UBFC
UNIVERSITÉ
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ

ELLIADD
Édition · Littératures
Langage · Informatique
Arts · Didactique · Discours

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
PRÉPARÉE AU LABORATOIRE ELLIADD - EA 4661

École doctorale n°592
Lettres, Communication, Langues, Arts

Doctorat en Sciences de l'Information et de la Communication

Par

Aymeric BOUCHEREAU

LES OBJETS CONNECTÉS AU SERVICE DE L'APPRENTISSAGE

Thèse présentée et soutenue à Montbéliard, le 23 novembre 2020

Composition du Jury :

M. CHAUDIRON, Stéphane	Professeur à l'Université de Lille	Rapporteur
M. GEORGE, Sébastien	Professeur à Le Mans Université	Examinateur
Mme PIPONNIER, Anne	Professeure à l'Université de Lorraine	Présidente du jury
M. ROXIN, Ioan	Professeur à l'Université de Franche-Comté	Directeur de thèse
M. SALEH, Imad	Professeur à l'Université Paris 8	Rapporteur

UBFC
UNIVERSITÉ
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ

ELLIADD
Édition · Littératures
Langage · Informatique
Arts · Didactique · Discours

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
PRÉPARÉE AU LABORATOIRE ELLIADD - EA 4661

École doctorale n°592
Lettres, Communication, Langues, Arts

Doctorat en Sciences de l'Information et de la Communication

Par

Aymeric BOUCHEREAU

LES OBJETS CONNECTÉS AU SERVICE DE L'APPRENTISSAGE

Thèse présentée et soutenue à Montbéliard, le 23 novembre 2020

Composition du Jury :

M. CHAUDIRON, Stéphane	Professeur à l'Université de Lille	Rapporteur
M. GEORGE, Sébastien	Professeur à Le Mans Université	Examinateur
Mme PIPONNIER, Anne	Professeure à l'Université de Lorraine	Présidente du jury
M. ROXIN, Ioan	Professeur à l'Université de Franche-Comté	Directeur de thèse
M. SALEH, Imad	Professeur à l'Université Paris 8	Rapporteur

ECOLE DOCTORALE
LECLA

Titre : Les objets connectés au service de l'apprentissage
Mots clés : apprentissage, internet des objets, médiation des savoirs, objets connectés, savoirs scientifiques
Résumé : L'apprentissage – principe vital de l'évolution – assure la transformation des données primaires captées par nos sens en connaissances utiles ou idées abstraites et générales, exploitables dans de nouvelles situations et contextes. Les neurosciences cognitives montrent que les mécanismes de l'apprentissage reposent sur l'engagement cognitif (e.g. se questionner, évaluer ses erreurs), physique (e.g. manipuler, bouger) et social (e.g. débattre, collaborer). L'apprenant construit ses connaissances par l'expérience, en explorant son environnement, en formulant des hypothèses et en expérimentant.
Apprendre est crucial dans un contexte où l'évolution exponentielle des technologies de l'information et de la communication change les objets, les pratiques et les usages. Le développement de l'Internet des Objets (IdO) transforme les objets physiques du quotidien (e.g. ampoule, montre, voiture) en objets connectés (OC) pouvant collecter des données et agir sur l'environnement de l'usager. L'apprentissage devient aussi bien biologique qu'artificiel et permet de créer des systèmes d'Intelligence artificielle (SIA) analysant de grands volumes de données pour automatiser des tâches et assister les individus.
Les technologies peuvent favoriser l'apprentissage, lorsque les possibilités techniques qu'elles offrent sont utilisées pour soutenir le processus de construction de connaissances. Ainsi, cette thèse porte sur l'apprentissage dans le contexte de l'IdO et examine la manière dont les spécificités des OC peuvent s'articuler avec les mécanismes de l'apprentissage. Afin d'identifier les caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'IdO, nous avons étudié les usages existants d'OC. En s'appuyant sur l'état de l'art, nous avons proposé un outil conceptuel décrivant l'IdO au travers de quatre dimensions d'analyse : Données, Interfaces, Agents et Pervasivité. Cet outil nous a permis d'identifier, de répertorier, de classer et, *in fine*, d'analyser les usages d'OC au service de l'apprentissage. Dans le cadre de ces usages, l'apprentissage est caractérisé par l'engagement physique, la contextualisation des savoirs et le rapprochement des activités pédagogiques avec la réalité.
En valorisant les résultats de ce premier travail, nous avons élaboré une approche pour mettre les spécificités des OC au service de l'apprentissage des sciences. L'aspect abstrait et souvent contre-intuitif des savoirs scientifiques freine leur apprentissage, en partie car notre perception de la réalité est subjective et limitée par nos sens. Or, les données collectées par les OC et analysées par des SIA apportent des informations sur l'environnement pouvant être utilisées pour étendre la perception humaine.
Ainsi, l'objectif de notre approche, traduite par le modèle Données - Représentations - Interactions (DRI), vise à exploiter les OC et les SIA pour faciliter l'observation de phénomènes physiques. Selon le modèle DRI, l'apprenant interagit avec des représentations d'un phénomène physique générées à partir d'OC et de SIA. En accord avec les mécanismes de l'apprentissage (e.g. constructivisme, rôle de l'expérience), l'apprenant est amené à faire des observations et des manipulations, à formuler des hypothèses et à les tester. Afin d'évaluer les effets et les contraintes du modèle DRI, nous avons conçu les dispositifs LumIoT dédiés à l'apprentissage des grandeurs photométriques (e.g. flux lumineux, intensité lumineuse, éclairement). Puis, nous avons conduit une expérimentation avec 17 étudiants du Master 1 Produits et Services Multimédia de l'Université de Franche-Comté (site de Montbéliard).
Les résultats de l'expérimentation montrent que les dispositifs LumIoT, basés sur le modèle DRI, ont facilité l'observation et la compréhension des grandeurs photométriques. En rendant accessibles des savoirs abstraits, le modèle DRI ouvre la voie à des dispositifs d'apprentissage mettant les OC et les SIA au service de la médiation des savoirs.

UBFC
UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
Université de Bourgogne
32, avenue de l'Observation
25200 Besançon

ECOLE DOCTORALE
LECLA

Title : Connected devices for learning

Keywords : learning, connected devices, internet of things, knowledge mediation, scientific knowledge

Abstract : Learning - a vital principle of evolution - ensures the transformation of primary data captured by our senses into useful knowledge or abstract and general ideas that can be used in new situations and contexts. Cognitive neuroscience shows that the mechanisms of learning are stimulated by cognitive (e.g. wondering, evaluating errors), physical (e.g. manipulating, moving) and social (e.g. debating, collaborating) engagement. The learner builds knowledge through experience, by exploring his environment, formulating hypotheses and experimenting.

Learning is crucial in a context where the exponential evolution of information and communication technologies is changing objects, practices and uses. The development of the Internet of Things (IoT) transforms common objects (e.g. light bulbs, watches, cars) into connected devices (CD) that can collect data and act on the user's environment. Learning becomes both biological and artificial and allows the creation of artificial intelligence systems (AIS) that analyse large volumes of data to automate tasks and assist individuals. Technologies can support learning when the technical possibilities they offer are used to support the process of knowledge construction. Thus, this thesis focuses on learning in the context of IoT and examines how the specificities of CD can be articulated with the mechanisms of learning.

In order to identify the characteristics of learning in the context of IoT, we studied existing uses of CD. Based on the state of the art, we proposed a conceptual tool describing the IoT through four dimensions of analysis : Data, Interfaces, Agents and Pervasiveness. This tool enabled us to identify, list, classify and ultimately analyse the uses of CD for learning. In the context of these uses, learning is characterised by physical commitment, contextualisation of knowledge and bringing pedagogical activities closer to reality.

Building on the results of this initial work, we have developed an approach to put the specificities of CD to learn sciences. The abstract and often counter-intuitive aspect of scientific knowledge hinders their learning, partly because our perception of reality is subjective and limited by our senses. However, data collected by CD and analysed by AIS provide information about the environment that can be used to extend human perception.

Therefore, the objective of our approach, translated by the Data - Representations - Interactions (DRI) model, aims at exploiting OCs and SIAs to facilitate the observation of physical phenomena. According to the DRI model, the learner interacts with representations of a physical phenomenon generated by CD and AIS. In accordance with the mechanisms of learning (e.g. constructivism, role of experience), the learner is led to make observations and manipulations, formulate hypotheses and test them. In order to evaluate the effects and constraints of the DRI model, we have designed LumIoT devices dedicated to the learning of photometric quantities (e.g. luminous flux, luminous intensity, illuminance). Then, we conducted an experiment with 17 students of the Master 1 Multimedia Products and Services of the University of Franche-Comté (Montbéliard).

The results of the experiment show that the LumIoT devices, based on the DRI model, have facilitated the observation and understanding of photometric quantities. By making abstract knowledge accessible, the DRI model paves the way for learning devices using CD and AIS to mediate knowledge.

UBFC
UNIVERSITÉ
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ

Université de Bourgogne
32, avenue de l'Observation
25200 Besançon

À ma grand-mère, « Mamie la mer »
qui s'en est allée

Souvent il suffit de l'amour-plaisir de la connaissance (curiosité), il suffit de l'amour-vanité, de l'habitude de la science, avec l'arrière-pensée des honneurs et de la sécurité matérielle, il suffit même pour beaucoup qu'ils ne sachent faire autre chose d'un surcroît de loisirs que lire, collectionner, classer, observer et continuer de relater : leur « impulsion scientifique », c'est leur ennui.
– Friedrich Nietzsche, *Le Gai Savoir*, 1939, p. 148

Remerciements

La thèse est un chemin parfois sinueux, de par les efforts que cela implique, mais procurant en retour de grandes satisfactions intellectuelles et humaines. Ces satisfactions ont été rendues possibles par plusieurs personnes que je souhaite remercier ici.

Tout d'abord, mes remerciements vont à mon directeur de thèse, Ioan Roxin, qui m'a fait découvrir le monde passionnant de la recherche scientifique. Infatigable dans son accompagnement, je le remercie pour sa confiance, ses multiples conseils et pour son aide afin de mener à bien ma recherche, toujours avec pédagogie et le souci du détail. Nos discussions tout au long de ces années m'ont aidé à construire mon identité de chercheur.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluer ; cela n'avait rien d'évident étant donné les conditions particulières créées par la pandémie de Covid-19. Je suis reconnaissant à Messieurs Stéphane Chaudiron et Imad Saleh pour leur rôle de rapporteurs, à M. Sébastien George pour avoir accepté d'évaluer mon travail ainsi qu'à Mme Anne Piponnier d'avoir assuré la présidence du jury. Leurs questions, remarques et suggestions formulées dans les rapports et lors de la soutenance me sont précieuses pour parfaire ma recherche et poursuivre mon chemin.

Cette recherche doctorale s'est déroulée dans des conditions idéales, notamment grâce au financement de mon contrat doctoral par le Pays de Montbéliard Agglomération que je remercie.

Durant ces années de thèse, j'ai reçu le soutien de plusieurs collègues. Je tiens à remercier spécialement Federico Tajariol pour son implication dans la finalisation de la thèse et plus généralement pour ses critiques constructives et ses remarques avisées lors de nos échanges. Je remercie également Antonin Segault aux côtés de qui j'ai découvert les joies (et le reste) de la vie quotidienne du doctorant et qui m'a apporté son aide pour la relecture du manuscrit. J'ai apprécié nos discussions bienveillantes et stimulantes ; je ne doute pas que nous parviendrons un jour à publier nos idées sur les fameuses « technologies disruptives ». Ma reconnaissance va aussi à Marie-Noëlle Doutreix pour son aide dans les derniers moments de la thèse à travers ses relectures et ses encouragements.

Merci aux collègues du pôle CCM et du laboratoire ELLIADD que j'ai côtoyés pour les échanges que nous avons eus et les retours lors des réunions. J'ai une pensée d'encouragement pour mes compagnons doctorants à qui il reste une partie du chemin à parcourir : Baba Mbaye, He Li et Ibrahim Maidakouale. Je n'oublie pas également l'équipe pédagogique du département Multimédia que j'ai eu l'honneur de connaître à la fois en tant qu'étudiant et collègue.

Enfin, je remercie ma famille, mes tantes, oncles, cousins et cousines qui, certainement sans en avoir conscience, m'ont permis d'avancer sur le chemin de la thèse. Je pense plus spécialement...

À mes parents, pour leur soutien et pour m'avoir donné le goût de l'apprentissage et de la réflexion.

À mes frères — Wilhelm, Erwan et Aylwin, membres de la « Tribu des Bouchereau » — pour avoir rendu ma vie de doctorant plus douce (et plus amusante).

P.-S. Merci à Atwood, Asimov, Baret, Cixin, Egan, Herbert et aux autres auteurs de science-fiction pour les moments d'évasion procurés et leurs fresques géniales, parfois terribles, sur les sociétés humaines.

Table des matières

Introduction **1**

Cadre scientifique . . . 2

Problématique et questions de recherche . . . 4

Méthodologie . . . 5

Contexte de la recherche . . . 6

Plan du manuscrit . . . 7

1 Mécanismes et processus de l'apprentissage **11**

1.1 Mécanismes de l'apprentissage . . . 12

1.1.1 Plasticité cérébrale . . . 13

1.1.2 Piliers de l'apprentissage . . . 16

1.1.3 Mémoire et apprentissage . . . 23

1.1.4 Rôles des émotions dans l'apprentissage . . . 26

1.2 Évolution des théories de l'apprentissage . . . 29

1.2.1 Du béhaviorisme au constructivisme . . . 30

1.2.2 Apprendre, c'est interagir avec les autres - Socioconstructivisme . . . 33

1.2.3 Rôle de l'expérience dans l'apprentissage . . . 35

1.3 Stratégies d'apprentissage actif . . . 38

1.3.1 Contextualiser l'apprentissage . . . 39

1.3.2 Apprendre à apprendre . . . 43

2 Connaître, savoir **47**

2.1 Percevoir et comprendre l'environnement . . . 48

2.1.1 Traitements impliqués dans la perception de l'environnement . . . 48

2.1.2 Données, informations, connaissances et savoirs . . . 54

2.2 Usages des technologies pour l'apprentissage humain . . . 59

2.2.1 Transmettre pour apprendre . . . 60
2.2.2 Environnement et ressources d'apprentissage . . . 65
2.2.3 Modes d'apprentissage . . . 69
2.3 Apprentissage artificiel . . . 75
2.3.1 Créer des SIA : des systèmes experts à l'apprentissage artificiel . . . 76
2.3.2 Usages de l'apprentissage artificiel pour l'apprentissage humain . . . 82
2.3.3 Enjeux de l'apprentissage artificiel . . . 86

3 Internet des Objets : de l'ordinateur à l'objet connecté 91
3.1 Développement de l'Internet des Objets . . . 92
3.1.1 Évolutions de l'informatique connectée . . . 92
3.1.2 Courants de pensée précurseurs : informatique ubiquitaire et systèmes pervasifs . . . 97
3.1.3 Internet des Objets et objet connecté . . . 103
3.2 Mise en place de l'écosystème de l'Internet des Objets . . . 109
3.2.1 Organisation fonctionnelle . . . 109
3.2.2 Technologies . . . 113
3.3 Perspectives et enjeux de l'Internet des Objets . . . 119
3.3.1 Applications de l'Internet des Objets . . . 119
3.3.2 Défis et problématiques de l'Internet des Objets . . . 124

4 Caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'Internet des Objets 133
4.1 Étudier l'Internet des Objets avec le modèle DIAP . . . 134
4.1.1 Modèles existants de l'Internet des Objets . . . 134
4.1.2 Le modèle DIAP et ses dimensions . . . 137
4.1.3 Utilisation du modèle DIAP . . . 145
4.2 Analyse de l'apprentissage avec le modèle DIAP . . . 147
4.2.1 Apprendre avec les données . . . 149
4.2.2 Apprendre avec les interfaces . . . 153
4.2.3 Apprendre avec les agents . . . 157
4.2.4 Apprendre avec la pervasivité . . . 160
4.3 Discussions. L'objet connecté : intermédiaire entre l'apprenant et l'environnement . . . 163

5 Objets connectés : catalyseurs dans la médiation des savoirs scientifiques 169

5.1 Rendre intelligibles des phénomènes intangibles 170

5.1.1 Sens et science : le rôle de la perception pour l'apprentissage des sciences 171

5.1.2 Augmenter les sens pour apprendre la science 174

5.1.3 Cadre de l'approche pour la médiation des savoirs scientifiques 177

5.2 Dispositifs LumIoT 183

5.2.1 Lumière et grandeurs photométriques 183

5.2.2 Conception et ressources 188

5.3 Évaluation des dispositifs LumIoT 196

5.3.1 Méthode 198

5.3.2 Résultats 202

5.3.3 Discussions 209

Conclusions et perspectives de recherche 217

Modèle DIAP : synthèse des spécificités des objets connectés 219

Usages des objets connectés pour l'apprentissage 219

Approche pour la médiation des savoirs scientifiques 221

Dispositifs LumIoT 222

Perspectives 224

Liste des publications au cours de la thèse 227

Bibliographie 229

Liste des figures 263

Liste des tableaux 265

Liste des équations 265

Liste des abréviations 267

Annexes 271

A Carte conceptuelle du manuscrit 271

A.1 Chapitre 1. Mécanismes et processus de l'apprentissage 271

A.2 Chapitre 2. Connaître, savoir 272

A.3 Chapitre 3. Internet des Objets : de l'ordinateur à l'objet connecté 273
A.4 Chapitre 4. Caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'Internet des Objets 274
A.5 Chapitre 5. Objets connectés : catalyseurs dans la médiation des savoirs scientifiques 275

B Fiches de manipulation des dispositifs LumIoT **277**
B.1 Dispositif Pram : propriétés d'une ampoule 277
B.2 Dispositif Ecla : éclairement 279
B.3 Dispositif Lumi : luminance et prise de vue 280
B.4 Dispositif Teco : température de couleur 281

C Évaluation des dispositifs LumIoT **283**
C.1 Questionnaire pré test 283
C.2 Questionnaire post test 286
C.3 Réponses des étudiants aux questions ouvertes 290

D Extraits des applications développées **297**
D.1 Application *Lumière&Couleurs* 297
D.1.1 RVBViewController.swift 297
D.1.2 TemperatureViewController.swift 300
D.2 Application *ConnaitreMonAmpoule* 303
D.2.1 index.html 303
D.2.2 analyseImage.php 309

Introduction

> Je crois personnellement qu'il y a au moins un problème philosophique qui intéresse tous les hommes qui pensent [...] le problème de comprendre le monde, nous-même et notre connaissance en tant qu'elle fait partie du monde.
>
> – Karl Popper, *La logique de la découverte scientifique*, 1973

L'apprentissage est un principe vital de l'évolution partagé par tous les êtres vivants pour s'adapter aux conditions fluctuantes de l'environnement qui, chez l'être humain, s'est mué en désir de savoir. À travers les âges, l'être humain est parti à la découverte des mystères du monde : il a créé les sciences pour organiser ses recherches et a élaboré des méthodes pour diffuser ses savoirs. Cependant, l'accélération des découvertes scientifiques et des évolutions technologiques complexifie nos sociétés et entraîne des changements constants. Témoins de cette dynamique, les inquiétudes contemporaines questionnent l'apprentissage : comment préparer les individus à la société qui vient ? Que faut-il apprendre ? Comment transmettre ? La diffusion des savoirs au sein d'une société, entre les individus, d'une génération et à une autre et entre des cultures différentes peut prendre des formes variées. Elle s'exerce de manière formelle (e.g. école, formation continue) et informelle (e.g. cercle familial, groupe d'amis) en empruntant de multiples canaux (e.g. communication orale, écris, médias) (Jeanneret, 2005).

Depuis le début des années 2010, l'évolution des technologies de l'information et de la communication (TIC) tend au développement de l'Internet des Objets (IdO). Sous la forme d'ampoules, d'enceintes, de montres, de compteurs électriques et de véhicules, les objets connectés se multiplient dans l'environnement modifiant ainsi les usages et les pratiques. Les changements induits par les objets connectés, et les TIC en général, redessinent la carte des connaissances nécessaires aux individus dans leur vie personnelle et professionnelle. Aux connaissances scientifiques et humanistes s'ajoutent la littératie numérique ainsi que des compétences pour la collaboration, la critique et la résolution de problèmes. En outre, l'attention portée à la carte des connaissances nécessaires aux individus s'est aussi intensifiée avec les avancées en matière d'intelligence artificielle (IA). Les systèmes d'IA parviennent à réaliser un nombre croissant de tâches jusqu'ici inaccessibles à des machines : reconnaître des objets, dialoguer, synthétiser et traduire des corpus de textes, conduire des véhicules, jouer contre des humains, etc. Ces réussites et la multiplication des objets connectés agissent comme une force d'accélération sur nos sociétés renforçant le rôle vital de l'apprentissage pour s'adapter aux changements.

Dans un contexte où apprendre est l'horizon permanent des individus, les moyens disponibles pour favoriser l'apprentissage sont indispensables. Pour cela, les TIC apportent une diversité de formes pour transmettre les informations dont il est nécessaire d'étudier les usages au service de l'apprentissage.

Par ailleurs, l'étude des outils pour apprendre est d'autant plus cruciale que l'augmentation des savoirs ne s'est pas accompagnée d'une meilleure transmission. Les savoirs accumulés, aussi bien en ce qui concerne la communication, la littérature, l'histoire, la biologie ou la physique, se perdent dans un océan d'informations. Paradoxalement, comme le formule Heidegger, « *Aucune époque n'a accumulé sur l'homme des connaissances aussi nombreuses et aussi diverses que la notre [...] Mais aussi, aucune époque n'a moins su ce qu'est l'Homme* » (Heidegger, 1953, p. 266). Dans un monde où les informations — vraies comme fausses — abondent au bout des doigts, il devient difficile d'opérer une synthèse pour comprendre la société dans laquelle nous vivons.

De plus, les savoirs sont aussi difficilement accessibles en raison de leur fragmentation et de leur enfermement dans des disciplines spécialisées. Edgar Morin soutient que l'accélération des sciences a produit « *une coupure épistémologique entre philosophie et science, mais aussi une rupture ontologique entre culture scientifique et culture humaniste* » (Morin, 2008, p. 1634). En ce sens, Michel Serres ajoute que ces deux cultures forment deux populations distinctes, « *littéraires, juristes, humanistes d'une part et scientifiques de l'autre* » (Serres, 2018, p. 9), qui ne savent rien l'une de l'autre. À ces deux populations correspondent « *deux types d'aveuglement* » (*Ibid.*). Les débats survenus en France durant la pandémie de Covid-19 sur les mesures politiques à prendre et l'efficacité des potentiels traitements illustrent les aveuglements des cultures humanistes et scientifiques. Nulle décision politique ne pouvait être prise sans considérer les travaux scientifiques tandis que les expertises scientifiques ne pouvaient faire fi des effets sociaux, économiques et politiques.

En définitive, selon Edgar Morin, « *ce qui est vital aujourd'hui, ce n'est pas seulement d'apprendre, pas seulement de réapprendre, pas seulement de désapprendre, mais de réorganiser notre système mental pour réapprendre à apprendre* » (Morin, 2008, p. 44). L'enjeu est d'apprendre à créer des liens entre les informations et de relier les savoirs des cultures scientifiques et humanistes à nos expériences vécues.

Afin de répondre à cet enjeu, la recherche que nous présentons dans ce mémoire étudie les usages, effectifs et potentiels, des objets connectés au service de l'apprentissage. La thèse que nous soutenons, sur laquelle nous reviendrons par la suite, est que les objets connectés constituent de nouveaux moyens pour la médiation des savoirs.

Cadre scientifique

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons à la diffusion des savoirs par le biais des TIC. En effet, de l'imprimerie aux systèmes d'IA en passant par les ordinateurs et les appareils mobiles, les TIC ont été vecteurs de nouvelles modalités d'apprentissage au fil des années : enseignement par correspondance, télévision éducative, environnements informatiques pour l'apprentissage humain (EIAH), *e-learning*, apprentissage mobile, etc.

L'utilisation des TIC pour l'apprentissage est un objet de recherche complexe, au carrefour de plusieurs disciplines allant des sciences de l'éducation et des sciences de l'information et de la communication (SIC) à la psychologie en passant par l'informatique et la sociologie. Notre recherche s'inscrit en SIC, lesquelles se distinguent par une approche interdisciplinaire mobilisant les disciplines sus-citées pour traiter les dimensions sociales, techniques et sémiotiques des technologies éducatives (Walter et al., 2018). Dans ce cadre, l'apprentissage est un acte de communication impliquant la transmission d'informations, *via* des moyens humains et/ou technologiques, et leur réception par l'apprenant. Ces informations forment les connaissances communiquées à l'apprenant qui, lorsqu'il les reçoit et leur confère un sens, vont changer ses représentations du monde (Couzinet, 2006). Étant entendu que l'apprenant construit ses connaissances en créant et en modifiant des représentations mentales du monde qui lui sont propres. De ce fait, les connaissances de l'apprenant peuvent diverger des savoirs issus des cultures humanistes et scientifiques, qui sont des connaissances reconnues par la société. Ainsi, les connaissances que construit l'apprenant proviennent des traitements qu'il effectue pour recevoir et interpréter les informations transmises en lien avec des savoirs (Jeanneret, 2000). La manière dont sont reçues les informations transmises influence la capacité de l'apprenant à construire ses connaissances et donc favorise ou non l'apprentissage. Les TIC sont utilisées pour l'apprentissage afin de transmettre les informations, mais également pour créer des conditions favorables à leur réception et à la construction des connaissances.

Les objets connectés font partie des évolutions technologiques soulevant de nouveaux enjeux et dont les effets sur les activités humaines telles que l'apprentissage restent à interroger. Il s'agit d'objets physiques dotés de capteurs, d'actionneurs, de capacités de calcul et de communication sans fil les reliant à un réseau local ou à internet (Roxin & Bouchereau, 2017a). Les fonctionnalités des objets connectés reposent sur la collecte et l'analyse de données sur l'environnement ainsi que sur le contrôle à distance déclenchant des actions sur l'environnement. Par exemple, un utilisateur peut contrôler à distance l'éclairage d'une ampoule connectée (e.g. luminosité, couleur) tandis qu'une ceinture connectée collecte et analyse l'activité physique de l'utilisateur pour l'informer sur sa santé (e.g. nombre de calories dépensées) [1]. La levée de verrous technologiques et économiques (e.g. miniaturisation des composants, faibles coûts de production) au début des années 2010 a permis la production d'objets connectés à grande échelle [2]. De ce fait, il existe une multitude d'objets connectés dans les domaines de la santé, du bien-être, du prêt-à-porter, de la domotique, de la logistique et des transports, des industries manufacturières (e.g. automobile, aéronautique), de l'agriculture et de l'urbanisme. Toutefois, dans le domaine de l'éducation, les objets connectés sont rares et les usages demeurent timides et embryonnaires. Majoritairement, les objets connectés ainsi que les services qu'ils supportent ne sont pas conçus par les entreprises pour être utilisés dans le cadre d'activités d'apprentissage.

1. Sources : https://www.philips-hue.com/fr-fr/bulbs, https://www.objetconnecte.net/inie-ceinture-intelligente-prend-soin-de-sante/. Consulté le 10 septembre 2020.
2. En août 2020, l'institut Statista avançait les chiffres de 38,6 milliards en 2025 et de 50 milliards en 2030. Source : https://www.statista.com/statistics/802690/worldwide-connected-devices-by-access-technology/.

Problématique et questions de recherche

Malgré tout, s'il n'existe pas une catégorie d'objets connectés dédiés à l'apprentissage, cela ne signifie pas pour autant que les usages éducatifs sont inexistants. Depuis plusieurs années, les recherches menées en SIC sur l'utilisation des TIC montrent que les usages pensés en amont par les concepteurs ne déterminent pas complètement les usages effectifs en aval (e.g. Perriault, 1989 ; Peraya & Bonfils, 2015 ; Paquienséguy, 2018). Dès lors, les objets connectés peuvent-ils servir l'apprentissage ?

Les outils pour apprendre concentrent des problématiques à la fois éducatives et communicationnelles. Au niveau éducatif, il s'agit d'étudier les mécanismes cognitifs et psychologiques impliqués dans le processus d'apprentissage ainsi que les dynamiques sociales qui l'influence. Puis, il faut en dégager des modalités de transmission des informations adéquates pour favoriser la construction des connaissances. Pour cela, les travaux menés en psychologie cognitive et en neurosciences nous montrent que le processus de construction des connaissances est stimulé par l'engagement cognitif, social et physique de l'apprenant (Piaget, 1969 ; Dehaene, 2018). Au lieu du modèle transmissif, ces travaux abondent en faveur de méthodes d'apprentissage actif qui tirent leurs principes des théories constructiviste et socio-constructiviste. Dans ce cadre, l'apprenant construit ses connaissances par le questionnement et la collaboration, en manipulant des objets (concrets et abstraits) et en expérimentant.

Les problématiques communicationnelles, quant à elles, émergent de la médiation, c'est-à-dire de la manière dont l'apprenant est mis en relation avec les savoirs. La médiation désigne par là le rôle du tiers, humain ou technologique, chargé d'organiser la situation de communication afin de faciliter la construction du sens associé aux informations (Liquète, 2019). Ce faisant, la médiation opérée par les TIC ne se réduit pas à une fonction technique de transmission des informations, mais comporte aussi une dimension sociale et sémio-cognitive (Jeanneret, 2009). Le dispositif est le lieu où se déroule la médiation des savoirs, il s'agit d'un ensemble d'éléments « *matériels, technologiques, symboliques et relationnels* » (Peraya, 1999, p. 153) organisés afin de créer des conditions d'utilisation stimulantes pour l'apprentissage. Ces conditions dépendent des spécificités techniques que le dispositif articule en fonction d'une stratégie d'apprentissage, des modalités de présentation des savoirs et d'interactions entre les usagers (e.g. apprenants, enseignants). Ainsi, les dispositifs d'apprentissage devraient viser à soutenir des usages éducatifs s'éloignant d'une logique transmissive pour se rapprocher d'un apprentissage actif.

Ces éléments permettent de reformuler notre interrogation initiale : *dans quelles conditions d'utilisation les possibilités médiatiques apportées par les objets connectés peuvent-elles contribuer à la médiation des savoirs ?* L'hypothèse que nous posons est que les objets connectés ouvrent un espace d'utilisation des TIC permettant de soutenir un apprentissage actif. En effet, les fonctions des objets connectés étant portées sur l'environnement physique, nous pensons qu'elles peuvent servir pour créer des activités tournées vers la pratique et la manipulation physique. Pour étayer cette hypothèse de travail, nous examinerons les spécificités techniques des objets connectés et leur usage au regard du processus d'apprentissage. Toutefois, nous n'entendons pas proposer une méthode prête à l'emploi pour « apprendre avec les objets connectés ». La recherche sur l'utilisation d'objets connectés pour la médiation des savoirs est encore naissante et les travaux existants explorent avant tout ce qui est faisable

techniquement. Plutôt, notre travail consistera à observer, collecter, rassembler, mettre en relation, analyser et synthétiser les travaux scientifiques et les usages existants. L'objectif est de dégager les caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'IdO et de proposer un socle de réflexion pouvant servir au développement de futures recherches. En ce sens, nous monterons à travers la conception d'un dispositif d'apprentissage et son évaluation avec des apprenants que les objets connectés peuvent être utilisés pour enrichir la médiation des savoirs scientifiques. Conséquemment, notre travail s'est structuré autour des questions de recherche suivantes :

— Quelles sont les spécificités des objets connectés pour l'apprentissage ?

— Quels sont les usages existants des objets connectés pour l'apprentissage ? Quels en sont les points communs et les ancrages théoriques ?

— Comment les spécificités des objets connectés peuvent-elles s'articuler au sein d'un dispositif d'apprentissage pour servir la médiation des savoirs scientifiques ?

— Quels sont les apports, les limites et les enjeux de l'utilisation de dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés pour la médiation des savoirs scientifiques ?

Méthodologie

Tout travail de recherche est le reflet d'une posture épistémologique, un point de vue particulier déterminant les théories déployées et les méthodes employées (Popper, 1973 ; Mucchielli, 2006). Chemin faisant, ces méthodes permettent de préciser la problématique et de construire un objet de recherche à partir d'une réalité technique et sociale (Davallon, 2004b).

L'étude des usages des objets connectés pour la médiation des savoirs a trait à la complexité décrite par Morin (2008). En effet, il est nécessaire de faire dialoguer des savoirs de disciplines différentes pour approcher notre objet de recherche et comprendre les interactions entre les éléments qui le composent. Il s'agira de saisir les relations entre : les processus info-communicationnels impliqués lors de la médiation ; les mécanismes cognitifs, psychologiques et sociaux qui agissent sur l'apprenant ; les théories et les méthodes d'apprentissage ; les aspects fonctionnels et ergonomiques des objets connectés. Cette approche interdisciplinaire caractérise le travail de recherche que nous présentons dans ce mémoire.

Les études que nous avons menées durant cette thèse s'inscrivent dans le cadre théorique de la médiation des savoirs tel qu'il est développé au sein des SIC (Walter et al., 2018). En cela, nos études portent sur les activités médiatisées par des dispositifs info-communicationnels impliquant des objets connectés. Au niveau méthodologique, la médiation des savoirs implique l'observation combinée de terrains actuels et potentiels.

Dans le premier cas, l'observation de terrains actuels consiste à analyser et comprendre les pratiques existantes, les usages au sein de dispositifs et les effets qu'ils induisent (Peraya & Papi, 2018). Quels types d'usages peut-on identifier ? De quels effets s'accompagnent-ils ? Nous nous intéressons aux usages existants d'objets connectés pour l'apprentissage, aux raisons qui les motivent ainsi qu'aux transformations qu'ils opèrent sur l'apprenant. Ces transformations peuvent porter sur les connaissances acquises, mais également sur l'évolution du rapport que l'apprenant entretient avec les savoirs lorsqu'il interagit avec des objets connectés.

Dans le second cas, l'observation de terrains potentiels consiste à interroger la dimension instrumentale de la médiation, en mettant en regard l'offre technologique, les usages possibles et le processus d'apprentissage (Jacquinot-Delaunay, 2007). L'étude des potentiels usages éducatifs vise à comprendre les apports et les limites des technologies pour l'apprentissage en passant par la conception et l'évaluation de dispositifs (Perriault, 1985 ; Walter et al., 2018). Cela suppose de penser la scénarisation et la présentation des savoirs en prenant en compte les théories de l'apprentissage et les possibilités médiatiques offertes par les TIC. Ainsi, dans le but saisir le rôle que peuvent jouer les objets connectés pour la médiation des savoirs, nous explorons comment les utiliser en adoptant une démarche de conception. L'objectif est d'examiner d'une part le processus de mise en dispositif médiatique des informations avec des objets connectés et, d'autre part, d'accéder à un nouveau terrain d'observation et d'interprétation (Peraya, 2010). Pour cela, nous nous appuierons sur les enseignements tirés de l'observation des usages existants afin d'élaborer une approche de l'utilisation d'objets connectés pour l'apprentissage. Puis, cette approche, incarnée par un dispositif d'apprentissage, sera évaluée lors d'une expérimentation avec des apprenants.

Contexte de la recherche

La recherche doctorale que je présente dans ce mémoire a été conduite au sein du laboratoire ELLIADD (Édition, Littératures, Langages, Informatique, Arts, Didactique, Discours) et de son pôle Conception Création Médiations (CCM). Le pôle CCM réunit autour de la problématique de la médiation une équipe de chercheur.e.s pluridisciplinaires issues des sciences humaines et sociales, dont les SIC, les sciences de l'éducation et les sciences du langage. Les recherches menées dans le cadre du pôle CCM s'articulent autour de plusieurs programmes scientifiques, parmi lesquels figurent : *Sémantisation des contenus et l'organisation des connaissances* et *Innover par les usages : conception/design et analyse*. Ma recherche s'inscrit dans ces deux programmes : dans le premier pour ce qui relève de l'organisation des connaissances ; dans le second pour l'analyse des usages et la conception de dispositifs médiatiques.

Plus concrètement, la recherche sur les dispositifs d'apprentissage a plusieurs précédents au sein du site montbéliardais du pôle CCM où j'ai effectué ma thèse. En effet, soutenue en 2011, la thèse de Radu Balog-Crisan portait sur la modélisation d'objets pédagogiques pour une plateforme sémantique d'apprentissage. Également, en 2014, Ioan Szilagyi a soutenu sa thèse sur l'utilisation des technologies sémantiques pour la conception d'un système actif d'apprentissage. De 2013 à 2016, les chercheur.e.s de l'équipe Objets et Usages numériques (le noyau du prochain pôle CCM) se sont impliqués dans le pilotage du projet SCOLA (Système de Communication Ouvert et Ludique pour les Apprentissages), lauréat de l'Appel Investissement d'Avenir 2012. Le projet visait la conception d'une plateforme de *e-learning* avec un jeu sérieux (*serious game*).

Dans la continuité de ces recherches, j'ai rejoint le pôle CCM et le laboratoire ELLIADD en février 2016, d'abord dans le cadre d'un stage pour achever mon master Produits et Services Multimédia, finalité recherche. Mon sujet de thèse pressenti étant l'utilisation des objets connectés pour l'apprentissage, mon stage a été consacré à l'état de l'art sur les usages

des objets connectés en général et en particulier pour l'apprentissage.

Après le stage, j'ai commencé ma recherche doctorale portant sur les usages des objets connectés au service de l'apprentissage. Pour effectuer cette thèse, j'ai bénéficié d'un contrat doctoral, d'octobre 2016 à octobre 2019, financé par la communauté d'agglomération Pays de Montbéliard Agglomération. Durant ces trois années, le contrat doctoral s'est accompagné d'un avenant d'enseignement au département Multimédia de l'UFR STGI (Sciences, Techniques et Gestion de l'Industrie) à l'Université de Franche-Comté. Lors de la clôture de mon contrat doctoral, j'ai obtenu un poste d'ATER (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche) au sein du même département Multimédia afin de terminer la rédaction de mon mémoire. En septembre 2020, j'ai pu renouveler mon contrat d'ATER.

Durant ces années de thèse, j'ai mené mes recherches principalement de manière individuelle, à l'exception des discussions avec mon directeur de thèse et des moments d'échange lors des manifestations scientifiques. Ce fait explique en partie le choix de publier et de communiquer fréquemment sur mes recherches, afin de disposer des retours de la communauté de chercheur.e.s. Néanmoins, de septembre à octobre 2018, j'ai pu collaborer avec Liviu Cotfas alors chercheur postdoctoral au laboratoire ELLIADD et maître de conférences à la faculté de Cybernétique, statistique et informatique de l'Académie des Études Économiques (Bucarest, Roumanie). Liviu Cotfas a participé au développement de prototypes du dispositif d'apprentissage présenté dans le dernier chapitre de ce manuscrit.

La rédaction de ce manuscrit s'est d'abord faite en pointillée dans la deuxième moitié de l'année 2019, puis de manière soutenue durant la période de confinement déclarée suite à la pandémie de Covid-19.

Plan du manuscrit

Le manuscrit présente au travers de cinq chapitres le travail effectué au cours de la recherche doctorale. Le lecteur trouvera en annexe A une carte conceptuelle synthétisant la structure des chapitres, leurs thématiques et les notions qu'ils abordent.

Le premier chapitre dresse un état de l'art sur les mécanismes d'apprentissage du cerveau, les théories de l'apprentissage et les stratégies pour favoriser la construction des connaissances. Dans un premier temps, nous décrivons les mécanismes cognitifs impliqués dans les phénomènes d'apprentissage à partir des résultats obtenus par les neurosciences. La plasticité cérébrale ainsi que les rôles de l'attention, de l'engagement, des mémoires, des émotions et du corps dans l'apprentissage sont présentés. Dans un second temps, nous rappelons l'évolution des théories de l'apprentissage issues de la psychologie cognitive. Il est question des conceptions de l'apprentissage selon le béhaviorisme, le cognitivisme, le constructivisme et le socioconstructivisme. La troisième partie présente les stratégies d'apprentissage actif et souligne en particulier le rôle de l'expérience pour favoriser l'apprentissage.

Le second chapitre se concentre sur les traitements de l'information pour favoriser l'apprentissage, du point de vue de leur réception par l'apprenant et de leur transmission *via* l'usage des TIC. La première partie détaille la manière dont les informations sont reçues et traitées par l'apprenant. Nous mettons en relation les processus de perception de l'environnement et d'apprentissage avec la distinction fondamentale entre les données, les informations,

les connaissances et les savoirs. Puis, nous rappelons les définitions des notions de médiation, de dispositif et d'usage avant de revenir sur l'évolution des usages des technologies pour l'apprentissage. La troisième partie met l'accent sur les apports de l'apprentissage artificiel [3] pour l'apprentissage humain. Après quelques rappels historiques sur le développement de l'IA, il s'agira d'explorer la manière dont l'apprentissage artificiel est mis au service de l'apprentissage humain et les enjeux que cela soulève.

Le troisième chapitre traite le développement de l'IdO et des objets connectés en présentant le contexte historique et l'écosystème de technologies. Les premières sections portent sur l'évolution de l'informatique connectée, l'apparition de l'informatique ubiquitaire et leur contribution au développement des objets connectés. Ensuite, nous décrivons l'organisation fonctionnelle de l'écosystème de l'IdO et nous dressons un panorama des technologies nécessaires au fonctionnement des objets connectés. Les dernières sections abordent les services et applications de l'IdO en les mettant en perspectives avec les enjeux techniques, sociaux, politiques, économiques et environnementaux qu'ils posent.

Le quatrième chapitre détaille une première série de résultats de notre recherche sur les usages existants des objets connectés pour l'apprentissage. La première partie expose le modèle que nous avons élaboré pour synthétiser les spécificités des objets connectés. Nous examinons des modèles similaires avant d'expliciter les quatre dimensions qui composent notre modèle : Données, Interfaces, Agents, Pervasivité (DIAP). En mobilisant le modèle DIAP, la seconde partie rapporte une classification des dispositifs d'apprentissage existants basés sur des objets connectés. Nous détaillons le contenu de chaque catégorie de dispositif d'apprentissage et nous analysons leurs points communs et leurs ancrages théoriques. Dans les dernières sections, nous faisons une synthèse des dispositifs d'apprentissage existants pour en dégager les caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'IdO.

Le cinquième chapitre rapporte une nouvelle série de résultats portant sur l'élaboration de notre approche articulant les objets connectés avec les mécanismes de l'apprentissage pour la médiation des savoirs scientifiques. Notre approche vise à rendre intelligibles des savoirs scientifiques abstraits et intangibles en s'appuyant sur les spécificités des objets connectés. Nous faisons l'hypothèse que les données collectées par les capteurs des objets connectés puis analysées par des systèmes d'IA facilitent l'observation de l'environnement. Dans la première partie, nous explicitons le cadre de notre approche ainsi que les postulats sur lesquels elle repose pour démontrer son intérêt pour l'apprentissage des sciences. Nous présentons le modèle Données Représentations Interactions (DRI) élaboré pour rendre opérable notre approche et structurer la conception de dispositifs d'apprentissage. La seconde partie du chapitre décrit l'ensemble de dispositifs LumIoT que nous avons conçu pour l'apprentissage de concepts liés aux grandeurs photométriques (flux lumineux, intensité, éclairement, luminance) et à la température de couleur. Nous décrivons la conception des sous-dispositifs Pram, Ecla, Lumi et Teco qui composent LumIoT et les concepts sur lesquels ils portent. La dernière partie du chapitre cinq rapporte la mise en place et les résultats d'une expérimentation menée avec les dispositifs LumIoT auprès d'étudiants du master Produits et Services Multimédia. Après une présentation du protocole et des instruments de mesure, nous rapportons les résultats de

3. Dans ce manuscrit, nous employons l'expression « apprentissage artificiel » en référence aux méthodes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond.

l'expérimentation et les analysons en les mettant en perspective avec la littérature scientifique.

Nous concluons ce manuscrit en dressant un bilan des recherches effectuées et en présentant les perspectives qu'elles ouvrent. Nous rappelons les résultats et les limites de nos études sur les usages existants et potentiels des objets connectés pour l'apprentissage ainsi que sur la médiation des savoirs scientifiques. Ces résultats sont remis en lien avec la problématique initiale de notre recherche. À partir de ce bilan, nous proposons plusieurs directions de recherche visant à approfondir nos observations et à investiguer l'utilisation d'objets connectés dans de nouvelles configurations d'apprentissage.

Chapitre 1

Mécanismes et processus de l'apprentissage

> And still they gazed, and still the wonder grew,
> That one small head should carry all it knew [1].
>
> – Oliver Goldsmith, *The Deserted Village*, 1770

L'apprentissage est le moteur commun à tous les organismes vivants pour s'adapter rapidement aux conditions de leur environnement. L'être humain se distingue nettement pour avoir fait de l'apprentissage son talent particulier, le poussant à travers les âges à façonner son territoire et à découvrir les mystères du monde, des grottes primitives aux étoiles.

Selon le dictionnaire Larousse, apprendre signifie « *Acquérir par l'étude, par la pratique, par l'expérience une connaissance, un savoir-faire, quelque chose d'utile* » [2]. Toutefois selon Krishnamurti (2010), apprendre ne se résume pas à l'accumulation de connaissances, mais est l'essence de la vie : un état d'esprit permanent d'observation et d'exploration du monde [3]. Morin ajoute que l'apprentissage n'est pas seulement la reconnaissance ou la découverte de nouvelles choses, mais la combinaison des deux : le connu et l'inconnu (Morin, 2008).

Comment les individus acquièrent-ils leurs connaissances ? L'apprentissage est un objet de recherche au carrefour de nombreuses disciplines au premier rang desquelles figurent la psychologie cognitive et les neurosciences. Les résultats obtenus par ces deux disciplines permettent de comprendre les mécanismes cognitifs impliqués dans les phénomènes d'apprentissage et le processus d'acquisition des connaissances. Nous nous intéressons à ces résultats pour, en amont, cerner les facteurs favorisant l'apprentissage et, en aval, étudier la manière dont les objets connectés peuvent stimuler ces facteurs.

Dans ce chapitre, nous expliquons en premier lieu les résultats obtenus par les neurosciences sur les mécanismes d'apprentissage du cerveau. Nous décrivons le fonctionnement

1. Traduction personnelle : « Et toujours ils regardaient, et toujours l'émerveillement grandissait / Cette seule petite tête devait porter tout ce qu'elle savait ».

2. Source : https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/apprendre/4746?q=apprendre#4720. Consulté le 22 novembre 2019.

3. Il est des circonstances plus graves où l'apprentissage devient décisif pour le maintien des activités à l'échelle de la société. Avec le confinement décrété suite à l'épidémie de Covid-19 en mars 2020, les actes d'apprentissage se sont multipliés : pour enseigner à distance, pour fabriquer des équipements médicaux, pour conduire des recherches, pour s'informer, pour se nourrir, pour maintenir un lien social avec ses proches, etc.

de la plasticité cérébrale (1.1.1) avant d'exposer les piliers de l'apprentissage que forment l'attention, l'engagement actif, le retour sur erreur et la consolidation (1.1.2). Ensuite, nous explicitons le fonctionnement de la mémoire (1.1.3) et le rôle des émotions dans la cognition (1.1.4). En second lieu, nous revenons sur l'évolution des théories de l'apprentissage élaborées par la psychologie cognitive. Nous présentons le passage du béhaviorisme à l'approche cognitive et au constructivisme (1.2.1). Puis, nous nous intéressons à l'influence du contexte socio-culturel (1.2.2) et à la place de l'expérience dans l'apprentissage (1.2.3). Enfin, nous concluons par les stratégies d'apprentissage actif mettant en application les résultats des neurosciences et de la psychologie cognitive. Nous mettons l'accent sur la contextualisation de l'apprentissage (1.3.1) ainsi que sur le développement de la capacité à apprendre (1.3.2).

1.1 Mécanismes de l'apprentissage

Dès la naissance, le cerveau humain étonne par sa formidable capacité d'apprentissage. En une poignée de mois, les nouveaux nés apprennent un grand nombre de choses : coordonner leurs gestes, se déplacer, parler, distinguer des objets ou encore reconnaitre des émotions. C'est de l'observation des nourrissons, et plus généralement des enfants, que nous viennent les connaissances sur les mécanismes d'apprentissage du cerveau.

Ces observations ont été rendues possibles grâce au perfectionnement de techniques pour sonder en temps réel et enregistrer l'activité cérébrale [4]. Avec l'imagerie par résonance magnétique (IRM), les neuroscientifiques peuvent cartographier le cerveau et associer l'activité cérébrale à des tâches particulières (e.g. lire, écrire, parler). De son côté, l'électroencéphalographie (EEG) renseigne sur l'activité électrique du cerveau en temps réel (chaque milliseconde) au cours de l'exécution d'une tâche. À l'aide de l'IRM et l'EEG, les neuroscientifiques observent les zones actives du cerveau lorsque, par exemple, des nourrissons regardent des photos d'animaux. En reproduisant cette observation et en comparant avec les zones actives du cerveau lorsque les nourrissons effectuent d'autres tâches, il est possible de distinguer les réseaux de neurones et d'en déduire leur rôle. De nombreux inconnus subsistent quant au fonctionnement du cerveau, mais l'IRM et l'EEG ont permis aux neuroscientifiques de mettre en évidence une partie des mécanismes cognitifs qui sont à la base de l'apprentissage.

Au sein des réseaux, chaque neurone « *À l'aide de son arbre dendritique [...] collecte des informations en provenance d'autres cellules, et il les rassemble pour n'envoyer qu'un seul message* » le long de son axone (Dehaene, 2018, p. 134). La Figure 1.1 illustre la communication entre deux neurones. Les dendrites d'un premier neurone reçoivent des signaux provenant d'autres cellules (e.g. neurones) puis l'information circule *via* l'axone, le canal de communication entre les dendrites et les synapses. Parvenues aux synapses, celles-ci assurent la transmission de l'information du premier neurone vers le second.

Les transmissions entre les neurones assurent la circulation de l'information d'une aire à l'autre du cerveau et les différents traitements qui y sont appliqués soutiennent les fonctions

4. Les techniques pour sonder le cerveau ont donné lieu des projets scientifiques ambitieux comme le *Human Brain Project* débuté en 2013 avec l'objectif de simuler le fonctionnement du cerveau. Ce projet est soutenu par l'Union européenne et vise l'avancement de la recherche en neurosciences, informatique et médecine du cerveau par l'utilisation des technologies. Source : https://www.humanbrainproject.eu/en/. Consulté le 22 novembre 2019.

5. Adapté de http://geozine.free.fr/Geozine/forme/memoire.htm. Consulté le 1 septembre 2020.

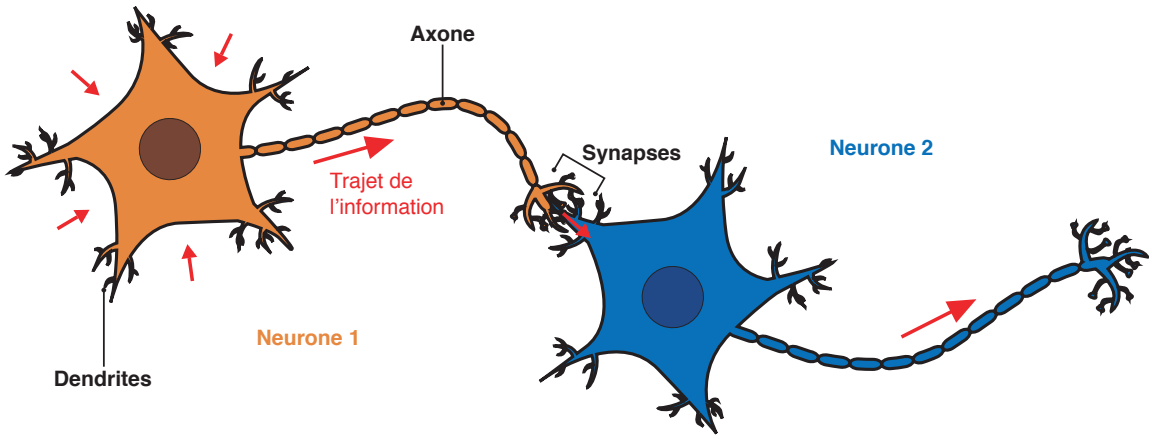


FIGURE 1.1 – **Communication entre deux neurones** [5]

cognitives telles que l'attention, les mémoires ou encore les émotions. Nous verrons au chapitre 2 que les méthodes d'apprentissage artificiel reposent sur des neurones artificiels qui sont une modélisation mathématique et simplifiée du fonctionnement des neurones biologiques.

1.1.1 Plasticité cérébrale

À la naissance, le développement du cerveau n'est pas terminé, mais se poursuit durant l'enfance ; une période singulièrement longue pour l'espèce humaine. Puisque l'ensemble des connaissances nécessaires au cours d'une vie ne peut pas être encodé dans le génome humain [6], seule l'architecture du cerveau est encodée. Cette architecture définie les grandes aires neuronales du cerveau, les principaux axes de communication entre les neurones et leur positionnement posant ainsi les bases des apprentissages futures (e.g. langage, motricité). Durant l'enfance, le cerveau termine son développement sous l'influence de l'environnement et en intégrant les connaissances acquises au fil des apprentissages.

Le mécanisme par lequel le cerveau continue son développement après la naissance est la plasticité cérébrale. Elle a été découverte par le prix Nobel de médecine Santiago Ramon y Cajal (1906) lorsqu'il étudiait le fonctionnement des réseaux de neurones présent dans le cerveau. Ramon y Cajal a montré que les réseaux de neurones sont plastiques au sens où les connexions entre les neurones se renforcent, se créent ou s'éteignent au cours du temps (Mateos-Aparicio & Rodríguez-Moreno, 2019). L'évolution des connexions entre les neurones est quantitative, car si le nombre de neurones est constant tout au long de la vie en revanche, le nombre de liaisons entre les neurones peut augmenter. La qualité des connexions neuronales évolue aussi, car la plasticité cérébrale agit sur les propriétés des neurones pour améliorer l'efficacité de la transmission de l'information (Dehaene, 2018). La plasticité cérébrale est au cœur du fonctionnement du cerveau et, en permettant une modification continue des réseaux de neurones, elle constitue le premier des mécanismes d'apprentissage.

6. L'argument est d'abord comptable : une fois développé, le cerveau a une capacité de stockage cent mille fois supérieure à celle du génome humain (Dehaene, 2018). Ensuite, comment savoir à l'avance quelles connaissances seront utiles ? L'apprentissage permet d'acquérir les connaissances nécessaires au cours de la vie. Dans une lettre à un confrère, van Gogh disait « *Je persiste à faire ce que je ne sais pas encore faire afin d'apprendre à le faire* » (http://vangoghletters.org/vg/letters/let528/letter.html).

Apprendre, c'est renforcer les connexions entre des neurones

La plasticité cérébrale est un mécanisme d'apprentissage, car la modification permanente des connexions entre les neurones reflète les expériences et les apprentissages de l'individu. Pour expliquer le processus de modification des connexions, Hebb (1949) formule la règle selon laquelle les neurones se lient entre eux lorsqu'ils s'excitent ensemble [7]. À la suite d'un stimulus, lorsque deux neurones s'activent simultanément, leurs synapses se renforcent à leur interconnexion rendant ainsi plus efficace la circulation de l'information entre les deux neurones. Autrement dit, la répétition d'une même tâche entraîne l'activation des mêmes neurones ce qui, par le renforcement successif des synapses, améliore la réalisation de la tâche. Par exemple, un enfant qui apprend à lire va progressivement transformer ses connexions neuronales pour favoriser celles aboutissant à la bonne compréhension des mots et des phrases.

Cependant, tous les stimuli reçus ne donnent pas lieu à un apprentissage, car la plasticité cérébrale est modulée par des neurotransmetteurs. Libérés en réponse aux stimuli, les neurotransmetteurs agissent sur le degré de renforcement des synapses et vont ainsi déterminer ce qui est appris ou non. En outre, la plasticité cérébrale n'est pas homogène dans le temps ni uniformément répartie entre les aires du cerveau (Dehaene, 2018). Le pic de plasticité a lieu durant l'enfance, particulièrement propice à l'apprentissage, puis la plasticité diminue progressivement avec l'âge. Les aires sensorielles du cerveau, traitant des informations de bas niveau (e.g. vision, audition), arrivent à maturité aux alentours de trois et quatre ans. À l'inverse, les aires responsables des fonctions cognitives supérieures (e.g. langage, raisonnement, mémoire) continuent de se modifier durant l'adolescence.

Finalement, les caractéristiques de la plasticité cérébrale soulignent l'importance de l'environnement et de l'éducation dès le plus jeune âge. L'environnement doit être sécurisant (physiquement et affectivement) et enrichi de façon à stimuler le développement cognitif : en facilitant les expérimentations personnelles, en renouvelant les objets de curiosité, etc.

Hypothèse du précablage du cerveau

La plasticité cérébrale est le mécanisme par lequel le cerveau poursuit son développement tout au long de la vie et se trouve à la base de tous nos apprentissages. Pour autant, le cerveau est-il vierge de toutes connaissances à la naissance ? Cette question a été débattue par Piaget et Chomsky en octobre 1975, lors d'une rencontre avec d'autres scientifiques au sein de l'abbaye cistercienne de Royaumont (Val-d'Oise) [8].

Piaget défend la thèse selon laquelle les connaissances ne sont pas innées, mais progressivement construites par l'individu au contact de la réalité. Cette position rejoint celle des empiristes anglais dont Hobbes, Hume et Locke défendant le concept de *tabula rasa* (ardoise vierge), c'est-à-dire l'absence de connaissances existantes dès la naissance (Bouveresse-Quilliot, 1998). Locke suppose que « *au commencement l'âme est ce qu'on appelle une* table rase *(tabula rasa) vide de tous caractères, sans aucune idée* » (Locke, 2007, p. 176) que seule l'expérience peut remplir [9]. D'autres penseurs ont une position moins radicale, à l'exemple de

7. La phrase originale étant : « *Neurons that fire together wire together* ».

8. Source : https://www.scienceshumaines.com/la-psychologie-de-l-enfant-quarante-ans-apres-piaget_fr_14714.html. Consulté le 28 décembre 2019.

9. Pour Locke (2007), nos connaissances nous viennent de l'expérience, en observant les objets extérieurs et les êtres vivants et en réfléchissant sur nous-mêmes.

Turing pour qui le cerveau du nouveau-né, sans être totalement vierge, est un cahier composé de « *peu de mécanismes, et beaucoup de feuilles blanches* » (Turing, 1950, p. 456) [10]. Quoi qu'il en soit, ces penseurs et Piaget soutiennent, à différents degrés, que les individus naissent avec un cerveau vierge et que les connaissances sont acquises au cours de la vie.

Pour démontrer sa position, Piaget s'appuie sur ses expériences suggérant que le développement cognitif est progressif. Il montre, par exemple, que la permanence de l'objet — comprendre qu'un objet continue d'exister même lorsqu'il est caché — n'est possible qu'aux alentours de deux ans. Ce fait suggère en effet que les nouveaux-nés ne possèdent pas les connaissances intuitives nécessaires sur le comportement des objets physiques dans son environnement. De son côté, Chomsky estime au contraire que le cerveau n'est pas vierge à la naissance, mais qu'il existe une forme de précablage, à tout le moins pour le langage. Selon cette hypothèse, le cerveau des bébés intégrerait déjà des connaissances intuitives sur les règles propres au langage, à la formulation et à la construction des phrases. Chomsky constate que seule la préexistence de connaissances permet d'expliquer pourquoi « *Tous les enfants du monde comprennent vite quelles sont les relations qui unissent le sujet (le chien) et son prédicat (aboie)* » [11]. Sans connaissances préexistantes, il est difficile d'expliquer l'universalité et la rapidité du phénomène d'apprentissage d'une langue. L'imagerie cérébrale et les expériences menées en neurosciences confirment l'hypothèse d'un précablage du cerveau plutôt que celle de l'ardoise vierge. En effet, le cerveau du nourrisson intègre des intuitions qui touchent au concept d'objets, aux lois de la physique ainsi qu'à l'arithmétique et aux probabilités (Dehaene, 2018).

Les chercheurs ont confronté des bébés à des situations normales et à d'autres violant les lois de la physique ou des probabilités tout en observant leurs réactions, en particulier les signes de surprise telle qu'un regard porté plus longtemps sur un objet. L'étude de Baillargeon et DeVos (1991) montre qu'aux environs de trois mois, un bébé est capable de se représenter des objets cachés et de faire des prédictions sur le comportement des choses (voir Figure 1.2).

Pour expliquer la compréhension rapide des lois physiques du monde par les bébés, les chercheurs font l'hypothèse que l'être humain intègre un moteur physique similaire à ceux intégrés dans les jeux vidéo (Lake et al., 2017). Selon cette hypothèse, « *les personnes reconstituent une scène perceptuelle à partir des représentations internes des objets, de leurs propriétés physiques pertinentes [...] et des forces agissant sur les objets* » [12]. En d'autres termes, les individus affinent au fil des expériences des représentations mentales leur permettant d'expliquer et de simuler le comportement des choses dans l'espace en prenant en compte les lois physiques qui régissent le monde (e.g. pesanteur).

La réaction de surprise du bébé face à des situations impossibles, du point de vue d'un adulte, est un indicateur important qui suggère que le déroulement de la situation n'est pas conforme à ce qu'il a anticipé. Les expériences mettant en évidence les réactions de surprise des bébés démontrent l'existence de connexions neuronales dès la naissance pour non pas seulement apprendre, mais déjà comprendre le monde.

10. « *Rather little mechanism, and lots of blank sheets* » (version originale).
11. Source : https://lewebpedagogique.com/paumier/wp-content/blogs.dir/228/files/piaget.pdf. Consulté le 28 décembre 2019.
12. « *people reconstruct a perceptual scene using internal representations of the objects and their physically relevant properties [...] and forces acting on objects* » (version originale)

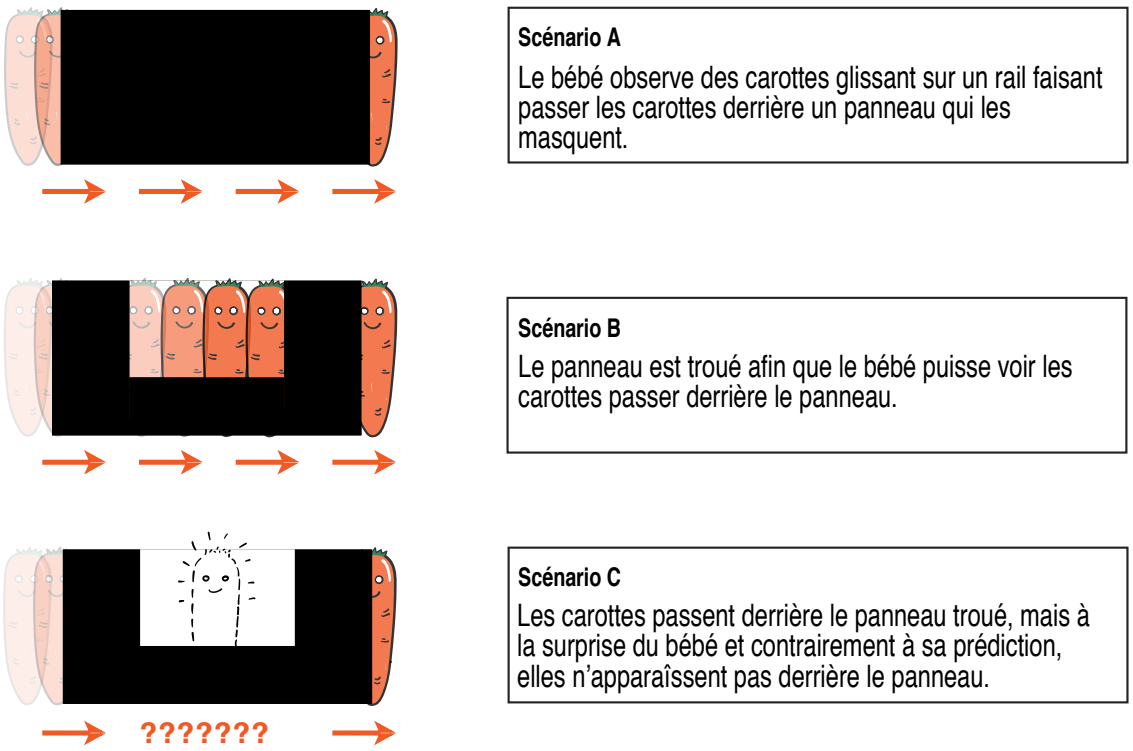


FIGURE 1.2 – **Anticipation de l'environnement par le bébé**. Adapté de Baillargeon et DeVos (1991).

La recherche sur le précablage du cerveau nous montre que l'humain élabore rapidement des hypothèses pour expliquer son environnement et anticiper. Ce faisant, la surprise dénote du déclenchement d'un processus d'apprentissage afin de comprendre et d'intégrer ce qui n'a pas été anticipé. Cela suggère d'ores et déjà que des activités incitant l'apprenant à anticiper son environnement et à réfléchir sur le déroulement d'événements pourraient être bénéfiques pour l'apprentissage. Aussi, à travers la plasticité cérébrale, nous avons vu que tout apprentissage se traduit par la modification de connexions neuronales. Cependant, plusieurs mécanismes clés modulent l'activité de la plasticité cérébrale et donc l'efficacité de l'apprentissage.

1.1.2 Piliers de l'apprentissage

Dans son livre *Apprendre ! : Les talents du cerveau, le défi des machines* (2018), Dehaene, neuroscientifique et Professeur au Collège de France, synthétise les mécanismes cognitifs liés à l'apprentissage. Dehaene identifie quatre mécanismes clés, les « piliers de l'apprentissage » : l'attention, l'engagement actif, le retour sur erreur et la consolidation (Dehaene, 2018). Étant donné leur importance pour un apprentissage actif et efficace, la compréhension de ces mécanismes permettra de guider notre réflexion lorsqu'il s'agira d'examiner comment les objets connectés peuvent servir l'apprentissage. Dans les parties suivantes, nous reprenons et complétons la synthèse proposée par Dehaene.

Attention

Parmi les piliers de l'apprentissage figure l'attention, une fonction cognitive permettant de filtrer, de trier, d'amplifier ou encore d'inhiber les informations perçues par les sens. Dans l'environnement, les sens perçoivent en permanence une grande quantité de stimuli (e.g. visuels, auditifs, olfactifs) qui, s'ils ne sont pas filtrés, vont saturer les capacités cognitives du cerveau. L'attention permet aux individus de sélectionner les stimuli à prendre en compte, l'importance à leur accorder et la manière de les traiter. Ces opérations correspondent à trois systèmes attentionnels : A) l'alerte, B) l'orientation et C) le contrôle exécutif (Posner & Rothbart, 2018).

A) Alerte : quand faire attention ? L'alerte adapte le niveau de vigilance et peut mobiliser tout l'organisme selon la situation avec un impact fort sur la mémoire. Lorsqu'un phénomène hautement inattendu se produit, avec des conséquences pour l'individu, le mécanisme *Now Print !* s'active pour enregistrer de façon permanente le phénomène ainsi que les événements co-occurrents (Livingston, 1980). *Now Print !* correspond à une libération massive de neurotransmetteurs qui a pour effet de tout enregistrer, les informations importantes comme les informations inutiles [13]. Les jeux vidéo, quand ils comportent les notions de vie et de mort, semblent mobiliser le système d'alerte, ce qui a des effets positifs en termes d'apprentissage : amélioration des capacités visuelles, focalisation de l'attention (Dehaene, 2018) [14].

B) Orientation : à quoi faire attention ? L'orientation est le système attentionnel qui permet le filtre et la sélection des informations à prendre en compte. Selon le psychologue James, « *Ce que je perçois est ce à quoi j'accepte de prêter mon attention* » [15] (James, 1890, p. 402), l'attention sélective s'apparente un coup de projecteur. Ce faisant, les neurones responsables du traitement des informations liées à l'objet de l'attention sont surexcités et agissent plus efficacement (Dehaene, 2018). L'effet d'amplification appliqué à certains neurones va de pair avec l'inhibition d'autres neurones, ce qui rend imperceptibles les stimuli normalement traitées par les neurones inhibés [16]. Par exemple, un enseignant peut être tenté de combiner sa présentation orale avec une animation, cependant, celle-ci risque de captiver l'attention des élèves et d'inhiber chez eux les neurones mobilisés pour écouter l'enseignant. Ainsi, pour qu'un apprentissage soit efficace, l'attention de l'apprenant doit être guidée en indiquant les informations à retenir et leur degré d'importance. Sans cela, le risque est que l'apprenant ne relève pas les informations pertinentes, qu'il se concentre sur des informations inutiles ou encore qu'il prenne en compte plus d'informations que nécessaire.

13. Par exemple, grâce à ce mécanisme les personnes peuvent répondre à la question : où étiez-vous lors de l'annonce du confinement lié à l'épidémie de Covid-19 en 2020 ?

14. Par exemple, la course aux nombres est un jeu vidéo dédié à l'apprentissage des concepts de nombre et des bases arithmétiques pour les enfants de 4 à 8 ans. Plusieurs études ont évalué et démontré l'efficacité du jeu vidéo. Source : http://thenumberrace.com/nr/home.php?lang=fr. Consulté le 13 janvier 2020.

15. La phrase complète originale est : « *Millions of items of the outward order are present to my senses which never properly enter into my experience [...] My experience is what I agree to attend to* ».

16. L'expérience du gorille invisible démontre la force de l'attention sélective : des personnes regardent une vidéo où deux équipes de joueurs se passent une balle. On demande aux personnes de compter le nombre de passes effectuées par une des équipes, ce qui va focaliser leur attention et rendre invisible le gorille se promenant au milieu des joueurs. Source : http://www.theinvisiblegorilla.com/videos.html. Consulté le 9 janvier 2020.

C) Contrôle exécutif : comment traiter les informations ? Le contrôle exécutif est un ensemble complexe de processus mentaux dédiés à la sélection des opérations mentales à effectuer sur chaque information (Dehaene, 2018). Le rôle du contrôle exécutif est de guider l'orientation de l'attention vers les informations à prendre en compte pour, par exemple, effectuer un calcul mental. Le contrôle exécutif établit un plan d'action, organise les opérations mentales à appliquer et évalue en permanence la réussite de l'action. Cependant, le mode de fonctionnement du contrôle exécutif s'apparente à un goulot d'étranglement où les informations sont traitées successivement (voir Figure 1.3). Par conséquent, multiplier les tâches cognitives surcharge le contrôle exécutif qui ne peut réaliser de traitements parallèles.

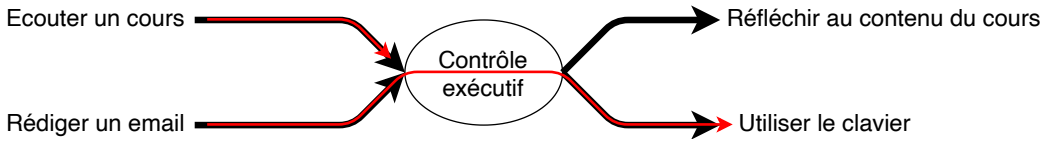


FIGURE 1.3 – **Fonctionnement du contrôle exécutif**[17]. Le contrôle exécutif se comportant comme un goulot d'étranglement, les deux tâches « Écouter un cours » et « Rédiger un email » ne peuvent être traitées simultanément. Dans cette situation, le contrôle exécutif effectue les actions pour écrire l'email.

Le multitâches favorisé par les TIC, nous permettant de jongler entre la rédaction d'un article et l'écoute d'un podcast, divise notre attention et réduit notre efficacité (Kushlev, Proulx, & Dunn, 2016). Pour créer des conditions favorables à l'apprentissage, il est nécessaire de veiller à la bonne concentration de l'apprenant en évitant les distractions : décorations de la salle de classe, bruit environnant, sonnerie de téléphone, etc. Pour cette raison, un cadre spécifique doit être élaboré pour structurer l'utilisation des objets connectés et les mettre au service de l'apprentissage. Les études de Beland et Murphy (2016) montrent que, sans intégration active et en utilisation libre, les objets connectés nuisent aux performances des apprenants. À l'inverse, les effets deviennent positifs lorsque l'utilisation d'objets connectés est guidée par des objectifs d'apprentissage (Bernard et al., 2014 ; Tingir et al., 2017).

Au-delà de l'alerte, de l'orientation et du contrôle exécutif, l'attention est plus largement modulée par le contexte social. De toutes les espèces animales, l'espèce humaine est la seule a posséder une « théorie » de l'esprit des autres, c'est-à-dire « *la capacité de faire attention à leur attention* » (Dehaene, 2018, p. 237). Cette capacité est manifeste lors des actes d'apprentissage et d'enseignement, à tout âge « *nous faisons attention à ce que les autres cherchent à nous enseigner* » (Dehaene, 2018, p. 237). Par exemple, le bébé prête attention à ce que lui explique l'adulte en cherchant son regard et en accordant de l'importance aux informations transmises par l'adulte. De ce fait, les connaissances que possèdent les individus sur le monde ne découlent pas uniquement de leur expérience personnelle, mais sont aussi acquises par un apprentissage social, en interagissant avec d'autres individus[18]. L'apprentissage social est présent dans l'enseignement à l'école, car « *Enseigner, c'est faire attention à l'attention des autres* » (Dehaene, 2018, p. 237). Il s'agit d'un élément essentiel dans la relation entre l'élève et l'enseignant : ce dernier choisit des exemples en faisant attention à ce que l'élève sait et ne sait pas ; l'élève sait que l'enseignant sait qu'il ne sait pas et, par conséquent, fait attention

17. Adapté de Houart (2015). Source : https://slideplayer.fr/slide/9045087/. Consulté le 21 janvier 2020.
18. Cette dimension sociale de l'apprentissage a notamment été explicitée dans les travaux de Vygotski (1997) sur lesquels nous revenons en section 1.2.2.

aux exemples présentés par l'enseignant.

Ce lien fort impliquant une attention partagée entre l'élève et l'enseignant explique également pourquoi une formation est inefficace lorsqu'elle est délivrée mécaniquement (Dehaene, 2018). Par exemple, l'efficacité de l'enseignement est réduite dans les formations à distance lorsqu'elles sont uniquement basées sur la distribution de textes, d'images et de vidéos, car peu d'attention est prêtée à la réception des contenus par les élèves, à ce qu'ils savent et ne savent pas.

Ainsi, les humains disposent d'un mode d'apprentissage réceptif et social où les individus apprennent en interagissant avec leur entourage. Ce mode d'apprentissage a largement contribué au développement des sociétés humaines cependant, il comporte des inconvénients : nous avons tendance à absorber les informations transmises par les autres sans regard critique. Dans un contexte social, « *si nos congénères portent un jugement différent du nôtre [...] nous révisons fréquemment notre jugement afin de l'aligner avec le leur, même si c'est au mépris de toute plausibilité* » (Dehaene, 2018, p. 240). Néanmoins, l'être humain possède un autre mode d'apprentissage, actif celui-ci, le poussant à agir comme un scientifique formulant et évaluant des hypothèses.

Engagement actif

L'engagement actif, au sens cognitif et physique, est un autre des piliers de l'apprentissage énoncé par Dehaene (2018). Qu'il s'agisse d'acquérir de nouvelles connaissances ou de réévaluer des connaissances déjà acquises, le cerveau a une plus grande efficacité lorsqu'il traite activement les informations au lieu de les recevoir passivement. Par exemple, un individu se souviendra mieux d'un trajet en voiture s'il est conducteur plutôt que passager. En tant que conducteur, l'individu traite activement les informations liées au trajet : il est attentif aux détails de la route et son esprit est concentré pour atteindre un objectif (le lieu d'arrivée). Par analogie, l'apprenant est engagé activement dans le processus d'acquisition des connaissances lorsqu'il se pose des questions, formule des hypothèses, les tests et fait des expérimentations. En outre, à l'exemple du conducteur, la recherche de l'engagement actif peut être un moyen pour diriger l'attention et encadrer les usages des objets connectés afin de limiter leur effet distrayant.

L'engagement de l'apprenant et son implication dans le processus d'apprentissage est déterminé par la motivation. Il s'agit d'« *un construit hypothétique utilisé afin de décrire les forces internes et/ou externes produisant le déclenchement, la direction, l'intensité et la persistance du comportement* » (Vallerand & Thill, 1993, p. 18). Cette forme d'énergie conditionne le passage à l'action ainsi que l'accomplissement ou l'abandon d'une tâche. La motivation est qualifiée d'intrinsèque lorsque l'activité est effectuée pour le simple plaisir qu'elle procure — e.g. apprendre pour le plaisir d'apprendre. Lorsque la réalisation de l'activité est motivée par des éléments externes, la motivation est dite extrinsèque — e.g. apprendre pour avoir de bonnes notes (Deci & Ryan, 2000). L'amotivation, l'absence de motivation selon Deci et Ryan (2000), survient lorsque l'individu ne perçoit pas de lien entre l'activité à réaliser et les résultats escomptés.

La curiosité, l'envie d'apprendre et de savoir, est un facteur majeur de la motivation intrinsèque et est directement liée au plaisir d'apprendre. Née de l'identification d'un décalage

entre ce que l'on connaît et ce que l'on pourrait connaître, la curiosité pousse à explorer l'inconnue [19] ; ce qui requiert de savoir ce que l'on ne sait pas. Dans le cerveau, la curiosité stimule les réseaux de neurones impliqués dans l'attention, la mémoire, mais également ceux du plaisir de sorte que la curiosité est une récompense en soi (Dehaene, 2018, p. 253).

L'engagement actif de l'apprenant est positivement influencé par l'activité d'apprentissage lorsqu'elle propose des objectifs motivants et intègre des éléments pour éveiller la curiosité. Par exemple, l'engagement peut être obtenu en ajustant la difficulté des exercices pour qu'ils ne soient ni faciles ni trop difficiles, de sorte qu'ils deviennent un défi faisable pour l'apprenant (Zaromb, Karpicke, & Roediger, 2010).

L'engagement cognitif peut être complété par un engagement physique, par exemple, dans le cadre d'activités pratiques et d'expérimentations. La mobilisation des fonctions sensori-motrices entraîne une meilleure vascularisation (le cerveau est mieux oxygéné) et libère des neurotransmetteurs qui agissent sur les performances de la mémoire, de l'attention et de la motivation (Doherty & Forés Miravalles, 2019). Les études de Kontra et al. (2015) montrent que par rapport à l'observation et à l'écoute, l'expérimentation concrète permet aux apprenants de mieux comprendre des concepts scientifiques. Ces derniers étant généralement abstraits, contre-intuitifs ou non tangibles, les auteurs suggèrent que l'implication des fonctions sensori-motrices favorise l'apprentissage.

Ainsi, l'attention est primordiale pour identifier les informations pertinentes et pour savoir comment les traiter. L'engagement actif signifie que l'apprenant est motivé et impliqué cognitivement, mais aussi physiquement, dans des activités d'apprentissage qui stimulent sa curiosité. Pour être actif, l'apprenant ne doit pas seulement observer, mais être libre de poser des questions, de formuler des hypothèses, d'explorer et d'expérimenter. Toutefois, un guidage est nécessaire, car laissé à eux-mêmes « *les enfants éprouvent les plus grandes difficultés à découvrir les règles qui gouvernent un domaine, et ils apprennent beaucoup moins bien, voire pas du tout* » (Dehaene, 2018, p. 248). Le retour sur erreur fait partie des moyens existants pour guider l'apprenant en fonction de ses actions.

Retour sur erreur

Comme pilier d'apprentissage, d'après Dehaene (2018) le retour sur erreur doit permettre à l'apprenant de comprendre ses erreurs et d'ajuster ses actions en conséquence.

L'effet de surprise créé par une erreur enclenche les mécanismes d'apprentissage du cerveau qui vont ensuite ajuster les connaissances acquises. Dans la section 1.1.1, nous avons vu que les neuroscientifiques observent les réactions de surprise du nourrisson pour cerner ses connaissances, car elles lui permettent d'anticiper les événements dans son environnement. Le modèle de Rescorla et Wagner (1972) suggère que les mécanismes d'apprentissage du cerveau s'activent précisément lorsqu'un décalage inattendu survient entre ce qui est anticipé et ce qui se passe en réalité.

19. La curiosité suit une courbe en cloche : qu'un objet nous paraisse trop familier ou tellement nouveau que nous ne le comprenons pas et la curiosité est réduite. La curiosité s'oriente vers des choses nouvelles et accessibles, « *notre cerveau évalue la vitesse d'apprentissage, et la curiosité s'éteint s'il détecte que nous ne progressons pas suffisamment en regard de nos attentes* » (Dehaene, 2018, p. 257).

Selon la règle de Rescorla-Wagner, à partir de données sensorielles, le cerveau (voir Figure 1.4) :

1. anticipe et émet une hypothèse sur ce qu'il va se produire ;
2. évalue l'erreur de prédiction à partir de la différence entre l'hypothèse et ce qui est advenu. L'erreur de prédiction permet de déterminer le degré de surprise ;
3. intègre les nouvelles informations en fonction du degré de surprise afin que les prochaines hypothèses soient plus en accord avec la réalité.

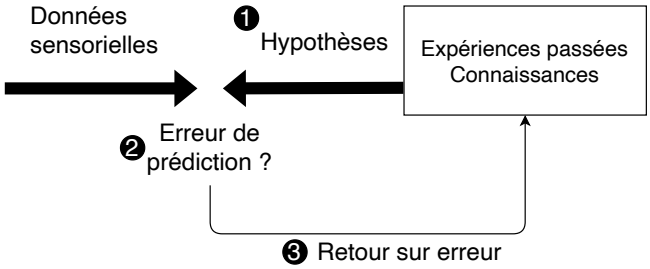


FIGURE 1.4 – **Apprentissage selon la règle de Rescorla-Wagner**. Adapté de Rescorla et Wagner (1972).

Cette règle d'apprentissage fait appelle aux trois piliers d'apprentissage évoqués jusqu'ici (Dehaene, 2018) : l'attention est dirigée vers des stimuli particuliers de l'environnement, le cerveau traite de manière active les stimuli en formulant des hypothèses puis prend en compte ses erreurs. Cependant, selon la règle de Rescorla-Wagner, la qualité d'apprentissage dépend de la qualité du retour sur erreur : celui-ci doit être rapide, précis et lié à un objectif donné. En ce sens, la note n'est pas un retour sur erreur de qualité lorsqu'elle est utilisée comme une récompense ou une punition. La note synthétise l'ensemble des erreurs commises par l'apprenant sans indiquer quelles sont exactement les erreurs, ni leurs origines ni leurs raisons. Dans la perspective d'obtenir un retour sur l'erreur et situer l'état de ses connaissances, les tests constituent une stratégie efficace pour apprendre. Plusieurs études ont montré que l'apprentissage en effectuant des tests répétés est plus efficace qu'un apprentissage sous la forme de lecture et de révision (Tse, Balota, & Roediger, 2010). Le test met l'apprenant dans une situation active où il sollicite sa mémoire et sa compréhension, ce qui renforce l'encodage des informations et permet à l'apprenant de constater ce qu'il sait et ce qu'il ne sait pas.

Consolidation

La consolidation des connaissances fait partie des piliers de l'apprentissage en ceci qu'elle permet le passage « *d'un traitement lent, conscient, avec effort, à un fonctionnement rapide, inconscient, automatique* » (Dehaene, 2018, p. 293). Les rôles de l'attention, de l'engagement actif et du retour sur erreur sont de saisir et d'intégrer les nouvelles informations tandis que la consolidation va agir sur le stockage à long terme des informations. Par exemple, un jeune conducteur réalise toutes les opérations de manière consciente : contrôler les rétroviseurs, appuyer sur la pédale d'accélération ou de frein, débrayer pour changer de vitesse, évaluer la distance des autres véhicules puis ajuster la vitesse, etc. Au fil des heures de conduite, ces opérations deviennent des routines automatiques et inconscientes pour le jeune conducteur

ce qui libère des ressources cognitives. Le traitement des informations nécessaires pour la conduite passe progressivement de la mémoire de travail à la mémoire à long terme (Dehaene, 2018).

L'apprentissage espacé (*spaced learning*), ou répétition espacée, est une technique efficace de consolidation basée sur la répétition des séquences d'apprentissage dans le temps. Dans leur synthèse, Gerbier et Koenig (2015) rapportent plusieurs études démontrant que l'efficacité est due à l'effet d'espacement et à l'effet d'intervalle. L'effet d'espacement s'observe par des performances plus élevées aux tests lorsque l'apprentissage est espacé dans le temps plutôt que massé sur une séquence temporelle (Gerbier & Koenig, 2015). L'oubli des informations entre chaque séquence ajoute une difficulté qui augmente l'activité cérébrale — qu'est-ce qui a été vu la dernière fois ? — ce qui finalement renforce l'encodage des informations. À l'inverse, lors d'une séquence longue, l'activité cérébrale et l'attention tendent à baisser, car les informations répétées perdent de leur nouveauté. L'effet d'intervalle correspond à l'influence de la durée des espacements entre chaque séquence sur le temps de rétention des informations dans la mémoire (Gerbier & Koenig, 2015). Pour une rétention à long terme, les études neuroscientifiques suggèrent d'augmenter progressivement la durée de l'espacement (Dehaene, 2018).

Le sommeil est l'une des variables jouant un rôle dans l'efficacité de l'apprentissage espacé et dans la consolidation plus généralement. Jenkins et Dallenbach (1924) et Karni et al. (1994) montrent que le sommeil prolonge la rétention des informations dans la mémoire ; il empêche d'oublier. Lors d'une expérience, les sujets ont appris une tâche jusqu'à atteindre ce qui semblait être une limite dans leur progression. Cependant, après un sommeil profond, les sujets ont dépassé cette limite et ont mieux réussi. Les chercheurs estiment que, durant le sommeil, le cerveau rejoue les événements appris dans la journée de manière plus rapide afin d'encoder les informations sous une forme plus abstraite et générale (Dehaene, 2018 ; Walker & Stickgold, 2004).

En résumé, à l'état de veille, le cerveau apprend en mode *bottom-up* : les informations sensorielles et les messages d'erreur, issues des aires de bas niveau du cerveau, sont graduellement traités par des aires liées aux fonctions cognitives supérieures (e.g. raisonnement, mémoire). À l'inverse, pendant le sommeil, le cerveau apprend en mode *top-down* : les fonctions cognitives supérieures génèrent de nouvelles informations sensorielles, jamais vues auparavant, avec lesquelles le cerveau s'entraîne (Buzsáki, Peyrache, & Kubie, 2014 ; Dehaene, 2018) [20].

Les piliers de l'apprentissage que sont l'attention, l'engagement actif, le retour sur erreur et la consolidation constituent une synthèse des principaux mécanismes sur lesquels s'appuie le cerveau pour apprendre. Ensemble, ces piliers suggèrent la mise en place d'un apprentissage actif au travers d'activités motivantes au cours desquelles l'apprenant peut découvrir, expérimenter et se tester. L'absence de l'un de ces piliers réduit l'efficacité de l'apprentissage, par conséquent le cadre de l'activité doit être structurant, éviter les éléments pouvant détourner l'attention et composé d'instruments permettant un retour rapide sur les erreurs de l'apprenant. Puis, les informations sont conservées sur le long terme par les mémoires.

20. Buzsáki et al. (2014) montrent que, lors des phases de repos, certains neurones s'activent comme si la personne effectuait une action dans l'environnement. Les chercheurs avancent l'hypothèse qu'il s'agit d'un mécanisme permettant d'accélérer l'apprentissage : au repos le cerveau génère de nouveaux scénarios d'entraînement à partir desquels il peut affiner ses hypothèses.

1.1.3 Mémoire et apprentissage

La mémoire est la faculté de l'esprit permettant de se souvenir des expériences vécues, elle garde une trace des états de conscience passés, les associent à d'autres, et les restituent [21]. La capacité à stocker des informations, à les conserver sur le long terme et à les restituer permise par la mémoire est essentielle pour apprendre [22]. Les recherches sur la mémoire ont mis en évidence plusieurs types de mémoire et ont produit des modèles pour rendre compte de leur rôle et de leur fonctionnement.

Types de mémoire

Parmi les modèles qui ont été élaborés, celui proposé par Atkinson et Shiffrin (1968) puis révisé par Baddeley (1986) offre une vue synthétique des connaissances accumulées sur la mémoire depuis les années 1960.

Le modèle de Atkinson et Shiffrin (1968) distingue la mémoire sensorielle, la mémoire à court terme et la mémoire à long terme. La mémoire sensorielle enregistre pendant une courte durée les informations jugées pertinentes issues des sens. Les modalités visuelles et sonores sont traitées par des sous-mémoires distinctes, dont la mémoire iconique qui conserve les stimuli visuels pendant une demi-secondes. Identifiée après le modèle de Atkinson et Shiffrin, la mémoire échoïque stocke les stimuli sonores pendant plusieurs secondes (Darwin, Turvey, & Crowder, 1972).

La mémoire à court terme à une capacité de conservation plus longue que la mémoire sensorielle (de 10 à 20 secondes) et elle enregistre les informations nécessaires à la tâche en cours (Peterson & Peterson, 1959). Outre la durée, Miller (1956) montre que la capacité de la mémoire à court terme est de sept, plus ou moins deux, *chunks* d'information. Un *chunk* désigne un paquet d'informations (e.g. chiffres, noms, dates, concepts) regroupées de façon à faciliter la mémorisation à court terme (dans la mémoire de travail) à l'exemple du regroupement par deux ou trois des chiffres d'un numéro de téléphone. Le paquet d'informations n'est pas déterminé par le nombre d'informations, mais par leur familiarité pour l'individu : une suite de chiffres ou un poème appris par cœur peuvent constituer un *chunk*. En réponse à certaines faiblesses du modèle de Atkinson et Shiffrin (1968), Baddeley (1986) remplace la mémoire à court terme par la mémoire de travail. Elle est constituée des sous-systèmes suivants (voir Figure 1.5) :

— le calepin visuo-spatial, pour le stockage des informations visuelles ;

— la boucle phonologique, pour les informations auditives et verbales ;

— l'administrateur central, qui coordonne le calepin visuo-spatial et la boucle phonologique ;

— le buffer épisodique, dont le rôle est de mettre en relation la mémoire de travail avec la mémoire à long terme.

21. Source : http://www.ac-grenoble.fr/savoie/pedagogie/docs_pedas/memoire_apprentissage/. Consulté le 3 septembre 2020.

22. Mnémosyne, déesse de la Mémoire, a donné naissance aux neuf muses des arts et des savoirs faisant de la mémoire une condition nécessaire de leurs maîtrises : éloquence, histoire, poésie, musique, chant, rhétorique, danse, comédie et astronomie. Source : https://books.openedition.org/cdf/5495?lang=fr. Consulté le 20 décembre 2019.

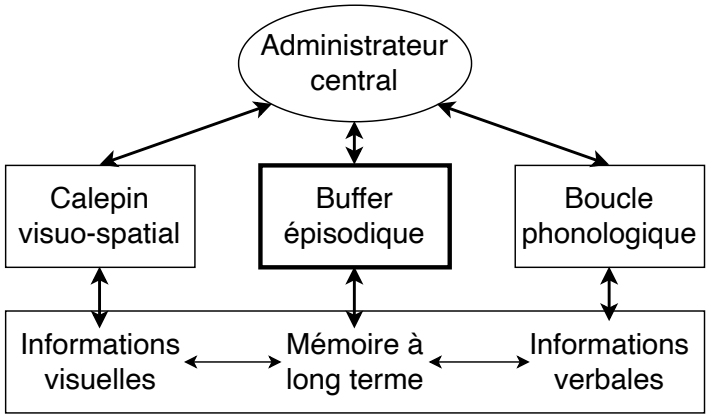


FIGURE 1.5 – **Modèle de Baddeley**. Adapté de Durand (s. d.) [23].

Plusieurs dichotomies ont été proposées pour les contenus de la mémoire à long terme : mémoire procédurale et mémoire déclarative (Cohen & Squire, 1980) , mémoire explicite et mémoire implicite (Graf & Schacter, 1985). Dans le cadre de cette thèse, nous adoptons la distinction la plus commune entre une mémoire déclarative (ou mémoire explicite) et des mémoires non déclaratives (ou mémoires implicites) (voir Figure 1.6).

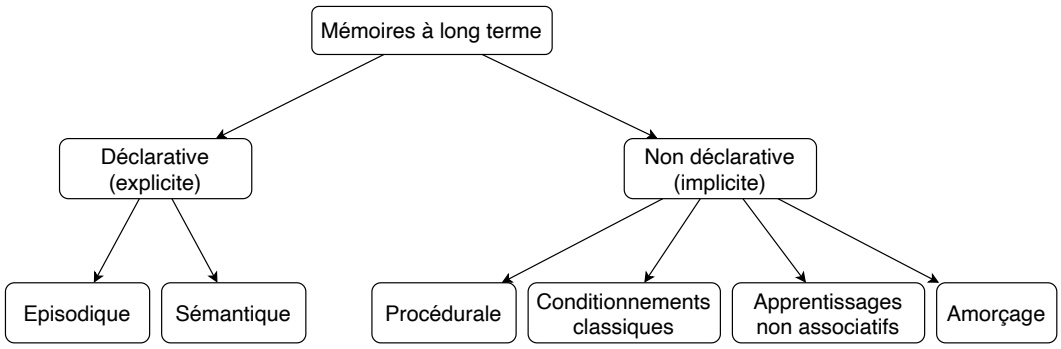


FIGURE 1.6 – **Les mémoires à long terme**. Adapté de Squire (2004).

La mémoire déclarative est mobilisée lors du rappel conscient d'informations et se compose d'une mémoire épisodique et d'une mémoire sémantique (Squire, 2004 ; Tulving, 1995). La mémoire épisodique conserve les événements autobiographiques, les souvenirs et leurs contextes, tandis que la mémoire sémantique est une base de connaissances, de définitions et d'explications sur le fonctionnement du monde.

Les mémoires non déclaratives correspondent à des processus inconscients, elles s'expriment à travers les actions et les routines automatiques (Squire, 2004). La mémoire procédurale est liée aux automatismes et aux compétences sensori-motrices (e.g. faire du vélo) (Martins, Guillery-Girard, & Eustache, 2006). Les conditionnements classiques correspondent aux réactions émotionnelles et musculaires survenant immédiatement après la perception de stimuli dans l'environnement. Par exemple, le bruit d'une voiture freinant brusquement déclenche une réaction inconsciente et immédiate d'alerte. Les apprentissages non associatifs désignent les phénomènes d'habituation et de sensibilisation qui déterminent la réaction d'une personne à un stimulus particulier. Dans le cas de l'habituation, la personne s'accoutume au stimulus et finit par ne plus y prêter attention. Tandis qu'au contraire, la sensibilisation signi-

23. Source : https://www.resodys.org/IMG/pdf/coralie_durand_.pdf. Consulté le 14 septembre 2020.

fie que la réaction de la personne est plus intense lorsqu'elle perçoit le stimulus. L'amorçage correspond aux effets de la reconnaissance perceptive et peut être compris comme un biais cognitif : lorsqu'un stimulus (prendre un café avant un entretien d'embauche) en influence un autre (la décision d'embaucher ou non la personne) [24].

Des modèles plus récents ont été proposés pour décrire les interactions entre les différentes mémoires à l'exemple du Modèle NEo-Structural Inter-Systémique de la mémoire humaine (MNESIS) (Eustache, Viard, & Desgranges, 2016). MNESIS définit des boucles de rétroactions entre les systèmes des mémoires déclaratives et non déclaratives. L'une des boucles de rétroaction relie la mémoire épisodique à la mémoire sémantique pour rendre compte de l'effet de consolidation : les événements vécus sont rejoués pour en extraire des informations sur le monde.

De façon générale, ces modèles nous renseignent sur les limites des mémoires en termes de capacité de stockage, en particulier pour la mémoire de travail, et sur la différenciation des traitements en fonction des types de stimuli (e.g. visuel, auditif). De ce fait, la création d'activités ou de dispositif d'apprentissage doit tenir compte de la quantité et de la présentation des informations transmises à l'apprenant afin de ne pas surcharger ses capacités mnésiques.

Apprendre, c'est mobiliser sa mémoire pour anticiper le futur

La consolidation, l'un des piliers de l'apprentissage, portait sur l'un des rôles des mémoires dans l'apprentissage. L'un des piliers de l'apprentissage, la consolidation, portait sur l'un des rôles de la mémoire. En réalité, les recherches menées sur le fonctionnement de la mémoire ont identifié trois processus différents (McDermott & Roediger, 2018) :

1. encodage : transformation des informations provenant des différentes aires du cerveau (e.g. sensorielles, fonctions cognitives supérieures) en une trace mnésique ;
2. consolidation : stockage dans la mémoire à long terme de la trace mnésique, ce qui se traduit par une modification des connexions neurones dans le cerveau ;
3. restitution : récupération des informations, de manière directe et explicite ou indirecte et implicite, de la mémoire à long terme vers la mémoire de travail.

La nature de l'encodage et la qualité de la consolidation influencent la facilité de rappel des informations (Croisile, 2009). Dans la mémoire, les informations sont stockées en les mettant en relation les unes aux autres, par exemple, en reliant une mélodie à une émotion ou en associant une odeur à un souvenir. Par conséquent, la qualité de l'encodage et de la consolidation peut être améliorée en associant les nouvelles informations à des connaissances acquises ou à des épisodes autobiographiques (Croisile, 2009 ; McDermott & Roediger, 2018).

La mémoire, au sens général du terme, est communément associée au passé puisqu'elle est le siège des connaissances apprises, des souvenirs et des expériences vécues. Cependant, la mémoire est aussi un moyen pour comprendre et anticiper le futur (Dehaene, 2018). Les mémoires de travail et à long terme sont impliquées lorsque le cerveau formule des hypothèses pour anticiper le déroulement des événements dans l'environnement. Cette anticipation, et les hypothèses qui en découlent sont élaborées à partir des expériences passées et des connaissances acquises, donc en mobilisant les mémoires. La Figure 1.7 illustre le lien entre les

24. Ce biais cognitif est connu sous le nom d'effet d'ancrage (Kahneman, 2018). Il est, entre autres, responsable de la difficulté à se défaire de la première impression que l'on a eue d'une personne.

processus mnésiques de rappel et de consolidation ainsi que l'apprentissage selon la règle de Rescorla-Wagner.

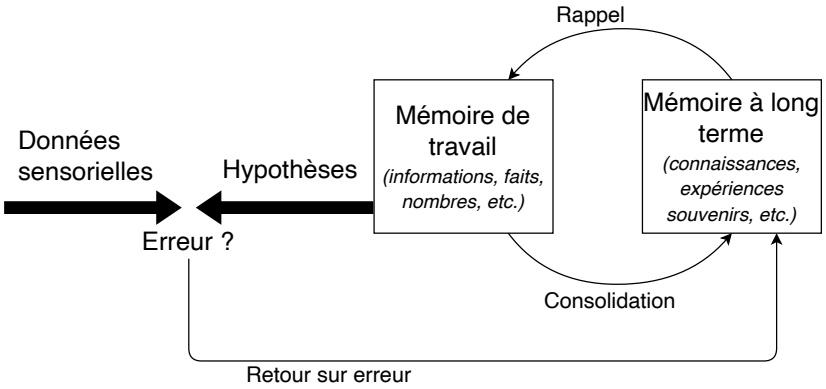


FIGURE 1.7 – **Rôles des mémoires pour anticiper l'environnement**. Adapté de Dehaene (2018) et McDermott et Roediger (2018)

À partir des données sensorielles, le cerveau récupère des informations utiles stockées dans la mémoire à long terme afin d'élaborer des hypothèses. En fonction de l'erreur commise en comparant la réalité avec les hypothèses, le cerveau intègre le retour sur erreur et va ajuster les connaissances stockées dans la mémoire à long terme. Ainsi, apprendre signifie mobiliser les informations en mémoire à long terme pour formuler des hypothèses et anticiper son environnement.

1.1.4 Rôles des émotions dans l'apprentissage

Du latin *emovere*, l'émotion se rapporte à la mise en mouvement : d'abord interne à l'individu, *via* des réactions physiologiques et psychologiques, puis externe par des choix ou des comportements. Dans son célèbre article, *What is an Emotion ?* (1884), le psychologue et philosophe James avance l'idée que les émotions sont le reflet des réponses corporelles face aux stimuli de l'environnement. Ce dernier influence directement le corps et provoque les émotions.

Par la suite, le concept d'évaluation mentale est ajouté à l'intermédiaire entre l'environnement et les changements corporels : l'émotion est le résultat de l'évaluation mentale d'une expérience par l'individu (Grandjean & Scherer, 2014). L'expérience courante est évaluée à l'aune des expériences passées et des réponses émotionnelles qu'elles ont déjà produites ce qui déclenche une réaction automatique et inconsciente du corps. Cette réaction correspond à l'émotion et à plusieurs composantes : une expression (e.g. faciale, vocale), une réaction corporelle, une motivation (tendance à l'action), un sentiment subjectif (Sander, 2013).

Raisonner avec les émotions

L'émotion a longtemps été considérée comme disjointe de la cognition, voir opposée à celle-ci, car les émotions perturberaient le raisonnement. La séparation entre l'émotion et la cognition, encore fortement ancrée aujourd'hui, a son origine dans la philosophie occidentale et la dualité corps-esprit. Ainsi, Platon, Descartes et Kant ont chacun défendu une forme de dualisme : le corps, et avec lui les émotions, représente une réalité distincte et indépendante de

l'esprit, de la faculté de connaître et de raisonner (Vieillard-Baron, 1991). Le dualisme corps-esprit a notamment influencé les théories de l'apprentissage qui ont soit écarté les aspects affectifs de l'acte de connaître soit elles les ont intégrés, mais en les séparant des aspects cognitifs [25]. Cependant, à mesure qu'avance la recherche sur la compréhension du cerveau, les travaux des psychologues cognitivistes et des neuroscientifiques montrent que l'émotion et la cognition sont étroitement liées.

Dans son livre *Descartes' error : émotion, reason, and the human brain*, le neurologue et psychologue Damasio (1994) remet en cause la thèse dualiste, représentée par Descartes [26], en montrant le rôle des émotions pour raisonner. À partir de l'étude de patients souffrants de difficultés à prendre des décisions, Damasio démontre que le cerveau s'appuie sur les émotions pour évaluer les conséquences d'action dans le temps et, *in fine*, décider. Damasio (1994) fait l'hypothèse que l'évolution a favorisé les interactions entre les émotions et la cognition étant donné leur caractère déterminant pour la survie de l'individu. Les émotions contribuent à la régulation biologique de l'organisme tandis que la cognition impacte les comportements et les expériences vécues. Ainsi, il constate que les réseaux de neurones activés par les émotions sont enchâssés avec les réseaux de neurones impliqués dans les fonctions cognitives supérieures : mémoire, attention, prise de décisions. Ce résultat est confirmé par les travaux plus récents actant les interconnexions entre les émotions et les fonctions cognitives (Levenson, 2019). La question n'est plus de savoir si les émotions sont séparées de la cognition, mais quel(s) rôle(s) jouent-elles ? (Pessoa, 2018).

La perception des émotions rend compte de la qualité de l'expérience vécue en termes de bien-être et de conséquences. L'évaluation mentale d'une situation génère des images mentales, basées sur l'histoire personnelle, juxtaposées à des réponses émotionnelles positives ou négatives (Damasio, 1994). La juxtaposition des images mentales et des réponses émotionnelles informe sur la qualité de la situation vécue (voir Figure 1.8).

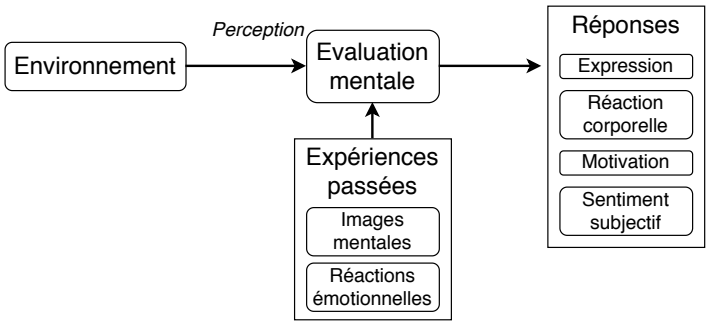


FIGURE 1.8 – **Perception des émotions**. Adapté de Damasio (1994) et Sander (2013).

La théorie des marqueurs somatiques formulée par Damasio (1994) propose que ce mécanisme d'évaluation par le biais des émotions soit aussi à l'oeuvre lorsqu'il s'agit de raisonner et de décider. Face à un problème (e.g. une situation dangereuse), le cerveau humain est capable de raisonner rapidement en prenant des décisions et en planifiant les actions à effectuer. Or, cette rapidité est impossible en adoptant uniquement un raisonnement logico-mathématique

25. Par exemple, la taxonomie de Bloom et al. (1956) décrivant les niveaux d'acquisition des connaissances dissocie les domaines cognitifs, affectifs et psychomoteurs.

26. À propos du livre, certains auteurs diront qu'il s'agit plutôt de « l'erreur de Damasio », pour dénoncer sa lecture approximative de Descartes. Source : https://doi.org/10.1016/j.amp.2004.09.003

puisque toutes les solutions possibles devraient être explorées avant de décider. L'évolution exponentielle du nombre de solutions à évaluer nécessiterait un temps de calcul long et une mémoire illimitée.

Damasio suggère que les émotions sont des marqueurs somatiques en ceci qu'elles sont associées à des anciennes expériences et indiquent les états corporels qu'elles ont engendrés. Lorsqu'un individu raisonne sur un problème, les conséquences prévisibles des différentes solutions sont juxtaposés à des marqueurs somatiques jouant le rôle de signal d'alarme ou d'encouragement (Damasio, 1994). Par exemple, imaginons un enfant se rendant à l'école à pied. Pour gagner du temps sur le chemin, il choisi de traverser un boulevard alors que le feu piéton est rouge, mais est surpris par une voiture arrivant bien plus rapidement qu'il ne l'avait prévu l'obligeant à courir. Plus de peur que de mal, mais à cet événement seront associés des émotions négatives (e.g. stress, angoisse) qui, plus tard, dans une situation similaire, agiront comme des marqueurs somatiques alertant l'enfant sur le danger de traverser une route lorsque le feu piéton est rouge.

Le rôle des émotions tel que décrit par Damasio doit être étayé par davantage de données empiriques. Toutefois, les résultats récents en neurosciences appuient l'idée que les émotions agissent comme un signal pour caractériser les expériences vécues (Todd et al., 2020). Les émotions constituent un filtre interprétatif appliqué à l'ensemble des stimuli perçus par les fonctions sensorielles (Levenson, 2019). L'émotion et la cognition ne sont plus perçues comme des systèmes isolés, mais unifiés : en voyant une chose, on ne pense pas « *C'est une chose. Je me sens bien.* », mais « *C'est une bonne chose.* » (Todd et al., 2020). Cet état de fait implique une influence importante sur la raison, l'attention, la mémoire et donc l'apprentissage.

Les émotions, modulateurs de l'attention et de la mémoire

L'émotion est un élément sous-jacent commun aux facteurs clés de l'apprentissage que nous avons établis dans les sections précédentes : la motivation, l'attention et la mémoire sont modulées par les réponses émotionnelles.

L'émotion créée la motivation, elle agit comme un élément déclencheur qui va pousser à agir : le bébé surpris face à une situation qu'il pensait impossible va forcer son attention pour comprendre ce qui lui échappe. La surprise, l'étonnement, la confusion et la curiosité sont des émotions dites de la connaissance (*knowledge emotions*, Silvia (2010)) qui initient le processus d'apprentissage. Pendant l'apprentissage, la motivation est modulée par des émotions d'accomplissement (e.g. joie, fierté, anxiété, colère ; Pekrun et al. (2011)) liée aux objectifs de l'apprentissage, aux récompenses et aux punitions.

L'attention et la mémoire de travail forment le terrain de nos réflexions dont la topologie est influencée par les émotions (Damasio, 1994). Pour résoudre un problème, nous avons besoin de l'attention afin de sélectionner les informations pertinentes et de la mémoire de travail pour manipuler ces informations de manière consciente. Les émotions exercent une fonction de pression pour orienter les informations à prendre en compte en les associant à des états corporels positifs ou négatifs (Damasio, 1994). Ce faisant, les émotions influencent le niveau de l'attention porté aux différents stimuli de l'environnement et la force de l'encodage en mémoire. L'attention est biaisée par les états émotionnels (*affect-biased attention*) et tend à s'orienter vers des objets et des personnes associées à une stimulation émotionnelle (Pool

et al., 2016) [27]. Par exemple, l'attention sélective pour la modalité visuelle est influencée par l'histoire personnelle de l'individu. En d'autres termes, les expériences passées et les émotions qu'elles ont induites influencent ce à quoi nous faisons attention visuellement. Outre l'histoire personnelle, les stimuli qui ont par le passé généré une récompense ou une punition tendent à être traités en priorité.

Du côté de la mémoire, la stimulation émotionnelle, positive ou négative, améliore la mémoire des événements passés, en particulier lorsqu'il s'agit d'événement autobiographique (*emotional engagement of memory* ; Todd et al. (2020)). Les chercheurs font l'hypothèse qu'un événement émotionnel mobilise davantage de ressources cognitives pour être encodé et ce qui facilite son rappel par la suite. Le rappel des informations est sujet à des effets contextuels d'au moins deux types (Todd et al., 2020) : l'effet de congruence émotionnelle et l'effet de dépendance émotionnelle. L'effet de congruence émotionnelle signifie que l'état émotionnel présent entraîne un rappel des informations liées à un état émotionnel similaire passé. Quant à l'effet de dépendance émotionnelle, il indique que le rappel d'une information particulière est facilité si l'état émotionnel présent est similaire à l'état émotionnel lorsque l'information a été encodée.

Enfin, les émotions négatives liées à un état dépressif, anxieux ou stressé peuvent altérer l'attention et la mémoire de travail (Joormann & Gotlib, 2008). Ces états produisent des pensées négatives qui entrent en conflit avec les informations à prendre en compte ce qui diminue l'efficacité de la mémoire de travail.

Nous avons rapporté la remise en cause de la dualité par les travaux de Damasio, dont les principales hypothèses ont été validées et complétées par la suite. Les émotions et les fonctions cognitives impliquées dans le raisonnement, la prise de décision, l'attention et la mémoire interagissent fortement. Ainsi, dans la suite de cette thèse, nous emploierons le terme cognition en sous-entendant sa composante émotionnelle.

Dans cette partie, nous avons décrit les piliers de l'apprentissage que sont l'attention, l'engagement actif, le retour sur erreur et la consolidation pour permettre au cerveau d'apprendre. Ils suggèrent de guider l'attention de l'apprenant vers les informations pertinentes, de proposer des activités engageantes et motivantes de sorte qu'il traite activement les informations. Ces activités doivent permettre à l'apprenant de formuler des hypothèses, de les évaluer et de comprendre ses erreurs. Dans la partie suivante, nous présentons l'évolution des théories de l'apprentissage afin d'éclaircir la manière dont les connaissances sont acquises : par quel processus l'apprenant transforme les informations en connaissances ?

1.2 Évolution des théories de l'apprentissage

Dans le cadre des travaux en psychologie cognitive, plusieurs théories de l'apprentissage se sont succédé pour décrire et expliquer le processus d'acquisition des connaissances. Nous verrons que ces théories sont influencées par des conceptions différentes de la connaissance, de sa nature et de son origine (Murphy, 1997). En complément des mécanismes d'apprentissage du cerveau, les théories de l'apprentissage apportent un cadre pour penser la manière

27. L'effet de focalisation sur l'arme est un exemple de biais attentionnel (Loftus, Loftus, & Messo, 1987). Lorsqu'un individu est témoin d'un crime, son attention est concentrée sur l'arme du crime et inhibe les autres détails (e.g. contexte, visage du porteur de l'arme).

dont se diffusent les savoirs, pour élaborer des méthodes d'apprentissage et identifier les facteurs qui influencent l'acquisition des connaissances. Au cours de l'évolution des théories de l'apprentissage, les phénomènes d'apprentissage ont d'abord été observés par le biais des comportements, puis à travers l'activité mentale et physique ainsi que les dimensions sociales et culturelles (Illeris, 2018).

1.2.1 Du béhaviorisme au constructivisme

Quels sont les éléments à prendre en compte pour comprendre les phénomènes d'apprentissage ? Dans l'histoire des théories de l'apprentissage, le passage du béhaviorisme à l'approche cognitive et aux théories constructivistes marque un tournant dans la compréhension de l'apprentissage. L'étude de l'apprentissage se complexifie avec la prise en compte des caractéristiques du cerveau, les comportements externes et les états mentaux de l'apprenant.

Apprendre, c'est modifier son comportement - Béhaviorisme

Apparu au début du XX^{e} siècle, le béhaviorisme, ou comportementalisme, est un paradigme de la psychologie fondé sur l'étude des comportements observables. Le choix épistémique du béhaviorisme s'explique par un souci d'objectivité en opposition aux courants antérieurs de la psychologie (e.g. mentalisme, subjectivisme). Désigné comme tel pour la première fois par Watson en 1913, le béhaviorisme a été le courant de pensée dominant dans les pays anglophones pendant près de 60 ans (Illeris, 2018).

Dans le cadre du béhaviorisme, les processus mentaux tels que le raisonnement, le langage, la mémoire et les émotions sont assimilés à des comportements (Watson, 1913). Le cerveau est une « boîte noire » et seuls comptent les stimuli de l'environnement et les réponses comportementales qu'ils provoquent. Ainsi, selon le modèle Stimulus-Réponse (S-R), les stimuli de l'environnement déterminent les comportements des individus.

Les travaux de Thorndike (1911) puis de Skinner (1971) sur le conditionnement opérant ajoutent au modèle S-R la notion de conséquence [28]. Le modèle S-R-Conséquence (S-R-C) est basé sur l'observation que les comportements sont en partie déterminés par leurs conséquences, positives ou négatives. Skinner (1971) ajoute au conditionnement opérant la notion de renforcement, qui valorise un comportement afin qu'il se reproduise, et la notion de punition, recherchant l'effet inverse [29].

Dans le cadre de l'apprentissage, le conditionnement opérant consiste à enseigner des associations entre des stimuli (par exemple, combien font 2+2 ?) et des réponses comportementales (répondre 2) ajustées par des renforcements ou des punitions. Skinner (1971) élabore une machine à enseigner sur le mode du conditionnement opérant qui apportait une correction immédiate aux réponses données par l'élève. Cependant, l'apprentissage est mécanique et dépendant de l'environnement : les élèves apprennent à appliquer des procédures dans des conditions particulières qui, si elles changent, faussent les procédures.

28. Le conditionnement classique de Pavlov diffère en ceci qu'il s'intéresse aux réflexes de l'organisme et non aux renforcements et aux punitions qu'apporte l'environnement.

29. Exemple de conditionnement opérant avec une punition : 1) Stimulus : appel à projets de recherche pour obtenir un financement ; 2) Comportement : proposition du projet LOCASDA ; 3) Conséquence : rejet du projet. Conclusion : les chances de proposer à nouveau le projet LOCASDA sont réduites.

Apprendre, c'est mobiliser des connaissances antérieures - Cognitivisme

Le béhaviorisme fera l'objet de plusieurs critiques dont la plupart s'attacheront à montrer que le cerveau a des caractéristiques particulières qu'il faut prendre en compte pour étudier l'apprentissage. Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, le fonctionnement des mémoires et, par exemple, la capacité de stockage limitée de la mémoire de travail figurent parmi les caractéristiques du cerveau à considérer pour comprendre l'apprentissage.

Chomsky (1959) adresse une critique vive aux hypothèses de Skinner concernant l'apprentissage des langues et aux thèses behavioristes en général. Pour Skinner, le langage est un comportement appris par un conditionnement opérant : les comportements des autres agissent comme des renforcements et des punitions. De son côté, Chomsky oppose à Skinner sa thèse du précablage du cerveau (voir section 1.1.1). Il soutient que le conditionnement opérant ne peut expliquer comment un enfant apprend à combiner de manière infinie les lettres de l'alphabet. Selon Chomsky, l'apprentissage *via* le conditionnement opérant est incapable d'expliquer la créativité impliquée dans une conversation (e.g. former des phrases, exprimer des idées, expliquer avec une métaphore).

Les critiques du béhaviorisme sont issues des travaux menés dans le cadre de l'approche cognitive[30] de l'apprentissage née à la suite de la « Révolution cognitive » dès années 1950 (Gardner, 1993). Cette révolution donne naissance aux sciences cognitives qui s'intéressent aux états internes de l'individu et à la manière dont il traite l'information pour percevoir, parler et apprendre (Steiner, 2005). L'approche cognitive se développe en parallèle du béhaviorisme puis prend le pas sur celui-ci à partir des années 1970 entraînant une bascule « *de l'étude du comportement et de ses produits (tels les textes) à celle des mécanismes internes constitutifs de la pensée et de l'action* »[31] (Chomsky, 2000, p. 5).

Le cognitivisme, paradigme dominant de l'approche cognitive, assimile le cerveau à un système de traitement d'informations et postule l'existence chez les individus d'états mentaux (Steiner, 2005). Ces états mentaux correspondent à la disposition mentale (e.g. émotions, état de concentration) dans laquelle se trouvent les individus dans une situation donnée. Dans ce cadre, l'apprentissage est un processus interne de développement cognitif entraînant des changements durables dans le temps. Les stratégies mentales que les individus utilisent pour traiter l'information et résoudre des problèmes sont au centre de l'attention (Ertmer & Newby, 1993). Nous pouvons faire ici un rapprochement avec les significations de l'apprentissage énoncées par Dehaene (2018). Il énonce qu'apprendre, c'est « *explorer l'espace des possibles* » (p. 53), « *projeter des hypothèses a priori* » (p. 62) ou encore « *raisonner en bon statisticien* » (p. 87). Il nous semble que ces énoncés s'inscrivent dans le paradigme cognitiviste de l'apprentissage, car il s'agit d'appliquer une stratégie mentale pour résoudre un problème.

Le cognitivisme ne considère plus que les informations sont passivement accumulées par l'apprenant. Au contraire, l'apprenant intègre les nouvelles informations dans des structures

30. Nous parlons d'approche plutôt que de théorie ou de paradigme, car l'approche cognitive regroupe plusieurs paradigmes. Le paradigme dominant est le cognitivisme, mais on trouve également le connexionisme et l'évolutionnisme. Source : https://www.scienceshumaines.com/histoire-des-sciences-cognitives_fr_12433.html. Consulté le 13 avril 2020.

31. « *from the study of behavior and its product (such as texts), to inner mechanisms that enter into thought and action* » (version originale).

cognitives existantes, formées par les connaissances déjà acquises et les expériences passées (Ausubel, 1968). Ainsi, les connaissances antérieures influencent l'acquisition de nouvelles connaissances. Nous avons vu que les individus possèdent dès le plus jeune âge des connaissances intuitives sur le monde physique (voir section 1.1.1). Dès lors, les nouvelles connaissances peuvent entrer en conflit avec les connaissances intuitives existantes et freiner l'apprentissage. Ce fait est l'un des obstacles à l'apprentissage des sciences, notamment en physique, car les savoirs scientifiques s'opposent parfois à ce qui est perçu au quotidien (Bachelard, 1993) [32]. Face à cet obstacle, les enseignants, les chercheurs et certaines associations mettent au point des dispositifs pour illustrer les savoirs scientifiques et les rendre plus concrets [33]. Parmi ces enseignants du secondaire et du supérieur, il en est qui utilise le smartphone dans le cadre de leur enseignement scientifique. Et pour cause, nous verrons que les possibilités médiatiques des objets connectés sont utiles pour réduire l'obstacle que constituent les connaissances intuitives des apprenants. Ce point est à la base de l'approche des usages des objets connectés que nous développons dans le cadre de cette thèse.

Apprendre, c'est construire ses connaissances - Constructivisme

Avant d'être une théorie de l'apprentissage, le constructivisme est une théorie sur la nature, les origines et les moyens d'acquisition de la connaissance. La théorie constructiviste de la connaissance a ses racines dans la philosophie de Kant qui postule l'existence de deux réalités (Kant, 1944). Kant distingue la réalité objective, l'objet A en tant que tel, de la réalité subjective, l'objet A tel qu'il est perçu et vécu par un individu. Ainsi, la connaissance n'est pas la réalité objective, mais une production de l'esprit de l'apprenant. À partir de son expérience, l'apprenant se construit une représentation mentale de la réalité qui lui est propre (Glasersfeld, 1984).

Le constructivisme signifie ainsi que les connaissances ne sont pas transvasées passivement dans la tête de l'apprenant [34]. Au contraire, l'apprenant construit lui-même ses connaissances par un traitement actif et subjectif, en interagissant avec les nouvelles informations. Le constructivisme appliqué à l'apprentissage a donné lieu à plusieurs formes [35] : le constructivisme de Piaget, l'approche triviale, le socioconstructivisme développé à partir des idées de Vygotski, l'approche culturelle, le constructionnisme (Dougiamas, 1999). Nous nous en tenons aux théories développées par Piaget et Vygotski en raison de leur influence sur les autres théories de l'apprentissage et de leur pertinence dans le cadre de cette thèse.

Le constructivisme théorisé par Piaget tient compte des représentations mentales des individus et des mécanismes cognitifs en jeu pour traiter les informations transmises. L'apprentissage est alors un processus d'équilibrage entre la réalité et les représentations mentales

32. Les travaux de Vosniadou et Brewer (1992) montrent que les conceptions des enfants à propos de la forme de la Terre sont résistantes à l'enseignement parce que l'idée d'une Terre sphérique est contre-intuitive et s'oppose à leur expérience de tous les jours. Au fil des enseignements, les enfants changent progressivement leurs conceptions en passant par plusieurs étapes (e.g. sphère aplatie, sphère creuse) avant d'accepter l'idée d'une Terre sphérique.

33. Parmi ces dispositifs, on peut citer la fondation La Main à la pâte et sa chaîne YouTube « Bille de sciences » et les sites lesdebrouillards.com, culturesciencesphysique.ens-lyon.fr et hugolescargot.com.

34. « *Enseigner, ce n'est pas remplir un vase, [...] c'est allumer un feu.* » disait Aristophane (~445 à 386 av. J.-C.).

35. Comme le note Duffy et Cunningham (1996), le constructivisme est parfois compris sous la forme de clichés et de slogans réductionnistes tels que « l'enfant doit être acteur de ses apprentissages » ou « l'enfant doit apprendre par lui-même ».

élaborées par l'apprenant (Piaget, 1969). Au cours de leur vie, les individus construisent progressivement des représentations mentales (des *schèmes*, selon Piaget) pour comprendre et expliquer l'environnement. Ces représentations mentales décrivent la réalité telle que l'apprenant la perçoit et elles évoluent en fonction des interactions avec l'environnement. Lors de ces interactions, les nouvelles informations sont intégrées dans les représentations existantes (*processus d'assimilation*) ou alors elles sont modifiées pour permettre leur intégration (*processus d'accommodation*). Le second cas signifie que les nouvelles informations sont en inadéquation avec les représentations existantes ce qui entraîne un déséquilibre. Pour revenir à un état d'équilibre, l'apprenant doit examiner ses représentations mentales et les ré-évaluer. Pour Piaget, ce processus d'équilibrage suppose que l'apprenant traite activement les informations en manipulant des objets, concrets et mentaux, et en expérimentant.

Les stratégies d'apprentissage en accord avec la théorie constructiviste de Piaget sont actives et présentent les savoirs sous la forme de problèmes à résoudre (Murphy, 1997). Par exemple, l'application d'une stratégie constructiviste à l'apprentissage des sciences pourrait être d'amener les apprenants à suivre les étapes de la méthode scientifique. De cette façon les apprenants abordent les savoirs en commençant par la problématique à laquelle ont été confrontés les scientifiques. Également, L'environnement a un rôle important puisque c'est à partir des interactions avec celui-ci que l'apprenant construit ses connaissances, en manipulant des objets et en expérimentant. Nous pouvons faire un lien avec les piliers de l'apprentissage formulés par Dehaene qui suggèrent également un apprentissage actif dans un environnement permettant l'exploration et l'expérimentation.

1.2.2 Apprendre, c'est interagir avec les autres - Socioconstructivisme

Le développement de l'approche cognitive puis des théories constructivistes a mis l'accent sur le rôle des processus mentaux pour l'acquisition des connaissances. L'apprentissage est une interaction, mentale et concrète, entre l'apprenant et l'objet de connaissance présent dans l'environnement. Toutefois, cette conception de l'apprentissage ne prend en compte que la dimension physique de l'environnement sans considérer les dimensions sociales et culturelles. Il s'agit d'une des critiques du constructivisme de Piaget émises par Vygotski dont les idées poseront les bases du socioconstructivisme.

Influence du contexte socio-culturel sur l'apprentissage

Le socioconstructivisme postule que l'apprentissage est un processus personnel de construction des connaissances, médiatisé par les interactions sociales. Piaget conceptualise l'interaction uniquement entre un individu et un objet de connaissance, tandis que le socioconstructivisme propose une interaction entre trois parties : l'individu, l'objet et autrui (Roux, 2003 ; Vygotski, 1997). Tout comme le constructivisme, le socioconstructivisme regroupe plusieurs positions néanmoins, celles-ci ont pour source commune les travaux de Vygotski (Maitre de Pembroke & Talbi, 2002).

À partir du milieu des années 1920, Vygotky et Luria développent en parallèle du béhaviorisme une approche historico-culturelle visant à établir des liens entre la conscience, le cerveau et la culture (Illeris, 2018). Pour Vygotski, l'humain est un être social dont les fonctions cognitives les plus hautes (e.g. langage, créativité) sont socialement élaborées. Elles sont modelées

par la participation aux activités socio-culturelles de la société et par la collaboration avec les autres (Keiler, 2012).

Le développement cognitif des individus est le fruit d'apprentissages qui ont lieu autant dans le cadre des activités quotidiennes que des activités scolaires (Maitre de Pembroke & Talbi, 2002). Vygotski définit la Zone Proximale de développement (ZPD) pour distinguer le développement actuel d'un enfant et son potentiel de développement. La ZPD décrit la distance entre ce qu'un enfant peut accomplir seul et ce qu'il peut apprendre grâce à l'assistance d'une personne plus expérimentée (Vygotski, 1997). La ZPD suppose qu'un apprenant qui parvient à effectuer des tâches en collaboration à un instant T pourra effectuer cette même tâche en autonomie à l'instant T+1. Pour compléter la ZPD, Bruner développe le concept d'étayage définissant des stratégies d'interaction entre un enfant et une personne expérimentée pour favoriser l'apprentissage (Bruner, 2015).

Les expérimentations menées par Doise, Mugny, et Perret-Clermont (1975) et de Mugny et Doise (1978) confirment que les interactions sociales contribuent à la construction des connaissances. Les interactions sociales amènent les apprenants à confronter leurs représentations personnelles de la réalité. Cette confrontation met en évidence les divergences des apprenants les conduisant à discuter, débattre et, finalement, à remettre en question leurs propres représentations. L'apprentissage est le fruit de la résolution des conflits induits par les interactions sociales et la confrontation des représentations personnelles de chacun.

La formule de Carre et Charbonnier (2003), « *on apprend toujours seul, mais jamais sans les autres* » synthétise l'idée centrale du socioconstructivisme selon laquelle l'apprentissage est un processus à la fois individuel et social. Il s'agit d'un processus individuel, car la construction des connaissances demeure un processus personnel et subjectif. Cependant, le processus est influencé par les échanges avec les autres.

Nous avons présenté jusqu'ici l'évolution de la compréhension de l'apprentissage au travers de trois grandes approches théoriques : l'approche cognitive, le constructivisme de Piaget et le socioconstructivisme de Vygotski. Chacun de ces ensembles met l'accent sur une dimension importante de l'apprentissage : les stratégies mentales des individus, leurs connaissances antérieures, le rôle de l'activité et celui des interactions sociales. Cependant, ces approches théoriques ont été élaborées dans un contexte où les technologies numériques étaient absentes ou balbutiantes.

Apprendre, c'est mettre en relation des informations - Connectivisme

Pour Siemens (2005) et Downes (2005), les théories de l'apprentissage ne sont plus adaptées pour décrire l'apprentissage compte tenu de l'évolution exponentielle des TIC. En effet, ils constatent que ces théories ont été élaborées à un moment où l'impact des technologies numériques sur les modes d'apprentissage était relativement restreint tandis qu'aujourd'hui, elles donnent accès à une abondance d'informations. En conséquence, Siemens (2005) et Downes (2005) élaborent le connectivisme, une théorie de l'apprentissage adaptée au contexte créé par les TIC.

Le connectivisme s'appuie sur la métaphore du réseau pour décrire l'apprentissage. Les apprenants construisent un réseau en établissant mentalement des connexions entre des informations, des images, du texte ou encore des concepts. L'apprentissage consiste à organiser et

structurer un ensemble d'informations pour faire émerger une connaissance à partir du chaos informationnel (Downes, 2005 ; Siemens, 2005).

Siemens (2005) distingue plusieurs principes sur lesquels se basent les apprentissages connectivistes : la diversité des opinions, l'interconnexion des informations, le stockage externe à l'humain, l'importance de pouvoir facilement connaître davantage, la maintenance des connexions entre les informations. L'apprentissage a lieu lors de la participation à une communauté d'apprentissage, c'est-à-dire un espace pour interagir, partager et échanger autour d'un sujet particulier, qui est elle-même un noeud dans un réseau plus large intégrant d'autres organisations (e.g. bibliothèque, base de données, magazine) (Goldie, 2016). Le connectivisme est critiqué notamment sur son statut de théorie de l'apprentissage (Kop & Hill, 2008). La conception de l'apprentissage comme un processus émergeant des interactions et des échanges d'informations dans un contexte social se retrouve dans les travaux de Vygotski (1997). Enfin, plus radicalement, certains auteurs critiques estiment que le connectivisme décrit le processus d'apprentissage de manière trop vague pour qu'on puisse évaluer la théorie (Goldie, 2016).

Néanmoins, le connectivisme demeure une approche intéressante, car elle cherche à répondre à la question : qu'est-ce que la quantité et l'accessibilité accrue d'information, dans tous les formats, font à l'apprentissage ? Cette question est critique, car la multiplication d'objets connectés étend les TIC au monde physique, dans les objets de l'environnement, ce qui accélère la production d'informations.

1.2.3 Rôle de l'expérience dans l'apprentissage

Nous avons établi d'après les mécanismes du cerveau et les théories d'apprentissage qu'apprendre requiert l'activité et la confrontation au réel. Cette expérience permet à notre cerveau de tester la validité des hypothèses qu'il formule pour évaluer l'état de l'environnement ainsi affiner nos représentations mentales. De même, les théories de Piaget et de Vygotski mettent l'accent sur le rôle de l'expérience pour la construction des connaissances. Des auteurs se sont intéressés plus directement au rôle de l'expérience dans l'apprentissage en tentant d'en définir les contours et sa valeur épistémique.

L'expérience, source de l'apprentissage ?

En philosophie, le rapport entre l'expérience et la connaissance a donné lieu à plusieurs doctrines. Les empiristes, à l'exemple de Aristote, Bacon, Hume et Locke, considèrent que l'expérience est la source exclusive de nos connaissances (Bouveresse-Quilliot, 1998). Dans *Un essai sur l'entendement humain*, Locke soutient que « *la connaissance de l'Homme ne saurait s'étendre au-delà de sa propre expérience* » (Locke, 2007, p. 211).

Le philosophe Dewey s'est penché plus directement sur le lien entre expérience et éducation (Boutet, 2016). Selon Dewey (2005), la réalité *est* l'expérience, et la source des connaissances des individus [36]. Pour connaître, les individus font l'expérience de la réalité en agissant sur leur environnement et réfléchissant aux conséquences de leurs actes. L'expérience implique plusieurs dimensions en interaction : « *l'interprétation mentale de la situation (cognition), à*

36. D'un point de vue philosophique, Dewey rejette la doctrine empiriste au profit du pragmatisme. Pour lui, il n'existe pas une réalité objective et une réalité subjective, mais une unique réalité qui est l'expérience personnelle. Cette expérience personnelle est composée des actions de l'individu et de leurs conséquences.

laquelle sont associés un vécu émotionnel (emotions / feelings), l'engagement dans une action particulière (will), et des sensations et comportements (body) » (Bourgeois, 2013, p. 17). Ces dimensions font écho aux mécanismes d'apprentissage du cerveau que nous avons décrit section 1.1 : la juxtaposition de la cognition et des émotions et la nécessité d'un engagement actif et motivé. L'expérience est un point de convergence entre la raison, les émotions et le corps.

L'expérience suppose l'action concrète sur l'environnement et une pensée réflexive donnant un sens à l'action et à son résultat (Dewey (1969) cité par Boutet (2016)). La pensée réflexive est déclenchée par deux choses : d'une part, l'expérience d'une situation indéterminée — l'apprenant ne sait pas le lien entre ses actions et leurs conséquences — et d'autre part, l'engagement de l'apprenant. Ces deux conditions donnent lieu à ce que Dewey nomme un processus d'enquête, et que nous appelons ici une expérimentation, c'est-à-dire une expérience délibérée et contrôlée pour vérifier des hypothèses. Selon Dewey, l'expérimentation implique (Houssaye, 2013) : 1) la définition d'un problème, 2) la formulation d'hypothèses possibles, 3) la sélection des hypothèses les plus plausibles et 4) l'évaluation des hypothèses. Le processus de l'expérimentation est itératif, par exemple, l'évaluation des hypothèses peut donner lieu à un nouveau problème.

Dans le cadre de l'éducation, Dewey initie le mouvement « *apprendre en faisant* » (*hands-on learning*), repris par les pédagogies actives (e.g. pédagogie Montessori, méthode Freinet), et de l'apprentissage expérientiel. Afin que l'apprentissage ne soit pas déconnecté du réel, Dewey suggère de transformer les sujets d'étude en expérience de vie (Houssaye, 2013). Les activités d'apprentissage doivent être équivalentes à une expérience réelle : cuisiner pour apprendre la cuisine, faire de la recherche pour apprendre la recherche, etc. En outre, les activités d'apprentissage et les projets proposés doivent être en lien avec les intérêts des apprenants pour s'assurer de leur engagement et motivation.

Kolb établit le cycle de l'apprentissage expérientiel en se basant sur les travaux de Dewey, de Piaget et de Lewin[37]. L'apprentissage expérientiel fonde entièrement l'acquisition des connaissances sur l'expérience et l'expérimentation. Le cycle de Kolb décrit le processus d'apprentissage selon quatre phases (Kolb, 1984)[38] :

— l'expérimentation, lorsque l'apprenant fait l'expérience de quelque chose ;

— l'observation réfléchie, où l'apprenant réfléchit à son expérience vécue ;

— la conceptualisation, lors de laquelle l'apprenant cherche à généraliser et à construire ses connaissances à partir de son expérience ;

— l'émission d'hypothèses, quand l'apprenant élabore des hypothèses en s'appuyant sur l'étape de conceptualisation.

Les hypothèses seront évaluées lors d'une nouvelle expérience concrète. Le cycle de l'apprentissage de Kolb est intéressant, car il rend compte du passage de l'observation à la génération

37. Le cycle d'apprentissage défini par Kolb reprend et complète les étapes de la méthode de recherche formulée par Lewin (1946).

38. Kolb identifie des styles d'apprentissage suivant la préférence de l'apprenant pour l'une des phases de son cycle (e.g. style divergent s'il préfère les phases d'expérience concrète). Les théories établissant des styles d'apprentissage suggèrent qu'un individu apprendra mieux si l'enseignement est adapté au style de l'apprenant. Toutefois, cette idée répandue n'a pas pu être démontrée et il ne semble pas exister de corrélation entre la préférence pour certaines modalités d'apprentissage et de meilleurs résultats (Coffield et al., 2004).

d'hypothèses et à leur évaluation concrète. Certaines critiques des théories de Kolb pointent une vision idéalisée de l'apprentissage où l'apprenant suit scrupuleusement et inéluctablement les phases du cycle [39]. En effet, la réalité est plus complexe et l'apprenant peut ne pas suivre l'ordre des phases ni passer par l'une des phases du cycle. Par exemple, l'apprenant peut faire plusieurs allers-retours entre deux étapes avant de poursuivre ou sauter une étape.

L'expérience et l'expérimentation sont donc étroitement liées à l'apprentissage, notamment parce qu'ils entraînent un engagement actif et permettent d'évaluer *via* le retour sur erreur, les connaissances de l'apprenant. Toutefois, la confrontation au réel est-elle la seule valeur de l'expérience ? L'engagement corporel, l'une des dimensions inhérentes à l'expérience, contribue-t-il à la cognition ?

Cognition incarnée : la connaissance dans le corps

Le cognitivisme, le paradigme dominant des sciences cognitives à partir des années 1950, a fait l'objet de critiques parce que la cognition était pensée en dehors du contexte corporel et environnemental (Steiner, 2005). Or, comme nous l'avons vu en section 1.1.4, les travaux de Damasio sur le rôle des émotions dans la prise de décision montrent que la cognition, le corps et l'environnement sont en interaction.

La cognition incarnée est un paradigme des sciences cognitives qui considère que sans le corps pour sentir et agir, les pensées sont vides. Les états corporels agissent sur les fonctions cognitives et, inversement, les états mentaux influencent le corps (R. A. Wilson & Foglia, 2011). La cognition incarnée postule que le rôle de la cognition est de supporter l'action et donc que les fonctions sensori-motrices sont à la base de la cognition (M. Wilson, 2002) [40].

L'une des thèses de la cognition incarnée est que la mémoire, au sens général, est incarnée et intégrerait les informations sensori-motrices générées par interactions avec l'environnement (Glenberg, 1997). Plusieurs études suggèrent que la présentation d'un stimulus (e.g. une lettre) active dans le cerveau les aires responsables des fonctions sensori-motrices (Sullivan, 2018). L'association entre la perception d'un stimulus et l'activation sensori-motrices permettrait de faciliter le rappel des informations.

Cette association perception-action est soutenue par l'existence des neurones miroirs et leur rôle dans la compréhension des situations et des actions (Caramazza et al., 2014). Les neurones miroirs ont la particularité d'être stimulés à la fois lors de la réalisation d'une action et lors de l'observation de cette même action (Keysers & Gazzola, 2010). Dans ce second cas, l'activité des neurones miroirs imite les actions observées par l'individu : observer une personne taper dans un ballon active les mêmes neurones miroirs que si l'action était réellement effectuée. L'observation et l'exécution d'une action mobilisent les représentations mentales et les représentations motrices associées à l'action ce qui favorise le rappel des informations encodées dans la mémoire.

La revue de la littérature effectuée par Castro-Alonso, Paas, et Ginns (2019) fait état des effets de la manipulation, des gestes et des actions sur l'apprentissage des sciences en s'ap-

39. Source : http://reviewing.co.uk/research/experiential.learning.htm#Critiques_of_David_Kolbs_theory. Consulté le 8 janvier 2020.

40. L'hypothèse avancée par les représentants de la cognition incarnée est liée à l'évolution naturelle. La survie d'un individu étant dépendante de sa capacité à agir dans l'environnement, l'objectif premier de la cognition est de diriger les actions pour survivre.

puyant sur les hypothèses de la cognition incarnée. Pour les auteurs, la manipulation implique les mains et un objet, le geste désigne uniquement les mains et l'action est une opération mentale. La synthèse de Castro-Alonso et al. (2019) suggère que la manipulation favorise l'apprentissage : lorsqu'il s'agit d'objets virtuels (plutôt que physiques), lorsque l'apprenant exécute lui-même la tâche (plutôt que d'observer) ou lorsqu'il s'agit d'un entraînement manuel (plutôt que mental).

L'étude de Barrett et al. (2015) montre que la manipulation d'objets virtuels (conçus pour apprentissage) conduit à de meilleurs apprentissages qu'avec des objets physiques. Les auteurs ont comparé les performances de deux groupes d'apprenants pour la résolution de problèmes en chimie après une séquence d'apprentissage avec des objets physiques ou virtuels. Selon les auteurs, l'objet virtuel est plus efficace pour l'apprentissage, car sa conception ne permet que des manipulations signifiantes pour l'apprentissage. Au contraire, les apprenants ont plus de liberté en manipulant un objet physique et peuvent ainsi se perdre avec des manipulations inutiles. Cet exemple souligne un point que nous avons évoqué en section 1.1.2 : l'importance du guidage de l'attention des apprenants vers les informations pertinentes. Les objets d'apprentissage doivent être conçus en intégration des éléments pour guider l'attention de l'apprenant, par exemple, en créant des contraintes spécifiques. Les résultats rapportés par Castro-Alonso et al. (2019) indiquent que les gestes favorisent l'apprentissage, mais davantage lorsqu'ils sont exécutés par l'apprenant lui-même plutôt que l'observation. Korbach et al. (2020) étudient l'effet des gestes de pointages et de traçages sur les performances d'apprentissage. L'expérience avec un groupe contrôle et un groupe auquel on demande explicitement d'utiliser les gestes, suggère que l'effet bénéfique s'explique par un niveau d'attention plus élevé grâce aux gestes et par une augmentation de l'activité cognitive.

À partir des travaux de Dewey sur le lien entre expérience et connaissance et l'influence du corps sur la cognition, nous avons vu que l'expérience et l'expérimentation jouent un rôle clé dans la construction des connaissances. Avec l'expérience, la confrontation au réel favorise l'engagement de l'apprenant en lui apportant un terrain pour formuler et tester ses hypothèses. D'autre part, l'engagement corporel que suscite l'expérimentation agit sur l'attention et la mémoire et donc améliore le traitement des informations. Les mécanismes du cerveau, les théories de l'apprentissage et le rôle de l'expérience fournissent un cadre dans lequel peuvent être élaborées de manière concrète et pratique des stratégies pour guider le processus d'apprentissage.

1.3 Stratégies d'apprentissage actif

Une stratégie d'apprentissage peut être une procédure à suivre, un objectif, concerner un domaine particulier (e.g. affectif, cognitif), un contexte d'apprentissage ou encore une tâche visée (Bégin, 2008). L'objectif d'une stratégie est de créer les conditions d'un apprentissage en structurant les comportements de l'apprenant en fonction du cadre donné par une théorie de l'apprentissage. Dans cette thèse, nous nous intéressons aux stratégies d'apprentissage actif, qui s'inscrivent dans les théories constructivistes, favorisent l'engagement actif et permettent d'apprendre par soi-même.

1.3.1 Contextualiser l'apprentissage

Dans la section 1.2.3, nous avons vu que l'expérience et l'expérimentation sont l'une des sources de l'apprentissage, notamment parce qu'elles permettent une confrontation au réel. Ce dernier point est l'objectif des stratégies d'apprentissage actif qui cherchent à contextualiser l'apprentissage en reliant les connaissances à des éléments concrets et réels.

Apprentissage situé et authentique

Selon le CNRTL, l'authenticité qualifie une chose qui fait autorité, qui ne peut être remise en doute, car elle serait conforme à un original ou à un modèle [41]. Le caractère authentique d'un apprentissage réside dans son degré de proximité avec le contexte réel de mobilisation des connaissances apprises. Il doit exister une correspondance entre les conditions dans lesquelles les connaissances ont été apprises (e.g. type d'activité, type de matériel, type de problème) et les conditions réelles de leur application.

La recherche de l'authenticité trouve une justification dans la théorie de l'apprentissage situé élaborée par Lave et Wenger (1991) [42]. Lave postule que toute connaissance est nécessairement ancrée dans un contexte physique, social et culturel. Les individus construisent leurs connaissances dans et par l'action, elle-même comprise dans le cadre d'activités socio-culturelles spécifiques (Brougère, 2008 ; Lave, 1977). Brougère rappelle l'exemple des mathématiques donné par Lave pour montrer l'ancrage socio-culturel de l'apprentissage : « *Comme l'arithmétique des tailleurs, l'arithmétique apprise à l'école est un système fonctionnel au sein duquel certains types de problèmes sont familiers et aisément résolus et d'autres non* » (Brougère, 2008 ; Lave, 1977, p. 180). Les mathématiques apprises dans le cadre scolaire diffèrent de celles appliquées par les tailleurs, car ces deux activités socio-culturelles mettent en jeu des principes et des problèmes différents. L'apprentissage est l'acquisition des connaissances mobilisées par une communauté (e.g. les tailleurs) dans le cadre d'activités socio-culturelles (Brougère, 2008) [43].

Outre la collaboration entre les apprenants, l'apprentissage authentique suppose que l'application des connaissances et les tâches effectuées par l'apprenant soient liées à des problèmes réels (A. J. Herrington & Herrington, 2007). Cela facilite la transition des conditions d'apprentissage aux conditions réelles et cela donne du sens aux connaissances apprises. Le rapprochement à la réalité peut avoir lieu à plusieurs niveaux (The Cognition And Technology Group At Vanderbilt, 1990) :

— matériel, e.g. appliquer une méthode d'analyse à des données réelles ;

— tâches, e.g. développer le site web d'un projet dans le cadre d'un cours ;

— processus d'apprentissage, e.g. appliquer la méthode scientifique pour résoudre un problème.

41. Source : https://www.cnrtl.fr/definition/authenticit%C3%A9. Consulté le 6 avril 2020.

42. L'apprentissage situé rentre dans le paradigme de la cognition située qui positionne la connaissance non pas dans la tête de l'individu, mais dans ses interactions avec l'environnement (J. S. Brown, Collins, & Duguid, 1989). Ainsi, connaître, c'est agir dans un contexte spécifique.

43. Le doctorat étant la formation à la recherche par la recherche, il constitue une forme d'apprentissage situé. Le doctorant apprend à suivre et respecter les méthodes, les modes et les outils de production scientifique de sa communauté de recherche.

L'authenticité de l'apprentissage est particulièrement recherchée dans le cadre de l'éducation scientifique où sont déployés des dispositifs plaçant les concepts scientifiques dans des problèmes réels (Bennett, Lubben, & Hogarth, 2007). Les concepts scientifiques sont introduits via la présentation du phénomène ou du problème qu'ils décrivent ainsi que du contexte de leur découverte puis, progressivement, la théorie est abordée. L'objectif est que les apprenants soient confrontés à la réalité décrite par le concept scientifique et le raisonnement qui a conduit à son élaboration.

Nous voyons que ce qui ressort de la contextualisation de l'apprentissage n'est pas tant la correspondance physique de l'activité avec la réalité que la correspondance cognitive. L'authenticité cognitive signifie que l'apprenant est immergé dans une situation impliquant la réalisation de tâches cognitives similaires aux conditions réelles (J. Herrington, Oliver, & Reeves, 2003). Cet aspect est l'une des caractéristiques des stratégies d'apprentissage basées sur la résolution de problèmes.

Apprendre, c'est résoudre des problèmes

Les stratégies d'apprentissage basées sur la résolution de problèmes s'inscrivent dans les théories constructivistes, car elles amènent l'apprenant à répondre par lui-même à un problème et à collaborer. Un problème étant définie par un état initial insatisfaisant, un état-objectif à atteindre et des obstacles tels que l'absence d'une méthode précise pour passer de l'état initial à l'état-objectif (Mayer & Wittrock, 1996). Le processus de résolution, qu'il s'agisse de l'application d'une méthode, d'une investigation ou de la réalisation d'un projet, implique l'idée de l'enquête propre à Dewey.

L'apprentissage par la résolution de problèmes a été élaboré en 1970 par la faculté de médecine de l'Université de McMaster (Ontario) constatant que les pédagogies précédentes préparaient mal les étudiants à la réalité du terrain (Leclercq & Van der Vleuten, 1998). En petits groupes, les apprenants sont confrontés à un problème réel, ils identifient leurs besoins d'apprentissage et s'informent en conséquence. Un « bon problème » doit éveiller la curiosité des apprenants, être d'une difficulté abordable et similaire à ce que les apprenants pourraient rencontrer dans leur futur métier (Leclercq & Van der Vleuten, 1998) [44]. Schmidt (1983) a identifié les sept étapes suivies par les étudiants dans le cadre d'un apprentissage par résolution de problèmes :

— l'identification et la clarification des termes ;

— la définition du problème ;

— l'analyse (qu'est-ce qui est connu ? qu'est-ce qui ne l'est pas ?) ;

— la structuration des idées ;

— la formulation des objectifs ;

— la réalisation d'une étude individuelle ;

— la réalisation d'une synthèse.

44. En section 1.1.2, lorsque nous avons décrit le rôle de l'engagement cognitif pour stimuler la capacité d'apprentissage du cerveau, il a été montré qu'un exercice ne doit être ni simple ni trop difficile afin de renforcer l'engagement de l'apprenant et augmenter l'effort cognitif.

La résolution d'une situation-problème implique une collaboration entre les apprenants et un recours à des stratégies mentales telles que la planification des tâches, auto-correction et auto-régulation des apprentissages.

L'apprentissage par le biais de l'investigation (*inquiry-based learning*) est un mode d'apprentissage où les apprenants résolvent un problème en utilisant leurs compétences d'investigation (Pedaste et al., 2015). L'investigation est un processus d'enchaînement de questions liées et traitées par la recherche d'informations ; chaque réponse initie une nouvelle question (Hintikka, 1981). Selon un processus cyclique, une situation est d'abord présentée à l'apprenant qui doit ensuite formuler des questions si celles-ci ne sont pas déjà formulées (Pedaste et al., 2015). Le questionnement étant le moteur de l'activité d'apprentissage, l'apprenant va mener des recherches, formuler des hypothèses, élaborer et tester des solutions en vue de répondre aux questions. L'investigation se clôture par une discussion et une explication des solutions. Dans ce cadre, le rôle de l'enseignant est de faciliter l'investigation en guidant les recherches et en proposant un environnement riche en ressources.

De par sa ressemblance à la méthode scientifique, l'apprentissage par l'investigation est appliqué à l'enseignement des sciences, pour mettre en place des activités pratiques. Cette stratégie d'apprentissage a l'intérêt de confronter les apprenants à l'exercice de la méthode scientifique et est considérée comme l'une des méthodes d'apprentissage les plus adaptées à cette discipline (García-Carmona, 2020).

L'apprentissage par projet rejoint également les stratégies de résolution de problèmes, car une situation-problème est présentée à l'apprenant à laquelle il doit répondre par le biais d'une production concrète (Krajcik & Blumenfeld, 2006). L'apprentissage par projet a été proposé par Kilpatrick en 1918 qui préconisait, tout comme Dewey, un enseignement basé sur l'expérience et la réalisation d'un objet concret, résultant de l'activité de l'esprit (Pecore, 2015). La réalisation est individuelle ou collective, et doit incorporer le résultat d'apprentissage de nouvelles connaissances. La première étape, la définition des buts et objectifs du projet, peut être fixée par l'enseignant ou bien constituer un premier travail pour les apprenants. Ensuite, les apprenants travaillent en autonomie à la réalisation du projet, ce qui inclut la recherche d'informations, la conduite d'expérimentations, un travail d'analyse et d'autocritique ainsi que la collaboration. Le processus d'apprentissage est clôturé par un bilan lors duquel les résultats des projets menés par les groupes d'étudiants sont discutés avec une prise de recul par rapport à ce qui a été accompli.

Limites des stratégies de résolution de problèmes

L'apprentissage par résolution de problèmes a l'avantage de proposer un mode actif d'apprentissage et de favoriser la construction des connaissances par les apprenants. Cependant, cette stratégie d'apprentissage fait reposer une charge cognitive importante sur l'apprenant.

La théorie de la charge cognitive, élaborée à partir des travaux de Sweller (1988), Paas (1992) et Sweller, Merrienboer, et Paas (1998), fournit un cadre permettant d'expliquer les performances des apprenants compte tenu du matériel pédagogique et de la présentation des informations. Pour construire ses connaissances, l'apprenant mobilise des ressources cognitives afin de traiter les informations transmises dans le cadre de l'activité d'apprentissage. La charge cognitive met en perspective les ressources cognitives nécessaires dans le cadre de

l'activité d'apprentissage et les limites de la mémoire de travail (voir le modèle de Baddeley présenté avec les Types de mémoire, Figure 1.5). Deux types de charges cognitives sont distingués (Sweller et al., 1998) : la charge cognitive intrinsèque, propre à la difficulté du concept à apprendre, et la charge cognitive extrinsèque dépendante de l'activité d'apprentissage. Cette charge extrinsèque est subdivisée entre la charge utile, ce qui est nécessaire à l'apprentissage, et la charge externe qui désigne les traitements cognitifs inutiles. Cela peut être dû à des informations manquantes, incomplètes, mal présentées ou encore mal organisées, mais également causé par de mauvaises explications. Lorsque la charge cognitive imposée par l'activité d'apprentissage est trop importante, elle entraîne une surcharge cognitive qui peut mettre en échec l'apprenant. Ainsi, l'objectif est de limiter la charge cognitive extrinsèque en présentant les informations de façon à faciliter leur traitement.

Sweller, van Merriënboer, et Paas (2019) rappellent plusieurs des effets induits par la théorie de la charge cognitive, effets pouvant améliorer ou freiner l'apprentissage [45]. On peut noter au moins deux effets liés à l'apprentissage par résolution de problèmes. Le premier est l'effet d'absence d'objectif (*goal-free effect*) : celui-ci se produit lorsque l'apprenant est confronté à un problème avec un objectif spécifique. Au début de l'apprentissage, un apprenant confronté à un problème avec un but précis ne dispose pas de suffisamment de connaissances pour résoudre le problème de manière pertinente. L'apprenant fait une analyse moyens-fins l'obligeant à saturer en permanence sa mémoire de travail avec toutes les informations liées au problème (e.g. état initial, état-objectif, obstacles) (Tricot, 1998). Le second effet qu'implique l'apprentissage par résolution de problèmes est l'effet de l'exemple de problème résolu (*worked example effect*, Sweller (1988)). Cet effet décrit la réduction de la charge cognitive qu'entraîne la présentation d'exemples de problèmes résolus, notamment lorsque sont pointés les aspects pertinents de l'exemple. La présentation de problèmes résolus permet à l'apprenant d'identifier les opérations à effectuer et d'inférer une démarche de résolution qu'il pourra appliquer en autonomie. Ainsi, il est préférable de précéder une activité de résolution de problèmes par une présentation d'exemples de problèmes résolus.

D'une manière générale, ces effets suggèrent qu'une attention particulière doit être portée au volume d'informations transmises à l'apprenant ainsi qu'à leur présentation, sous la forme d'un problème, d'un texte ou d'une image. Ce constat fait écho au propos de Dehaene (2018) sur la nécessité de guider et d'orienter l'attention vers les informations pertinentes. Sans cela, l'apprenant risque de se concentrer sur les informations inutiles ou de prendre en compte toutes les informations dont ils disposent et ainsi être surchargé.

Dans le cadre de notre recherche, nous verrons que les objets connectés sont utilisés dans des activités d'apprentissage pour représenter les informations numériques de manière concrète et palpable. En particulier, les travaux menés en ce sens explorent les effets sur l'activité cognitive (e.g. mémoire, attention) de modalités « naturelles » pour l'humain telles que la voix ou le touché pour transmettre les informations.

45. Par exemple, l'effet de division de l'attention (*split attention effect*) se produit lorsque l'apprenant doit traiter séparément des informations de plusieurs types (e.g. texte, image) alors que celles-ci requièrent d'être unifiées pour comprendre.

1.3.2 Apprendre à apprendre

La contextualisation de l'apprentissage et la résolution de problèmes accordent de l'autonomie à l'apprenant ce qui stimule ses capacités d'auto-direction. Par exemple, l'apprenant est libre pour choisir une démarche de résolution de problème ou pour rechercher des informations. Cela suppose d'anticiper, de planifier, de contrôler ses actions (physiques et cognitives) et finalement, d'apprendre à apprendre.

Métacognition

Apprendre à apprendre est soutenu par la métacognition, littéralement la cognition sur la cognition : un ensemble de capacités cognitives permettant de comprendre et d'évaluer son fonctionnement cognitif. Flavell a créé le terme qu'il définit comme se rapportant « *à l'évaluation active, à la régulation et l'organisation de ses processus en fonction des objets cognitifs ou des données sur lesquelles ils portent habituellement pour servir un but ou un objectif concret* » (Flavell, 1976, p. 232). Plus simplement, la métacognition est « *la connaissance et le contrôle qu'un système cognitif peut avoir de lui-même et de son propre fonctionnement* » (Chartier & Lautrey, 1992). Les chercheurs travaillant sur la métacognition distinguent trois aspects : les connaissances métacognitives, les stratégies métacognitives et les expériences métacognitives.

Les connaissances métacognitives sont les connaissances qu'a un individu du fonctionnement de la cognition (Frenkel, 2014) [46]. Ces connaissances métacognitives concernent les personnes, l'exécution de tâches ou encore de stratégies mentales (e.g. stratégies de révision). Ces connaissances sont introspectives et conscientes, mais concernent aussi bien le fonctionnement cognitif personnel que celui des autres. Par exemple, cela peut être la conscience de ses forces ou de ses faiblesses pour retenir des informations spécifiques : « *je confonds souvent le calcul de l'aire du cercle avec celui du périmètre* ».

Les stratégies métacognitives visent la régulation et la surveillance de la cognition (A. L. Brown, 1987). Ce sont les stratégies que les individus utilisent délibérément et consciemment pour planifier et contrôler leurs processus cognitifs en vue d'un objectif. La régulation comporte deux opérations mentales (Frenkel, 2014) : la préparation de l'apprentissage et la supervision de l'apprentissage. La préparation est l'anticipation du déroulement des événements pour atteindre un objectif et la planification des tâches en conséquence. La supervision comporte la surveillance continue pour évaluer l'avancement par rapport à un objectif ainsi que l'évaluation finale comparant les résultats et l'objectif.

Les expériences métacognitives désignent les prises de conscience par l'individu de ses processus cognitifs en lien avec la tâche qu'il réalise. Cette prise de conscience est produite par un processus continu de *monitoring* de la cognition qui permet ensuite de la contrôler (T. O. Nelson & Narens, 1990). L'individu prend conscience de son activité cognitive ou du résultat qu'elle produit, puis il émet un jugement sur son activité cognitive (Frenkel, 2014). De ce fait, les expériences métacognitives sont des portes d'entrée pour la mobilisation de connaissances et de stratégies métacognitives. À partir du jugement que l'individu émet sur son activité cognitive, il peut adopter une nouvelle stratégie basée sur ses connaissances métacognitives.

46. La notion de connaissance métacognitive a été initialement définie par Flavell (1976).

Les méthodes pour développer les capacités métacognitives amènent l'apprenant à s'interroger sur la manière dont il peut conduire la réalisation de tâches liées à l'apprentissage. Comment planifier une révision ? Comment évaluer son niveau de connaissance pour diriger la révision ? Plusieurs méta-analyses montrent que les capacités métacognitives permettent de prédire la réussite scolaire (Donker et al., 2014 ; Losinski et al., 2014 ; Ohtani & Hisasaka, 2018).

Apprendre, c'est résister à ses automatismes

La métacognition repose en partie sur la capacité à résister aux automatismes de pensée et aux réflexes en les inhibant. Cette résistance consiste en l'inhibition dans le cerveau des circuits neuronaux activés lors d'idées réflexes pour laisser place à une pensée réfléchie. L'inhibition est liée aux fonctions exécutives qui permettent le contrôle du traitement des informations, de l'utilisation de la mémoire de travail ou encore de l'orientation de l'attention [47].

La distinction entre une pensée rapide et réflexe et une pensée réfléchie a sa source dans les travaux menés par Khaneman, professeur de psychologie cognitive et d'économie [48]. Dans son livre *Système 1 Système 2. Les deux vitesses de la pensée*, (Kahneman, 2018) explique et illustre les deux modes de pensée dont la dichotomie explique les prises de décision irrationnelles en contexte économique. Le système 1 a un fonctionnement heuristique, il suit un ensemble de règles intuitives et des raccourcis permettant de trouver rapidement une solution aux problèmes rencontrés. Ainsi, le système 1 soutient un mode de pensée réflexe, automatique, intuitif et créatif, mais responsable d'erreurs d'appréciation et sujet à des biais cognitifs (Houdé & Borst, 2014). À l'inverse, le système 2 est algorithmique, il fait appel à des raisonnements logico-mathématique pour résoudre les problèmes. Le système 2 soutient un mode de pensée plus lent et réfléchi, qui demande un effort de concentration et permet de résoudre des problèmes complexes.

Les travaux de Houdé et de son équipe se basent sur la dichotomie proposée par Khaneman pour souligner le rôle de la capacité d'inhibition dans la réflexion (Houdé & Borst, 2014). Houdé distingue trois systèmes de pensée : le système 1 heuristique, le système 2 algorithmique et le système 3 d'inhibition. Lors de la présentation d'un problème, le système 1 est mobilisé de manière automatique et lorsqu'il est mis en défaut, le système 2 s'active. Le système 3 fait partie des capacités métacognitives dédiées au contrôle de la cognition. Il permet d'inhiber le système 1 pour que le problème présenté soit plutôt traité par le système 2 (voir la Figure 1.9). Autrement dit, le système 3 représente la capacité à maîtriser ses réflexes et automatismes afin de résoudre les problèmes de manière réfléchie.

47. La distinction entre les fonctions exécutives et les capacités métacognitives est artificielle puisque les deux concepts réfèrent au contrôle de la cognition. Les neuroscientifiques parlent de fonctions exécutives pour désigner des mécanismes métacognitifs de bas niveau (e.g. inhibition, orientation de l'attention) tandis que les psychologues cognitivistes font référence à des mécanismes cognitifs de haut niveau (e.g. s'interroger consciemment sur ce qu'on réalise).

48. Khaneman et son collègue Tversky ont conduit une série d'études en 2002 ayant abouti à la théorie des perspectives, base de l'économie comportementale. Cette théorie met, entre autres, en évidence le fait que les individus ont une aversion à la perte ; ils accordent une valeur plus forte à une perte qu'à des gains.

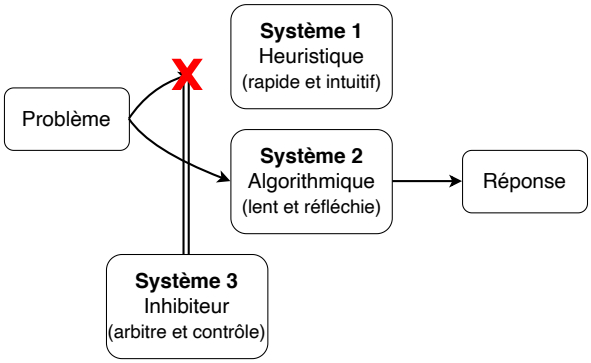


FIGURE 1.9 – **Contrôle inhibiteur de la cognition**. Adapté de Houdé (2018).

À travers la formule *Apprendre à résister*, Houdé (2019) résume le principe de ses travaux : on apprend de deux façons, soit en automatisant par la pratique, soit en inhibant ses automatismes pour utiliser le système algorithmique.

Apprentissage tout au long de la vie

Au-delà de son utilité pour les stratégies d'apprentissage actif, savoir apprendre devient une capacité importante étant donné la transformation des activités quotidiennes et professionnelles par les technologies. Il ne s'agit pas seulement d'apprendre à apprendre, mais aussi d'apprendre tout au long de la vie. À partir des années 1970 et dans le prolongement des grandes théories de l'apprentissage, la compréhension de l'apprentissage évolue pour devenir un vecteur d'émancipation sociale (Illeris, 2018 ; Alheit & Dausien, 2005). Ce changement est marqué par le rapport de l'UNESCO *Learning to be - The world of education today and tomorrow* (Faure et al., 1972 ; Illeris, 2018) reconnaissant que l'apprentissage est nécessaire pour la vie sociale, citoyenne et démocratique.

Dans ce contexte, les frontières entre les apprentissages formel, informel et non formel deviennent floues. L'apprentissage formel correspond à la formation initiale, liée au système éducatif, tandis que l'apprentissage non formel désigne la formation continue, qui n'aboutit généralement pas à une qualification reconnue (IsaBelle, Gélinas Proulx, & Meunier, 2014). L'apprentissage informel englobe les activités quotidiennes que l'individu met en œuvre pour s'informer et approfondir ses connaissances, en dehors du cadre donné par une organisation (Livingstone, 1999 ; Cristol & Muller, 2013). Cristol et Muller (2013) notent que l'apprentissage informel demeure un concept flou aux formulations multiples : « *apprentissages accidentels, intentionnels, incidents, implicites, nomades, expérientiels, émergents, actifs (ou apprentissages par l'action), autodirigés, autonomes, entre pairs, non formels, pratiques* ». Néanmoins, l'apprentissage informel est ancré dans l'expérience, quotidienne et professionnelle, ce qui le relie aux idées théoriques de Dewey et de Kolb (Conlon, 2004).

L'un des postulats du rapport de l'UNESCO est que l'apprentissage formel, où l'on apprend des connaissances définitives, n'est plus suffisante compte tenu de l'abondance d'informations et la rapidité des changements technologiques et sociaux. L'apprentissage tout au long de la vie apparaît comme un enjeu pour l'épanouissement des individus dans un contexte technologique et socio-économique mouvant (Faure et al., 1972) [49].

49. Toutefois, notons que sous la promotion à l'allure humaniste de l'apprentissage tout au long de la vie,

Le développement de l'apprentissage tout au long de la vie est soutenu par les TIC supportant de nombreux moyens pour apprendre : encyclopédie libre, cours en ligne, tutoriel, vidéo ou encore applications mobiles. Les individus apprennent au gré des aléas de leur vie, au sein des institutions scolaires, au et pour leur travail, pour leurs loisirs, etc. L'apprentissage tout au long de la vie et plus généralement l'apprentissage en général pose deux défis. Le premier est celui de la formation des individus aux technologies numériques leur permettant de rechercher et d'évaluer l'information et d'avoir un regard critique sur les outils qu'ils mobilisent (Cormerais et al., 2017). Le second défi est la conception de dispositifs permettant d'apprendre efficacement, en tenant compte des mécanismes d'apprentissage du cerveau et du processus de construction des connaissances. Les objets connectés et l'IdO figurent parmi les nouvelles technologies, dont les possibilités, pour en tant qu'outils pour l'apprentissage restent à interroger. Ainsi, dans cette thèse, nous nous attachons à étudier les usages existants et possibles des objets connectés et les modalités d'apprentissage qu'ils peuvent soutenir.

*
* *

L'apprentissage est au cœur du fonctionnement du cerveau, lui permettant de poursuivre son développement après la naissance et de s'adapter à l'environnement. Dans ce chapitre, nous avons vu que, grâce à la plasticité cérébrale, les expériences quotidiennes et les interactions avec l'environnement façonnent le développement du cerveau, ajustent et complètent les connaissances antérieures. La plasticité d'apprentissage est modulée par plusieurs mécanismes clés : l'attention, l'engagement actif, le retour sur erreur, les mémoires et les émotions. Après avoir décrit l'état des connaissances sur le processus d'apprentissage, nous avons postulé que la possibilité de formuler des hypothèses, d'explorer et d'expérimenter favoriser la construction des connaissances. Les théories de l'apprentissage ont mis en lumière les différentes dimensions de l'acquisition des connaissances : la modification du comportement, l'intégration avec des connaissances antérieures, le rôle de l'activité et des interactions sociales. En outre, les connaissances acquises sont étroitement liées à l'action, elle-même prise dans un contexte social, physique et culturel spécifique. Ainsi, nous avons montré que les conditions d'un apprentissage optimal devraient inclure l'engagement cognitif et physique, la possibilité d'expérimenter et la confrontation à des situations-problèmes réelles. Dans un monde où les technologies évoluent de manière exponentielle en transformant les activités personnelles et professionnelles, l'enjeu réside à la fois dans la capacité à apprendre et dans les moyens disponibles pour favoriser l'apprentissage. Dans le chapitre suivant, nous examinerons la manière dont les TIC peuvent être intégrées dans des dispositifs d'apprentissage afin d'opérer une médiation entre les savoirs et l'apprenant afin de stimuler le processus de construction des connaissances.

---

et plus récemment de la « société apprenante » (Taddei, Becchetti-Bizot, & Houzel, 2017), se cachent des intérêts économiques. À certains égards, la promotion de l'apprentissage n'est que la reformulation « cool » de l'injonction ambiante du néolibéralisme à l'individu entrepreneur de lui-même, performant, flexible et adaptable aux lois du marché (Castoriadis, 1996).

Chapitre 2

Connaître, savoir

> The Information Age offers much to mankind, and I would like to think that we will rise to the challenges it presents. But it is vital to remember that information — in the sense of raw data — is not knowledge, that knowledge is not wisdom, and that wisdom is not foresight.
> But information is the first essential step to all of these [1].
>
> – Arthur C. Clarke, 2003

Des médias audiovisuels aux systèmes d'intelligence artificielle (SIA) en passant par les ordinateurs et les appareils mobiles, les TIC ont eu et continuent d'avoir une croissance exponentielle. Chaque nouveau stade dans l'évolution technologique a engendré des effets sociaux, culturels, politiques, économiques et cognitifs (Serres, 2007). En diversifiant les formes de transmission de l'information, l'évolution des TIC a stimulé le développement de nouveaux modes d'apprentissage. Les possibilités médiatiques apportées par les TIC sont articulées avec le processus d'apprentissage pour favoriser la construction des connaissances.

L'apprentissage, processus typiquement propre aux êtres vivants, devient de nos jours un processus artificiel. En effet, l'apprentissage automatique (*machine learning*) et les méthodes d'apprentissage profond (*deep learning*) sont à l'origine d'incroyables percées dans la vision par ordinateur, la reconnaissance de la parole, la traduction automatique, le traitement du langage naturel, l'analyse d'images médicales, les voitures autonomes, les jeux et la robotique.

Dans ce chapitre, nous étudions les usages des technologies pour favoriser l'apprentissage humain. En premier lieu, nous décrivons la manière dont les informations transmises dans l'environnement sont traitées et reçues par l'apprenant. Pour cela, nous présentons le processus de perception (2.1.1) et nous rappelons la distinction entre la donnée, l'information, la connaissance et le savoir (2.1.2). En second lieu, nous examinons la médiation opérée par les technologies entre l'apprenant et le savoir. Nous rappelons les définitions des notions de médiation, de dispositif et d'usage (2.2.1) puis nous exposons les modes d'apprentissage soutenu

1. Traduction personnelle : « *L'Âge de l'Information offre beaucoup à l'humanité, et j'aimerais penser que nous serons à la hauteur des défis qu'il présente. Mais il est vital de se rappeler que l'information – au sens de données brutes – n'est pas la connaissance, que la connaissance n'est pas la sagesse, et que la sagesse n'est pas la clairvoyance. Mais l'information est la première étape essentielle à tout cela* ».

par le web social, l'informatique mobile, et les technologies de réalité virtuelle et de réalité mixte (2.2.3). Nous explorons ensuite les usages de l'apprentissage artificiel pour favoriser l'apprentissage humain. Dans cette optique, nous explicitons les approches préconisées pour concevoir des SIA (2.3.1) puis nous mettons en évidence les usages effectifs de l'apprentissage artificiel pour l'apprentissage humain (2.3.2). Nous concluons avec les enjeux posés par les méthodes d'apprentissage artificiel ainsi que, plus généralement, par les SIA pour l'éducation (2.3.3).

2.1 Apprentissage humain : percevoir et comprendre l'environnement

En accord avec les mécanismes d'apprentissage du cerveau et les théories de l'apprentissage, nous avons souligné que le processus de construction des connaissances est stimulé par l'engagement de l'apprenant, lorsqu'il explore, pose des hypothèses et expérimente (voir 1.2.3). Cet engagement est nécessaire pour traiter activement les informations transmises, usuellement par l'enseignant, mais aussi par un dispositif médiatique. Cependant, avant que l'apprenant s'approprie les informations pour construire ses connaissances, quels sont les processus en jeu dans la réception des informations ? Comment l'apprenant fait-il sens des stimuli présents dans son environnement pour recevoir les informations liées aux savoirs qu'il étudie ?

L'information, «*le plus vicieux des caméléons conceptuels* » (von Foerster cité par Morin, 2008, p. 290), est un concept clé pour décrire les relations entre les stimuli de l'environnement, les connaissances de l'apprenant et les savoirs qui lui sont présentés. Dans cette section, nous verrons que ces relations correspondent aux processus de perception de l'environnement et d'apprentissage. Nous explicitons les mécanismes de la perception à partir des travaux issus de la psychologie cognitive et des neurosciences. Puis, nous mettons ce processus en perspective avec les concepts de donnée, d'information, de connaissance et de savoir tels qu'ils ont été distingués par les SIC.

2.1.1 Traitements impliqués dans la perception de l'environnement

Comment une personne qui attend à un passage piéton comprend-elle la situation et prend-elle la décision de traverser ou non ? Depuis les stimuli sensoriels jusqu'aux fonctions cognitives supérieures, la perception de l'environnement implique plusieurs traitements clés que la psychologie cognitive et les neurosciences ont identifiés.

Sentir et percevoir

Précédant la perception, les sensations sont la conséquence directe de l'environnement sur le corps humain. Les organes sensoriels agissent comme des « capteurs » informant de manière automatique sur ce qui se passe à l'extérieur et à l'intérieur du corps (e.g. pression sanguine, taux de sucre) (Lieury, 2015). Il s'agit de sensations conscientes telles que la vue, les sons et les odeurs qui se produisent lorsque des stimuli de l'environnement parviennent aux organes sensoriels. Ces sensations sont le résultat d'une transduction transformant l'énergie physique créée par un phénomène dans l'environnement (e.g. la lumière reflétée par un objet) en un état

électrique (e.g. l'image de l'objet sur la rétine) (R. Wilson & Keil, 1999). Les caractéristiques des organes sensoriels changent d'une espèce animale à l'autre et, dans une moindre mesure, présentent des variations entre les individus d'une même espèce (Lieury, 2015) [2]. Ainsi, les caractéristiques des organes sensoriels conditionnent ce qui peut être perçu de l'environnement. Par exemple, une tomate éclairée par le Soleil reflète des ondes électromagnétiques (des rayons lumineux) que nos yeux captent et traduisent en une scène visuelle. Cependant, l'œil humain ne peut capter que les ondes s'étalant de 380 à 780 nanomètres, ce qui correspond au spectre de la lumière visible. Les autres ondes reflétées par la tomate (e.g. infrarouge, ultraviolet) ne sont pas captées par nos yeux. Néanmoins, la plage ses sensations accessibles *via* nos sens peut être étendue par l'intermédiaire de capteurs électroniques à l'exemple des capteurs d'ultraviolets. À l'instar des smartphones, les objets connectés embarquent de nombreux capteurs électroniques qui, comme nous le montrerons, peuvent effectivement être utilisés pour dans le cadre d'activité d'apprentissage pour étudier des phénomènes qui échappent à nos sens.

Une fois que les stimuli de l'environnement sont traduits en sensations, l'étape suivante est la perception : les sensations sont interprétées pour obtenir des informations sur l'environnement et ainsi guider le comportement (R. Wilson & Keil, 1999). Les travaux de Berthoz et de ses collègues montrent que les stimuli sensoriels ne sont pas reçus passivement, mais font l'objet d'un traitement actif [3]. En effet, la perception mobilise les fonctions cognitives supérieures pour apposer des règles d'interprétation aux stimuli sensoriels (Berthoz, 2012). Ces règles d'interprétation sont appliquées en fonction du contexte de l'observation et sont élaborées à partir des expériences passées. L'application des règles d'interprétation aux stimuli sensoriels mobilise l'attention et la mémoire. L'attention est indispensable pour sélectionner les stimuli à prendre en compte tandis que la mémoire est nécessaire pour retenir les informations à court terme ainsi que pour rappeler des informations conservées à long terme (voir section 1.1.3). En d'autres termes, nous percevons notre environnement à travers le filtre de notre histoire personnelle : les expériences que nous avons vécues hier influencent ce que nous voyons aujourd'hui. Les illusions d'optique témoignent du caractère actif de la perception en mettant en évidence les différences entre ce que l'individu perçoit et la réalité [4].

De manière synthétique, les sensations représentent les propriétés physiques des stimuli sensoriels (e.g. l'image rétinienne) tandis que la perception est l'interprétation des stimuli par rapport au contexte pour reconstituer le déroulement des événements (e.g. la scène visuelle). Les caractéristiques des sens — ce qu'ils permettent de « capter » — et l'interprétation des données qu'ils fournissent influencent la perception de l'environnement.

Catégoriser les sensations

Ainsi, contrairement à l'idée intuitive, la perception ne se résume pas à la réception des stimuli de l'environnement par les sens et leur acheminement jusqu'au cerveau. En réalité,

2. Par exemple, les yeux du chat ne lui permettent pas de distinguer le vert et le rouge. C'est également le cas pour les personnes atteintes de daltonisme deutéranope (la forme la plus fréquente). Source : https://www.sciencesetavenir.fr/animaux/comment-les-chats-percoivent-ils-le-monde_12315. Consulté le 4 mai 2020.

3. Source : https://www.college-de-france.fr/media/alain-berthoz/UPL17178_UPL52025_BerthozR01_02.pdf. Consulté le 4 mai 2020.

4. L'échiquier d'Adelson est un exemple d'illusion d'optique : sur un échiquier, deux cases, pourtant identiques, semblent ne pas avoir la même couleur. Les couleurs des cases sont perçues différemment, car nous appliquons une règle d'interprétation : sur un échiquier, les cases adjacentes sont de couleurs différentes. Source : http://persci.mit.edu/gallery/checkershadow. Consulté le 4 mai 2020.

la perception de l'environnement implique des interactions permanentes entre d'une part les stimuli sensoriels et d'autre part les expériences passées et les connaissances acquises. Tout au long de la vie, les individus forgent des catégories mentales à partir de leurs expériences et de leurs apprentissages qui sont ensuite mobilisées pour interpréter l'expérience sensorielle et percevoir l'environnement (R. Wilson & Keil, 1999, p. 104).

Dans leur livre *L'analogie. Cœur de la pensée*, Hofstadter et Sander (2013) décrivent les processus de la pensée que sont l'analogie et la catégorisation. Les auteurs soutiennent la thèse selon laquelle l'analogisation et la catégorisation sont à la racine de tous nos concepts et le mécanisme de leur évocation sélective, donc le moteur de la pensée (Hofstadter & Sander, 2013). Les individus disposent d'une multitude de catégories mentales permettant de classer des objets réels et/ou abstraits selon leurs similitudes. Le cerveau humain s'appuie sur l'analogie (consciemment ou non) pour associer les stimuli sensoriels avec des objets, des situations ou des événements déjà vécus. Par exemple, la catégorie mentale « chaise » est la synthèse de toutes les expériences passées impliquant cet objet et permet de reconnaître une nouvelle chaise, même lorsque son *design* diffère de la norme. L'individu reconnaîtra la nouvelle chaise par le biais d'une analogie mettant en relation la nouvelle chaise avec la catégorie mentale « chaise » de l'individu.

L'activité continue de production d'analogies est indispensable pour comprendre le monde qui nous entoure, pour raisonner, communiquer, agir et apprendre [5]. L'ensemble des catégories varie d'un individu à l'autre en fonction de sa langue, de l'époque, de sa culture, de son éducation ou de son état d'esprit [6]. Lorsque les stimuli sensoriels sont nouveaux, ils entraînent soit la modification d'une catégorie mentale existante afin de les intégrer ou alors une catégorie mentale est créée spécialement. Notons que ce mode de fonctionnement fait écho aux processus d'accommodation et d'assimilation de l'information décrits par Piaget (voir section 1.2.1).

À travers l'analogie, nous voyons que pour reconnaître, il faut connaître. L'analogie est « *le moyen et la fin* » de la connaissance, car l'esprit se sert de l'analogie à la fois pour « *simuler le réel perçu en construisant un analogon mental (la représentation), et de simuler le réel conçu en élaborant un analogon idéal (théorie)* » (Morin, 2008, p. 1333). La perception de l'environnement n'est pas la réception des stimuli sensoriels, mais la reconnaissance des objets (concrets et abstraits) à partir des expériences vécues et des connaissances acquises.

Prédire à partir des stimuli sensoriels

La analogisation et la catégorisation sont liées à un autre processus jouant un rôle clé dans la perception : la prédiction. Ce processus intervient pour déterminer qu'elle est l'interprétation des stimuli sensoriels la plus probable compte tenu du contexte et pour anticiper les futurs stimuli sensoriels.

Les travaux récents de recherche en neurosciences ont mené à l'élaboration de la théorie

5. L'analogie est parfois à l'origine des inspirations soudaines des savants. Kepler, célèbre pour avoir découvert ce que nous appelons les lois de Kepler expliquant le mouvement des planètes autour du Soleil, utilisait fréquemment des analogies. En faisant une analogie avec la lumière, Kepler attribue au Soleil une force motrice qui agit sur les planètes, qui, comme l'intensité lumineuse, diminue en fonction de la distance entre le Soleil et la planète. Source : https://www.pourlascience.fr/sd/histoire-sciences/le-imysteriumi-premier-livre-de-kepler-4415.php. Consulté le 18 décembre 2019.

6. Par exemple, la catégorie mentale « souris » a d'abord désigné exclusivement le mammifère avant d'être également un dispositif de pointage informatique.

du « cerveau bayésien » (Dehaene, 2018). Le théorème de Bayes, issue de la théorie des probabilités, permet d'estimer la probabilité d'un événement ou d'un phénomène en tenant compte de la probabilité d'autres facteurs [7]. Il s'agit de calculer la probabilité qu'une hypothèse soit vraie (e.g. piocher une balle rouge) à partir des données observées (e.g. sur cinq balles, quatre sont rouges).

Dans le chapitre 1, nous avons vu que lorsqu'il traite activement les informations, le cerveau génère des hypothèses pour anticiper les changements dans l'environnement. La théorie du « cerveau bayésien » conçoit le cerveau comme un système prédictif où l'ensemble des activités du cerveau, dont la perception, comporte une part de prédiction. Cette théorie postule que l'inférence bayésienne fournit un cadre pertinent pour expliquer le fonctionnement du cerveau et la manière dont il interprète les stimuli sensoriels. Le cerveau effectuerait une inférence bayésienne pour prédire la probabilité d'occurrence d'un événement en fonction des expériences passées et des connaissances acquises. Dans ce cadre, l'activité permanente d'analogisation associe aux stimuli sensoriels des catégories mentales à partir desquels sont générées les prédictions (A. Clark, 2013). Par exemple, lorsque des étudiants entrent dans une nouvelle salle de classe et en perçoivent le mobilier, ils s'appuient sur leur catégorie mentale « salle de classe » pour inférer qu'il s'agit probablement des tables et des chaises sur lesquelles ils vont s'asseoir.

Ainsi pour reconnaître un objet dans l'environnement, le cerveau évalue la plausibilité que la catégorie mentale de cet objet soit associée à l'expérience sensorielle. Le calcul est alors le suivant (voir Équation 2.1) : la probabilité que les stimuli sensoriels soient associés à la catégorie mentale de l'objet ($P(Stimuli/Catégorie\ mentale)$) est pondérée par la probabilité que l'objet apparaisse ($P(Catégorie\ mentale)$) et divisée par la probabilité de capter les stimuli sensoriels ($P(Stimuli)$).

$$P(Catégorie\ mentale/Stimuli) = \frac{P(Stimuli/Catégorie\ mentale)P(Catégorie\ mentale)}{P(Stimuli)}$$

Équation 2.1 – Inférence bayésienne

Les théories précédentes sur le fonctionnement du cerveau conceptualisaient la perception selon un processus uniquement ascendant (*bottom-up*) : les stimuli sensoriels étaient reçus passivement et interprétés *via* des inférences successives allant vers de plus hauts degrés d'abstractions. Des résultats plus récents obtenus par les neurosciences suggèrent qu'il s'agit autant d'un processus descendant (*top-down*) (Helmholtz, 1867 ; Schultz, Dayan, & Montague, 1997) [8]. Pour expliquer les stimuli sensoriels et comprendre son environnement, le cerveau effectue continuellement des prédictions en mettant en relation les stimuli sensoriels entrants avec les expériences passées (voir Figure 2.1) [9].

7. Le théorème porte le nom de Thomas Bayes, pasteur britannique et mathématicien à la Royal Society, dont un essai publié après sa mort en 1763 présente une application de l'inférence bayésienne. Cependant, la découverte du théorème par Bayes est contestée, car elle aurait été faite avant lui par d'autres. Source : https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1740-9713.2013.00638.x. Consulté le 31 janvier 2020.

8. Von Helmholtz a mis évidence le concept de copie d'efférence pour expliquer la stabilité visuelle, l'anticipation des mouvements volontaires des yeux pour garder une image fixe. Les travaux de Schultz et al. montrent que les neurones dopaminergiques anticipent la récompense.

9. Certaines observations de l'activité cérébrale mettent bien en évidence la capacité de prédiction du

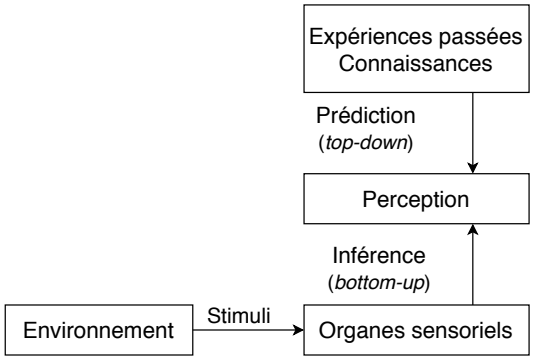


FIGURE 2.1 – **Perception de l'environnement.** Adapté de Dehaene (2014)

Le mode de fonctionnement prédictif du cerveau décrit par la théorie du « cerveau bayésien » comporte plusieurs avantages, car cela permet de [10] :

— gagner du temps dans le traitement des informations ;

— filtrer les stimuli sensoriels, par exemple, en complétant ceux qui sont incomplets ;

— simplifier le traitement des stimuli sensoriels (en omettant ce qui a été prédit) [11] ;

— renforcer l'interprétation des stimuli en cherchant à réduire les erreurs de prédiction.

À travers la théorie du « cerveau bayésien » et les processus de catégorisation et d'analogisation, nous voyons que la frontière est ténue entre la perception et la compréhension de l'environnement. Percevoir l'environnement implique de reconnaître le connu et d'anticiper l'avenir en associant les sensations à des expériences passées et aux connaissances acquises. Cette porosité entre la perception et la compréhension n'est pas sans causer des difficultés dans le cadre de l'apprentissage, notamment lorsqu'il s'agit pour l'apprenant d'étudier un phénomène physique dans l'environnement. En effet, si la perception de l'environnement est conditionnée par nos sensations et nos expériences vécues, elle influence en retour notre compréhension de l'environnement. Or, comment concilier notre propre perception d'un phénomène physique (e.g. la lumière, les couleurs) avec sa description par les sciences qui tiennent compte de stimuli qui nous échappent ?

Dans le cadre de cette recherche doctorale, nous montrons à partir des usages observés que les objets connectés apportent une solution à cette problématique. Comme nous le verrons par la suite, cette solution ne s'appuie pas uniquement sur les capteurs des objets connectés, mais sur d'autres spécificités des objets connectés, notamment leur couplage avec des systèmes d'Intelligence artificielle (SIA). Afin de comprendre en quoi consistent ces systèmes et leur rapport à l'intelligence, nous nous intéressons dans la section suivante aux théories développées sur l'intelligence humaine.

---

cerveau. Par exemple, la négativité de discordance (*mismatch negativity*) est la réaction de surprise déclenchée par le cerveau lorsqu'un même son est répété de manière continue puis change subitement (Gomot et al., 2002).

10. Source : http://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2014-2015.htm. Consulté le 18 décembre 2019.

11. Ce traitement se rapproche de l'algorithme de compression MPEG (Roxin & Mercier, 2004) : pour éviter d'encoder la couleur de chaque pixel de l'image, il ne prend en compte que les pixels dont la couleur ne peut pas être prédite. Par exemple, il est très probable qu'autour d'un pixel bleu se trouve d'autres pixels bleus, par conséquent il n'est pas nécessaire de l'encoder. Si les pixels autour ne sont pas bleus, contrairement aux attentes, leurs couleurs seront encodées.

Théories de l'intelligence

Pour Platon, l'intelligence est l'« *activité qui permet d'acquérir la science* » (Platon & Brisson, 2011) [12]. Depuis, d'innombrables discussions ont eu lieu pour définir ce que recouvre l'intelligence, à la fois en termes de capacité de raisonnement et plus généralement de capacité cognitive, de fonctionnement mnésique ou encore de structure cérébrale [13].

En psychologie, les théories cherchant à expliquer l'intelligence ont une approche soit unidimensionnelle soit multidimensionnelle. Dans le cadre de l'approche unidimensionnelle, tous les aspects de l'intelligence seraient corrélés à un facteur commun, le facteur g, qui expliquerait pourquoi des individus qui réussissent mieux que la moyenne dans un domaine tendent aussi à mieux réussir dans d'autres domaines. D'abord établi par Spearman (1904), le facteur g caractérise un ensemble de corrélations positives qui sont récurrentes lors des tests de l'intelligence. Les élèves qui participaient aux tests étaient notés dans plusieurs domaines et la moyenne pondérée des notes correspondait au facteur g. Cependant, l'interprétation du facteur g fait l'objet de discussions : quelle est la cause des corrélations positives entre les tests ? S'agit-il uniquement d'une variable statistique ? Si effectivement le facteur g permet de prédire mieux que le hasard la réussite ou non à un test, les prédictions sont limitées et le facteur g en lui-même reste vague (Lautrey, 2006). L'approche unidimensionnelle de l'intelligence a été nuancée par des travaux mettant en évidence, selon une approche multidimensionnelle, plusieurs facteurs caractéristiques de l'intelligence. Cattell (1941) puis Horn (1968) décriront deux facteurs de l'intelligence : l'intelligence fluide (Gf) et l'intelligence cristallisée (Gc). L'intelligence fluide désigne la capacité à penser logiquement et à résoudre des problèmes nouveaux, sans nécessairement s'appuyer sur des connaissances acquises. Il s'agit d'une capacité à analyser les situations pour en identifier les tendances et les relations entre les acteurs. L'intelligence cristallisée correspond à l'utilisation des compétences et des connaissances acquises, notamment grâce à une récupération rapide des informations stockées dans la mémoire à long terme.

Le modèle de Cattell-Horn-Carroll (CHC) élaboré par McGrew et Flanagan (1998) fait la synthèse des facteurs Gf, Gc et du modèle hiérarchique à trois strates développées par J. B. Carroll (1993) à partir de 461 études. Le modèle CHC soutient une conception multidimensionnelle de l'intelligence et identifie plusieurs groupes de fonctions cognitives liées au facteur g : les capacités motrices, la perception, l'attention, les connaissances, et la vitesse de traitement des informations.

De manière plus radicale, Gardner (1983) défend la thèse selon laquelle il existerait plusieurs types d'intelligence. Selon la théorie des intelligences multiples de Gardner (1983), il existe les intelligences suivantes : linguistique, logico-mathématique, spatiale, intra-personnelle, interpersonnelle, kinesthésique et existentielle. Un individu pourrait se démarquer par une intelligence linguistique élevée (e.g. maîtrise de la langue à l'écrit), mais en ayant une intelligence logico-mathématique moyenne (e.g. difficulté pour manipuler les nombres). Cependant, la théorie des intelligences multiples fait l'objet de plusieurs critiques dont les principales pointent l'ambiguïté des définitions proposées par Gardner. Il est difficile de distinguer l'in-

12. Bachelard disait : « *La science est l'esthétique de l'intelligence* » (Bachelard, 1993, p. 10).

13. Après avoir répertorié 70 définitions, Legg et Hutter (2007) proposent en guise de synthèse une 71^{e} définition : la capacité d'un agent à atteindre ses objectifs dans un large éventail d'environnements.

telligence selon Gardner de la notion de talent et les définitions que l'auteur emploie sont basées sur des raisonnements tautologiques [14] (Larivée & Senéchal, 2012).

En neurosciences, les chercheurs Jung et Haier (2007) ont développé la théorie de l'intégration fronto-pariétale. Selon cette théorie, les facteurs g, Gf et Gc correspondent aux connexions entre les aires cérébrales frontales et pariétales. Ainsi, l'intelligence serait soutenue par l'efficacité des communications entre les grands réseaux de neurones reliant les aires cérébrales frontales et pariétales. La théorie de l'intégration fronto-pariétale est reconnue comme la meilleure explication actuelle sur la localisation de l'intelligence dans le cerveau (Deary, Penke, & Johnson, 2010).

Les travaux en psychologie cognitive et en neurosciences nous montrent que la perception est un processus actif qui se confond avec la compréhension et qui implique l'histoire personnelle de l'individu. Les sensations sont interprétées à l'aune des expériences passées et des connaissances existantes. La section suivante met en relation la perception avec la construction des connaissances.

Les travaux en psychologie cognitive et en neurosciences sur la perception et la compréhension de l'environnement explicitent le processus actif par lequel les informations sont reçues et traitées par l'apprenant, avant l'étape de construction des connaissances. Ainsi, la réception des informations n'est pas neutre, car l'apprenant interprète les sensations qu'ils captent en faisant des analogies avec ses expériences personnelles et ses connaissances. Dans la section suivante, nous examinons la relation entre les processus de perception et d'apprentissage.

2.1.2 Données, informations, connaissances et savoirs

Du point de vue des SIC, les processus de perception et d'apprentissage sont liés à la distinction fondamentale entre donnée, information, connaissance. La perception et l'apprentissage forment une chaîne d'opérations pour transformer les données, en informations puis en connaissances. Nous revenons sur la distinction entre ces concepts et leur lien avec les savoirs.

Des données sensorielles au traitement des informations

À l'ère de la société de l'information, l'explosion quantitative des données numériques nous a conduits à parler de données massives (*Big Data*), de données ouvertes, de pratiques dirigées par les données (*data-driven*) ou de protection des données personnelles [15]. Souvent comparées de manière simpliste et erronée comme étant le « pétrole du XXI^{e} siècle », les données représentent la ressource principale de la science des données (*data science*) visant à extraire des connaissances d'ensemble de données. Elle mobilise des théories et des méthodes issues plus largement des mathématiques, la statistique, la théorie de l'information et les TIC,

14. Par exemple, l'intelligence spatiale est la faculté de suivre un chemin dans un environnement. Une personne sachant bien suivre un chemin dans un environnement a une intelligence spatiale. Le concept renvoie à sa définition qui renvoie au concept.

15. Pendant la crise sanitaire provoquée par la Covid-19, les données (e.g. médicales, épidémiologiques) ont été un élément clé pour appréhender l'évolution de la pandémie. Quotidiennement, les médias et les instances gouvernementales ont livré leurs analyses en s'appuyant sur le nombre de décès, d'infections, de tests, de lits disponibles en réanimation ou encore le taux de contagion (le fameux R0).

l'apprentissage artificiel, la modélisation d'incertitude ou le calcul à haute performance [16].

Incidemment, les concepts de donnée et d'information ont de multiples acceptations, selon le champ scientifique, l'objet de recherche et la doctrine philosophique. Dans le cadre de cette thèse, nous nous référons aux significations de donnée et d'information portées par les travaux en SIC.

Une donnée, du latin *datum*, désigne ce qui est connu, un fait, une quantité ou une grandeur, un symbole ou un ensemble de symboles qui peuvent être traités par l'humain ou un système automatique (Bellinger, Castro, & Mills, 2004 ; Leleu-Merviel & Useille, 2008). Plus précisément, selon le philosophe Luciano Floridi, la donnée est un fait se rapportant à des différences, des variations ou un manque d'uniformité dans un contexte particulier [17]. Selon cette acceptation, les stimuli de l'environnement « captés » par des organes sensoriels ou par des capteurs lors du processus de perception constituent des données en ceci qu'elles décrivent des variations dans l'environnement. Par exemple, les valeurs en degrés indiquées par un thermomètre sont des données qui décrivent les variations de température dans une pièce. Les données peuvent aussi être produites par l'humain lorsque, par exemple, on observe avec nos yeux deux personnes dans une rue.

Contrairement à la donnée, l'information est porteuse d'une signification qui émerge à partir de l'interprétation d'une ou plusieurs données ; elles constituent la matière première à partir de laquelle sont produites les informations (Leleu-Merviel & Useille, 2008). La relation entre donnée et information peut se formuler de manière synthétique par la formule suivante : $information = données + signification$. Par exemple, l'interprétation de l'évolution des variations de température données par un thermomètre peut constituer une information. Notons que la distinction entre une donnée et une information peut varier selon le point de vue : une donnée, dénuée de sens pour un individu, peut être une information pour un autre individu.

Les travaux de recherche en SIC ont opéré une distinction entre les dimensions matérielle et immatérielle de l'information (Mallowan, 2012). La matérialité de l'information correspond à son inscription dans des supports physiques et/ou numérique tels que les documents permettant d'enregistrer, de reproduire et de transmettre des informations (Silem & Lamizet, 1997). Cependant, l'information n'est spécifiquement liée à un support, mais existe aussi en dehors de celui-ci. L'information est avant tout une production de l'esprit conditionnée par un contexte social et culturel ; le résultat de l'activité réflexive du sujet pour attribuer un sens à un ensemble de données (Couzinet, 2006). Pour Meyriat (1985), l'information est le contenu de tout acte de communication entre deux ou plusieurs individus. Ces derniers construisent la signification associée à l'information lorsqu'ils reçoivent l'information. Cependant, l'environnement dans lequel se déroule la communication influence à la fois la création, la transmission et la réception des informations échangées entre les individus.

Dans le cadre de cette thèse, nous assimilons les données à des faits décrivant des variations dans un environnement qui, lorsqu'ils sont mis en relation et interprétés par un individu, sont transformés en informations. En accord avec le processus de perception présenté précé-

16. Sources : https://www.lopinion.fr/edition/economie/pourquoi-donnees-ne-sont-pas-petrole-nicolas-mazzucchi-145984, http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26527074. Consulté le 28 juin 2020.

17. Source : https://plato.stanford.edu/entries/information-semantic/. Consulté le 29 juillet 2020.

demment, l'interprétation des données mobilise les expériences passées et les connaissances acquises par le biais d'opérations d'analogisation et de prédiction. Cette étape d'interprétation est cruciale pour l'apprentissage, car les informations obtenues sont ensuite traitées pour construire des connaissances. Nous verrons que le rôle des technologies éducatives est de transmettre les informations, mais également de créer des conditions favorables à la réception et à l'interprétation des informations pour faciliter la construction des connaissances.

Traiter les informations pour construire ses connaissances

Après la perception reliant les données et les informations, l'apprentissage met en relation les concepts d'information, de connaissance et de savoir.

Ces concepts ont été décrits par plusieurs auteurs selon un continuum allant du plus simple au plus complexe : données - information - connaissance (Davenport & Prusak, 1997) ou données - information - connaissance - sagesse (Ackoff, 1989 ; Bellinger et al., 2004 ; Mallowan, 2012). Communément représentée sous une forme pyramidale [18], la relation entre les concepts est hiérarchique en ceci que les données constituent la matière des informations qui sont à la base des connaissances, elles-mêmes à la source de la sagesse (Ackoff, 1989 ; Cleveland, 1982 ; Zeleny, 1987). La représentation proposée par Bellinger et al. (2004) (voir Figure 2.2) définit chacun des concepts en fonction de son degré de connexion et de son degré de compréhension. La sagesse est le degré de compréhension le plus élevé, fruit de la mise en relation des connaissances, elles-mêmes obtenues par la création et la compréhension des liens entre les informations qui, comme nous l'avons vu, sont produites par l'interprétation de données.

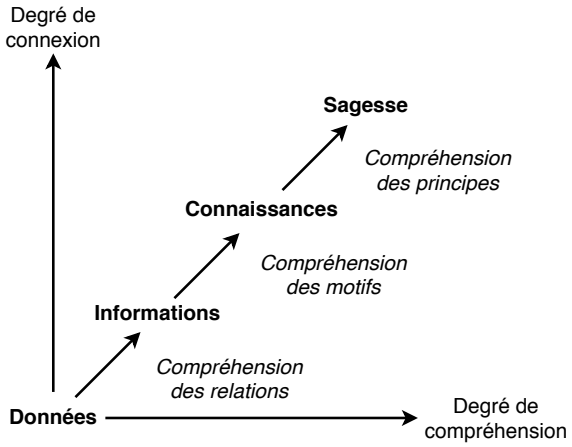


FIGURE 2.2 – **Données, Informations, Connaissances et Sagesse.** Adapté de Bellinger, Castro, et Mills (2004)

Selon la représentation de Bellinger et al. (2004), les connaissances sont construites à partir de la synthèse de plusieurs sources d'informations lors du processus d'apprentissage, par l'expérience et la réflexion. Au niveau supérieur, la sagesse est l'évaluation de la compréhension, elle s'apparente à la recherche philosophique en allant au-delà de ce qui est connu pour s'interroger sur l'inconnu, où il ne peut y avoir de réponse (Bellinger et al., 2004).

18. Il est à noter que cette représentation pyramidale est fréquemment reprise et attribuée à Zeleny (1987) et Ackoff (1989). Cependant, leurs articles ne mentionnent pas la pyramide et celle-ci aurait d'abord été proposée par Debons, Horne, et Cronenweth (1988) (cité par Wallace, 2007).

Dans le chapitre précédent, lorsqu'il a été question des théories cognitiviste et constructiviste de l'apprentissage, nous avons vu que la connaissance ne correspond pas à la réalité objective, mais qu'elle est une représentation mentale et subjective de la réalité. Par la suite, les représentations mentales ont aussi été nommées par les expressions « modèles mentaux » [19] et « catégories mentales ». Sans être totalement identique, chacune de ses expressions désigne une représentation de la réalité, une projection de l'esprit pour expliquer et décrire l'environnement (Meunier, 2003). Ainsi, il faut par exemple distinguer la pomme en tant que réalité objective et les représentations mentales de la pomme qui peuvent être différentes d'un individu à l'autre.

Ces représentations mentales sont dynamiques : elles sont créées et modifiées au gré des expériences quotidiennes et des apprentissages. L'apprenant mobilise sous la forme de représentations mentales des connaissances déjà acquises conservées dans la mémoire à long terme. Il traite ensuite les nouvelles informations pour les intégrer dans ses représentations mentales, directement ou après les avoir modifiées (voir la section 1.2.1 sur le processus d'apprentissage décrit par Piaget). Ce traitement abouti à la conservation, de façon stable et permanente, des représentations sous la forme de connaissances. En d'autres termes, le traitement cognitif des informations permet la création et la modification des représentations mentales et, finalement, la construction des connaissances.

Connaissances et savoirs

D'après le CNRTL, le savoir est un « *Ensemble des connaissances d'une personne ou d'une collectivité acquises par l'étude, par l'observation, par l'apprentissage et/ou par l'expérience* » [20]. Cette définition met en lumière deux conceptions du savoir : le savoir pour une personne, ce que nous avons défini comme étant une connaissance, et le savoir collectif, élaboré par les chercheurs et scientifiques.

Dans son *Traité de Documentation*, (Otlet, 1934) formalise le processus de construction des savoirs, leur encadrement par la science et leur ordonnancement selon des classifications [21]. Les intelligences observent l'Univers et retranscrivent leurs pensées, encadrées par une discipline scientifique, dans des livres qui sont ensuite classés et organisés dans des encyclopédies. Selon ce processus, le savoir est construit à partir de l'observation de l'environnement. Cependant, cette construction reste humaine et se réalise dans un cadre socio-culturel particulier (Morin, 2008) : les savoirs sont le fruit d'une activité collective à laquelle prennent part des individus qui observent et décrivent le réel à travers les cadres de pensée de leur époque. Ainsi, tout savoir « *subit une détermination sociologique. Il y a dans toute science, même la plus physique, une dimension anthropo-sociale* » (Morin, 2008, p. 30).

Pourtant, dans le cadre l'éducation, les savoirs tendent à être objectivés en distinguant le savoir de la connaissance selon la dichotomie bibliothèque/tête (Gardiès, 2008). Le savoir,

19. La notion de représentation se retrouve dans la description des modèles mentaux, notamment dans la théorie des modèles de Johnson-Laird (1995). L'auteur explique que le modèle mental est la représentation d'une réalité extérieure au travers de laquelle le cerveau élabore des alternatives et formule des hypothèses.

20. Source : https://www.cnrtl.fr/definition/savoir. Consulté le 5 mai 2020.

21. Avec Henri La Fontaine, Paul Otlet créera en 1906 la Classification Décimale Universelle, à partir de la Classification décimale élaborée par Melvil Dewey en 1876 (Rayward, 1991). Il s'agit de systèmes de classification à l'attention des bibliothèques qui proposent une organisation et division des savoirs en plusieurs catégories et sous-catégories thématiques.

contenu dans la bibliothèque, tend à être assimilé à une description exacte de la réalité tandis que la connaissance, dans la tête des individus, est perçue comme subjective (Astolfi, 1992). L'objectivation des savoirs se produit au cours de la « transposition didactique » (Chevallard, 1991) visant à adapter aux conditions d'apprentissage les savoirs tels qu'ils sont exprimés dans le champ de recherche. Comme le rappelle Reuter et al. (2013), la transposition didactique permet de passer des savoirs élaborés par les chercheurs aux :

— savoirs à enseigner : les savoirs sont transposés du contexte scientifique initial à un contexte d'apprentissage ; cela se concrétise, par exemple, par la mise à l'écart de la démarche de construction des savoirs et leur dépersonnalisation ;

— savoirs enseignés : les savoirs à enseigner sont appropriés par l'enseignant qui va les adapter à sa pratique ;

— savoirs appris : les connaissances construites par l'apprenant.

Le concept de transposition didactique est propre à l'activité de l'enseignant néanmoins, il met en évidence que le passage des savoirs du monde de la recherche à celui de l'éducation n'est pas neutre. Nous verrons que la conception de dispositifs pour favoriser l'apprentissage implique également une forme de transposition afin d'adapter la présentation des savoirs en fonction d'une stratégie d'apprentissage ou des spécificités des technologies utilisées.

Dans le cadre de cette thèse, nous adoptons la distinction entre les connaissances qui sont construites par l'apprenant et les savoirs élaborés par les scientifiques et les chercheurs. En ce sens, nous rejoignons Jeanneret (2000) lorsqu'il énonce que la connaissance est « *le travail productif des sujets sur eux-mêmes pour s'approprier des idées ou des méthodes* » et le savoir : « *les formes de connaissance qui sont reconnues par une société* » (Jeanneret, 2000, p. 85).

Cette distinction est en accord avec la théorie constructiviste de l'apprentissage dans laquelle les connaissances sont le résultat d'un processus subjectif de construction. Les savoirs, ce que l'on peut apprendre, sont des connaissances faisant l'objet d'un consensus scientifique et ont un caractère institutionnel.

Percevoir l'environnement, interagir et apprendre

Au chapitre 1, nous avons vu que l'apprentissage requiert un traitement actif des informations qui peut être favorisé par des activités authentiques permettant d'observer l'environnement, de formuler des hypothèses et d'expérimenter. Conséquemment, afin d'expliciter les mécanismes impliqués dans la réception des informations et les interactions avec l'environnement, nous avons présenté le processus de perception de l'environnement ainsi que les concepts de donnée, d'information et de connaissance. La Figure 2.3 synthétise les sections précédentes en mettant en relation les données, les informations et les connaissances avec les processus de perception et d'apprentissage [22].

Au niveau le plus bas, les données sensorielles sont générées par les organes sensoriels « captant » les stimuli présents dans l'environnement. La perception, au second niveau, est l'interprétation des données sensorielles pour les transformer en informations. Une signification est associée aux données sensorielles *via* des processus de catégorisation et de prédiction

22. Rappelons qu'il s'agit d'un modèle et que, par définition, le modèle est une représentation simplifiée de la réalité avec une valeur heuristique. Source : http://sens-public.org/articles/1287/?lang=fr. Consulté le 20 avril 2020.

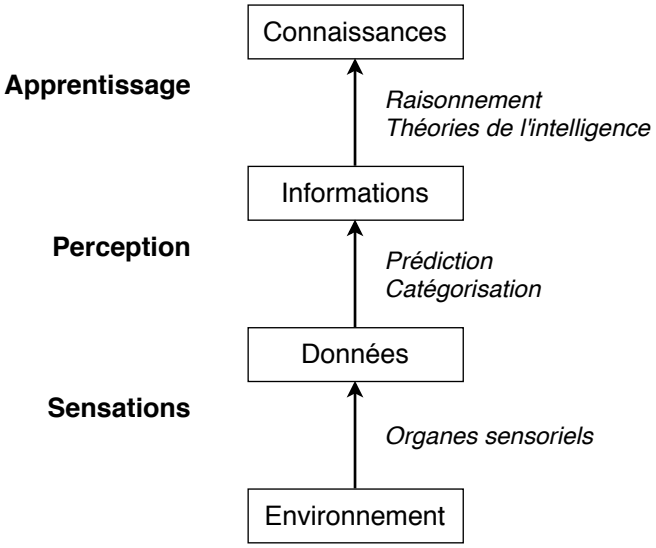


FIGURE 2.3 – **Processus de perception et d'apprentissage.** Synthèse à partir des sections 2.1.1 et 2.1.2

faisant appel à l'histoire personnelle. Au plus haut niveau, l'apprenant traite activement les informations afin de modifier ses connaissances existantes ou de construire de nouvelles connaissances.

La perception de l'environnement, et finalement l'apprentissage, sont influencés par plusieurs facteurs. À l'interface entre l'environnement et le corps humain, les données sensorielles générées sont déterminées par les caractéristiques des organes sensoriels. Par exemple, les caractéristiques de nos yeux ne nous permettent pas de percevoir les rayonnements infrarouges. Puis, les données sensorielles sont interprétées à partir des expériences passées et des connaissances déjà acquises. Dans le cadre d'un apprentissage actif, ces facteurs ont une influence sur l'apprenant lorsqu'il interprète les conséquences de ses actions dans l'environnement.

Dans la section suivante, nous examinons la manière dont les TIC sont utilisées pour favoriser l'apprentissage et comment elles soutiennent l'interaction avec l'environnement et l'expérimentation.

2.2 Usages des technologies pour l'apprentissage humain

L'évolution exponentielle des TIC depuis les années 1980-90 bouleverse l'apprentissage et « *Chaque nouvelle technologie d'information ou de communication [. . .] porte en elle l'espoir d'un usage éducatif* » (Jacquinot-Delaunay, 2007, p. 176). Les TIC diversifient les moyens de transmission de l'information et, avec eux, renouvellent les modalités d'accès aux savoirs et les méthodes pour stimuler la construction des connaissances. Dans cette section, nous traitons de la manière dont les technologies sont utilisées pour transmettre les informations, favoriser leur réception et finalement soutenir l'apprentissage. Nous verrons que cette utilisation relève non pas d'un déterminisme technique – les TIC ne font pas apprendre – mais repose sur l'articulation entre les spécificités des technologies, les stratégies d'apprentissage, les savoirs à apprendre et le cadre socio-culturel.

2.2.1 Transmettre pour apprendre

Apprendre et transmettre sont les deux facettes de l'apprentissage (Krichewsky, 2003) : la première concerne l'apprenant et comment il construit ses connaissances. La seconde porte sur l'activité de médiation entre le savoir et l'apprenant : comment les informations relatives aux savoirs sont transmises à l'apprenant et comment il les reçoit ?

L'utilisation des TIC pour l'apprentissage est un champ de recherche investi par les SIC, dont l'approche est interdisciplinaire, et par les sciences de l'éducation qui se concentrent sur les usages éducatifs et les méthodes d'apprentissage (Jacquinot-Delaunay, 2004 ; Baron, 2013). Cette thèse s'inscrit en SIC pour lesquelles l'apprentissage est un acte de communication relevant de la transmission et de la réception d'informations. Les travaux menés en SIC s'appuient sur les apports des sciences de l'éducation, de la psychologie, de la sémiotique, de la sociologie ou encore de l'informatique pour analyser les dimensions techniques, sociales et sémio-cognitives des usages des technologies pour l'apprentissage (Walter et al., 2018).

Dans les sections suivantes, nous rappelons les définitions des notions de médiation, de dispositif et d'usage qui sont mobilisées par les SIC pour étudier les technologies pour l'apprentissage.

Médiation entre l'apprenant et les savoirs

Les savoirs ne sont pas simplement et directement transmis à l'apprenant, de la même manière que ce dernier n'accumule pas passivement les connaissances. Selon Vygotski (1997), les savoirs sont diffusés dans une société par le biais d'outils, psychologiques (e.g. langage) et matériels que, par exemple, les adultes emploient pour faciliter l'accès aux savoirs des enfants[23]. Ces outils réalisent une médiation en ceci qu'ils sont les intermédiaires entre des savoirs et des individus.

Dans nos sociétés de l'information, pourtant accompagné d'un idéal de communication directe et sans entrave, la médiation devient une notion de premier plan dans de nombreux domaines : vie politique, médias, culture, sciences (Jeanneret, 2005). La notion de médiation introduit un tiers (ou l'intermédiaire) au service de la communication et de la transmission pour rendre accessibles les informations et favoriser leur réception (Azémard, 2013 ; Davallon, 2004a). Qu'il s'agisse de réseaux socio-numériques, de courriels, de messageries instantanées, de cours à distance, de visio-conférence ou encore de cours à distance, aujourd'hui plus que jamais le rôle d'intermédiaire est assuré par les TIC pour transmettre des messages entre un émetteur et un récepteur. Liquète (2019) définit la médiation de la manière suivante :

> « *la recherche du lien entre l'énonciateur et le récepteur [...] grâce à une tierce personne et/ou un ensemble de techniques [...] afin de faciliter la compréhension du récepteur par la construction de sens, pouvant se solder par un changement (d'actions, de représentations, etc.)* ». Liquète (2019).

La médiation est l'instauration d'une relation entre l'émetteur et le récepteur par un intermédiaire, un médiateur humain ou technologique, dont le but est de faciliter les échanges d'informations. Le médiateur organise la situation de communication par la gestion des relations humaines, en mobilisant des ressources spécifiques et en adoptant une stratégie adaptée

23. Le concept de ZPD élaboré par Vygotski décrit ce que l'enfant peut accomplir grâce à la médiation avec l'adulte opéré par des outils (voir section 1.2.2).

à la manière dont sont reçues les informations (Liquète, 2019). Les fonctions du médiateur relèvent autant du relationnel que de la transmission et visent à faciliter la construction des significations associées aux informations échangées entre les acteurs de la situation de communication.

Ainsi, la médiation qu'opèrent les TIC n'est pas seulement technique, car il ne suffit pas de transmettre l'information pour assurer sa réception (Wolton, 2012). Jouët (1993) parle de double médiation : à la fois technique et sociale. La médiation est technique, car les TIC tendent à rationaliser et à organiser les relations et les actions effectuées par les individus. Mais, la médiation est aussi sociale, car le développement des TIC s'inscrit dans un cadre socio-culturel donné ce faisant elles reflètent les valeurs, les normes et les références sociales des concepteurs [24]. La technique organise le monde social autant que celui-ci façonne la technique.

Courtisée par plusieurs disciplines scientifiques, dans le cadre des SIC et lorsqu'elles portent sur les savoirs, la médiation désigne « *les processus médiatiques et interactionnels qui concourent à la construction, au partage, à la diffusion voire à la confrontation de connaissances socialement institutionnalisées* » (Galibert & Bonnet, 2015). Ainsi, la finalité de la médiation des savoirs est de stimuler le processus de construction des connaissances de l'apprenant en favorisant la réception et la compréhension des informations liées aux savoirs [25].

Peraya (2010) opère une distinction entre la médiation, en tant qu'effet produit par un média, et la médiatisation, l'acte de « mettre en média » les savoirs. Pour lui, la médiation « *relève de la sphère des usages et des effets qu'induit le média par sa présence dans le cadre d'une activité* » (Peraya, 2010, p. 10). La médiation est l'observation, l'analyse et la compréhension des usages liés à un objet technique et de ses effets sur les comportements des individus. Quant à la médiatisation, elle correspond à la « *conception, de production et de mise en œuvre de dispositifs de communication médiatisée* » (Peraya, 2010, p. 3). Ce travail se rapproche de l'ingénierie pédagogique en ceci qu'il vise l'instrumentation des activités médiatisées en articulant l'offre technologique avec le processus d'apprentissage (Walter et al., 2018). Il s'agit d'imaginer de nouvelles conditions d'utilisation des TIC en fonction des possibilités techniques qu'elles apportent et des mécanismes de l'apprentissage.

L'étude de la médiation des savoirs requiert l'observation des terrains actuels et l'exploration des terrains potentiels. D'une part, l'observation des terrains actuels se traduit par l'analyse des usages existants des TIC, de leurs apports et de leurs limites pour le processus d'apprentissage. D'autre, l'exploration des terrains potentiels implique de proposer de nouvelles manières d'utiliser les TIC en concevant des dispositifs d'apprentissage et en menant des expérimentations avec des apprenants. Comme nous le verrons, les notions de dispositif et d'usage ne comportent pas seulement des aspects techniques et fonctionnels.

24. Pour le philosophe Dagognet (1989, p. 12), « *N'importe quel objet, même le plus ordinaire, enferme de l'ingéniosité, des choix, une culture* ».

25. De son côté, la médiation documentaire porte sur la structuration des contenus, la relation des informations avec leur support ainsi que sur l'accessibilité des informations (Gardiès, 2012).

Dispositifs pour la médiation des savoirs

Ancré dans les travaux de Foucault, le dispositif décrit un ensemble ou un réseau d'éléments hétérogènes dont l'organisation reflète des intentions et des objectifs [26]. En SIC, la notion de dispositif n'est pas figée et a été discutée par plusieurs auteurs néanmoins, d'une manière générale, celle-ci désigne un composé d'éléments organisés selon des principes propres à un dispositif particulier (Walter et al., 2018 ; Larroche, 2018). L'objet de cette thèse étant l'utilisation d'objets connectés pour stimuler le processus de construction des connaissances, nous nous intéressons au dispositif pour son rôle dans les activités de médiation des savoirs. Par conséquent, cette thèse mobilise la notion de dispositif au sens donné par (Peraya, 1999) dans le cadre de ses recherches sur les dispositifs médiatiques. Peraya donne la définition suivante du dispositif :

> « *organisation structurée de moyens matériels, technologiques, symboliques et relationnels qui modélisent, à partir de leurs caractéristiques propres, les comportements et les conduites sociales (affectives et relationnelles), cognitives, communicatives des sujets* ». Peraya (1999), p. 153.

Ainsi, le dispositif désigne le lieu où se situe l'analyse des activités médiatisées, il concentre les interactions sociales et techniques selon un fonctionnement qui lui est propre. Comme le rappelle Larroche, « *un dispositif possède une finalité, celle de résoudre un problème informationnel et/ou communication qui répond aux besoins des usagers du dispositif* » (Larroche, 2018, p. 105). S'agissant de la médiation des savoirs, ce problème informationnel et communicationnel est lié à la médiation des savoirs qui implique de transmettre les informations à l'apprenant tout en favorisant le processus d'apprentissage. La notion de dispositif permet alors de rendre compte des différents éléments impliqués pour favoriser l'apprentissage : éléments techniques, rôles des usagers, effets escomptés de l'utilisation.

Plusieurs qualificatifs ont été employés pour décrire les dimensions du dispositif : techno-sémiopragmatique (Peraya, 1999), socio-technique (Bonfils, 2007), dispositif infocommunicationnel (Couzinet, 2009). Dans sa revue de la littérature, Massou (2010) met en évidence trois dimensions récurrentes des dispositifs de formation : relationnelle, sémio-cognitive et technologique. Un dispositif comporte des supports d'information, permet d'organiser les relations entre les utilisateurs prenant part au dispositif et de soutenir leurs interactions. Les utilisateurs du dispositif interprètent et traitent un ensemble de signes véhiculés par les supports d'information représentant des savoirs.

Dans le cadre de la médiation des savoirs, le dispositif d'apprentissage est structuré autour d'objectifs d'apprentissage (e.g. apprendre le concept de température de couleur) et, d'une manière générale, vise à favoriser la construction des connaissances [27]. Un dispositif d'apprentissage structure des moyens matériels, techniques et symboliques pour encadrer les usages

26. Lors d'un interview pour la revue Ornicar ? en 1977, Foucault définit succinctement le dispositif comme « *un ensemble résolument hétérogène, comportant des discours, des institutions, des aménagements architecturaux, des décisions réglementaires, des lois, des mesures administratives, des énoncés scientifiques, des propositions philosophiques, morales, philanthropiques, bref : du dit, aussi bien que du non-dit, voilà les éléments du dispositif. Le dispositif lui-même, c'est le réseau qu'on peut établir entre ces éléments* ». Source : http://1libertaire.free.fr/MFoucault158.html.

27. Dans le cadre de la médiation documentaire, les dispositifs de médiation sont conçus pour accompagner les usages des bibliothèques. Leurs objectifs sont de favoriser l'accès, l'appropriation et la dissémination des contenus des bibliothèques (Dujol & Mercier, 2017).

selon une stratégie d'apprentissage. De ce fait, l'on peut concevoir des dispositifs soutenant des stratégies et des objectifs d'apprentissage différents à partir de technologies identiques.

Rapporté à la problématique de recherche de cette thèse, un dispositif d'apprentissage dans le contexte de l'IdO serait composé d'un ou plusieurs objets connectés dont le cadre d'utilisation est déterminé par une stratégie d'apprentissage actif. Comme nous l'avons au chapitre précédent, les stratégies d'apprentissage actif visent l'engagement cognitif, physique et social de l'apprenant l'amenant à résoudre des problèmes, à mener des enquêtes ou à expérimenter (voir section 1.3). Concernant la dimension technique du dispositif, les objets connectés peuvent avoir fait l'objet d'une programmation particulière (e.g. installation d'une application) et sont sélectionnés pour leurs spécificités par rapport à un objet d'apprentissage et à la stratégie d'apprentissage mise en œuvre.

Nous avons vu que les TIC s'insèrent dans un dispositif d'apprentissage où a lieu la médiation entre l'apprenant et le savoir. Le dispositif encadre des usages dont l'objectif est la construction des connaissances.

Usages de dispositifs d'apprentissage

La notion d'usage apparaît avec les études de réception menées aux États-Unis pour comprendre le rapport entre les programmes des médias et les récepteurs (Lazar, 1993). Dans les années 1970, l'approche « *uses and gratifications* » émerge à partir de plusieurs travaux étudiant non pas ce que les médias font aux individus, mais plutôt « *ce que font les gens avec les médias* » (Lazar, 1993). À partir du début des années 1980, cette approche se retrouve en France dans les travaux fondateurs de la sociologie des usages [28]. Les études menées sur les usages des objets techniques, dont l'objectif était initialement d'identifier les usages déviants du mode d'emploi, montrent alors que l'usage est un processus créatif influencé par le cadre social (Jauréguiberry, 2008).

L'usage ne se résume pas à la « bonne » ou à la « mauvaise » utilisation d'un dispositif d'apprentissage, mais comporte une dimension fonctionnelle « *comment on s'en sert ?* » et une dimension symbolique et sociale, « *qu'est-ce qui se joue ?* » (Jeanneret, 2009). Une distinction doit être faite entre l'utilisation, désignant des interactions ponctuelles entre l'utilisateur et un dispositif socio-technique, et l'usage qui revêt un sens plus large intégrant le cadre social (Chaudiron & Ihadjadene, 2010). Les usages sont des « *modes d'utilisation se manifestant avec suffisamment de récurrences [...] pour être capables de se reproduire et éventuellement de résister en tant que pratiques spécifiques* » (Lacroix, Moeglin, & Tremblay, 1992, p. 132). Ainsi, il s'agit d'une utilisation liée à un contexte social spécifique et relativement stable dans le temps.

Pour Le Marec (2001), l'usage est l'ensemble formé par les projets de l'utilisateur, les contextes (e.g. culturel, social, physique) et les habiletés techniques. Perriault (1989) nomme logique d'usage le cadre permettant de décrire la diversité des usages pour un même usager et pour un même objet. L'usage implique un instrument, avec une fonction spécifique, utilisé selon un projet particulier ; ce qui suggère qu'un même instrument peut être utilisé avec des

28. Parmi ces travaux, on peut noter l'ouvrage *Le Magnétoscope au quotidien, demi pouce de liberté* dans lequel Baboulin, Gaudin, et Mallein (1983) mettent en évidence la composante sociale de l'usage des technologies à partir de l'étude de la réception du magnétoscope.

projets différents. Par exemple, l'assise d'une chaise peut aussi bien être utilisée pour s'asseoir ou comme escabeau pour atteindre des objets en hauteur.

Ainsi, ce que fait un utilisateur avec un dispositif dépend de ses intentions, du contexte de l'utilisation, de sa capacité à effectivement utiliser le dispositif en même temps que les possibilités d'utilisation qu'il offre. Notons que l'usage, ici employé pour décrire les interactions avec un dispositif d'apprentissage, est à distinguer de la pratique qui caractérise « *les approches centrées sur le "comportement composite" à l'œuvre dans les différentes sphères, informationnelles, culturelles, journalistiques, etc.* » (Chaudiron & Ihadjadene, 2010, p. 20).

Du champ de la sociologie des usages, nous pouvons dégager deux approches pour interpréter l'utilisation des technologies pour l'apprentissage : la généalogie des usages et l'appropriation (Jouët, 2000).

La généalogie des usages appréhende ces derniers sous l'angle historique et montre qu'ils n'émergent pas *ex nihilo*, mais trouvent leur origine dans des pratiques existantes (Jouët, 2000). Perriault (2002) décrit l'effet diligence comme étant l'application de protocoles anciens à des technologies nouvelles. Ainsi, lorsque de nouvelles technologies sont introduites dans le monde de l'éducation, les premiers usages reproduisent des pratiques existantes [29]. Par exemple, les cours distribués en ligne tels que les *Massive Open Online Course* (MOOC) [30] reproduisent les codes du cours magistral (e.g. présentation vidéo, lecture de textes). Il en va de même pour les *Learning Management System* (LMS) proposant de nombreuses fonctionnalités pour assurer des formations en ligne : partage de ressources, espace de discussion, tests de validation des connaissances, suivi des apprentissages, gestion des notes, contrôle des absences, etc. Les études sur l'utilisation des LMS mis en place par les institutions d'enseignement montrent qu'ils sont majoritairement utilisés pour distribuer des documents (Rhode et al., 2017), comme le ferait un enseignant pendant son cours.

L'approche de l'appropriation étudie les usages sous l'angle de leur construction par rapport aux intérêts des usagers, à leurs habiletés techniques et aux possibilités d'utilisation (Jouët, 2000). Les qualités techniques d'une technologie ne déterminent pas seules l'usage ou le non-usage, ce dernier est aussi modulé par les significations projetées et construites par l'usager. Pour Perriault (1989), les usages déviants du mode d'emploi ne sont pas des erreurs de manipulation, mais relèvent de la logique d'usage : l'instrument et la fonction ne changent pas, au contraire du projet d'utilisation. Les technologies peuvent être utilisées en dehors des cadres pensés par les concepteurs et, par exemple, servir des objectifs d'apprentissage. C'est le cas du réseau socio-numérique Twitter, initialement conçu pour partager des moments de la vie quotidienne, mais aussi utilisé pour organiser des dictées [31].

Nous venons de rapporter les définitions des notions de médiation, de dispositif et d'usage. La médiation des savoirs englobe la relation entre l'apprenant et le savoir ainsi que le dispositif médiatique permettant la transmission des informations et conçu pour créer des conditions favorables à l'apprentissage. Le dispositif n'est pas seulement technique, mais un ensemble d'éléments hétérogènes mettant en adéquation des spécificités matérielles avec un projet d'ap-

29. La continuité pédagogique opérée par les enseignants lors du confinement provoquée par la pandémie de Covid-19 fournit de nombreux exemples de l'effet diligence. Les enseignants ont cherché à reproduire leur mode d'enseignement en présentiel en s'aidant des plateformes de visio-conférence et de discussions vocales.

30. Dans cette thèse, nous utiliserons l'acronyme MOOC, plus commun, plutôt que l'acronyme français CLOM : Cours en Ligne Ouvert et Massif.

31. Source : https://www.twictee.org/twictee/. Consulté le 10 mai 2020.

prentissage. Les usages des TIC dépendent des pratiques préexistantes, des projets d'utilisation et dans le cadre de l'apprentissage, comme nous allons le voir, l'usage est influencé par les théories d'apprentissage dominantes.

2.2.2 Environnement et ressources d'apprentissage

À la base des dispositifs d'apprentissage, les TIC ont permis une diversification des modalités d'apprentissage et d'enseignement. Les TIC conduisent à une réorganisation spatiale et temporelle des activités d'enseignement et d'apprentissage qui mettent au centre l'apprenant (Glikman, 2002). Dans les sections suivantes, nous présentons l'évolution des TIC pour l'apprentissage et nous interrogeons leurs effets pour l'apprenant.

Évolution des technologies pour l'apprentissage

L'évolution des technologies pour l'apprentissage et leur utilisation ont accompagné les théories de l'apprentissage, du béhaviorisme aux courants constructiviste et connectiviste. Le développement de l'informatique et des TIC ont donné lieu à plusieurs vagues successives de travaux regroupés autour de terminologies différentes.

À partir des années 1970, les ordinateurs sont utilisés dans le cadre de l'enseignement programmé (*programmed instruction*)[32] pour leurs « *capacités de répétition et de renforcements* » (Albero, 2004, p. 23). Ces « machines à enseigner » implémentent des principes béhavioristes et proposent principalement des exercices et des programmes d'entraînement. Avec l'importance croissante de l'informatique dans les travaux sur les machines à enseigner, d'abord avec les postes de travail puis avec la micro-informatique grand public, l'enseignement programmé devient l'enseignement assisté par ordinateur (EAO).

Dans les années 1980, l'enseignement intelligemment assisté par l'ordinateur (EIAO) qui marque un éloignement avec le béhaviorisme pour prendre en compte les travaux issus de l'approche cognitive (Lowyck, 2014). Les dispositifs d'apprentissage conçu sont des didacticiels et des micromondes ; des environnements artificiels dans lequel l'apprenant peut s'exercer. Le développement du multimédia permettra d'améliorer la présentation des informations liées aux savoirs en combinant plusieurs modalités (e.g. texte, image, son). Une partie des travaux issus de la recherche sur l'IA seront exploités pour créer des *Intelligent Tutoring System* (ITS) conçus pour accompagner l'apprenant lors de la résolution de problèmes en suivant son raisonnement et en identifiant ses erreurs.

Les travaux de Papert à partir des années 1970-80 ont eu une influence persistante sur la conception d'environnements informatiques pour l'apprentissage. Papert élabore sa vision de l'informatique éducative en puisant dans la théorie constructiviste de Piaget. Il postule que la construction des connaissances — une activité mentale — est favorisée par la construction d'une réalité concrète (Balacheff, 2017). L'objectif est que l'apprenant construise ses connaissances en produisant quelque chose, car une construction réussie dans la tête l'est davantage lorsqu'une construction est réussie dans le monde réel (Papert, 1994). Papert crée en 1967 le langage de programmation LOGO et en 1970 une Tortue programmable comme support d'activités d'apprentissage. Dans un environnement ouvert, les apprenants peuvent programmer

32. Toutefois, les travaux sur l'enseignement programmé existaient dès les années 1950-1960. Le lecteur curieux peut consulter la frise chronologique élaborée par Watters sur son site : http://teachingmachin.es/.

la tortue et améliorer leur capacité à résoudre des problèmes par eux-mêmes.

À partir des années 1990 et 2000, l'essor de l'informatique en réseau et l'amélioration des interfaces humain-machine conduiront au champ de recherche sur les environnements informatiques pour l'apprentissage humain. Les EIAH deviennent des dispositifs d'apprentissage complexe faisant appel à plusieurs disciplines : SIC, sciences de l'éducation, ergonomie, psychologie, informatique (Albero, 2004). Ils implémentent les principes des théories constructivistes et socio-constructivistes où l'accent est mis sur l'activité de l'apprenant et les interactions avec ses pairs. L'apprenant, au centre du dispositif, peut librement explorer et expérimenter ainsi que collaborer.

En outre, la croissance exponentielle d'internet, et des services associés (e.g. web, courriels, transfert de fichiers) ouvre la voie à l'apprentissage à distance ou *e-learning*. Ce dernier est l'utilisation « *des technologies multimédias et l'internet, pour améliorer la qualité de l'apprentissage en facilitant l'accès à des ressources et des services, ainsi que les échanges et la collaboration à distance* » (Commission européenne, 2000). L'apprentissage à distance a vu le jour avec l'imprimerie et les services postaux puis a continué son développement avec les médias audiovisuels (e.g. télévision éducative, baladodiffusion)[33]. Cependant, l'accessibilité de l'informatique, du réseau internet et du Web ainsi que des appareils mobiles a permis le développement de l'apprentissage à distance à une plus large échelle.

Dans leur évolution, les dispositifs d'apprentissage s'appuient de manière croissante sur la notion d'environnement d'apprentissage, c'est-à-dire le cadre physique ou numérique dans lequel se joue la médiation des savoirs (Lowyck, 2014). Les dispositifs d'apprentissage proposent à l'apprenant un environnement, physique et/ou numérique, composé d'outils et de ressources d'apprentissage visant à soutenir la construction des connaissances.

Ressources d'apprentissage

Dans le cadre de l'*e-learning*, les dispositifs d'apprentissage prennent plusieurs formes : LMS, *Virtual Learning Environment* ou encore plateformes de MOOC. Ces dispositifs intègrent des fonctionnalités pour les tâches administratives (e.g. gestion des parcours de formation), d'enseignement (e.g. évaluation des travaux) et d'apprentissage. Dans ce dernier cas, les formations proposées aux apprenants sont construites à partir d'un ensemble de ressources d'apprentissage : supports de présentation, livres, pages web, fichiers de baladodiffusion, etc. La quantité croissante d'informations accessibles *via* internet et le web, notamment avec des projets tels que Wikipédia, favorise une logique de réutilisation plutôt que de conception *ex nihilo*. Les informations existantes sont structurées en fonction d'objectifs pédagogiques sous la forme de ressources d'apprentissage réutilisables.

La possibilité de réutiliser ou non une ressource d'apprentissage repose sur son interopérabilité, c'est-à-dire le degré de liberté avec laquelle elle peut être traitée et partagée par des systèmes informatiques différents[34]. Plusieurs standards ont vu le jour pour structurer

33. En 1728, le journal Boston Gazette fait de la publicité pour le premier cours recensé d'enseignement par correspondance (Kaplan & Haenlein, 2016). En 1852, grâce à l'imprimerie et aux services postaux, un cours de sténographie est administré via des échanges de courrier (Casey, 2008). À partir des années 1960, les médias audiovisuels réduisent le temps entre l'émission et la réception des cours (Casey, 2008 ; Kaplan & Haenlein, 2016) : en 1921, les universités de Salt Lake City, du Wisconsin et du Minnesota lancent des radios éducatives ; en 1969 la Open University (UK) est créée pour la diffusion de cours via la télévision.

34. Selon le Référentiel européen d'interopérabilité pour les services gouvernementaux et pan-européens,

et uniformiser la description des ressources afin qu'elles soient interopérables dont : SCORM (*Sharable Content Object Reference Model*), Dublin Core, LOM (*Learning Object Metadata*) ou MLR (*Metadata for Learning Resources*)(Bianco, De Marsico, & Temperini, 2004 ; Bourda et al., 2010). SCORM est un standard conçu pour les LMS afin de décrire les ressources et les données générées lors des interactions de l'apprenant avec le dispositif. xAPI, le successeur de SCORM, a été conçu pour être indépendant d'un type de dispositif particulier et permet de prendre en compte toutes les formes d'actions effectuées par l'apprenant, par exemple, comprises dans un LMS ou depuis un objet connecté (e.g. tablette, smartphone, montre) [35]. Ainsi, xAPI est un standard de description adapté au contexte de l'IdO et des objets connectés.

Dans le contexte numérique, les standards de description sont utilisés pour décrire un « objet/ressource pédagogique », un « objet/ressource d'apprentissage » ou encore une « ressource éducative libre » [36]. Ces expressions font référence à des contextes différents (e.g. LMS, environnement ouvert), mais se rejoignent pour désigner un « *bloc de contenus qui se focalise sur un objectif d'apprentissage spécifique [...] incluant du texte, des images, de la vidéo, des sons, des animations, etc.* » (Simard, 2002). La ressource numérique est un ensemble d'informations formant une unité conçu pour un objectif d'apprentissage pouvant s'intégrer dans un ensemble plus large : scénario pédagogique, activité d'apprentissage, cours, etc.

La notion de ressource d'apprentissage n'est pas réservée aux contenus numériques, mais englobe « *toute entité, numérique ou non-numérique, qui peut être utilisée pour l'apprentissage, l'enseignement ou la formation* » (IEEE, 2002, p. 5). Ce faisant, une ressource d'apprentissage peut également être tangible, à l'exemple des jouets et des objets éducatifs imaginés par les penseurs partisans d'un apprentissage par l'expérience et de l'engagement aussi bien cognitif que physique (Zuckerman, 2006). Par exemple, Dewey mettait l'accent sur le rôle de l'environnement, des décors et des objets pour créer des conditions propices à l'apprentissage simulant la réalité (voir section 1.2.3) (Houssaye, 2013 ; Zuckerman, 2006).

La méthode pédagogique élaborée par Montessori [37] s'appuie également sur un « matériel didactique » pour stimuler l'apprentissage. Postulant que l'activité et l'engagement corporel sont des ingrédients nécessaires pour apprendre, Montessori préconise un environnement d'apprentissage enrichi par des ressources tangibles (Courtier, 2019). Ces dernières doivent être sobres, intégrer un mécanisme d'auto-correction [38] et représenter les propriétés de concepts abstraits, dont la conception doit favoriser la reconnaissance. D'une manière générale, le rôle des ressources d'apprentissage tangibles est de favoriser l'activité de l'apprenant avec des objets soutenant un apprentissage par la manipulation, l'exploration et l'expérimentation [39].

---

l'interopérabilité est la capacité des objets connectés et des services qu'ils supportent « *à échanger des données et à permettre le partage de l'information et des connaissances* ». Source : https://ec.europa.eu/idabc/servlets/Doca2cd.pdf?id=19528. Consulté le 30 juillet 2019.

35. Source : https://xapi.com/overview/. Consulté le 29 mai 2020.

36. Les ressources éducatives libres sont « *des matériaux d'enseignement, d'apprentissage ou de recherche appartenant au domaine public ou publiés avec une licence de propriété intellectuelle permettant leur utilisation, adaptation et distribution à titre gratuit* » Source : https://fr.unesco.org/themes/tic-education/rel. Consulté le 20 février 2020.

37. Maria Montessori est aussi reconnue comme étant, en 1896, l'une des premières femmes à être diplômée de médecine en Italie.

38. L'objet intègre un mécanisme de retour sur erreur permettant à l'apprenant de se corriger sans l'intervention d'une tierce personne.

39. L'efficacité de la pédagogie Montessori est difficile à évaluer scientifiquement, car elle est mise en place dans des écoles privées limitant la pertinence d'une expérience contrôlée : faibles effectifs, homogénéité des profils des parents. On peut noter l'étude de Courtier (2019) menée sur trois ans sur 200 enfants d'une école

Ce principe fait écho à la théorie de la cognition incarnée que nous avons présentée en section 1.2.3 postulant que les fonctions sensori-motrices soutiennent la cognition.

Une troisième catégorie de ressources d'apprentissage se situe à l'intersection entre le numérique et le physique. Faisant écho à la pédagogie Montessori et aux travaux de Papert, Resnick et al. (1998) décrivent les « manipulés virtuels » (*digital manipulatives*), des jouets intégrant des capacités de calcul et de communication. Leur objectif est de rendre accessible aux plus jeunes des concepts abstraits par la manipulation directe de jouets augmentés. Les travaux de Resnick et de ses collègues sont cantonnés aux jouets, mais nous verrons qu'avec l'IdO l'idée de ressources d'apprentissage couplant le physique avec le numérique va se généraliser pour englober d'autres objets.

Effets des TIC sur l'apprentissage

Le premier effet des TIC sur l'apprentissage est la recomposition des modalités spatiales et temporelles de l'apprentissage impliquant notamment un découplage entre apprendre et enseigner. Apparu dans les années 1990 pour désigner simplement l'utilisation des TIC dans l'enseignement, l'apprentissage mixte (ou *blended learning*) est ensuite associé à la combinaison de plusieurs stratégies d'apprentissage (Friesen, 2012). Ces stratégies se distinguent par la manière dont les TIC sont utilisées pour organiser les activités d'apprentissage dans le temps et l'espace (Charlier, Deschryver, & Peraya, 2006) : entièrement à distance ou en présentiel, en combinant des activités synchrones en face à face avec des activités asynchrones à distance, etc. Pour Bates (2015), l'apprentissage mixte est un continuum partant d'activités d'apprentissage entièrement en face à face jusqu'aux activités d'apprentissage complètement en ligne [40].

La diversification des modalités d'apprentissage pose la question de l'efficacité : dans quelles conditions les TIC rendent-elles l'apprentissage efficace ? Dans son livre *The No Significant Difference Phenomenon*, Russell (1997) réunit un corpus de 355 publications montrant l'absence de différence significative lorsqu'on compare les effets des technologies sur l'apprentissage [41]. Quand des effets positifs liés aux TIC sont identifiés, ceux-ci sont moins dus à la technologie en elle-même qu'aux conditions d'apprentissage qu'elle induit pour l'apprenant (Nortvig, Petersen, & Balle, 2018).

Ainsi, l'apprentissage n'est pas influencé par les technologies seules — la technique ne fait pas apprendre mieux — mais par l'ensemble des dimensions du dispositif d'apprentissage dans lequel elles s'insèrent (R. E. Clark, 1994). Les dimensions techniques, sociales, organisationnelles et pédagogiques créent des conditions qui vont plus ou moins favoriser la construction de connaissances. Selon Dieuzéide (1965 ; cité par Jacquinot-Delaunay, 2007), les technologies ont des spécificités qui peuvent être exploitées à des fins d'apprentissage, mais selon des espaces d'utilisation et d'intégration précis. Il s'agit d'interroger ce que les caractéristiques des technologies peuvent soutenir comme stratégie d'apprentissage, pour quels types de savoirs

maternelle faisant état de résultats positifs, notamment pour l'apprentissage de la lecture.

40. L'apprentissage mixte peut aussi bien être la mise à disposition du support de présentation d'un cours, un devoir à effectuer en ligne après la séance de cours, ou bien le suivi d'un cours entièrement en ligne.

41. À la suite de Russell, le National Research Center for Distance Education and Technological Advancement maintien à jour une base de publications montrant l'absence ou la présence de différences significatives. Source : https://detaresearch.org/research-support/no-significant-difference/. Consulté le 20 février 2020.

et en accord avec l'état des connaissances sur les mécanismes de l'apprentissage.

Nous avons vu que les technologies pour l'apprentissage ont évolué en fonction des possibilités techniques et des théories d'apprentissage dominantes, mais également sous l'influence des pratiques existantes et des usages qui ont émergé. Les technologies sont utilisées dans le cadre plus large de dispositifs qui structurent les interactions de l'apprenant (e.g. avec les moyens techniques, avec leurs pairs) et fournissent des ressources d'apprentissage. Ainsi, l'étude des usages éducatifs des technologies doit conjuguer une analyse de ce qu'il est possible de faire techniquement, des usages qui en découlent et des pratiques existantes, de leur pertinence vis-à-vis des mécanismes de l'apprentissage et, *in fine*, des effets induits sur le processus de construction des connaissances. S'agissant des objets connectés, nous verrons dans les chapitres suivants que leurs spécificités résident principalement dans le couplage physique/numérique qu'ils opèrent ce qui conduit à des usages particuliers pour l'apprentissage.

2.2.3 Modes d'apprentissage

Au fil des évolutions, les TIC ont permis de diversifier les modes de transmission de l'information ce qui s'est traduit par de nouvelles façons d'apprendre. Les premiers dispositifs d'*e-learning* proposaient un mode d'apprentissage avant tout réceptif basé sur l'accès, la récupération et la consultation de contenus. Par la suite, le web social, l'informatique mobile, le *cloud Computing*, la réalité virtuelle et la réalité augmentée ont porté des modes d'apprentissage basés sur la collaboration, l'immersion, la mobilité et l'inscription dans les activités quotidiennes. Dans les sections suivantes, nous dressons un aperçu de la manière dont ces technologies sont utilisées, car les modes d'apprentissage qu'elles soutiennent se retrouvent dans les usages existants des objets connectés que nous avons observés.

Apprentissage collaboratif

L'avènement du web social[42] au début des années 2000 a progressivement transformé le Web en un espace interactif et social, avec des échanges en temps réel et des utilisateurs créateurs de contenus. Cela a été rendu possible grâce au développement d'outils de création et de transmission de contenus avec des interfaces humain-machine plus accessibles aux utilisateurs moins à l'aise avec la technique (O'Reilly, 2007). Au contraire des médias traditionnels régient par un principe de réception, le Web social soutient des activités relationnelles et participatives variées composées d'interactions, d'échanges et de communautés (Chomienne & Lehmans, 2012).

Dans le domaine éducatif, les nouvelles possibilités de socialisation et de communication soutenues par le web social ont apporté de nouveaux moyens pour soutenir l'apprentissage collaboratif. Dans le cadre de l'apprentissage collaboratif[43], les apprenants participent à des activités collectives en contribuant à la réalisation d'une tâche générale et en s'appuyant sur les ressources fournies par le dispositif. Cette stratégie d'apprentissage s'inscrit dans les

42. Le web social est aussi appelé Web 2.0, reprenant ainsi le mode de numérotation des versions des programmes informatiques. Cette numérotation est fréquemment reprise par les prospectivistes pour nommer les potentielles futures versions du web : Web 3.0 pour l'IdO ou le Web sémantique ; Web 4.0 pour le Web mobile ou le Web émotionnel ; Web 5.0 pour la fusion des biotechnologies et de l'informatique, etc.

43. La collaboration est à distinguer de la coopération où chacun travaille d'abord individuellement avant une mise en commun des travaux.

travaux de Vygotski et du socio-constructivisme en faisant reposer l'apprentissage sur les interactions sociales (Baudrit, 2007). Les apprenants co-construisent leurs connaissances *via* des échanges constants ; c'est une négociation permanente et synchrone entre les apprenants pour maintenir une compréhension partagée d'un problème (Dillenbourg, 1999). Si l'apprentissage en groupe comporte des inconvénients tels qu'un engagement différent de la part des membres d'un groupe, il favorise le partage des connaissances entre les apprenants.

Née dans les années 1990 avec le développement d'internet et du web, la recherche sur les dispositifs *Computer-supported collaborative learning* (CSCL)[44] vise la création d'outils pour soutenir les interactions sociales, permettant le partage et la (co-) construction des connaissances (Stahl, Koschmann, & Suthers, 2006). L'enjeu des systèmes CSCL est de créer des conditions favorables à la socialisation et la collaboration entre les apprenants aussi bien *via* des moyens techniques (e.g. chats, forums, wikis) que par des stratégies d'apprentissage. Les dispositifs CSCL appliquent plusieurs stratégies pour encadrer la collaboration entre les apprenants (Dillenbourg & Hong, 2008) :

— avec des outils de communication ;

— en rendant l'objet d'apprentissage manipulable par les apprenants ;

— en formant des groupes spécifiques ;

— en affichant l'état des interactions entre les membres d'un groupe ;

— en donnant des conseils pour améliorer la qualité des interactions ;

— en scénarisant les rôles et les actions des apprenants.

Les dispositifs CSCL ont des effets positifs sur l'apprentissage en ceci qu'ils favorisent le développement des compétences de haut niveau telles que le raisonnement critique, la capacité à s'auto-diriger et à collaborer (Vogel et al., 2017).

Apprentissage mobile

Après les premiers dispositifs d'*e-learning*, le développement de l'informatique mobile réduit une nouvelle fois les contraintes de temps et d'espace pour apprendre. L'essor des téléphones mobiles et des smartphones en même temps que l'amélioration de leur performance matérielle (e.g. bande passante, mémoire, calcul) permet une utilisation quotidienne du réseau et la consultation de contenus multimédias. Comme le symbolise l'acronyme ATAWADAC, l'information tend à être accessible en tout temps (*AnyTime*), en tout lieu (*AnyWhere*), depuis de multiples appareils (*AnyDevice*) et en des formats variés (*AnyContent* ; e.g. texte, vidéo, audio) (Badillo, 2015).

L'apprentissage mobile[45] a été défini de nombreuses manières suivant la période de la recherche, la discipline scientifique et les aspects des appareils mobiles pris en compte. À partir de l'analyse des définitions existantes dans la littérature, Grant (2019) a identifié quatre catégories de définitions se rapportant à :

44. De manière plus générale, les dispositifs pour l'apprentissage collaboratif sont aussi désignés par l'expression *e-learning* 2.0.

45. L'apprentissage est qualifié de mobile cependant Bordeaux et Renaud (2018) notent que « *la mobilité numérique repose moins sur un accroissement de l'amplitude des déplacements physiques des usagers que sur la possibilité de transporter avec soi, sur soi, des dispositifs permettant d'accéder à des informations numériques* ».

— l'utilisation de ressources et la recherche d'informations au moment où l'apprenant en a besoin ;

— l'exploitation des appareils mobiles et des réseaux cellulaires pour soutenir des activités d'enseignement et d'apprentissage ;

— la médiation opérée par les appareils mobiles des interactions entre l'environnement et les individus ;

— l'apprentissage à travers des contextes différents, en tous lieux et à tous les moments.

L'apprentissage mobile (*m-learning*) se développe au début des années 2000 avec des projets s'apparentant à une extension du *e-learning* : les ressources d'apprentissage sont stockées, transposées et rendues accessibles sur des terminaux mobiles (Traxler, 2009) [46]. Progressivement, les projets d'apprentissage s'appuient sur les spécificités des appareils mobiles [47] : la portabilité, l'accès à l'information en tout lieu, le stockage de documents et les interactions avec l'environnement (Traxler, 2009 ; Sharples, Taylor, & Vavoula, 2006). En outre, en étant aussi bien utilisés pour des apprentissages formels, informels et non formels, les terminaux mobiles tendent à gommer les frontières entre ces différents cadres (Sharples et al., 2006).

Une partie importante des travaux sur l'apprentissage mobile se concentrent sur la conception de dispositifs d'apprentissage sensible au contexte de l'apprenant (*context-aware*) (Sharples et al., 2006). Le contexte étant défini par l'environnement physique, le temps, le type d'appareil ainsi que le profil de l'apprenant (Soualah-Alila, Nicolle, & Mendes, 2014). L'objectif des dispositifs sensibles au contexte est de proposer des ressources d'apprentissage adaptées au contexte de l'apprenant, par exemple, qui prennent en compte le lieu et l'appareil utilisé.

La revue de la littérature menée par Suárez et al. (2018) fait état d'autres usages des appareils mobiles. Les auteurs constatent que les appareils mobiles sont également utilisés comme support à l'apprentissage par l'investigation : les apprenants peuvent consulter des informations en fonction de leur localisation et ils peuvent collecter des données sur l'environnement (e.g. prise de note, photo, texte). Les travaux analysés par Suárez et al. (2018) montrent également que les appareils mobiles sont utilisés pour maintenir la communication entre les apprenants et avec les enseignants.

Dans les établissements scolaires, l'apprentissage mobile est introduit de manière ponctuelle par la pratique du *Bring Your Own Device* (BYOD) [48]. Le BYOD est l'utilisation des appareils personnels des élèves et des étudiants dans un cadre formel, par exemple lors des activités pédagogiques mises en place par l'enseignant. L'intérêt du BYOD est double : l'apprenant utilise un appareil qu'il connaît bien ce qui permet à l'établissement de réduire les achats d'équipements informatiques [49]. Cependant, la pratique du BYOD soulève plusieurs

46. Cette utilisation des appareils mobiles est un exemple de l'effet diligence décrit par Perriault (voir section 2.2.1).

47. La portabilité et le moindre coût de l'infrastructure réseau (e.g. antennes 3G) comparé à l'installation de lignes fixes favorisent la croissance de l'internet mobile dans les pays en voie de développement. L'UNESCO a fait de l'apprentissage mobile un outil au service du développement des politiques éducatives dans des zones où l'accès à l'éducation est limité. Source : https://en.unesco.org/themes/ict-education/mobile-learning. Consulté le 6 mai 2020.

48. En français, l'acronyme est AVEC pour « Apportez Votre Équipement personnel de Communication ».

49. Le « plan pour le numérique à l'école » lancé par le gouvernement du président Hollande en mai 2015 avait pour objectif d'équiper 100% des collégiens avec des tablettes tactiles. Ce plan s'est révélé coûteux et n'a pas été prolongé par le gouvernement suivant qui a préféré s'orienter vers le BYOD. En 2019 a été lancé l'appel à projets « *Collèges numériques et expérimentations de projets pédagogiques innovants s'ins-*

problématiques (Braunstein, 2012 ; Martin & Hardt, 2016) :

— il peut être un révélateur d'inégalités entre les élèves qui possèdent des appareils haut de gamme et ceux ayant des modèles bon marché ;

— une infrastructure est nécessaire pour accueillir les appareils des élèves (e.g. prises, chargeurs, connectivité) ;

— les appareils des élèves représentent une faille de sécurité, car ils se connectent au réseau de l'établissement. Cela implique la mise en place de politiques de sensibilisation à la sécurité informatique et d'encadrement des usages ainsi qu'un investissement dans des ressources informatiques spécifiques (e.g. surveillance du réseau).

Dans son article, Traxler constate que, contrairement aux attentes, l'apprentissage mobile dépasse peu le stade de la consultation de documents en mobilité, car selon lui « *en pratique, les étudiants lisent leurs notes dans le bus* » [50]. Dans certains cas, les appareils mobiles sont utilisés comme instrument pour interagir avec l'environnement favorisant ainsi un apprentissage actif. Cependant, majoritairement, les dispositifs de *m-learning* adoptent un modèle transmissif s'appuyant sur les spécificités des appareils pour adapter la distribution des contenus [51]. Afin de rendre les dispositifs de *m-learning* plus interactifs, plusieurs travaux se sont porté sur l'intégration des technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée.

Apprentissage par l'immersion

La réalité virtuelle est la simulation d'un environnement virtuel dans lequel l'utilisateur peut s'immerger et interagir avec des éléments (Radianti et al., 2020). L'environnement produit est multisensoriel, car il simule des stimuli captés par plusieurs des sens humains (e.g. son, vue, geste). La réalité virtuelle est la simulation d'environnements virtuels et multisensoriels au sein desquels l'utilisateur peut s'immerger et interagir avec les contenus (Radianti et al., 2020). La réalité virtuelle devient accessible à partir de 2012 avec la commercialisation des casques (*Head Mounted Display*, HMD) tels que l'Oculus Rift, le HTC Vive et des dispositifs sur mobile (mobile VR) à l'exemple du Google Cardboard [52]. En plus des HMD et des applications mobiles, il existe des pièces entièrement dédiées à la réalité virtuelle, les *Cave Automatic Virtual Environment*.

La réalité mixte est un continuum représentant différents degrés de combinaison entre des éléments virtuels et des éléments du monde physique (Milgram & Kishino, 1994) (voir Figure 2.4). Partie intégrante de ce continuum, la réalité augmentée est « *la possibilité d'augmenter*

crivant dans une démarche BYOD/AVEC » dans le cadre du Programme d'Investissement Avenir (PIA). Sources : https://www.nextinpact.com/news/106943-leducation-nationale-ne-prolongera-pas-plan-tablettes-francois-hollande.htm, http://www.brunodevauchelle.com/blog/?p=2880.

50. La phrase originale complète est « *we've ended up with mobile access to virtual learning environments that are being used as repositories. So, in practice, students reading their notes on the bus* ». Source : https://www.jisc.ac.uk/news/what-killed-the-mobile-learning-dream-26-feb-2016-inform. Consulté le 10 mai 2020.

51. On peut donner l'exemple des applications de *micro-learning* dont l'objectif est de distribuer de courtes unités d'apprentissage dans les moments de pause et d'inactivités du quotidien (e.g. arrêt de bus, file d'attente). Source : https://www.digiforma.com/definition/micro-learning/. Consulté le 10 mai 2020.

52. Les premiers projets de réalité virtuelle sont apparus dans les années 1970, mais ils étaient peu accessibles et offraient une expérience limitée. Le Sensorama créé par Heilig en 1962 est l'une des premières installations de réalité virtuelle ; l'installation projetait des vidéos en 3D en grand-angle, propageait des odeurs et créait une sensation de vent. D'autres projets de réalité virtuelle verront le jour au cours des années 1970 et 1980, mais ils étaient limités par les ressources informatiques de l'époque. Source : https://patents.google.com/patent/US3050870A/en. Consulté le 7 mai 2020.

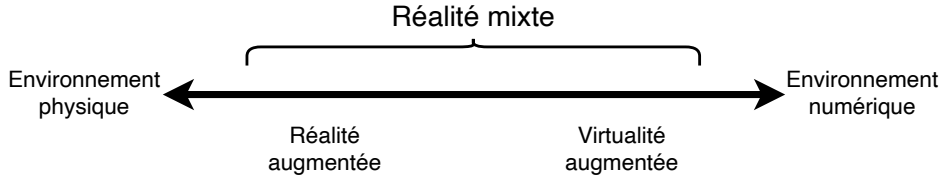


FIGURE 2.4 – **Continuum de la réalité mixte.** Adapté de Milgram et Kishino (1994).

l'environnement immédiat avec des données et des informations, dans des formats variés (e.g. visuels, audio, textes, vidéo) » (FitzGerald et al., 2013). La réalité augmentée combine dans un environnement non simulé des objets physiques et des objets virtuels qui, par un système de correspondance, sont mis en relation. De cette façon, le changement d'état d'un objet physique peut avoir une conséquence immédiate sur un objet virtuel. Les applications de réalité augmentée sont principalement dédiées aux appareils mobiles et fonctionnent soit à partir d'étiquettes, pour indiquer l'emplacement des objets virtuels, soit à partir de la géolocalisation (Munnerley et al., 2012).

Dans le cadre de l'apprentissage, la littérature existante relève avant tout de l'ingénierie et vise à explorer les possibilités techniques de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée. Par exemple, la réalité virtuelle est utilisée pour la visite de musées et de monuments [53], pour représenter des concepts abstraits [54] ou encore pour simuler un environnement réel afin de réaliser des entraînements [55]. Les dispositifs de réalité virtuelle et de réalité augmentée cherchent à proposer un apprentissage en immersion. L'immersion est d'abord technique : l'apprenant intègre un environnement virtuel calculé en temps réel et englobant plusieurs modalités sensorielles. Elle revêt aussi une dimension psychologique en produisant l'impression subjective d'isolement et de déconnexion entre l'expérience de l'apprenant et le monde réel (C. Dede, 2009). Les technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée sont notamment utilisées dans les dispositifs d'apprentissage à distance afin de proposer des outils de simulation et d'entraînement (Blandin, 2010). Cela permet d'enrichir les formations en ligne initialement basées sur des textes, des images et des vidéos.

La réalité virtuelle et la réalité augmentée sont aussi utilisées pour créer des expériences inédites par rapport à la réalité, afin de se « *familiariser avec des concepts qui ne sont pas réalisables dans le monde physique* » [56] (Sutherland, 1965). L'objectif est de rendre concrets et palpables des concepts abstraits et « invisibles » au sens humain (Chris Dede, Salzman, & Loftin, 1996). Les technologies de réalité virtuelle et mixte permettent de créer des expériences contrôlées, en supprimant les éléments distractifs qui peuvent exister dans la réalité, et en fournissant un retour sur erreur en temps réel à l'apprenant (Radianti et al., 2020).

53. Source : http://www.artgp.fr/?lang=fr. Consulté le 9 mai 2020.

54. Par exemple, Holo-Math « *est une expérience en réalité mixte qui propose aux participants une ballade immersive pour interagir avec des concepts mathématiques* ». Source : https://holo-math.org/index-fr.html. Consulté le 9 mai 2020.

55. Par exemple, Bonfils et al. (2015) rapportent une étude sur l'utilisation d'environnements immersifs par un constructeur aéronautique pour assurer la formation des employés à travers des sessions de mise en pratique.

56. La phrase originale est « *A display connected to a digital computer gives us a chance to gain familiarity with concepts not realizable in the physical world. It is a looking glass into a mathematical wonderland.* ».

Ainsi, les technologies de réalité virtuelle et de réalité mixte sont adaptées aux stratégies d'apprentissage expérientiel et situé parce qu'elles permettent de créer des activités pratiques contextualisant les savoirs à apprendre.

En outre, les dispositifs d'apprentissage exploitant la réalité virtuelle et la réalité augmentée favorisent l'engagement corporel au cours de l'apprentissage. En section 1.2.3, nous avons vu que l'engagement corporel est étroitement lié aux fonctions cognitives supérieures et peut faciliter le traitement des informations. En ce sens, l'étude de Krokos, Plaisant, et Varshney (2019) montre que les déplacements dans l'espace dans un environnement virtuel ont un effet positif sur la rétention des informations.

Cependant, dans le cadre de l'apprentissage, l'aspect innovant et inédit de la réalité virtuelle et la réalité augmentée peut avoir un effet négatif en détournant l'attention de l'apprenant vers la technique plutôt que vers les connaissances. Également, l'ajout d'informations à l'environnement réel oblige l'apprenant à interpréter le sens de leur superposition vis-à-vis des objets réels et entraîner une surcharge cognitive.

Apprentissage ubiquitaire

L'évolution des TIC tend au développement d'une informatique ubiquitaire, un paradigme développé par Mark Weiser (1999) décrivant la fusion des technologies dans l'environnement [57]. Cela se traduit par une multiplication d'appareils mobiles accentuant la présence des TIC dans l'environnement et facilitant l'accès aux informations numériques. Ce dernier point est notamment permis par le *cloud Computing*, qui assure la synchronisation des données entre plusieurs appareils, ainsi que par des technologies permettant d'associer des informations numériques à des objets physiques. Un QR code ou une étiquette RFID [58] posée sur un objet quelconque peut être scanné par un appareil mobile et apporter des informations contextuelles. Ainsi, après l'*e-learning* et le *m-learning*, l'apprentissage ubiquitaire (*u-learning*) est l'utilisation des TIC pour imbriquer l'apprentissage avec les activités quotidiennes.

L'apprentissage ubiquitaire est un champ de recherche en développement depuis le début des années 2000 dont la définition n'est pas encore stabilisée (Bomsdorf, 2005). Dans la littérature, le *u-learning* est fréquemment défini en se référant à la possibilité d'apprendre en tout temps et en tout lieu (« *anywhere, at anytime* ») (Tahir, Haron, & Singh, 2018) cependant, cela ne permet pas une distinction claire avec le *m-learning*. Yahya et ses collègues proposent de définir l'apprentissage ubiquitaire comme « *un paradigme de l'apprentissage qui se déroule dans un environnement d'informatique ubiquitaire ce qui permet d'apprendre la bonne chose au bon endroit et au bon moment, de la bonne manière* » (Yahya, Arniza Ahmad, & Abd Jalil, 2010). Pour les auteurs, le *u-learning* exploite les technologies de l'informatique ubiquitaire pour soutenir l'apprentissage dans le cadre des activités quotidiennes des individus. Les dispositifs de *m-learning* cherchent à inclure l'environnement de l'apprenant dans un apprentissage déjà en cours. Tandis qu'avec le *u-learning*, l'apprentissage n'existe qu'uniquement par rapport à des éléments de l'environnement (Bomsdorf, 2005).

57. En raison des liens étroits entre l'Internet des Objets et l'informatique ubiquitaire, ce dernier est présenté de manière détaillée dans le chapitre 3.

58. La Radio-Identification (*radio frequency identification*, RFID) permettant de stocker des informations dans des étiquettes. En scannant les étiquettes, l'appareil peut récupérer les informations. Les étiquettes RFID sont utilisées pour identifier les livres ou les vêtements. Voir section 3.1.3.

De façon générale, les dispositifs d'*u-learning* soutiennent un apprentissage situé, car l'apprentissage se déroule en contexte et par rapport à une tâche ou à une activité authentique. La revue de la littérature de Cárdenas-Robledo et Peña-Ayala (2018) montre que l'apprentissage ubiquitaire est davantage utilisé pour l'apprentissage des sciences (e.g. écologie, botanique, zoologie). Par exemple, dans (Hwang et al., 2009), les auteurs proposent un dispositif de *u-learning* afin d'aider les jeunes chercheurs lors de la réalisation de leurs expériences scientifiques. Lorsqu'il utilise un instrument scientifique, le jeune chercheur peut scanner une étiquette avec son appareil mobile afin d'obtenir un tutoriel et des conseils d'utilisation. Les interviews semi-structurés menés par les auteurs montrent que le système est un gain de temps pour les chercheurs et permet d'apprendre au plus près du problème.

Dans les paragraphes précédents, nous avons présenté plusieurs modes d'apprentissage soutenus par les TIC en fonction de leurs spécificités techniques et des articulations possibles avec le processus d'apprentissage. À l'exemple de l'utilisation des appareils mobiles pour la distribution et la consultation de contenus, certains de ces modes d'apprentissage sont influencés par les pratiques préexistantes. Dans les sections suivantes, nous examinons les apports et les limites de l'apprentissage artificiel aux méthodes d'apprentissage humain.

2.3 Apprentissage artificiel au service de l'apprentissage humain

Qui est le « cancre de la pensée » entre l'humain et la machine ? s'interrogent Hofstadter et Sander (2013). Ils constatent qu'à première vue la machine est plus performante que l'humain, car elle est rationnelle, rapide, précise, fiable et infatigable. À l'inverse, l'humain prend des décisions irrationnelles, à une attention et une mémoire limitée et commet fréquemment des erreurs. Pourtant, malgré cela la machine est encore mise en défaut par l'humain. Plusieurs chercheurs en IA remarquent combien il est simple de simuler un raisonnement mathématique effectué par un adulte en comparaison des facultés de perception et de mobilité d'un enfant (M. L. Minsky, 2007 ; Moravec, 1986). De même, si les enfants apprenaient de la même manière que les méthodes d'apprentissage artificiel contemporaines, ils devraient parcourir plusieurs livres remplis de photos de girafes pour apprendre à reconnaître une girafe [59]. Or, en réalité, il ne faut que quelques observations, parfois une seule, aux enfants pour savoir ce qu'est une girafe et être capable d'en reconnaître une.

Selon Hofstadter et Sander (2013), les problèmes de perception de la machine sont liés à sa faible capacité d'analogisation comparé à celle de l'humain. Par exemple, la traduction d'un texte ne peut se faire par une simple analogie entre les mots d'une langue et une autre, mais implique des analogies à plusieurs niveaux d'abstraction. Car, dans un texte, « *la conversation gouverne les idées, les idées gouvernent les phrases, les phrases gouvernent les expressions, les expressions gouvernent les mots [...] les mots eux-mêmes gouvernent les lettres* » (Hofstadter & Sander, 2013, p. 36).

Cette thèse ne porte pas sur les systèmes d'intelligence artificielle (SIA) cependant, ils deviennent incontournables dès lors que l'on étudie les TIC en raison de leur intégration

59. Source : https://futureoflife.org/2020/06/15/steven-pinker-and-stuart-russell-on-the-foundations-benefits-and-possible-existential-risk-of-ai/. Consulté le 29 juillet 2020.

croissante dans les dispositifs numériques [60]. Nous verrons que les SIA sont nécessaires aux objets connectés, d'une part pour traiter les volumes de données qu'ils génèrent et, d'autre part, pour développer des fonctionnalités telles que l'interface vocale des enceintes connectées et la reconnaissance d'objets des voitures autonomes. Il nous semble nécessaire de porter notre regard sur le fonctionnement des SIA afin de pouvoir, par la suite, saisir les enjeux des liens entre les SIA et les objets connectés ainsi que leurs potentiels apports pour la médiation des savoirs. Par conséquent, les sections suivantes traitent des différentes méthodes pour élaborer des SIA et leur utilisation pour l'apprentissage humain [61].

2.3.1 Créer des SIA : des systèmes experts à l'apprentissage artificiel

La recherche sur l'IA débute formellement sous cette expression en 1955, lors de la rédaction par John McCarthy d'un programme de recherche qui a eu lieu à l'Université de Dartmouth [62]. Le programme de recherche est organisé pendant deux mois, en 1956, par Shannon, Minsky, Rochester et McCarthy [63], et réunit un panel pluridisciplinaire : Newell (informaticien et psychologue cognitiviste), Simon (économiste), Solomonoff (informaticien), Ashby (psychiatre), McCulloch (linguiste), Nash (mathématicien) [64].

Le programme de recherche de Dartmouth amorce une période faste et pleine d'optimisme pour la recherche sur l'IA qui mobilise plusieurs disciplines : philosophie, mathématiques, économie, neurosciences, informatique, cybernétique, linguistique et psychologie (Russel & Norvig, 2010). Les chercheurs fixent le projet ambitieux de créer des machines capables de processus mentaux de haut niveau tels que la perception, l'apprentissage et la résolution de problèmes. À cette période, les succès rapportés par les chercheurs sont davantage les témoins de leur excès d'enthousiasme que de l'importance des avancées [65]. En effet, les ressources informatiques étant rares, coûteuses et limitées en performance, le domaine du réalisable était restreint.

En visant la création de machines autonomes, simulant des facultés humaines, les chercheurs poursuivent les travaux pionniers de Turing sur la programmation d'une machine capable de penser.

60. Dans cette thèse, nous adoptons la définition de l'IA énoncée par Yann LeCun dans son cours au Collège de France : un « *ensemble de techniques permettant à des machines d'accomplir des tâches et de résoudre des problèmes normalement réservés aux humains et à certains animaux* » (https://www.college-de-france.fr/site/yann-lecun/Recherches-sur-l-intelligence-artificielle.htm). Cette définition s'inscrit dans la continuité de la vision de Turing et met l'accent sur la capacité d'un système à agir de manière similaire à un humain (Russel & Norvig, 2010).

61. Notons aussi que la recherche sur les SIA vise autant la conception de SIA simulant les capacités humaines (dont l'apprentissage) que la compréhension de ces mêmes capacités humaines (Simon, 1983). Autrement dit, concevoir des méthodes d'apprentissage artificiel est aussi un moyen de comprendre l'apprentissage humain.

62. Source : http://www-formal.stanford.edu/jmc/reviews/bloomfield/bloomfield.html. Consulté le 2 août 2019.

63. Appel à participations du projet de recherche : https://web.archive.org/web/20070826230310/http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html. Consulté le 2 août 2019.

64. Source : http://raysolomonoff.com/dartmouth/boxbdart/dart56ray812825who.pdf. Consulté le 2 août 2019.

65. « *John McCarthy définit cette période comme celle des premiers pas : 'Hé, maman... t'as vu ? Sans les mains !'* » (Russel & Norvig, 2010, p. 19).

Turing, le modèle de l'enfant

En 1936, Turing publie un article dans une revue de mathématiques qui pose les bases formelles d'une « machine universelle » capable d'effectuer les mêmes calculs qu'un être humain (Turing, 1936). L'objectif de Turing est de « *justifier la réduction de la calculabilité "humaine" [...] à la calculabilité par machine* » (Andler, 1998, p. 3) par la définition mathématique du calcul effectif et la conceptualisation d'une machine. Ultérieurement nommée Machine de Turing, il s'agit d'un dispositif de calcul virtuel modélisant le fonctionnement d'un appareil mécanique de calcul. La machine de Turing est composée d'un ruban imprimé de cases successives (contenant ou non des symboles), sur lesquelles on peut lire ou écrire un symbole, et d'un registre pour mémoriser les états d'une table de transitions (indiquant les actions à réaliser). La Machine est manipulée par une personne en suivant une procédure spécifique – un algorithme[66] — qui décompose le calcul en sous-ensembles d'actions pour parvenir au résultat. Ainsi, dès lors que l'on dispose de l'algorithme adapté, la machine peut effectuer les mêmes calculs qu'un humain (Turing, 1936).

En 1950, Turing considère la question « *les machines peuvent-elles penser ?* » dans un article publié dans une revue de psychologie et s'interroge sur la faisabilité d'une machine capable de simuler l'intelligence humaine (Turing, 1950). Pour répondre, Turing invente le « jeu de l'imitation », une expérience de pensée créant les conditions pour observer si une entité non humaine peut produire un comportement qu'un humain qualifierait d'intelligent. Le jeu comporte trois personnages : un interrogateur doit distinguer le sexe des deux autres personnages situés dans une pièce différente et hors de son champ de vision, à partir de leur réponse à ses questions. Par ce jeu, Turing remplace sa question initiale par : l'interrogateur va-t-il se tromper plus souvent si l'on remplace l'un des deux personnages par une machine ?

Ce jeu, aujourd'hui appelé Test de Turing[67], trace « *une ligne assez nette entre les capacités physiques et intellectuelles d'un homme* » (Turing, 1950, p. 434)[68]. Cette ligne démarque « *ce qui serait à l'intelligence ce que les gestes de l'homme calculant sont à ses processus mentaux* » (Andler, 1998, p. 17) et permet d'examiner la capacité d'une machine à simuler les effets perceptibles de l'intelligence humaine.

Cependant, parmi les objections qu'il énonce, Turing note qu'il est virtuellement impossible de programmer une machine pouvant jouer comme un être humain, dans tous les cas de figure. L'objectif étant de créer une machine capable de jouer comme un adulte, Turing propose d'étudier les éléments nécessaires pour devenir un adulte : le cerveau du bébé, l'éducation et l'expérience (Turing, 1950, p. 455). Turing suggère de créer une « programme-enfant » intégrant les mécanismes du cerveau du nouveau-né et capable d'apprendre pour atteindre un état adulte. En posant l'hypothèse d'une machine apprenante, Turing met en avant le rôle de l'apprentissage dans la réalisation d'une machine capable d'agir intelligemment.

66. Du nom latin de Al-Khwârizmî, mathématicien perse du IX siècle, un algorithme est une procédure décrivant un ensemble d'actions élémentaires à effectuer pour résoudre un problème. Pour Berry, l'algorithme permet « *d'évacuer la pensée du calcul, afin de le rendre exécutable par une machine* ». Source : « *Pourquoi et comment le monde devient numérique* », leçon inaugurale du cours *Algorithmes, machines et langages* de Berry au Collège de France (2008).

67. Le prix Loebner existe depuis 1990 pour récompenser l'agent conversationnel qui remplit au mieux les conditions de succès au Test de Turing.

68. « *drawing a fairly sharp line between the physical and the intellectual capacities of a man* » (version originale).

Par la suite, les travaux des chercheurs s'inscriront dans deux grandes approches de SIA :

— le symbolisme, basé le raisonnement à partir de connaissances formalisées ;

— le connexionnisme, où l'apprentissage repose sur l'ajustement progressif d'un système.

Symbolisme : apprendre, c'est raisonner avec des connaissances formalisées

Le symbolisme est l'un des paradigmes de l'approche cognitive émergente dans les années 1950 en opposition au béhaviorisme (voir section 1.2.1). Dans le cadre de l'approche cognitive, l'ordinateur, en tant que moyen de traitement de l'information, devient la métaphore de la pensée. La pensée étant assimilée au logiciel et le cerveau au matériel, les processus cognitifs que sont l'apprentissage, le langage ou les émotions deviennent opérables par une machine. Cela amène Allen Newell et Simon (1976) à énoncer l'hypothèse selon laquelle : « *un système de symboles physiques dispose des moyens nécessaires et suffisants pour l'action d'intelligence générale* » [69]. Les connaissances sont basées sur des modèles utilisant la logique formelle et la manipulation explicite de symboles en suivant des règles syntaxiques.

Dans les années 1960, les SIA tels que *Logic Theorist* résolvaient les problèmes en appliquant une méthode de force brute en explorant toutes les solutions possibles (Simon, 1983) [70]. Cependant, cette méthode est rapidement mise en défaut compte tenu des faibles performances des ressources informatiques, car le nombre de solutions à explorer augmente de manière exponentielle avec la complexité du problème. Au début des années 1970, cette barrière entraîne la recherche sur les SIA dans un premier hiver où l'intérêt et les financements sont fortement réduits.

Ce premier hiver prend fin à partir de 1980 grâce au développement de systèmes experts dont les résultats permirent une utilisation dans l'industrie. Plutôt que d'essayer toutes les combinaisons possibles pour résoudre un problème, les systèmes experts traitaient les données du problème en prenant en compte les connaissances d'experts humains du domaine (Buchanan, Feigenbaum, & Lederberg, 1969). Les connaissances des experts sont formalisées et intégrées dans un modèle de représentation des connaissances afin que le système puisse raisonner avec (Russel & Norvig, 2010).

Le projet Cyc lancé en 1984 par Lenat illustre l'étape de formalisation des connaissances au coeur de l'approche symbolique et des systèmes experts. L'ambition du projet est de soutenir la création de SIA capable des mêmes raisonnements que l'humain (Lenat & Guha, 1990). Pour cela, Cyc vise la création d'une base de connaissances contenant des assertions, des règles et des concepts (saisies manuellement) sur le monde [71]. Les connaissances sont formalisées avec le langage CycL sous la forme de prédicats, de concepts et de relations sur lesquels il est possible d'effectuer des calculs. Par exemple, un SIA est capable d'analyser les deux propositions de la base de connaissances « *Bergheim est une ville située en France* » et « *Une ville regroupe des habitants* » pour conclure : « *Les habitants de Bergheim sont en France* ».

69. « *A physical symbol system has the necessary and sufficient means for general intelligent action* » (version originale).

70. Présenté à Dartmouth par Newell, Simon et Shaw, *Logic Theorist* a démontré 38 des 52 premiers théorèmes issus de *Principia Mathematica* de Whitehead et Russell (A. Newell & Simon, 1956).

71. Une version libre de la base de connaissances était publiée sous le nom de OpenCyc, cependant la distribution de celle-ci a été interrompue depuis 2017. Source : https://sciencepost.fr/que-devient-lintelligence-artificielle-cyc-quon-nous-avait-annonce-surpuissante/. Consulté le 12 août 2019.

Parmi les succès que rencontreront les systèmes experts, l'un des plus connus est la victoire en 1997 de DeepBlue (conçu par IBM) aux échecs face au champion du monde Garry Kasparov (Hsu, Campbell, & Hoane, 1995) [72] [73]. Cependant, les systèmes experts et le symbolisme en général se heurtent à des difficultés pour effectuer des tâches qui sont en apparence simples et intuitives pour l'humain (e.g. perception, lecture). Pour Dreyfus (1972), ces difficultés sont liées aux postulats du symbolisme qu'il juge erronés. Selon lui, si la métaphore du logiciel et du matériel permet la formulation de règles de fonctionnement de l'esprit, elle néglige la complexité de la cognition qui est comprise dans un corps et dans un environnement [74]. Dreyfus réfute l'hypothèse selon laquelle toutes les connaissances peuvent être formalisées et organisées en un ensemble logique. Non seulement les connaissances mobilisées au quotidien ont une part d'implicite et relèvent du sens commun, mais elles sont également susceptibles de varier selon les contextes sociaux et culturels. Finalement, les échecs des systèmes experts par rapport aux attentes importantes qu'ils avaient suscitées conduisent à un nouvel hiver de la recherche sur les SIA à partir de 1987.

Connexionnisme : apprendre, c'est ajuster les paramètres d'un système

Le connexionnisme s'est développé à partir de 1943 en parallèle de l'approche symbolique largement dominante. L'hypothèse posée par les tenants du connexionnisme est que l'intelligence d'un système tel que le cerveau humain émerge d'un ensemble de réseaux interconnectés de neurones, des unités simples de calcul. Ainsi, l'architecture du cerveau et la topologie des réseaux de neurones biologiques servent de canon aux chercheurs qui en dégagent des modèles formels. Mcculloch et Pitts (1943) proposent le premier modèle de neurone formel basé sur une simplification du fonctionnement d'un neurone biologique (voir Figure 2.5).

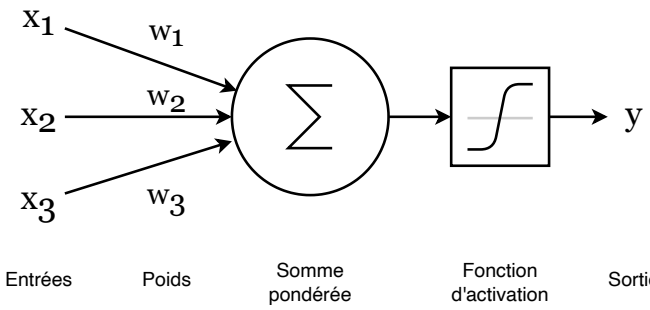


FIGURE 2.5 – **Représentation d'un neurone formel.** la sortie y (le cône d'émergence d'un neurone) est obtenue en appliquant une fonction d'activation à la somme des entrées (x_n ; les dendrites) pondérées par leurs poids synaptiques (w_n ; les synapses). La sortie vaut 0 ou 1 selon la valeur de la somme des entrées pondérées par rapport à un seuil donné. Adapté de Russel et Norvig (2010).

72. Certains des créateurs de Deep Blue ont indiqué qu'il ne s'agissait pas d'un programme d'IA. Cependant, l'utilisation d'un algorithme d'exploration d'un arbre de recherche couplé à des règles heuristiques s'inscrit pleinement dans l'approche symbolique. Source : https://www.aaai.org/Papers/Workshops/1997/WS-97-04/WS97-04-001.pdf. Consulté le 13 août 2019.

73. Le célèbre jeu en ligne *Akinator : Le Génie du web* est un autre exemple de système expert. Source : https://fr.akinator.com/. Consulté le 10 juillet 2019.

74. Cette critique rejoint les travaux montrant les liens entre la cognition, les émotions, le corps et l'environnement (voir section 1.1.4).

Le neurone formel calcule une équation linéaire dont le résultat détermine si le neurone est activé ou non, mais ne réalise aucun apprentissage : les mêmes entrées X produiront toujours la même sortie. L'apprentissage est introduit à partir du Perceptron modélisé par Rosenblatt (1958). Le Perceptron est un réseau de neurones formels où les poids de connexion (w_n) entre les neurones sont ajustés en fonction de la différence entre la sortie observée et la sortie attendue. Les ajustements progressifs des poids des connexions entre les neurones rapprochent la sortie finale de la sortie désirée réalisant ainsi une forme d'apprentissage.

L'apprentissage réalisé par un Perceptron et plus généralement par les réseaux de neurones est lié à leur capacité de représentation : les connaissances sont représentées par la structure du réseau et les poids de connexion entre les neurones. M. Minsky et Papert (1969) feront une critique sévère du Perceptron en montrant justement que sa capacité de représentation ne permet pas de représenter des problèmes simples à l'exemple de la fonction logique XOR. Pour améliorer la capacité de représentation du Perceptron, l'une des solutions consiste à ajouter des couches de neurones intermédiaires (des couches cachées) entre la couche d'entrée et la couche de sortie (voir Figure 2.6). Nous retrouverons ce principe dans le cadre de l'apprentissage profond.

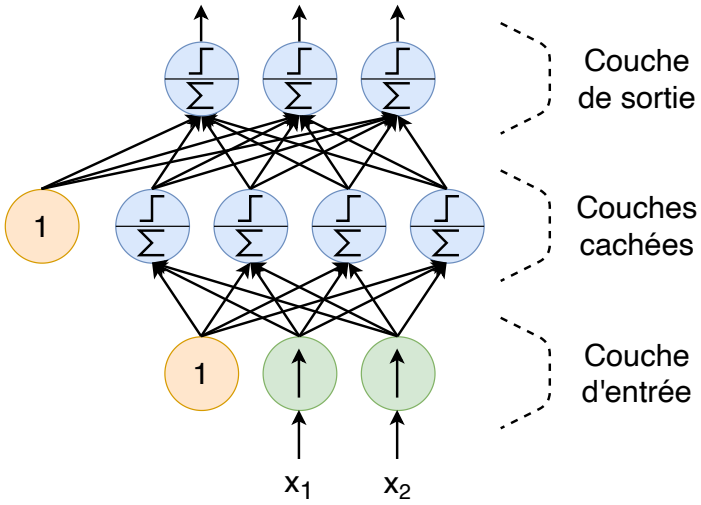


FIGURE 2.6 – **Perceptron multi-couches.** Dans un Perceptron multi-couches, les sorties des neurones d'une couche sont traitées par la couche de neurones suivantes jusqu'à la couche de sortie. Adapté de Géron (2017).

Néanmoins, la critique de Minsky et Papert impactera négativement et durablement le connexionnisme qui sera majoritairement abandonné par les chercheurs, mais connaît un regain d'intérêt dans les années 1980 grâce à l'algorithme de rétropropagation. Celui-ci améliore la capacité d'apprentissage des réseaux de neurones et doit sa reconnaissance à l'article de David E. Rumelhart, Hinton, et Williams (1986) [75]. Les auteurs présentent principe de l'algorithme ainsi que des applications possibles pour la reconnaissance de caractères et la reconnaissance vocale.

75. L'algorithme de rétropropagation a été conçu de manière indépendante par plusieurs chercheurs : Paul Werbos en 1974, David Parker en 1982, Yann LeCun en 1985 ainsi que Rumelhart et McClelland en 1985 (McClelland & Rumelhart, 1985 ; David E. Rumelhart et al., 1995).

Apprentissage profond : apprendre, c'est découvrir des relations entre les données

L'engouement pour les SIA depuis les années 2010 est dû aux performances obtenues grâce à l'apprentissage profond, un ensemble de réseaux de neurones avec une capacité de représentation plus grande que les réseaux précédents. En 2006 et 2007, Bengio, Hinton et LeCun [76] démontrent la faisabilité de l'apprentissage profond et son application à la reconnaissance de motifs visuels et sonores (Bengio et al., 2007 ; Hinton, Osindero, & Teh, 2006 ; Ranzato et al., 2007). Pour Bengio et LeCun, l'architecture profonde, caractérisée par ses nombreuses couches de neurones, est une solution prometteuse face aux limitations des autres méthodes d'apprentissage (Bengio & LeCun, 2007). De l'entrée à la sortie, les multiples couches de neurones du réseau traitent l'information à chaque fois avec un niveau d'abstraction et de complexité supérieur (voir Figure 2.7).

FIGURE 2.7 – **Vision artificielle avec l'apprentissage profond.** Adapté de Goodfellow, Bengio, et Courville (2017).

Le premier succès qui popularise l'apprentissage profond a lieu en 2012, lors de la compétition annuelle *ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge* mettant en concurrence des algorithmes pour des tâches de vision artificielle (Russakovsky et al., 2015). Le réseau de neurones profond *SuperVision* mis au point par (Krizhevsky, Sutskever, & Hinton, 2017) obtient pour la première fois dans l'histoire de la compétition un taux d'erreurs de 16,4%. Par la suite, l'apprentissage profond sera à l'origine de plusieurs succès : la victoire en 2011 de Watson d'IBM au jeu de télévision Jeopardy !, les victoires successives de AlphaGo face aux meilleurs joueurs de jeu de Go [77] (Perrault et al., 2019). Plusieurs facteurs expliquent ces performances (Bengio, 2016) : les grands volumes de données disponibles, l'augmentation des capacités de calcul et de stockage ainsi que le coût réduit des composants informatiques.

D'une manière générale, l'élaboration de SIA à partir de réseaux de neurones comprend deux phases : l'apprentissage puis la mise en production.

Durant la phase d'apprentissage, le réseau de neurones est entraîné à partir d'un jeu de données — des exemples — pour élaborer un modèle prédictif (Vayre, 2018). La phase d'ap-

76. En 2019, Bengio, Hinton et LeCun ont reçu le prix Turing pour leurs travaux fondateurs sur l'apprentissage profond. Source : Source : https://www.lemonde.fr/pixels/article/2019/03/27/le-prix-turing-recompense-trois-pionniers-de-l-intelligence-artificielle_5441937_4408996.html. Consulté le 13 août 2019.

77. Alpha Go gagne en 2015 contre Fan Hui (champion européen depuis 2013), en 2016 contre Lee Sedol (l'un des meilleurs joueurs mondiaux) et en 2017 contre Ke Jie (numéro 1 mondial).

prentissage peut se dérouler selon plusieurs modes : l'apprentissage supervisé, semi-supervisé, non-supervisé et par renforcement. Lorsqu'il est supervisé, l'apprentissage est basé sur des données annotées – les exemples – et inclut des données non annotées lorsqu'il est semi-supervisé. L'objectif est de produire un modèle qui émet en sortie les mêmes prédictions que les annotations des données d'entrée. Les paramètres du modèle sont ajustés au fil des essais pour réduire l'erreur de prédiction. L'apprentissage non supervisé, sans exemples, est la classification de données non annotées en découvrant des relations et des similitudes implicites. Quant à l'apprentissage par renforcement, le but est d'obtenir un modèle qui adapte sa sortie en fonction de stimuli afin de maximiser une récompense.

Puis, lors de la mise en production, le modèle prédictif est intégré dans un SIA qui va l'utiliser pour générer des prédictions à partir de nouvelles données.

Plusieurs réseaux de neurones ont été élaborés et traitent des problèmes différents :

— réseaux de neurones convolutifs : traitement des images, reconnaissance de formes et d'objets ;

— réseaux de neurones récurrents : traitement des séquences temporelles (e.g. audio, vidéo, langage), traitement du langage naturel ;

— réseaux antagonistes génératifs : génération de nouvelles données (e.g. création d'images réalistes).

Le fonctionnement particulier de chacun de ces réseaux de neurones va au-delà de la recherche que nous rapportons dans ce manuscrit par conséquent nous ne les présenterons pas. Notons d'ailleurs qu'il existe désormais de nombreux outils permettant d'implémenter et d'utiliser des réseaux de neurones sans pour avoir besoin des connaissances techniques. Par exemple, les plateformes Google Cloud ML, Microsoft Azure Machine Learning, IBM Watson ou encore Amazon ML fournissent des modèles de vision artificielle, de synthèse vocale ou de traitement du langage naturel [78]. Ces modèles peuvent être exploités sous la forme de services *via* des API (*Application Programming Interface*) dans des applications pour les voitures autonomes, la robotique, la traduction automatique des langues ou encore l'apprentissage humain.

2.3.2 Usages de l'apprentissage artificiel pour l'apprentissage humain

À partir du début des années 1990, se forme le champ de recherche sur l'Intelligence artificielle en éducation (*Artificial Intelligence in Education*, AIED) pour inclure les travaux sur les SIA dans les dispositifs d'apprentissage.

Les développements contemporains de l'apprentissage automatique et de l'apprentissage profond trouvent une utilité dans la valorisation des données générées dans le cadre de l'éducation. Ces données concernent aussi bien les activités d'apprentissage des apprenants, leurs interactions avec un dispositif d'apprentissage, les heures de consultation des documents, les notes, réponses à des questionnaires, la fréquentation des salles de classe, etc. De ce fait, les méthodes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond trouvent leur place au sein des communautés de recherche sur les *Educational Data Mining* (EDM) et *Learning Analytics* (LA).

78. Source : https://www.altexsoft.com/blog/datascience/comparing-machine-learning-as-a-service-amazon-microsoft-azure-google-cloud-ai-ibm-watson/. Consulté le 11 mai 2020.

Les EDM et les LA partagent l'objectif d'améliorer l'éducation en se basant sur l'analyse de données, pour comprendre les difficultés des apprenants, planifier les évaluations, adapter les contenus, etc. (Siemens & d. Baker, 2012). Toutefois, l'EDM se concentre sur l'automatisation tandis que la recherche sur les LA vise la valorisation du jugement humain. Par exemple, les travaux sur l'EDM cherchent à automatiser l'adaptation et la personnalisation des ITS quand ceux sur les LA s'attachent à informer les apprenants et les enseignants (Siemens & d. Baker, 2012).

Dans ce cadre, l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond sont utilisés pour remplir trois objectifs : 1) la personnalisation de l'apprentissage, 2) l'automatisation de tâches liées à l'enseignement et à l'apprentissage, 3) la prédiction des comportements des apprenants.

Personnaliser

Les méthodes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond sont utilisées pour élaborer des modèles prédictifs permettant de personnaliser l'apprentissage. La personnalisation de l'apprentissage a pour objectif d'individualiser l'apprentissage en reproduisant des situations d'apprentissage *one-to-one* lors desquelles un enseignant ou un tuteur aide un apprenant.

Plus concrètement, l'apprentissage automatique est utilisé pour concevoir les ITS et apporter des fonctions de personnalisation (Mavrikis & Holmes, 2019). Celles-ci s'appuient sur les principaux composants de l'ITS (voir Figure 2.8) :

— le modèle de l'apprenant, décrivant le profil de l'apprenant (e.g. engagement, résultats, état d'avancement) ;

— la représentation des connaissances du domaine étudié ;

— les informations liées à la stratégie d'apprentissage (e.g. collaboration, investigation).

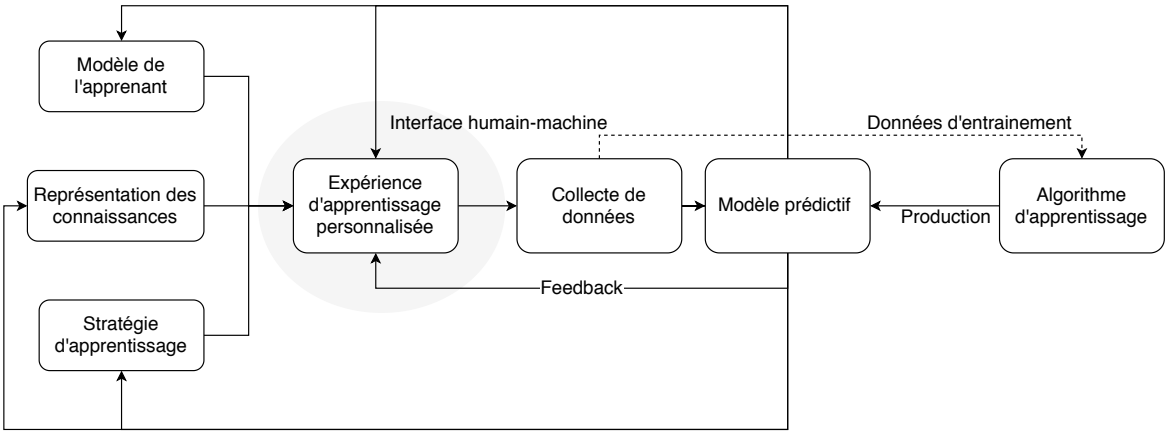


FIGURE 2.8 – **Système de tutorat intelligent.** Adapté de Mavrikis et Holmes (2019).

Dans le cadre d'un ITS, l'expérience d'apprentissage est personnalisée en fonction du modèle de l'apprenant, des connaissances du domaine étudié et de la stratégie d'apprentissage. L'apprentissage automatique apporte un modèle prédictif pour analyser les données et actualiser la personnalisation de l'expérience d'apprentissage. Cela peut se traduire par l'adaptation des objectifs d'apprentissage, des ressources proposées, des feedback ou encore du rythme d'apprentissage (Xie et al., 2019).

Destiné aux enfants de cinq à douze ans, Fractions Lab est un exemple de dispositif d'apprentissage intégrant une forme de personnalisation [79]. Le dispositif soutient un apprentissage par l'exploration pour comprendre les fractions : les enfants effectuent des tâches ouvertes en autonomie. Pour chaque tâche Fractions Lab accompagne l'enfant à l'aide de feedback adaptés à la situation en cours, sous la forme de questions ouvertes, de suggestions sur ce qu'il est possible de faire ou encore d'indices pour résoudre la tâche (Mavrikis et al., 2018). Plusieurs évaluations de Fractions Lab suggèrent que l'environnement permet aux élèves d'apprendre plus vite des concepts normalement appris plus tard dans leur cursus scolaire (Mavrikis et al., 2018).

Outre l'utilité des méthodes d'apprentissage profond pour l'analyse de données, celles-ci permettent également d'améliorer les interactions entre le dispositif et l'apprenant. Les performances de l'apprentissage profond dans le domaine de la perception (e.g. vision artificielle, traitement du langage naturel) permettent d'intégrer des interfaces conversationnelles dans les ITS. L'interface de ses derniers, qualifiés de *Dialogue-based tutoring system*, s'apparente à une fenêtre de discussion dans laquelle le tuteur intelligent pose des questions à l'apprenant, donne des indices, explique les erreurs ou encore gère les efforts de l'apprenant [80].

Automatiser

Au-delà de la personnalisation, les méthodes d'apprentissage automatique sont également employées pour automatiser des tâches liées à l'enseignement.

L'automatisation soutenue par l'apprentissage automatique concerne principalement les tâches d'évaluation en synthétisant les qualités et les défauts des travaux des étudiants et en attribuant une note (Luckin et al., 2016). Les systèmes de notation automatique des textes rédigés par les apprenants (*Automated essay scoring* (AES)) s'appuient sur l'apprentissage profond pour le traitement du langage naturel. La notation automatique repose sur un modèle entraîné à partir de nombreux exemples de textes rédigés par des apprenants et déjà évalués par des enseignants [81]. L'objectif du modèle est d'apprendre à classer les textes dans un petit ensemble de catégories correspondant aux notes. Les premiers modèles d'AES attribuaient uniquement une note globale ce qui, comme nous l'avons vu lorsqu'il a été question du retour sur erreur (voir section 1.1.2), est peu pertinent pour l'apprenant. Les modèles d'AES plus récent évaluent la qualité d'un texte selon plusieurs dimensions : grammaire, utilisation des mots, style, pertinence, organisation, cohésion, clarté, cohérence (Ke, Ng, & Kraus, 2019). Certains modèles d'AES permettent d'évaluer la qualité et la pertinence des arguments utilisés par l'étudiant dans son texte (Persing & Ng, 2015).

Avec une approche similaire, des applications ont été développées pour aider l'apprenant à rédiger en automatisant la formulation de conseils et de feedback (Lv, 2018). Par exemple, les applications Grammarly et Hemingway App [82] évaluent la qualité globale de l'écrit et fournissent diverses informations : utilisation de la voix passive, phrase difficile à comprendre (e.g. trop longue, pas de virgule), mot complexe pour exprimer quelque chose de simple, etc.

79. Source : http://fractionslab.lkl.ac.uk/. Consulté le 7 mai 2020.
80. Le lecteur curieux peut visionner la présentation de Watson Tutor lors de la Conférence AIED 2018 : https://www.youtube.com/watch?v=7YUthMwlifs. Consulté le 7 mai 2018.
81. Parmi les AES existants, on peut citer Intellimetric et E-Rater. Sources : http://www.intellimetric.com/direct/, https://www.ets.org/erater/about. Consulté le 7 mai 2020.
82. Sources : https://www.grammarly.com/, http://www.hemingwayapp.com/. Consulté le 7 mai 2020.

Cependant, les modèles d'AES sont limités par les faiblesses inhérentes à l'apprentissage automatique. Il est difficile d'expliquer les résultats obtenus par l'apprentissage automatique dont les modèles constituent des « boîtes noires ». De fait, les éléments textuels sur lesquels se base le modèle AES pour attribuer la note finale sont inconnus ce qui limite les informations que l'on peut fournir à l'apprenant en retour. Nous revenons sur cet aspect de l'apprentissage automatique dans la section 2.3.3.

Outre l'explication de la note, des techniques comme l'*adversarial machine learning* peuvent tromper les modèles d'AES et biaiser la note finale. L'*adversarial machine learning* consiste à introduire des perturbations dans les données d'entrée (le texte de l'apprenant) afin de modifier la sortie du modèle (la note). Par exemple, des chercheurs ont imprimé une tortue en 3D avec une texture spécifique sur sa carapace afin de tromper l'algorithme de reconnaissance d'objets de Google ; pour celui-ci, la tortue est un fusil (Athalye et al., 2018) [83].

Enfin, les AES soulèvent également une question pédagogique : pour l'enseignant, l'évaluation des travaux a-t-elle seulement pour objectif d'attribuer une note ? La correction des travaux des étudiants est un travail long et qui peut être fastidieux pour l'enseignant. Toutefois, la correction des travaux est également un moyen pour l'enseignant de mieux connaître ses étudiants, leurs raisonnements et leurs difficultés. La charge de travail que représente la correction des travaux ne peut être le seul critère pour utiliser la notation automatique. Par exemple, la notation automatique trouve sa place au sein des plateformes de MOOC afin d'apporter rapidement un feedback aux nombreux participants des MOOC (Balfour, 2013).

Prédire

Enfin, si le propre de l'apprentissage automatique est d'élaborer des modèles pour émettre des prédictions (e.g. prédire une note), dans certains cas la prédiction est explicitement recherchée. En ce sens, plusieurs travaux exploitent l'apprentissage automatique afin de suivre les actions et le comportement de l'apprenant afin de prédire certaines variables liées à l'apprentissage (e.g. engagement, risque d'abandon).

Parmi ces variables, les systèmes d'alertes précoces (*early warning system*) cherchent à identifier le plus tôt possible les apprenants risquant d'abandonner l'apprentissage (Chung & Lee, 2019). Pour cela, un modèle prédictif est élaboré à partir des données collectées sur les apprenants aussi bien au niveau administratif (e.g. assiduité) qu'au niveau des résultats et des interactions avec le dispositif d'apprentissage (e.g. consultation de ressources). L'objectif est d'identifier des corrélations entre une ou plusieurs de ces données et le fait d'abandonner afin de mettre en œuvre des mesures de prévention. Les systèmes d'alertes précoces peuvent être utilisés au sein des établissements scolaires et des dispositifs d'apprentissage à distance [84] (Hu, Lo, & Shih, 2014).

Dans d'autres cas, l'apprentissage automatique est utilisé pour suivre les apprenants afin d'identifier leurs difficultés. Sur le même principe que la prédiction de l'abandon, les modèles

83. Les chercheurs ont publié une vidéo montrant le résultat en temps réel : https://www.youtube.com/watch?v=YXy6oX1iNoA&feature=youtu.be. Consulté le 7 mai 2020.

84. Notamment, dans le cas des MOOC où de nombreuses études font état de taux d'abandon élevé. Source : http://blog.educpros.fr/matthieu-cisel/2013/06/01/mooc-ce-que-les-taux-dabandon-signifient/. Consulté le 7 mai 2020.

sont élaborés pour identifier des corrélations entre les données issues des activités des apprenants et des difficultés. Cet usage de l'apprentissage automatique n'est opérable que pour les activités d'apprentissage récurrentes où de grands volumes de données sont disponibles. C'est par exemple le cas de l'apprentissage de la lecture où des dispositifs comme Lexplore ont pour but d'évaluer les capacités de lecture des enfants [85]. Lexplore analyse les capacités de lecture de l'enfant à l'aide d'un dispositif de *eye tracking* : les mouvements des yeux de l'élève pendant qu'il lit un texte. Plusieurs études font état de liens entre les mouvements des yeux et des troubles du langage tels que la dyslexie (voir, par exemple, Prabha et Bhargavi (2019), Yagle et al. (2017)). L'apprentissage automatique permet d'élaborer un modèle prédictif établissant des corrélations entre les mouvements des yeux et les capacités de lecture de l'enfant (Nilsson Benfatto et al., 2016). Pour cela, le modèle est entraîné à partir d'un grand volume d'enregistrements des mouvements des yeux associés à des capacités de lecture connues. En appliquant cette méthode, le dispositif Lexplore permet de prédire et d'identifier les enfants ayant des difficultés de lecture (Bingel, Barrett, & Klerke, 2018).

Enfin, d'autres travaux exploitent l'apprentissage automatique pour prédire les performances des apprenants lors des tests en se basant sur des facteurs liés à l'apprentissage tels que l'engagement. Par exemple, des chercheurs ont développé un modèle prédictif permettant d'évaluer le niveau d'engagement des étudiants dans une salle de classe (Lascio, Gashi, & Santini, 2018). Le modèle prédictif s'appuie sur les données issues de bracelets connectés : pouls, accélération, température de la peau et activité électrodermale. La comparaison entre les prédictions du modèle et l'évaluation subjective de l'engagement par l'apprenant montre que le modèle évalue comme engagé 81% des étudiants réellement engagés pendant le cours.

À travers cet aperçu, nous constatons que les usages de l'apprentissage automatique pour l'apprentissage humain consistent à extraire des informations sur l'apprenant à partir de l'observation de ses interactions avec le dispositif d'apprentissage. Nous observons également que les performances de l'apprentissage profond pour la perception de l'environnement demeurent sous-exploitées et que les usages sont davantage ancrés dans des pratiques existantes. En effet, l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond sont utilisés pour des tâches de personnalisation, d'automatisation et de prédiction se situant dans la continuité des travaux des EDM et des LA.

2.3.3 Enjeux de l'apprentissage artificiel

La propension à traiter de grands volumes de données pour en extraire des informations et des connaissances présente des avantages exploitables pour favoriser l'apprentissage humain. Cependant, l'apprentissage artificiel soulève de multiples questions qui sont aussi bien techniques que sociales, politiques, éthiques et économiques. Elles sont discutées sont par de nombreux chercheurs évoquant notamment la protection de la vie privée et les problèmes de gouvernementalité algorithmique. Ces questions sont complexes et importantes pour le développement des SIA et leur intégration dans nos activités quotidiennes. Toutefois, pour des raisons pratiques, nous nous concentrons sur les enjeux des SIA qui touchent plus directement l'apprentissage. Nous identifions deux principaux enjeux : la compréhension des résultats rendus par l'apprentissage artificiel ainsi que la nature des apprentissages humains

85. Source : https://www.lexplore.com/. Consulté le 7 mai 2020.

produit par l'apprentissage artificiel.

Comprendre les boîtes noires

Publiée en 2018, la Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'IA constate que « *Les machines intelligentes ne se contentent pas de mieux calculer que les êtres humains, elles peuvent interagir avec les êtres sensibles, leur tenir compagnie et s'occuper d'eux* » [86]. Ce fait implique un regard critique sur la manière dont sont conçus les algorithmes, sur leur rôle dans les systèmes informatiques (e.g. au niveau d'une entreprise, au niveau national) et les décisions qu'ils sont amenés à prendre ainsi que sur les données utilisées pour l'apprentissage. Ce questionnement fait émerger des problématiques éthiques auxquelles la Déclaration de Montréal répond en énonçant dix principes. Parmi ces principes figurent, entre autres : le respect de la vie privée des individus, la primauté de l'autonomie des individus dans un contexte d'automatisation, la collaboration humain-machine, l'explicabilité des décisions algorithmiques et l'anticipation de leurs effets.

Dans le processus de conception d'algorithmes d'apprentissage, les caractéristiques des données d'entraînement (e.g. origine, format, description) constituent un point crucial en matière d'éthique. En effet, le choix des données d'entraînement détermine le modèle prédictif et donc la nature des prédictions qui pourront être générées. Loin de produire de l'objectivité, les algorithmes d'apprentissage renferment les opinions et les valeurs implicites de leurs concepteurs ce qui conduit à la reproduction de biais (e.g. sexisme, racisme) (O'Neil, 2018). Par exemple, Buolamwini et Gebru (2018) ont montré que les systèmes de reconnaissance faciale de IBM, Microsoft et Face++ ont un taux d'erreur de 1% lorsqu'il s'agit d'un homme blanc et d'environ 34% s'il s'agit d'une femme noire.

Après la phase d'apprentissage, les résultats et décisions prises par le modèle doivent pouvoir être expliqués et justifiés. L'explicabilité est un enjeu particulier de l'apprentissage profond où le modèle constitue une « boîte noire » à partir de laquelle sont formulées des prédictions [87]. En ce sens, Vayre (2018) rapporte dans les résultats de son enquête auprès de professionnels de l'analyse de données que « *les apprentissages de ces machines sont*, a minima *dans certains cas, extrêmement difficiles à comprendre* » (p. 97). « *plus les apprentissages réalisés par le système sont humainement compréhensibles et moins ce dernier est capable de considérer la complexité du réel que représente la base de données* » (Vayre, 2018, p. 85). Cet enjeu requiert de la transparence : dans le choix des données d'entraînement et de leur contrôle, des caractéristiques discriminantes du phénomène (*features*) et dans l'application des décisions algorithmiques. La transparence est nécessaire pour savoir *où*, *quoi*, *comment* et *pourquoi* les données sont collectées et pour comprendre les décisions algorithmiques.

S'éduquer au milieu de SIA

Outre l'explicabilité des décisions algorithmiques, le développement des individus dans un milieu composé de SIA soulève plusieurs interrogations.

86. Source : https://www.declarationmontreal-iaresponsable.com/la-declaration. Consulté le 3 mai 2019.

87. Pour certains chercheurs, les sciences sociales ont depuis longtemps développé des méthodes pour étudier et comprendre les boîtes noires que sont les êtres humains. Ils avancent que celles-ci pourraient être appliquées à l'évaluation des SIA. Source : https://www.technologyreview.com/s/613440/ai-researchers-want-to-study-ai-the-same-way-social-scientists-study-humans/. Consulté le 3 mai 2019.

Nous avons vu que l'éducation est un champ d'application des SIA donnant lieu à des tuteurs intelligents, des évaluateurs, des outils d'analyse et de suivi d'apprentissage, etc. Ces outils intégrant des SIA exercent des fonctions métacognitives du point de vue de l'apprenant : évaluer ce qu'on sait et ne sait pas, planifier des phases d'étude ou encore identifier ses erreurs. Derian assimile le smartphone à une « *prothèse cognitive* », car « *il épaule au jour le jour notre comportement* » (Derian, 2018, p. 13), influence notre quotidien et nos interactions avec les autres. De la même manière, en épaulant l'apprenant dans la gestion de ses apprentissages, les outils éducatifs intégrant des SIA contribueraient à externaliser les fonctions métacognitives. Or, nous avons vu dans la section 1.3.2 que la métacognition est un facteur clé de la réussite scolaire et contribue largement à l'apprentissage. Dès lors, l'enjeu de la recherche sur les SIA pour l'apprentissage est d'évaluer la manière dont les SIA peuvent s'articuler avec le processus d'apprentissage et, plus particulièrement s'ils peuvent soutenir les fonctions métacognitives plutôt que de les suppléer.

De manière plus diffuse et sans être explicitement lié à l'apprentissage dans un contexte formel, la présence de SIA dans l'environnement des enfants peut possiblement influencer leur développement. Par exemple, des parents ont exprimé leur crainte quant à l'impact de l'assistant vocal sur leur enfant [88]. Selon eux, l'assistant favoriserait le développement d'un comportement autoritaire, sans que l'enfant soit capable de différencier un robot d'une personne sur le plan relationnel. Face à cette crainte, les assistants Amazon Echo et Google Home ont mis en place les fonctions *Magic Word* et *Pretty please* pour valoriser la politesse. L'assistant remercie l'interlocuteur quand il emploie des formes de politesse (e.g. s'il te plaît, merci).

Étant donné la nouveauté des SIA dans l'environnement, il existe peu de données empiriques sur les effets des SIA sur l'activité mentale, en particulier chez les enfants. Néanmoins, lorsque les SIA sont intégrés dans des objets ou des robots, l'imitation d'un comportement intelligent produite ne semble pas être sans effet sur la cognition. Par exemple, Kahn (2006) montre que les robots sous la forme d'animaux de compagnie brouillent la distinction entre animaux et objets inanimés chez les enfants de 30 à 70 mois. Toute proportion gardée quant à l'interprétation des réponses des enfants, les auteurs notent qu'ils agissent comme si le robot était un agent social (e.g. humain, chat) et accordent leurs valeurs morales en conséquence (e.g. ne pas frapper le robot). Un groupe de chercheurs du MIT Media Lab a lancé plusieurs projets visant à familiariser les enfants avec les concepts fondamentaux de l'IA [89]. Leurs études auprès d'enfants montrent que ces derniers jugent aux premiers abords les SIA comment étant intelligents, au même titre qu'un humain (Druga, 2018). Cependant, après avoir appris à élaborer des modèles prédictifs et programmer des robots, les enfants ont changé leur regard sur les SIA. Ils se sont montrés plus sceptiques quant aux qualités humaines telles que la capacité de se souvenir et de comprendre qu'ils attribuaient aux SIA (Druga, 2018). Ces premières études semblent montrer que la multiplication de SIA dans l'environnement n'est pas sans effets sur la cognition humaine, notamment de par leur apparence « intelligente ».

88. Source : https://hunterwalk.com/2016/04/06/amazon-echo-is-magical-its-also-turning-my-kid-into-an-asshole/. Consulté le 5 mai 2019.

89. Source : https://aieducation.mit.edu/. Consulté le 10 mai 2020.

*
* *

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit l'état des connaissances sur le processus d'apprentissage et postulé que la possibilité de formuler des hypothèses, d'explorer et d'expérimenter favorise la construction des connaissances. Dans ce chapitre, nous venons d'examiner la façon dont les technologies sont utilisées pour l'apprentissage. Les TIC sont intégrés dans des dispositifs d'apprentissage qui opèrent une médiation entre les savoirs et l'apprenant avec pour objectif de stimuler la construction des connaissances. Nous avons montré que les modes d'apprentissage soutenus par ces dispositifs relèvent d'une adéquation entre des caractéristiques techniques, des pratiques existantes et des stratégies d'apprentissage. Nous observons que les dispositifs de *m-learning* et de *u-learning* visent majoritairement à distribuer des ressources d'apprentissage, en prenant en compte le contexte et en s'insérant dans le quotidien des individus. Les technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée permettent le développement d'environnements de simulation et d'entraînement. Enfin, l'apprentissage artificiel a apporté de nouveaux moyens pour analyser les données générées dans le cadre d'activités d'apprentissage. Dans cette recherche, nous nous intéressons aux possibilités ainsi qu'aux conditions de médiation des savoirs dans le contexte de l'IdO. Ainsi, dans les chapitres suivants, nous allons décrire l'IdO et en identifier les caractéristiques spécifiques qui peuvent être pertinentes pour la médiation.

Chapitre 3

Internet des Objets : de l'ordinateur à l'objet connecté

> In retrospect it looks like the rapid growth of the World Wide Web may have been just the trigger charge that is now setting off the real explosion, as things start to use the Net [1].
>
> – Neil Gerhenfeld, *When Things Start to Think*, 1999

Les TIC ont connu une évolution exponentielle au cours du temps, des premiers ordinateurs *mainframes* au *cloud Computing*, en passant par les postes de travail et l'informatique mobile. L'Internet des Objets (IdO) est une nouvelle étape dans cette évolution où les TIC transforment objets du quotidien les plus simples (e.g. grille-pain, verre, lunette) et les plus complexes (e.g. voiture, robot industriel) en objets connectés. Ces derniers sont le support d'applications et de services dans de nombreux domaines : médecine, bien-être, domotique, agriculture, industrie manufacturière, transport, logistique ou encore prêt-à-porter.

Dans le cadre de notre recherche, nous étudions les articulations possibles entre les objets connectés et les mécanismes de l'apprentissage. Ces objets connectés sont pris dans l'écosystème complexe de technologies, d'applications et de services que constitue l'IdO. De ce fait, ce chapitre éclaircit à la fois les concepts d'IdO et d'objet connecté, leurs origines conceptuelles, les technologies qu'ils recouvrent et les enjeux qu'ils soulèvent. La première partie est consacrée au contexte historique (3.1.1) et théorique (3.1.2) de l'apparition des concepts d'IdO et d'objet connecté ainsi qu'aux définitions contemporaines (3.1.3). La seconde partie décrit l'organisation fonctionnelle (3.2.1) et les technologies (3.2.2) nécessaires à la mise en place d'un écosystème de l'IdO. La troisième partie expose les perspectives de l'IdO dans les principaux domaines affectés par son développement (e.g. médecine, agriculture, industrie) (3.3.1) ainsi que les problématiques techniques, scientifiques, sociales et économiques (3.3.2).

1. Traduction personnelle : « Rétrospectivement, il semble que la croissance rapide du World Wide Web n'ait été que l'élément déclencheur qui provoque maintenant la véritable explosion, au moment où les choses commencent à utiliser le Net. »

3.1 Développement de l'Internet des Objets

Le développement de l'IdO est prégnant depuis les années 2009-2010 de par la multiplication d'objets connectés tels que les bracelets, les tablettes, les montres, les thermostats ou encore les télévisions connectées (Roxin & Bouchereau, 2017a). L'IdO fait partie des tendances technologiques et suscite un engouement en tant que sujet de débat, d'actualité, d'investigation et de recherche. De ce fait, la réalité du concept est difficile à saisir tant il existe des définitions différentes, qui se confondent parfois avec celles de la communication de machine à machine, de l'informatique ubiquitaire ou du Web 3.0 (Weill & Souissi, 2010). Ce flou conceptuel tient également au fait que les idées sous-jacentes à l'IdO sont présentes dès l'émergence de l'informatique connectée, d'internet et du World Wide Web (WWW). Afin de lever une partie de ce flou conceptuel et d'approcher notre objet de recherche, nous exposons dans les sections suivantes le contexte historique et technologique qui a conduit au développement d'objets connectés.

3.1.1 Évolutions de l'informatique connectée

La création du réseau de réseaux internet (de l'anglais *internetting*, en français « interconnecter des réseaux ») visait l'établissement de voies de communication entre les ordinateurs. La finalité d'internet était de faciliter les communications entre les utilisateurs sans se soucier des différences entre les systèmes d'exploitation (e.g. Unix, Windows, Mac) et le réseau d'origine (e.g. universitaire, privé, gouvernemental). Le développement d'internet marque le début de l'informatique connectée dont les évolutions successives amèneront aux objets connectés et à l'IdO.

Transmettre des données et identifier les terminaux

En 1963, Licklider, le premier directeur du Bureau des techniques de traitement de l'information de la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), décrit le concept d'*Intergalactic Computer Network* : un réseau d'ordinateurs remplissant les fonctions d'une bibliothèque grâce aux capacités de stockage des ordinateurs (Licklider, 1960). À la même période, la technique de commutation de paquets implémentée dans le futur internet est développée par Baran, Davies et Kleinrock (Smyrnaios, 2017) [2]. La commutation de paquets consiste à faire circuler sur une ligne de communication un message décomposé en paquets comportant chacun l'adresse de destination. De cette façon, une ligne de communication peut faire circuler plusieurs messages en même temps. C'est à partir de ces travaux que le réseau Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET), l'ancêtre d'internet, émerge en 1969 et raccorde des universités et centres de recherche (voir la Figure 3.1) [3].

2. En France, le réseau expérimental Cyclades créé par l'ingénieur et chercheur Louis Pouzin utilisait aussi la commutation de paquets et a influencé le développement d'internet. En concurrence avec les PTT, par manque de financements et à la suite de décisions politiques, le réseau sera arrêté en 1978. Source : https://www.liberation.fr/ecrans/1998/03/27/et-la-france-ne-crea-pas-l-internet-cyclades-est-le-projet-francais-qui-aurait-pu-avoir-le-meme-succ_231404

3. L'université de Californie à Los Angeles et l'Institut de recherche de Stanford furent les deux premiers nœuds du réseau.

4. Source : https://twitter.com/workergnome/statuses/807704855276122114. Consulté le 20 juin 2019.

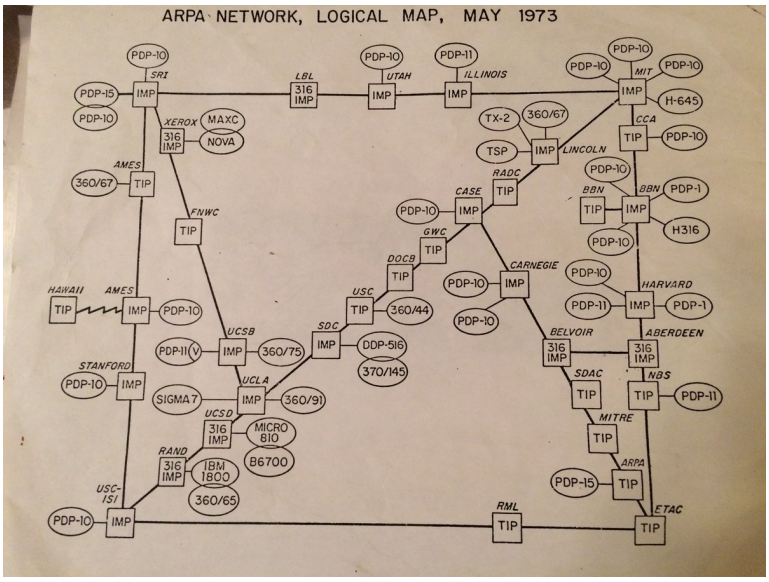


FIGURE 3.1 – **Cartographie d'ARPANET en mai 1973**. Carte appartenant à Paul Newbury, ancien directeur du département informatique de l'Université Carnegie Mellon. [4]

ARPANET repose sur le couple de protocoles TCP (*Transmission Control Protocol*) et IP (*Internet Protocol*) créé par Vinton Cerf et Robert Khan dans l'optique d'uniformiser les moyens de communication au sein du réseau (Cerf & Kahn, 1974). Pour chaque paquet, IP permet d'identifier l'émetteur et le récepteur du message afin de diriger la transmission des paquets sur le réseau. Le rôle de TCP est de contrôler la réception de tous les paquets – du message complet – à la fin de la transmission. Les protocoles deviennent la norme de l'ARPANET en 1983 en même temps que le terme « internet » fait son apparition [5].

L'internet a permis le déploiement d'une multitude de services tels que le transfert de fichiers (FTP, *File Transfer Protocol*), le forum et les discussions relayées par internet (IRC, *Internet Relay Chat*) ainsi que le web.

Partage de documents

Le WWW est né le 13 mars 1989 d'une proposition de Tim Berners Lee, ingénieur diplômé en physique, pour améliorer le système de gestion de l'information du Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN) [6]. L'objectif de Berners Lee est de faciliter le partage de documents entre les chercheurs et leurs ordinateurs, aux configurations différentes, sur le réseau du CERN. Pour cela, la proposition associe l'internet au principe du système hypertexte imaginé par Ted Nelson en 1965 pour le partage instantané d'informations (T. H. Nelson, 1965) [7].

5. Le terme « internet » est utilisé la première fois en octobre 1972 par Robert Kahn, mais il devient officiel le 1er janvier 1983 pour désigner l'ensemble d'ARPANET et de plusieurs réseaux informatiques. Les années suivantes, l'internet sort du territoire américain pour raccorder la Norvège, la Grande-Bretagne et la France afin de devenir un réseau informatique mondial accessible au public. Source : https://www.internetsociety.org/resources/doc/2017/brief-history-internet/. Consulté le 11 septembre 2019.

6. Source : https://www.w3.org/History/1989/proposal.html. Consulté le 16 septembre 2019.

7. Dans le cadre du projet XANADU, Nelson conceptualise un système hypertexte pour mettre en réseau des documents et simplifier le passage de l'un à l'autre, sans lecture linéaire. Cette idée est aussi présente dans le Memex décrit par Vannevar Bush en 1945 dans son article *As We May Think* : il s'agit d'un bureau composé d'appareils électroniques pour naviguer dans les documents d'une bibliothèque et créer des liens entre les documents (Bush, 1945). Précédent encore Bush, Paul Otlet imaginait en 1934 un système similaire

Le projet prend forme en 1990 où, aidé de Robert Cailliau, Berners Lee crée le premier navigateur et éditeur web, nommé WorldWideWeb, et le premier serveur web, baptisé CERN httpd. Un utilisateur qui souhaite consulter un document envoie une requête depuis un client web (e.g. navigateur) vers un serveur web qui retourne le document demandé. Ce document est en général une page web, un nœud du système hypertexte, et peut incorporer un hyperlien (ou lien hypertexte) permettant un saut vers une autre page web.

Le fonctionnement du WWW repose sur trois technologies fondamentales implémentées en 1990 par Berners Lee : HTTP (*HyperText Transfer Protocol*)[8], URI (*Uniform Resource Identifier*)[9] et HTML (*HyperText Markup Language*)[10]. Les requêtes client-serveur, émises *via* HTTP, pointent vers des pages web identifiées de manière unique par un URI ou IRI (*International Resource Identifier*). Un URI peut être de type « *locator* », « *name* » ou les deux. Ainsi, on utilise un URL (*Uniform Resource Locator*) pour décrire l'emplacement d'une ressource et un URN (*Uniform Resource Name*) pour nommer une ressource. La structure de la page web et la présentation des informations qu'elle contient sont définies avec le langage de balisage HTML (e.g. lien hypertexte, liste à puces, image, paragraphe).

Face à l'essor que prend sa création, Berners Lee fonde en octobre 1994 l'organisme de standardisation World Wide Web Consortium (W3C) pour veiller à la compatibilité des technologies et protocoles[11]. Le web évolue, les technologies liées à son fonctionnement se diversifient de même que les supports d'accès et les usages du web. Les temps forts de l'évolution du web sont communément identifiés par la numérotation propre au développement logiciel : Web 1.0, Web 2.0, Web 3.0 (Gandon, 2017)[12].

Diversification des usages et des supports d'accès

Le Web 1.0 est statique et son fonctionnement s'apparentait à celui d'une bibliothèque : un espace de documents que les utilisateurs peuvent consulter à distance. Cette situation change avec le Web 2.0 à partir du début des années 2000, le web est progressivement transformé en espace interactif et social, avec des échanges en temps réel et des utilisateurs créateurs de contenus. En 1996, Berners Lee estimait que le futur du web était l'amélioration de la communication et des interactions entre les personnes et, pour cela, suggérait de créer de meilleurs éditeurs web et d'intégrer l'audio et la vidéo[13]. Le web est devenu social et participatif grâce au développement d'outils de création et de transmission de contenus avec des interfaces utilisateur réduisant la barrière technique (O'Reilly, 2007). Les *rich internet application* ont permis un rapprochement entre le site web et le logiciel en termes d'interacti-

permettant d'accéder à une vaste quantité d'informations depuis un bureau muni d'un écran et d'un téléphone pour lire et chercher l'information (Otlet, 1934).

8. Source : https://tools.ietf.org/html/rfc1945. Consulté le 16 septembre 2019.
9. Source : https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1630.txt. Consulté le 16 septembre 2019.
10. Source : https://www.w3.org/MarkUp/draft-ietf-iiir-html-01.txt. Consulté le 16 septembre 2019.
11. Le W3C regroupe des industriels (e.g. Mozilla, Google) mais aussi des centres de recherche (e.g. Inria, National Research Council Canada).
12. Face à l'importance qu'ont prise les plateformes numériques sur le web et leur modèle économique fondé sur la captation et la revente des données d'utilisateurs, Tim Berners-Lee milite pour un nouveau web. Depuis 2018, Berners-Lee dirige la startup Inrupt pour développer le logiciel *open-source* Solid avec lequel l'utilisateur contrôle ses données personnelles et choisit les applications qui peuvent y accéder. Source : https://www.businessinsider.fr/us/tim-berners-lee-reveals-vision-alternative-web-solid-2018-10. Consulté le 1 septembre 2020.
13. Source : https://www.w3.org/People/Berners-Lee/1996/ppf.html. Consulté le 16 septembre 2019.

vité, de fonctionnalités et de vitesse d'exécution, notamment grâce aux technologies comme JavaScript et AJAX (*asynchronous JavaScript and XML*). Des dispositifs plus élaborés se sont développés tels que des jeux, des médias sociaux et plus généralement des plateformes infomédiaires mettant à disposition de l'utilisateur des informations de manière automatique et hiérarchisée (Smyrnaios, 2017). À l'instar des GAFAM (Google, Amazon, Facebook, Amazon, Microsoft) [14], les plateformes infomédiaires mettent en place des API (*Application Programming Interface*) pour ouvrir – partiellement – l'accès aux données qu'elles produisent et collectent.

FIGURE 3.2 – **Développement du web mobile**. Le navigateur Pocket Internet Explorer de l'assistant personnel Dell Axim X30 624 (à gauche) et une réunion entre utilisateurs de l'assistant personnel Palm en 2001 (à droite) [15].

Parallèlement, l'accès au web est porté aux téléphones mobiles avec l'intégration du WAP (*Wireless Application Protocol*) [16] pour accéder à des services via internet ; dès 1990 avec le Nokia 7110 [17]. L'internet et le couple TCP/IP deviennent les moyens de communication primaires pour les appareils électroniques et les services qu'ils supportent [18]. Les assistants personnels se voient dotés de navigateurs web : Pocket internet Explorer en 1996, pour les assistants fonctionnant avec Windows CE de Microsoft [19] ; Blazer en 2000 [20], pour les assistants Palm [21] (voir Figure 3.2). Le web mobile est rendu possible grâce aux protocoles réseau

14. Outre les GAFAM américains, la chine a également ses géants, les BATX : Baidu, Alibaba, Tencent et Xiaomi. Il existe aussi l'acronyme NATU pour désigner les entreprises symbolisant la « disruption » par le numérique : Netflix, Airbnb, Tesla et Uber.

15. Sources : King, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dell_Axim_X30_624.jpg ; Mobiles magazine n°36 (février 2001), ISSN 1253-4560. Consulté le 23 septembre 2019.

16. Proche du HTML, le langage de balisage *Wireless Markup Language* est conçu pour le WAP afin d'adapter l'affichage au téléphone mobile.

17. Source : http://www.mobic.com/oldnews/9909/nokia_unveils_new_media_phones_f.htm. Consulté le 16 septembre 2019.

18. La généralisation d'internet est critiquée par certains, dont Danny Hillis, en raison de ses faiblesses inhérentes en matière de sécurité et des potentielles conséquences d'une attaque ou d'une surcharge du réseau si celui-ci est exploité pour des services sensibles (e.g. santé, militaire). Source : https://www.ted.com/talks/danny_hillis_the_internet_could_crash_we_need_a_plan_b. Consulté le 16 septembre 2019

19. Source : https://news.microsoft.com/1996/11/19/microsoft-announces-broad-availability-of-handheld-pcs-with-windows-ce/. Consulté le 23 septembre 2019.

20. Source : https://www.geek.com/mobile/new-palm-Web-browser-blazes-542543/. Consulté le 23 septembre 2019.

21. L'entreprise américaine Palm commercialise en 1996 l'un des premiers assistants personnels appelé Palm Pilot avec le système d'exploitation embarqué Palm OS. Source : http://www.computinghistory.org.uk/det/26490/US-Robotics-Pilot-5000/.

GPRS (*General Packet Radio Service*, la 2G) et UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*, la 3G) supportant la consultation de sites, la gestion d'emails, le téléchargement de photos ou de vidéos (Roxin & Bouchereau, 2017b). En 2004, l'Initiative Web Mobile est créée par le W3C pour guider le développement des technologies du web et résoudre les problématiques d'utilisabilité liées aux contraintes qu'impose le téléphone (e.g. dimensions de l'écran, mémoire, vitesse de la bande passante) [22]. Le web mobile s'accélère avec le passage du téléphone au smartphone qui élargit les possibilités d'utilisation de la connexion internet : le premier iPhone d'Apple lancé le 9 janvier 2007 intégrait les fonctions d'un baladeur numérique, d'un appareil photo et d'un assistant personnel avec un accès au web [23]. L'utilisation croissante du smartphone pour accéder au web amènera les concepteurs de sites à prioriser le smartphone comme support de consultation. Ainsi, l'approche Mobile First est la conception de sites web en prenant en compte les contraintes des appareils mobiles (e.g. taille de l'écran, bande passante) ainsi que leurs spécificités (e.g. géolocalisation) (Wroblewski & Zeldman, 2011). En 2020, les données du site Statista montrent que les appareils mobiles représentent environ 50% du trafic mondial sur le web [24]. Pour les pays africains, une étude datant de 2018 réalisée par Deloitte montre que le support mobile est le premier moyen d'accès à internet (pour 66% des foyers africains) [25].

Cette diversification des supports d'accès à internet et au web, dès les années 1990, est un premier indice du développement à grande échelle des objets connectés quelques années plus tard. Par ailleurs, nous verrons que les premiers objets connectés ont été conçu avec l'essor d'internet et du web.

Interconnecter les données

Le Web 3.0 a deux directions principales de développement : le web sémantique et le web des objets.

Initié par Berners-Lee en 2001, le web sémantique (ou web des données) est une extension du web courant (Berners-Lee, Hendler, & Lassila, 2001) visant à appliquer les principes du web aussi aux données et pas seulement aux documents. Rendues interopérables et découplées de leurs systèmes d'origine, les données doivent pouvoir être reliées, échangées et (ré)utilisées aussi bien que les documents. Pour que les systèmes informatiques puissent manipuler les données à partir de leur sémantique, les données doivent être décrites dans un langage structuré interprétable par un système informatique et exprimant le sens de la donnée et ses relations.

De la même façon que le WWW, le web sémantique repose sur plusieurs technologies fondamentales : URI, RDF (*Resource Description Framework*), RDFS (*RDF-Schema*), OWL (*Web Ontology Language*) et SPARQL (*SPARQL Protocol and RDF Query Language*) (Bizer, Heath, & Berners-Lee, 2009). RDF est un modèle de graphe qui permet de décrire formellement les ressources web et leurs métadonnées sous la forme de triplets Sujet, Prédicat, Objet (e.g. « Bergheim », « estUneVilleDe », « France »). Le « Sujet » et le « Prédicat » sont

22. Source : https://www.w3.org/2005/Talks/200509Berlin/all.htm. Consulté le 1 octobre 2019.
23. Source : https://www.cnet.com/news/when-iphone-met-world-7-years-ago-today/. Consulté le 23 septembre 2019.
24. Source : https://www.statista.com/statistics/277125/share-of-website-traffic-coming-from-mobile-devices/. Consulté le 21 juillet 2020.
25. Source : https://www2.deloitte.com/fr/fr/pages/presse/2018/des-foyers-africains-connectes-a-internet-via-les-technologies-mobiles.html. Consulté le 1 octobre 2019.

des URI et l'« Objet » peut être une valeur (littéral) ou un autre URI. RDF-S et OWL permettent, à des degrés différents, de définir des vocabulaires et des ontologies relatifs aux descriptions RDF des données. Les ontologies, décrites avec OWL (un standard du W3C), permettent de spécialiser les définitions pour un domaine particulier. Enfin, SPARQL est un langage de requête pour interroger une base de données RDF (appelée aussi triplestore), ajouter, modifier et supprimer des données.

Le Web 3.0 est aussi envisagé comme étant un web des objets, une approche développée notamment par Dominique Guinard et Vlad Trifa dans leurs thèses à l'École polytechnique fédérale de Zurich (soutenues en 2011). Le web des objets est l'utilisation des technologies du web pour développer des services et des applications liés à des réseaux d'objets connectés. Guinard soutient que le web des objets ne doit pas se réduire à la récupération des données d'un objet depuis le web, mais permettre la création de « *mashups physiques* » : (ré)exploiter les fonctions et les données des objets connectés à travers les technologies du web (Guinard, 2011). Par exemple, cela peut être l'exploitation des technologies du web pour créer une interface web permettant de contrôler à distance des ampoules connectées.

Le déploiement d'internet, la généralisation de ses protocoles et leur implémentation dans d'autres appareils (e.g. téléphone, assistant personnel) ainsi que l'essor du web, ont contribué à accroître la place des TIC dans les activités humaines. À travers le développement de l'IdO et des objets connectés, l'évolution des TIC se caractérise par leur imbrication croissante avec des objets communs du quotidien. Ce couplage physique/numérique a été pensé et expérimenté aux débuts de l'informatique connectée avec l'informatique ubiquitaire et les systèmes pervasifs.

3.1.2 Courants de pensée précurseurs : informatique ubiquitaire et systèmes pervasifs

En 1966, Karl Steinbuch, pionnier de l'informatique, exprimait sa vision du futur de l'ordinateur en ces mots : « *dans quelques années, les ordinateurs seront intégrés dans presque tous les produits industriels* » [26] (Steinbuch, 1966). Les premiers objets connectés, témoins de l'ingéniosité de quelques-uns, font leur apparition quelques années plus tard avec le développement de l'informatique connectée. L'idée sous-jacente d'une imbrication des technologies numériques avec les objets physiques de l'environnement se retrouve dans plusieurs concepts : la communication de machine à machine, l'informatique ubiquitaire et les systèmes cyber-physiques.

Prototypes d'objet connecté : machine à sodas, grille-pain, réfrigérateur et lampe

L'un des premiers objets connectés connus fut une machine à sodas de l'Université de Carnegie Mellon (Pittsburgh, Pennsylvanie). En 1982, Mike Kazar, John Zsarnay et Ivor Durham, étudiants au département d'informatique, relient à ARPANET leur machine à sodas pour éviter des déplacements inutiles vers une machine vide [27]. Ils installent des micro-interrupteurs

26. Traduction personnelle de l'originale : « *in a few decades time, computers will be interwoven into almost every industrial product* ».

27. L'histoire détaillée de cette machine est consultable sur le site de l'Université de Carnegie Mellon : https://www.cs.cmu.edu/%7Ecoke/, https://www.cs.cmu.edu/~coke/history_long.txt. Consulté le 17 avril 2019.

pour détecter le nombre de bouteilles présentes dans la machine et écrivent un programme serveur qui, lorsqu'il est interrogé, indique le nombre et le temps de présence des bouteilles dans la machine. Plus tard, dans les années 1990, les étudiants utiliseront les protocoles du WWW pour connecter leur machine. La créativité et l'ingéniosité des étudiants furent reconnues par d'autres qui firent de même [28] : au Massachusetts Institute of Technology (MIT) et à l'Université d'Australie-Occidentale par exemple.

Parmi les premiers objets connectés, on compte également l'*Internet Toaster*, un grille-pain connecté créé par John Romkay et Simon Hackett. En 1989, le président du salon-conférence annuel et international Interop sur les technologies de l'information, Dan Lynch, lance un défi à Romkay : une compensation financière s'il parvient à connecter un grille-pain à internet. Aidé de Hackett, Romkay présente l'année suivante une version connectée du Sunbeam Deluxe Automatic Radiant Control Toaster. Le grille-pain pouvait être allumé et éteint à distance, ce qui déterminait la durée de cuisson du pain, via le SNMP (*Simple Network Management Protocol*) [29]. L'année suivante, un bras robotique est ajouté au grille-pain pour prendre des tranches de pain et les insérer dans la machine.

Les premiers objets connectés sont aussi des réfrigérateurs comme l'Internet Digital DIOS [30] de LG et celui de l'entreprise V-Sync. Ce dernier a été commercialisé en 1998 et était conçu comme un centre de contrôle de la domotique présente dans la maison : télévision, téléphone, climatisation. Quant à l'Internet Digital DIOS, il disposait des fonctions relatives au réfrigérateur (e.g. affichage de la température), mais aussi d'un lecteur de musiques, d'un gestionnaire de notes et d'une messagerie vidéo.

En France, on peut donner l'exemple du Nabaztag et de la lampe DAL de l'entreprise Violet, produit respectivement en 2003 et 2005. Connecté à internet *via* la technologie Wi-Fi, le Nabaztag est un objet en forme de lièvre [31] permettant la lecture des messages vocaux (e.g. emails, flux RSS, météo, bourse) et de chansons. Tandis que la lampe DAL, elle aussi connectée à internet par Wi-Fi, pouvait être programmée pour créer des éclairages différents en fonction d'événements particuliers (e.g. météo, emails, sms).

Sans doute d'autres objets connectés furent conçus à cette période, mais les exemples présentés annoncent bien le mouvement actuel de multiplication d'objets connectés. Il s'agit d'objets physiques du quotidien qui intègrent une technologie de communication (e.g. Wi-Fi) et un système informatique pour créer de nouvelles fonctionnalités (e.g. lire des emails, écouter de la musique) et automatiser des tâches (e.g. cuire le pain).

Communication entre machines

Les systèmes de communication de machine à machine, aussi appelés *Machine-to-Machine* (M2M), préfigurent à l'une des facettes de l'IdO : la mise en place d'une infrastructure pour observer, contrôler et agir dans un environnement. Dans l'industrie (e.g. automobile, agroalimentaire, pétrolière), le milieu médical ou encore bancaire, les systèmes M2M interconnectent

28. Le 1er avril 1998, l'IETF publie une RFC (*request for comments*, demande de commentaires) sur les spécifications techniques nécessaires pour relier une machine à café à internet. Source : https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2324.txt. Consulté le 17 avril 2019.

29. Il s'agit d'un protocole permettant de gérer et superviser des équipements sur un réseau. Source : https://tools.ietf.org/html/rfc2235.Consultéle17avril2019.

30. Source : https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_Digital_DIOS. Consulté le 17 avril 2019.

31. Nabaztag est un mot arménien signifiant lièvre.

plusieurs machines afin d'automatiser des tâches (voir Figure 3.3). L'échange de données entre les machines permet de synchroniser leur fonctionnement et d'effectuer de la télémétrie. Les systèmes M2M ont plusieurs applications : la surveillance à distance, la gestion de flotte automobile, la sécurité (e.g. communication entre des systèmes d'alarme), les distributeurs automatiques de billets ou encore le comptage de la consommation (e.g. électricité) [32] (Höller, 2014). Les systèmes de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) sont un cas particulier de système M2M où l'humain intervient plus régulièrement. Ils sont apparus dans les années 1960 pour la gestion à distance de grandes infrastructures techniques. Composé d'une interface utilisateur, d'une base de données, de réseaux de communication, d'actionneurs et de capteurs, le SCADA permet de centraliser l'information et d'exécuter des commandes à distance à des automates programmables industriels (Daneels & Salter, 1999 ; Sallam & Malik, 2018). Ces derniers assurent l'interfaçage entre les entrées (les données d'un capteur) et les sorties (activation d'un appareil). Le développement des TIC a fait évoluer le SCADA en apportant la mise en réseau des postes de travail dédiés au traitement de l'information (seconde génération de SCADA) et les protocoles d'internet (troisième génération). Avec l'IdO, la quatrième génération comporte des réseaux de capteurs et d'actionneurs, l'informatique en nuage et les technologies de communication à courte, moyenne et longue distance (Boyes et al., 2018).

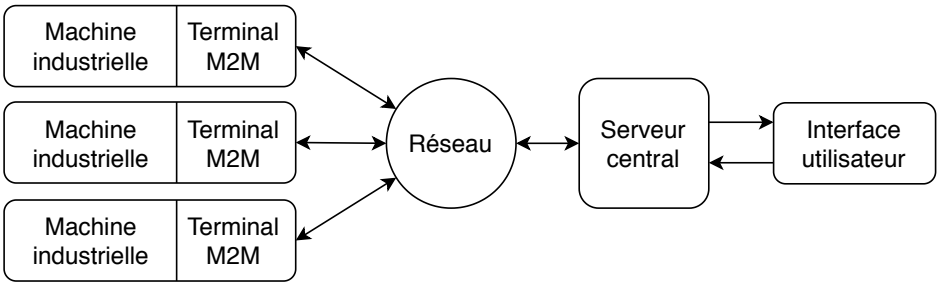


FIGURE 3.3 – **Système *Machine-to-Machine***. Communication entre plusieurs machines (e.g. robot de ligne de montage, compteur électrique, distributeur automatique, véhicule) *via* un même réseau, centralisation dans un serveur de données métriques décrivant l'état des machines, visualisation des données et envoi de commandes depuis une interface utilisateur (Höller, 2014).

Dans la continuité des SCADA, les systèmes cyber-physiques représentent une catégorie plus large de système d'automatisation caractérisé par une architecture distribuée de composants informatiques en interaction avec des entrées et sorties physiques (Poovendran, 2010). Partie intégrante de la quatrième génération de SCADA, les systèmes cyber-physiques sont l'un des facteurs de développement de l'Industrie 4.0 marquant une réorganisation de la production industrielle désormais soutenue par les TIC [33].

32. Par exemple, les compteurs électriques communiquant Linky, déployés en 2015 par Enedis pour la gestion du réseau électrique de distribution sont des dispositifs M2M. Source : https://particulier.edf.fr/fr/accueil/contrat-et-conso/compteur/compteur-linky.html. Consulté le 5 novembre 2019.

33. Le concept d'industrie 4.0 ou industrie du futur correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production. Ainsi, la 4e révolution industrielle désignerait une réorganisation des chaînes de production suite à l'intégration des TIC, notamment l'IdO, la réalité augmentée, l'impression 3D ou encore les SIA (Kohler & Weisz, 2018).

Le champ de la communication de machine à machine propose des architectures pour la mise en réseau de terminaux et la prise en compte d'entrées et de sorties physiques sur lesquelles le développement de l'IdO a pu s'appuyer.

Informatique ubiquitaire

Le développement de l'IdO trouve également sa source dans les travaux de recherche sur l'informatique ubiquitaire qui donne la priorité à l'expérience de l'utilisateur (Dourish & Bell, 2011). Après l'ordinateur *mainframe* utilisé par plusieurs personnes et l'ordinateur personnel pour chaque personne, l'informatique ubiquitaire représente la troisième ère de l'informatique, devenue omniprésente, où chaque personne utilise plusieurs appareils (voir Figure 3.4) (Dourish & Bell, 2011, p.2).

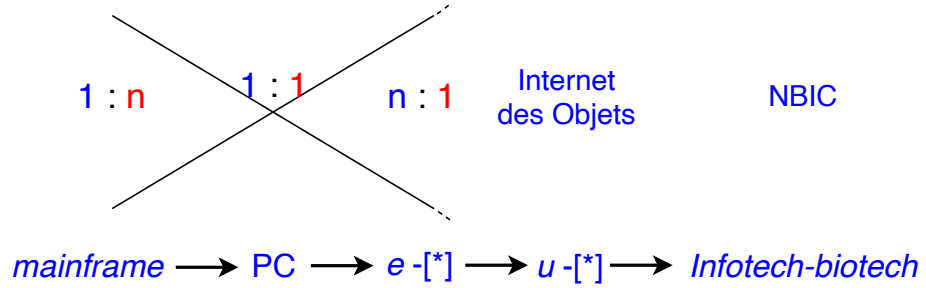


FIGURE 3.4 – **Des *mainframes* à l'*infotech-biotech***. L'informatique a connu plusieurs évolutions : le *mainframe* utilisé par plusieurs utilisateurs (1 :n), l'ordinateur personnel pour un utilisateur (1 :1), la multiplication d'appareils pour un seul utilisateur (n :1) avec le développement d'applications et de services en ligne (e.g. *e-learning*). Dans la continuité de ces évolutions, le *u*-[*] représente les appareils, les applications et les services relevant de l'informatique ubiquitaire (e.g. *u-learning*). Puis, les évolutions en parallèle des nanotechnologies, des biotechnologies, de l'informatique et des sciences cognitives (NBIC) finissent par converger. Adapté de Husemann (2000).

Ubiquité, du latin *ubique* signifiant « partout », est défini par le CNRTL comme étant la « *faculté divine d'être présent partout en même temps* » [34]. Au-delà de sa dimension religieuse, l'ubiquité se rapporte à un état stable dans le temps, car l'omniprésence est un fait établi et constant (Dufort, 2016). La dimension ubiquitaire de l'informatique signifierait qu'elle est omniprésente dans l'environnement des individus. Cette ubiquité serait le résultat de l'intégration de systèmes informatiques dans les objets physiques de l'environnement afin d'assister les individus (Dourish & Bell, 2011) [35].

L'informatique ubiquitaire est née avec le programme de recherche du même nom porté par Mark Weiser en 1988 au laboratoire d'informatique du Xerox PARC (M. Weiser, Gold, & Brown, 1999) [36]. Considéré comme le père de ce champ de recherche, Weiser pense l'informatique ubiquitaire par rapport aux problématiques posées par les ordinateurs de son époque : leurs caractéristiques physiques (e.g. écran, souris, clavier, chaise) et leurs modes d'utilisation

34. Source : https://www.cnrtl.fr/definition/ubiquit%C3%A9. Consulté le 20 mai 2020.
35. Dans son livre Every[ware], Greenfield (2007) introduit le terme de ubimédia pour désigner « *ce qui reste de l'informatique quand les ordinateurs ont disparu - ou plutôt, ont fusionné avec tout ce qui nous entoure* » (quatrième de couverture). Les interfaces ubimédia seraient une source de créativité et d'innovation en matière d'usage, de marketing, d'ergonomie, d'écologie ou encore d'éthique.
36. En 1996, Weiser deviendra le Directeur des technologies au Xerox PARC.

font de l'informatique une activité à part du quotidien (Krumm, 2010). Leurs idées sont influencées par l'équipe de recherche *Work Practice and Technology* du Xerox PARC, dirigée par l'anthropologue Lucy Schuman, qui soutient une conception des interfaces humain-machine centrées sur l'utilisateur (Dourish & Bell, 2011) [37].

Weiser et son équipe veulent repenser le contexte d'utilisation de l'informatique de sorte que « *[les technologies] s'intègrent dans la trame de la vie quotidienne jusqu'à ne plus pouvoir être distinguées* » [38] (Mark Weiser, 1999, p. 1). Ainsi, la « technologie calme » (Mark Weiser & Brown, 1996) est celle qui glisse dans l'environnement en fusionnant avec les objets, elle informe l'utilisateur sans accaparer son attention [39].

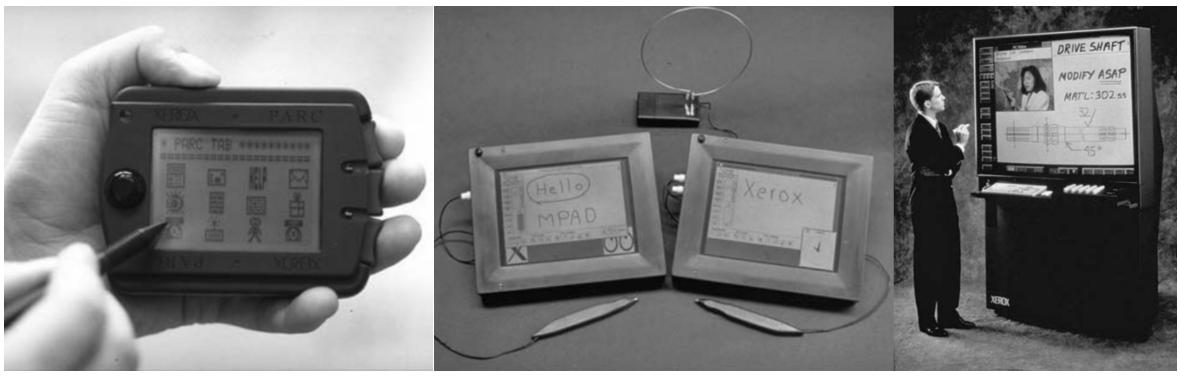


FIGURE 3.5 – **Prototypes d'objets connectés du Xerox PARC**. De gauche à droite : ParcTab, ParcPad et Liveboard (version commercialisée et imaginée à partir du prototype du Xerox PARC) (Krumm, 2010).

Durant leurs recherches, Weiser et ses collègues ont exploré le champ de l'informatique ubiquitaire en créant trois prototypes (voir la Figure 3.5). ParcTab, de la taille d'un portefeuille, est un gestionnaire d'informations personnelles, lecteur d'emails et éditeur de documents. Plus grand, le ParcPad fait office de liseuse numérique et d'outil de prise de notes. Le Liveboard est un tableau interactif avec des fonctions d'indexation et de stockage des écrits. Sur le modèle client-serveur, le ParcTab et le ParcPad envoient les requêtes et les actions de l'utilisateur via infrarouge ou par ondes radio courtes à une application sur un serveur pour être traités (Krumm, 2010, p.9). Quant au Liveboard, il a été conçu en adaptant un poste de travail avec un écran large et un système d'écriture sur écran avec stylo infrarouge.

Une autre dimension explorée par l'équipe de recherche était la sensibilité au contexte (*context awareness*) des prototypes conçus. Le but est de produire une meilleure expérience utilisateur en s'adaptant aux stimuli dans l'environnement transmis par des capteurs. Ainsi, le ParcTab intégrait l'application Proximity Browser pour permettre à l'utilisateur de visionner les fichiers qui ont été consultés à son emplacement actuel lors d'une précédente visite (Krumm, 2010).

L'apport de l'informatique ubiquitaire pour étudier l'IdO et les objets connectés se situe principalement dans l'attention portée aux situations d'usage, aux besoins et aux attentes de l'utilisateur. Notre recherche portant sur la médiation opérée par les objets connectés pour

37. À ce titre, Schuman contribue aux bases de la cognition située postulant que la connaissance est ancrée dans l'action, elle-même comprise dans un environnement social, culturel et physique (Theureau, 2004).

38. Traduction personnelle de l'originale : « *The most profound technologies are those that disappear. They weave themselves into the fabric of everyday life until they are indistinguishable from it* ».

39. Traduction personnelle de l'originale : « *that wich informs but doesn't demand our focus or attention* ».

mettre l'apprenant en relation avec des savoirs, ces aspects seront à prendre en compte dans l'analyse dans dispositifs existants basés sur des objets connectés.

Informatique et réseaux pervasifs

Au milieu des années 1990, IBM lance une nouvelle branche de recherche intitulée *Mobile and Pervasive Computing* avec des projets similaires à l'informatique ubiquitaire (Krumm, 2010). Bien qu'ils soient fréquemment utilisés indifféremment, ubiquité et pervasivité ne sont pas équivalents sur le plan sémantique. Le mot pervasivité est une francisation de l'anglais « *pervasive* » venant du latin *pervadere* qui signifie : « *aller de toute part, s'insinuer, se propager, se pénétrer dans, s'étendre, imprégner, se répandre, faire répandre, envahir* »[40]. La pervasivité exprime quelque chose qui se diffuse et se répand dans quelque chose d'autre : par exemple, la peur de la contamination est pervasive dans la population, elle se répand de proche en proche. Ainsi, l'ubiquité désigne l'omniprésence, un état stable, tandis que la pervasivité est un mouvement, quelque chose en train de devenir (Dufort, 2016).

L'informatique pervasive telle que la conçoit IBM est axée sur la mise en réseau d'appareils et l'accès à des services à distance, mais sans la dimension de technologie calme propre à Weiser. Les solutions déployées par IBM exploitaient un ensemble hétérogène de technologies afin d'étendre l'accessibilité des services numériques à de nouveaux supports. Par exemple, le 19 décembre 1999, grâce à sa collaboration avec IBM Zurich, la compagnie aérienne Swissair est la première à proposer le *check-in* directement depuis un téléphone mobile[41]. Pour cela, les chercheurs d'IBM ont adapté la procédure de *check-in* à un support mobile et utilisé le protocole WAP pour la transmission des données.

Le terme « pervasif » a aussi été employé dans le cadre du projet TRON (*The Real-Time Operating system Nucleus*) initié en 1984 par Ken Sakamura, professeur à l'Université de Tokyo. L'objectif était d'établir un réseau de communication omniprésent, pervasif, interconnectant les ordinateurs pour prendre en charge les besoins de la société[42]. Les systèmes d'informatique embarquée T-Engines développés dans le cadre du projet TRON fonctionnaient via le système de traitement d'information en temps réel ITRON et étaient destinés à des appareils mobiles de petite taille.

Les champs de l'informatique ubiquitaire et pervasive ont donné lieu à une multitude de projets d'universités et/ou d'entreprises, parmi lesquels :

— Cooltown (Hewlett Packard, Kindberg et al., 2000) est axé sur la liaison entre les objets physiques et le WWW. Similaire au web des objets présenté précédemment, le projet visait l'exploitation des protocoles du web pour identifier de manière unique un objet physique et créer une page web de cet objet, pour le décrire, mais aussi pour interagir avec celui-ci ;

— InfoPad (Université de Berkeley en Californie, Truman et al., 1998) est une recherche sur l'architecture réseau et les technologies de communication permettant à des appareils mobiles limités en ressources informatiques d'accéder à des informations et de consulter des contenus multimédias ;

40. Source : https://fr.wiktionary.org/wiki/pervasivit%C3%A9. Consulté le 20 mai 2020.
41. https://www.zurich.ibm.com/news/99/wap_sr.html. Consulté le 27 juin 2019.
42. Document archivé introduisant le projet TRON : https://web.archive.org/web/20100714092259/http:/www.assoc.tron.org/eng/intro/TRON_intro.pdf. Consulté le 17 avril 2019.

— *Wearable computing* (MIT, Siewiorek, Smailagic, & Starner, 2008) est la conception de dispositifs informatiques portés sur le corps. Par exemple, l'un de ces appareils fut un affichage sur le verre d'une paire de lunettes accompagné d'une télécommande pouvant se mettre dans une poche ;

— *Living laboratories* (Institut de Technologie de Géorgie, Abowd et al., 2000) donnera lieu à deux dispositifs majeurs : Classroom 2000 et Aware Home. Classroom 2000 explore l'informatique ubiquitaire pour la salle de classe et proposait un système d'enregistrement/captation du cours avec création automatique d'index et sauvegarde des annotations de l'enseignant. Quant à Aware Home, il s'agit de l'application de l'informatique ubiquitaire à la maison : domotique connectée, installation de capteurs, objets en réseau, etc. ;

— Active Badges (laboratoire de recherche Olivetti) est l'un des premiers systèmes de badges pour la localisation en intérieur [43].

Les travaux sur la communication entre machines et les systèmes cyber-physiques ainsi que l'informatique ubiquitaire et pervasive constituent les origines conceptuelles et technologiques de l'IdO et des objets connectés. Ces domaines, y compris l'IdO, représentent chacun une manière d'appréhender l'imbrication entre les TIC et l'environnement. Nous verrons que cette imbrication rend possible des interactions entre l'utilisateur et l'environnement qui sont au cœur des dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés.

3.1.3 Internet des Objets et objet connecté

Le développement de l'IdO est visible depuis les années 2009-2010 à travers la multiplication des objets connectés, l'organisation des premières conférences et l'engouement d'acteurs variés : chercheurs, journalistes, industriels, entrepreneurs, investisseurs, etc. (Roxin & Bouchereau, 2017a). La Figure 3.6 illustre l'emballement médiatique à partir des données de la plateforme Europresse sur la période 1997-2020 [44]. Les données ont été collectées en juin 2018 et complétées en septembre 2020, pour le mot-clé « Internet des Objets » et avec le domaine de recherche « Presse généraliste nationale » qui regroupe les 13 principaux journaux français. On observe une croissance soutenue à partir de 2010 avec, par exemple, une multiplication par 17 des articles de journaux entre 2012 et 2016. On peut toutefois noter une inversion de la tendance à partir de 2019 qui pourrait s'expliquer par un désintérêt, notamment en raison d'attentes trop élevées jamais satisfaites. Il est possible aussi que l'IdO soit présent implicitement dans des articles portant plus généralement sur les objets connectés et des systèmes d'IA.

L'analyse quantitative menée par Ruiz-Rosero et al. (2017) à partir des publications dans les bases de données Clarivate Web of Science et Scopus montre que l'emballement est aussi scientifique. Les résultats font état d'une croissance exponentielle des publications relatives à l'IdO : entre 2012 et 2016, l'intérêt pour l'IdO explose, passant de 500 à 4500 publications, et touche des champs d'application variés : e-santé, maison connectée, vie privée, réseaux sociaux, gestion de l'énergie, ville intelligence. Notons que l'éducation figure aussi parmi les

43. http://www.computinghistory.org.uk/det/33918/Active-Badge/. Consulté le 27 juin 2019.
44. http://www.europresse.com/fr/. Consulté le 27 septembre 2020.

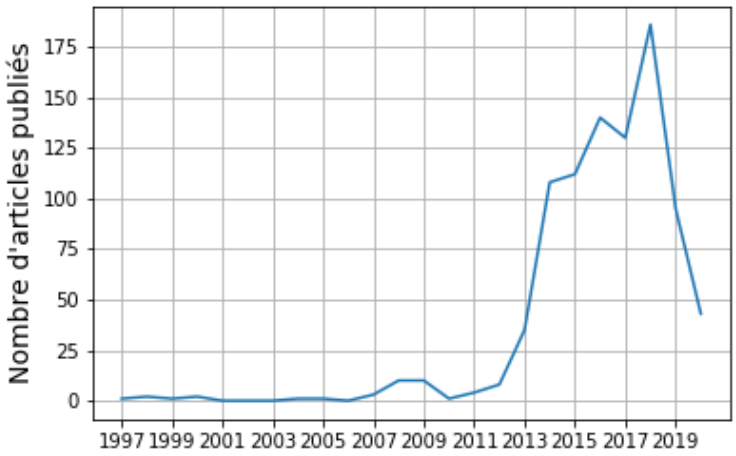


FIGURE 3.6 – **Évolution des publications traitant de l'IdO**. Nombre de publications journalistiques dans la base de données Europresse entre 1997 et 2020.

champs d'application des recherches sur les objets connectés, mais dans des proportions plus réduites.

L'essor de l'IdO ces dernières années est dû à des conditions technologiques favorables qui permettent de concrétiser à grande échelle des concepts en maturation depuis les années 1990-2000. Les principaux leviers technologiques sont (Conant, 2015 ; Roxin & Bouchereau, 2017a) :

— la loi de Moore, énoncée par Gordon Moore en 1965 et reformulée en 1975, postule que la « complexité des semi-conducteurs proposés en entrée de gamme » double tous les ans (Moore, 2006). Elle sera réévaluée dix ans plus tard affirmant que le nombre de transistors sur une puce de silicium double tous les deux ans. Cette loi empirique s'est révélée particulièrement efficace pour décrire l'évolution des circuits intégrés. Cette évolution est parfois rapportée à la « vitesse », la « puissance » ou encore la « fréquence d'horloge » des systèmes informatiques qui croient de manière exponentielle [45] ;

— la loi de Metcalfe, stipule que l'intérêt d'un réseau est proportionnel au carré de nombre de ses utilisateurs. L'internet, le web, les réseaux socio-numériques et les réseaux d'objets connectés gagnent en importance et popularité à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente ;

— la multiplicité des technologies de communication sans-fil, qui varient en matière de consommation énergétique, de débit et de portée ;

— l'amélioration de l'autonomie des batteries ;

— la miniaturisation des composants tels que les capteurs et les actionneurs et leur faible coût de production ;

— l'informatique en nuage (*cloud computing*) est la fourniture de services informatiques (e.g. stockage, base de données, messagerie, analyse de données) par le biais d'internet

45. Niklaus Wirth propose en 1995 une loi empirique connexe : « *les programmes ralentissent plus vite que le matériel accélère* », car les développeurs accordent moins d'attention à l'optimisation de la vitesse d'exécution du programme.

(le *cloud*) [46]. Le *fog computing* et le *edge computing* sont des variantes de l'informatique en nuage permettant de traiter les requêtes de l'utilisateur au niveau de la périphérie du réseau local (e.g. routeur, passerelle) afin de réduire les temps de latence et de traitement [47] ;

— les *Big Data*, le gigantisme des données générées par les usages des TIC et la taille des bases de données nécessitent des méthodes de traitement particulières passant par des logiciels adaptés au modèle distribué comme Hadoop et NoSQL et des techniques telles que MapReduce et Filter.

Ces facteurs ont réduit les obstacles technologiques et économiques pour l'intégration des TIC dans les objets du quotidien et conduit à leur commercialisation à large échelle. Toutefois, l'engouement et la diversité des acteurs entretiennent une forme de confusion autour des concepts d'IdO et d'objet connecté, car « *le même mot à la fois désigne et explique. La désignation est la même ; l'explication différente* » (Bachelard, 1993, p.17-18). Ainsi, il n'existe non pas une, mais plusieurs manières de concevoir et de définir l'IdO et l'objet connecté.

Objet connecté : interface entre l'analogique et le numérique

En 1997, Paul Saffo estime que la multiplication de capteurs bon marché ouvre la voie à l'ère de l'interaction des appareils électroniques avec le monde physique (Saffo, 1997). Ainsi, le grille-pain, le réfrigérateur, le téléphone, le lit, la brosse à dents, la fourchette ou encore les chaussures deviennent des appareils connectés à l'interface entre le monde physique et le numérique [48].

Pour Gilles Privat l'objet connecté est « *un couple d'automates hybrides, physique/informationnel* »(Privat, 2002, p. 30-31) avec les capacités suivantes : l'acquisition de données sur son environnement ou sur son propre état ; le traitement et le stockage des données ; l'échange des données avec d'autres objets ; l'action sur l'environnement ou la modification de son état physique. André Lemos décrit plus succinctement les objets connectés comme « *des objets réels ou virtuels, dotés des capteurs de données et d'instructions algorithmiques. Ils ont une identification universelle, peuvent communiquer entre eux sans intervention humaine et réalisent des actions concrètes* » (Lemos, 2016, p.76). Cette définition apporte deux éléments : l'identification, à l'instar des terminaux connectés à internet, et la virtualité. L'objet virtuel est « *la contrepartie numérique de toute entité réelle [...] de l'IdO et a le rôle fondamental de combler le vide entre le monde physique et le monde virtuel* » [49] (Nitti et al., 2016). Par exemple, le pendant numérique d'un bracelet connecté est l'outil de visualisation des données (e.g. rythme cardiaque, nombre de pas) [50].

46. http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26539676. Consulté le 1 septembre 2020.

47. Sources : http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26542763, http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26544929. Consulté le 2 juin 2020.

48. Dans son article Connections (1999), Robert W. Lucky se demande à quoi pourrait ressembler un futur dans lequel tout est connecté ; un futur qu'il imagine plutôt sombre : « *My refrigerator would monitor supplies, and order new staples when necessary. Occasionally it would refuse to open at certain hours of the day, having talked to my bathroom scales [...] I would undoubtedly fear the "this program has performed an illegal operation" message on the refrigerator door just when I need a quick snack.* ».

49. Traduction personnelle de l'originale : « *the digital counterpart of any real [...] entity in the IoT and has the fundamental role to bridge the gap between the physical and virtual world* ».

50. L'idée d'objet virtuel est à rapprocher du concept de jumeau numérique lequel désigne non pas seulement une représentation numérique, mais la simulation numérique d'un système complexe (e.g. une voiture)

Privat (2002) identifie quatre catégories d'objets connectés :

— objets mobiles personnels : smartphone, tablette, assistant personnel ; il s'agit d'objet complexe jouant le rôle de passerelle entre un réseau général et des réseaux locaux et personnels ;

— objets portatifs divers : montre et bracelet connecté, lunettes connectées ; ce sont des objets intermédiaires avec des fonctions spécialisées que l'individu peut emporter avec lui ;

— objets d'environnement : grille-pain connecté, ampoule connectée, réfrigérateur connecté ; ces objets renouvellent l'électroménager, les espaces de travail et les machines industrielles ;

— objets passifs : vêtement avec puce RFID (*Radio Frequency Identification*, radio identification) [51], badge d'accès ; ces objets ont des fonctions de localisation et d'identification avec une interactivité limitée.

Partant des différentes acceptations présentées préalablement, nous proposons de conclure que l'objet connecté réalise un couplage physique/numérique, dispose d'un ou plusieurs moyens de communication et de capacités de stockage, de traitement et d'analyse de données. Il entretient un rapport étroit avec l'environnement, physiquement, avec des capteurs et actionneurs, et virtuellement, par la manipulation de données correspondant à des paramètres environnementaux. Enfin, la conception de l'objet est contrainte par son contexte d'utilisation et nécessite des ressources adaptées en termes de mémoire, de bande passante, de consommation énergétique et de puissance de calcul. Les objets connectés sont les supports visibles des applications et des services soutenus par l'écosystème de technologies qu'IdO.

Internet des Objets : définitions

L'expression « Internet des Objets » apparaît formellement en 2002 dans le titre d'un article du magazine Forbes ou Kevin Ashton, à la direction du Centre Auto-ID du MIT à ce moment, appel à la création d'un « Internet pour les objets » [52]. Le Centre Auto-ID est issu d'un groupement d'industriels dont l'objectif est de faire de RFID un standard pour le suivi et l'identification de produits [53]. Le fait que Ashton évoque l'IdO et travaille sur la technologie RFID (radio-identification) n'est pas anodin puisque cette dernière permet une identification, une description et un suivi numérique d'objets physiques.

La vision de l'IdO développée par Ashton est axée sur la mise en données de l'environnement par le biais de capteurs et d'étiquettes de radio identification. Pour lui, les machines ne reçoivent des données sur l'environnement qu'à travers les humains lorsqu'ils écrivent des documents, saisissent des données dans un tableur ou téléchargent des photos. Cependant,

permettant d'en évaluer la dynamique dans le temps.

51. La technologie RFID prend la forme d'étiquette auto-adhésive que l'on coller, incorporer ou implanter dans des objets. L'étiquette stocke des informations auxquelles il est possible d'accéder avec un lecteur adapté.

52. La phrase originale est : « *We need an 'Internet-for-things', a standardized way for computers to understand the real world* » (https://www.forbes.com/free_forbes/2002/0318/155.html). Ashton affirme avoir utilisé l'expression dès 1999, lors d'une présentation pour l'entreprise Procter & Gamble dans laquelle il était directeur exécutif (Mattern & Floerkemeier, 2010).

53. Le centre fermera en 2003, car la technologie RFID fut remplacée par le Code Produit Électronique (EPC) pour le suivi des produits.

Ashton remarque que l'humain manque de temps, de précision et d'attention pour décrire l'environnement de manière systématique. L'IdO est le déploiement des TIC pour que les machines observent, collectent et traitent elles-mêmes les données issues de l'environnement au moyen de capteurs, d'actionneurs et d'étiquettes de radio-identification (Ashton, 2009). Cette vision met l'accent sur la mise en données de l'environnement par les machines, « *des installations industrielles aux espaces publics et aux demandes des consommateurs* » (Tsiatsis et al., 2019, p.11).

Le Tableau 3.1 rapporte quelques-unes des multiples définitions de l'IdO qui ont vu le jour, sans que l'une d'entre elles s'impose finalement [54]. Ces définitions se rejoignent sur les points suivants : il s'agit d'un écosystème d'objets physiques et virtuels, interconnectés via les protocoles de communication d'internet et du web, identifiables, munis de capteurs et d'actionneurs, et programmables. L'IdO tend à rendre les TIC ubiquitaires et fournit des services contextuels, avec ou sans intervention humaine, en fonction des événements se déroulant dans l'environnement physique.

Dans leur revue de la littérature, Ibarra-Esquer et al. (2017) observent qu'au fil des années les définitions et visions de l'IdO se concentrent d'abord sur l'interconnexion et l'identification des objets puis, sur les services et modèles d'affaires et enfin sur les propriétés des objets connectés et les données. Ils notent que les visions sont de deux types : l'IdO est soit une *extension* d'internet, et de nouvelles technologies et services apparaissent, soit il s'agit d'une *évolution* d'internet qui renouvelle les technologies et services existants. De manière plus fine, Atzori, Iera, et Morabito (2010) identifient trois grands types de visions de l'IdO. Les visions *things oriented* mettent l'accent sur les capteurs et actionneurs, l'identification des objets et la communication entre eux. Les visions *Internet oriented* se concentrent sur l'utilisation des protocoles standards d'internet et du web pour connecter les objets. Enfin, les visions *semantic oriented* sont portées sur les données générées par les objets connectés : comment les stocker et les traiter ? Comment les représenter et les interpréter ? Comment en extraire de la connaissance ?

Cette catégorie de visions voit les objets connectés comme des « *fournisseurs et/ou consommateurs de données liées au monde physique* » (Miorandi et al., 2012) [56]. Dans la continuité de Ashton, Qin et al. (2016) expliquent que l'IdO constitue un changement dans la manière de produire et traiter les données. Avec l'IdO, la production de données, l'extraction d'information et l'élaboration de modèles de connaissance deviennent entièrement opérables par des machines.

Le développement de l'IdO et des objets connectés s'inscrit dans la continuité des idées qui ont suivi l'informatique connectée et le web. L'informatique ubiquitaire, l'informatique pervasive ainsi que la communication entre machines sont des concepts précurseurs à l'IdO dans lesquels on retrouve l'idée d'une fusion des TIC avec les objets du quotidien, de l'interfaçage physique/numérique et de l'action dans et sur l'environnement. L'expression « Internet

54. Pour une collection plus complète de définitions voir : https://www.postscapes.com/internet-of-things-definition/. Consulté le 20 avril 2019.

55. Sources : EPoSS, IETF, UIT, IEEE (https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Issue1_14MAY15.pdf), ISO/CEI (https://www.iso.org/fr/news/ref2361.html).

56. Traduction personnelle de l'originale : « *providers and/or consumers of data related to the physical world* ».

Date	Auteur(s)	Définition
2008	EPoSS	Des objets ayant des identités et des personnalités virtuelles fonctionnant dans des espaces intelligents utilisant des interfaces intelligentes pour se connecter et communiquer dans des contextes sociaux, environnementaux et d'utilisateurs. L'origine sémantique de l'expression est composée de deux mots et concepts : "Internet" et "Objet", où "Internet" peut être défini comme "le réseau mondial de réseaux informatiques interconnectés, basé sur un protocole de communication standard, la suite Internet (TCP/IP)", tandis que "Objet" est "un objet non précisément identifiable". Par conséquent, sémantiquement, "l'internet des objets" signifie "un réseau mondial d'objets interconnectés, adressables de manière unique, basé sur des protocoles de communication standard".
2010	IETF	L'idée de base est que l'IdO va connecter les objets qui nous entourent (électroniques, électriques, non électriques) pour fournir une communication transparente et des services contextuels. Le développement d'étiquettes RFID, de capteurs, d'actionneurs et de téléphones mobiles permet de matérialiser l'IdO qui interagit et coopère avec les autres pour améliorer le service et le rendre accessible à tout moment et en tout lieu.
2012	UIT	Une infrastructure mondiale pour la société de l'information, permettant des services avancés en interconnectant les objets (physiques et virtuelles) en se basant sur l'évolution des technologies de l'information et de la communication interopérables et existantes.
2015	IEEE	L'Internet des objets est un réseau complexe, adaptatif et autoconfigurable qui relie les "objets" à l'Internet par l'utilisation de protocoles de communication standard. Les objets interconnectés ont une représentation physique ou virtuelle dans le monde numérique, une capacité de détection/d'actionnement, une caractéristique de programmabilité et sont identifiables de manière unique. La représentation contient des informations, notamment l'identité, le statut, l'emplacement de l'objet ou toute autre information commerciale, sociale ou privée pertinente. Les objets offrent des services, avec ou sans intervention humaine, par l'exploitation d'une identification unique, la saisie et la communication de données, et la capacité d'actionnement. Le service est exploité grâce à l'utilisation d'interfaces intelligentes et est rendu disponible partout, à tout moment et pour tout ce qui prend en considération la sécurité.
2018	ISO/CEI	Infrastructure d'entités, de personnes, de systèmes et de ressources d'information interconnectés avec des services qui traitent et réagissent aux informations du monde physique et du monde virtuel.

Tableau 3.1 – **Définitions de l'IdO**. Traductions personnelles des définitions proposées par l'EPSoSS (*European Technology Platform on Smart Systems Integration*), l'IETF (*Internet Engineering Task Force*), l'UIT (Union internationale des télécommunications), l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) et l'ISO/CEI (International Organization for Standardization/Commission Électrotechnique Internationale) [55].

des Objets » se donne à comprendre aisément, pourtant il existe une pluralité de définitions et de visions désignant un écosystème complexe de technologies dont l'objet connecté n'est que la partie visible.

3.2 Mise en place de l'écosystème de l'Internet des Objets

Notre recherche s'intéresse aux objets connectés et à la manière dont leurs spécificités techniques peuvent s'articuler avec le processus d'apprentissage. Afin d'étudier les articulations possibles, nous observons les usages effectifs d'objets connectés pour l'apprentissage ainsi que les usages potentiels et plus spécifiquement en adoptant une démarche de conception et de prototypage. L'évaluation des dispositifs conçus vise à ouvrir de nouveaux terrains d'observation et d'interprétation en lien avec notre problématique de recherche. Ainsi, dans le cadre de cette démarche, il nous semble nécessaire d'examiner et de comprendre le fonctionnement des objets connectés ainsi que les technologies sur lesquelles ils reposent. Ce faisant, les sections suivantes présentent les technologies des objets connectés et de l'écosystème de l'IdO. Ce dernier est un agencement de technologies remplissant des objectifs et des fonctions variées, allant de l'identification de terminaux aux protocoles de communication et de traitement des données. Cette section en deux parties présente les modèles d'architecture et les besoins technologiques nécessaires pour la mise en place d'écosystèmes de l'IdO.

3.2.1 Organisation fonctionnelle

Le développement de l'IdO est marqué par la création de silos : les fournisseurs de service et d'objets connectés mettent en place des écosystèmes fermés en utilisant des technologies propriétaires incompatibles avec celles d'autres fournisseurs (Tsiatsis et al., 2019 ; Borgia, 2014). Ces silos réduisent l'interopérabilité entre les objets connectés, c'est-à-dire leur capacité à pouvoir fonctionner ensemble (e.g. échange de données, coordination d'actions) ce qui limite le potentiel de développement des applications de l'IdO et impact l'expérience de l'utilisateur. Pour répondre à cette problématique, plusieurs organismes internationaux, des entreprises et des chercheurs, élaborent des modèles d'architectures pour normaliser le développement des objets connectés et des services sur lesquels ils sont basés. L'objectif est de favoriser la comptabilité entre les objets connectés, l'accessibilité des services, d'accélérer le développement de l'IdO et d'ouvrir la voie à de nouvelles fonctionnalités.

Architectures de l'IdO

À l'instar des définitions de l'IdO, plusieurs modèles d'architecture ont été proposés dont les différences dénotent de la variété des besoins (e.g. communication avec une plateforme dans le *cloud*, *edge computing*). La variété s'explique par les modèles informatiques mis en œuvre pour le traitement des données et par les domaines concernés : domotique, industrie, santé, prêt-à-porter, agriculture, etc. Cependant, il existe des caractéristiques communes à l'ensemble de ces modèles.

Le groupe de travail P2413 de l'IEEE a pour but de créer une architecture de référence applicable à tous les domaines, en se concentrant sur les éléments communs. Initié en 2014 par l'IEEE-SA (*Standards Association*), le groupe de travail doit modéliser les concepts, entités et relations propres à l'IdO puis décrire le fonctionnement de l'IdO. Le projet est toujours en cours de développement toutefois, la Figure 3.7 montre l'architecture envisagée initialement.

57. Source : https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Issue1_14MAY15.pdf. Consulté le 24 avril 2019.

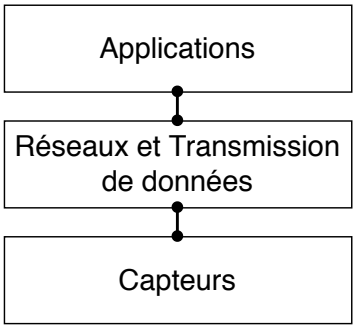


FIGURE 3.7 – **Architecture de l'IdO selon l'IEEE P2413**[57].

La première couche, Capteurs, correspond aux réseaux de capteurs et d'actionneurs, embarqués ou non dans des objets connectés. La couche Réseaux et Transmission de données désigne les technologies de communication et les processus de transmission nécessaires pour faire circuler les données entre les objets connectés et avec des plateformes situées dans le *cloud*. La dernière couche, Applications, concerne les applications et services pour les utilisateurs créés à partir des données collectées par l'objet connecté. Dans le cas d'un bracelet connecté, par exemple, au niveau de la première couche, il s'agit des capteurs de type : accéléromètre, gyromètre, cardiofréquencemètre et altimètre. La seconde couche correspond aux protocoles de communication pour transmettre les données depuis le bracelet jusqu'au smartphone et à une plateforme située dans le *cloud*. La dernière couche est le traitement des données et leur visualisation via une application dédiée.

L'architecture proposée par la branche télécommunications de l'UIT apporte un niveau de détail supplémentaire et intègre la notion de sécurité. La recommandation UIT-T Y.2060 définit les concepts importants et donne les caractéristiques générales de l'IdO et des objets connectés. L'UIT-T décrit également le modèle de référence élaboré par plusieurs groupes de travail dont le SG20 (*Study Group* 20) dédié à l'IdO et ses applications aux villes connectées et aux communautés.

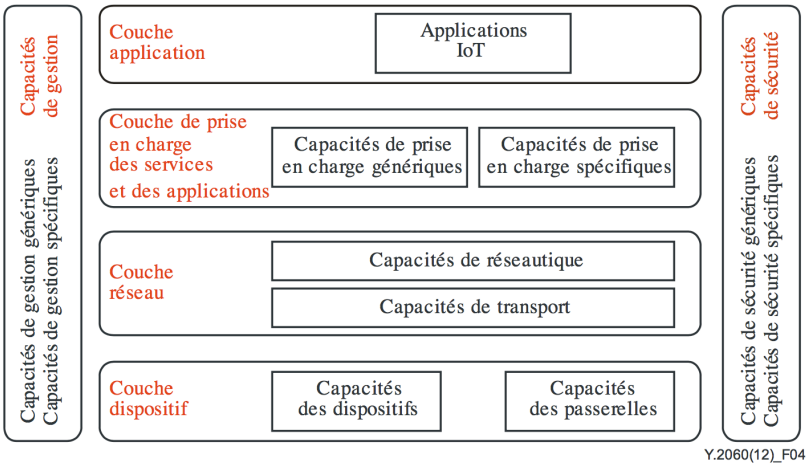


FIGURE 3.8 – **Architecture de l'IdO selon l'UIT-T**. Architecture de référence proposée par l'UIT-T dans sa Recommandation UIT-T Y.2060

La figure 3.8 présente le modèle décrit l'UIT-T. On peut distinguer quatre couches principales et deux couches transversales :

— La première couche est similaire à celle de l'IEEE, mais intègre, en plus des capteurs et actionneurs, les passerelles permettant la communication entre les objets/capteurs et avec les plateformes situées dans le *cloud* ;

— La seconde couche (proche aussi de celle de l'IEEE) englobe les fonctions de contrôles pour l'accès aux ressources, l'authentification des équipements, la compatibilité entre eux et finalement la transmission des données ;

— La troisième couche, pour la prise en charge des services, fait référence aux fonctions de stockage et de traitement des données, qui peuvent être génériques et spécifiques suivant le type de service visé ;

— La quatrième couche désigne les applications et services créés avec les objets connectés ;

— Les capacités de management, l'une des couches transversales, désignent les fonctions pour gérer la flotte d'équipements (e.g. contrôle à distance, mise à jour, maintenance), du réseau et du trafic ;

— Les capacités de sécurité sont les fonctions au niveau de l'application (e.g. maintient de la confidentialité, antivirus) et au niveau du réseau (e.g. intégrité des données, authentification des équipements).

Outre le travail de l'UIT-T, on peut citer également celui de l'ISO/CEI qui a publié en 2018 la norme ISO/CEI 30141 définissant une architecture de référence pour l'IdO [58]. Cette norme est issue du travail mené par le sous-comité 41 (SC41), « Internet des Objets et technologies connexes », dans le cadre du JTC 1 (Joint Technical Committee), un organe de normalisation de la collaboration ISO/CEI. L'objectif du SC41 est d'élaborer une architecture de référence pour améliorer l'interopérabilité des systèmes au sein de l'IdO et d'inclure les problématiques liées à la sécurité. La norme ISO/CEI 30141 propose un modèle conceptuel pour définir les concepts et leurs relations, un modèle de référence pour présenter le fonctionnement à un niveau abstrait et compréhensible par tous et une architecture de référence détaillant toutes les fonctions nécessaires pour créer un système d'Internet des Objets [59].

Ces architectures de référence présentent l'organisation de l'écosystème de technologies de l'IdO au niveau macro. D'autres architectures élaborées par des chercheurs portent, au niveau micro, sur l'organisation et le fonctionnement technique des applications et services basés sur des objets connectés.

Architectures des applications et services basés sur des objets connectés

En mars 2015, des chercheurs de l'Internet Architecture Board (IAB) [60] publient le RFC 7452, un guide sur la mise en réseau d'objets connectés destiné aux développeurs et concepteurs de services et d'applications basés sur des objets connectés [61]. Les recommandations indiquées dans le RFC 7452 s'attachent à améliorer l'interopérabilité entre les objets connectés et à réduire la fragmentation de l'IdO en silos. La Figure 3.9 illustre les quatre modes de communication présentés par les auteurs :

58. Source : https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso-iec:30141:ed-1:v1:en. Consulté le 24 avril 2019.
59. Source : https://www.iso.org/fr/news/ref2361.html. Consulté le 24 avril 2019.
60. L'IAB est le comité chargé par l'association internationale Internet Society de surveiller le développement d'internet.
61. Source : https://tools.ietf.org/html/rfc7452. Consulté le 12 février 2020.

— (a) la communication entre objets ;
— (b) la communication des objets vers une plateforme dans le *cloud* ;
— (c) la communication d'un objet avec une passerelle ;
— (d) le partage de données avec des tiers.

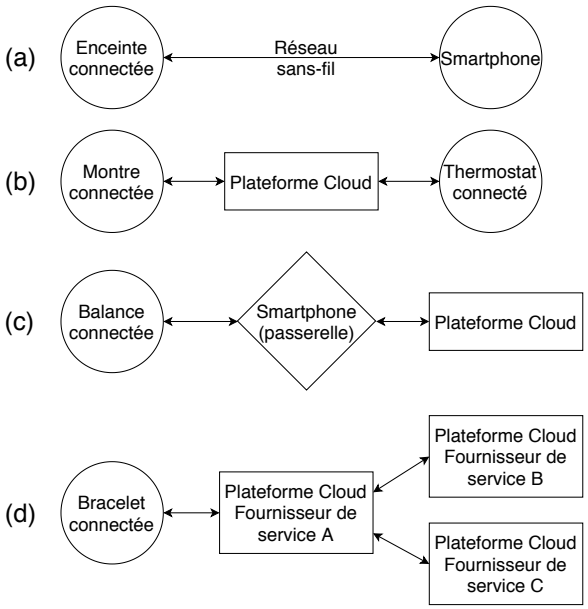


FIGURE 3.9 – **Modes de communication entre les objets connectés**.

Le mode (a) désigne deux objets de fournisseurs différents connectés via un réseau sans-fil, par exemple, une enceinte connectée et un smartphone reliés par Bluetooth. Afin d'assurer l'interopérabilité entre les objets – pour que l'utilisateur puisse interagir avec l'enceinte, quel que soit son modèle de smartphone – les concepteurs doivent s'interroger sur les points suivants :

— les contraintes de l'objet (e.g. puissance de calcul, batterie) ;
— la compatibilité de la technologie de communication ;
— le mode d'identification de l'objet ;
— le mécanisme de découverte de l'objet ;
— le protocole pour transporter les données ;
— le langage pour décrire les données ;
— le niveau de sécurité requis et les potentielles atteintes à la vie privée.

Le mode (b) concerne la communication entre des objets connectés et une plateforme située dans le *cloud*, par exemple, une montre connectée envoyant des données médicales à une plateforme pour l'analyse. Dans cette configuration, l'interopérabilité peut paraître négligeable, car l'objet connecté et la plateforme appartiennent au même fournisseur, cependant l'exploitation de la plateforme par des objets d'autres fournisseurs peut donner lieu à de nouveaux services. D'autre part, à long terme le risque d'une cessation d'activité augmente ce qui peut rendre inutilisable un objet connecté ayant une faible interopérabilité.

Plus complexe que les précédents, le mode (c) correspond à une communication entre des objets connectés et une plateforme dans le *cloud* en passant par une passerelle. Cette

dernière est nécessaire lorsque les ressources de l'objet connecté (e.g. puissance de calcul, débit) ne permettent pas d'utiliser les protocoles standards d'internet (e.g. TCP/IP, HTTP). La passerelle est un intermédiaire qui va recevoir les données de l'objet connecté par le biais d'un protocole adapté puis elle retransmettra les données à la plateforme dans le *cloud*.

Enfin, le mode (d) est l'ouverture à des tiers des données générées par l'objet connecté et la plateforme dans le *cloud*. Face aux écosystèmes fermés – les silos – créés par les fournisseurs, les auteurs du RFC 7452 recommandent la mise en place de service web REST et d'API (*Application Programming Interface*) pour que d'autres fournisseurs ou des utilisateurs puissent exploiter et combiner les données. Par exemple, les données générées par un bracelet connecté peuvent intéresser une entreprise spécialisée dans le coaching sportif et gagneraient à pouvoir exploiter ces données pour émettre des conseils sur-mesure.

Ces architectures ont été élaborées pour synthétiser l'organisation fonctionnelle de l'écosystème de l'IdO et chacune des parties de ces architectures mobilisent des technologies spécifiques.

3.2.2 Technologies

Quelles sont les étapes et technologies nécessaires pour mettre en place un écosystème d'IdO ? Dans leur étude, Benghozi, Bureau, et Massit-Folléa (2008) proposent plusieurs groupes de technologies : identification, capteurs, connexion, intégration, traitement de données, réseaux. Cette thèse s'appuie sur ces groupes de technologies, pris comme une succession d'étapes, pour illustrer les besoins technologiques de l'écosystème d'IdO.

Identifier	**Capter**	**Connecter**	**Intégrer**	**Transport des données**	**Traiter**
Reconnaître, accéder et contrôler un objet connecté relié à un réseau.	Obtenir des données sur l'environnement, alimenter les fonctionnalités de l'objet connecté et assurer l'imbrication physique/-numérique.	Relier les objets connectés entre eux afin d'assurer l'échange de données sur de petites, moyennes et grandes distances.	Lier l'objet physique à un objet numérique ou à un service numérique.	Assurer le transport des données d'un nœud du réseau à l'autre.	Manipuler les données produites par l'objet connecté (e.g. stockage, agrégation, analyse).
IPv4, IPv6, 6LoWPAN	Microsystème éléctromécanique, NEMS	SigFox, LoRa, Narrowband-IoT	RFID, NFC, Bluetooth (LE), ZigBee, Wi-Fi, réseaux cellulaires	CoAP, MQTT, AllJoyn, REST HTTP, XMPP, AMQP	Apprentissage automatique, Hadoop, MapReduce, Filter, NoSQL

Tableau 3.2 – **Technologies pour la mise en place d'un écosystème de l'IdO**.

Le Tableau 3.2 synthétise les besoins technologiques adaptés de Benghozi et al. (2008), à

la fois au niveau des intitulés et des exemples de technologies que chaque besoin regroupe. Les technologies données en exemple ne sont pas exclusives à un besoin spécifique, par exemple, la RFIC peut remplir aussi bien des besoins d'identification et d'intégration.

Identifier

À l'instar des ordinateurs connectés à internet identifiable grâce à leur adresse IP, un objet connecté doit également être identifiable sur un réseau pour permettre l'échange de données et plus généralement pour la reconnaissance, l'accès et le contrôle de l'objet. Ainsi, dans la figure 3.10, les objets connectés sont identifiables par un numéro.

Nous pouvons utiliser le protocole IP pour identifier de manière unique chaque objet connecté. Cependant, compte tenu de la croissance exponentielle du nombre de terminaux reliés à internet, IPv4 est arrivée à épuisement [62]. En effet, la version IPv4, créée en 1981, est codée sur 32 bits et offre ainsi une plage de 2^{32} adresses [63].

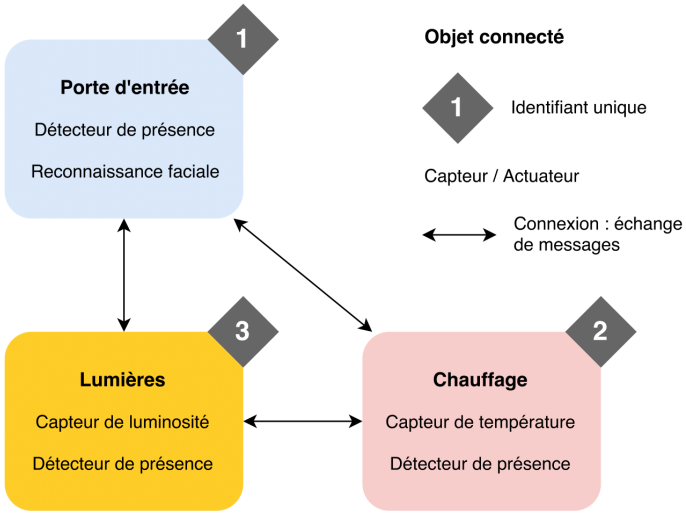


FIGURE 3.10 – **Écosystème d'IdO**. Échanges de données entre une porte d'entrée connectée, des lumières connectées et un chauffage connecté (Roxin & Bouchereau, 2017b).

La nouvelle version du protocole, IPv6, est codée sur 128 bits et offre donc 2^{128} adresses [64] ce qui correspond a plusieurs trillions d'adresses pour chaque être humain sur Terre [65]. IPv6 garantit l'adressage pour l'ensemble des objets connectés toutefois, le traitement des en-têtes des paquets IPv6 demande une puissance de calcul incompatible avec des appareils contraints en ressources (Mulligan, 2007). Afin de répondre à cette contrainte, en 2005 un groupe de travail de l'IETF a créé le protocole 6LoWPAN (IPv6 *Low Power Wireless Personal Area Network*), une version allégée du protocole IPv6. Avec 6LoWPAN, les en-têtes des paquets IPv6 sont compressés, la communication est basée sur le protocole 802.15.4 de l'IEEE dédié aux réseaux sans-fil LR WPAN (*Low Rate WPAN*) et exploité par les appareils limités

62. En juin 2019, l'ARCEP, chargée de la régulation des communications électroniques en France, signale que le nombre d'adresses IPv4 arrivera à épuisement en juin 2020. Outre l'épuisement, l'alarme sonnée par l'ARCEP est aussi motivée par des enjeux de sécurité et d'optimisation des échanges. Source : https://www.arcep.fr/actualites/les-communiques-de-presse/detail/n/internet-ouvert-2.html. Consulté le 3 juillet 2019.
63. Soit 4 294 967 296 adresses. Voir la RFC 791. Source : https://tools.ietf.org/html/rfc791
64. Soit $3{,}4\times10^{38}$ adresses.
65. « Oops ! How Many IP Addresses ? », IEEE Spectrum, 30 mars 2007. Source : https://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/devices/oops_how_many_ip_addresses. Consulté le 26 avril 2019.

en portée, consommation et débit. En 2007, le RFC 4944 [66] rend possible l'utilisation de 6LoWPAN pour les appareils aux ressources contraintes.

Capter

L'objet connecté intègre un ou plusieurs capteurs pour mesurer son environnement et alimenter en données les fonctionnalités de l'objet connecté et les services basés dessus. Les capteurs sont les « organes sensoriels » des objets connectés et assurent, avec les actionneurs, la liaison entre le monde physique et le monde numérique. Par exemple, un smartphone peut avoir les capteurs suivants : accéléromètre, magnétomètre, thermomètre, gyromètre, hygromètre, capteur de luminosité, de proximité, de pression, de geste infrarouge, d'impulsions cardiaques, scanner d'empreintes digitales, etc. [67]. Sur la Figure 3.10, les capteurs des objets connectés sont adaptés au contexte d'utilisation : le chauffage est équipé d'un thermomètre et d'un détecteur de présence pour adapter la température en fonction des personnes dans la pièce.

Le fonctionnement des capteurs et des actionneurs repose sur des microsystème éléctromécanique (MEMS). Développés dans les années 1970, les MEMS sont composés d'un ou plusieurs transducteurs convertissant des signaux physiques en signaux électriques (Saffo, 1997). Par exemple, le microphone est un transducteur transformant une onde acoustique en signal électrique et le haut-parleur effectue l'opération inverse. Il existe également des systèmes électromécaniques à l'échelle nanométrique appelés NEMS (*nanoelectromechanical system*), ayant les mêmes fonctions. Compte tenu du faible coût des transducteurs et de leur taille réduite, les fabricants enrichissent le fonctionnement et les fonctionnalités de leurs appareils électroniques en intégrant plusieurs capteurs. Par exemple, la navigation GPS est basée sur le récepteur GPS (géolocalisation), mais aussi sur l'accéléromètre (direction du déplacement) et le gyromètre (changements de vitesse et d'orientation) [68].

L'avenir des capteurs se joue à l'échelle infinitésimale, en exploitant les principes de la physique quantique pour créer des capteurs quantiques ultra-sensibles. La superposition d'états quantiques est très sensible à l'environnement classique et fournit des capteurs d'une grande précision. Les accéléromètres et les gyromètres à atomes froids sont fondés sur l'interférométrie atomique. Ils détectent le déphasage entre les ondes de matière parcourant les deux bras de l'interféromètre. Les applications attendues concernent la sismologie ou la prospection des ressources minières et pétrolières [69].

Connecter

L'étape suivante est l'interconnexion des objets connectés entre eux pour l'échange de données et la coordination des actions. Parmi les technologies spécialisées dans la communication de M2M, on peut citer SigFox, LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) et Narrowband IoT.

66. Source : https://tools.ietf.org/html/rfc4944. Consulté le 9 juillet 2019.
67. Source : https://fr.farnell.com/smartphone-technology-applications. Consulté le 9 juillet 2019.
68. Source : https://avismobiles.fr/astuces/a-quoi-servent-les-capteurs-proximite-luminosite-accelerometre-gps-gyroscope-magnetometre/. Consulté le 9 juillet 2019.
69. Des physiciens de l'armée de terre américaine ont mis au point un tout nouveau capteur quantique basé sur des atomes de Rydberg, capable de détecter l'ensemble des radiofréquences du spectre électromagnétique https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6455/ab6051. Consulté le 7 février 2020.

Lancée en 2009, SigFox est l'entreprise française à l'origine de la technologie du même nom pour créer un réseau de communication M2M de type LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) [70]. Avec une consommation énergétique réduite et une couverture sur de grandes distances, le réseau LPWAN est adapté à la mise en réseau d'objets connectés. SigFox est basée sur la technologie Ultra Narrow Band qui se distingue par des transmissions de quelques dizaines de Hertz, comparé aux centaines de kHz et MHz des réseaux cellulaires (Mekki et al., 2019). Les transmissions sont bidirectionnelles et limitées à 140 messages par jour dont la taille ne dépasse pas les 12 octets. SigFox étant un réseau propriétaire, les entreprises paient un abonnement à SigFox pour la mise en place du réseau.

À l'inverse, LoRaWAN, concurrent de SigFox, est une technologie ouverte. Les entreprises créent elles-mêmes leur réseau LoRa en utilisant des appareils équipés de puces LoRa et mettant en place les antennes-relais. La technologie est maintenue par l'association LoRa Alliance initiée par la société Semtech [71].

La technologie Narrowband IoT (NB-IoT) est développée par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project) qui regroupe plusieurs acteurs autour de la normalisation des télécommunications comme l'UIT et l'ETSI [72]. NB-IoT s'appuie sur les standards de réseaux cellulaires (e.g. GSM, LTE) et vise la couverture réseau en intérieur à faible coût (e.g. économique, batterie, calcul).

Intégrer

L'objectif de l'intégration est la communication entre le réseau d'objets connectés avec un réseau plus large tel qu'un réseau domestique ou avec des plateformes situées dans le *cloud*. La Figure 3.11 présente quelques-unes des nombreuses technologies sans-fil selon leur portée et débit. On distingue quatre catégories : BAN (*Body Area Network*), PAN (*Personal Area Network*), LAN (*Local Area Network*) et WAN (*Wide Area Network*). Le choix d'une technologie est conditionné par le contexte d'utilisation de l'objet connecté et les caractéristiques de chaque technologie en termes de consommation d'énergie, de débit de communication, de qualité de transmission, de coût, de sécurité et de portée.

BAN est un type de réseau sans-fil à très courte portée définit par le standard IEEE 802.15.6, extension du 802.15 dédié au PAN, ayant les caractéristiques suivantes : une faible consommation énergétique, un débit de données important, transmission avec moindre perte et faible portée (Afelete, 2014 ; Kwak, Ullah, & Ullah, 2010). Le BAN inclus des objets connectés pour la santé, le bien-être et les activités sportives, portés en contact avec le corps de l'utilisateur : les bracelets et les montres, les pendentifs, les vêtements ou encore les lunettes. Les capteurs et fonctions de ces objets connectés mesurent les paramètres physiologiques de l'être humain : pouls, température de la peau, nombre de pas, calorie. Les technologies sans-fil RFID, NFC (*Near Field Communication*) et Beacon entrent dans cette catégorie.

PAN, définit par le standard IEEE 802.15, est un type de réseau sans-fil à courte portée pour relier des appareils électroniques proches, par exemple : entre l'ordinateur, la souris et le clavier, entre le smartphone et les oreillettes sans-fil. Un PAN peut être créé avec les

70. Source : https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview. Consulté le 9 juillet 2019.
71. Source : https://lora-alliance.org/. Consulté le 9 juillet 2019.
72. Source : https://www.gsma.com/iot/narrow-band-internet-of-things-nb-iot/. Consulté le 9 juillet 2019.

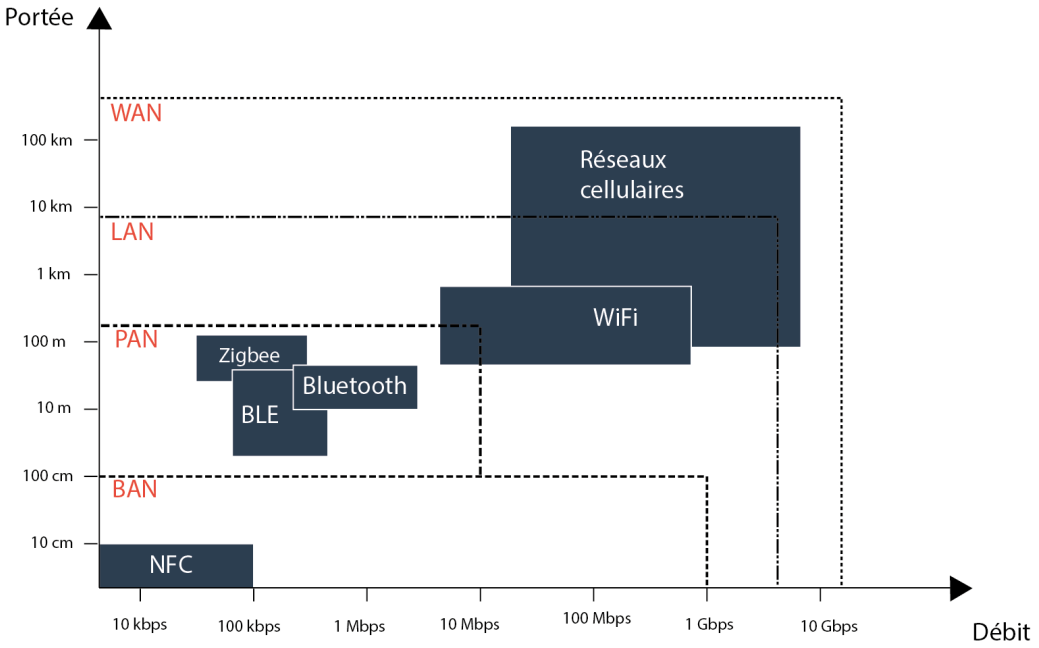


FIGURE 3.11 – Technologies de communication sans-fil selon la portée et le débit du signal (Roxin & Bouchereau, 2017b).

technologies Bluetooth [73], Bluetooth Low Energy (BLE) et ZigBee.

LAN et WAN désignent des réseaux sans-fil à moyenne distance pour connecter, par exemple, les appareils électroniques au sein d'une maison ou d'une entreprise, mais également pour couvrir de grands espaces comme un territoire national. Le Wi-Fi compte parmi les technologies LAN tandis que les réseaux cellulaires (e.g. GSM, GPRS, EDGE, UMTS, LTE, 5G) entrent dans la catégorie des WAN.

Notons que le développement de ces réseaux et en particulier les types BAN et PAN accentuent les problématiques de sécurité soulevées par l'IdO. La protection informatique et juridique des données intimes des individus collectées et stockées par les objets connectés ne peut être négligée. Et s'il est presque impossible de sécuriser chaque système informatique, les fournisseurs de services doivent ajouter une couche de sécurité pour contrecarrer la plupart des attaques.

Transport des données

L'étape de mise en réseau correspond à l'établissement de voie de communication entre les objets connectés et les plateformes des fournisseurs de services pour traiter et extraire la valeur ajoutée de la combinaison des données collectées. Cette opération vise à alimenter des applications et services, intégrés ou non à des objets connectés. S'agissant de l'IdO, les données circulent par le biais d'internet cependant, cela nécessite un protocole pour régir le mode de communication des données entre les noeuds du réseau d'objets connectés. Outre le standard HTTP et le service web REST, il existe des protocoles adaptés à l'IdO : AllJoyn,

73. Le nom « Bluetooth » a été proposé par Jim Kardach (ingénieur d'Intel) à la suite d'une discussion avec Sven Mattisson (ingénieur d'Ericsson) à propos du livre *Longships* de F. G. Bengtsson dans lequel est évoquée l'unification d'une partie du Danemark, de la Norvège et de la Suède par le roi Harald Bluetooth. Source : https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1269737. Consulté le 9 juillet 2019.

AMQP (*Advanced Message Queuing Protocol*), CoAP (*Constrained Application Protocol*), MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) et XMPP (*Extensible Messaging and Presence Protocol*).

Les protocoles s'appuient sur le couple TCP/IP d'internet et proposent des modes de communication différents qui sont à prendre en compte lors de la conception et dépendent du contexte d'utilisation. Ces protocoles résolvent plusieurs problèmes, dont celui de la découverte et de la transmission de données avec des objets connectés proches. En outre, l'enjeu est de réduire les obstacles à l'interopérabilité entre les données collectées par les objets connectés afin de fluidifier les communications et atteindre l'un des objectifs de l'IdO : la mise en place d'un écosystème d'objets capable de capter les stimuli dans l'environnement, de se partager les données et de réagir cohérente au niveau collectif et individuel.

Traiter les données

L'IdO requiert des outils pour la manipulation, l'exploration et la visualisation des données qui reposent sur des méthodes d'apprentissage artificiel (voir la section 2.3.1), du *data mining* (aussi nommé *knowldge discovery in databases*), des mathématiques et des statistiques. Pour analyser de grands volumes de données, ces techniques s'appuient sur des technologies développées pour la manipulation de données à large échelle dans des architectures distribuées : MapReduce, Hadoop, NoSQL (Besse & Vialaneix, 2014). MapReduce supporte la parallélisation des calculs en deux étapes : *map* applique un traitement à un groupe de données et les résultats sont individuellement associés à un tuple (clé, résultat), ensuite *reduce* combine et réduit les tuples en associant les résultats d'une même clé à un unique tuple. MapReduce est exploité par Hadoop, un environnement d'informatique distribuée. Hadoop est un ensemble de composants logiciels utiles à différentes étapes (Besse & Vialaneix, 2014) : le système de fichiers Hadoop Distributed File System fournit une abstraction du système physique de stockage distribué ; HBase et MongoDB sont des systèmes de gestion de bases de données NoSQL adaptés à l'architecture distribuée ; les logiciels Hive et Pig pour l'analyse des données (également Mahout et RapidMiner pour l'implémentation de l'apprentissage artificiel) ou encore le langage de programmation R ou Python (adaptés à la visualisation des données).

L'IdO est un concept en développement caractérisé par une pluralité de définitions, de visions, mais également un ensemble complexe de technologies. L'absence d'architecture de référence et de technologies standards produit une variété de modèles d'organisation des écosystèmes d'IdO et d'agencement technologique. Nous verrons que l'hétérogénéité des technologies, des protocoles et des modèles d'objets connectés est une contrainte forte de la conception de dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés obligeant à des adaptations parfois complexes. En dehors de l'éducation, les objets connectés soutiennent des applications et des services dans plusieurs domaines tels que la santé, l'agriculture et l'industrie manufacturière.

3.3 Perspectives et enjeux de l'Internet des Objets

Les objets connectés existent pour un grand nombre de tâches quotidiennes : fourchettes, chaussures, caméras, tee-shirts, voitures, livres, machines à café, bracelets, montres, tables, stylos, enceintes, télévisions, blocs-notes ou encore lunettes. La multitude d'objets connectés destinés à « faciliter la vie » étend les logiques d'automatisation et d'assistance aux objets de la vie quotidienne. Ces objectifs sont atteints par la mise en données de l'environnement, avec des réseaux de capteurs, la transmission de données entre objets et leur traitement. Cette section dresse un aperçu des applications des objets connectés dans les domaines de la médecine, de l'agriculture, de la ville et de l'industrie. Puis, les promesses véhiculées par les applications de l'IdO seront mises en perspective au regard des problématiques techniques, sociales et environnementales.

3.3.1 Applications de l'Internet des Objets

L'IdO est un nouveau marché économique pour les startups, entreprises et industriels du secteur des TIC leur permettant de diversifier leurs produits et services. La commercialisation d'objets connectés fait partie de la campagne publicitaire des entreprises, pour « *donner un vernis IoT à leur stratégie, à leur road-map de R&D ou à leur gamme de produits* » (Rouxel, 2013). À la fois l'une des conséquences et l'une des causes du flou conceptuel entourant l'IdO, les discours publicitaires décrivent les objets connectés en employant des expressions telles que phygital, post-numérique, hugital et *cognitive automation*. Ces expressions, tout en désignant des objets connectés, semblent vouloir apporter la preuve d'une innovation différente des autres et ouvrant la voie à une nouvelle ère technologique.

Les estimations avancées par les études sur l'IdO font état d'une croissance exponentielle du nombre d'objets connectés : 38 milliards en 2025 et 50 milliards en 2030 selon Statista [74]. Chaque année, le salon international Consumer Electronics Show (CES), dédié à l'innovation technologique, apporte son lot de nouveaux objets et gadgets connectés n'épargnant aucun aspect de la vie quotidienne. Ainsi ont été présentées des toilettes intégrant l'assistant personnel Alexa [75], une bouteille d'eau qui rappelle qu'il faut s'hydrater, une boîte d'œufs dont on peut vérifier la fraîcheur à distance [76] ou encore un grille-pain envoyant une notification lorsque le pain est cuit [77] [78]. Cependant, outre les gadgets, il n'en reste pas moins des applications concrètes de l'IdO pour la médecine, l'agriculture, l'urbanisme, l'habitat, les transports et l'industrie (Raja, Rajkumar, & Raj, 2018).

74. Source : https://www.statista.com/statistics/802690/worldwide-connected-devices-by-access-technology/. Consulté le 21 juin 2019.
75. https://techcrunch.com/2019/01/07/kohler-put-alexa-in-a-toilet-so-happy-new-year/. Consulté le 16 juillet 2019.
76. https://www.digitaltrends.com/home/egg-minder-smart-tray-lets-you-remotely-check-the-freshness-of-your-eggs/. Consulté le 16 juillet 2019.
77. https://fr.ubergizmo.com/2017/01/05/griffin-technologys-connected-toaster.html. Consulté le 16 juillet 2019.
78. Pour un suivi au jour le jour des gadgets et des situations absurdes qu'ils créent, le lecteur curieux pourra consulter le compte Twitter @internetofshit : https://twitter.com/internetofshit?lang=fr.

Type d'objet	**Problème(s)**
Fourchette	Troubles digestifs
Tensiomètre	Maladies cardiovasculaires
Enceinte	Crise cardiaque
Casque	Dépression
Balance	Obésité
Vêtement	Mal de dos
Verre	Déshydratation
Bracelet	État de fatigue, activité physique
Montre	Qualité du sommeil, stress, glycémie, oxygénation sanguine, électrocardiogramme, suivi des cycles menstruels

Tableau 3.3 – Objets connectés dédiés au bien-être et à la santé

Santé et bien-être : mesurer le corps pour l'améliorer

La santé et le bien-être font partie des domaines les plus touchés par le développement de l'IdO avec des objets connectés pour la santé électronique (*e-health*) et la santé mobile (*m-health*) (Ruiz-Rosero et al., 2017). Pour l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'*e-health* est la transmission des ressources médicales et de l'assistance médicale par des moyens électroniques pour trois objectifs : la transmission d'informations médicales pour les professionnels et les consommateurs, l'amélioration des services de santé et l'introduction de pratiques de e-commerce (Ifrim et al., 2017). Quant à la santé mobile, elle désigne l'ensemble des pratiques médicales supportées par les appareils électroniques mobiles, en exploitant leurs fonctionnalités de communication (e.g. GPS, réseaux cellulaires) (Cvrkel, 2018). En matière de soins cliniques, les objets connectés favorisent la surveillance proactive et la prédiction de maladies, le suivi à distance et la prise en compte de paramètres contextuels (e.g. environnement du patient, antécédents) (Ifrim et al., 2017 ; Dhanvijay & Patil, 2019). Ainsi, les objets connectés dédiés à la santé et au bien-être quantifient et surveillent les paramètres physiologiques de l'utilisateur permettant une personnalisation des soins médicaux. Ces objets dédiés à la santé s'inscrivent dans le mouvement plus large du *quantified self* dont les objectifs en matière de santé « *peuvent aller du suivi général à la résolution de pathologies en passant par l'amélioration des performances physiques et mentales* » (Swan, 2013) [79] [80]. Ainsi, ils se voient équipés de capteurs de glucose, d'électrocardiogramme, de capteur de pression sanguine et de température du corps, de saturation en oxygène ou encore ils intègrent un système de gestion de prise de médicaments. Le tableau 3.3 donne un aperçu des types d'objets commercialisés et des problèmes qu'ils traitent.

L'analyse des données en temps réel, issues de plusieurs capteurs d'objets connectés permet également d'établir des prédictions et d'anticiper l'arrivée de maladie. Par exemple, en observant les courbes de fréquence cardiaque, de respiration et de température du corps, il est possible d'identifier le V grippal, c'est-à-dire une chute temporaire de la fréquence cardiaque et de la température annonçant le début d'une grippe (Roxin & Bouchereau, 2017b). Du

79. « *where objectives may range from general tracking to pathology resolution to physical and mental performance enhancement* » (Traduction personnelle)

80. Ruckenstein et Pantzar (2017) montrent que ces objectifs sont accompagnés de discours sur la possibilité de quantifier toutes les dimensions de son corps, d'améliorer ses performances, de réguler son comportement en ayant un *feedback* en temps réel et d'expérimenter sur soi pour mieux se connaître.

côté de la recherche, les travaux portent sur l'élaboration de méthodes pour identifier une maladie particulière à partir d'une combinaison de données des objets connectés ainsi que sur la conception de dispositifs de mesure et de surveillance en temps réel, à l'échelle individuelle et collective (Santos et al., 2020 ; Gubbi et al., 2013 ; Atzori et al., 2010). En somme, les applications médicales de l'IdO consistent en substance en des objets à porter mesurant le corps humain pour produire des conseils, des recommandations, des alertes ou encore des visualisations de données relatives à la santé et au bien-être.

Agriculture : mesurer les cultures pour en automatiser la gestion

Aux côtés de la médecine, l'agriculture est particulièrement touchée par le développement de l'IdO qui apporte de nouveaux outils de travail tels que les réseaux de capteurs, des objets connectés pour les bêtes, des robots et des drones agricoles. Ces nouveaux outils sont mis au service de l'agriculture de précision [81], un modèle de gestion des activités et de la production agricole basé sur « *l'identification, la quantification et la réponse à la variabilité* » [82] (Leonard, 2015). La collecte massive de données et leur analyse visent à répondre de manière optimale aux besoins variés des cultures et des sols afin d'améliorer la productivité (Khanna & Kaur, 2019). L'amélioration et l'optimisation passent par l'automatisation des activités agricoles avec des drones et des robots [83]. Plus concrètement, les applications de l'IdO à l'agriculture sont les suivantes (Alreshidi, 2019) :

— Suivi des conditions climatiques : collecte de données de stations météo ;

— Automatisation de la gestion d'une serre : traitement des nuisibles et des maladies, contrôle de l'irrigation et de la lumière ;

— Gestion des cultures : suivi de la croissance des plantes ;

— Gestion du bétail : suivi de l'état de santé de chaque bête avec un collier connecté ;

— Planning des activités d'une ferme : prévision des activités en fonction de la météo et de l'état des cultures ;

— Analyses prédictives : anticipation des maladies et des nuisibles, prédictions météo ;

— Suivi de l'état de santé des cultures et des sols ;

— Machines agricoles et drones : cartographie des parcelles par un drone, robots chargés du désherbage, de la protection des cultures, de la récolte et du conditionnement de celle-ci.

Dans le domaine agricole, la relation étroite entre le numérique et le physique portée par l'IdO, de même que l'accessibilité économique des équipements, facilite en amont la surveillance des activités et des cultures et, en aval, les données collectées permettent d'établir des prédictions et de prendre des décisions.

81. On trouve également les vocables *smart agriculture*, agriculture 2.0 ou encore agriculture connectée.
82. « *on identifying, quantifying, and responding to variability* » (Traduction personnelle)
83. En 2018, à San Carlos en Californie, l'entreprise Iron Ox a mis en place une ferme entièrement autonome basée sur des cultures hydroponiques gérées par deux robots. Source : http://ironox.com/. Consulté le 24 novembre 2019.

Ville intelligente : mesurer les activités pour les optimiser

Les technologies de l'IdO s'appliquent également à l'échelle de la ville, des transports et de la maison. La ville intelligente (*smart city*) est un concept flou aux acceptions multiples, d'abord employées comme concept marketing par des entreprises telles que IBM pour déployer leur technologie dans le marché potentiel que représente la ville (Albino, Berardi, & Dangelico, 2015 ; Söderström, Paasche, & Klauser, 2014). Ce faisant, la ville intelligente est avant tout une vision techno-centrée de la ville du futur : un système de systèmes « *qui a optimisé son fonctionnement dans toute une série de directions, en particulier en matière de production ou de distribution de services* » (Eveno, 2018) [84]. L'optimisation est atteinte par la mise en données des activités de la ville et l'établissement d'une base de connaissances (Chopplet, 2018). Cela concerne les télécommunications, les *smart grids* (les réseaux d'électricité, d'eau, de chauffage), les transports publics (e.g. gestion du trafic, contrôle de la pollution et des accidents), la mise en place de services géolocalisés (e.g. surveillance médicale, assistance à distance), les services citoyens (vote électronique, engagement), etc. (Breux & Diaz, 2017).

L'IdO apporte à la ville intelligente les réseaux de capteurs et d'actionneurs ainsi que les technologies de communication entre machines à courte, moyenne et grande distance pour optimiser les services urbains. Pour Rifkin, l'IdO va permettre le déploiement d' « *un réseau intelligent composé d'un internet des communications, d'un internet de l'énergie et d'un internet de la logistique* » (Rifkin, Chemla, & Chemla, 2016, p.111). Ainsi, les technologies de l'IdO sont mises au service des réseaux intelligents pour la surveillance des flux et l'ajustement de la distribution (Gubbi et al., 2013 ; Atzori et al., 2010) [85].

À l'échelle du lieu de vie, le développement des objets connectés se traduit par l'évolution de la domotique avec une multiplication d'objets connectés : ampoules, assistant vocal, caméras, four, lit, machine à laver, prise, robot aspirateur, serrure, station météo, thermostat, ventilateur, etc. Afin que les appareils soient capables d'échanger des données et de se coordonner, les entreprises comme Samsung, Philips, Apple, Netatmo ou encore Withings élaborent des écosystèmes d'objets connectés facilitant le fonctionnement, la communication entre objets et leur coordination.

Industrie : mesurer la chaîne de production pour augmenter la productivité

L'intégration des technologies de l'IdO dans le domaine industriel est à l'origine du concept de l'IdO industriel (IIoT, *Industrial Internet of Things*) aussi nommé internet industriel. L'IIoT désigne l' « *accès, la collecte, l'analyse, la communication et l'échange autonome d'informations sur les processus, les produits et/ou les services dans l'environnement industriel, afin d'optimiser la valeur globale de la production* » [86] (Boyes et al., 2018). Ainsi, l'IIoT combine les systèmes cyber-physique, le *cloud computing*, le *edge computing*, les données massives ainsi que l'apprentissage artificiel pour surveiller et optimiser la gestion des chaînes de production.

84. Si la ville intelligente est décrite comme une innovation, Goodspeed (2015) montre que le concept n'est pas nouveau, mais est l'équivalent de la cybernétique urbaine développée dans les années 1970.

85. En France, le compteur Linky, parce qu'il permet de suivre automatiquement la consommation au jour le jour et de personnaliser la distribution, est un exemple de service urbain imaginé pour une ville intelligente.

86. « *access, collection, analysis, communications, and exchange of process, product and/or service information, within the industrial environment, so as to optimise overall production value* » (Traduction personnelle).

FIGURE 3.12 – **Casques à réalité mixte pour professionnels**. Durant la pandémie de Covid-19, des médecins de l'Imperial College Health NHS Trust ont utilisé des casques HoloLens 2 (Microsoft) pour visualiser les informations liées aux patients qu'ils voyaient et les partager en temps réel avec le reste de l'équipe médicale [87].

Plus concrètement, l'IdO facilite la maintenance prédictive, permet la mise en place de jumeaux numériques pour les machines et outils de production, et apporte des outils pour assister les individus exerçant un travail manuel. La maintenance prédictive est assurée par la mise en place de réseaux de capteurs et l'analyse de ces flux de données massifs. Elle est liée au concept de jumeau numérique, « *une représentation virtuelle dynamique d'un objet ou système physique durant son cycle de vie, en utilisant des données en temps réel pour comprendre, apprendre et raisonner* » [88] (Bolton et al., 2018). Le jumeau numérique est créé à partir d'un objet ou système physique avec un identifiant unique, des capteurs et des actionneurs, un modèle prédictif et un moyen de télécommunication (Saddik, 2018). Enfin, le couplage avec d'autres technologies comme la robotique, la réalité augmentée et l'apprentissage artificiel est vecteur de technologies d'augmentation qui vont assister/guider les employés dans leur tâche. Les casques à réalité augmentée sont un exemple de technologie qui augmente la perception de l'utilisateur en « *transmettant des informations jusqu'alors imperceptibles par l'individu* » et « *En représentant données, réalité, environnement, de manière à les rendre plus compréhensibles* » (Gauttier, 2017). Les casques à réalité mixte tels que celui présent dans la Figure 3.12 sont utilisés pour assister l'utilisateur en synchronisant les données (e.g. captation vidéo, son) avec des personnes à distance, en identifiant les objets dans l'environnement ou en y ajoutant des informations contextuelles actualisées par un réseau de capteurs [89].

Dans une perspective applicative, l'IdO est le déploiement des TIC et de systèmes cyber-physiques pour la mise en données de l'environnement. Les applications facilitent la prise de décision orientée vers l'optimisation des activités et se distinguent en deux formes : diffuse

87. Source : https://news.microsoft.com/en-gb/2020/05/19/imperial-college-healthcare-nhs-trust-uses-microsoft-hololens-to-protect-doctors-and-reduce-need-for-ppe/. Consulté le 1 juin 2020.

88. « *a dynamic virtual representation of a physical object or system across its lifecycle, using real-time data to enable understanding, learning and reasoning* » (Traduction personnelle).

89. En 2019, l'entreprise BMW a annoncé la mise au point des lunettes intelligentes TSARAVision pour faciliter le dépannage et la maintenance des véhicules. Source : http://m.fr.eugeniaeyewear.com/news/bmw-tsaravision-smart-glasses-24660277.html. Consulté le 29 juillet 2019.

et tangible. Dans leur forme diffuse, les applications de l'IdO constituent avant tout l'évolution d'une infrastructure existante qui intègre un réseau de capteurs et d'actionneurs et des technologies de communication M2M. Tandis que dans sa forme tangible, qui nous intéresse spécifiquement dans le cadre de cette thèse, l'IdO se traduit par des objets physiques directement en interaction avec l'utilisateur pour remplir des tâches d'assistance et d'automatisation à l'échelle des individus. Qu'il s'agisse de leur forme diffuse ou de leur forme tangible, les applications de l'IdO soulèvent de nombreux enjeux à la fois techniques, sociaux et environnementaux.

3.3.2 Défis et problématiques de l'Internet des Objets

Les objets connectés accentuent les problématiques liées à l'évolution exponentielle des TIC en élargissant leur champ d'application aux objets de l'environnement, avec des effets pour l'individu (e.g. anxiété, troubles du sommeil, phénomène d'addiction) et la société (e.g. solutionnisme, surveillance). En outre, l'imbrication du numérique avec le physique a des répercussions sur le travail et la nature de certaines activités professionnelles (e.g. ouvrier, médecin, agriculteur) ce qui renforce l'enjeu de la formation « par » et « aux » technologies numériques. Les sections suivantes dressent un aperçu de ces problématiques, en commençant par les défis techniques puis les problématiques individuelles et collectives pour finir avec les enjeux de formation.

Défis technologiques

Les principaux défis technologiques que posent les objets connectés correspondent aux besoins technologiques énoncés en section 3.2.2 pour mettre en place un écosystème d'IdO : identification unique de chaque objet, captation de données, connexion entre objets, mise en réseau, communication avec des plateformes situées dans le *cloud* et traitement des flux de données massives. Ces besoins constituent autant de défis techniques à relever compte tenu des ressources limitées des objets connectés (e.g. bande passante, autonomie, puissance de calcul, stockage) et de leur contexte d'utilisation (e.g. zone géographique à faible couverture réseau, autonomie de plusieurs semaines, faible tolérance aux pannes). Conséquemment, les travaux sur les objets connectés s'inscrivent dans plusieurs champs de recherche : les systèmes distribués, la gestion de ressources en situation contrainte, la sécurité d'un réseau et des données, la représentation et le raisonnement sur les données et l'apprentissage artificiel embarqué (Miorandi et al., 2012).

Certaines problématiques entremêlent les questions techniques et politiques à l'exemple de la fragmentation en écosystèmes d'objets connectés pas ou peu perméables entre eux. La fragmentation est due à la diversité des technologies à chaque étape, ce qui entraîne des incompatibilités, mais est également due à l'utilisation par les entreprises de technologies et de protocoles propriétaires. Incidemment, l'interopérabilité s'en trouve limitée. Pour Noura, Atiquzzaman, et Gaedke (2019), l'interopérabilité dans le cadre de l'IdO concerne plusieurs points :

— les appareils électroniques : permettre aux appareils avec des ressources hétérogènes de s'échanger des données ;

— le réseau : mettre en réseau des appareils variés en supportant l'adressage, le routage, la sécurité et la qualité du service ;

— la structure des données : assurer la communication entre des appareils utilisant des modes différents pour l'encodage des informations (e.g. XML, JSON, RDF) ;

— la sémantique des données : exploiter des données issues de modèles de représentation différents ;

— la plateforme : gérer la diversité des systèmes d'exploitation et des API.

Pour répondre à la variété des technologies et des protocoles nécessaires à la mise en place d'un écosystème d'IdO, plusieurs initiatives de gouvernance ont vu le jour, spécifiquement : Open Connectivity Foundation [90], ETSI Smart M2M [91], oneM2M [92], The Internet of Things Consortium [93], The Industrial Internet Consortium [94] ; et de manière plus générale : IETF, IEEE, ISO/IEC JTC 1, UIT. À l'instar des architectures présentées dans la section 3.2.1, ces initiatives visent l'encadrement des pratiques de développement d'objets connectés pour favoriser l'interopérabilité (Atzori et al., 2010). Cependant, si ces initiatives reflètent la prise de conscience d'un besoin d'uniformisation, leur nombre important contribue à la fragmentation en écosystèmes d'objets connectés.

Outre l'interopérabilité, le principal défi technique de l'IdO est d'assurer la sécurité au niveau de l'objet connecté, du réseau et de protéger les données collectées. La sécurité est l'un des champs de recherche de l'IdO les plus développés (Ruiz-Rosero et al., 2017) et, pour cause, les objets connectés sont particulièrement sujets aux attaques informatiques [95]. Ces attaques informatiques peuvent être de plusieurs types : accès non autorisé et/ou modification des données, déni de service ou encore écoute des communications. En 2017, une université des États-Unis a été victime d'une attaque par déni de service en exploitant l'écosystème d'objets connectés de l'université. Infectées par un bot, les machines à sodas et les ampoules connectées ont saturé le réseau universitaire avec des requêtes inutiles pour l'empêcher de fonctionner [96]. Les vulnérabilités des objets connectés sont liées aux faiblesses inhérentes d'internet, à des mauvais paramétrages par les utilisateurs ainsi qu'à des défauts de conception. En 2019, la Commission européenne a exigé le rappel des montres connectées pour enfant Safe-KID-One de l'entreprise ENOX, car celles-ci présentaient un risque grave pour la vie privée. En effet, la montre devait permettre aux parents de surveiller leur enfant et de communiquer avec lui cependant, les communications n'étaient pas chiffrées et le serveur de données (contenant les historiques de localisation et des numéros de téléphone) était accessible sans authentification [97]. Les dommages causés par les attaques informatiques sont élevés lorsqu'il s'agit

90. Source : https://openconnectivity.org/. Consulté le 6 août 2019.
91. Source : https://portal.etsi.org/TBSiteMap/SmartM2M/SmartM2MToR.aspx. Consulté le 6 août 2019.
92. Source : http://www.onem2m.org/. Consulté le 6 août 2019.
93. Source : https://iofthings.org/. Consulté le 6 août 2019.
94. Source : https://www.iiconsortium.org. Consulté le 6 août 2019.
95. La plaisanterie énoncée par Oleg Selajev sur Twitter en novembre 2016 illustre bien la problématique : « *The S in the IoT stands for Security* ». Source : https://twitter.com/shelajev/status/796685986365325312. Consulté le 6 août 2019.
96. Source : https://www.csoonline.com/article/3168763/university-attacked-by-its-own-vending-machines-smart-light-bulbs-and-5-000-iot-devices.html. Consulté le 30 juillet 2019.
97. Source : https://www.developpez.com/actu/244850/La-Commission-europeenne-prescrit-le-rappel-des-montres-connectees-pour-enfants-Safe-KID-One-d-ENOX-en-raison-de-graves-problemes-de-confidentialite/. Consulté le 6 août 2019.

d'objets connectés et d'infrastructures pour la santé et peuvent, par exemple, paralyser un hôpital ou voler des données sensibles des patients [98].

Enfin, la capacité à traiter et à analyser les données générées par les objets connectés est un défi majeur pour l'évolution de l'IdO, particulièrement pour l'autonomie des objets connectés. Le traitement des données doit prendre en compte l'instantanéité, l'imperfection, la continuité et la volatilité des données (Liu, Dastjerdi, & Buyya, 2016) et nécessite des architectures (e.g. *cloud computing*, *edge computing*) et des outils (e.g. Hadoop, MapReduce) spécifiques. Pour l'extraction d'information, les méthodes d'apprentissage artificiel sont préconisées, notamment pour la sécurité afin de détecter les intrusions, authentifier les terminaux et préserver la vie privée (Andročec & Vrček, 2018). Dans ce cadre, des modèles prédictifs sont élaborés par apprentissage de modèles d'attaque de réseau et par la combinaison de variables pour reconnaître un terminal. Les technologies du web sémantique sont aussi envisagées pour favoriser l'interopérabilité, pour sémantiser les données et pour les interpréter (Seydoux et al., 2015). La capacité à faire sens des données captées, les analyser pour prendre des décisions sur les prochaines actions à réaliser est nécessaire au développement des objets connectés, dans les domaines comme la médecine ou la ville intelligente, mais aussi d'une manière plus générale pour la création d'environnement intelligent.

Effets négatifs de la pervasivité des TIC

L'omniprésence des technologies numériques s'accompagne d'effets néfastes comme le dérèglement du sommeil, la peur de manquer des informations, les vibrations fantômes et l'accaparement de l'attention.

La lumière bleue des écrans dérègle le rythme de sommeil en supprimant ou décalant la mélatonine normalement sécrétée la nuit et dont le rôle est de synchroniser les rythmes circadiens, de température du corps et de sommeil (Claustrat, 2009). La peur de manquer des informations (FOMO, *Fear of Missing Out*) avec lesquelles on aurait pu interagir, via un réseau social numérique (e.g. commenter, partager un lien, liker), est une anxiété sociale liée aux TIC (Przybylski et al., 2013). Les personnes atteintes se déconnectent rarement et consultent fréquemment leur fil d'actualité [99]. Il est à ajouter que la fréquentation des réseaux sociaux numériques en elle-même peut avoir des effets négatifs en favorisant les ruminations et les émotions négatives (Fourquet-Courbet & Courbet, 2017). Le syndrome de la vibration fantôme est un autre effet contemporain des TIC qui implique une hallucination tactile ou sonore similaire à la réception d'une notification (Rothberg et al., 2010). Toutefois, il n'existe pas de preuve empirique attestant d'un lien entre une utilisation excessive du smartphone et les vibrations fantômes (Deb, 2015). Plus spécifiquement à l'IdO, l'auto-mesure permise par les objets connectés dans le domaine de la santé et du bien-être peut être utile aux personnes à risque (e.g. risque de crise cardiaque) ou atteintes de maladies. Cependant, la possibilité de suivre son état de santé en temps réel pourrait ne pas avoir de bénéfices évidents pour

98. En 2017, le NHS (*National Health Service*) a été victime d'une attaque par ransomware qui a entraîné l'annulation ou la perturbation de 19 000 rendez-vous médicaux. Source : https://cyberguerre.numerama.com/648-wannacry-un-an-apres-les-mesures-prises-par-les-acteurs-touches.html. Consulté le 6 août 2019.

99. La FOMO peut être considérée comme l'un des aspects de ce qui est couramment appelé la nomophobie (« *no mobile phobia* »), c'est-à-dire la peur d'être séparé de son smartphone. Cependant, il s'agit d'un usage abusif du terme « phobie », car l'addiction au smartphone n'est pas reconnue comme une pathologie (Fourquet-Courbet & Courbet, 2017).

les personnes ne présentant pas de risque avéré (McCartney, 2019). En juin 2018, le U.S. Preventive Services Task Force, un panel indépendant d'experts en prévention des maladies, recommande aux personnes à faibles risques cardiaques de ne pas utiliser d'objets connectés pour surveiller leur rythme cardiaque [100]. Le panel montre que, dans la majorité des cas, les informations apportées par l'objet connecté ne conduisent pas à une prise en charge clinique et que les tests effectués peuvent être source d'anxiété et de stress, particulièrement chez les personnes hypocondriaques.

Dans son livre *Les prothèses cognitives du corps humain*, Derian (2018) assimile l'objet connecté à une prothèse cognitive, car il augmente « *nos capacités de mémorisation, de communication, de calcul* » (*Ibid.*, p.22) et « *il épaule au jour le jour notre comportement* » (*Ibid.*, p.13). Les prothèses cognitives que sont nos smartphones, nos montres ou encore nos tablettes nous permettent de créer, d'apprendre et de communiquer, mais elles ont également des effets négatifs sur l'attention, la créativité et le développement cognitif. En redéfinissant la nature des activités quotidiennes, les prothèses cognitives ont des effets structurants sur le développement du cerveau, notamment chez les enfants. L'attention est affectée par le multitâche médiatique et la conception des plateformes pour *effectivement* capter et retenir l'attention des utilisateurs. À rebours de la technologie calme souhaitée par Weiser, les interfaces des plateformes des GAFAM, centrées sur l'utilisateur, « *arme notre désir d'autonomie contre nous-mêmes par l'exploitation de nos biais cognitifs, sociaux et comportementaux* » [101]. Ainsi, la captologie, l'utilisation des TIC pour la persuasion appliquée à la conception des interfaces, cherche à maximiser le temps passé sur une plateforme grâce à un fil d'actualités infini, à des notifications ou à un compte à rebours annonçant la lecture du prochain épisode de sa série [102]. Pour cela, les concepteurs exploitent les biais cognitifs, des distorsions du jugement provoquées en partie par le Système 1 décrit par Kahneman (2018) (voir section 1.3.2). Les traitements intuitifs et rapides du Système 1 entraînent des biais dans nos jugements, par exemple, l'effet de simple exposition énonce qu'être exposé de manière répétée à quelqu'un augmente la probabilité d'avoir un sentiment positif à l'égard de cette personne (Kahneman, 2018).

Dans ce contexte, l'une des visées sous-jacentes à notre problématique de recherche est d'étudier les objets connectés pour qu'à défaut de servir de prothèses cognitives, ils puissent être utilisés afin de favoriser l'apprentissage. En outre, l'effet prothèse cognitive produit par les fonctions d'assistance des objets connectés s'inscrit dans une conception solutionniste de la technique soulevant plusieurs enjeux éthiques tels que l'infantilisation, la protection de la vie privée, la prise en compte des questions environnementales.

Enjeux éthiques

Les applications et les services portés par les objets connectés sont emprunts du solutionnisme technologique décrit par Morozov (2014) dans sa critique des technologies numériques. Dans son livre, *De la critique du digital : Pour tout résoudre cliquez ici*, Morozov montre que les technologies numériques sont employées pour transformer les problématiques indivi-

100. Source : https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2684613. Consulté le 6 août 2019.
101. Source : http://www.internetactu.net/2019/01/14/retro-design-de-lattention-cest-complique/. Consulté le 30 juillet 2019.
102. Source : http://captology.stanford.edu/about/what-is-captology.html. Consulté le 6 août 2019.

duelles, sociales et politiques en problématiques techniques qui traitent davantage des effets que des causes. Comme le note Moatti (2016), cette critique n'est pas neuve et était déjà résumée par Ellul en ces mots : « *la technique nous est dorénavant présentée comme la seule solution à tous nos problèmes collectifs ou individuels* » (Ellul, 1990). Le solutionnisme, lié au déterminisme technologique, pose la technique comme indépendante de la société et comme un facteur de transformation de celle-ci. Wolton remarque que, « *Rarement des techniques auront été autant investies positivement, avec aussi peu d'esprit critique [...] Toute critique est considérée comme de la 'technophobie'* » (Wolton, 2012). Pourtant, « *le développement de la technique n'est ni bon, ni mauvais, ni neutre [...] chaque progrès technique accentue la complexité du mélange des éléments positifs et négatifs* » (Ellul, 1965). Le solutionnisme appliqué aux objets connectés s'appuie sur la double promesse que tout est quantifiable et que cette quantification systématique apporte les informations nécessaires pour suivre, gérer, prédire et automatiser les activités humaines. Ainsi, dans le domaine agricole, les objets connectés sont mis au service de la productivité en optimisant la gestion des cultures de façon à maximiser les rendements et les profits. L'agriculteur devient un homme d'affaires et ses activités sont rationalisées de sorte que le temps passé à un bureau pour visualiser et interpréter les données augmente au détriment du temps sur le terrain (Mateescu & Clare Elish, 2019). Encore, les problèmes de pollution dans une ville intelligente deviennent des questions techniques basées sur la surveillance et la gestion en temps réel : quelle est la qualité de l'air ? Quels sont les endroits avec des déchets ? Les objets connectés, des réseaux de capteurs et de caméras, surveillent la qualité de l'air et adaptent le trafic routier (grâce au réseau de feux de signalisation), ils surveillent les traces de pollution et les signalent aux services de nettoyage. Cette approche ne s'intéresse ni aux causes des déchets dans un endroit particulier ni ne remet en question les modes de transport dans les villes.

Les prothèses pour la vie quotidienne que sont les objets connectés, en nous assistant constamment, tendent à l'infantilisation. Si les objets connectés soustraient complètement l'individu à certaines tâches (e.g. conduire, contrôler les aliments dans le réfrigérateur, commander une recharge de café), comme l'observe Morozov, ils sont aussi conçus pour ajuster les comportements : « *Les fourchettes intelligentes nous informent que nous mangeons trop vite. Les brosses à dents intelligentes nous incitent à passer plus de temps à nous brosser les dents. Les senseurs de nos voitures peuvent nous dire si nous conduisons trop vite ou freinons trop brutalement* » [103]. Selon Morozov, si les informations apportées par les objets connectés peuvent être utiles, les logiques d'automatisation et d'assistance réduisent la liberté des individus. En ce sens, les chercheurs Frishmann et Selinger défendent dans leur livre la nécessité d'intégrer des valeurs humaines dans la technologie afin de ne pas diminuer la part d'humanité de l'individu en le transformant en rouage nécessaire au fonctionnement des dispositifs technologiques (Frischmann & Selinger, 2018).

Améliorer la sécurité est un défi technologique crucial en lien avec les questions de vie privée et de confidentialité des données que renforce la pervasivité d'objets capables de mesurer, d'enregistrer et d'analyser l'environnement. Les données collectées par ces objets sont destinées en premier lieu à l'individu qui s'auto-mesure, mais elles peuvent également intéresser

103. Source : https://www.wsj.com/articles/SB10001424127887324503204578318462215991802. Consulté le 7 août 2019.

d'autres acteurs : une compagnie d'assurance ajustant ses prix en fonction de l'hygiène de vie ; une entreprise promouvant ses produits auprès d'une catégorie particulière d'individus ; un état surveillant les individus pour lutter contre le terrorisme ; un chercheur en sciences humaines étudiant les comportements sociaux (Saleh, 2018). Face à la captation continue de données sensibles, permettant d'identifier et de suivre les activités d'un individu, la protection de la vie privée demande de la transparence pour savoir *où*, *quoi*, *comment* et *pourquoi* les données sont collectées. À l'instar des assistants vocaux qui écoutent en permanence l'environnement pour savoir quand répondre, les objets connectés se transforment facilement en outils de contrôle et de surveillance. En 2019, un juge de l'état du New Hampshire (États-Unis) a ordonné à Amazon de fournir tous les enregistrements de l'assistant vocal d'une personne sur une période donnée pour aider à résoudre un double meurtre [104]. Cette capacité de surveillance est exploitée par les entreprises qui peuvent étendre le suivi et l'analyse du comportement des consommateurs en dehors de leur plateforme, par exemple, en inférant les informations personnelles des clients d'un magasin à partir des connexions Wi-Fi. En 2013, une entreprise de publicité a installé dans les rues de Londres (puis retiré à la demande des autorités de la ville) des poubelles qui récupéraient des informations sur les passants et suivaient leur déplacement [105].

Enfin, le déploiement d'écosystèmes d'IdO doit prendre en compte les conditions et aménagements nécessaires à leur existence et la production d'objets connectés doit être pensée dans le contexte critique du changement climatique causé par les activités humaines (Saleh, 2018). Selon l'étude publiée en 2019 par GreenIT, la croissance des objets connectés est l'une des raisons de la multiplication par cinq entre 2010 et 2025 de l'empreinte environnementale du numérique [106]. La mise en place des infrastructures pour le fonctionnement d'objets, de capteurs et d'actionneurs en réseau passe par une adaptation de l'environnement : installation d'antennes relais, réorganisation physique, etc. Par exemple, l'installation des capteurs pour surveiller le développement d'une parcelle requiert des aménagements pour optimiser la lecture des capteurs et réduire l'influence de la variabilité de l'environnement sur les mesures (Mateescu & Clare Elish, 2019). Au-delà des adaptations physiques, les objets connectés également un changement dans les connaissances et les compétences, notamment pour collecter, visualiser et interpréter les données.

Évolution des activités et formation

Couplé aux avancées technologiques que sont la robotique et les systèmes d'intelligence artificielle, le développement des objets connectés contribue à l'évolution de la nature du travail en modifiant les manières de faire et les outils des professionnels. Ces changements vont détruire des emplois tout en créant de nouvelles opportunités dans des secteurs différents cependant, il est difficile d'évaluer la balance entre les pertes et les gains (La Banque Mondiale, 2019). La variabilité des estimations quant au nombre d'emplois détruits par l'automatisation et les systèmes d'intelligence artificielle reflète la complexité de la question. Les

104. Source : https://www.iflscience.com/technology/how-amazons-alexa-could-help-solve-a-double-murder-case/. Consulté le 30 juillet 2019.
105. Source : https://www.theguardian.com/world/2013/aug/12/city-london-corporation-spy-bins. Consulté le 30 juillet 2019.
106. Source : https://www.greenit.fr/empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/. Consulté le 8 novembre 2019.

emplois touchés seraient en particulier ceux essentiellement composés de routines, physiques ou cognitives, telles que les tâches exercées par un ouvrier sur une ligne de montage ou un médecin diagnostiquant les maladies (Segal, 2018). Toutefois, même dans ces cas-là, le travail pourrait ne pas être entièrement automatisé et nécessiter l'humain pour fonctionner à l'exemple des caisses automatiques où un agent surveille et intervient en cas de problème (Mateescu & Clare Elish, 2019).

Selon Acemoglu et Restrepo (2019), l'automatisation créée un effet de déplacement qui réduit le contenu et la main d'oeuvre de certaines activités, mais qui créé aussi de nouvelles activités demandant des qualifications plus élevées. Outre l'automatisation ou non des activités, la question est celle des moyens dont disposent les employés pour s'adapter aux changements, en termes de compétences et de soutien de la part des institutions. Cette question est au cœur du *Automation Readiness Index* élaboré par The Economist Intelligence Unit qui dresse un classement des pays les mieux préparés à l'automatisation [107]. Le classement prend en compte trois catégories d'indicateurs : l'environnement pour l'innovation, les politiques du marché du travail ainsi que les politiques en matière d'éducation. Les politiques éducatives concernent la formation initiale et continue, avec l'instauration de programmes de formation aux technologies et aux compétences complémentaires à celles-ci, et aux environnements d'apprentissage, incluant des programmes de formation des enseignants et l'application de l'IA aux données éducatives [108]. L'objectif est de créer les conditions favorisant l'adaptation à l'évolution technologique par le biais de formations aux technologies et en formant à des compétences qui ne seront pas sujettes à l'automatisation. À mesure que les machines gagnent en autonomie et intègrent de l'expertise, les besoins en compétences pour les employés se déplacent de connaissances expertes à des compétences de haut niveau telles que la résolution de problème, la capacité à travailler en équipe, les compétences sociales et la capacité à apprendre et s'adapter (La Banque Mondiale, 2019). Le tableau 3.4 présente quelques-uns des référentiels qui ont été élaborés pour synthétiser les compétences que doivent posséder les individus au 21^{e} siècle.

Les compétences décrites par les référentiels sont valables dans les secteurs de la santé, de l'agriculture, de l'urbanisme et de l'industrie où l'IdO se développe particulièrement. Par exemple, la multiplication d'objets connectés pour la santé demande au personnel hospitalier des connaissances sur leur fonctionnement : identifier leurs défauts, savoir les paramétrer, récupérer les données, les visualiser puis les interpréter. Il en va de même pour les agriculteurs qui, comme le rapportait en 2017 le journal VICE, ont mis en place des stratégies pour le piratage informatique de leurs machines connectées et appris à réparer les dysfonctionnements eux-mêmes [109]. Les piratages concernent les machines dédiées à l'agriculture de précision vendues par John Deere, cette dernière oblige de passer par ses services payants pour intervenir sur le fonctionnement logiciel et matériel d'une machine.

Outre les compétences de haut niveau, la pervasivité des TIC induite par les objets connectés et l'intégration dans les objets de l'environnement rend cruciale la question de la formation

107. Source : https://www.automationreadiness.eiu.com/. Consulté le 2 août 2019.
108. Source : https://www.automationreadiness.eiu.com/whitepaper. Consulté le 8 août 2019.
109. Source : https://www.vice.com/en_us/article/xykkkd/why-american-farmers-are-hacking-their-tractors-with-ukrainian-firmware. Consulté le 2 août 2019.
110. Sources : DigComp 2.0 (https://ec.europa.eu/jrc/en/digcomp/digital-competence-framework), Common Core Standards (http://www.corestandards.org/), P21 (https://www.battelleforkids.org/networks/p21).

Référentiel	Compétences	Source
DigComp 2.0	Compétences informationnelles Communication Collaboration Création de contenus Sécurité Résolution de problèmes	Union Européenne
Common Core Standards	Raisonnement Esprit critique Collecte d'évidence Résolution de problèmes Analyse Communication	National Governors Association et Council of Chief State School Officers
Partnership for 21st Century Skills (P21)	Esprit critique et résolution de problèmes Créativité et innovation Compréhension cross-culturel Compétences info-communicationnelles Informatique et technologies numériques Gestion de carrière Auto-formation	Organisation à but non lucrative réunissant des éducateurs, des politiques et des entreprises

Tableau 3.4 – **Référentiels de compétences pour le 21e siècle** [110].

aux technologies numériques. Selon Milad Doueihi, le numérique, incluant les objets connectés, « *est un écosystème dont il faut faire l'apprentissage* » [111]. D'une manière générale, les compétences en calculs et littéraires restent primordiales, cependant la formation, initiale ou continue, doit également préparer le « lettré du digital » (Cormerais et al., 2017). La difficulté actuelle réside dans la complexification de l'écosystème à mesure que se sont empilées les couches technologiques augmentant l'abstraction et masquant les mécanismes internes (Cormerais et al., 2017). L'IdO requiert des compétences relevant de la pensée computationnelle – algorithmique, programmation, système distribué et collaboratif, design créatif – et des connaissances sur la place de la technique dans la société (Kortuem et al., 2013).

En France, la réforme du baccalauréat qui doit être opérationnelle en 2021 instaure un nouvel enseignement commun en seconde pour renforcer les compétences numériques : « Sciences numériques et technologies » [112]. Le programme de la spécialité comporte un volet « informatique embarquée et objets connectés » dont l'objectif est d'initier les élèves à l'IdO avec la programmation de microcontrôleurs et la manipulation des données de capteurs [113]. Cette réforme fait suite aux mesures précédentes qu'ont été le programme Informatique pour tous

111. Source : https://www.lemonde.fr/education/article/2016/10/04/le-numerique-un-ecosysteme-dont-il-faut-faire-l-apprentissage_5007987_1473685.html. Consulté le 2 août 2019.
112. Source : https://www.education.gouv.fr/cid126438/baccalaureat-2021-tremplin-pour-reussite.html. Consulté le 8 août 2019.
113. Source : https://www.editions-delagrave.fr/sites/default/files/feuilleteurs/9782206103389/152/index.html. Consulté le 8 août 2019.

en 1985, le plan RE/SO en 2007 (qui a fait naître les environnements numériques de travail) ou encore le brevet Informatique et internet (B2i) en 2004. Ces mesures font de l'informatique et des technologies numériques une discipline distincte et ont une approche instrumentale de la technique, focalisée sur les interfaces (Cormerais et al., 2017). Papert (1994) a initié la réflexion sur la pensée computationnelle en envisageant l'informatique non pas en tant que discipline à part entière, mais comme vecteur d'un mélange de disciplines, car « *l'informatique donne plus de liberté pour approfondir le sujet étudié* » (p.77). En ce sens, dans les années 1960, les TIC ont été utilisées par les enseignants en sciences pour créer des tutoriels, des simulations, la programmation, le calcul scientifique et l'enregistrement de données (Cox, 2012). Lors de la présentation de nos études sur les usages existants et potentiels des objets connectés pour l'apprentissage, nous verrons que les objets connectés permettent de se rapprocher des premières introductions des TIC dans l'enseignement des sciences.

*
* *

Nouvelle étape dans l'évolution des TIC et suscitant l'intérêt d'acteurs variés, la réalité de l'IdO est complexe à appréhender. Le développement de l'IdO et les objets connectés s'inscrit dans la continuité de l'informatique connectée et trouvent leurs origines conceptuelles et technologiques dans l'informatique ubiquitaire, les systèmes pervasifs et la communication entre machines. En effet, ces concepts partagent des idées communes, en particulier la disparition des TIC dans l'environnement et l'imbrication du numérique avec le physique. Depuis 2010, l'IdO est un nouveau marché pour les industriels qui produisent en nombre des objets connectés (e.g. tablette, fourchette, verre, vêtements) dédiés à la santé, à l'agriculture, à l'industrie et à la ville intelligente. Les défis que posent les objets connectés sont techniques — par exemple, comment répondre au besoin d'identification des objets ? — et liés à des questions de gouvernance et de normalisation. Le nombre et la pervasivité des objets amplifient les risques que font peser les TIC sur la société et les individus (e.g. attention, addictions, vie privée, liberté d'action). Enfin, les objets connectés rendent cruciales les capacités d'adaptation et d'apprentissage des individus qui voient leurs activités, personnelles et professionnelles, changer de nature. Dans les chapitres suivants, nous rapportons les études que nous avons conduites sur les articulations entre les spécificités techniques des objets connectés et les mécanismes de l'apprentissage en vue de stimuler le processus de construction des connaissances.

Chapitre 4

Caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'Internet des Objets

> Le savant doit ordonner ; on fait la science avec des faits comme une maison avec des pierres ; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison.
>
> – Henri Poincaré, *La Science et l'hypothèse*, 1908

Les objets connectés constituent les supports de l'IdO, un écosystème complexe de technologies, d'applications et de services. Comme nous l'avons présenté (voir le chapitre 3), si les objets connectés sont amplement utilisés dans plusieurs domaines de la vie quotidienne (e.g. industrie, bien-être), les possibilités d'utilisation des objets connectés pour la médiation des savoirs restent à explorer. D'une manière générale, les objets connectés ne sont pas conçus par les entreprises pour être utilisés dans le cadre d'activités d'apprentissage. Cependant, nous avons vu que les usages prescrits par les concepteurs ne déterminent pas entièrement les usages effectifs qui résultent également de phénomènes de détournement et d'appropriation (voir le chapitre 2). Ce faisant, existe-t-il des usages d'objets connectés pour l'apprentissage et pour quelles raisons sont-ils utilisés ?

Dans le cadre de notre recherche, nous étudions les usages existants et potentiels des objets connectés pour la médiation des savoirs. Précédemment, nous avons montré que les modes d'apprentissage soutenu par les TIC dépendent de plusieurs facteurs, dont leurs spécificités techniques. Ainsi, notre objectif est de saisir la manière dont les spécificités des objets connectés sont articulées avec les mécanismes de l'apprentissage pour soutenir le processus de construction des connaissances. Notre travail a été structuré autour des questions de recherche suivantes :

— Quelles sont les spécificités des objets connectés pour l'apprentissage ?

— Quels sont les usages existants des objets connectés pour l'apprentissage ? Quels en sont les points communs et les ancrages théoriques ?

Les résultats des études que nous présentons dans ce chapitre apportent une réponse à ces questions de recherche. La première partie du chapitre décrit le modèle Données, Interfaces, Agents, Pervasivité (DIAP) que nous avons élaboré pour synthétiser les spécificités des objets connectés. Ce modèle nous permettra d'étudier les usages des objets connectés dans le cadre de l'apprentissage. Tout d'abord, les apports et les défauts des modèles existants sont présentés (4.1.1) puis nous décrivons notre modèle DIAP (4.1.2) et son applicabilité au-delà de cette thèse (4.1.3). Dans la seconde partie, nous exposons l'application du modèle DIAP pour identifier les façons dont les spécificités des objets connectés sont articulées avec les mécanismes de l'apprentissage. La démarche suivie nous a conduit à répertorier et classer les dispositifs d'apprentissage existants basés sur des objets connectés. Nous exposons les différentes catégories de dispositif que nous avons créées (4.2). Puis, à partir de l'analyse de ces catégories, nous mettons en évidence les caractéristiques communes des dispositifs d'apprentissage dans le contexte de l'IdO (4.3).

4.1 Étudier l'Internet des Objets avec le modèle DIAP

Cette partie présente le modèle DIAP, un outil conceptuel que nous avons élaboré afin d'étudier l'écosystème de l'IdO et plus particulièrement les objets connectés. Le modèle DIAP propose une synthèse des spécificités des objets connectés afin de délimiter notre objet de recherche avant de se pencher sur la littérature dédiée aux usages des TIC pour l'apprentissage. Cette étape est nécessaire, car discerner parmi les travaux existants ceux portant sur les objets connectés et l'IdO est une opération délicate. Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, l'IdO est un concept aux contours mouvants :

— ses définitions diffèrent en fonction des acteurs (e.g. journaliste, industriel) et, dans la littérature, selon le rattachement disciplinaire ;

— il est au croisement de concepts proches (e.g. informatique ubiquitaire, intelligence ambiante) ;

— il recouvre un ensemble hétérogène de technologies allant des capteurs aux méthodes de traitement de données en passant par les télécommunications sans-fil.

Pour ces raisons, nous avons d'abord cherché un modèle capable de mettre en perspective les recherches menées autour des objets connectés et l'IdO.

4.1.1 Modèles existants de l'Internet des Objets

Le modèle dont nous avons besoin pour notre recherche doit proposer une description des spécificités de l'IdO suffisamment précise pour que l'on puisse reconnaître des dispositifs basés sur l'IdO. Cependant, la description ne doit pas porter sur le fonctionnement singulier d'un type de dispositif parmi l'ensemble des dispositifs basés sur l'IdO. Autrement dit, le modèle doit agir comme une « loupe » sur la littérature, avec un grossissement intermédiaire permettant de relever les dispositifs existants sans entrer dans leurs particularités. Suivant ce critère de précision, le modèle idéal devrait respecter le principe du rasoir d'Ockham en proposant un nombre restreint de dimensions pour décrire les spécificités de l'IdO. En outre, notre but étant d'étudier la médiation opérée par les objets connectés entre l'apprenant et les

savoirs, il est nécessaire que le modèle ne soit pas entièrement axé sur l'ingénierie informatique, mais fasse aussi apparaître l'utilisateur. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, le rôle du tiers dans la médiation des savoirs est de transmettre les informations, mais également d'organiser la situation de communication dans laquelle se déroule l'apprentissage. Cette dimension sociale de la médiation implique d'instaurer un dialogue avec le récepteur afin de faciliter la construction du sens associées aux informations. Ainsi, le modèle que nous cherchons doit proposer une description qui prenne en compte la présence de l'utilisateur et ses interactions avec les objets connectés.

Lors de l'état de l'art sur l'IdO présenté au chapitre 3, nous avons relevé cinq modèles proposant une description synthétique des spécificités de l'IdO et des objets connectés.

Kortuem et al. (2010) proposent un modèle rendant compte des trois dimensions dans lesquelles s'inscrit la conception d'un objet connecté :

— *Awareness*[1] : la capacité de l'objet à analyser les événements dans l'environnement et les activités humaines pour adapter son comportement. Par exemple, l'*Awareness* d'un bracelet connecté réside dans les capteurs liés à l'activité physique de l'utilisateur (e.g. nombre de pas, rythme cardiaque) et les indications qu'il produit ;

— *Representation* : le modèle de programmation sur lequel repose l'application pour traiter les données. Par exemple, la *Representation* pour un bracelet pourrait être un ensemble de règles permettant de traiter les données des capteurs (e.g. si X km parcourus, alors X calories dépensées) ;

— *Interaction* : la capacité de l'objet connecté à interagir avec un utilisateur. Par exemple, un bracelet connecté peut présenter les informations *via* une interface graphique pour afficher les informations ou informer l'utilisateur par le biais de vibrations.

D'une part, ce modèle est en accord avec le rasoir d'Ockam, car il propose un nombre réduit de dimensions pour décrire les objets connectés. D'autre part, sa limite principale est que la dimension *Awareness* est relativement vague et vaste : elle peut aussi bien englober les données collectées par les capteurs des objets que les SIA analysant les données.

De leur côté, Ning et Hu (2012) proposent un modèle constitué de quatre dimensions pour catégoriser les technologies de l'IdO :

— *Body* : regroupe les capteurs et les technologies de mise en réseaux et de transmission des données ;

— *Processing* : corresponds aux algorithmes de traitement des données ;

— *Intelligence* : désigne les fonctions avancées pour la gestion réseau, la prise de décision automatique ou encore le contrôle intelligent ;

— *Sociality* : en référence aux instances de gouvernance, aux programmes de standardisation et aux lois régulant le développement de l'IdO.

Comme le modèle précédent, les auteurs ont choisi un nombre restreint de dimensions pour décrire les technologies de l'IdO. Cependant, nous voyons trois inconvénients à l'utiliser dans notre recherche. Tout d'abord, les dimensions *Body* et *Processing* semblent se recouper —

1. Nous avons fait le choix de ne pas traduire les dimensions des modèles existants dans la littérature, car elles correspondent à un concept plutôt qu'à un terme que l'on peut changer.

comment distinguer les technologies pour la transmission de données des algorithmes ? Ensuite, comme nous l'avons montré en section 2.3, le terme « intelligence » sur-évalue l'état de l'art de la recherche sur les SIA, car ces derniers ne sont pas intelligents au même titre que l'humain. Enfin, les quatre dimensions relèvent avant tout de l'ingénierie informatique et ne font pas apparaître les aspects liés à l'utilisateur. Les dimensions du modèle doivent en partie rendre compte des interactions de l'utilisateur avec les objets connectés.

Püschel, Roeglinger, et Schlott (2016) proposent quant à eux une taxonomie pour classer les objets connectés existants. Leur classification se compose de quatre couches ayant chacune plusieurs dimensions :

— *Thing* : un objet connecté est muni de capteurs et d'actionneurs ;

— *Interaction* : un objet connecté peut interagir, *via* des moyens de communication, dans une direction donnée (e.g. envoyer et recevoir des données, uniquement envoyer), avec un ou plusieurs acteurs, qui peuvent être des consommateurs, d'autres objets, des entreprises ou des fournisseurs de services. Enfin, un objet connecté utilise des technologies propriétaires ou ouvertes ;

— *Data* : les données générées par un objet connecté peuvent avoir différentes sources (e.g. état de l'objet, utilisations) et être utilisées pour des objectifs variés ;

— *Service* : un objet connecté apporte un service spécifique et comporte ou non des fonctionnalités hors-ligne.

La taxonomie de Püschel et al. (2016) propose un niveau de description supérieur aux modèles de Kortuem et al. (2010) et de Ning et Hu (2012). La portée descriptive de cette taxonomie est utile pour décrire les objets connectés, mais son application est restreinte pour déterminer si des dispositifs relèvent ou non de l'IdO en raison du nombre élevé de dimensions (dix).

Dans leurs travaux, (Atzori et al., 2010, 2014, 2017) proposent de décrire l'IdO selon quatre niveaux :

— 1er niveau : le monde physique et les individus ;

— 2e niveau : les technologies d'augmentation des objets (*object augmentation technologies*, e.g. RFID, NFC), les moyens de communication et les profils des individus ;

— 3e niveau : le *cloud computing* et la virtualisation ;

— 4e niveau : les applications.

L'intérêt de cette modélisation est de faire apparaître le monde physique comme point de départ pour la création de services et d'applications. Cependant, cette modélisation adopte un point de vue ancré dans l'ingénierie informatique qui rejoint les architectures de l'IdO présentées en section 3.2.1. L'utilisateur est uniquement présent au premier niveau du modèle, en tant que source de données qui alimentent les applications et services de l'IdO.

Finalement, Alkhabbas, Spalazzese, et Davidsson (2019) ont conduit une revue des taxonomies existantes sur l'IdO afin d'établir la liste des caractéristiques d'un écosystème d'IdO. Selon les auteurs, un écosystème d'IdO est composé des dimensions suivantes ayant elles-mêmes plusieurs caractéristiques :

— *Thing* : les objets connectés (e.g. capteurs, actionneurs, passerelles) sont caractérisés entre autres par des fonctions, un niveau d'autonomie, une ressource énergétique et un logiciel ;

— *Communication* : technologies pour la captation et la diffusion des données ;

— *Middleware* : logiciel à l'interface entre le système d'exploitation de l'objet connecté et l'application/le service ;

— *Data* : nature des données générées par les objets connectés (e.g. type, source, qualité) ;

— *Deployment* : ensemble des opérations pour mettre en place un écosystème d'IdO ;

— *User* : caractéristiques de l'utilisateur (e.g. objectif, mode d'interaction) ;

— *Goal* : objectifs des applications de l'IdO ;

— *Identifier* : technologies pour l'identification des objets connectés ;

— *Resource management* : gestion des ressources (e.g. énergie, stockage) ;

— *Collaboration* : nature des collaborations entre des objets connectés (e.g. objectifs, données échangées).

Tout comme la taxonomie produite par Püschel et al. (2016), le niveau de descriptions obtenu par Alkhabbas et al. (2019) est très avancé. Le modèle ne respecte pas le principe du rasoir d'Ockham, que nous avons posé comme nécessaire pour les besoins de notre recherche, et propose dix dimensions pour décrire les spécificités de l'IdO. Le nombre important de dimensions ne facilite pas l'identification de dispositifs relevant ou non de l'IdO.

Pour notre recherche, les limites des modèles que nous venons de présenter résident dans le grand nombre de dimensions qu'ils proposent pour décrire les spécificités de l'IdO ainsi que leur orientation vers l'ingénierie informatique. En effet, le nombre élevé de dimensions décrit finement les spécificités des objets connectés et de l'IdO, mais complexifie l'identification de dispositifs basés sur des objets connectés parmi les travaux portant sur les technologies éducatives. D'autre part, pour traiter des problématiques soulevées par la médiation des savoirs, le modèle devrait faire apparaitre l'utilisateur dans sa description des spécificités des objets connectés et de l'IdO. Ces limites nous ont incités à aller plus loin en élaborant un modèle adapté à notre problématique de recherche.

4.1.2 Le modèle DIAP et ses dimensions

Pour construire notre modèle, nous avons cherché à cerner les spécificités invariables aux objets connectés et aux applications existantes dans les domaines de la médecine et de l'agriculture où le développement de l'IdO est le plus visible.

A posteriori, nous pouvons rapprocher ce travail de l'opération de variation eidétique propre à la phénoménologie et théorisée par Husserl. La variation eidétique est ce qui permet de « *dégager progressivement l'essence, par retranchements successifs, de ses traits ou caractères liés essentiellement à l'objet donné dans l'expérience, pour tout dire non nécessaires* » (Depraz & Husserl, 2012, p. 32). Il s'agit de faire varier les caractéristiques d'un objet pour en cerner l'essence. Dans notre cas, nous nous sommes demandé : à quelles spécificités essentielles peut-on réduire les objets connectés et les applications qu'ils soutiennent ? Également,

du point de vue de l'utilisateur, quels sont les invariants qui apparaissent lorsque les objets connectés sont introduits dans des activités (e.g. soins médicaux, gestion des parcelles) ?

Cette interrogation nous a conduits à construire le modèle DIAP synthétisant ces spécificités sous la forme de quatre dimensions : Données, Interfaces, Agents, Pervasivité (voir Figure 4.1).

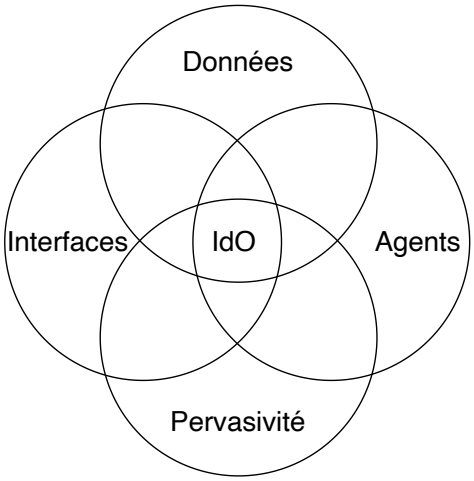


FIGURE 4.1 – **Modèle DIAP : Données, Interfaces, Agents, Pervasivité** [2]

Dans les sections suivantes, nous décrivons les quatre dimensions en justifiant leur choix.

Données

Les Données forment la première dimension de l'IdO, car elles sont au cœur du fonctionnement des applications portées par l'IdO et les objets connectés. Plusieurs constats permettent d'appuyer cette proposition.

Tout d'abord, nous observons que les architectures de l'IdO, à l'exemple de celles présentées en section 3.2.1, sont organisées autour de la collecte de données et de leur valorisation dans des applications et services. Bien que cela ne soit pas explicite, chaque couche des architectures de l'IdO correspond à un nouveau traitement sur les données (voir Figure 4.2).

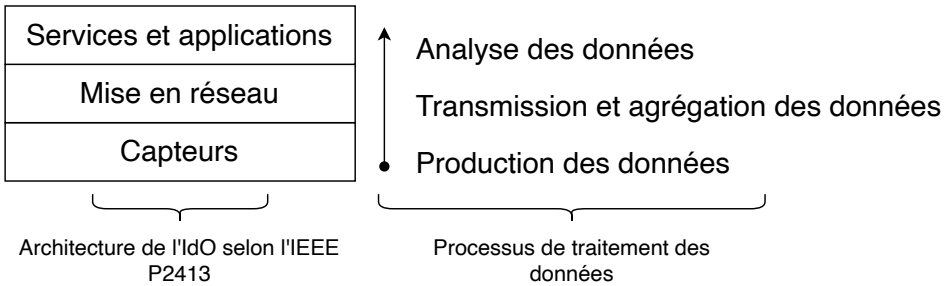


FIGURE 4.2 – **Architecture de l'IdO et traitement des données**

2. La représentation du modèle DIAP proposée ici est une forme moins restrictive du diagramme de Venn appelée diagramme d'Euler pour laquelle deux ensembles peuvent ne pas avoir une intersection unique en commun. Par exemple, les dimensions Données et Pervasivité du modèle DIAP ne se recoupent jamais seules, mais uniquement lorsque les autres dimensions sont présentes. Cependant, cette représentation du modèle DIAP n'est pas fixée et doit faire l'objet d'approfondissements pour examiner ce qui se situe aux intersections entre chaque dimension. Source : https://www.cs.kent.ac.uk/events/conf/2004/euler/eulerdiagrams.html.

En effet, dans la majorité des architectures, la couche la plus basse est dédiée à la production des données, où les capteurs enregistrent des événements dans leur environnement. Les couches suivantes visent à transmettre les données, vers d'autres objets ou vers des plateformes situées dans le *cloud*, pour agréger, stocker et traiter les données. Enfin, les données sont traitées pour être valorisées dans un service ou une application. Par exemple, dans le cas d'un bracelet connecté, les capteurs récupèrent des données sur l'activité physique de l'utilisateur puis elles sont transmises vers un autre objet mobile personnel (e.g. smartphone, tablette) pour leur analyse et leur présentation à l'utilisateur.

Outre les architectures, nous constatons aussi que la finalité des applications existantes de l'IdO implique nécessairement une collecte de données. En effet, qu'il s'agisse de surveiller l'activité physique, d'automatiser la gestion de parcelles ou de prédire les risques de maladie, ces applications traitent les données collectées par des capteurs d'objets connectés. Ce constat est lié aux deux effets inhérents au développement des TIC : a) l'automatisation et b) la capacité d'information (*informating capacity*).

Selon Zuboff (1988), les TIC sont utilisées pour substituer à l'agentivité humaine des processus automatiques afin d'accélérer la réalisation de tâches. Dans un même temps, l'automatisation produit et fonctionne grâce à des données qui renseignent sur des activités et des événements auparavant invisibles ou intangibles. Une application « recherche de contacts » (*contact tracing*[3]) utilisée dans le cadre de la pandémie de Covid-19 permet d'automatiser l'identification de personnes infectées, mais elle fournit également des données sur les déplacements des utilisateurs. Les données produites par les capteurs des objets connectés rendent visibles des activités qui ont lieu dans l'environnement physique : les déplacements d'une personne, l'évolution de l'état de santé d'un patient, le niveau de pollution dans une ville, etc. En visant l'automatisation d'activités liées à l'environnement, les objets connectés étendent la capacité d'information des TIC .

En section 2.1.2, nous avons établi que la donnée désigne un fait ou une mesure. Plusieurs travaux ont proposé une distinction entre la donnée et le « capta » (Checkland & Holwell, 2002 ; Chippindale, 2000 ; Dodge & Kitchin, 2005). Les auteurs argumentent en faveur de l'utilisation du terme capta plutôt que donnée, car l'acceptation de cette dernière lui attribue un caractère objectif. Or, d'après les auteurs, les données ne sont ni objectives ni neutres, mais résultent d'une sélection qui comporte une part d'intention et de subjectivité. Ainsi, pour Dodge et Kitchin (2005) les capta sont des « *unités de données qui ont été sélectionnées et récoltées à partir de la somme de toutes les données potentielles* » (Dodge & Kitchin, 2005, p. 5)[4]. En d'autres termes, les capta représentent les données qui ont été finalement sélectionnées parmi toutes celles qui pouvaient potentiellement être sélectionnées.

Nous reconnaissons que les données ne sont pas neutres et objectives parce qu'elles sont le résultat de choix liés à l'implémentation et à la conception des capteurs. Les données de l'IdO sont issues de capteurs qui génèrent des mesures, c'est-à-dire des grandeurs physiques (ou, plus simplement, des valeurs) liées à un référentiel permettant de les décrire. Par exemple,

3. « Mise en œuvre des moyens permettant de retrouver et de traiter, s'il y a lieu, les personnes qui ont eu des contacts étroits ou intimes avec une personne infectée par une maladie épidémique afin de freiner la progression de celle-ci » (Le grand dictionnaire terminologique, http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26552313).

4. « *units of data that have been selected and harvested from the sum of all potential data* » (version originale).

un capteur peut mesurer la température selon plusieurs référentiels, dont l'échelle Celsius et l'échelle Fahrenheit. Cependant, nous sommes en désaccord avec l'idée de « données potentielles », car ces deux termes sont contradictoires : si une donnée est un fait, comment peut-il être potentiel ? D'un côté, la donnée renvoie à quelque chose d'existant et de présent alors que la potentialité suppose que cette chose est seulement virtuelle.

En suivant le principe de simplicité, il nous semble plus pertinent de garder uniquement le terme de donnée tout en admettant dans sa définition l'existence d'une part de sélection. Les données de l'IdO sont donc des paramètres décrivant certains aspects de l'environnement et obtenus par des capteurs ayant été conçus avec une finalité particulière. Nous distinguons plusieurs types de paramètres :

— des paramètres environnementaux décrivant l'environnement et ses différents états. Il s'agit de données, par exemple, générées par les capteurs dont disposent la plupart des smartphones [5] : accéléromètre, magnétomètre, thermomètre, gyromètre, hygromètre, capteur de luminosité, de proximité, de pression, de geste infrarouge, d'impulsions cardiaques, scanner d'empreintes digitales, etc. ;

— des paramètres portant sur les états comportementaux et physiologiques de l'humain. Ces capteurs sont le plus souvent intégrés dans les objets connectés dédiés à la médecine, aux bien-être et aux activités sportives : nombre de calories dépensées, température de la peau, rythme cardiaque, poids, déplacements, etc.

Collectées par des capteurs, les données sont ensuite traitées pour alimenter les applications et les services portés par les objets connectés.

Interfaces

Les interfaces humain-machine et les modes d'interaction des objets connectés constituent la seconde dimension de l'IdO. La multiplication d'objets connectés et la fusion des technologies avec les objets qui nous entourent transforment le corps et l'environnement en interface (Doueihi, 2016). L'intégration des TIC dans les objets de l'environnement amène les concepteurs à adapter les interfaces humain-machine en fonction de la forme, de l'utilité ou encore de l'utilisabilité de l'objet. Ce faisant, les modes d'interaction entre l'objet et l'utilisateur évoluent vers des modalités plus naturelles pour l'utilisateur : les verbes « toucher », « bouger », « parler » et « regarder » succèdent aux verbes « taper », « pointer » et « cliquer ».

En 1980, Bolt, du MIT Architecture Group, présente l'interface *Put That Here* innovante pour l'époque permettant de manipuler des données spatiales par la voix et les gestes (Bolt, 1980). Plus tard, les interfaces graphiques (*graphical user interface*, gui) exploitant le paradigme WIMP (*Windows*, *Icons*, *Menus and Pointing device*) proposent de manipuler les données sous forme lexicale et iconique à l'aide de dispositifs de pointage (e.g. clavier, souris). Cependant, van Dam (1997) argumente en faveur d'une nouvelle génération d'interfaces, post-WIMP, proposant des modes d'interactions plus naturels mobilisant tous les sens humains. Les interfaces post-WIMP incluent la reconnaissance des gestes et des mouvements, le traitement du langage naturel et la reconnaissance vocale, les interfaces tactiles, ainsi que la

5. Sources : http://webstar-electro.com/actualite/comprendre-les-capteurs-de-smartphones-et-leur-utilite-21819.htm, https://sites.google.com/site/wikismartphone/generalites/les-capteurs. Consulté le 2 juin 2020.

réalité virtuelle et la réalité augmentée. L'objectif sous-jacent à ces interfaces naturelles est de rendre les interactions de l'utilisateur avec le système informatique transparentes et sans effort [6]. Cet aspect se rapproche de l'un des principes à l'origine de l'informatique ubiquitaire (voir section 3.1.2) : l'utilisation des systèmes informatiques ne doit plus être une activité à part entière, mais se fondre dans les activités quotidiennes.

Dans le cadre de notre modèle DIAP, la dimension Interfaces décrit les interfaces intégrées dans les objets connectés au sens donné à post-WIMP par van Dam (1997). Nous prenons en compte dans cette dimension les interfaces vocales, la réalité virtuelle et la réalité augmentée ainsi que les interfaces surfaciques (*surface user interfaces* (SUI)), tangibles (*tangible user interfaces* (TUI)) et ambiantes (*ambiant user interfaces* (AUI)). Avec les interfaces naturelles, notamment les SUI, TUI et AUI, les modes de saisi et de contrôle de l'information tendent à se confondre avec la représentation de l'information elle-même.

Les SUI sont des écrans ou des projections (horizontales, verticales ou sphériques) incorporant un dispositif de commande dans le même support physique (e.g. écran tactile ; Krumm (2010)). L'intégration du moyen de contrôle de l'information avec sa représentation est particulièrement visible avec les TUI donnant une forme physique et concrète à des informations numériques (Ullmer, Ishii, & Jacob, 2005). Une information, ou une opération numérique, est représentée sous la forme d'un objet physique et la manipulation de celui-ci par l'utilisateur affecte l'information. Les manières de contrôler et de saisir les informations numériques se rapprochent de leurs représentations (Ishii, 2008) (voir Figure 4.3).

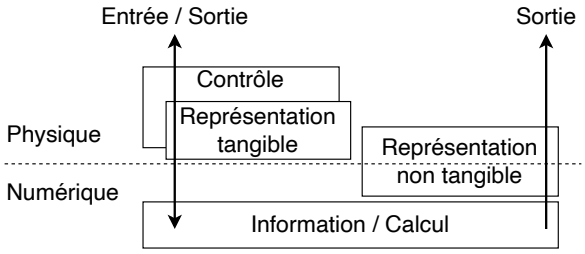


FIGURE 4.3 – **Interface utilisateur tangible.** L'information est tangible, représentée par un objet palpable, et peut être complétée par une représentation intangible (e.g. ombre, projection vidéo). Adapté de Ishii (2008).

Les TUI ont évolué dans deux directions (Holmquist et al., 2019) : d'une part, l'utilisation de matériaux programmables et interactifs et d'autre part, le mélange avec la réalité virtuelle ou augmentée. Le jeu Osmo est un exemple de TUI utilisant des matériaux interactifs : à l'aide de pièces tangibles, les enfants peuvent manipuler des nombres, coder ou encore jouer au Tangram [7]. Flemisch et al. (2020) décrivent un dispositif intégrant une interface tangible et la réalité virtuelle mis en place dans le cadre du projet de défense EnSUI. L'objectif du dispositif est d'étudier l'ergonomie des postes de conduite de véhicules militaires. Le dispositif est composé d'un casque de réalité virtuelle et d'objets tangibles de sorte que l'utilisateur peut toucher physiquement des objets (e.g. manettes de commande d'un véhicule) qu'il perçoit

6. Comme le rappel Norman (2010) dans son article *Natural user interfaces are not natural*, le terme « naturel » ne signifie pas pour autant que l'utilisateur est capable d'interagir naturellement avec l'objet comme il le ferait avec une personne. Les interfaces naturelles apportent de nouveaux modes d'interaction qui doivent s'accompagner d'une réflexion sur le respect de critères ergonomiques indispensables pour assurer leur utilisabilité.

7. Source : https://www.playosmo.com/fr/. Consulté le 18 février 2020.

dans un monde simulé (e.g. poste de conduite d'un véhicule).

Les interfaces ambiantes regroupent les interfaces ne sollicitant pas directement l'engagement et l'attention de l'utilisateur, elles peuvent être ignorées (Krumm, 2010). L'information est présentée à la périphérie de l'attention de l'utilisateur, dans sa vision périphérique. Les LED des multiprises et des chargeurs d'appareils mobiles ou encore la fontaine DataFountain conçue par van Mensvoort sont des exemples de AUI [8].

Les interfaces humain-machine peuvent aussi s'appuyer sur l'apprentissage automatique pour améliorer les interfaces et comprendre l'humain (Marquis, Papini, & Prade, 2020). Les interactions humain-machine peuvent se faire par la parole (reconnaissance et synthèse vocale), par l'écrit (traitement du langage naturel), par les gestes et la posture (reconnaissance d'objets) ou encore par les émotions [9]. Les modèles de traitement du langage naturel élaboré par apprentissage automatique permettent de créer des interfaces vocales et/ou conversationnelles. L'utilisateur dialogue interagit avec le système oralement ou par écrit, à l'exemple des *Dialogue-based tutoring system* que nous avons présenté en section 2.3.2. Les modèles de vision artificielle sont également utilisés dans les interfaces humain-machine pour reconnaître les gestes de l'utilisateur (Negi, Pawar, & Lal, 2020). Dans un flux vidéo en temps réel, les mains de l'utilisateur sont isolées et les doigts sont identifiés puis leurs positions sont associées à des catégories de gestes (e.g. saluer, aller à gauche).

Agents

Les Agents (du latin *agere*, agir), la troisième dimension de notre modèle DIAP, représentent les capacités de décisions et d'actions des objets connectés dans l'environnement. Comme nous l'avons vu précédemment, les données sont un élément central de l'IdO en ceci qu'elles forment le contenu à partir duquel fonctionnent les applications et les services basés sur des objets connectés. Cependant, si les capteurs constituent les « organes sensoriels » permettant d'obtenir les données, des « fonctions cognitives » sont nécessaires pour traiter et analyser les données (Li et al., 2020, Wu et al., 2014). Ainsi, les Agents répondent à l'enjeu de valorisation des grands volumes de données collectées par les objets connectés : qu'extraire et comment ? L'objectif est d'assurer une cohérence entre les données collectées par les capteurs et les décisions / actions des objets connectés.

Pour parvenir à cette cohérence, les objets connectés sont couplés à des systèmes d'intelligence artificielle. Ensemble, les objets connectés et les SIA forment un système intelligent, car l'on retrouve un module pour estimer l'état du monde, un module pour agir sur le monde et un module pour contrôler la réussite (LeCun, 2016). Les technologies de l'IdO permettent la mise en données de l'environnement avec des réseaux de capteurs, l'échange de données pour coordonner les opérations entre objets et l'action concrète sur l'environnement avec des actionneurs. Le couplage avec des SIA permet aux objets connectés, en plus de la coordination,

8. La hauteur des différents jets d'eau de la DataFountain reflète en temps réel les taux de change de trois monnaies (Yen, Euro et Dollar) et leurs relations entre elles. Source : https://www.koert.com/work/datafountain/. Consulté le 18 février 2020.

9. La reconnaissance des émotions fait partie du champ plus large de l'informatique affective initiée par Picard (1995) et dont le but est d'identifier et de synthétiser les expressions faciales ainsi que les inflexions de voix. L'identification des émotions se base sur des algorithmes de vision artificielle, de traitement du langage naturel et sur les données physiologiques renvoyées par des capteurs. L'objectif est d'améliorer les interactions avec la machine en intégrant de l'empathie et en s'adaptant aux émotions de l'utilisateur.

d'adapter leurs actions en fonction des stimuli.

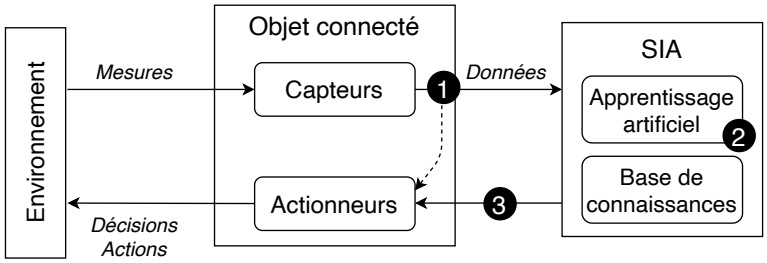


FIGURE 4.4 – **Couplage d'un objet connecté avec un système d'intelligence artificielle.**

Le traitement des données collectées relève soit d'un algorithme classique (e.g. régulation d'un thermostat) soit d'un SIA (voir Figure 4.4). Dans ce second cas, les données ❶ sont les entrées d'un modèle prédictif élaboré par un algorithme d'apprentissage artificiel ❷. L'apprentissage artificiel synthétise sous la forme d'un modèle les régularités statistiques présentes dans les données (voir section 2.3.1). Le modèle ne reflète pas avec exactitude la complexité du réel, mais réalise un compromis entre une description abstraite du phénomène et la prise en compte de spécificités locales. Ainsi, si les modèles prédictifs sont par nature inexacts, ils permettent une première interprétation des données qui est exploitable pour la reconnaissance d'objets, la traduction ou la synthèse vocale. Des connaissances peuvent aussi être représentées formellement avec les technologies du web sémantique (e.g. triplets sujet, prédicat, objet, ontologies) pour interpréter les données entrantes.

Les modèles prédictifs et les connaissances formalisées constituent les éléments à partir desquelles les données collectées sont traduites en actions simulant un comportement intelligent dans l'environnement ❸ (Qin et al., 2016). De cette façon, les modèles élaborés par apprentissage sont un moyen pour saisir le contexte afin d'adapter les actions. En outre, le couplage des objets connectés avec des modèles de vision artificielle et de traitement du langage naturel permet d'augmenter les objets connectés avec de nouvelles fonctions. Ainsi, un objet connecté peut intégrer des fonctions basées sur la reconnaissance d'objets ou de visages, sur la reconnaissance de voix, pour traduire des textes ou encore dialoguer avec l'utilisateur.

Il est à noter que l'étape de traitement et d'analyse des données a lieu à différents endroits selon l'architecture de l'écosystème d'IdO déployé (voir la section 3.2.1 sur l'organisation fonctionnelle de l'IdO). En effet, après captation, les données peuvent être transmises et centralisées dans une plateforme située dans le *cloud*. Ou bien, selon un modèle de *edge computing*, tout ou une partie des données sont traitées à la périphérie du réseau, c'est-à-dire au plus proche du capteur (les données sont, par exemple, traitées directement par l'objet connecté intégrant le capteur).

Selon nous, l'une des problématiques posées par le couplage objet connecté / SIA réside dans l'encapsulation des connaissances et des modèles prédictifs [10]. Ces derniers ne sont pas directement accessibles à l'utilisateur ; il perçoit seulement le résultat de leur application. Pour l'utilisateur, l'interprétation des données apparaît uniquement sous la forme d'instructions

10. L'encapsulation est un terme emprunté à la programmation informatique où elle désigne un principe visant à masquer les données brutes afin de les protéger. Suivant ce principe d'encapsulation, les données et les fonctions d'un programme sont regroupées pour former un ensemble opaque (*black box*), dont on ne peut pas connaître le fonctionnement interne, mais avec lequel il est possible d'interagir à travers son interface.

ou d'actions, selon les fonctionnalités de l'objet connecté. Cela peut être une alerte médicale, des prédictions sur les rendements agricoles ou des directives pour adapter le trafic routier d'une ville compte tenu du taux de pollution.

Il nous semble que l'encapsulation des connaissances accentue le rôle de « prothèses cognitives » des OC qui accompagnent et épaulent les individus à chaque instant (Derian, 2018) (voir la section 3.3.2 pour plus de détails). Parce qu'ils manipulent des connaissances, les OC permettent d'externaliser des tâches cognitives ce qui se traduit par une perte au niveau des connaissances pour les usagers. Cependant, nous pensons que les connaissances encapsulées dans les objets connectés peuvent servir pour l'apprentissage humain en apportant des informations sur l'environnement.

Pervasivité

La Pervasivité, quatrième dimension de notre modèle DIAP, correspond à l'un des effets produits par le développement de l'IdO et la multiplication d'objets connectés dans l'environnement quotidien.

Dans le domaine des TIC, la pervasivité et l'ubiquité sont des termes fréquemment employés indifféremment pour désigner la présence croissante des technologies dans nos sociétés, en particulier à cause de leur fusion avec les objets du quotidien (Nieuwdorp, 2007). En section 3.1.2, nous avons vu que ces termes ont été utilisés dans les années 1990 lors du développement de l'informatique ubiquitaire de Weiser ou de ce que IBM appelait l'informatique pervasive. Nous renvoyons le lecteur à la section 3.1.2 du chapitre 3 pour plus de détails sur les distinctions sémantiques entre les deux termes.

Dans le contexte de notre modèle DIAP, nous employons le terme de pervasivité au sens de « s'insinuer », pour désigner l'envahissement croissant des TIC dans tous les aspects de la vie quotidienne. Cet envahissement s'accentue avec le développement de l'IdO, car il se traduit par l'intégration croissante des TIC dans les objets du quotidien. Transformés en objets connectés, ils tendent à réduire les contraintes d'accès à l'information en termes de temps, d'espace, de support et de contenu. Cet effet se rapproche de l'acronyme ATAWADAC que nous avons présenté dans la section 2.2.3 portant sur l'apprentissage mobile. Nous considérons que la pervasivité produite par les objets connectés comporte trois facettes :

— la mobilité : l'IdO s'inscrit dans la suite de l'informatique mobile de par l'amélioration des performances matérielles et la diversification des supports d'information. En effet, nous avons vu en section 3.1.3 que parmi les facteurs de développement de l'IdO figurent des avancées techniques pour les appareils mobiles : bande passante, puissante de calcul, mémoire, technologies de communication sans fil, etc. Ces performances matérielles étendent le champ des activités possibles en mobilité. D'autre part, les supports mobiles ne sont plus uniquement les tablettes et les smartphones, mais, par exemple, des bracelets, des montres, des tables ou encore des miroirs connectés ;

— la continuité : de l'expérience utilisateur à travers les différents supports d'information. Le *cloud computing* permet la synchronisation des données de façon à réduire les coupures informationnelles entre les différents supports. Ce faisant, un utilisateur peut débuter une tâche sur sa montre, la poursuivre sur son smartphone et la terminer sur son ordinateur portable ;

— le contexte : les capteurs des objets connectés, à l'exemple du GPS, et la multiplication des technologies de communication permettent de collecter des données sur le contexte de l'utilisateur (e.g. lieux, conditions physiques) et de distribuer des informations contextuelles.

La pervasivité des objets connectés ainsi que la collecte et les échanges de données qui en découlent mettent en évidence un point critique : la sécurité des données, du réseau sur lequel elles transitent ainsi que des systèmes informatiques qui les traitent. Comme nous l'avons vu la sécurité est l'un des défis du développement de l'IdO (voir section 3.3.2, car les objets connectés collectent des données sensibles et intimes (e.g. activité physique, personnes rencontrées) qui peuvent donner lieu à des discriminations et plus généralement porté atteinte à la vie privée des individus.

4.1.3 Utilisation du modèle DIAP

Initialement, les quatre dimensions du modèle DIAP ont été formulées pour délimiter notre objet de recherche en facilitant l'identification de dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés. Ce travail d'identification vise à cerner les spécificités des objets connectés et leurs articulations possibles avec les mécanismes de l'apprentissage pour stimulé la construction des connaissances.

Néanmoins, avant de décrire comment nous avons utilisé le modèle DIAP, nous souhaitons montrer qu'il peut être utilisé en dehors du cadre de notre recherche. En effet, les quatre dimensions du modèle ont été formulées en observant les objets connectés et les applications existantes de l'IdO, par conséquent, elles peuvent rendre compte des usages des objets connectés dans d'autres domaines que celui de l'apprentissage. Dans les paragraphes suivants, nous présentons un exemple d'utilisation du modèle DIAP pour mettre en perspective les applications et des services portées par les objets connectés dans le domaine de la santé que nous avons présenté en section 3.3.1.

Exemple du suivi médical

La santé, la médecine et le bien-être font partie des domaines les plus touchés par le développement de l'IdO (voir section 3.3.1). La médecine contemporaine est centrée sur la guérison des patients après avoir identifié et qualifié les symptômes d'une maladie ainsi que préconisé des soins qui sont, d'une manière générale, indifférenciés selon les individus. Cependant, le développement des TIC, notamment avec la multiplication d'objets connectés pour la santé et le bien-être, favorise une médecine davantage portée sur la prédiction des risques et sur la personnalisation des soins (Zerhouni, 2013 ; Roxin & Bouchereau, 2017b). Ainsi, l'on peut résumer le changement de la manière suivante : *médecine + objets connectés = médecine prédictive, préventive et personnalisée*[11]. Le modèle DIAP permet d'expliciter

11. Notons que les analyses prospectivistes surenchérissent fréquemment en ajoutant des « P » pour qualifier la médecine du futur. Ainsi, « *la médecine 4P : prédictive, préventive, personnalisée, participative. Certes chaque terme est heureux en soi : . La* ***prédiction*** *se veut plus* ***personnalisée*** *par le séquençage rapide du génome de chacun, permettant une* ***prévention*** *efficace des risques dépistés. avec la* ***participation*** *du patient. Suit aussitôt la médecine 6P : en ajoutant* ***Preuves*** *(preuve du service médical rendu) et* ***Parcours*** ». Source : https://www.synmad.com/actualites/ejournal/la-medecine-4p-5p-6p-copie-du-4p-politique-ou-standardisation-des-comportements-seul-un-syndicat-fort-nous-gardera-libre.html. Consulté le 18 septembre 2020.

les usages d'objets connectés et les applications de l'IdO que recouvre cette formule.

Données. Nous avons vu que les données de l'IdO sont des paramètres environnementaux, comportementaux et physiologiques produits par des capteurs intégrés à des objets connectés. Dans le domaine de la santé, les objets connectés apportent des données sur le corps humain et produisent donc des mesures relatives au comportement et à l'état physiologique des patients (e.g. le poids, la température de la peau, le rythme cardiaque, la glycémie, l'état de fatigue, la qualité du sommeil, la tension). Ces paramètres comportementaux et physiologiques et la possibilité de les collecter pour chaque individu permettent ensuite d'adapter les soins.

Interfaces. Les interfaces de l'IdO tendent à rendre l'information numérique tangible et à l'intégrer dans les objets du quotidien et l'environnement : un bracelet, une ceinture, une balance ou un verre qui servent à la fois à mesurer un paramètre physiologique et à la visualiser. Par exemple, une ceinture connectée peut surveiller l'activité physique du porteur, en comptant le nombre de pas quotidien, et l'informer *via* des vibrations si l'activité physique n'est pas suffisante [12]. Dans ce cas, l'information (le niveau d'activité physique) est rendue tangible (vibrations) par la ceinture qui à la fois mesure et informe.

Agents. Les agents intégrés dans les objets connectés permettent de transformer les données issues des capteurs en informations puis en connaissances pour agir dans l'environnement. Les données sur l'état physiologique du patient sont traitées et analysées par un modèle prédictif permettant d'en extraire des informations liées à la santé du patient. Ces informations peuvent être un diagnostic médical, l'identification des signes avant-coureurs d'une maladie ou l'anticipation de risques. À partir de ces informations, des actions sont prises : un objet connecté peut notifier des conseils ou envoyer une alerte à un médecin, par exemple.

Pervasivité. La pervasivité des objets connectés réduit les contraintes d'accès à l'information en termes de temps, d'espace, de format et d'appareil. Jusqu'ici, nous avons dit que les données sont générées par des capteurs, traitées et analysées par des agents puis rendues accessibles et visibles à l'utilisateur *via* une interface. La pervasivité permet de visualiser les données décrivant l'état physiologique du patient à distance et depuis un autre appareil que l'objet connecté d'origine. Ainsi, le patient peut consulter sur son téléphone portable ses données de santé générées par l'un de ses objets connectés tandis que le médecin peut suivre à distance l'évolution des paramètres physiologiques du patient.

À travers ces descriptions, nous voyons que les quatre dimensions du modèle DIAP rendent compte des facteurs à l'origine de la formule : *médecine + objets connectés = médecine prédictive, préventive et personnalisée*. Cependant, il ne s'agit que des possibilités techniques et les effets sociaux, éthiques, politiques et économiques restent à interroger [13]. On peut par exemple inférer que la collecte massive de données sur l'état de santé des indi-

12. Source : https://www.objetconnecte.net/inie-ceinture-intelligente-prend-soin-de-sante/. Consulté le 15 mai 2020.

13. Ajoutons est que cette interrogation d'autant plus nécessaire en cette période de pandémie de Covid-19, car « *La peur et le doute de l'arrivée d'une Épidémie inconnue risque de faire gober le concept Médecine 4P, 5P, 6P, avec enthousiasme par nos parlementaires ! Toutes les dictatures sont des modélisations de comportement nées dans des moments d'incertitude. Elles réussissent facilement à convaincre ; nous savons que les comportements humains sont prévisibles en ces périodes de craintes. C'est pourquoi il faut aborder cette gestion des données avec la conviction que à chaque instant tout peut (et tout doit) être remis en question. Le doute reste le meilleur pacte avec la liberté* ». Source : https://www.synmad.com/actualites/ejournal/la-medecine-4p-5p-6p-copie-du-4p-politique-ou-standardisation-des-comportements-seul-un-syndicat-fort-nous-gardera-libre.html. Consulté le 6 septembre 2020.

vidus n'est pas sans poser des questions sur la vie privée et sur les modalités d'accès à ces données. La récupération des données par les assurances santé peut introduire une différenciation des individus en termes d'accès à l'assurance, de conditions tarifaires et affecter le droit à la protection de la santé (Del Sol, 2020).

Dans les sections suivantes, nous décrivons l'utilisation du modèle DIAP afin de répondre à notre problématique de recherche.

4.2 Analyse de l'apprentissage avec le modèle DIAP

Le modèle DIAP que nous venons de présenter définit quatre dimensions (Données, Interfaces, Agents et Pervasivité) permettant de déterminer notre objet de recherche et distinguer les dispositifs d'apprentissage qui relèvent ou non de l'IdO. En accord avec notre problématique de recherche, nous nous sommes appuyés sur le modèle DIAP pour identifier les dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés dans la littérature sur les technologies éducatives. L'objectif était de répertorier et d'analyser au sein de ces dispositifs existants, la manière dont les spécificités des objets connectés sont articulées avec le processus et les mécanismes d'apprentissage. Ce travail s'est concrétisé d'abord sous la forme d'une classification des dispositifs d'apprentissage dont chaque catégorie correspond à une utilisation particulière des spécificités des objets connectés [14]. Finalement, l'analyse des différentes catégories a permis de mettre en évidence des caractéristiques de l'apprentissage avec les objets connectés.

La Figure 4.5 présente les différentes phases de la méthode que nous avons suivie : 1) exploration de la littérature et création d'un corpus à l'aide du modèle DIAP, 2) classement des dispositifs d'apprentissage et 3) analyse des dispositifs et synthèse des caractéristiques de l'apprentissage avec les objets connectés.

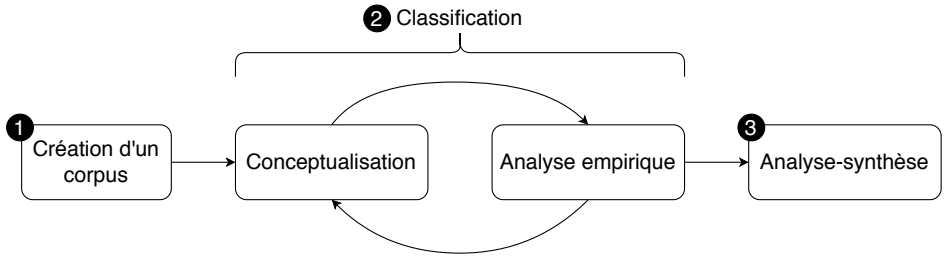


FIGURE 4.5 – **Méthode pour caractériser l'apprentissage dans le contexte de l'IdO.**

En phase 1, un corpus de dispositifs d'apprentissage basé sur l'IdO a été créé en explorant la littérature scientifique. Parmi les publications identifiées, il s'agit majoritairement de travaux d'ingénierie décrivant un dispositif d'apprentissage, sa conception et/ou son évaluation avec des apprenants. Le corpus initial était composé de 35 publications, datant de 2009 à 2017, puis il a été enrichi progressivement pour atteindre 79 publications sur la période 2005-2019 [15].

14. Si la catégorisation est un processus cognitif fondamental pour la perception de l'environnement (voir section 2.1.1), elle sert également la recherche. Coenen-Huther (2007) note que « *Tout projet scientifique se fonde sur des opérations de classification plus ou moins élaborées* » (Coenen-Huther, 2007, para. 1).

15. Pour construire le corpus, nous avons principalement interrogé les bases de publications scientifiques ACM, ScienceDirect et Google Scholar. Les requêtes de recherche ont été formulées en combinant des mots

Lors de la phase ❷, les dispositifs d'apprentissage du corpus initial ont été classés selon leur utilisation des objets connectés.

Il nous semble pertinent de rappeler que la recherche scientifique produit principalement deux types de classifications (Bailey, 1994 ; Coenen-Huther, 2007) : la typologie et la taxonomie. À ces deux types de classification correspondent les deux mouvements de pensée constitutifs de la méthode scientifique que sont la déduction et l'induction (Bailey, 1994). La typologie relève d'une démarche déductive, c'est-à-dire partant de concepts généraux pour expliquer des éléments spécifiques du réel (Bailey, 1994 ; Coenen-Huther, 2007). La taxonomie (ou taxinomie) est le fruit d'une démarche inductive où le chercheur part d'exemples du réel pour établir des principaux généraux (Bailey, 1994 ; Silva, 2014) [16]. En d'autres termes, l'élaboration d'une typologie repose sur un effort de conceptualisation tandis que la taxonomie fait appel à l'analyse empirique.

La classification que nous avons élaborée à partir du corpus de dispositifs d'apprentissage combine la conceptualisation et l'analyse empirique. Nous avons emprunté cette approche à la méthode développement de taxonomie proposée par Nickerson, Varshney, et Muntermann (2013). La méthode des auteurs permet deux approches pour catégoriser un nouvel objet ou, dans notre cas, un dispositif d'apprentissage basé sur l'IdO :

— selon une approche *bottom-up*, une catégorie est créée par induction en identifiant les similitudes entre des objets ; puis, une dimension est créée en regroupant plusieurs catégories avec des caractéristiques similaires ;

— selon une approche *top-down*, une dimension comprenant une ou plusieurs est créée par déduction ; ensuite, les caractéristiques des objets sont examinées au regard de cette nouvelle dimension et de ses catégories.

Bien qu'elle emprunte explicitement un élément méthodologique propre à la taxonomie, notre objectif n'est pas d'établir une taxonomie des usages éducatifs des objets connectés, mais d'obtenir des catégories rendant compte de l'existant. La classification n'est pas pour nous une finalité en soi, mais un outil intermédiaire pour avancer par rapport à notre problématique de recherche.

Selon l'approche *top-down*, les dispositifs d'apprentissage ont d'abord été triés selon la dimension du modèle DIAP sur laquelle ils s'appuient : au sein du dispositif d'apprentissage, les objets connectés sont utilisés pour leur dimension Données, Interfaces, Agents ou Pervasivité ? Une fois les dispositifs associés à une des quatre dimensions, nous avons suivis l'approche *bottom-up* en regroupant les dispositifs en fonction de leurs similitudes. Ainsi, la classification finale comporte deux niveaux : le premier est déterminé par les dimensions du modèle DIAP tandis que le second niveau correspond aux similitudes entre les dispositifs d'une même dimension [17].

clés relatifs à l'apprentissage et à l'IdO, majoritairement en anglais. Les mots clés portant sur l'apprentissage ont été, par exemple, « apprentissage », « éducation », « étudiants », « e-learning », « learning environment » ou encore « learning experience ». Quant à l'IdO, tel que décrit par le modèle DIAP, il s'agissait, par exemple, de « internet of things », « smart devices », « sensor », « tangible », « BYOD », « mobile » ou encore « seamless environment ». Les publications obtenues ont ensuite été analysées et filtrées en utilisant le modèle DIAP pour déterminer si elles portaient ou non sur l'IdO.

16. La taxonomie a d'abord été une branche des sciences naturelles visant à décrire et classer les organismes vivants afin d'établir leurs relations. Ce mode classificatoire a ensuite été repris plus largement en sciences humaines et sociales (Coenen-Huther, 2007).

17. Le lecteur pourra trouver des différences entre les intitulés des catégories présentées dans ce manuscrit

La phase ❸ a consisté en l'analyse des ancrages théoriques mobilisés par les auteurs des dispositifs d'apprentissage ainsi que des stratégies d'apprentissage mises en place. À partir de cette analyse, nous avons identifié plusieurs points communs parmi les différentes catégories de dispositifs permettant de dégager les principales caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'IdO.

Les sections suivantes décrivent les différentes catégories de notre classification. Il est à noter que les catégories n'étant pas mutuellement exclusives, des dispositifs d'apprentissage peuvent entrer dans plusieurs catégories.

4.2.1 Apprendre avec les données

Les données de l'IdO, nous l'avons vu, sont majoritairement des paramètres environnementaux, comportementaux et physiologiques. Ces paramètres sont exploités dans des dispositifs d'apprentissage de deux façons : soit pour observer le monde, soit pour suivre les activités de l'apprenant.

Observation de l'environnement

Les dispositifs d'apprentissage de cette première catégorie utilisent les données comme objets d'apprentissage pour découvrir et observer des phénomènes dans l'environnement. À l'instar des smartphones, des montres et des tablettes, les objets connectés disposent de capteurs qui mettent en données l'environnement.

Avant de servir la démarche expérimentale dans le cadre de la formation aux sciences, les objets connectés sont utilisés pour mener des enquêtes. Plusieurs travaux s'appuient sur la possibilité de collecter des données avec l'objet connecté pour mettre en place une stratégie d'apprentissage par l'investigation. Une question ou un problème est posé aux apprenants qui apportent ensuite une réponse en collectant des données particulières sur l'environnement. Les données collectées sont ensuite comparées et discutées entre les apprenants et avec l'enseignant afin d'apporter une réponse à la question ou au problème initiale. Ces données peuvent être des photos, des vidéos, des sons, mais aussi des paramètres environnementaux mesurés par des capteurs tels que l'accéléromètre, le thermomètre, le gyroscope ou le magnétomètre.

Le projet *Internet of School Things* initié en 2013 et impliquant plusieurs écoles britanniques[18] est un exemple représentatif de l'utilisation des objets connectés pour observer le monde. *Internet of School Things* propose aux élèves des kits pour collecter des données telles qu'une station météo connectée pour étudier les saisons. Dans le cadre de ce projet, Joyce et ses collègues (Joyce et al., 2014 ; Joyce, 2014) ont élaboré une activité d'apprentissage par l'investigation. Pour réfléchir à la pollution dans les villes, des élèves ont été amenés à utiliser leurs smartphones pour documenter, en prenant des photos, ce qu'ils jugeaient être des traces de pollution urbaine.

Les études de Putjorn (Putjorn, Ang, & Farzin, 2015 ; Putjorn et al., 2018) illustrent aussi l'utilisation des objets connectés pour mener des investigations en lien avec l'environnement.

et ceux de nos publications (voir Bouchereau, 2018 ; Bouchereau & Roxin, 2018, 2019). Ces différences ne tiennent pas à l'évolution du contenu des catégories, mais reflètent une volonté de clarifier leur présentation.

18. Le projet semble avoir été arrêté depuis et son site web, encore accessible en 2019, n'existe désormais plus. Cependant, une archive du site est encore disponible ici : https://web.archive.org/web/20191115120132/http://iotschool.org/. Consulté le 30 mai 2020.

FIGURE 4.6 – **Dispositif OBSY**. Collecte de données sur le développement des plantes et visualisation des résultats sur une tablette (Putjorn et al., 2018).

Putjorn et al. (2015) ont développé un dispositif d'apprentissage composé d'un objet intégrant des capteurs (nommé OBSY pour *Observation learning System*) et d'une application mobile pour visualiser et interagir avec les données collectées (voir Figure 4.6). OBSY dispose d'une caméra et collecte des données liées au développement des plantes : température, humidité du sol, luminosité. Putjorn et al. (2018) ont comparé les effets du dispositif sur la qualité de l'apprentissage et le niveau d'engagement *via* une expérience contrôlée auprès de 244 élèves de CE2 en Thaïlande. Les élèves ont effectué trois activités d'apprentissage scientifique, dont deux, selon la stratégie d'apprentissage par investigation. Dans un cas, les élèves devaient déterminer comment et dans quelles conditions la moisissure évolue et dans l'autre, ils devaient identifier les facteurs influençant la croissance des champignons. Les élèves pouvaient mener librement des observations et des expérimentations, mais leurs réflexions et découvertes étaient discutées avec un enseignant à intervalle régulier.

Après les activités d'apprentissage, pour évaluer leurs connaissances les élèves ont réalisé une carte conceptuelle et pour évaluer l'engagement, ils ont rempli un questionnaire. Les résultats montrent que le dispositif d'apprentissage a permis un meilleur apprentissage et a eu un effet positif sur l'engagement des élèves. Les auteurs expliquent ces effets positifs par le fait que les élèves ont pu observer en temps réel, et de manière concrète, l'évolution des plantes et constater rapidement les conséquences de leurs expériences. Nous pouvons relier ces explications à deux facteurs favorisant l'apprentissage présenté dans le premier chapitre : le retour sur erreur (voir section 1.1.2) et la cognition incarnée (voir section 1.2.3). D'une part, le dispositif fournit à l'élève un moyen pour observer les conséquences de ses actions et, d'autre part, les manipulations (lorsque l'élève effectue une expérimentation) favoriseraient l'apprentissage (Castro-Alonso et al., 2019).

D'autres travaux utilisent les objets connectés pour remplacer les instruments de mesure habituellement utilisés dans les formations scientifiques, principalement en physique, et ainsi individualiser la réalisation des expériences [19]. Ces travaux montrent que les objets connectés fournissent des mesures précises et utilisables dans un cadre pédagogique (Castro-Palacio et al., 2012 ; Chevrier et al., 2013 ; Dyer, 2018 ; Hirth, Kuhn, & Müller, 2015). Le capteur

19. Dans certains cas, les objets connectés sont utilisés pour ajouter des activités pratiques et expérimentales à des dispositifs d'apprentissage à distance. En 2016, Chevrier organisait le MOOC *Smartphone Pocket Lab : Expérimental Classical Mechanics* où les participants devaient réaliser des expériences de mécanismes classiques avec leurs smartphones et tablettes. Source : https://www.fun-mooc.fr/courses/parisdescartes/70003/session01/about. Consulté le 30 mai 2020.

de luminosité ambiante, permettant d'ajuster l'éclairage de l'écran, est utilisé pour calculer la vitesse de la lumière (Kapucu, 2017). Le microphone est utilisé pour mettre en évidence l'effet Doppler (Klein et al., 2014), c'est-à-dire la variation des fréquences sonores lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur change. La caméra du smartphone est transformée en microscope grâce à une goutte d'eau déposée sur l'objectif [20]. La fréquence d'acquisition des images de la caméra peut aussi être augmentée pour faciliter l'observation de phénomènes rapides au ralenti (e.g. impact d'une goutte d'eau sur une surface) (Dillavou, Rubinstein, & Kolinski, 2019) [21].

Bouquet et al. (2019) rapportent comment des microcontrôleurs Arduino ont été utilisés par leurs étudiants pour expérimenter en dehors de la salle de classe. Les étudiants, en seconde année d'une filière scientifique, devaient réaliser trois études : sur les oscillations mécaniques (accéléromètre), la transmission de la lumière (capteur de luminosité), la déformation d'une règle (capteur à effet Hall) et la perte de chaleur (thermomètre). L'objectif était de contextualiser certains concepts et de familiariser les étudiants avec la prise de mesures, la calibration et la représentation graphique. Il s'agit d'un apprentissage situé où les apprenants collectent des données authentiques à l'aide d'objets connectés et de microcontrôleurs et interprètent les données à l'aune des théories scientifiques présentées dans leur formation scientifique.

Cette approche est motivée par le coût des appareils, qu'il s'agisse de microcontrôleurs ou de smartphones, et contextualise les concepts enseignés (Chevrier, 2016). Le coût et le taux d'équipement en smartphone des apprenants permettent d'individualiser la réalisation des expériences et chaque étudiant a ainsi facilement à disposition un instrument de mesure qu'il connaît bien. L'expérimentation en dehors des murs laisse plus de temps avec l'enseignant pour discuter des mesures collectées et de leurs interprétations, notamment pour évoquer les problèmes liés à l'incertitude des mesures [22] (González & González, 2016).

Dans une configuration inverse, les technologies de l'IdO sont aussi utilisées pour créer un accès à distance aux instruments scientifiques d'un laboratoire physique (Mershad et al., 2020). Depuis un terminal relié à internet, les étudiants accèdent à un environnement virtuel où ils visualisent les mesures prises par les instruments d'un laboratoire physique, envoient des instructions et observent les effets de leur manipulation (Mehmood et al., 2017). Par exemple, Ali et al. (2017) proposent la plateforme IoTFLiP (*IoT-based flipper learning platform*) pour mettre à disposition d'étudiants en médecine des données de patients réels afin qu'ils puissent s'exercer. Ainsi, les étudiants ont accès à des cas authentiques et bénéficient des retours des médecins. Mershad et al. (2020) ont réalisé *LearnSmart*, un dispositif d'apprentissage similaire dont l'objectif est d'intégrer des activités d'expérimentation en chimie dans une plateforme LMS Moodle. Depuis cette dernière, les étudiants peuvent contrôler

20. Source : https://www.pourlascience.fr/sr/idees-physique/comment-transformer-votre-smartphone-en-microscope-14556.php. Consulté le 30 mai 2020.

21. Les techniques pour visualiser au ralenti ou image par image des mouvements sont à l'origine de découvertes scientifiques. En 1878, Muybridge rend compte grâce à la chronophotographie, une technique qu'il a inventée consistant à prendre une succession de photographies, des mouvements successifs du cheval au galop. Source : https://petitegalerie.louvre.fr/oeuvre/cheval-au-galop. Consulté le 30 mai 2020.

22. Selon le Bureau international des poids et des mesures, l'incertitude des mesures est le « *paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande* ». Les causes de l'incertitude peuvent être une mauvaise calibration, un défaut dans l'instrument de mesure ou dans la méthode. Source : https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_F.pdf. Consulté le 2 juin 2020.

les instruments scientifiques d'un laboratoire à distance (e.g. bras robotique, microscope, oscilloscope) pour conduire une expérimentation et récupérer les données générées pour les analyser.

Ces études montrent que les dispositifs de la catégorie « Observation de l'environnement » exploitent les données des objets connectés comme objet d'apprentissage. L'apprenant est amené à explorer l'environnement pour collecter des données, à utiliser son objet connecté comme instrument de mesure et à interpréter des données authentiques. Étant donné le manque de données empiriques, il est difficile de statuer sur les effets de ces dispositifs en termes d'apprentissage. Néanmoins, nous notons un inconvénient notable et commun à ces dispositifs : l'apprentissage repose sur la capacité de l'apprenant à interpréter les données, ce qui peut être la source de difficultés (Putjorn et al., 2015). Par conséquent, ces dispositifs ne peuvent convenir à tous les profils d'apprenant et l'interprétation doit être guidée (pour lire les graphiques, par exemple).

Suivi de l'apprenant

Quand les données des objets connectés ne sont pas utilisées comme objet d'apprentissage, celles-ci sont exploitées par des dispositifs de suivi de l'apprenant. Historiquement, les dispositifs d'apprentissage en ligne tels que les LMS, les ITS ou les MOOC collectent des données sur l'apprenant lors de ses activités et interactions directes avec le dispositif. Ces traces numériques sont ensuite utilisées pour construire et affiner le profil de l'apprenant, évaluer son processus d'apprentissage et, *in fine*, adapter les recommandations de ressources d'apprentissage. À l'instar du smartphone, les objets connectés accompagnent les individus au quotidien et fournissent ainsi un autre type de données : les traces des activités informelles, des actions et des déplacements de l'apprenant. Les objets connectés peuvent enregistrer des traces des déplacements et des activités informelles de l'apprenant tels que : assister à une conférence, visionner un documentaire, discuter avec un expert, etc. Ces activités informelles contribuent à l'apprentissage et sont donc utiles pour affiner le profil de l'apprenant et adapter l'apprentissage. Ainsi, les données de l'IdO permettent d'étendre le suivi de l'apprenant au-delà des cadres formels créé en ligne par les dispositifs d'apprentissage.

Stapic, Mihaljinac, et Džeko (2019) présentent une architecture pour collecter des données dans les environnements d'apprentissage (e.g. salle de classe, bibliothèque), en particulier les entrées et sorties des apprenants dans une salle ou les conditions de cette salle (e.g. température, luminosité). D'autres travaux comme ceux de Marquez et al. (2016) cherchent à agréger les données générées par les interactions avec d'autres objets connectés pour améliorer le suivi du processus d'apprentissage de l'apprenant. En ce sens, Marquez et al. (2016) proposent une architecture pour intégrer les données des objets connectés dans les traces numériques enregistrées par un LMS. Selon les auteurs, cette architecture permettrait aux enseignants de suivre les activités menées par les étudiants dans le cadre de travaux pratiques conduits en laboratoire ainsi que les informations consultées par l'apprenant. Avec le même objectif d'extraire davantage d'informations sur le comportement de l'apprenant et l'état de son processus d'apprentissage, Njeru, Omar, et Yi (2017) proposent de coupler un MOOC avec un réseau de capteurs. L'objectif, pour les auteurs, est de mieux comprendre les scénarios d'apprentissage suivi par les apprenants sur ces plateformes.

Cheng et Liao (2012) proposent un dispositif d'apprentissage fournissant des recommandations aux étudiants et aux enseignants. Pour cela, le dispositif s'appuie sur les données générées par les apprenants lorsqu'ils interagissent avec les ressources d'apprentissage, mais également lorsqu'ils utilisent des objets présents dans leur établissement d'enseignement (e.g. imprimante, appareils mobiles, bibliothèque). L'hypothèse que font les auteurs est que les données apportées par les objets connectés permettront d'affiner les recommandations.

Toutefois, cette catégorie de dispositif soulève des problématiques liées à la protection de la vie privée et à sécurité des données sensibles collectées. Cet aspect est d'autant plus saillant, car les dispositifs de suivi de l'apprenant s'inscrivent dans la tendance plus large des « campus connectés » (Sutjarittham et al., 2019). Les « campus connectés » impliquent la collecte de données des activités d'apprentissage de circulation et d'occupation des salles d'enseignement afin de rationaliser les ressources du campus et de les adapter aux usagers [23].

Dans cette section, nous avons vu que les données générées par les objets connectés sont utilisées en tant qu'objet d'apprentissage, pour observer l'environnement, et pour étendre le suivi de l'apprenant à ses activités informelles. Dans la section suivante, nous décrivons comment la dimension Interfaces du modèle DIAP est utilisée dans le cadre de dispositif d'apprentissage avec des objets connectés.

4.2.2 Apprendre avec les interfaces

Dans le contexte de l'IdO, les interfaces humain-machine sont dites naturelles et tendent à rapprocher le moyen de contrôle de l'information de sa représentation. Pour l'apprentissage, ces interfaces sont utilisées soient pour donner une forme concrète et palpable aux concepts à apprendre soient pour rendre l'environnement interactif.

Manipulation d'objets

Cette première catégorie comprend les dispositifs faisant reposer l'apprentissage sur des interfaces tangibles et surfaciques. Selon la dimension Interfaces, nous avons vu que les modes d'interaction évoluent avec les objets connectés : il ne s'agit plus simplement de pointer ou de taper au clavier, mais de manipuler et de bouger des objets ayant des capacités de calcul et de communication (So et al., 2018 ; Resnick et al., 1998).

Les dispositifs d'apprentissage basé sur des interfaces tangibles et surfaciques concrétisent la théorie constructiviste de l'apprentissage (voir section 1.2.1). L'apprenant est actif, avec un certain degré d'autonomie, il doit manipuler des objets dans le cadre d'un jeu, pour résoudre un problème ou pour répondre à des questions et, *in fine*, construire ses connaissances. C'est plus particulièrement l'engagement physique qui est recherché dans l'activité de l'apprenant. En effet, les chercheurs ayant conçu des dispositifs basés sur des interfaces tangibles s'appuient, explicitement ou non, sur la théorie de la cognition incarnée postulant le rôle clé des fonctions sensori-motrices dans la cognition et donc, pour le traitement des informations

23. Notons que cette vision du campus connecté est davantage présente dans les universités américaines et britanniques. En France, en mai 2019, la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a annoncé un plan « campus connectés », mais dont le but est principalement l'enseignement à distance. Sources : https://www.theguardian.com/education/2019/feb/22/are-university-campuses-turning-into-mini-smart-cities, www.leparisien.fr/societe/frederique-vidal-nous-allons-ouvrir-13-campus-connectes-a-la-rentree-02-05-2019-8064648.php. Consulté le 6 juin 2020.

et la construction des connaissances (voir section 1.2.3). Ainsi, les dispositifs d'apprentissage conduisent l'apprenant à bouger et à manipuler des objets en lien avec des objectifs d'apprentissage.

Ces objets sont conçus pour donner une forme concrète et palpable à des concepts abstraits, tel qu'il en existe en mathématiques (Urrutia, Loyola, & Marín, 2019). La forme de l'objet tangible est une représentation du concept abstrait qui est actualisée en fonction des manipulations effectuées par l'apprenant (So et al., 2018). De cette façon, l'apprenant peut observer en temps réel les conséquences de ses actions sur l'objet. Lorsque nous avons détaillé les mécanismes d'apprentissage du cerveau, nous avons montré que le retour sur erreur après une action fait partie des piliers de l'apprentissage (Dehaene, 2018) (voir section 1.1.2). Les interfaces tangibles, et plus généralement l'intégration de TIC dans des objets physiques, étendent les possibilités de retour sur erreur lors de l'apprentissage, que ce soit par le biais de sons, de signaux lumineux, de réponses haptiques ou par le biais de contraintes matérielles.

Le dispositif d'apprentissage créé par Urrutia et al. (2019) s'appuie sur la théorie de la cognition incarnée pour faciliter l'apprentissage de concepts de la trigonométrie. Les auteurs évaluent un dispositif composé d'une interface surfacique représentant des informations numériques que l'apprenant peut contrôler par le biais d'objets tangibles (voir Figure 4.7). Selon Urrutia et al. (2019), l'exploration des concepts de la trigonométrie en manipulant des objets physiques favorise la construction du sens associé aux concepts. L'évaluation post-utilisation par 24 étudiants d'écoles en Design et Ingénierie (*Design and Engineering School*) suggère que le dispositif permet une meilleure compréhension des concepts de la trigonométrie.

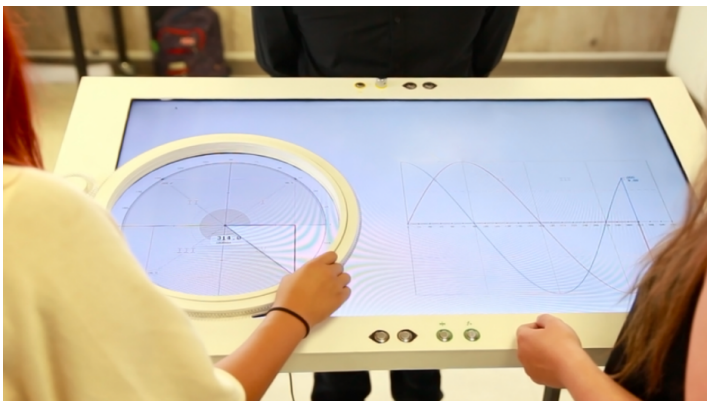


FIGURE 4.7 – **Dispositif avec objets tangibles pour l'apprentissage de la trigonométrie** (Urrutia, Loyola, & Marín, 2019)

Une partie des dispositifs classés dans la catégorie « Manipulation d'objets » sont conçus pour favoriser la collaboration entre les apprenants, en présentiel, ce qui rejoint la théorie socioconstructiviste de l'apprentissage. Les apprenants participent collectivement à un jeu, à la résolution d'un problème ou à la construction de *quelque chose* ; les connaissances étant alors le fruit des interactions entre les apprenants.

L'étude de Kubicki et al. (2016) propose un dispositif combinant une table interactive avec des objets tangibles pour développer les capacités de raisonnement spatial chez les jeunes enfants. Le dispositif reproduit les éléments d'un jeu habituellement proposé aux élèves par les enseignants en mathématiques afin de les faire travailler en petits groupes. Kubicki et al. (2016) ont étudié l'activité physique et verbale d'élèves en Classe préparatoire lorsqu'ils

participaient au jeu. Les résultats obtenus par les auteurs montrent que le dispositif avec des objets tangibles a eu un effet positif sur la capacité de raisonnement spatial des élèves et qu'il a favorisé la participation des élèves et leur collaboration. L'une des hypothèses avancées est que les dispositifs basés sur des interfaces tangibles offrent une meilleure visibilité sur les intentions et les actions des autres, car tous les apprenants sont réunis sur un même lieu physique (Garcia-Sanjuan et al., 2018).

Ces résultats ont été confirmés par plusieurs travaux, y compris sur des sujets plus complexes comme la programmation informatique. En ce sens, Marfisi-Schottman, George, et Leconte (2020) ont mené des expérimentations avec le dispositif *TurtleTable* : un jeu collaboratif destiné à l'apprentissage des bases de la programmation. Avec *TurtleTable*, les auteurs montrent que les interfaces interactives et des objets tangibles favorisent davantage la collaboration que d'autres interfaces humain-machine.

Toutefois, il faut souligner que la littérature sur l'utilisation d'interfaces tangibles pour l'apprentissage fait état d'effets hétérogènes, notamment en mathématiques (Schneider et al., 2011). Par ailleurs, comme Clements (2000), Uttal, Scudder, et DeLoache (1997) le montrent, les interfaces tangibles ont des effets limités, car les apprenants ne parviendraient pas à transférer les propriétés de l'objet physique au concept abstrait. Il n'est donc pas possible de statuer sur la cardinalité des effets des interfaces tangibles sur les performances d'apprentissage.

Environnement augmenté

Cette seconde catégorie regroupe les dispositifs d'apprentissage visant à augmenter l'environnement en associant des informations contextuelles à des objets physiques et en les rendant interactifs. Pour cela, ces dispositifs s'appuient sur des interfaces ambiantes, la réalité augmentée ainsi que sur les technologies de communication à courte portée que sont les QR code, les puces NFC et les étiquettes RFID. Avec un appareil mobile, l'apprenant peut consulter et interagir avec des informations contextuelles qui sont en lien avec une activité d'apprentissage et avec le lieu physique. Ainsi, du point de vue de l'apprenant, l'environnement est augmenté par les technologies de l'IdO.

Les QR code, les étiquettes RFID et les puces NFC, que l'on peut interroger avec des objets connectés, permettent d'intégrer des informations dans des objets et des espaces dédiés à l'apprentissage. Les dispositifs d'apprentissage que nous classons dans cette catégorie s'inscrivent, explicitement ou non, dans la théorie de l'apprentissage situé (voir section 1.3.1). La présentation des savoirs est ancrée dans un cadre authentique créant un lien direct entre l'environnement perçu par l'apprenant et les informations contextuelles transmises. Les dispositifs d'apprentissage que nous classons dans cette catégorie s'inscrivent, explicitement ou non, dans la théorie de l'apprentissage situé. La présentation des savoirs est ancrée dans des conditions authentiques créant un lien direct entre l'environnement perçu par l'apprenant et les informations contextuelles transmises.

Gómez et al. (2013) proposent un dispositif basé sur des technologies à courte portée pour transmettre des informations contextuelles aux apprenants. Lors d'un cours d'informatique, les élèves ont été amenés à découvrir les composants d'un ordinateur. Ils pouvaient manipuler les composants et interroger, à l'aide de leur smartphone, le QR code ou la puce NFC associée au composant pour avoir des informations complémentaires.

FIGURE 4.8 – **Mise en pratique du dispositif HistoNFC** (Ignacio Jimena Medina et al., 2018)

De façon similaire, I. Jimena Medina et al. (2019) ont conçu le dispositif HistoNFC destiné à aider les étudiants en histologie, une branche de la biologie spécialisée dans l'étude des tissus biologiques (voir Figure 4.8). Au cours de leur formation, les étudiants observent des tissus au microscope et apprennent à identifier les caractéristiques des tissus de différents types (e.g. estomac, intestin, muscle, œsophage). HistoNFC veut faciliter l'accès aux informations relatives aux échantillons étudiés au microscope. Pour cela, des puces NFC sont intégrées dans les lames pour microscopes manipulées par les étudiants afin qu'ils puissent avoir accès, *via* un smartphone, à des informations sur l'échantillon qu'ils sont en train d'observer (I. Jimena Medina et al., 2019).

Une autre technologie porteuse pour l'apprentissage est la réalité augmentée, qui permet d'ajouter à un objet physique une aide contextuelle en lien avec un lieu, un événement ou une tâche exécutée par l'apprenant (Kyza & Georgiou, 2019). À travers l'écran d'appareils mobiles ou de lunettes connectées, les utilisateurs voient une réalité à laquelle sont superposées des informations calculées en temps réel par un programme.

Par exemple, Di Serio, Ibáñez, et Kloos (2013) rapporte une étude sur l'utilisation de la réalité augmentée pour améliorer la motivation des étudiants dans un cours d'arts visuels. Le dispositif des auteurs consiste à apporter des informations contextuelles aux œuvres d'art visibles en réalité augmentée grâce à un smartphone. Les résultats obtenus par l'auteur par le biais d'un questionnaire font un état d'un effet positif sur la motivation et sur leur sentiment d'autonomie dans la conduite de leur apprentissage.

Les lunettes connectées sont préconisées par les chercheurs travaillant sur l'utilisation de la réalité augmentée dans le cadre des formations scientifiques, où les apprenants sont amenés à travailler dans un laboratoire (Strzys et al., 2019). De cette façon, les apprenants ont les mains libres pour mener des expérimentations tout en pouvant visualiser les informations et représentations numériques générées en réalité augmentée.

Strzys et al. (2019) proposent des lunettes connectées avec réalité augmentée pour assister l'apprenant dans ses expérimentations en superposant des informations numériques à des objets physiques. Le dispositif, Holo.lab, a été conçu pour une expérience sur la conduction thermique du métal dans le cadre d'un cours d'introduction à la thermodynamique. L'apprenant observe une tige en métal, chauffée d'un côté et refroidie de l'autre, et visualise avec les lunettes connectées les mesures de température en temps réel (Strzys et al., 2019). Les mesures de températures sont visualisées sous la forme de couleurs (e.g. rouge, bleu) apposées

sur la tige métallique.

De ces dispositifs, nous pouvons retenir que l'apprentissage repose sur des interactions avec l'environnement, comme cela est aussi le cas pour les dispositifs exploitant les Données de l'IdO. Nous retrouvons également l'idée que l'apprenant puisse observer en temps réel les conséquences de ses manipulations et expérimentations. En ce sens, les objets connectés sont utilisés pour favoriser deux piliers de l'apprentissage : l'engagement corporel et le retour sur erreur. Le lien étroit entre les objets connectés et l'environnement est également un trait caractéristique des dispositifs d'apprentissage exploitant les dimensions Agents et Pervasivité de notre modèle DIAP.

4.2.3 Apprendre avec les agents

La dimension Agents du modèle DIAP désigne la capacité des objets connectés à traiter et analyser des données pour adapter leurs actions dans et sur l'environnement. Les dispositifs d'apprentissage basé sur l'IdO exploitent la dimension Agents des objets connectés de deux façons : pour évaluer l'état psychologique de l'apprenant ou pour augmenter les objets avec lesquels l'apprenant va interagir.

État psychologique de l'apprenant

Nous avons montré dans la section 4.2.1 que les objets connectés peuvent aussi prendre en compte les activités informelles et les déplacements en dehors des LMS. Les données produites sont une représentation formelle des traces d'activités d'apprentissage et sont utilisées pour suivre l'apprenant et adapter les contenus. Dans une partie des dispositifs que nous avons identifié, le suivi de l'apprenant est enrichi par une évaluation de son état psychologique. Pour cela, ces dispositifs s'appuient sur des SIA afin de combiner et d'analyser plusieurs des paramètres comportementaux et physiologiques collectés par les capteurs d'objets connectés.

Nous avons identifié plusieurs travaux engagés dans l'élaboration de modèles prédictifs pour déterminer le niveau d'engagement de l'apprenant à partir des données d'objets connectés. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre (voir section 1.1.2), l'engagement de l'apprenant, et plus généralement son état émotionnel, est l'un des piliers de l'apprentissage (Lu et al., 2019). L'objectif des chercheurs est alors de créer un modèle pour évaluer automatiquement l'engagement afin de prendre des mesures pour ré-engager l'apprenant. Les capteurs des objets connectés tels que les montres ou les bracelets représentent un moyen non invasif que les méthodes par EEG et moins subjectif que l'évaluation par questionnaire (M. Carroll et al., 2020).

La Figure 4.9 illustre le processus d'évaluation de l'engagement à partir des objets connectés mis en place par Lu et al. (2019). Les données sont collectées à partir d'un smartphone, d'une montre ou d'un bracelet puis elles sont analysées par des modèles pour reconnaître les activités et les actions effectuées par l'apprenant (Lu et al., 2019). L'étape suivante consiste à interpréter les activités et actions effectuées par l'apprenant et à les associer avec un niveau d'engagement, le qualifier et proposer des actions afin de déclencher son ré-engagement (Lu et al., 2019).

Le travail mené par Lascio et al. (2018) s'inscrit dans la même optique, mais avec une approche différente. Les auteurs n'essaient pas de reconnaître les actions de l'apprenant,

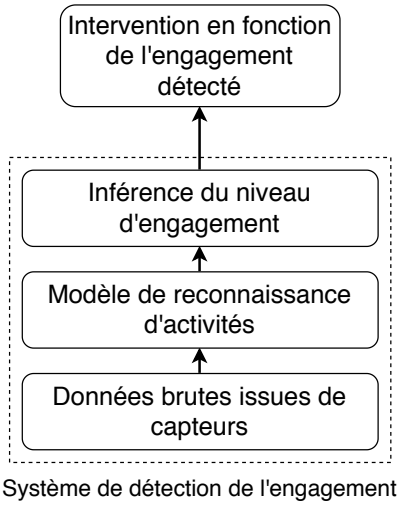


FIGURE 4.9 – **Détection de l'engagement de l'apprenant à partir de capteurs d'objets connectés.** Adapté de Lu et al. (2019).

mais d'inférer son niveau d'engagement à partir de paramètres physiologiques. Pour cela, les auteurs ont élaboré un modèle prédictif, en s'appuyant sur l'apprentissage automatique, à partir de données issues d'un bracelet connecté : pouls, accélération, température de la peau et activité électrodermale [24]. La comparaison entre les prédictions du modèle et l'évaluation subjective de l'engagement par l'apprenant montre que le modèle évalue comme *engagé* 81% des étudiants réellement engagés pendant le cours.

D'autres travaux se concentrent sur la prédiction des émotions de l'apprenant pendant l'apprentissage (e.g. la peur, la joie, la frustration, la colère) grâce à des indicateurs physiologiques et physiques (Kassab & Mazzara, 2020) : l'activité électrodermale, les variations de la fréquence cardiaque ou de la fréquence respiratoire, la température de peau ainsi que les expressions faciales, les gestes et le positionnement du corps. Ces trois derniers indicateurs sont fréquemment combinés et sont opérables simplement, grâce aux capteurs d'objets connectés (Dzedzickis, Kaklauskas, & Bucinskas, 2020) [25]. Par exemple, Kassab et Mazzara (2020) ont développé un dispositif de type LMS intégrant la reconnaissance automatique des émotions faciales de l'apprenant afin d'adapter l'apprentissage à leurs émotions. Kassab et Mazzara (2020) envisagent de combiner la reconnaissance faciale avec le suivi du rythme cardiaque et le mouvement des yeux. Car, s'il est facile de collecter les données pour la reconnaissance faciale, l'analyse demeure complexe et nécessite la prise en compte de nombreux paramètres.

En définitive, les dispositifs d'apprentissage exploitant la dimension Agents s'appuient sur des SIA pour analyser les paramètres environnementaux, comportementaux et physiologiques issus de capteurs pour évaluer l'état psychologique de l'apprenant. Les SIA sont également utilisés pour enrichir les fonctionnalités des objets connectés.

24. Lascio et al. (2018) ont utilisé le bracelet connecté E4 de Empatica. Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication d'objets connectés et de capteurs pour surveiller les paramètres physiologiques d'une personne. Source : https://www.empatica.com/research/e4/. Consulté le 28 mai 2020.

25. Par exemple, l'entreprise Affectiva propose des services de reconnaissance des émotions à partir du visage, du corps et de la voix. L'application AffdexMe permet tester les modèles de reconnaissance des émotions de l'entreprise. Source : https://www.affectiva.com/. Consulté le 3 juin 2020.

Objets augmentés

L'autre cas d'utilisation des Agents à des fins d'apprentissage est lié à l'augmentation des fonctions des objets connectés. Moins développé, ce cas d'usage consiste à intégrer dans un objet connecté des modèles de vision artificielle et/ou de traitement du langage naturel. Ainsi, la reconnaissance d'objets et de visage ou la reconnaissance de la parole sont exploitées pour créer des activités d'apprentissage, pour assister l'apprenant ou pour changer le mode d'interaction avec l'objet connecté.

Ce dernier point rejoint le principe des *Dialogue-based* ITS que nous avons présenté en section 2.3.2 : l'apprentissage s'apparente à une conversation orale ou textuelle avec un SIA. La différence réside dans le fait que le SIA est embarqué dans un objet connecté et non plus dans un logiciel ou une interface web.

L'entreprise Elemental Path a lancé en 2015 une campagne de financement, qui a abouti, pour la fabrication de CogniToy [26]. Il s'agit d'un jouet connecté sous la forme d'un dinosaure qui embarque le SIA IBM Watson. Selon cette dernière, CogniToy devrait pouvoir répondre aux questions des enfants (dans un format adapté à leur âge) et proposer des jeux éducatifs sur le vocabulaire ou les mathématiques. Notons que CogniToy et d'autres jouets connectés de ce type comportent des failles critiques menaçant la vie privée des enfants et de leurs parents. Ces failles sont dues à des négligences de la part des entreprises qui, par exemple, ne chiffrent pas les données, dont les enregistrements audio, lorsqu'elles sont transmises aux serveurs de l'entreprise [27].

De leur côté, les chercheurs Chang et al. (2020) ont développé un chapeau connecté (*smart hat*) dont l'objectif est d'aider les enfants en bas âge à reconnaître les objets qu'ils rencontrent. Lorsque l'enfant rencontre un objet, le *Smart hat* identifie l'objet et l'explique oralement à l'enfant. La reconnaissance est possible grâce à des microcontrôleurs embarqués dans le chapeau et à un programme qui implémente des modèles prédictifs pour la reconnaissance d'objets et la synthèse vocale. Ces modèles prédictifs sont créés par Google et utilisables sous la forme d'une API *via* la plateforme *Google Cloud Machine Learning*. Les auteurs envisagent d'améliorer leurs objets augmentés en permettant à l'enfant de poser des questions sur l'objet identifié.

Les chercheurs Kutafina et al. (2019) rapportent plusieurs cas de couplage entre des capteurs d'objets connectés et des SIA dans le cadre d'apprentissage d'activités manuelles et physiques. L'activité musculaire est mesurée par le biais d'une électromyographie de surface (EMG de surface) (Kutafina et al., 2019) : des capteurs sont disposés au contact de la peau entourant un muscle afin d'enregistrer l'activité électrique et nerveuse du muscle. Les mesures collectées sont ensuite analysées par un modèle prédictif pour la reconnaissance de gestes. Des chercheurs ont proposé cette méthode pour la formation aux gestes d'hygiènes des professionnels de médecine en début de carrière (Kutafina et al., 2016). L'objectif est de fournir des feedback au médecin lorsqu'il se lave les mains en comparant ses gestes et leur durée d'exécution par rapport aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé

26. Source : https://www.kickstarter.com/projects/cognitoys/cognitoys-internet-connected-smart-toys-that-learn. Consulté le 28 mai 2020.
27. Sources : https://inews.co.uk/news/easily-hacked-smart-toys-still-on-sale-a-year-after-warning-181525, https://www.consumerreports.org/privacy/test-of-connected-toys-shows-parents-should-be-cautious/. Consulté le 28 mai 2020.

(OMS). Enfin, Kutafina et al. (2019) rapportent également un projet visant à exploiter la reconnaissance de gestes pour l'apprentissage de la poterie.

Cette section a présenté deux manières dont les agents embarqués dans les objets connectés sont utilisés pour l'apprentissage. En premier lieu, les agents sont utilisés pour inférer l'état psychologique de l'apprenant à partir des données issues de capteurs d'objets connectés. En second lieu, les modèles de vision artificielle et de traitement du langage naturel permettent la création d'objets augmentés pour assister l'apprenant dans son exploration de l'environnement. Ce dernier point est l'une des facettes de la dimension Pervasivité de notre Modèle DIAP sur laquelle s'appuie les dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés.

4.2.4 Apprendre avec la pervasivité

La pervasivité, au sens où nous l'employons dans le cadre du modèle DIAP, résulte de la multiplication des objets connectés dans l'environnement ce qui tend à réduire les contraintes de temps, d'espace et de support pour accéder à l'information. Lorsque le modèle DIAP a été présenté, nous avons indiqué que la dimension Pervasivité a trois facettes : la mobilité, la continuité et le contexte (voir section 4.1.2). Conséquemment, les dispositifs d'apprentissage que nous relevé exploitent ces trois facettes pour : l'exploration de l'environnement, la persistance de l'expérience de l'apprentissage à travers les supports, ainsi que la sensibilité au contexte. Il est à noter que ces aspects sont transversaux et ils se retrouvent dans certains des dispositifs d'apprentissage précédents.

Exploration de l'environnement

La dimension Pervasivité est exploitée pour concevoir des dispositifs d'apprentissage permettant à l'apprenant d'explorer l'environnement physique, en dehors des lieux formellement dédiés à l'apprentissage.

L'exploration de l'environnement renvoie ici à une stratégie d'apprentissage actif déployée pour mettre l'apprenant en relation avec les savoirs. Selon un mode d'apprentissage par l'investigation, l'apprenant doit mener une enquête ou répondre à une question en allant chercher les informations dans un lieu donné (voir la section 1.3.1 pour plus de détails sur l'apprentissage par l'investigation). L'apprenant utilise un smartphone, une tablette ou encore des microcontrôleurs Arduino pour interagir avec certains objets de l'environnement et obtenir les informations dont il a besoin pour résoudre son enquête. Nous retrouvons par exemple cet aspect dans les dispositifs d'apprentissage de la catégorie « Observation de l'environnement », à l'exemple du projet *Internet of School Things* (Joyce et al., 2014). Les apprenants vont collecter des données dans l'environnement, en déduire des informations et avancer sur leur enquête.

MacCallum et Bell (2015) ont étudié l'utilisation faite d'objets connectés par un enseignant en jardin d'enfants et montrent qu'ils sont employés pour s'adapter aux besoins et aux intérêts des enfants. Les auteurs rapportent que l'enseignant engage les enfants dans des activités créatives basées sur des interactions avec l'environnement et à l'aide des fonctions d'objets connectés. Ainsi, l'enseignant propose à une enfant de créer un livre de photos racontant une histoire à propos des animaux présents au jardin d'enfants. À d'autres enfants,

l'enseignant proposera de créer un film vidéo dans lequel les enfants se mettent en scène pour raconter des histoires de superhéros. Ces activités font des objets connectés des outils pour explorer l'environnement et créer des expériences de vie, ce qui fait écho à la pensée du Dewey sur le rôle de l'expérience pour l'apprentissage (voir section 1.2.3).

Dans leur recherche, Kyza et Georgiou (2019) examinent les interactions entre l'apprenant et l'environnement dans le cadre d'un dispositif d'apprentissage basé sur la réalité augmentée et la localisation. Les auteurs estiment que la réalité augmentée est le support d'expériences hybrides mélangeant le monde physique et le monde numérique. Kyza et Georgiou (2019) ont conçu le dispositif *Mystery at the Lake* où, selon une stratégie d'apprentissage par l'investigation, les apprenants mènent une enquête sur le déclin de la population de canards colverts. Par groupe de deux, des élèves de collèges et de lycées ont exploré un environnement (autour d'un lac) à la recherche d'indices qu'ils pouvaient consulter sur une tablette en fonction de leur géolocalisation. L'application sur tablette associe à l'environnement perçu par les élèves des documents, des images, des diagrammes ou des vidéos. Kyza et Georgiou (2019) rapportent que l'apprentissage situé, le fait d'apprendre dans un environnement authentique, a eu un effet positif sur l'engagement des élèves. Les auteurs notent aussi que les élèves étaient demandeurs de davantage d'interactions avec l'environnement ; ce qui a amené les auteurs à intégrer dans le dispositif des moments où l'apprenant devait récolter des données sur l'environnement.

La continuité, autre facette de la dimension Pervasivité de notre modèle DIAP, est également exploitée dans les dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés.

Persistance de l'activité à travers les supports

Avec le développement de l'IdO, les individus tendent à jongler avec plusieurs objets connectés pour utiliser les services et outils numériques, notamment grâce au *cloud computing* et aux technologies de communication sans fil. Dans le cadre de l'apprentissage, la possibilité de synchroniser les données entre les différents appareils permet d'assurer la continuité de l'activité d'apprentissage, quel que soit le support. Tenant compte de cela, il est possible de démarrer un cours de programmation sur son téléphone mobile le matin en attendant le bus, poursuivre le midi sur son ordinateur portable au bureau et terminer le cours le soir sur sa tablette chez soi. Il y a une continuité de l'expérience d'apprentissage qui traverse les supports, sans perte d'informations.

Plusieurs dispositifs d'apprentissage permettent cette synchronisation entre les appareils de l'utilisateur afin de poursuivre la formation d'un appareil à l'autre. C'est le cas notamment de l'application Duolingo dont les cours peuvent être suivis aussi bien depuis un smartphone que depuis un ordinateur [28].

De même, l'application Tynker, dédiée à l'apprentissage de la programmation, permet également de poursuivre une même activité d'apprentissage avec plusieurs dispositifs. Tynker propose un environnement de programmation visuelle où l'apprenant manipule des blocs de code qu'il peut assembler à la manière d'un puzzle (voir Figure 4.10). Son interface est similaire au logiciel Scratch développé par Resnick (2007) au MIT, mais ajoute des fonctionnalités pour la programmation d'objets connectés tels que des drones et des ampoules

28. Source : https://www.duolingo.com/. Consulté le 3 juin 2020.

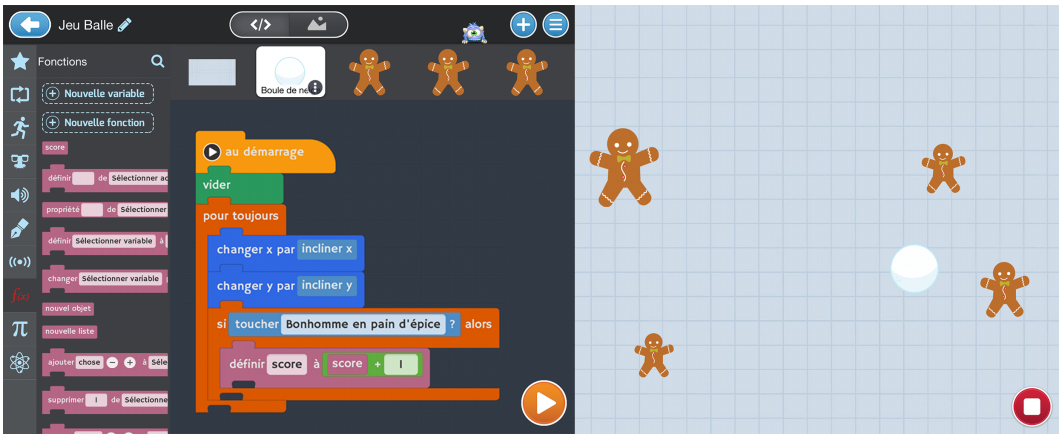


FIGURE 4.10 – **Initiation à la programmation avec l'application Tynker**.

connectées.

Enfin, il y a également l'application Phyphox, permettant de récupérer les données des capteurs du smartphone ou de la tablette afin de créer des expériences de physique (voir Figure 4.11). Développée par des chercheurs de l'université d'Aix-la-Chapelle, l'application Phyphox dispose d'une fonction pour étendre l'interface de visualisation des données collectées par un capteur à plusieurs supports. Par exemple, il est possible de collecter les données de l'accéléromètre du smartphone tout en permettant de visualiser et de contrôler celle-ci depuis une autre tablette. Dans le cas de ces trois applications, l'activité d'apprentissage persiste à travers les supports sans qu'il y ait une coupure.

FIGURE 4.11 – **Utilisation de l'application Phyphox sur plusieurs supports** [29].

De leur côté, les chercheurs Mouri, Ogata, et Uosaki (2017) proposent un système pour mettre en relation entre des apprentissages formel et informel (voir la section 1.3.2 pour plus de détails sur les apprentissages formel et informel). Dédié à l'apprentissage des langues, VASCROLL (*Visualization and Analysis System for Connecting Relationships of Learning Logs*) permet d'enregistrer, d'organiser, de rappeler et d'évaluer les mots et expressions apprises. Avec ce système, les apprenants enregistrent des traces d'apprentissage informel (des mots entendus ou écrits qu'ils n'ont pas compris) que VASCROLL met en relation avec les contenus des ressources d'apprentissage distribuées par l'enseignant.

29. Source : https://phyphox.org. Consulté le 3 juillet 2020.

L'environnement pour contextualiser les savoirs

La dernière catégorie liée à la dimension Pervasivité correspond aux dispositifs d'apprentissage qui exploitent les objets connectés et leurs liens avec l'environnement pour donner du sens aux savoirs à apprendre. En section 1.3.1 du premier chapitre, nous avons vu que l'une des stratégies d'apprentissage actif consiste à créer des activités d'apprentissage qui placent les savoirs à apprendre dans un contexte spécifique. Dans le cadre de la catégorie que nous décrivons ici, les dispositifs d'apprentissage s'appuient sur l'environnement physique pour contextualiser les savoirs.

Une partie des dispositifs se basent sur les technologies de l'IdO (e.g. capteurs, RFID, montre connectée) pour inférer la localisation physique de l'apprenant et ainsi proposer des services adaptés, liés à l'apprentissage (Takiddeen & Zualkernan, 2020). Ces services peuvent être la recommandation d'un parcours lors de la visite d'un musée, la recommandation de ressources d'apprentissage ou encore des alertes et des rappels.

Nous pouvons également citer l'étude menée par Kuhn et al. (2016) pour évaluer l'utilisation des lunettes connectées à des fins d'apprentissage. Le dispositif conçu propose de contextualiser des concepts scientifiques en superposant à l'environnement physique de l'apprenant des représentations numériques. Les auteurs ont conduit une expérimentation où des Google Glass sont utilisées pour représenter sous la forme d'un graphique la relation entre la masse d'un verre d'eau et la fréquence de vibration selon le niveau de remplissage. Les apprenants visualisent en temps réel le graphique produit suite à leurs manipulations des objets concrets.

Les résultats des auteurs montrent que ce dispositif d'apprentissage stimule curiosité des étudiants qui, comme nous l'avons vu, est lié à l'engagement, l'un des piliers de l'apprentissage (voir la section 1.1.2). Les auteurs notent aussi que la superposition de la représentation numérique à la réalité concrète n'a pas engendré, dans le cas présent, de surcharge cognitive. En revanche, en accord avec la tendance *No Significant Difference* décrite par Russell (1997) (voir section 2.2.2), Kuhn et al. (2016) n'observent pas de différence significative en termes de résultats d'apprentissage. Après analyse des réponses des apprenants à un questionnaire post-expérience, les auteurs estiment que l'utilisation des lunettes connectées reste un moyen intéressant pour faciliter la mise en place d'expériences en physique ; qui nécessite normalement des instruments moins accessibles (e.g. oscilloscope).

À travers cette présentation de notre classification des dispositifs, nous voyons que les spécificités des objets connectés sont utilisées de multiples façons pour l'apprentissage. Les catégories de dispositifs que nous avons identifiés peuvent donner l'impression que les usages des objets connectés sont hétérogènes cependant, nous allons voir qu'ils ont des caractéristiques communes.

4.3 Discussions. L'objet connecté : intermédiaire entre l'apprenant et l'environnement

L'analyse des dispositifs d'apprentissage présentés pour chacune des catégories nous permet de faire plusieurs observations sur les caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'IdO. L'observation majeure que nous pouvons faire, et celle-ci apparaît aussi à la lecture

des descriptions données par le Tableau 4.1, est le rapport étroit avec l'environnement.

Dimension	Dispositif	Description
Données	Observation de l'environnement	Collecter des données avec les capteurs d'objets connectés pour observer des phénomènes dans l'environnement.
	Suivi de l'apprenant	Suivre les déplacements et les activités informelles de l'apprenant ainsi que ses interactions avec des objets connectés.
Interfaces	Manipulation d'objets	Manipuler des objets tangibles représentant des concepts abstraits.
	Environnement augmenté	Intégrer des informations contextuelles dans les objets et l'environnement.
Agents	État psychologique de l'apprenant	Transformer les données des objets connectés en informations pour suivre l'état psychologique de l'apprenant.
	Objets augmentés	Exploiter les modèles de vision artificielle et de traitement du langage naturel pour assister l'apprenant.
Pervasivité	Exploration de l'environnement	Se déplacer et interagir avec l'environnement.
	Persistance de l'activité	Poursuivre l'activité d'apprentissage sur plusieurs supports différents.
	L'environnement pour contextualiser les savoirs	Donner du sens aux savoirs à apprendre en s'appuyant sur l'environnement.

Tableau 4.1 – **Synthèse des catégories de dispositifs d'apprentissage basés sur l'IdO.**

Il s'agit d'un trait commun aux dispositifs : les objets connectés opèrent une médiation entre l'apprenant, l'environnement et les savoirs à apprendre. Ces derniers sont liés à l'environnement et l'objet connecté sert d'intermédiaire avec l'apprenant pour qu'il puisse les étudier. Par exemple, l'apprenant collecte des paramètres environnementaux sur un phénomène ou bien il « scan » des objets pour obtenir des informations contextuelles sur l'environnement. Plus concrètement, ces savoirs concernent majoritairement les disciplines des sciences formelles (e.g. mathématiques, informatique) et des sciences naturelles (e.g. biologie, écologie, médecine, physique, chimie). Les dispositifs basés sur les technologies de l'IdO partagent les mêmes ancrages théoriques et l'on peut identifier des caractéristiques communes dans la manière de favoriser l'apprentissage.

Ancrages théoriques : constructivisme et socioconstructivisme

Comme cela a été montré dans la section 2.2.2, les dispositifs d'apprentissage tendent à soutenir des modes d'apprentissage en accord avec les principes des théories dominantes. Ainsi, les dispositifs d'apprentissage ont initialement implémenté des principes béhavioristes puis ont évolué, en accord avec les théories constructivistes et socioconstructivistes, pour supporter un apprentissage actif. Les dispositifs d'apprentissage basé sur l'IdO s'inscrivent également dans cette tendance.

Nous constatons que la majorité des dispositifs d'apprentissage basé sur l'IdO entrent, explicitement ou implicitement, dans le paradigme constructiviste. Qu'il s'agisse d'exploiter

les Données, les Interfaces, les Agents ou la Pervasivité de l'IdO, les dispositifs placent l'apprenant dans une position active. Ils créent les conditions pour favoriser la construction des connaissances par l'apprenant : en lui accordant de l'autonomie, en proposant des activités pratiques, en le confrontant à des situations réelles ou encore en problématisant les connaissances. En ce sens, nous voyons que les dispositifs soutiennent des stratégies d'apprentissage actif : la contextualisation, la résolution de problèmes, l'investigation et l'expérimentation. Par exemple, l'apprenant collecte des données ou manipule des objets dans l'environnement pour résoudre un problème ou mène une enquête pour répondre à une question.

Toutefois, les catégories « Suivi de l'apprenant » et « État psychologique de l'apprenant » se distinguent des autres. Celles-ci comprennent des usages des technologies de l'IdO qui sont centrés sur le dispositif d'apprentissage plutôt que sur l'apprenant et le mode d'apprentissage. En effet, elles décrivent toutes les deux l'exploitation des données générées par les objets connectés pour adapter l'apprentissage, en étendant le suivi en dehors du dispositif et en intégrant l'état psychologique de l'apprenant.

Plusieurs dispositifs s'inscrivent également dans la théorie socioconstructiviste de l'apprentissage, notamment lorsqu'il s'agit d'exploiter les Données et les Interfaces de l'IdO. Dans la catégorie « Observation de l'environnement », les activités de collecte de données sur l'environnement se concluent par des phases où les résultats sont partagés et discutés entre les apprenants et avec les enseignants. Également, une partie des dispositifs basés sur des interfaces tangibles, dans la catégorie « Manipulation d'objets », soutiennent un apprentissage collaboratif où les apprenants échangent pour résoudre un problème ou répondre à une question. Dans ces cas-là, les dispositifs font reposer le processus de construction des connaissances sur les interactions sociales entre les apprenants : le dialogue avec les pairs favorise la construction des connaissances par l'apprenant.

Caractéristiques de l'apprentissage : engagement, contextualisation et authenticité

Au-delà des théories constructiviste et socioconstructiviste, l'analyse des catégories de dispositifs basés sur l'IdO permet d'identifier plusieurs caractéristiques communes dans la manière de favoriser l'apprentissage. Nous identifions trois caractéristiques principales : l'engagement corporel, la contextualisation des savoirs et la recherche de l'authenticité.

L'engagement corporel est favorisé par le rapport étroit entre l'IdO et l'environnement et que l'on retrouve dans les dispositifs d'apprentissage. En section 1.2.3, nous avons présenté la théorie de la cognition incarnée rendant compte du rôle des fonctions sensori-motrices — des gestes, des manipulations et de l'activité physique — pour la cognition et ainsi pour l'apprentissage. La mobilisation du corps apparaît particulièrement avec les dispositifs exploitant les Interfaces de l'IdO. En effet, dans le cadre de ces dispositifs, l'apprentissage passe par la manipulation d'objets tangibles représentant des concepts abstraits (Kubicki et al., 2016). Néanmoins, l'engagement corporel est présent dans une moindre mesure dans les autres catégories de dispositifs : lorsque l'apprenant doit collecter des données (Joyce et al., 2014) (voir section 4.2.1), lorsqu'il explore l'environnement (MacCallum & Bell, 2015) (voir section 4.2.4), lorsqu'il utilise un objet connecté pour s'aider dans une tâche pratique (Kuhn et al., 2016) (voir section 4.2.3).

La contextualisation est également un trait caractéristique de l'apprentissage dans le contexte de l'IdO. Cette contextualisation intervient de deux façons : du savoir au contexte et du contexte au savoir. Ces deux cas font écho à l'apprentissage situé : la construction des connaissances s'ancre dans un contexte spécifique. Dans le premier cas, le dispositif d'apprentissage facilite la création de conditions donnant du sens aux savoirs à apprendre. Par exemple, les étudiants d'une formation scientifique sont amenés à étudier des phénomènes physiques en dehors de la salle de classe, dans des conditions réelles (Bouquet et al., 2019) (voir section 4.2.1). Dans le second cas, le dispositif d'apprentissage infère le contexte de l'apprenant à partir des données générées par les objets connectés pour adapter l'apprentissage (e.g. ressources d'apprentissage, conseils). Par exemple, des dispositifs entrant dans la catégorie « État psychologique de l'apprenant » cherchent à prédire le niveau d'engagement de l'apprenant (Lascio et al., 2018) (voir section 4.2.3).

L'authenticité est l'utilisation de matériaux d'apprentissage ou la création de conditions d'apprentissage qui soient semblables au réel. Cette caractéristique apparaît principalement lorsque les objets connectés sont utilisés pour observer le monde, comme instruments de mesure ou pour collecter des photos ou des sons. S'il y a une forme de contextualisation, il y a également la volonté d'apprendre avec et à partir de matériaux, en l'occurrence les données générées par les objets connectés, qui sont authentiques. Par exemple, des apprenants vont étudier l'effet du pendule avec leur enseignant en physique à l'aide de leurs smartphones pour mesurer réellement et de manière individuelle les mouvements d'un objet faisant un pendule (Hochberg, Kuhn, & Müller, 2018) (voir section 4.2.1).

*
* *

Nous avons examiné les dispositifs d'apprentissage incluant des objets connectés afin de comprendre comment s'articulent leurs spécificités avec les mécanismes de l'apprentissage.

À cette fin, nous avons élaboré le modèle DIAP décrivant les spécificités des objets connectés et de l'IdO au travers de quatre dimensions : Données, Interfaces, Agents et Pervasivité. Les Données sont des paramètres environnementaux, comportementaux et physiologiques générées par les capteurs d'objets connectés. Les Interfaces humain-machine des objets connectés s'orientent vers des modalités dites naturelles pour l'humain et tendent à rapprocher les modes de contrôle et de représentation de l'information. Les Agents embarqués dans les objets connectés transforment les données collectées en informations puis en connaissances pour prendre des décisions et agir dans l'environnement. La Pervasivité désigne la réduction des contraintes de temps, d'espace, de contenu et de support pour l'accès à l'information de par la multiplication d'objets connectés. Ces quatre dimensions permettent de synthétiser les spécificités des objets connectés et, incidemment, de décrire les applications et les services qu'ils supportent.

À partir du modèle DIAP, nous avons identifié et répertorié dans la littérature les dispositifs d'apprentissage basé sur les technologies de l'IdO. Ces dispositifs ont été regroupés pour former plusieurs catégories selon leurs usages similaires des dimensions des objets connectés. Les dispositifs d'apprentissage identifiés s'inscrivent dans les théories constructiviste et socioconstructiviste de l'apprentissage. Leur conception reflète une volonté de favoriser l'apprentissage de trois manières : par l'engagement corporel, la contextualisation des savoirs, ainsi que l'authenticité des matériaux d'apprentissage. L'analyse de ces catégories de dispositifs d'apprentissage suggère que, dans le contexte de l'IdO, l'apprentissage est basé sur interactions entre l'apprenant et l'environnement. Les objets connectés opèrent une médiation entre l'apprenant, l'environnement et les savoirs à apprendre.

Dans le chapitre suivant, nous développons une approche de la médiation de savoirs basée sur le rapport à l'environnement créé par les objets connectés et à partir des observations faites sur les dispositifs d'apprentissage existants.

Chapitre 5

Objets connectés : catalyseurs dans la médiation des savoirs scientifiques

> Grands, assurément, sont les sujets qu'en ce mince traité je propose à chacun de ceux qui observent la Nature, afin qu'ils les examinent et contemplent. Grands, dis-je, d'abord en raison de l'importance de la matière même, ensuite en raison de sa nouveauté inouïe au cours des siècles, enfin, également, à cause de l'Instrument grâce auquel ces sujets sont offerts à notre perception.
>
> – Galilée, *Le Messager des Étoiles*, 1610

En 1610, Galilée livre dans *Le Messager des Étoiles* (*Sidereus nuncius*) ses premières observations du ciel étoilé : la Lune est montagneuse, la Voie lactée est composée d'une multitude de petites étoiles et des lunes sont en orbite autour de Jupiter [1]. Mais, pour Galilée, la grandeur de ces découvertes égale celle de l'Instrument : la lunette astronomique lui ayant permis d'étendre sa perception pour observer les étoiles.

La caractérisation de l'apprentissage dans le contexte de l'IdO a mis en évidence les spécificités des objets connectés et leur rapport étroit avec l'environnement. Ainsi, nous avons interrogé la possibilité que, à l'instar de l'Instrument de Galilée, les objets connectés puissent être utilisés pour étendre la perception humaine de l'environnement afin de rendre accessible des savoirs scientifiques. Conformément à notre problématique de recherche, l'approche que nous avons élaborée articule les spécificités des objets connectés avec les mécanismes de l'apprentissage humain, sachant le rôle clé de l'expérience. Dès lors, notre travail a été structuré par les questions de recherche suivantes :

— comment les spécificités des objets connectés peuvent-elles être articulées au sein d'un dispositif d'apprentissage pour servir la médiation de savoirs scientifiques ?

1. Les lunes de Jupiter décrites par Galilée sont les premières observées après la Lune de la Terre. Les lunes galiléennes sont aujourd'hui nommées : Io, Europe, Ganymède et Callisto. Source : https://fermedesetoiles.com/documents/supports/galilee-et-les-satellites-jupiter. Consulté le 10 juin 2020.

— quels sont les effets, les contraintes et les enjeux de l'utilisation de dispositifs basés sur des objets connectés pour la médiation de savoirs scientifiques ?

Dans ce chapitre, nous explicitons dans un premier temps les fondements de notre approche pour la médiation des savoirs scientifiques avec des objets connectés. Nous revenons sur les obstacles à l'apprentissage (5.1.1) puis nous montrons que les spécificités des objets connectés sont utiles face à ces obstacles (5.1.2). Nous décrivons le cadre de l'approche ainsi que le modèle que nous avons élaboré pour structurer la conception de dispositifs d'apprentissage (5.1.3). La seconde partie présente l'ensemble de dispositifs LumIoT que nous avons conçu pour l'apprentissage des grandeurs photométriques et de la température de couleur (5.2). Dans un troisième temps, nous rapportons les résultats d'une expérimentation que nous avons menée avec les dispositifs LumIoT auprès d'étudiants. Nous détaillons la méthode employée et les données collectées (5.3.1), les résultats obtenus (5.3.2) que nous discutons ensuite au regard de la littérature existante (5.3.3).

5.1 Rendre intelligibles des phénomènes intangibles

Au cours des chapitres précédents, nous nous sommes attachés à rapporter l'état des connaissances sur les mécanismes de l'apprentissage et à montrer comment les objets connectés sont utilisés pour l'apprentissage.

Dans les deux premiers chapitres, il a été établi que les mécanismes de l'apprentissage sont stimulés par l'engagement cognitif (e.g. formulation d'hypothèses, évaluation des erreurs), physique (e.g. manipulations, gestes) et social (e.g. débats, collaboration). L'apprentissage par l'expérience et l'expérimentation favorise le traitement actif des informations et donc la construction des connaissances. La transmission des informations doit s'inscrire dans le cadre d'un dispositif opérant une médiation entre l'apprenant et les savoirs. Le dispositif articule des éléments techniques, communicationnels et sémio-cognitifs afin de créer des conditions stimulantes pour la construction des connaissances. À travers plusieurs exemples (e.g. web social, réalité augmentée, SIA), nous avons vu que les conditions d'apprentissage créées par le dispositif sont dépendantes de spécificités propres à chaque technologie. Ces spécificités sont articulées au sein d'un dispositif en fonction d'une stratégie d'apprentissage, de savoirs à apprendre et sous l'influence de pratiques préexistantes.

Ces constats nous ont amenés, dans les chapitres suivants, à déterminer les spécificités techniques de l'IdO et les possibilités de médiation des savoirs qui en découlent. Le troisième chapitre s'est attaché à exposer le contexte historico-technologique du développement de l'IdO en montrant qu'il s'agit d'un concept complexe aux frontières encore floues. Pour cette raison, dans le quatrième chapitre, nous avons formulé le modèle DIAP décrivant les spécificités de l'IdO au travers de quatre dimensions : Données, Interfaces, Agents et Pervasivité. Grâce au modèle DIAP, nous avons pu explorer les possibilités de médiation des savoirs en identifiant plusieurs catégories de dispositifs d'apprentissage basés sur les objets connectés. En analysant ces catégories, nous avons observé que, dans le contexte de l'IdO, l'acte d'apprentissage est caractérisé par un engagement physique, la mise en contexte des savoirs et l'authenticité.

À partir de ces travaux, nous avons élaboré une approche articulant les spécificités des objets connectés avec les mécanismes de l'apprentissage. Cette approche est basée sur l'hy-

pothèse générale que *les objets connectés peuvent servir la médiation des savoirs scientifiques en rendant intelligibles des phénomènes physiques intangibles*. Les sections suivantes explicitent cette hypothèse – e.g. ce qui est entendu par intelligible – et détaillent les postulats sur lesquels elle est fondée.

5.1.1 Sens et science : le rôle de la perception pour l'apprentissage des sciences

Par leurs capteurs et leurs actionneurs, les objets connectés ainsi que les services et applications qui en découlent entretiennent un rapport étroit avec l'environnement. Ce lien avec l'environnement se retrouve dans les dispositifs d'apprentissage à l'exemple de ceux identifiés dans les catégories « Observation de l'environnement » ou « Environnement augmenté » (voir sections 4.2.1 et 4.2.2). Ainsi, comme nous l'avons montré au chapitre précédent, les possibilités techniques offertes par les objets connectés semblent adaptées à l'apprentissage de savoirs scientifiques.

Cependant, les dispositifs d'apprentissage qui ont été présentés précédemment, en particulier dans le cadre de la catégorie « Observation de l'environnement », visent dans leur majorité un public d'apprenants suivant *déjà* une formation scientifique. Or, dans une société imprégnée des sciences et des technologies, la culture scientifique est l'une des clés pour comprendre le monde dans lequel nous vivons [2]. Selon Morin (2008), « *Le développement de la culture scientifique va déterminer non seulement une coupure épistémologique entre philosophie et science, mais aussi une rupture ontologique entre culture scientifique et culture humaniste.* » (Morin, 2008, p. 1634). Ainsi, si « *l'esprit peut accéder aisément aux connaissances de la culture humaniste* », les connaissances dans la culture scientifique sont enfermées dans des disciplines de plus en plus spécialisées et s'expriment « *dans des langages formalisés inaccessibles au profane* » (Morin, 2008, p. 1635).

L'objectif de l'approche est de mettre les spécificités des objets connectés au service de l'apprentissage des sciences en rendant accessibles des savoirs abstraits et intangibles. Notre approche est basée sur une série de postulats établissant d'une part l'origine de l'un des obstacles à l'apprentissage des sciences et, d'autre part, la manière dont les spécificités des objets connectés permettent de réduire cet obstacle.

Premier postulat : une perception incomplète et subjective de la réalité

L'hypothèse générale de notre approche est que les objets connectés peuvent rendre intelligibles des savoirs abstraits décrivant des phénomènes physiques intangibles. Le terme intelligible est entendu au sens donné par Platon lorsqu'il expose l'allégorie de la caverne dans le Livre VII de *La République* (Chambry & Platon, 1975).

Au fond d'une caverne, des humains sont immobilisés par des chaînes de sorte qu'ils

2. Durant la pandémie de Covid-19, en mars et avril 2020, le débat très médiatisé autour de l'efficacité de la chloroquine est une démonstration de l'importance de la culture scientifique. L'arrivée de concepts scientifiques (e.g. étude randomisée, R0) dans l'espace médiatique, pas ou mal expliqués par les médias généralistes, combinés au manque de culture scientifique, a conduit à une cristallisation d'opinions en faveur ou non de l'utilisation de la chloroquine. Cette cristallisation a eu des effets négatifs pour la recherche sur la Covid-19 : beaucoup de moyens humains et financiers ont été mobilisés pour peu de résultats. Source : https://www.huffingtonpost.fr/entry/coronavirus-les-crasoignants-redoutent_fr_5e96e378c5b6ac7eb26318b5. Consulté le 29 juillet 2020.

tournent le dos à la sortie de la caverne. Les humains enchaînés ne percevant que de faibles rayons lumineux du Soleil, un feu est allumé entre eux et la sortie de la caverne afin de les éclairer (Chambry & Platon, 1975). Grâce à cet éclairage, les humains distinguent sur les parois de la caverne leurs ombres et celles des objets qui les entourent. Lorsqu'un humain parvient à se libérer de ses chaînes pour se diriger vers la sortie, la lumière du Soleil à laquelle il n'est pas habitué l'éblouit et le fait souffrir. Bien qu'insupportable au départ, l'humain peut s'y habituer progressivement en persistant et, *in fine*, atteindre l'extérieur de la caverne (Chambry & Platon, 1975).

L'allégorie de la caverne est exposée par Platon pour décrire les conditions d'accès à la connaissance. La caverne représente le monde sensible où l'on connaît les choses uniquement par les sens tandis que l'extérieur de la caverne, baigné par la lumière du Soleil, est le monde intelligible (Chambry & Platon, 1975). Le Soleil est la source de la science dont le rayonnement, complet sur le monde intelligible, permet d'accéder à la connaissance des choses. Les rayons du Soleil parviennent faiblement à l'intérieur de la caverne, car « *La connaissance du réel est une lumière qui projette toujours quelque part des ombres* » (Bachelard, 1993, p. 13). Les humains enchaînés ne peuvent connaître les choses telles qu'elles sont réellement, car ils n'en perçoivent que les ombres, des images trompeuses et distordues de la réalité. Le chemin parcouru par l'humain vers la sortie est « *la montée de l'âme vers le lieu intelligible* » (Chambry & Platon, 1975), il doit « *monter par le raisonnement pur, dépouillé de toute trace de sensation, jusqu'aux réalités intelligibles* » (Chambry & Platon, 1975, p. lxxxiii).

Nous retenons de l'allégorie de la caverne de Platon que la connaissance requiert de dépasser la réalité donnée par les sens qui ne conduit qu'à l'opinion. Ainsi, le premier des postulats sur lesquels repose notre approche est que la connaissance du réel ne saurait reposer uniquement sur l'expérience sensible car, *la réalité perçue à travers les sens humains est subjective et incomplète.*

Pour appuyer ce postulat, nous pouvons rappeler que la perception et la compréhension de l'environnement sont dépendantes de plusieurs facteurs (voir section 2.1.2). Les caractéristiques propres des sens humains forment le premier de ces facteurs puisqu'ils déterminent le domaine du percevable. Par exemple, le spectre de la vision humaine s'étend du violet au rouge et exclue l'ultraviolet et l'infrarouge. Puis, à partir des travaux de Berthoz et de ses collègues ainsi que de la description des mécanismes de catégorisation et de prédiction, nous avons montré que les données sensorielles font l'objet d'une interprétation mobilisant les connaissances antérieures. Ainsi, la perception de la réalité est déterminée par l'expérience sensible, les connaissances acquises et les expériences passées.

Second postulat : l'incomplétude de la perception, un obstacle à l'apprentissage des sciences

Le second postulat de notre approche est que *la perception incomplète et subjective de la réalité est l'un des obstacles à l'apprentissage de concepts scientifiques, qui sont abstraits et contre-intuitifs.*

Le cerveau formule continuellement des hypothèses pour expliquer les phénomènes dans l'environnement à partir desquelles les individus construisent leurs représentations du monde (voir section 1.2.1). Ces représentations du monde peuvent être erronées dans la mesure

où elles sont formées intuitivement à partir de l'expérience sensible et dans des conditions particulières. Par exemple, un enfant peut se représenter la baleine comme étant un poisson en voyant que la baleine partage le même milieu que les poissons et leur ressemble (e.g. nageoires, couleurs de peau). Or, le processus de construction des connaissances implique de mettre en relation les nouvelles informations transmises avec les représentations déjà formées de la réalité.

Les représentations erronées sont un obstacle à l'apprentissage des sciences, car les savoirs scientifiques sont souvent contre-intuitifs et s'opposent à la réalité perçue par les sens (Astolfi et al., 2008). Les apprenants ont des représentations qui sont solidement ancrées et qui continuent d'exister après les activités d'apprentissage, car elles sont en accord avec leur expérience quotidienne ; au contraire, parfois, des savoirs scientifiques. Ces représentations forment ce que Bachelard nomme un « obstacle épistémologique » créé par l'attachement à l' « expérience première », qui « *se présente avec un luxe d'images ; elle est pittoresque, concrète, naturelle, facile. Il n'y a qu'à la décrire et s'émerveiller* » (Bachelard, 1993, p. 18) [3]. Bachelard (1993) estime que l'apprentissage des sciences n'est pas tant l'acquisition de connaissances que la modification de connaissances préexistantes. Pour cela, la stratégie d'apprentissage doit amener l'apprenant à dépasser les obstacles créés par l'expérience première.

Pourtant, si elle est trompeuse, l'expérience est la source à partir de laquelle les savoirs sont élaborés (Locke, 2007). Le philosophe Démocrite (460-370 avant J.-C.), dont les idées forment les prémisses de la science moderne, opposait « *la connaissance légitime de l'intellect à la connaissance bâtarde des sens* » (Morel, 1998, p. 8). Pour Démocrite, l'expérience sensible est toujours relative et incapable de saisir la réalité authentique. De son côté, la connaissance légitime est celle de la raison qui, par son exercice, parvient à saisir la réalité et à la rendre intelligible. L'expérience sensible peut conduire aux savoirs scientifiques à condition de quitter l'empirisme immédiat pour adopter la démarche scientifique. L'observation rigoureuse du réel, la formulation d'hypothèses et l'expérimentation forment la démarche scientifique à partir de laquelle sont élaborés les savoirs (Bachelard, 1993). Ainsi, ce n'est pas tant la quantité des expériences que leur qualité qui importe.

L'incomplétude et la subjectivité de la perception humaine conduisent à l'élaboration de représentations mentales en contradiction avec des savoirs scientifiques abstraits et souvent contre-intuitifs. L'objectif de l'apprentissage des sciences est d'amener l'apprenant à réévaluer et modifier ses représentations mentales afin qu'elles soient en accord avec les savoirs scientifiques. Ce processus ne peut s'opérer lorsque l'apprentissage des sciences est réduit à l'exposition des résultats donnés par les savoirs scientifiques. Pour Bachelard, « *Si l'on n'explicite pas la ligne de production spirituelle qui a conduit au résultat, on peut être sûr que l'élève combinera le résultat avec ses images les plus familières* » (Bachelard, 1993, p. 234). Ce constat fait écho aux études en faveur d'un apprentissage des sciences reprenant les étapes clés de la méthode scientifique ou l'application d'une stratégie d'apprentissage par l'investigation (voir section 1.3.1).

3. Bachelard montre que la confiance aveugle et sans critique de l'expérience sensible conduit à des explications péremptoires. L'électricité s'est vu attribuer une qualité « glutineuse, onctueuse, tenace » par des théoriciens voyant que des particules étaient attirées par le flux électrique (Bachelard, 1993, p. 103). « *On pense comme on voit, on pense ce qu'on voit : Une poussière colle à la paroi électrisée, donc l'électricité est une colle, une glu* » (Bachelard, 1993, p. 103) et la recherche scientifique s'arrête à cette affirmation qui semble suffisante pour expliquer le phénomène.

Tenant compte de ces deux postulats, la finalité de notre approche est la conception d'un dispositif permettant d'augmenter la perception de l'apprenant afin d'étudier un phénomène physique intangible. Le dispositif doit apporter des moyens pour mener des observations, formuler des hypothèses et les expérimenter et, *in fine*, amener l'apprenant à réévaluer ses représentations mentales. Comme nous l'avons vu en section 1.2.3, l'expérience et l'expérimentation ancrent l'apprenant dans l'action et favorisent le traitement actif des informations. Toutefois, si le dispositif d'apprentissage créé des conditions favorables à l'expérimentation, elles doivent aussi inclure des éléments de guidage ; sans quoi l'autonomie de l'apprenant devient contre-productive (Kirschner, Sweller, & Clark, 2006).

5.1.2 Augmenter les sens pour apprendre la science

En réponse à l'obstacle que constitue l'incomplétude et la subjectivité de la perception humaine pour l'apprentissage des sciences, l'une des solutions est de rendre visible ce qui, précisément, échappe aux sens. Les sections suivantes montrent que « rendre visible l'invisible » est une pratique existante dans le cadre de l'apprentissage des sciences que les objets connectés permettent de renouveler.

Pratiques existantes pour rendre visible l'invisible

Derrière l'expression « rendre visible l'invisible », nous entendons l'ensemble des pratiques visant à rendre accessibles les savoirs scientifiques en les présentant sous une forme concrète et proche du quotidien des apprenants. Cela peut être la mise en évidence de facettes cachées d'un phénomène expérimenté quotidiennement ou l'illustration concrète d'un concept abstrait avec des objets du quotidien.

Depuis longtemps des enseignants et des vulgarisateurs de sciences imaginent et élaborent des expériences à l'aide d'objets du quotidien pour rendre concrets des concepts abstraits et illustrer la science. L'on trouve de nombreuses initiatives proposant ce type d'activités telles que la fondation La Main à la Pâte et sa chaîne YouTube Billes de Sciences ou encore les sites lesdebrouillards.com et culturesciencesphysique.ens-lyon.fr [4]. Par exemple, l'expérience du pendule simple requiert de faire osciller un objet suspendu au bout d'un fil afin de calculer, avec une précision raisonnable, la pesanteur. Étant donné qu'elle détermine l'accélération des oscillations du pendule, la pesanteur peut être calculée si l'on connaît le nombre d'oscillations en un temps donné [5].

Comme nous l'avons montré en section 2.2.1, les travaux en sociologie des usages se sont attachés à expliciter la dimension historique des usages : les nouveaux usages des TIC s'inscrivent dans les pratiques, les habitudes et les traditions d'aujourd'hui et d'hier. Il en va de même dans le cadre de l'apprentissage des sciences où les technologies ont été utilisées pour poursuivre les pratiques visant à rendre visible l'invisible.

4. On peut citer les sites suivants : lesdebrouillards.com, 123couleurs.fr, phymain.unis ciel.fr, culturesciencesphysique.ens-lyon.fr, kidiscience.cafe-sciences.org, espace-sciences.org et hugolescargot.com.

5. Il s'agit d'appliquer la formule $T = 2\pi(\frac{L}{g_0})^{\frac{1}{2}}$, sachant que T est le temps d'un aller-retour du pendule (en secondes), L est la longueur du fil (en mètres) et g_0 est la pesanteur. Si l'on souhaite calculer g_0, la formule s'écrit : $g_0^{\frac{1}{2}} = 2\pi * L^{\frac{1}{2}} * T^{-1}$. Source : http://lesetoiles.over-blog.net/2017/02/mesurer-la-gravite-avec-un-pendule.html. Consulté le 16 juin 2020.

Les matières scientifiques ont été pionnières dans l'introduction des TIC dans l'enseignement et, dès les années 60, l'ordinateur a servi de support à plusieurs types de ressources numériques d'apprentissage (Cox, 2012). Parmi ces ressources numériques, Cox (2012) distingue :

— les tutoriels : développés selon des principes béhavioristes, ils exposaient des problèmes scientifiques accompagnés de plusieurs réponses possibles ;

— les logiciels de modélisation : à l'exemple de LOGO (voir section 2.2.2), les apprenants pouvaient construire leur propre modèle et effectuer des tests ;

— le contrôle et le recueil de données : les apprenants pouvaient enregistrer des données liées à une expérience grâce à des capteurs reliés à un ordinateur ;

— les simulations [6] : à l'intermédiaire entre la réalité et le savoir scientifique, les simulations présentent une représentation symbolique, dynamique et interactive d'un phénomène et des facteurs qui lui sont liés (Beaufils & Richoux, 2003). L'apprenant avait une position d'enquêteur lui permettant de simuler une expérience cependant, la liberté de l'apprenant en matière d'expérimentation était limitée par le logiciel.

Ces ressources numériques étaient utilisées par les enseignants pour pallier les difficultés que rencontraient les élèves en raison de l'élaboration de représentations erronées. Cependant, à partir des années 2000, les usages se sont cantonnés à des recherches sur le web et à la mise en ligne des cours (Cox, 2012).

À partir des années 2010, l'essor de smartphones et de tablettes munis de capteurs facilement accessibles a conduit certains enseignants à créer des activités pratiques pour l'enseignement des sciences. Les retours de l'édition 2017-2018 des Travaux Académiques Mutualisés (TRAaM) en physique-chimie organisée par la Direction du numérique pour l'éducation apportent de nombreux exemples d'expériences pédagogiques réalisées avec des smartphones [7]. Avec leurs élèves de collège et de lycée, les enseignants ont élaboré des expériences où le smartphone est utilisé comme instrument de mesure et pour collecter des données sur l'environnement. La reproduction de l'expérience du pendule simple est, par exemple, facilitée par l'utilisation du smartphone à la place de l'objet oscillant : le calcul de la pesanteur est réalisé automatiquement et plus précisément à partir de l'accéléromètre. Ces expériences rejoignent les travaux des physiciens déjà cités dans la catégorie « Observation de l'environnement » (voir section 4.2.1) : tout comme les enseignants du secondaire, ils démontrent comment le smartphone peut servir d'instrument pour mesurer et observer l'environnement. Ces activités pratiques renouent avec le contrôle et le recueil de données puisqu'elles font des objets connectés des instruments de mesure.

Notre approche s'inscrit dans la continuité de ces pratiques éducatives visant à utiliser des objets du quotidien pour mener des expériences et éclaircir des savoirs scientifiques. Cependant, comme nous le verrons par la suite, il ne s'agit pas simplement d'une reproduction des pratiques existantes. Les objets connectés peuvent certes être des objets physiques du

6. Le site PhET Interactive Simulations de l'Université du Colorado à Boulder héberge plusieurs simulations en physique, chimie ou encore en biologie. https://phet.colorado.edu/fr/.

7. Les expériences pédagogiques des enseignants avec des smartphones sont recensées sur la plateforme Eduscol sous la forme de scénarios pédagogiques : http://eduscol.education.fr/physique-chimie/enseigner/ressources-et-usages-numeriques/travaux-academiques-mutualises-traam/usages-doutils-numeriques-pour-evaluer-mesurer-visualiser-produire-des-objets-2017-2018.html. Consulté le 16 juin 2020.

quotidien, mais ils sont aussi plus complexes en raison de leurs capacités de communication, de calcul, de collecte de données et d'action sur l'environnement. De ce fait, les objets connectés posent des conditions supplémentaires particulières à leur utilisation dans le cadre de la médiation des savoirs scientifiques. On peut noter que l'utilisation du smartphone par les enseignants (du secondaire, mais aussi par les physiciens) est motivée par la possibilité d'individualiser l'expérimentation et de faciliter sa réalisation en dehors des murs. Nous verrons que ce ne sont pas les seuls effets de cette utilisation des smartphones lorsqu'il s'agira de discuter des résultats de la mise en pratique de notre approche.

Données, Agents et savoirs scientifiques

Les usages d'objets connectés pour l'apprentissage sont timides et embryonnaires en comparaison des usages pour la santé, le bien-être, l'industrie, l'agriculture et la domotique. Les objets connectés commercialisés, à l'instar des smartphones, des bracelets et des tablettes sont utilisés pour le divertissement, l'organisation des activités quotidiennes, le sport, la recherche d'informations, etc. Toutefois, nous avons montré qu'au-delà des usages prescrits, les objets connectés peuvent être liés à des projets d'utilisation portant sur l'apprentissage. En ce sens, selon la logique d'usage de Perriault (1989), le projet d'utilisation des fonctions des instruments que sont les objets connectés diffère de leurs usages prescrits. Nous pouvons ainsi postuler qu'*il est possible de sortir des usages prescrits des objets connectés pour les exploiter dans le cadre de l'apprentissage des sciences.*

Cependant, quelles sont ces « fonctions » des objets connectés qui sont utilisables pour l'apprentissage des sciences et de quelles manières ? À travers les différents usages que nous avons rapportés, nous pouvons observer que ces fonctions sont liées à la simulation d'un comportement intelligent dans l'environnement, c'est-à-dire les dimensions Données et Agents du modèle DIAP.

Dans le cadre de l'apprentissage des sciences, les Données collectées par les capteurs des objets connectés sont exploitées en tant que mesures de phénomènes physiques (e.g. gravité, effet Doppler[8]). L'objet connecté est utilisé comme instrument de mesure individuel avec lequel l'apprenant va pouvoir étudier un phénomène authentique. Cet usage est lié au quatrième postulat que nous posons : *le spectre de perception des objets connectés diffère des sens humains en termes de précision et d'étendue*[9]. Les « organes sensoriels » des objets connectés que sont les capteurs mesurent des phénomènes dans l'environnement avec une précision supérieure aux sens humains pour un même phénomène. Un capteur de température rapporte des valeurs en degrés tandis que la température ressentie par l'humain est fonction

8. L'effet Doppler est la variation d'un signal sonore émis par une source en déplacement et reçu par un récepteur immobile, par exemple lorsqu'une ambulance passe rapidement près de nous les sirènes allumées. Pour analyser l'effet Doppler, on peut utiliser deux smartphones : l'un émettant un son à une fréquence donnée et l'autre enregistrant le spectre du son émit. Deux personnes, Bob et Alice, se tiennent à bonne distance : Bob se tient immobile avec le smartphone-récepteur, l'enregistrement audio allumé, tandis que Alice lance le signal sonore avec le smartphone-émetteur tout en se déplaçant rapidement vers Bob. Selon l'effet Doppler, la fréquence enregistrée par Bob sera différente de celle émise par Alice parce qu'elle se déplace vers Bob. Source : https://smartphonique.fr/?p=72. Consulté le 17 juin 2020.

9. Nous ouvrons une parenthèse pour préciser que ce postulat ne sous-entend aucunement la supériorité de l'un (les objets connectés) sur l'autre (l'humain). Si les objets connectés ont la précision et l'étendue de la perception de leur côté, l'humain a de son côté la rapidité et la fiabilité de l'interprétation face à des données sensorielles incomplètes.

de la sensibilité au chaud et au froid [10]. Les capteurs prennent également des mesures sur une plage de valeurs plus grande que les sens humains pour un même phénomène. Ainsi, l'humain ne peut percevoir l'infrarouge et l'ultrason tandis qu'il existe des détecteurs infrarouges et d'ultrasons [11]. D'autre part, les usages répertoriés dans la catégorie « Observation de l'environnement » suggèrent que les capteurs des objets connectés fournissent des mesures suffisamment fiables pour être valorisés dans des dispositifs d'apprentissage.

Toutefois, la capacité de « perception » des objets connectés ne tient pas seulement aux Données collectées par les capteurs. Selon nous, il est nécessaire de prendre également en compte les Agents embarqués dans les objets connectés dont le rôle est de transformer les données en informations. Nous pensons que les modèles prédictifs, notamment lorsqu'ils sont utilisés pour augmenter les objets connectés (voir section 4.2.3), constituent tout autant que les capteurs un moyen pour saisir l'environnement. En permettant de découvrir des corrélations cachées dans les Données ou en créant des capteurs virtuels, les modèles prédictifs élaborés par apprentissage contribuent aussi à la « perception » des objets connectés.

5.1.3 Cadre de l'approche pour la médiation des savoirs scientifiques

Dans le cadre de notre approche, nous avons posé comme hypothèse générale que les objets connectés peuvent servir la médiation des savoirs scientifiques en rendant intelligibles des phénomènes intangibles. Cette hypothèse générale s'appuie sur les postulats suivants :

— la réalité perçue à travers les sens humains est subjective et incomplète ;

— la perception incomplète et subjective de la réalité est l'un des obstacles à l'apprentissage de concepts scientifiques qui sont abstraits et non tangibles ;

— il est possible de sortir des usages prescrits des objets connectés pour les exploiter dans le cadre de l'apprentissage des sciences ;

— le spectre de perception des objets connectés diffère des sens humains en termes de précision et d'étendue.

Partant de ces postulats, selon la Figure 5.1, notre approche vise à faire interagir ce que perçoit l'apprenant d'un phénomène dans l'environnement avec ce que perçoivent un ou plusieurs objets connectés à partir de leurs capteurs et agents embarqués.

En accord avec les postulats qui ont été formulés, les informations apportées par le ou les objets connectés ont pour objectif de compléter ce que perçoit directement l'apprenant et de rendre intelligible le phénomène étudié. De son côté, l'apprenant devrait pouvoir agir directement sur l'environnement, pour tester une hypothèse et observer les effets de ses actions *via* le(s) objet(s) connecté(s). Nous formulons l'hypothèse que les interactions entre l'apprenant, le ou les objet(s) connecté(s) et l'environnement, en permettant à l'apprenant d'avoir une perception plus étendue d'un phénomène, peuvent conduire à des apprentissages.

10. Source : https://planet-vie.ens.fr/thematiques/animaux/systeme-nerveux-et-systeme-hormonal/comment-le-corps-humain-ressent-il-la. Consulté le 20 juillet 2020.

11. Les capteurs d'infrarouges et à ultrasons des objets connectés sont utilisés pour mesurer la distance entre le capteur et un objet. Source : http://www.ac-grenoble.fr/college/jean-monnet.st-jorioz/techno/clg/old-html/Documents/les-capteurs-de-distance.htm. Consulté le 20 juillet 2020.

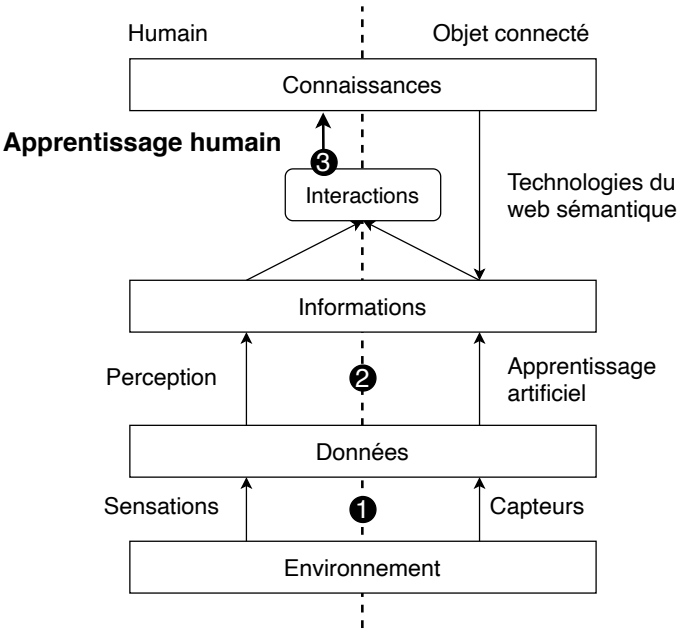


FIGURE 5.1 – **Approche pour la médiation des savoirs scientifiques**. ❶ L'humain et l'objet connecté collectent des données sur un phénomène dans l'environnement, ❷ les données sont interprétées et transformées en informations, ❸ l'humain construit ses connaissances via un dispositif mettant en relation ses informations avec celles de l'objet connecté.

Modèle Données - Représentations - Interactions

Notre approche s'inscrit dans les théories constructivistes et socio-constructivistes de l'apprentissage en reconnaissant que l'apprenant construit ses connaissances en interagissant avec l'environnement et avec ses pairs. C'est par l'observation, la formulation d'hypothèses et l'expérimentation que l'apprenant va interagir avec les informations issues de l'objet connecté sur l'environnement. Cela suppose un engagement cognitif et physique de l'apprenant, pour réfléchir à ses actions et ses hypothèses ainsi que pour manipuler le(s) objet(s) connecté(s). Selon la stratégie d'apprentissage par l'investigation, les actions effectuées par l'apprenant ont pour objectif de répondre à une question ou un problème initial.

Pour rendre opérable notre approche et faciliter la conception des dispositifs d'apprentissage, nous avons élaboré le modèle Données - Représentations - Interactions (DRI). Le modèle DRI apporte un cadre aux trois dimensions du dispositif (Peraya, 1999), car il définit l'utilisation des éléments techniques (e.g. Données, Agents) communicationnels (e.g. rôle de l'apprenant) et sémio-cognitifs (e.g. présentation des savoirs). Dans le cadre du modèle DRI, les objets connectés sont utilisés pour faire des observations sur l'environnement, pour représenter un phénomène invisible (ou un concept abstrait) ainsi que pour interagir avec ce phénomène.

De façon synthétique, le modèle DRI (voir Figure 5.2) définit le processus de médiation suivant : les données issues des capteurs ❶ et leur analyse par des agents alimentent en temps réel des représentations ❷ d'un phénomène physique.

L'apprenant construit ses connaissances en observant le phénomène à étudier et en interprétant les informations apportées par les représentations et par ce qu'il perçoit *via* ses sens. L'observation et l'interprétation sont stimulées par la possibilité d'interagir ❸ avec les

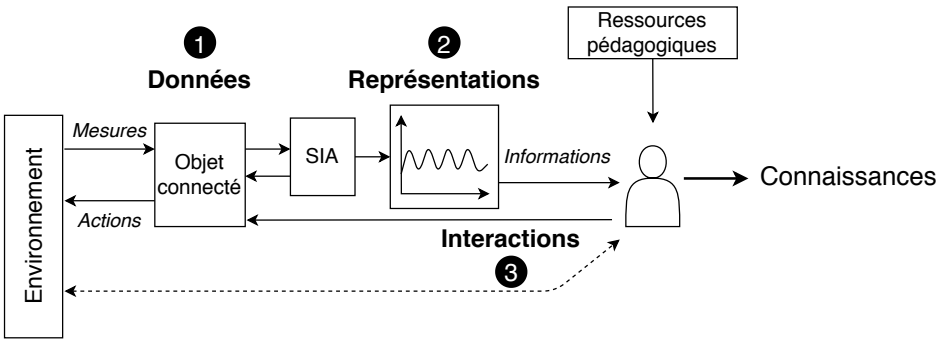


FIGURE 5.2 – **Diagramme fonctionnel du modèle DRI**

représentations par des actions directes dans l'environnement et par l'intermédiaire de l'objet connecté. L'objectif est que ces interactions suivent les étapes de la démarche scientifique : observation, formulation d'hypothèses, expérimentation. Le rôle des ressources pédagogiques est de guider l'apprenant dans ses interactions et dans son interprétation du phénomène physique à étudier.

Données. La composante Données du modèle DRI correspond aux moyens techniques mis en œuvre pour obtenir des informations sur le phénomène physique à étudier. Ces moyens techniques peuvent être les capteurs des objets connectés, pour surveiller en temps réel des paramètres environnementaux. Les agents embarqués peuvent également être utiles lorsqu'ils ajoutent une couche d'interprétation aux paramètres environnementaux. Cette interprétation peut consister en la mise en relation de plusieurs paramètres environnementaux pour obtenir une nouvelle information. Par exemple, des chercheurs ont implémenté des algorithmes d'apprentissage pour inférer l'état émotionnel de l'apprenant à partir de plusieurs paramètres différents (e.g. pouls, température de la peau) (voir section 4.2.3). Plus simplement, il peut s'agir d'algorithmes de vision artificielle pour reconnaître les objets dans une photo ou un flux vidéo, ou d'algorithmes de traitement du langage naturel pour la traduction ou faire de la synthèse vocale.

Représentations. La composante Représentations opère une médiation entre d'une part la visualisation des données collectées par les objets connectés et d'autre part les savoirs à apprendre. La représentation doit proposer une visualisation du phénomène à étudier en accord avec les savoirs scientifiques, sous la forme d'une courbe, d'un schéma, d'une image, d'un modèle ou d'une simulation. La Figure 5.3 présente une représentation de la lumière visible par l'humain, décomposée en plusieurs intensités de couleurs (e.g. violet, vert, rouge) variant en fonction de la lumière émise par une ampoule connectée.

Interactions. Au niveau de la composante Interactions, l'apprenant contrôle la représentation actualisée en temps réel soit par le biais de l'objet connecté soit *via* une action directe sur l'environnement.

L'apprenant est amené à interagir avec la représentation pour faire des observations, formuler des hypothèses et les tester afin de répondre à une problématique. L'objectif est que l'apprenant questionne et réévalue les représentations mentales qu'il s'est forgé à partir de l'expérience quotidienne et qui peuvent être erronées. Ces interactions doivent favoriser l'engagement cognitif et physique de l'apprenant, deux facteurs favorisant l'apprentissage humain.

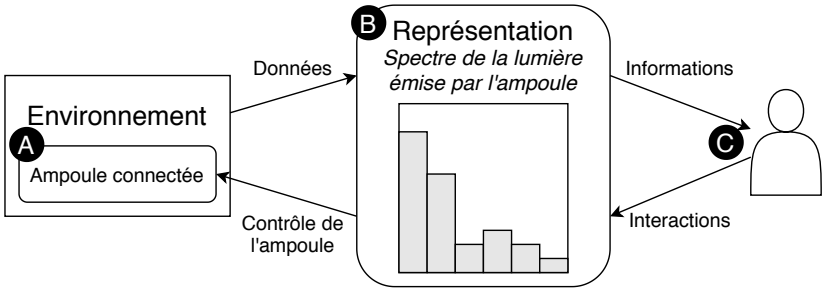


FIGURE 5.3 – **Visualisation du spectre d'une lumière.** A une ampoule connectée éclaire l'environnement, B la lumière émise est décomposée en intensités de couleur *via* les données d'un capteur, C l'apprenant observe les variations d'intensité et modifie l'éclairage en contrôlant l'ampoule.

En section 1.1.2, nous avons vu à partir des travaux de Dehaene (2018) que l'engagement cognitif est l'un des « piliers de l'apprentissage » permettant de stimuler les mécanismes d'apprentissage du cerveau. Cette implication cognitive peut être complétée par un engagement corporel dans le cadre d'activités pratiques et d'expérimentations. L'actualisation en temps réel de la représentation permet à l'apprenant d'observer rapidement les conséquences de ses actions. Cet aspect constitue un autre pilier de l'apprentissage : le retour sur erreur (Dehaene, 2018).

In fine, selon le modèle DRI et en accord avec la définition donnée plus haut, le dispositif de médiation des savoirs scientifiques devrait avoir les caractéristiques suivantes :

— l'utilisation du dispositif est encadrée selon une stratégie d'apprentissage actif : l'expérimentation et l'investigation ;

— l'apprenant a un rôle actif où il peut formuler des hypothèses, expérimenter et discuter avec ses pairs des résultats obtenus ;

— le dispositif propose une représentation du phénomène à étudier cohérente avec les savoirs scientifiques ;

— le dispositif propose un espace d'expérimentation contrôlé avec des éléments de guidage pour limiter l'effet contre-productif de l'autonomie ;

— le dispositif organise un ou plusieurs objets connectés sélectionnés en fonction de l'utilité de leurs capteurs et de leurs agents embarqués au regard des savoirs à apprendre.

La conception du dispositif peut s'appuyer sur plusieurs ressources techniques et logicielles, notamment afin de récupérer les données des capteurs.

Ressources d'apprentissage

En section 2.2.2, nous avons défini ce que sont les ressources d'apprentissage : tout objet, tangible ou numérique, qui peut être utilisé à des fins d'apprentissage. La Figure 5.4 synthétise les ressources qui ont été identifiées pour concevoir un dispositif d'apprentissage tel qu'il a été décrit dans la section précédente.

La ressource la plus élémentaire est l'objet connecté (voir Figure 5.4, Objet connecté), sélectionné en fonction de ces capteurs et de ces actionneurs pour observer et agir sur l'environnement. Le niveau suivant porte sur la récupération des données générées par les capteurs

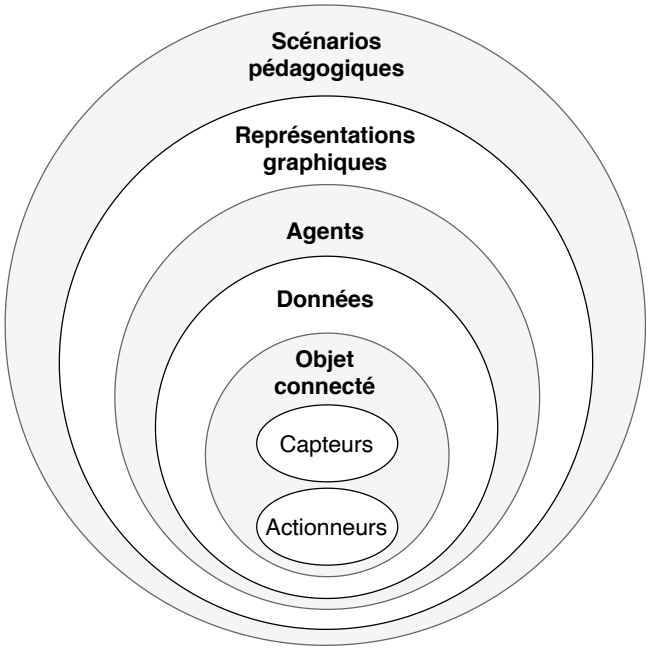


FIGURE 5.4 – **Ressources pour la conception de dispositifs d'apprentissage**.

des objets connectés (voir Figure 5.4, Données). Certains capteurs, à l'exemple de ceux pour le positionnement de l'objet dans l'espace (e.g. accéléromètre, gyromètre), sont courants et sont intégrés dans de nombreux objets connectés (e.g. smartphone, montre, tablette). D'autres capteurs sont plus rares, ils sont intégrés dans des objets connectés, notamment ceux spécialisés dans la santé (e.g. mesure de la température de la peau, tension), ou disponibles sous la forme de composants à assembler pour microcontrôleurs. Si pour les capteurs rares, il faut en passer par le développement d'une application sur-mesure, il existe de nombreuses applications mobiles dédiées aux capteurs courants dans les catalogues d'applications (e.g. App Store, Google Play).

La première catégorie d'application que l'on peut distinguer, parmi les plus simples, concerne les applications spécialisées dans un seul capteur en particulier ; des applications mono-capteur. Avec l'application, l'utilisateur peut visualiser les mesures prises par le capteur, de manière continue (en temps réel) ou à un instant T (un bouton permet de prendre une mesure comme l'on prendrait une photo). Dans certains cas, les applications mono-capteur représentent l'évolution des mesures sous la forme d'une courbe et permettent l'exportation des données collectées. L'utilisateur peut alors partager les données (et les envoyer par message) au format texte ou *via* une capture écran de l'application.

La seconde catégorie englobe les applications mobiles permettant de visualiser les mesures prises par les capteurs les plus couramment intégrés dans un smartphone ou une tablette. Tout comme les applications mono-capteur, les applications multi-capteurs représentent les données collectées dans un repère orthonormé et permettent d'exporter les mesures prises. Elles disposent également de fonctions plus avancées pour prendre une série de mesures pendant une durée déterminée (e.g. mesurer l'accélération pendant 5 minutes), d'enregistrer la série de mesures ou encore de créer un affichage personnalisé. Cette dernière fonctionnalité autorise l'utilisateur à sélectionner les capteurs dont il a besoin pour conduire une expérience afin d'afficher les mesures prises par ces capteurs sur un même écran. Enfin, dans certains

cas, l'application multi-capteurs propose de visualiser les mesures prises par un capteur après un traitement particulier. Par exemple, afficher les mesures prises par l'accéléromètre sans prendre en compte la pesanteur [12].

Au niveau suivant, après la collecte de données des capteurs, les ressources mobilisées concernent l'implémentation des agents embarqués dans les objets connectés (voir Figure 5.4, Agents). Il existe des outils pour se saisir des algorithmes d'apprentissage artificiel sans maîtriser les connaissances techniques. Par exemple, plusieurs bibliothèques « machine learning » (ML) sont aujourd'hui disponibles côté « client » : TensorFlow Lite ; Caffe2 ; Apple Core ML 3. Dans les « clouds », les plateformes Google Cloud ML, Microsoft Azure Machine Learning, IBM Watson ou encore Amazon ML fournissent des algorithmes de vision artificielle, de synthèse vocale ou de traitement du langage naturel [13]. Ces algorithmes peuvent être exploités sous la forme de services *via* des *Application Programming Interface* (API) dans des applications pour les voitures autonomes, la traduction automatique ou encore l'apprentissage humain.

Pour le niveau des représentations (voir Figure 5.4, Représentations graphiques), il existe des applications non pas directement dédiées à la visualisation des mesures prises par les capteurs, mais à la manipulation de représentations graphiques. Ces applications mathématiques permettent de positionner des points, de tracer des droites et des courbes, d'écrire des fonctions et de les visualiser dans un repère orthonormé. À l'instar des applications mono et multi capteurs, elles disposent également de fonctions pour partager les représentations graphiques effectuées.

Au niveau le plus haut, l'on trouve des ressources encadrant l'utilisation des applications précédemment citées selon un scénario pédagogique ou un tutoriel, créées par des enseignants souhaitant rendre réutilisables leurs expériences pédagogiques. Parmi les répertoires importants de scénarios pédagogiques et de tutoriels, on peut citer :

— les projets TRAaM 2017-2018 que nous avons déjà présentés : dans leurs rapports, les enseignants ont structuré leurs expériences pédagogiques sous la forme de scénarios pédagogiques ;

— les expérimentations pédagogiques du professeur Jeanjacquot qui sont partagées sur la page « Classe numérique » de l'Institut Français de l'Éducation [14] ;

— la plateforme OpenTP.fr et plus généralement les expériences pédagogiques menées par l'équipe de recherche « La Physique Autrement » (Université Paris-Saclay) [15] : les enseignants-chercheurs partagent sous la forme de tutoriels des expériences de physique faisables avec des objets connectés ;

— le site Smartphonique.fr où l'enseignant-chercheur en physique Ulysse Delabre (Université de Bordeaux) partage également sous la forme de tutoriels les travaux pratiques qu'il réalise avec ses étudiants.

L'objectif des enseignants à l'origine de ces scénarios pédagogiques et ces tutoriels est de

12. Cela permet, entre autres, d'avoir une accélération de 0 lorsque le smartphone est immobile plutôt qu'une accélération de 9,81g

13. Source : https://www.altexsoft.com/blog/datascience/comparing-machine-learning-as-a-service-amazon-microsoft-azure-google-cloud-ai-ibm-watson/. Consulté le 21 juillet 2020.

14. Source : http://acces.ens-lyon.fr/acces/classe/smartphones. Consulté le 16 juin 2020.

15. Source : http://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/. Consulté le 29 juillet 2020.

valoriser l'utilisation des smartphones à des fins pédagogiques en facilitant la reproduction de leurs expériences pédagogiques par d'autres enseignants. Cet effort de partage est intéressant dans la mesure où il renseigne sur les applications mobiles utilisables ou non, ce qui permet d'opérer un tri parmi la quantité disponible, et sur la manière dont elles ont été utilisées. On peut également noter que certains scénarios pédagogiques s'appuient sur des applications mobiles secondaires pour que les élèves puissent prendre des notes de leurs observations et communiquer entre eux et avec l'enseignant.

Dans la section suivante, nous décrivons l'ensemble de dispositifs d'apprentissage que nous avons conçu à partir de ces catégories d'applications mobiles et en s'inspirant des scénarios pédagogiques et tutoriels déjà réalisés.

5.2 Dispositifs LumIoT : médiation des savoirs autour de la lumière

Notre approche repose donc sur l'exploitation des données collectées par les capteurs des objets connectés et des informations extraites par des agents embarqués. L'objectif est d'utiliser ces moyens pour rendre « perceptibles » et intelligibles des concepts scientifiques abstraits et intangibles. Le modèle DRI a été élaboré pour rendre opérable cette approche : à partir des données de capteurs et des informations extraites, l'objet connecté génère une représentation avec laquelle l'apprenant peut interagir, soit *via* l'interface de l'objet connecté soit en agissant dans l'environnement.

Nous avons souhaité mener une expérimentation afin d'étudier les effets, les contraintes et les enjeux de cette approche de la médiation des savoirs scientifiques. En premier lieu, l'objectif était d'évaluer la faisabilité de la conception de dispositifs selon le modèle DRI. Dans cette optique, nous avons conçu un ensemble de dispositifs d'apprentissage baptisé LumIoT destiné à la découverte et à l'apprentissage des grandeurs photométriques. Nous présentons dans cette section les dispositifs LumIoT et leur conception puis, dans la dernière section de ce chapitre, nous exposons les résultats de l'expérimentation.

5.2.1 Lumière et grandeurs photométriques

> Le chat ouvrit les yeux, le Soleil y entra
> Le chat ferma les yeux, le Soleil y resta
> Voilà pourquoi le soir, quand le chat se réveille,
> J'aperçois dans le noir deux morceaux de Soleil
>
> – Maurice Carême, Le Chat et le Soleil,
> *L'Arlequin* (1970)

La lumière est le thème que nous avons choisi pour la conception des dispositifs d'apprentissage. Ce thème est adapté à notre recherche car, la lumière est un phénomène physique intangible dont la nature et les effets sont difficilement accessibles aux sens humains.

Depuis l'Antiquité, avec les premières idées de Platon et d'Aristote sur la vision [16], et

16. Les philosophes de l'Antiquité se sont intéressés à la vision plutôt que directement à la lumière (Maitte, 2016). Selon Empédocle et Platon, la vision est possible, car les yeux projettent un feu qui éclaire notre

jusqu'aux travaux récents sur la physique quantique, nombreuses ont été les découvertes sur la lumière. Au fil des découvertes, les travaux sur la lumière ont convergé avec ceux cherchant à créer des instruments pour rendre intelligibles l'infiniment petit et l'infiniment lointain. Les découvertes que Galilée rapporte dans *Le Messager des Étoiles*, obtenues grâce à son Instrument, illustrent cette convergence. À l'instar du Chat de Carême, seuls nos yeux permettent de percevoir et d'appréhender la lumière. Or, comme nous l'expliquons dans les paragraphes suivants, l'expérience première apportée par les yeux peut entraîner des représentations erronées par rapport aux savoirs scientifiques.

Représentations sur la lumière

La lumière est un phénomène étudié par plusieurs disciplines dont la physique, la physiologie, la psychologie, les neurosciences, la chimie ou encore l'art. D'un point de vue physique, qui nous intéresse en particulier dans cette recherche, la lumière est soit comprise comme une onde électromagnétique soit comme un ensemble de corpuscules (Feynman, 1987) [17]. Lorsqu'il s'agit d'une onde électromagnétique, la lumière est caractérisée par une longueur d'onde, c'est-à-dire la « *distance parcourue [en nano-mètres] par l'onde pendant une période d'oscillation* » [18]. Des longueurs d'onde 400 à 700 nano-mètres, ce que l'on nomme le spectre de la lumière visible, la lumière produit sur les yeux des sensations de couleurs.

Plusieurs études ont été menées pour mieux comprendre les représentations mentales des élèves et des étudiants à propos de la lumière et des couleurs. Ces études s'inscrivent dans le champ de recherche de la didactique des sciences et cherchent à identifier les représentations erronées des apprenants pour adapter ensuite les pratiques pédagogiques (Anderson & Smith, 1986). Certaines des représentations erronées des apprenants coïncident avec des théories scientifiques qui ont été élaborées au cours du temps (Feynman, 1987 ; Feher & Meyer, 1992).

Dans leur étude, Feher et Meyer (1992) rapportent que les erreurs des apprenants font par exemple écho à la théorie des couleurs de Aristote. Selon lui, la lumière blanche est pure et sans mélange tandis que les autres couleurs sont créées par des mélanges jusqu'au noir, le plus haut degré de mélange (Maitte, 2016). Les auteurs notent également des explications proches de celles formulées par Goethe dans son *Traité des couleurs* (1810) affirmant que la couleur est un obscurcissement de la lumière (Feher & Meyer, 1992) : par exemple, la couleur jaune est de la lumière plus sombre que celle de la couleur bleue. Toutefois, ces théories ont été rejetées au profit de la théorie développée par Newton (2015) établissant que la lumière blanche est formée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, c'est-à-dire du spectre visible de la lumière.

Anderson et Smith (1986) ont mené plusieurs études sur deux années auprès d'élèves de neuf à onze ans pour interroger leurs représentations sur la lumière et sur l'origine des couleurs. En interrogeant les élèves, les auteurs remarquent qu'ils tendent à penser que la lumière n'est pas en mouvement et ne rebondirait qu'uniquement contre un miroir et non pas

environnement. Pour Aristote, la lumière est essentielle pour distinguer les couleurs et donc pour percevoir les objets qui nous entourent.

17. La Dualité onde-corpuscule signifie que la lumière possède à la fois des propriétés propres aux ondes électromagnétiques et des propriétés corpusculaires. Le choix entre l'onde ou les corpuscules dépend du phénomène étudié et des instruments d'observation utilisé.

18. Source : https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-longueur-onde-4575/. Consulté le 17 juin 2020.

contre d'autres objets. Pour les élèves, la lumière éclaire les objets et l'environnement, mais n'est pas responsable de la perception des couleurs de ces mêmes objets [19]. Des études plus récentes font état des mêmes résultats en termes de représentations erronées (e.g. Haagen-Schützenhöfer (2017), Gallegos-Cázares, Flores-Camacho, et Cadlerón-Canales (2009)).

En réalité, la lumière est toujours en mouvement et se déplace en lignes droites, à une vitesse constante [20]. La couleur d'un objet dépend de la composition de la lumière qu'il reçoit, de la partie de la lumière absorbée, de celle qui est réfléchie dans toutes les directions et, enfin, de la sensibilité des yeux. Par exemple, une feuille d'arbre bien verte absorbe toutes les couleurs de la lumière blanche du Soleil sauf le vert. Pour compléter cette explication, ajoutons que ce qui nous apparaît comme une couleur, à l'exemple du vert de la feuille d'arbre, résulte de l'interprétation d'une longueur d'onde spécifique du rayonnement lumineux. La lumière réfléchie par une feuille a une longueur d'onde comprise en 510 nm et 541 nm que nous interprétons comme une couleur verte.

Galili et Hazan (2000) ont conduit des études similaires sur les représentations des élèves et étudiants à propos de la lumière. Selon les auteurs et en accord avec les postulats que nous avons énoncés en première section de ce chapitre, les représentations erronées sont dues aux limites de nos sens qui ne nous permettent pas d'appréhender la lumière en termes de vitesse, de longueur d'onde ou encore de pression. Ces exemples de représentations erronées montrent que la lumière est un candidat idéal pour notre approche visant à augmenter les sens de l'apprenant.

Savoirs à apprendre

Afin de concevoir l'ensemble de dispositifs d'apprentissage LumIoT, une série de concepts précis ont été choisis parmi les savoirs scientifiques portant sur la lumière. Le choix de ces concepts est d'abord le résultat d'une recherche sur les possibilités offertes par les capteurs et les objets connectés existants : quels capteurs et objets connectés permettent d'illustrer quels savoirs ? Ajouté à cela, l'expérimentation que nous avons menée a été conduite auprès d'étudiants en première année du Master 1 « Produits et Services Multimédia » (Master 1 PSM) de l'UFR STGI de l'Université de Franche-Comté, à Montbéliard. Le programme de l'unité d'enseignement Fondements du Multimédia que les étudiants suivent comporte une partie sur la lumière et plus particulièrement la photométrie qui étudie les rayons lumineux par rapport à la perception humaine.

Ainsi, les dispositifs d'apprentissage LumIoT ont été conçus autour de concepts liés à la photométrie : les grandeurs photométriques et la température de couleur. Les grandeurs photométriques sont des quantifications de la lumière, dans certaines conditions, utilisées pour ajuster les éclairages (voir Figure 5.5). Les cinq concepts qui ont été retenus sont les suivants :

— Flux lumineux : puissance lumineuse d'une source dans toutes les directions ;

— Intensité lumineuse : flux transmis uniformément dans un cône d'angle solide unitaire ;

19. Notons que cette représentation erronée est renforcée par le langage lui-même : nous disons que l'objet *est* rouge tel que nos yeux nous le font apparaitre.

20. La vitesse de la lumière est de 299 792 458 m/s. Source : https://www.wikidata.org/wiki/Q2111. Consulté le 29 juillet 2020.

— Éclairement : le flux reçu par unité de surface de l'élément éclairé ;

— Luminance : l'intensité lumineuse fournie par l'unité de surface apparente d'une lumière (re)transmise par une surface éclairée ;

— Température de couleur : mesure caractérisant la couleur apparente d'une source lumineuse.

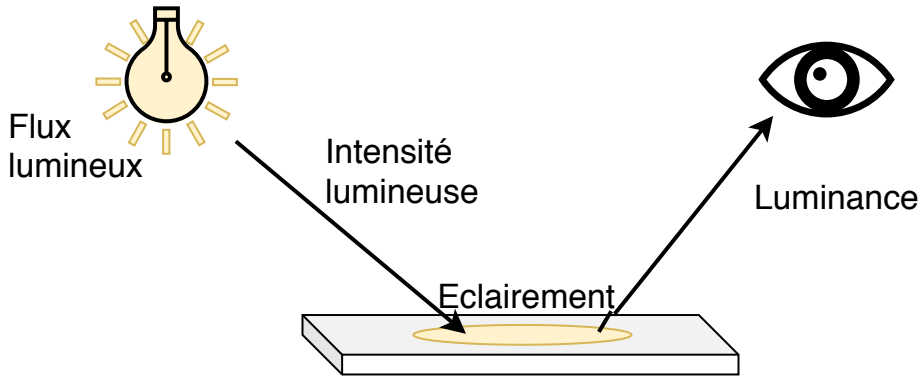


FIGURE 5.5 – **Grandeurs photométriques**.

Le flux lumineux est la grandeur servant de socle pour formuler les autres grandeurs photométriques. Il s'agit de la puissance lumineuse d'une source (e.g. Soleil, lampe de chevet, lampe torche) telle qu'elle est perçue par l'œil humain. Les yeux ont une sensibilité particulière permettant notamment d'interpréter certaines longueurs d'onde de la lumière en termes de couleur. Les récepteurs de l'œil humain ne sont pas sensibles avec la même intensité selon la longueur d'onde : par exemple, l'œil humain n'est pas sensible aux longueurs d'onde correspondant à l'ultraviolet et à l'infrarouge [21]. En d'autres termes, le flux lumineux caractérise la puissance d'une source lumineuse dans toutes les directions moyennant la sensibilité de l'œil. Enfin, le flux lumineux s'exprime en lumen (lm) et fait partie des indications inscrites sur les ampoules par les fabricants aux côtés du voltage et de la température de couleur.

Le flux lumineux informe sur la puissance d'une source lumineuse dans toutes les directions cependant, il peut être utile de connaître le flux lumineux qui vient frapper une surface dans une direction donnée. L'intensité lumineuse quantifie la capacité d'éclairement d'une source de lumière selon un cône de lumière, c'est-à-dire une partie du flux lumineux. Pour calculer l'intensité lumineuse, exprimée en candela (cd), il faut donc diviser la surface de la sphère lumineuse, correspondant au flux lumineux dans toutes les directions, en portions unitaires. Le stéradian (sr) est la mesure de l'angle solide équivalent à une division unitaire de la surface de la sphère de sorte qu'une candela est égale à un lumen par stéradian, soit $1cd = \frac{1lm}{1sr}$.

Trivialement, il est possible de calculer l'intensité lumineuse (en candela) à partir du flux lumineux (en lumen) si l'on connaît l'angle de diffusion de la source [22] et en admettant que la diffusion de la lumière soit homogène. L'angle solide en stéradian se calcule à partir de l'angle

21. Ajoutons que la sensibilité des yeux varie également en fonction de la luminosité. Les yeux sont plus sensibles aux changements de faible luminosité que de haute luminosité. Par exemple, la perception d'un « gris moyen » ne correspond pas à 50% de noir + 50% de blanc comme on pourrait s'y attendre, mais à 18% de noir + 82% de blanc. Source : http://www.blog-couleur.com/?qu-est-ce-que-la-luminosite-95. Consulté le 29 juillet 2020.

22. Pour illustrer, imaginons une ampoule innovante qui serait une sphère parfaite émettant de la lumière dans toutes les directions. Une telle boule lumineuse aurait alors un angle de diffusion de 360°. Les ampoules contemporaines ont des angles de diffusion plus ou moins larges : 160°, 90°, 30°, etc.

de diffusion (angle) en degrés de la manière suivante : $sr = 2\pi(1 - \cos\frac{angle}{2})$. Sachant cette formule, l'intensité lumineuse est obtenue à partir du flux lumineux selon l'équation 5.1.

$$Intensité\ lumineuse\ (cd) = \frac{Flux\ lumineux\ (lm)}{Angle\ solide\ (sr)}$$

Équation 5.1 – Intensité lumineuse

L'éclairement est la quantité de lumière reçue par une surface éclairée en fonction de la distance depuis la source de lumière et de l'orientation de cette source. Tout comme les autres grandeurs photométriques, les mesures d'éclairement, exprimées en lux, sont fonction de la sensibilité de l'œil humain. Contrairement aux autres grandeurs photométriques, l'éclairement est mesurable directement grâce à l'effet photoélectrique, c'est-à-dire la réaction de la matière aux rayonnements lumineux. En photographie, l'éclairement est mesuré à l'aide d'un luxmètre (aussi appelé posemètre) afin de déterminer l'exposition optimale de la scène à prendre en photo. La mesure d'éclairement renseigne le photographe sur les réglages à effectuer en termes d'ouverture de diaphragme (quantité de lumière) et de temps de pose (durée pendant laquelle la lumière est captée par l'appareil). Ces deux réglages influencent la quantité de lumière qui sera reçue par la surface sensible de l'appareil et donc la luminosité de la scène.

Lorsque la surface éclairée et la source lumineuse sont alignées sur un même axe, la relation entre l'éclairement et la distance suit la Loi en carré inverse. Selon cette loi, l'éclairement reçu par la surface éclairée est inversement proportionnel au carré de la distance depuis la source de lumière. Par exemple, si une surface est reculée deux fois plus loin, passant de 2 à 4m, alors l'éclairement est quatre fois plus faible. La Figure 5.6 est un exemple de loi en carré inverse exprimant la relation entre l'éclairement et la distance, qui se calcule avec l'équation 5.2.

$$Eclairement\ (lux) = \frac{1}{distance^2}$$

Équation 5.2 – Eclairement

La luminance est la seule grandeur photométrique directement perceptible par l'humain, car il s'agit de la sensation visuelle d'éclairement d'une surface. Exprimée en candela par mètre carré (cd/m^2), la luminance caractérise l'intensité lumineuse réfléchie par une surface en direction de l'œil de l'observateur. Ainsi, la luminance ne dépend pas de la distance, mais est influencée par la surface (e.g. couleur, niveau de réflexion, type de matériau). La luminance est par exemple utile pour mesurer l'éblouissement [23].

Enfin, le dernier concept que nous allons traiter, la température de couleur, n'est pas une grandeur photométrique, mais caractérise les sources de lumière. Exprimée en kelvins, la température de couleur renseigne sur la couleur apparente d'une source de lumière par rapport à un corps noir. Ce dernier est un modèle mathématique décrivant un matériau idéal absorbant intégralement les rayonnements lumineux — apparaissant donc complète-

23. La luminance de la surface du Soleil est estimée à environ 1 650 000 000 cd/m^2.

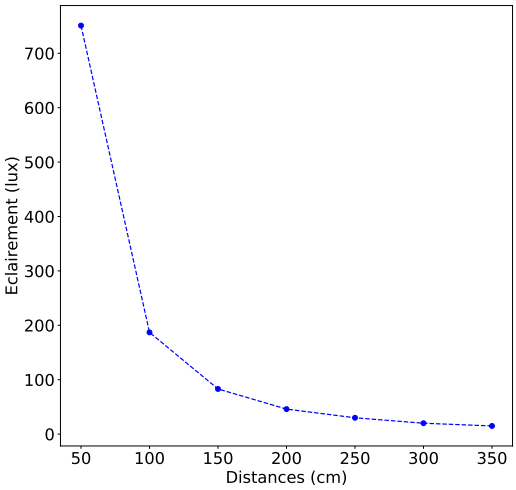


FIGURE 5.6 – **Exemple de loi en carré inverse**.

ment noir — et n'émettant de la lumière que lorsqu'il est chauffé. Le spectre lumineux émis par le corps noir varie en fonction de la température en kelvins à laquelle il est chauffé. Une température de couleur élevée, entre 7000K et 12000K, donne lieu à une couleur apparente bleutée tandis qu'une température faible, entre 1000K et 5000K, produit une couleur apparente rouge-orangé. Ce phénomène va à l'encontre de l'intuition selon laquelle un matériau chaud apparaîtrait rouge et un matériau froid bleu. Ainsi, le spectre lumineux d'une source de lumière varie en fonction de sa température de couleur.

5.2.2 Conception et ressources

L'ensemble de dispositifs d'apprentissage LumIoT a été conçu pour permettre à l'apprenant d'effectuer des observations et des manipulations en lien avec les grandeurs photométriques (e.g. flux lumineux, éclairement, intensité lumineuse, luminance) et la température de couleur.

LumIoT est constitué de quatre sous-dispositifs portant sur une question principale liée à l'un des savoirs à apprendre (voir Tableau 5.1). Les dispositifs sont indépendants les uns des autres de sorte que l'apprenant puisse utiliser un ou plusieurs des dispositifs sans contraintes d'ordre et de connaissances pré-requises.

Nom	Sujet	Question(s)
Pram	Propriétés d'une ampoule	À quoi correspondent les indications « lm, K, W » sur une ampoule ? Qu'est-ce que le flux lumineux par rapport à l'intensité lumineuse et l'éclairement ?
Ecla	Éclairement	Comment varie la lumière reçue par une surface en fonction de la distance de la source de lumière ?
Lumi	Luminance	Que désigne la luminance ?
Teco	Température de couleur	Pour une ampoule, à quoi correspond visuellement une température de couleur exprimée en kelvins ?

Tableau 5.1 – **Dispositifs d'apprentissage LumIoT**

À l'aide des dispositifs, l'apprenant peut effectuer des observations et des manipulations pour finalement répondre à la question principale de chaque dispositif. Chaque dispositif

comporte une fiche de manipulations destinée à guider l'apprenant dans ses manipulations et lui permettant de garder une trace de ses observations. Le lecteur trouvera en annexe B les fiches propres à chaque dispositif. La fiche accompagnant le dispositif apporte des éléments de guidage pour mener les observations et les manipulations dont elle permet de garder une trace. Ainsi, chaque dispositif requiert une réflexion de l'apprenant sur la manière dont il peut utiliser les outils pour répondre à la question principale et aux questions subsidiaires.

Nous avons conçu l'ensemble de dispositifs LumIoT à partir d'objets physiques, d'applications mobiles et d'objets connectés. Ces derniers ont été choisis pour leurs liens entre, d'une part, leurs capteurs et leurs actionneurs et, d'autre part, les savoirs à apprendre que nous avons présenté précédemment. Concernant les capteurs, la plupart des objets connectés disposant d'un écran intègrent un capteur de luminosité ambiante (pour régler la luminosité de l'écran) ou un capteur photographique (pour la caméra) [24]. Nous avons également utilisé un capteur de lumière visible sous la forme de composants pour microcontrôleurs Arduino. Quant aux actionneurs, nous avons détourné de leurs fonctions standards des ampoules connectées en développant des applications sur mesure pour nos dispositifs.

Dispositif Pram, « Propriétés d'une ampoule »

Le dispositif Pram, pour « Propriétés d'une ampoule », porte sur la distinction entre les trois grandeurs photométriques que sont le flux lumineux, l'intensité lumineuse et l'éclairement. La question servant de point de départ aux manipulations et observations est : *à quoi correspondent les signes indicatifs « lm », « K » et « W » présents sur une ampoule ou son emballage ? Qu'est-ce que le flux lumineux d'une ampoule, par rapport à son intensité lumineuse ?*

Le dispositif Pram comporte deux parties : l'une dédiée à la compréhension des indications présentes sur une ampoule (e.g. « lm », « K », « W ») et l'autre permettant de distinguer le flux lumineux de l'intensité lumineuse et de l'éclairement. Dans le cadre de la première partie, à l'aide du dispositif Pram, l'apprenant prend en photo une ampoule et obtient des informations contextuelles portant sur les propriétés de l'ampoule (voir Figure 5.7). Parmi ces propriétés figure le flux lumineux de l'ampoule, indiqué par les signes « lm » sur l'ampoule.

Lors de la seconde partie, le dispositif Pram permet à l'apprenant de visualiser en réalité augmentée des représentations du flux lumineux, de l'intensité lumineuse et de l'éclairement (voir Figure 5.7, partie droite). Ces représentations graphiques sont superposées à une lampe éclairant en direction d'une surface proche (e.g. un mur). Pour saisir les différences entre les différentes grandeurs photométriques, l'apprenant identifie le flux lumineux de l'ampoule, le convertit en flux lumineux à l'aide d'une application puis calcule l'éclairement sur la surface en posant l'équation sur papier (voir Équation 5.2).

Au niveau matériel, le dispositif Pram est composé d'une ampoule normale, d'une lampe sur laquelle l'ampoule peut se visser, d'une règle ainsi que de marqueurs pour réalité augmentée. Pour chaque dispositif, l'apprenant peut utiliser son smartphone ou sa tablette personnelle cependant, pour prévenir les éventuels problèmes matériels et/ou logiciels, une tablette

24. Le capteur photographique convertit le rayonnement lumineux en signal électrique qui est ensuite numérisé et traité pour générer une image.

25. Crédit : Pays de Montbéliard Agglomération.

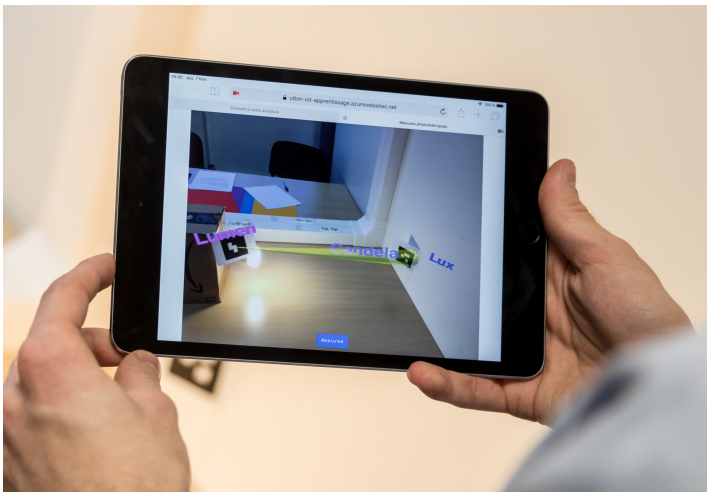


FIGURE 5.7 – **Application *GrandeursPhotométriques* du Dispositif Pram**[25].

(iPad) est disponible. Au niveau logiciel, nous avons utilisé trois applications : Calculs d'éclairement, *ConnaitreMonAmpoule*, *GrandeursPhotométriques*[26].

Calculs d'éclairement est une application mobile existante (pour iOS et Android) permettant d'effectuer des conversions de mesures entre des grandeurs photométriques (e.g. calculer l'intensité lumineuse à partir du flux lumineux). L'application affiche uniquement le résultat du calcul, sans donner l'équation, cependant elle est intéressante car, pour chaque calcul, l'utilisateur doit saisir les paramètres nécessaires (voir Figure 5.8). Par exemple, pour calculer l'intensité lumineuse à partir du flux lumineux, l'utilisateur doit saisir le flux lumineux ainsi que l'angle de diffusion de l'ampoule.

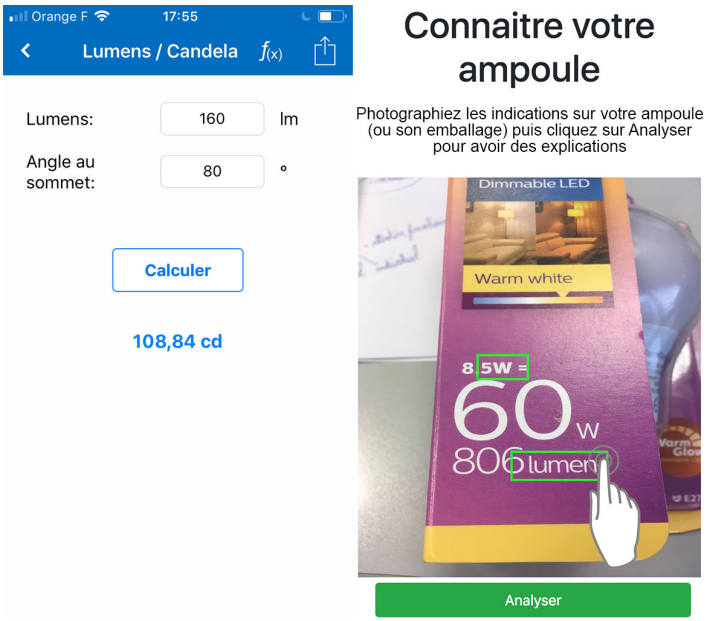


FIGURE 5.8 – **Applications mobiles du dispositif Pram**. À gauche : calcul de l'intensité lumineuse à partir du flux lumineux avec l'application Calculs d'éclairement. À droite : avec l'application *ConnaitreMonAmpoule*, l'utilisateur analyse la photo d'une ampoule par un SIA puis il peut cliquer sur les encadrés verts pour obtenir des informations.

26. Nous mettons en italique les applications mobiles que nous avons développées pour les différencier des applications existantes.

Les deux autres applications, *ConnaitreMonAmpoule*[27] et *GrandeursPhotométriques*, ont été développées par nous même et spécifiquement pour le dispositif Pram. L'application *ConnaitreMonAmpoule* permet de détecter dans la photo d'une ampoule, ou de l'emballage d'une ampoule, les indications « lm », « K » et « W » et affiche des explications pour chacune. Il s'agit d'une application web accessible *via* un QR code présent sur la fiche de l'atelier. Elle a été développée en utilisant le modèle de vision artificielle mis en service par la plateforme Google Cloud ML afin de détecter les éléments textuels dans une photo[28]. L'utilisateur prend une photo de l'ampoule, ou de son emballage, et lance l'analyse avec l'application *ConnaitreMonAmpoule*. L'application analyse la photo, identifie les indications relatives aux propriétés d'une ampoule et affiche la photo à l'utilisateur tout en mettant en exergue les indications identifiées. L'utilisateur peut alors cliquer sur l'une des indications pour obtenir des explications.

La seconde application, *GrandeursPhotométriques*, a été développée en collaboration avec Liviu Cotfas, Maître de conférences au département d'informatique et de cybernétique économique de l'Université de Bucarest. Cotfas a été chercheur postdoctoral au sein du laboratoire ELLIADD aux mois de septembre et d'octobre 2018. Accessible *via* un QR code présent sur la fiche du dispositif Pram, il s'agit d'une application web réalisée avec le framework Javascript AR.js permettant de créer des applications de réalité augmentée. L'application *GrandeursPhotométriques* permet de visualiser les grandeurs photométriques en réalité augmentée : le flux lumineux au niveau de l'ampoule, l'intensité lumineuse sous la forme d'un cône, l'éclairement sur une surface. Pour chaque grandeur photométrique, l'application indique son unité et permet d'y ajouter une valeur : par exemple, afficher 160 lm au lieu de « lumen ».

À l'aide des objets physiques (e.g. ampoule, règle) et des applications mobiles, les apprenants avaient les outils nécessaires pour répondre à la question principale du dispositif Pram ainsi que les questions subsidiaires présentes sur la fiche.

Dispositif Ecla, « Éclairement »

Le dispositif Ecla, pour « Éclairement », porte sur la mesure de l'éclairement et les facteurs qui l'influencent, notamment la distance depuis la source de lumière. La question initiale est alors la suivante : *la quantité de lumière reçue par une surface est appelée Éclairement (Lux). Quels facteurs influencent l'éclairement ? Comment varie l'éclairement en fonction de la distance ?*

En premier lieu, l'objectif du dispositif Ecla est d'amener les apprenants à formuler des hypothèses, à observer et à expérimenter afin d'identifier les facteurs qui semblent influencer la mesure de l'éclairement. Concrètement, les apprenants doivent mesurer l'éclairement sur une surface en faisant varier les conditions d'éclairage à l'aide d'une lampe (voir Figure 5.9). Deuxièmement, le but du dispositif Ecla est aussi l'étude de l'influence sur l'éclairement de la distance entre la surface éclairée et la source de lumière. Pour cela, les apprenants sont amenés à prendre des mesures à différentes distances de la source de lumière puis à les rapporter dans un repère orthonormé. Ensuite, il s'agissait de comparer les mesures obtenues en pratique,

27. Le code de l'application est consultable dans l'annexe D.2.

28. Google intègre ce modèle de vision artificielle dans son application Google Translate afin de traduire les textes présents dans une photo. Sources : https://cloud.google.com/vision/docs/ocr?hl=fr, https://translate.google.com/intl/fr/about/. Consulté le 30 juillet 2020.

à l'aide d'un objet connecté comme instrument de mesure, avec des mesures calculées en théorie, en appliquant l'équation 5.2.

FIGURE 5.9 – **Utilisation du dispositif Ecla par des étudiants du Master 1 PSM**. À gauche : mesure de l'éclairement à partir du capteur de la caméra d'un iPad [29]. À droite : prises de mesures de l'éclairement à différentes distances par des étudiants.

Concernant le matériel, le dispositif Ecla comporte une lampe, une ampoule connectée Philips Hue [30], deux tablettes iPad, un mètre pour mesurer la distance depuis la source de lumière et des *posts-it* pour garder une trace des endroits où les mesures ont été prises.

Au niveau logiciel, nous avons développé l'application iOS *Lumière&Couleurs* afin que l'apprenant puisse contrôler l'ampoule connectée et changer sa couleur et son intensité lumineuse (voir la Figure 5.10 et l'annexe D.1 pour consulter le code de l'application). Pour cela, nous avons utilisé le kit de développement fourni par Philips permettant de créer des applications mobiles personnalisées pour contrôler les ampoules Hue. L'application *Lumière&Couleurs* n'étant pas disponible sur l'App Store, celle-ci était préinstallée sur les iPad accompagnant chaque dispositif [31].

La mesure de l'éclairement avec un objet connecté est opérée soit *via* le capteur de luminosité destiné à ajuster l'éclairage de l'écran tactile soit par le biais de la caméra. Ce second cas concerne principalement les applications iOS, car Apple restreint l'accès au capteur de luminosité pour des raisons de sécurité [32]. Dans les deux cas, l'utilisateur pointe l'objet connecté vers la source de lumière afin de mesurer l'éclairement qui correspond alors à la quantité de lumière reçue par la surface sensible du capteur.

De nombreuses applications mobiles sont accessibles depuis les catalogues App Store et Google Play cependant, les mesures prises sont-elles suffisamment fiables pour être utilisées à des fins d'apprentissage ? Les travaux de Sans et de ses collègues montrent que les données du capteur de luminosité peuvent être utilisées pour étudier le mouvement oscillatoire (Sans

29. Crédit : Pays de Montbéliard Agglomération.

30. Nous disposions d'un pack de trois ampoules connectées de type E27 de la marque Philips Hue. Les ampoules sont connectées via la technologie de communication sans-fil ZigBee à un Bridge lui-même relié à un réseau local et à internet par Ethernet. Le Bridge est une passerelle faisant circuler les instructions émises par l'utilisateur depuis une application mobile vers les ampoules connectées. Source : https://www.amazon.fr/Philips-D%C3%A9marrage-Ambiance-Inclus-Connect%C3%A9es/dp/B01LZ8QYPI/ref=sr_1_34?__mk_fr_FR=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&qid=1596101540&sr=8-34. Consulté le 30 juillet 2020.

31. La principale raison est que *Lumière&Couleurs* a été créée uniquement pour conduire notre expérimentation, dans un environnement contrôlé. Rendre l'application accessible à tous via l'App Store nécessiterait un effort de développement supplémentaire pour assurer son fonctionnement dans des conditions variables.

32. Source : https://developer.apple.com/forums/thread/99499?answerId=303446022. Consulté le 30 juillet 2020.

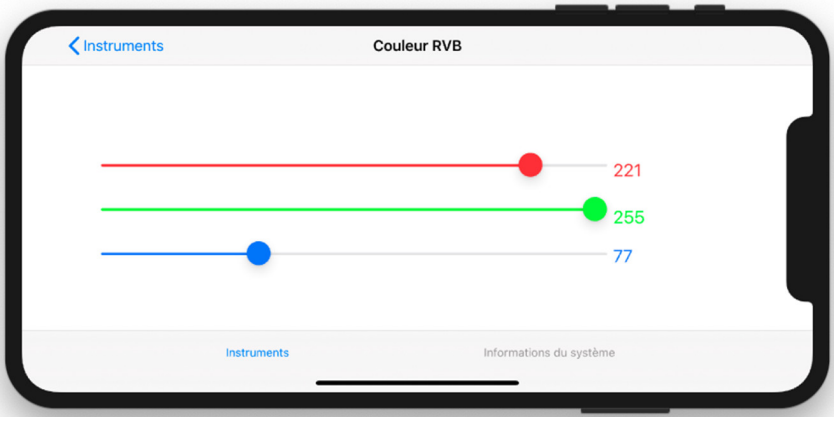


FIGURE 5.10 – **Application mobile *Lumière&Couleurs***. Écran permettant de modifier la couleur apparente de la lumière émise par une ampoule connectée en créant la couleur à partir du rouge, du vert et du bleu.

et al., 2013) ou pour déterminer l'efficacité lumineuse d'une source (Sans et al., 2017). Ding et al. (2018) ont créé un spectromètre basé sur le capteur de la caméra d'un smartphone dont la précision pourrait autoriser une utilisation dans le domaine de la santé. De notre côté, nous ne nous intéressons pas tant à la précision des valeurs de l'éclairement qu'à leur évolution en fonction de la distance selon la loi en carré inverse. Par conséquent, nous avons testés plusieurs applications mobiles en comparant les mesures prises entre elles et avec les valeurs attendues en appliquant l'équation 5.2. À partir de ces tests, nous avons choisi les applications mobiles LUX Light Meter FREE pour iOS [33] et Lux Light Meter Free pour Android [34].

Enfin, l'application Grapheur de Geogebra [35], pour iOS et Android, a été utilisée pour rapporter les mesures d'éclairement dans un plan orthonormé, avec la distance en ordonnée et l'éclairement en abscisses.

Ainsi, dans le cadre de ce dispositif, les apprenants avaient à disposition les outils pour (i) modifier les conditions d'éclairage, grâce à *Lumière&Couleurs*, (ii) mesurer l'éclairement (iii) créer une courbe avec les mesures.

Dispositif Lumi, « Luminance »

Le dispositif Lumi, pour « Luminance », est dédié à la compréhension de la luminance et de son rôle pour la prise de photos. La question de départ était : *à quoi correspond la luminance ? Quel est son lien avec la prise de vue ?*

Dans un premier temps, les apprenants utilisent l'appareil photo d'une tablette en observant les paramètres sélectionnés automatiquement en fonction de la scène (voir Figure 5.11). Le paramétrage automatique par défaut de l'appareil photo a pour but d'obtenir une photo correctement exposée ; une photo ni trop claire, ni trop sombre. Pour équilibrer l'exposition d'une photo, l'appareil photo ajuste automatiquement deux principaux paramètres : le temps

33. Source : https://apps.apple.com/fr/app/lux-light-meter-free/id1171685960?l=en. Consulté le 30 juillet 2020.
34. Source : https://play.google.com/store/apps/details?id=com.doggoapps.luxlight. Consulté le 30 juillet 2020.
35. Source : https://www.geogebra.org/m/dQBDvdAE. Consulté le 30 juillet 2020.

de pose et l'ouverture du diaphragme [36]. Le temps de pose détermine la durée pendant laquelle le capteur de l'appareil est exposé à la lumière tandis que l'ouverture contrôle la quantité de lumière qui parvient au capteur. Par exemple, les apprenants peuvent observer que lorsque la scène est une surface blanche, donc renvoyant beaucoup de lumière, les paramètres de l'appareil photo sont ajustés afin de limiter la quantité de lumière captée.

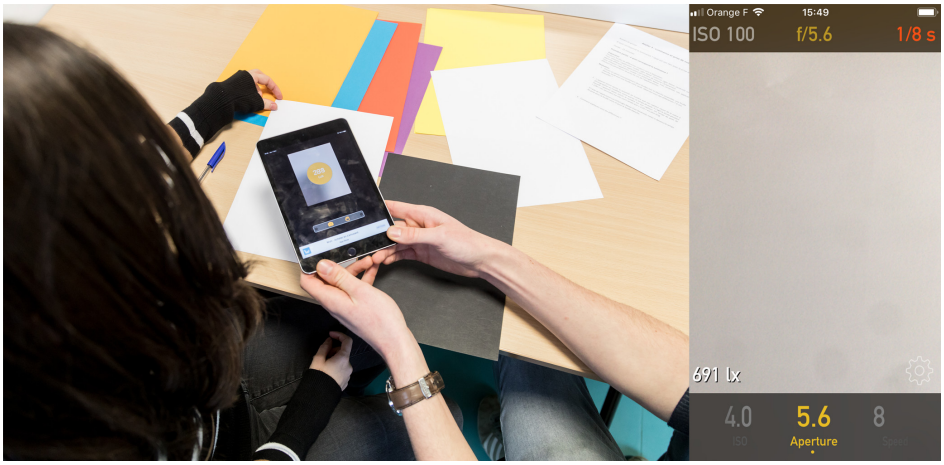


FIGURE 5.11 – **Utilisation du dispositif Lumi**. À gauche : utilisation du dispositif Lumi par des étudiants du Master 1 PSM [37]. À droite : Application mobile Lux affichant des paramètres de l'appareil photo lorsque la scène est blanche.

Dans un second temps, l'objectif du dispositif Lumi était de comparer les différences entre la luminance, obtenue en mesurant la quantité de lumière renvoyée par une surface, et l'éclairement, la quantité de lumière reçue par une surface. Dans le premier cas, il s'agit de mesurer la lumière incidente sur une surface et dans le second cas, c'est la lumière réfléchie qui est mesurée. L'on pouvait observer que les différences varient en fonction des surfaces éclairées et, dans le cadre de l'atelier, en particulier selon la couleur des surfaces.

Le dispositif Lumi est composé de feuilles de couleur (e.g. blanche, noire, orange, bleue) représentant les surfaces à prendre en photo ainsi que de deux tablettes iPad. Ces dernières permettaient à l'apprenant de mesurer l'éclairement avec les applications présentées plus haut ainsi que d'observer le paramétrage automatique de la caméra en fonction de la scène. Les applications mobiles Lux pour iOS [38] et Light Meter Free pour Android [39] ont été utilisées pour voir les paramètres de la caméra.

Ainsi, les apprenants avaient à disposition des outils pour observer l'effet de différentes surfaces sur la prise de vue et pour comparer les mesures de luminance et d'éclairement dans des conditions variées.

36. Le temps de pose est exprimé en secondes (e.g. 1/125 pour un temps court, 1/4 pour un temps long) et l'ouverture du diaphragme est indiquée par le signe « f/N » où, contrairement à l'intuition, plus N est grand (e.g. f/22) plus l'ouverture est petite. Source : https://www.commentcamarche.net/faq/32511-temps-d-exposition-photo-les-bases. Consulté le 30 juillet 2020.
37. Crédit : Pays de Montbéliard Agglomération.
38. Source : https://apps.apple.com/fr/app/lux-professional-light-meter-for-film-photography/id926139057. Consulté le 30 juillet 2020.
39. Source : https://play.google.com/store/apps/details?id=com.willblaschko.android.lightmeterv2.free. Consulté le 30 juillet 2020.

Dispositif Teco, « Température de couleur »

Le dispositif Teco, pour « Température de couleur », est destiné à la compréhension du concept de température de couleur d'une ampoule. Ainsi, la question initiale était : *à quoi correspond visuellement la température de couleur d'une ampoule ?*

La température de couleur fait partie des caractéristiques indiquées sur les ampoules et déterminent, entre autres, l'ambiance créée par l'ampoule : chaleureuse si la température de couleur est faible ; froid si la température de couleur est forte. L'objectif du dispositif Teco est que les apprenants comprennent ce que signifie l'indication de température de couleur, exprimée en kelvins, sur une ampoule. *Primo*, le dispositif permet de visualiser concrètement la couleur apparente de la lumière émise par l'ampoule en fonction de son nombre de kelvins. *Secundo*, les apprenants pouvaient observer que le spectre de la lumière émise par l'ampoule varie en fonction de la température de couleur, donc du nombre de kelvins. En accord avec le modèle mathématique du corps noir, la température de couleur d'une source de lumière renseigne sur son spectre lumineux.

Le dispositif Teco est composé d'une ampoule connectée installée en hauteur à l'intérieur d'une boîte en carton semi-fermée, d'une tablette iPad ainsi que d'un microcontrôleur Arduino posé sur le fond de cette même boîte. Le microcontrôleur Arduino implémente sur une carte Mega 2560 : un écran TFT de 1,44 pouces [40] et un capteur de lumière visible 6 canaux [41].

Au niveau logiciel, nous avons repris et adapté un code existant pour programmer la carte Arduino afin de représenter graphiquement l'intensité de couleur collectée par le capteur de lumière visible [42]. La représentation graphique est affichée sur l'écran TFT et actualisée en temps réel en fonction de l'éclairage (voir Figure 5.12). L'application *Lumière&Couleurs* comporte une fonction pour faire varier la température de couleur en kelvins de l'ampoule connectée située à l'intérieur de la boîte en carton. De cette façon, le changement de la température de couleur depuis la tablette entraîne une actualisation de la représentation graphique sur l'écran TFT du microcontrôleur Arduino.

Ainsi, l'apprenant peut d'une part observer directement dans la boîte en carton la couleur apparente de la lumière émise par l'ampoule en fonction de la température de couleur qu'il choisissait. Ensuite, l'apprenant peut constater que le spectre de la lumière émise par l'ampoule et les intensités de couleur collectées par le capteur du microcontrôleur Arduino changent également en fonction de la température de couleur. Par exemple, il est possible d'observer qu'une température de couleur faible est associée à un spectre contenant davantage de rouge et d'orange qu'une température de couleur élevée.

40. Source : https://boutique.semageek.com/fr/970-ecran-tft-144-avec-microsd-st7735r.html?search_query=ecran+tft&results=115. Consulté le 15 juin 2020.

41. Le capteur de lumière visible 6 canaux collecte des données sur le spectre de la lumière éclairant le capteur qu'il décompose en intensité de rouge, d'orange, de jaune, de vert, de bleu et de violet. Source : https://boutique.semageek.com/fr/1270-capteur-de-couleurslumiere-visible-6-canaux-as7262.html?search_query=capteur+lumiere+visible&results=288. Consulté le 15 juin 2020.

42. Le code original est consultable à l'adresse suivante : https://learn.adafruit.com/adafruit-as7262-6-channel-visible-light-sensor?view=all. Consulté le 1 septembre 2020.

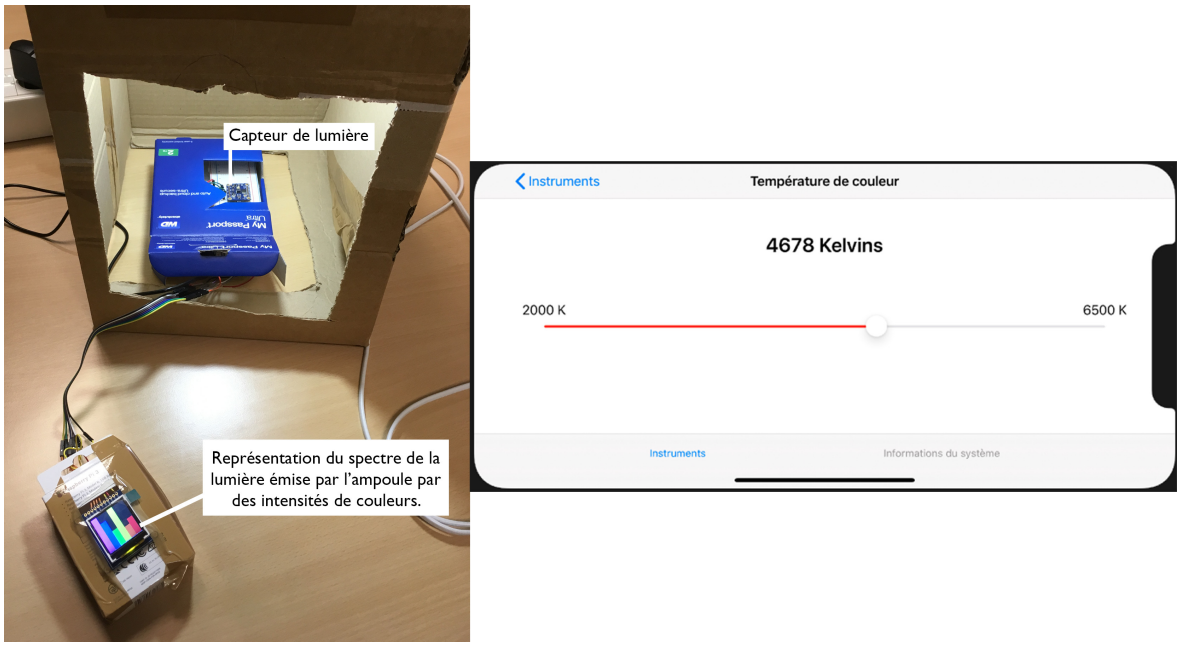


FIGURE 5.12 – **Dispositif Teco**. À gauche : Microcontrôleur Arduino permettant de capter la lumière émise par l'ampoule ; À droite : modification de la température de couleur de l'ampoule avec *Lumière&Couleurs*.

Dans cette section, nous avons décrit l'ensemble des dispositifs d'apprentissage LumIoT ayant pour thématique la lumière. Les quatre dispositifs conçus portent sur les concepts suivants :

— dispositif Pram : flux lumineux et intensité lumineuse ;

— dispositif Ecla : éclairement ;

— dispositif Lumi : Luminance ;

— dispositif Teco : température de couleur.

LumIoT permet à l'apprenant d'effectuer des observations et des manipulations afin de répondre aux questions spécifiques accompagnant chaque dispositif. La section suivante rapporte la mise en place et les résultats de l'expérimentation auprès d'étudiants ayant utilisé l'ensemble de dispositifs LumIoT.

5.3 Évaluation des dispositifs LumIoT

Outre notre approche, nous avons vu dans les sections précédentes plusieurs cas d'utilisation d'objets connectés dans le cadre de l'apprentissage des sciences. Toutefois, il existe peu de données empiriques sur les usages des objets connectés pour la médiation des savoirs scientifiques. Les études existantes sont centrées sur la mise en évidence des effets en termes d'apprentissage (e.g. connaissances, motivation) par comparaison à d'autres dispositifs (e.g. avec objets connectés, visionnage de vidéos) (Hochberg et al., 2020 ; Becker et al., 2020 ; Hochberg et al., 2018 ; Strzys et al., 2018 ; Kuhn et al., 2016). En accord avec le phénomène *No Significant Difference* de Russell (voir section 2.2.2), ces études rapportent que l'effet des objets connectés sur l'apprentissage est équivalent aux dispositifs conventionnels, mais s'accompagne d'effets positifs sur la motivation et l'intérêt des apprenants. Ces résultats

rejoignent ceux obtenus par les études portant plus généralement sur l'effet des pratiques de contextualisation dans l'enseignement des sciences (voir section 1.3.1).

Ces études sont utiles pour établir l'intérêt ou non des objets connectés pour l'apprentissage cependant, elles ne permettent pas d'étudier la manière dont les spécificités des objets connectés peuvent s'articuler avec le processus d'apprentissage. En effet, ces études interrogent les conséquences de dispositifs d'apprentissage spécifiques, composés d'objets connectés, sur l'apprentissage plutôt que les conditions d'utilisation ayant conduit ou non à des apprentissages. Or, comme l'ont montré les travaux sur les usages et les dispositifs médiatiques, les effets constatés sur l'apprentissage dépendent moins des médias utilisés que des conditions créées par le dispositif d'apprentissage dans lequel ils s'insèrent (voir section 2.2.1). Ainsi, les résultats de ces études reflètent les choix de conception du dispositif : les objets connectés choisis, mais aussi la manière dont ils sont utilisés, la stratégie d'apprentissage, les savoirs à apprendre ou encore leur présentation.

Nous avons mené une expérimentation afin d'étudier les effets, mais aussi les contraintes et les enjeux de l'utilisation d'objets connectés selon notre approche de la médiation des savoirs scientifiques. Cette approche, synthétisée par le modèle DRI, consiste à exploiter les dimensions Données et Agents des objets connectés pour rendre intelligibles des phénomènes physiques. Cependant, les dispositifs finalement conçus permettent-ils de rendre intelligibles les grandeurs photométriques et est-ce que cela se traduit par une progression des connaissances chez les apprenants ? En outre, nous avons montré que les usages d'objets connectés pour l'apprentissage des sciences s'inscrivent dans la continuité de pratiques d'enseignants et de vulgarisateurs visant à illustrer la science avec des objets du quotidien. Les objets connectés sont présentés comme des matériaux pédagogiques permettant de créer de nouvelles activités pédagogiques et de réaliser des expériences scientifiques classiques. Pourtant, il nous semble que l'usage d'objets connectés, de par leur complexité, n'est pas seulement une reconduction de pratiques préexistantes, mais s'accompagne d'autres effets, notamment sur le rapport aux savoirs scientifiques. Ainsi, l'objectif était d'évaluer la faisabilité de la conception de dispositifs selon le modèle DRI, les conditions de leur utilisation par les apprenants et le rapport aux savoirs scientifiques.

L'expérimentation a été incluse dans le cours Fondements du Multimédia des étudiants du Master 1 PSM de l'UFR STGI de Montbéliard et s'est déroulée avec les dispositifs d'apprentissage LumIoT. Nous avons fait les hypothèses suivantes :

— les dispositifs LumIoT, conçus selon le modèle DRI, augmentent la perception de l'apprenant permettant ainsi de rendre intelligibles les grandeurs photométriques ;

— en accord avec la littérature existante, l'utilisation d'objets connectés pour l'apprentissage a un effet positif sur l'engagement de l'apprenant ;

— à la différence des études citées plus haut, les étudiants ne suivent pas un cursus scientifique, mais une formation les préparant aux métiers du multimédia et d'internet. De ce fait, nous supposons que l'engagement de l'apprenant est influencé par sa capacité à utiliser les TIC ;

— l'usage d'objets connectés inclus dans des dispositifs conçus selon le modèle DRI a un effet sur le rapport aux savoirs scientifiques de l'apprenant.

Nous décrivons dans les sections qui suivent le protocole de l'expérimentation, les données qui ont été collectées, les résultats obtenus puis nous discutons ces résultats en faisant un parallèle avec la littérature existante.

5.3.1 Méthode

Les sections suivantes décrivent les éléments méthodologiques de l'expérimentation en commençant par son déroulement, la description du profil des étudiants puis des données qui ont été collectées.

Protocole expérimental

L'expérimentation a eu lieu le 12 décembre 2018 dans les locaux du Département Multimédia de l'UFR STGI de l'Université de Franche-Comté, sur le site de Montbéliard. L'expérimentation a été organisée de façon à compléter le programme du cours Fondements du Multimédia des étudiants en Master 1 PSM. Au moment où a eu lieu l'expérimentation, les concepts de flux lumineux, d'intensité lumineuse, d'éclairement et de luminance n'avaient pas encore été traités par l'enseignant en charge du cours. Toutefois, les étudiants avaient déjà dû étudier le concept de température de couleur pour la rédaction d'un rapport sur les transformations colorimétriques. Néanmoins, il s'agissait d'une approche théorique de la température de couleur contrairement à ce qui est présenté par les dispositifs LumIoT.

L'échantillon total de l'expérimentation est composé de 17 étudiants dont la moyenne d'âge est de 22,8 ans sur l'ensemble, de 23,5 pour les 6 femmes et de 22,45 pour les 11 hommes. D'une manière générale, le profil des étudiants est orienté vers les sciences de l'information et de la communication, le design ainsi que l'informatique. Le dernier diplôme obtenu par les étudiants est majoritairement lié à une formation spécialisée en information et en communication puis, dans une moindre mesure, en informatique et en design. De manière plus isolée, les autres étudiants ont obtenu des diplômes touchant à la littérature, à l'audiovisuel et à l'animation 2D/3D. Les sciences ne représentent a priori pas un élément central du parcours post-bac des étudiants.

Les dispositifs LumIoT n'existant qu'en un exemplaire et compte tenu de la taille de l'échantillon, les étudiants ont été aléatoirement répartis en deux groupes, l'un de huit et l'autre de neuf. Ainsi, deux sessions d'expérimentation ont été organisées successivement. Le protocole expérimental que nous avons suivi pour les deux sessions est le suivant (voir Figure 5.13) :

1. présentation des tenants et aboutissants de l'expérimentation ;
2. administration d'un questionnaire pré-test ;
3. utilisation des dispositifs LumIoT ;
4. administration d'un questionnaire post-test.

Après avoir répondu individuellement au questionnaire pré-test, les étudiants de chaque session ont été aléatoirement groupés par deux. Le groupement par pair s'inscrit dans une perspective socio-constructiviste visant à favoriser l'apprentissage en amenant les étudiants à échanger leurs idées, à débattre et à collaborer. Nous supposons que cette configuration peut stimuler la génération d'hypothèses et faciliter la conduite des expérimentations par

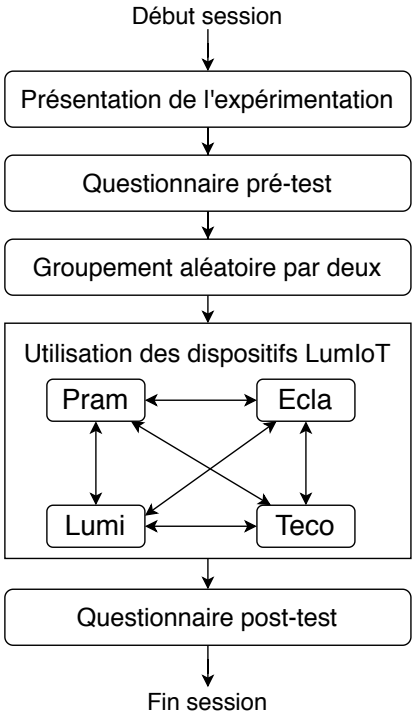


FIGURE 5.13 – **Déroulement de l'expérimentation**

les apprenants. Il y a eu quatre groupes de deux étudiants lors de la première session, trois groupes de deux étudiants et un groupe de trois pendant la seconde session.

L'ordre dans lequel sont utilisés les dispositifs LumIoT n'ayant pas d'importance, chaque groupe d'étudiants s'est vu assigner à un nouveau dispositif, en fonction des disponibilités et jusqu'à que tous les dispositifs aient été utilisés. Afin de s'assurer que tous les étudiants puissent utiliser les quatre dispositifs, un temps limite a été fixé par dispositif. Pour chacun des quatre dispositifs LumIoT, un animateur avait pour rôle de présenter les différents éléments du dispositif, d'aider les étudiants en cas de problèmes techniques et de veiller au respect de la limite de temps. Pour des raisons pratiques, ce sont quatre étudiants de la promotion d'étudiants en Master 1 PSM qui ont accepté de remplir le rôle d'animateur [43]. Lors de l'expérimentation, les animateurs avaient également les fiches de manipulations distribuées pour guider les étudiants, mais celles des animateurs étaient enrichies avec des indications complémentaires (e.g. que faire si le bug XYZ survient). Des tests ont été effectués avec les animateurs avant l'expérimentation afin de présenter le fonctionnement des dispositifs et les concepts sur lesquels ils portent [44]. Les animateurs ont également rempli les questionnaires pré et post -test afin d'identifier les problèmes de formulation des questions. Les animateurs ont ensuite reçu les instructions et les fiches de manipulations ajustées en fonction des résultats des tests préliminaires.

Une fois que tous les groupes d'étudiants d'une session sont passés par chaque dispositif, les étudiants ont rempli individuellement un questionnaire post-test.

43. Nous remercions Wiem Boughalleb, Océane Georges, Bastien Jaskulski et Lucas Reuter pour leur aide.
44. Ces tests ont notamment mis en évidence des problèmes de communication entre les objets connectés (tablette, ampoule) lors de l'utilisation du réseau de l'Université.

Données quantitatives et qualitatives collectées

Les données quantitatives et qualitatives de l'expérimentation ont été collectées de manière anonyme *via* les deux questionnaires avant et après l'utilisation des dispositifs LumIoT [45]. Les questionnaires, disponibles en annexes C.1 et C.2, ont été administrés en ligne sur la plateforme Google Form [46].

Les questionnaires ont été conçus à partir d'échelles de mesure standardisées dont les résultats ont été contrôlés par plusieurs études. Les échelles de mesure comportent plusieurs propositions, chacune accompagnée d'une échelle de Lickert [47], en lien avec la variable que l'on souhaite mesurer (e.g. engagement, état émotionnel). Lors de la compilation des réponses, chaque échelle de mesure se traduit par un score situant l'individu par rapport à la variable mesurée. Les scores obtenus par les échelles de mesure permettent de comparer les individus et d'effectuer des tests de corrélation entre deux ou plusieurs scores. Cependant, à l'instar des notes attribuées aux travaux des étudiants, le score d'une échelle de mesure apporte une information limitée ne laissant pas transparaître l'origine du score (Lallemand & Gronier, 2019). Pour cette raison, des questions ouvertes ont été ajoutées aux questionnaires en plus des échelles de mesure.

Questionnaire pré-test. Son but était de déterminer le profil de l'étudiant (e.g. âge, genre, dernier diplôme) et sa capacité à utiliser les technologies. Les questionnaires pré et post -test comportaient également un contrôle des connaissances identiques sur les cinq concepts présentés dans la section précédente. Les questions du contrôle des connaissances ont été validées avec l'enseignant en charge du cours Fondements du Multimédia et donnaient lieu à une note sur 20.

La capacité des étudiants à utiliser les technologies a été évaluée dans l'hypothèse où, s'agissant d'étudiants utilisant les TIC à des fins professionnelles, cela aurait une influence sur l'engagement durant l'apprentissage. Cette variable a été mesurée à l'aide de l'échelle du sentiment d'efficacité dans l'usage des TIC (SEP-TIC, Déro et Heutte (2008)). Le sentiment d'efficacité personnelle désigne la croyance d'un individu dans sa capacité à mobiliser ses ressources cognitives et à faire les actions nécessaires pour accomplir avec succès une tâche (Bandura, 1997). L'efficacité perçue influence le niveau d'engagement de l'individu dans une activité, ses efforts, ses prises de décisions ou encore sa persévérance. Le sentiment d'efficacité personnel est corrélé à l'utilisation de stratégies pertinentes pour résoudre des problèmes et est une variable de prédiction des performances en termes d'apprentissage (S. Brown et al., 2008 ; Mailles-Viard, Vayre, & Pelissier, 2015). Étant donné le profil des étudiants, nous supposons que le score moyen de SEP-TIC sera relativement élevé et que cela sera corrélé à la motivation.

Le lecteur constatera que le questionnaire pré-test administré aux étudiants comporte des questions qui n'ont pas été présentées dans les lignes précédentes. Ces questions étaient initialement destinées à évaluer le degré d'utilisation des TIC des étudiants en s'informant notamment sur : le nombre d'objets connectés qu'ils possèdent, leur utilisation ou non pendant un cours, l'utilisation d'applications éducatives. Cependant, ces questions n'ont pas été

45. Un identifiant aléatoire a été attribué à chaque étudiant afin de pouvoir relier les réponses du questionnaire pré test avec celles du questionnaire post test.

46. Source : https://docs.google.com/forms/u/0/. Consulté le 19 juin 2020.

47. Pour chaque proposition, la personne doit indiquer à quel point elle est en accord ou en désaccord.

prises en compte dans l'analyse des résultats. Cela est dû en partie parce qu'il est apparu, *a posteriori*, que ces questions élargissaient l'objet de l'expérimentation vers d'autres interrogations (e.g. à quel degré les étudiants connaissent-ils leurs appareils ?) ou parce que les réponses obtenues se sont révélées difficilement exploitables.

Questionnaire post-test. Celui-ci comprenait des évaluations de l'utilisabilité des dispositifs LumIoT, de la motivation des étudiants ainsi que des questions ouvertes portant sur les aspects positifs et les difficultés rencontrées.

L'utilisabilité est selon la norme ISO 9241-11 le « *degré selon lequel un produit peut être utilisé par des utilisateurs identifiés pour atteindre des buts définis, avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié* »[48]. Le concept renvoie au caractère fonctionnel et pragmatique de l'utilisation d'un dispositif : l'utilisateur parvient-il à faire ce qu'il souhaite et dans de bonnes conditions ? Dans le cadre de notre expérimentation, nous souhaitions pouvoir évaluer l'utilisabilité moyenne des dispositifs LumIoT pour comparer avec d'éventuelles futures versions. Pour mesurer l'utilisabilité des dispositifs LumIoT, nous avons intégré au questionnaire post-test l'échelle de mesure *System Usability Scale* (SUS) développée par Brooke (1996) et dont une traduction en français est proposée par Lallemand et Gronier (2019). L'échelle SUS est basée sur la définition de l'utilisabilité donnée par la norme ISO 9241-11 et mesure l'utilisabilité perçue, car il s'agit d'une auto-évaluation de l'utilisateur. L'échelle SUS permet de calculer un score d'utilisabilité sur 100 dont les valeurs intermédiaires indiquent que l'utilisabilité est (Bangor, Kortum, & Miller, 2008) : mauvaise (inférieur à 39), acceptable (inférieur à 52), bonne (inférieur à 73) ou excellente (inférieur à 86).

L'engagement actif, comme cela a été montré dans le premier chapitre, est l'un des piliers de l'apprentissage directement lié à la motivation et la curiosité, c'est-à-dire l'énergie qui va pousser l'apprenant à agir et à essayer de comprendre. Plusieurs théories tentent d'expliquer les mécanismes motivationnels des individus et apportent un cadre pour les évaluer de manière systématique. La théorie de l'autodétermination (TAD) élaborée par (Deci & Ryan, 2000, 2008) est communément utilisée dans le domaine éducatif et rejoint notre conception de l'apprentissage. La TAD postule que les individus cherchent continuellement à se réaliser par la satisfaction de besoins psychologiques primaires, ce qui constitue à la fois la cause et la conséquence de la motivation. Plus concrètement, cette dernière est liée à la satisfaction de trois besoins psychologiques :

— le besoin d'autodétermination : être à l'origine de ses actions ;
— le besoin de relation sociale : être en relation avec les autres et développer un sentiment d'appartenance ;
— le besoin de compétence : pouvoir interagir efficacement avec son environnement, la volonté de développer de nouvelles compétences.

Ainsi, les individus sont plus enclins à faire une activité si celle-ci leur permet de satisfaire au moins l'un des trois besoins psychologiques et, *in fine*, de se réaliser. La motivation est intrinsèque lorsqu'elle est directement liée à l'un des besoins psychologiques ou elle peut résulter d'un processus d'internalisation lorsqu'un motivateur externe (e.g. une note) est ramené à l'un des besoins.

48. Source : https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:fr. Consulté le 18 juin 2020.

Le questionnaire *Intrinsic Motivation Inventory* (IMI) a été élaboré pour évaluer la motivation en accord avec les principes de la TAD [49]. Le questionnaire IMI est composé de plusieurs sous-échelles que l'on peut combiner ou non. Pour notre expérimentation, nous avons intégré dans le questionnaire post-test les sous-échelles de mesure de l'intérêt et de l'utilité perçue. L'intérêt mesuré par le questionnaire IMI correspond à l'évaluation de la motivation intrinsèque de l'apprenant, tel qu'il le ressent, tandis que l'utilité perçue estime le degré d'internalisation. Ces deux évaluations permettront de rendre compte de la motivation de l'apprenant lors de l'utilisation des dispositifs LumIoT si celui-ci juge les dispositifs utiles, dans le cadre de sa formation et pour comprendre les grandeurs photométriques.

Dans le questionnaire post-test, après l'échelle de mesure SUS et celles du questionnaire IMI, les étudiants ont pu répondre à des questions ouvertes. Les étudiants pouvaient indiquer les points positifs et négatifs des dispositifs, les difficultés rencontrées et suggérer des améliorations.

5.3.2 Résultats

Selon la méthode usuelle, les réponses aux questionnaires ont été encodées et compilées dans un tableau commun en fonction de l'identifiant aléatoire attribué à chaque étudiant (de Singly, 2016). Les données ont ensuite été traitées et analysées avec le langage de programmation R et le logiciel RStudio. Les traitements incluent le calcul des scores pour chaque échelle de mesure selon les indications fournies par leurs créateurs. Les paragraphes suivants rapportent les résultats de l'analyse des données quantitatives puis qualitatives.

Maîtrise des TIC, utilisabilité, engagement et connaissances

Nous décrivons ci-après les données quantitatives obtenues *via* les deux questionnaires : le SEP-TIC, l'intérêt et l'utilité perçue des dispositifs et le contrôle des connaissances.

Le SEP-TIC est homogène et cohérent avec l'échantillon : les étudiants faisant partie d'une même formation, portant sur les TIC, les scores de SEP-TIC sont similaires et relativement élevés (voir Figure 5.14). Pour 75% des étudiants, les scores de SEP-TIC sont supérieurs à 34, sur une échelle de 0 à 50, et les scores sont concentrés entre 34 et 36. Il ne semble pas y avoir de différences significatives entre les femmes et les hommes.

Le score SUS moyen mesurant l'utilisabilité perçue de l'ensemble des dispositifs LumIoT est de 62, sur une échelle de 0 à 100, ce qui correspond à une « bonne utilisabilité » selon Bangor et al. (2008). L'écart est important entre le minimum (35) et le maximum (85) cependant, à l'exception de ces deux extrêmes, 50% des scores SUS se situent entre 58 et 68 (voir Figure 5.14). Le score SUS moyen des femmes est de 54 tandis que pour les hommes il est de 65,5. Cette différence peut s'expliquer par le plus grand nombre d'hommes dans l'échantillon et par la présence, parmi les femmes, du score SUS minimum ce qui diminue la moyenne.

Les scores obtenus avec le questionnaire IMI pour l'intérêt et l'utilité perçue sont similaires sur l'ensemble de l'échantillon, mais également lorsqu'on s'intéresse uniquement aux femmes ou aux hommes (voir Figure 5.15). Pour l'intérêt et l'utilité perçue, environ la moitié des scores

49. Source : https://selfdeterminationtheory.org/intrinsic-motivation-inventory/. Consulté le 15 juin 2020.

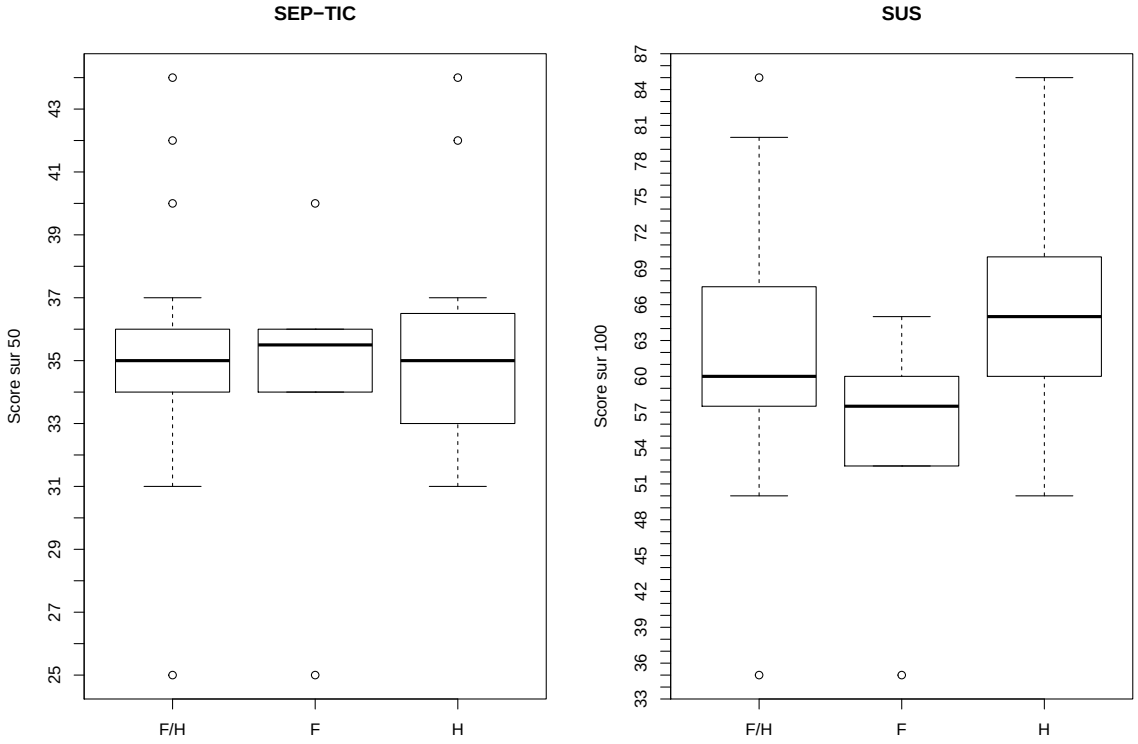


FIGURE 5.14 – **Résultats des échelles SEP-TIC et SUS**. Scores obtenus sur la totalité de l'échantillon, pour les femmes et pour les hommes.

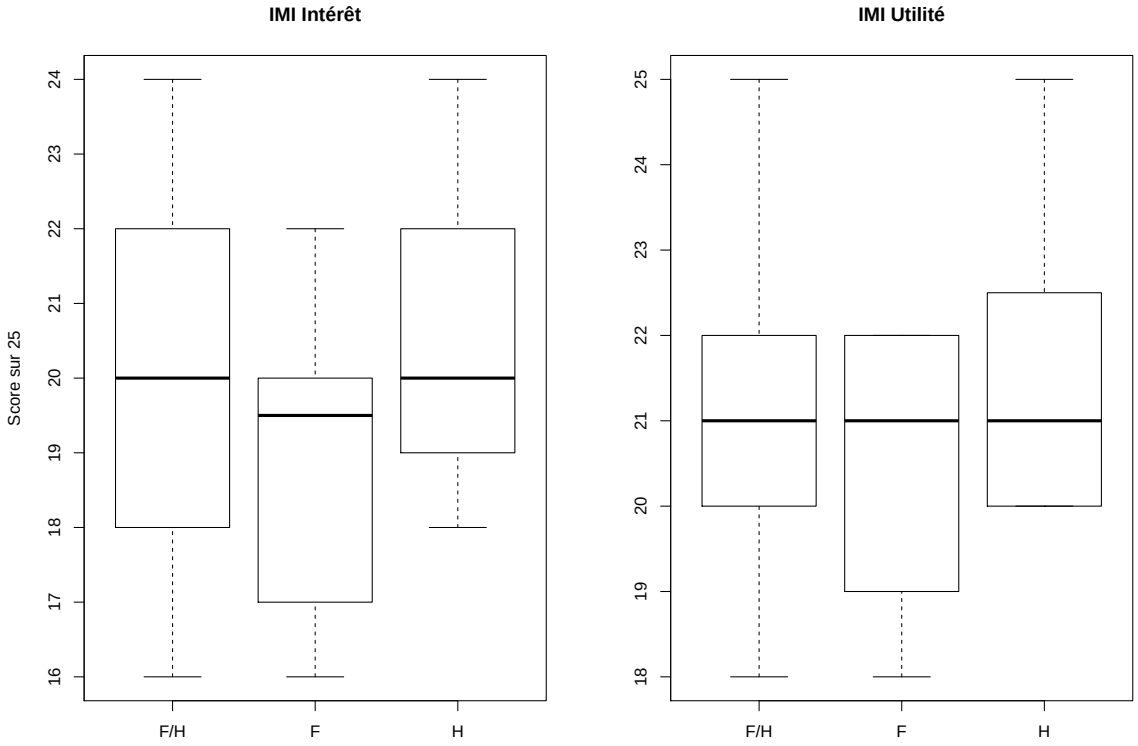


FIGURE 5.15 – **Résultats des échelles IMI**. Scores obtenus pour l'intérêt et l'utilité perçue.

sont compris entre 18 et 22, avec des scores moyens de 20 pour l'intérêt et de 21 pour l'utilité perçue (sur une échelle allant de 0 à 25). Les résultats de ces deux mesures semblent indiquer que les dispositifs ont suscité l'engagement des étudiants durant les activités d'apprentissage. Nous verrons que cela peut se recouper avec les réponses des étudiants aux questions ouvertes.

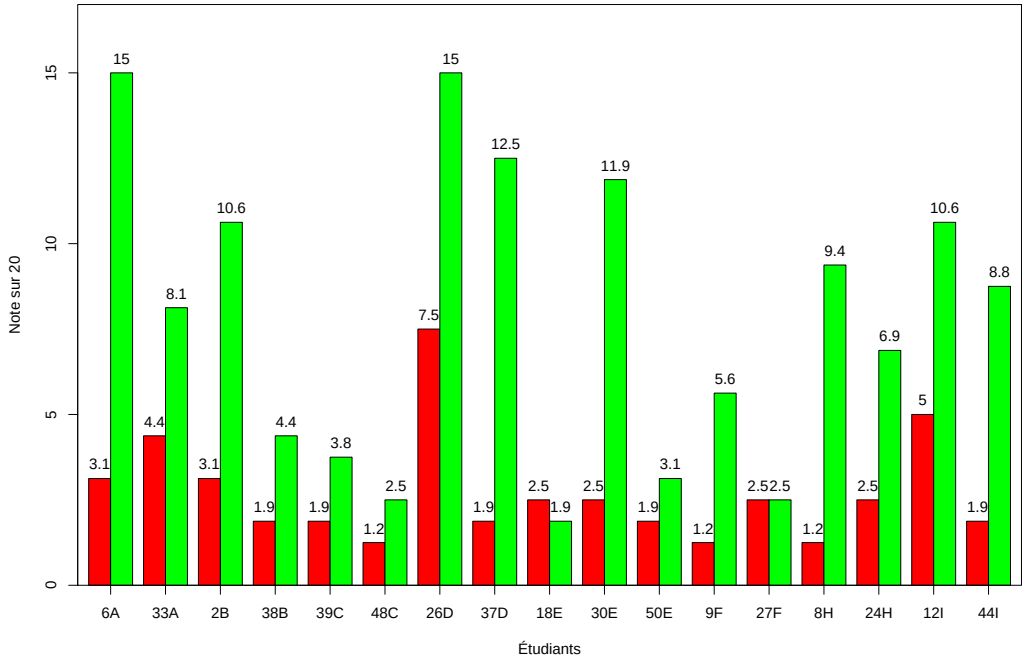


FIGURE 5.16 – **Évaluation des connaissances**. Notes sur 20 obtenues par chaque étudiant [50]avant (en rouge) et après l'utilisation des dispositifs LumIoT.

Concernant le contrôle des connaissances, un test de *Student* apparié a permis d'établir que la série de notes obtenues post-test est significativement différente de la série de notes pré-test [51]. En effet, 75% des notes obtenues lors du questionnaire pré test sont inférieures à 3,12 sur 20 et la meilleure note est de 7,5 (voir Figure 5.16). Après avoir utilisé les dispositifs LumIoT, la moyenne des notes gagne environ cinq points, 50% des notes sont supérieures à 8,12 et la meilleure est de 15. Ainsi, l'on peut supposer que les dispositifs LumIoT ont eu un effet significatif sur les connaissances des étudiants en matière de photométrie.

Toutefois, ces notes sont individuelles, or durant l'expérimentation les étudiants ont travaillé par groupe de deux ou de trois : au sein de chaque groupe, les étudiants ont-ils eu des notes similaires au questionnaire post-test ? Pour répondre, nous avons comparé les notes pré et post -test entre les étudiants de chaque groupe. Nous observons des similitudes pour trois des huit groupes au total. Nous verrons dans la section Discussions comment expliquer les différences entre les étudiants d'un même groupe.

50. Le chiffre de l'identifiant correspond à un étudiant et la lettre désigne le groupe dans lequel il était. L'étudiant 26 était dans le groupe D.

51. Le test de Student est utile pour déterminer si deux séries de valeurs ayant un lien entre elles sont significativement différentes d'un point de vue statistique. Dans notre cas, les séries de notes pré et post -test sont liées, car il s'agit des mêmes étudiants avant et après utilisation des dispositifs LumIoT. La valeur p obtenue étant inférieure à 0,05, cela signifie que l'utilisation des dispositifs LumIoT a bien eu un effet sur l'évaluation des connaissances et qu'il ne s'agit pas d'un hasard. Source : http://www.sthda.com/french/wiki/test-de-student-formules. Consulté le 19 juin 2020.

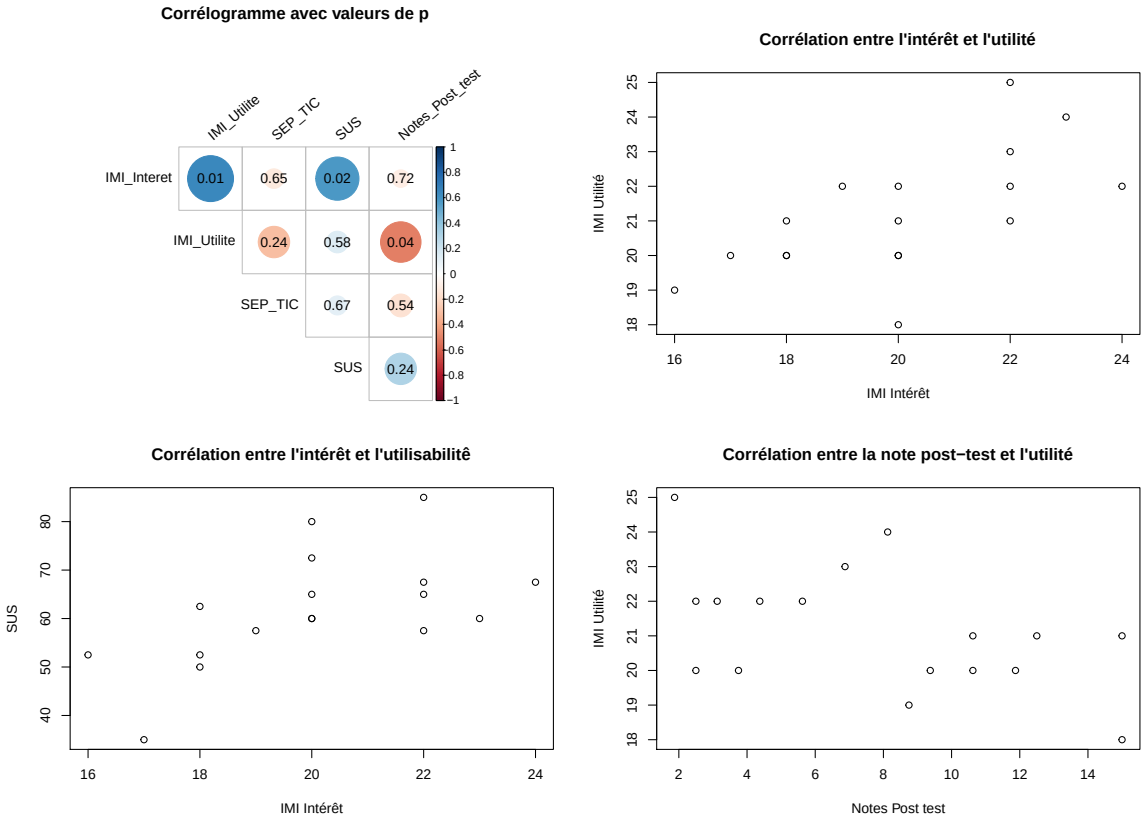


FIGURE 5.17 – **Tests de corrélation entre les variables mesurées par les questionnaires**. Le corrélogramme synthétise le niveau de dépendances (représenté par la valeur p présente dans chaque cercle [52]) entre chacune des variables. Les graphiques de corrélation représentent l'évolution des valeurs pour chaque pairs de variables.

Pour conclure, nous avons souhaité savoir s'il existait des corrélations entre les variables qui ont été mesurées avec les questionnaires (voir Figure 5.17). Contrairement à notre hypothèse, le SEP-TIC ne semble pas avoir eu une influence sur la motivation des étudiants, représentée par les échelles d'intérêt et d'utilité perçue. En revanche, les tests font état de trois corrélations : entre l'intérêt et l'utilité perçue ($p = 0,01$), entre l'intérêt et l'échelle SUS ($p = 0,02$) et entre l'utilité perçue et les notes obtenues à l'évaluation post-test ($p = 0,04$).

Il apparaît logique que les échelles d'intérêt et d'utilité perçue soient fortement corrélées, car elles appartiennent au même questionnaire IMI destiné à mesurer l'engagement des étudiants. Cet engagement semble être associé à l'utilisabilité des dispositifs LumIoT ce qui pourrait traduire l'impact des difficultés d'utilisation sur l'engagement de l'utilisateur. La relation entre l'utilité perçue et la note finale est moins significative et indique une corrélation négative : une forte valeur pour l'utilité perçue est corrélée à une faible note finale. Cette relation est en contradiction avec la TAD et, plus généralement, les travaux rapportant l'effet positif de l'engagement sur l'apprentissage. Une interprétation possible est que les étudiants ayant le mieux réussi l'évaluation finale aient été plus mesurés, voire critiques, en remplissant

52. La valeur p (*p-value*) est un indicateur statistique décrivant le niveau de dépendance entre deux variables pour évaluer la probabilité que cette dépendance relève du hasard. Il est d'usage de considérer que lorsque la valeur p est inférieure à $0,05$, alors il est peu probable que la dépendance entre deux variables soit due au hasard ; ce qui correspond à une corrélation. Notons que lorsque la valeur p suggère une corrélation, celle-ci constitue une piste de recherche à approfondir et non un lien de causalité. Source : https://www.amq.math.ca/wp-content/uploads/bulletin/vol56/no4/08-stats-2016-12.pdf.

les échelles IMI.

Quoi qu'il en soit, étant donné la taille limitée de l'échantillon (17 étudiants), les corrélations mises en évidence sont davantage à interpréter comme des pistes de recherche à approfondir plutôt qu'en tant que confirmation (ou infirmation) d'hypothèses.

Difficultés liées à l'utilisation de chaque dispositif

Les données qualitatives suggèrent que les dispositifs LumIoT ont eu un effet positif sur la motivation des étudiants et sur les connaissances acquises, malgré une utilisabilité perçue seulement bonne, voire insuffisante, pour certains étudiants. Les réponses des étudiants aux questions ouvertes permettent d'étayer ces premiers résultats. Le lecteur trouvera les réponses brutes des étudiants pour chaque question en annexe C.3.

Cette section rapporte les réponses des étudiants par rapport aux difficultés qu'ils ont rencontrées pour chaque dispositif. Le Tableau 5.2 synthétise les réponses des étudiants pour les questions « *Lequel des ateliers avez-vous le plus apprécié ? Pourquoi ?* » et « *Lequel des ateliers avez-vous le moins apprécié ? Pourquoi ?* ».

	Apprécié	Non apprécié	Commentaires positifs	Commentaires négatifs
Pram	1	4	Facile de comprendre la différence entre W, K et Lm	Trop d'informations Applications difficiles à utiliser Faire des calculs
Ecla	4	5	Observation directe Simplicité Cas pratique Contrôle	Pas de surprise dans les résultats obtenus Problèmes pour prendre des mesures
Lumi	1	4	Absorption du spectre lumineux	Manque de clarté des objectifs et instructions Manque d'interactivité
Teco	11	1	Composition de la lumière Représentation en temps réel du phénomène Connaissances préalables	Notion déjà étudiée en cours

Tableau 5.2 – **Synthèse des commentaires positifs et négatifs pour chaque dispositif**. Les colonnes "Apprécié" et "Non apprécié" indiquent le nombre d'étudiants ayant cités le dispositif.

À la question « *Lequel des ateliers avez-vous le plus apprécié ? Pourquoi ?* », les étudiants

ont majoritairement cité le dispositif Teco sur la température de couleur. La principale raison évoquée est la simplicité du dispositif en termes d'utilisabilité et parce que les étudiants pouvaient directement observer les effets de leurs actions : « *manipuler depuis l'application mobile a été très intuitif pour changer la couleur de l'ampoule, mais aussi voir le spectre de couleur dans une interface avec la Raspberry Pi a été intéressant* » (26D). Il est vrai que le dispositif Teco engageait uniquement l'étudiant à faire varier la température de couleur de l'ampoule *via* une tablette et à observer le résultat. Néanmoins, la simplicité perçue peut aussi s'expliquer par le fait que les étudiants connaissaient déjà, de manière théorique, le concept de température de couleurs ; il s'agit d'ailleurs d'un élément négatif pour l'un des étudiants.

Les dispositifs Lumi et Pram ont été les moins appréciés à cause de difficultés d'utilisation et de compréhension des objectifs des dispositifs. Pour Lumi, les étudiants ont pointé le manque de clarté des questions et des indications présentes sur la fiche de manipulations : « *je n'ai pas compris spécialement le but de l'atelier, j'ai été un peu perdu* » (26D). Concernant le dispositif Pram, les étudiants ont rencontré des difficultés à utiliser les applications *ConnaitreMonAmpoule* et *GrandeursPhotométriques* : « *C'était l'atelier où nous avons eu le plus besoin d'aide (l'application n'a pas fonctionné directement, les applications utilisées n'étaient pas forcément facile à comprendre)* » (12I). Teco abordait plus de concepts que les autres dispositifs, ce qu'ont également fait remarquer les étudiants : « *il y a une grosse quantité d'information à assimiler* » (8H). Ce point ainsi que les difficultés d'utilisation s'ajoutent à la limite de temps qui incitait les étudiants à avancer rapidement.

L'animateur était normalement présent afin d'aider les étudiants, notamment en cas de problèmes avec l'utilisation des applications. Cependant, il est possible que l'animateur ne soit pas intervenu en jugeant que le problème était davantage lié à l'investigation que devaient mener les étudiants plutôt qu'à l'utilisation fonctionnelle des applications. En d'autres termes, certaines difficultés pointées par les étudiants pourraient être inhérentes au fait d'investiguer, de réfléchir aux questions posées et de manipuler les instruments. Toutefois, les éléments négatifs indiqués par les étudiants pour les dispositifs Lumi et Pram témoignent tout de même de problèmes de conception dans les éléments de guidage liés au dispositif.

Quant au dispositif Ecla, les réponses des étudiants sont mitigées. Une partie des étudiants ont jugé le dispositif simple et ont apprécié le rapprochement entre la théorie et la pratique : « *Observer la différence entre les résultats attendus et obtenus était un bon moyen de comprendre l'influence des différents facteurs sur l'éclairage* » (2B). Cependant, l'incohérence des mesures en pratique avec celles attendues en théorie a été un élément négatif pour d'autres étudiants. Dans ce cas, certains étudiants ont regretté de ne pas pouvoir retrouver le résultat théorique à partir des mesures prises avec les objets connectés.

Les réponses concernant chaque dispositif en particulier suggèrent que les difficultés des étudiants viennent de l'utilisation des dispositifs et de la conduite de l'investigation pour répondre aux questions. Nous revenons sur ces difficultés dans les sections suivantes en étudiant les réponses aux questions plus générales sur les aspects appréciés et les difficultés rencontrées.

Aspects appréciés et obstacles rencontrés

Outre les éléments positifs et négatifs propres à chaque dispositif, les questions ouvertes renseignent plus généralement sur les obstacles rencontrés durant l'expérimentation et ce qu'ils ont apprécié. Le Tableau 5.3 synthétise les réponses des étudiants aux questions « *Donnez au moins deux choses que vous avez appréciées sur l'ensemble des ateliers* », « *Donnez au moins deux choses que vous n'avez pas appréciées sur l'ensemble des ateliers* » et « *Quelles difficultés avez-vous rencontrées ?* ».

Aspects appréciés	**Obstacles et difficultés rencontrées**
Autonomie	Limite de temps pour réaliser les activités
Manipulation d'objets physiques	Ambiguïté dans les consignes
Utilisation d'objets connectés	Dysfonctionnement des applications mobiles
Lien entre théorie et pratique	Manque d'accompagnement
Résolution de problème	Réalisation de calculs
Collaboration	

Tableau 5.3 – **Synthèse des commentaires généraux des étudiants**

Parmi les aspects appréciés, l'autonomie, la manipulation d'objets et l'utilisation d'objets connectés sont citées ensemble : « *La manipulation libre, l'utilisation des applications* » (9F), « *le faite [sic] que l'on puisse manipuler par nous-même, utiliser des applications à l'aide de nos smartphones* » (48C). Ces aspects étant les plus fréquemment cités, ils pourraient expliquer l'engagement des étudiants constatés avec les échelles d'intérêt et d'utilité perçue du questionnaire IMI.

Le travail par groupe a amené les étudiants à collaborer pour traiter les questions associées à chaque dispositif : « *Le fait qu'on est [sic] pu partager des connaissances avec mon binômes [sic] et réaliser ses propres expérimentations* » (44I). Pour mener leurs observations et expérimentations, les étudiants ont dû échanger leurs connaissances et partager leurs hypothèses avant de conduire leurs observations et expérimentations. Cependant, dans quelques cas, la collaboration a conduit à une répartition stricte des tâches, e.g. l'un des étudiants lit et remplit la fiche de manipulations tandis que l'autre effectue les manipulations. Si l'on considère que cette répartition des tâches implique un processus d'apprentissage différent, alors cela pourrait être une hypothèse pour expliquer les écarts en termes de connaissances acquises au sein de chaque binôme. En effet, nous avons vu qu'au sein des groupes les notes obtenues au questionnaire post-test peuvent différer de plusieurs points (8,78 au maximum). Cette hypothèse ne peut être vérifiée, car nous n'avons pas pris de traces des rôles adoptés par chaque étudiant lors de l'expérimentation. Néanmoins, cette répartition des tâches suggère que la conception des dispositifs LumIoT limitait l'utilisation à une seule personne.

Le lien entre la théorie et la pratique a été apprécié sous deux angles différents. D'abord, les étudiants notent que les dispositifs traitent les concepts théoriques avec des objets du quotidien. Ensuite, ce n'est pas tant la manipulation en autonomie qui est appréciée que la possibilité d'observer en temps réel les conséquences des manipulations et de pouvoir les comparer à la théorie : « *Manipulation direct[sic] + lien pratique/théorique immédiat* » (12I).

Toutefois, comme nous l'avons vu dans la section précédente, le rapprochement théorie/pratique a aussi été un frein pour une partie des étudiants.

Une partie des difficultés rencontrées par les étudiants sont dues à la conception des ressources dont ils disposaient pour s'aider et au temps limité pour la réalisation des activités. Les étudiants pointent des problèmes de compréhension des indications données par les fiches de manipulation ainsi que les problèmes matériels et logiciels. La limite du temps a créé une tension entre la nécessité d'avancer et le temps requis pour comprendre ce qui est attendu. De plus, les étudiants ont pointé le manque d'accompagnement pour utiliser les dispositifs et pour choisir les observations et les expérimentations à effectuer : « *Difficulté dans la démarche à adopter, par où commencer* » (8H). Les animateurs et les feuilles d'activités devaient assurer une forme de guidage pour limiter la surcharge cognitive et éviter que l'autonomie devienne contre-productive (Kirschner et al., 2006). Les résultats montrent que ces solutions n'ont pas permis d'éviter les effets négatifs de l'autonomie.

Les autres difficultés proviennent des conditions d'apprentissage posées par les dispositifs, en particulier l'autonomie et la confrontation de la théorie au réel. La confrontation entre les résultats attendus, en théorie, et les résultats obtenus, en pratique, a été une source de difficultés pour les étudiants. Certains étudiants, notamment lorsqu'il s'agissait de calculer un résultat, cherchent à « coller » à la théorie sans y parvenir parfaitement : « *Trouve le valeur théorique similaire de nos valeur pratique [sic]* » (33A). Nous revenons sur ce point dans la section suivante.

5.3.3 Discussions

Les résultats de l'expérimentation suggèrent que les dispositifs LumIoT ont effectivement fait progresser les connaissances des étudiants sur la photométrie. L'apprentissage par l'expérimentation, avec observation directe des conséquences des actions, et l'utilisation d'objets connectés semblent avoir eu un effet positif sur l'engagement des étudiants. Par rapport aux hypothèses initiales, ces éléments sont en faveur de l'idée que les dispositifs LumIoT ont permis de rendre intelligibles les concepts de flux lumineux, d'intensité lumineuse, d'éclairement, de luminance et de température de couleur.

Cependant, contrairement à ce qui était attendu, le sentiment d'efficacité avec les TIC n'a pas eu d'influence sur l'engagement ni sur les connaissances acquises. On constate également que les étudiants ont rencontré des difficultés quand il s'agissait d'adopter une démarche d'investigation, notamment parce que dans certains cas la pratique et la théorie n'étaient pas en accord. Ces difficultés sont dues à la faiblesse des éléments de guidage inclus dans chacun des dispositifs, aussi bien au niveau de la fiche de manipulations parfois mal interprétée qu'au niveau de la conception des applications mobiles. En outre, une partie des obstacles rencontrés par les étudiants est inhérente à notre approche de la médiation des savoirs scientifiques, à l'exemple de l'incompréhension des étudiants face aux différences entre la théorie et la pratique. Nous faisons plusieurs observations en ce sens dans les sections suivantes, en mettant en perspective les résultats de l'expérimentation avec les études et travaux similaires.

Limites de l'expérimentation

En premier lieu, les résultats que nous avons présentés et les observations que nous pouvons en déduire sont à pondérer, car le protocole de l'expérimentation comporte des limites.

Parmi ces limites figure la taille réduire de l'échantillon (17 étudiants) qui ne permet pas de généraliser les résultats. Ces derniers reflètent les conditions spécifiques de notre expérimentation et indiquent avant tout les directions de recherche à suivre. Il en va ainsi des corrélations que nous avons identifiées concernant l'utilisabilité, l'intérêt, l'utilité perçue et les notes post-test. Les liens que décrivent les corrélations sont valables dans le cadre de notre expérimentation et pourraient être différents dans d'autres conditions.

En ce sens, les scores obtenus pour les différentes échelles de mesure (e.g. SUS, IMI) sont à interpréter avec des précautions. En effet, il s'agissait d'étudiants que nous connaissions pour avoir déjà été leur enseignant dans le cadre de la formation en Master 1 PSM. De ce fait, il est possible que les étudiants se soient montrés plus enclins à utiliser les dispositifs ce qui pourrait avoir biaisé les échelles de mesure, particulièrement celles évaluant la motivation.

Concernant l'utilisabilité, il nous semble qu'il aurait fallu réaliser une évaluation préalable, avant l'expérimentation, afin de réduire l'influence qu'ont pu avoir les difficultés d'utilisation sur l'apprentissage. Également, les dispositifs LumIoT étant composé de plusieurs applications mobiles et objets connectés, il était difficile de mettre en œuvre une évaluation précise de l'utilisabilité. De ce fait, nous avons évalué l'utilisabilité que de manière globale, ce qui limite l'identification des problèmes d'utilisation. Une solution envisageable dans de futures expérimentations serait d'évaluer séparément les quatre dispositifs LumIoT en complétant avec une observation *in situ* des usages.

Au-delà des défauts d'utilisabilité, les difficultés rencontrées par les étudiants ont été adressées différemment selon le dispositif, et donc l'animateur, et la session de passage. En effet, l'observation des animateurs lors de l'expérimentation suggère que, le temps passant, ils ont davantage aidé les étudiants lors de la seconde session. Nous n'avons pas de données permettant d'étayer cette analyse cependant, on constate que la moyenne au contrôle de connaissances post-test est de 6,25 lors de la première session et de 9,1 lors de la seconde.

Nous avons effectivement observé une progression des connaissances acquises par les étudiants sur les grandeurs photométriques et la température de couleur. Cependant, il aurait été intéressant de comparer ces résultats avec ceux d'un groupe d'étudiants apprenant les mêmes concepts, mais sans objets connectés. Les années précédentes, l'enseignant du cours Fondements du Multimédia introduisait les grandeurs photométriques en les illustrant avec une bougie allumée. En reprenant ce principe, il est possible d'imaginer une séance lors de laquelle un enseignant présente brièvement les grandeurs photométriques à l'aide d'une bougie ou d'une lampe. Puis, les étudiants doivent répondre aux mêmes questions présentes sur les fiches de manipulations en s'aidant de recherches sur le web. La comparaison entre cette séance et l'utilisation des dispositifs LumIoT permettrait d'évaluer l'effet de l'approche pratique sur les connaissances acquises.

Pour conclure cette revue des limites de notre expérimentation, ajoutons que nous avons évalué les connaissances des étudiants dans un court laps de temps après l'utilisation des dispositifs. Or, si nous avons constaté un effet positif à court terme, il aurait été intéressant d'évaluer l'évolution connaissances des étudiants sur un temps long. Une évaluation étalée

sur plusieurs semaines permettrait d'observer les effets des dispositifs LumIoT à long terme.

Malgré ces limites, les résultats de l'expérimentation permettent d'éclairer les défauts et l'intérêt de notre approche pour la médiation des savoirs scientifiques.

Les dispositifs LumIoT implémentent-ils le modèle DRI ?

Le modèle DRI a été formulé afin de donner un cadre opérable à notre approche et permettre la conception des dispositifs d'apprentissage LumIoT. Selon le modèle DRI, les données collectées issues de capteurs d'objets connectés alimentent en temps réel une représentation actualisée du phénomène à étudier. L'apprenant peut interagir avec cette représentation en agissant directement sur le phénomène dans l'environnement ou en interagissant avec un ou plusieurs objets connectés. Cependant, les dispositifs LumIoT implémentent-ils le modèle DRI tel qu'il a été décrit en section 5.1.3 ?

Au regard de la description du modèle DRI, les dispositifs Pram, Ecla, Lumi et Teco finalement conçus n'implémentent jamais complètement le modèle. On retrouve effectivement pour chacun des dispositifs les composantes Données, Représentations et Interactions cependant, certaines de leurs propriétés sont manquantes.

Dans le cadre du dispositif Pram, la composante Données comporte bien des données collectées par un capteur (photo d'une ampoule) et un traitement par un SIA (détection du texte dans la photo). Toutefois, les mesures de flux lumineux, d'intensité lumineuse et d'éclairement ne sont pas issues d'un capteur, mais calculées par l'apprenant. Au niveau de la composante Représentations, l'application *ConnaitreMonAmpoule* présente des explications, accompagnées de figures, à propos des propriétés d'une ampoule. Cependant, il n'y a pas d'actualisation en temps réel et les interactions sont limitées : l'apprenant doit prendre une photo, lancer une analyse puis cliquer sur différentes parties de la photo. En revanche, l'application *GrandeursPhotométriques* présente une représentation graphique actualisée en temps réel des grandeurs photométriques. Concernant les Interactions, l'apprenant peut ajouter des valeurs aux grandeurs photométriques représentées en réalité augmentée qui s'adaptent également lorsque l'apprenant déplace les marqueurs de réalité augmentée.

Rapportée au modèle DRI, la composante Données du dispositif Ecla correspond aux mesures d'éclairement collectées en continu *via* une application mobile à partir d'un capteur. La composante Représentations est constituée d'une représentation non actualisée en temps réel, mais créée par l'apprenant lui-même : celui-ci rapporte ses mesures dans un repère orthonormé pour créer une courbe. Au niveau de la composante Interactions, les actions de l'apprenant consistent à faire des tests d'éclairage et des observations, prendre des mesures et créer une courbe. Le dispositif Ecla amène l'apprenant à comparer explicitement les mesures attendues en théorie avec celles obtenues en pratiques.

Le dispositif Lumi est sans doute celui qui se rapproche le moins du modèle DRI. La composante Données comporte effectivement des mesures de luminance, d'éclairement ainsi que les paramètres d'exposition de l'appareil photo. En revanche, la composante Représentations est fortement réduite et n'est constituée que de surfaces représentant des scènes plus ou moins éclairées ainsi que des mesures prises par l'apprenant. En ce qui concerne la composante Interactions, elle implique principalement la manipulation d'objets physiques et l'utilisation d'objets connectés comme instruments de mesure. Notons toutefois que l'actualisation en

temps réel est bien présente en ceci que l'apprenant peut observer instantanément les effets de ces choix de surface sur la mesure de luminance.

Enfin, le dispositif Teco est celui se rapprochant le plus du modèle DRI. La composante Données est présente à travers les intensités de couleur collectées par le capteur de lumière 6 canaux, même si elle n'inclut pas de SIA. La composante Représentations est un graphique actualisé en temps réel représentant le spectre de la lumière émise par une source de lumière sous la forme d'intensités de couleur. Au niveau de la composante Interactions, les apprenants peuvent agir sur l'environnement au travers de l'objet connecté et faire des observations. Les actions directes sur l'environnement, sans passer par l'intermédiaire de la tablette, sont toutefois absentes.

La comparaison du modèle DRI décrit initialement avec les dispositifs d'apprentissage finalement conçus met en évidence la difficulté d'implémenter entièrement le modèle DRI. L'actualisation en temps réel des représentations ainsi que le recours à des SIA pour le traitement des données figurent parmi les aspects manquants les plus fréquents. Malgré tout, nous verrons que la conception des dispositifs LumIoT en suivant le modèle DRI a conduit à une progression des connaissances chez les apprenants après l'utilisation des dispositifs. En ce sens, le modèle DRI reste une piste de recherche à approfondir et apparaît davantage comme un objectif à atteindre plutôt qu'une fin en soi. Dans les paragraphes suivants, nous détaillons trois obstacles à l'implémentation du modèle DRI.

Contraintes de conception de dispositifs basés sur des objets connectés

Les pratiques des enseignants et des physiciens ont ceci de commun avec notre approche et le modèle DRI qu'elles visent à utiliser les objets connectés pour faciliter l'accès à l'expérimentation. Certains sont particulièrement enthousiastes à l'idée d'utiliser les objets connectés, principalement le smartphone, pour l'apprentissage des sciences. Selon eux, le smartphone est « *un instrument puissant au service de la démarche expérimentale* » (Chevrier, 2016) qui va permettre une « *démocratisation de l'accès à l'expérimentation* » (Delabre, 2019, p. 5). Selon nous, ce n'est pas aussi simple car, il ne s'agit pas simplement de posséder un smartphone pour mener des expérimentations. En réalité l'utilisation du smartphone, et d'autres objets connectés, pour la médiation des savoirs scientifiques est conditionnée à la possession d'un bagage de connaissances (e.g. informatique, physique, méthodologie scientifique). Les ressources d'apprentissage que nous avons présentées en section 5.1.3, sous la forme d'applications, de scénarios pédagogiques ou de tutoriels montrent que cela implique des opérations de création, d'adaptation et de transposition.

Faire de l'objet connecté un « *laboratoire de poche* » (Chevrier, 2016) requiert des connaissances dans plusieurs domaines. Savoir quels capteurs des objets connectés permettent d'explorer quels concepts requiert des connaissances en sciences. Par exemple en physique, si l'on souhaite illustrer un concept avec les capteurs d'objets connectés. Lorsque les ressources d'apprentissage existantes ne sont pas adaptées aux objectifs d'apprentissage, des connaissances en électronique et en informatique sont nécessaires. La conception d'un dispositif d'apprentissage peut inclure l'assemblage de microcontrôleurs et leur programmation informatique ou encore le développement d'applications mobiles.

D'une manière générale, la conception d'un dispositif d'apprentissage nécessite de se

confronter à une hétérogénéité de plusieurs niveaux :

— L'hétérogénéité est d'abord au niveau des modèles d'objets connectés qui, comme nous l'avons vu au chapitre 3, sont fabriqués selon des technologies et architectures différentes réduisant leur interopérabilité. Par exemple, les restrictions de sécurité différentes imposées par les fabricants font que le développement d'une application pour récupérer les mesures prises par un capteur peut varier d'un modèle d'objet connecté à l'autre. La mesure de l'éclairement est calculée à partir du capteur de la caméra pour l'iPhone, car Apple verrouille l'accès au capteur de luminosité ambiante au contraire des smartphones équipés du système Android ;

— L'hétérogénéité se situe également au niveau des applications mobiles : pour récupérer les mesures par un capteur particulier, il existe un large choix d'applications. La difficulté est de choisir parmi les nombreuses applications gratuites, dont la fiabilité des mesures et l'utilisabilité varient, parfois à cause de publicités intempestives [53]. Là encore, les ressources d'apprentissage partagées par les enseignants et chercheurs apportent une aide lorsqu'elles indiquent quelles applications utiliser ;

— L'hétérogénéité concerne également les formats d'exportation des données issues de capteurs collectées avec une application mobile. Lorsqu'elles intègrent une fonction d'exportation, les données peuvent être exportées sous la forme de photo, au format texte simple, au format CSV ou Excel. Cette hétérogénéité peut s'avérer contraignante lorsque plusieurs applications sont utilisées pour des objectifs différents, par exemple, pour collecter les données puis les représenter graphiquement.

Outre les connaissances requises, ces contraintes techniques freinent les possibilités d'adaptation de l'offre technologique aux objectifs d'apprentissage.

Adapter les savoirs scientifiques à l'objet connecté

Nous avons vu que le recours aux objets connectés pour la médiation des savoirs scientifiques est déterminé par les capteurs accessibles et les concepts scientifiques qu'ils permettent d'explorer. Si cette tâche peut demander une expertise dans des disciplines scientifiques, les ressources d'apprentissage existantes peuvent servir de relais pour montrer ce qui est possible. Les travaux des physiciens publiés dans la revue *The Physics Teacher* s'inscrivent pleinement dans cette optique : ils présentent des cas où un smartphone a permis d'illustrer un concept scientifique ou de transposer une expérience classique en physique. Toutefois, ces travaux s'adressent à un public d'experts en physique c'est pourquoi il peut être utile de consulter d'autres relais : les scénarios pédagogiques publiés dans le cadre des projets TRAaM 2017-2018 ou bien les tutoriels proposés par le site Smartphonique.fr ou la plateforme OpenTP.fr.

Les contraintes techniques imposées par les objets connectés n'ont pas seulement une influence sur les possibilités de médiation, mais impliquent aussi un ensemble d'adaptations pour inscrire les savoirs dans les supports médiatiques. Ces adaptations font partie de la transposition didactique, c'est-à-dire de l'ensemble d'actions effectuées par l'enseignant pour

53. Sur 135 applications mobiles dédiées aux enfants, Meyer et al. (2019) constatent que 95% contiennent au moins une publicité. Les auteurs observent que ces publicités peuvent être agressives : en interrompant l'enfant pendant qu'il joue (35% des cas), en l'obligeant à effectuer une action pour continuer à jouer (16% des cas) ou encore en se fondant dans le décor du jeu (7%).

transformer un savoir scientifique en un savoir à apprendre. Cependant, s'agissant des objets connectés, la transposition didactique implique de gérer les différents niveaux d'hétérogénéité qui ont été décrits plus précédemment. Par exemple, l'accéléromètre de l'iPhone ne fait pas la différence entre la gravité et l'accélération ce qui signifie qu'il mesure une accélération g de 9,81 m/s au lieu de 0.0 lorsque l'appareil est immobile. Cela doit être pris en compte lors de la transposition didactique afin de ne pas induire en erreur l'apprenant, par exemple, en donnant davantage d'explications sur l'iPhone ou en identifiant une application corrigeant le comportement de l'iPhone (Hochberg et al., 2018).

La gestion des différents niveaux d'hétérogénéité est d'autant plus importante que l'un des objectifs de notre approche de la médiation des savoirs scientifiques avec des objets connectés suppose une autonomie de la part de l'apprenant. Dans le cadre de notre approche, l'autonomie est à la fois recherchée et nécessaire, mais constitue dans le même temps une source accrue de difficultés pour les apprenants. Ainsi, les éléments de guidage doivent prendre en compte la diversité des équipements des apprenants.

Objets connectés et rapport aux savoirs scientifiques

Dans le cadre de l'apprentissage de savoirs scientifiques, l'autonomie implique l'adoption d'une démarche scientifique pour émettre des hypothèses, les tester et les reformuler. Si les mesures des capteurs sont exploitables dans un cadre pédagogique, elles sont sujettes à une incertitude (e.g. mauvaise manipulation, défaut de l'appareil) provoquant des divergences entre les valeurs théoriques obtenues par le calcul et les valeurs effectives données par les capteurs. Les résultats de l'expérimentation montrent que ces différences entre la théorie et la pratique ont mis en difficulté les apprenants.

Il nous semble que ces difficultés sont liées au rapport qu'entretiennent les apprenants avec les savoirs scientifiques. L'enseignement des sciences dans les établissements primaires et secondaires se concentre davantage sur les résultats scientifiques plutôt que sur la démarche adoptée par les chercheurs. Les travaux menés par Maurines et ses collègues interrogent les représentations des apprenants et des enseignants à propos des savoirs scientifiques et des scientifiques. Ils montrent que les apprenants et enseignants tendent à avoir une « *image empirico-inductive et réaliste 'naïve' des sciences* » où les savoirs élaborés par les scientifiques sont la « vérité » (Maurines, Fuchs-Gallezot, & Ramage, 2018 ; Maurines et al., 2013). En outre, l'enseignement des sciences accorde une faible place à la réalité humaine, sociale et culturelle de la construction des savoirs scientifiques :

> « *Les découvertes semblent instantanées, fixées à une date précise et surgies d'un esprit hors norme ayant eu une intuition géniale, provenir d'une idée indiscutable ou d'une expérience cruciale, et donc bien loin de la complexité des activités scientifiques* ». Maurines et Beaufils (2011), para. 15

Pourtant, les savoirs comportent une dimension anthropo-sociale en ceci qu'ils sont construits par des individus, pris dans un contexte socio-culturel particulier, qui échangent, débattent, tâtonnent, commettent des erreurs et se corrigent (voir section 2.1.2).

Selon nous, cette vision empiriste naïve des sciences pourrait expliquer les difficultés et les frustrations de certains étudiants durant l'expérimentation lorsqu'ils ne parvenaient à obtenir les résultats attendus en théorie. La tendance à l'objectivation des savoirs est

mise en contradiction par le mode d'apprentissage que proposent les dispositifs LumIoT. L'accessibilité de la prise de mesure et de l'expérimentation apportée par les objets connectés conduit nécessairement à observer des différences entre la théorie et la pratique. Les conflits entre la théorie et la pratique ont mis en difficulté les étudiants et peuvent les amener à reconsidérer le caractère objectif et vrai des savoirs scientifiques. Dans ces conditions, les éléments de guidage accompagnant les dispositifs devraient viser à outiller l'apprenant sur le plan cognitif pour le préparer à suivre une démarche expérimentale, à faire des observations et à expérimenter. En ce sens, cet outillage pourrait consister en la présentation de stratégies métacognitives permettant à l'apprenant de réfléchir sur ses propres actions et de réguler son comportement. De cette façon, l'utilisation d'objets connectés pour la médiation conduit à la préhension des savoirs scientifiques du point de vue de leur élaboration *via* une démarche expérimentale, en prise avec le réel.

*
* *

Au chapitre précédent, nous avons identifié, répertorié, classé et analysé les dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés ce qui nous a permis de dégager les caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'IdO. En valorisant ce travail, nous avons élaboré une approche articulant les spécificités des objets connectés avec les mécanismes de l'apprentissage humain pour la médiation des savoirs scientifiques. L'incomplétude et la subjectivité de la perception humaine sont des obstacles à l'apprentissage de savoirs scientifiques étant donné leur caractère abstrait et souvent contre-intuitif. Ainsi, l'hypothèse de notre approche est que les dimensions Données et Agents des objets connectés permettent d'étendre la perception humaine afin de rendre intelligibles des phénomènes physiques intangibles. Afin d'évaluer les effets, les contraintes et les enjeux de notre approche, nous avons conduit une expérimentation auprès d'étudiants en Master 1 Produits et Services Multimédia (UFR STGI Montbéliard). Pour rendre opérable notre approche et permettre la conception de dispositifs d'apprentissage, nous avons élaboré le modèle Données-Représentations-Interactions. Selon ce modèle, les données collectées par des objets connectés et traitées par des SIA alimentent des représentations d'un phénomène physique. L'apprenant construit ses connaissances en interagissant avec ces représentations, en faisant des observations, en formulant des hypothèses et en expérimentant. L'ensemble de dispositifs LumIoT a ainsi été conçu pour la découverte et l'apprentissage des grandeurs photométriques (e.g. flux lumineux, intensité lumineuse, éclairement, luminance) et du concept de température de couleur. Les résultats de l'expérimentation suggèrent que les dispositifs LumIoT, conçus selon le modèle DRI, ont permis de rendre intelligibles les grandeurs photométriques et la température de couleur. Nous avons pu constater une progression des connaissances des étudiants ainsi qu'un effet positif sur leur engagement. Cependant, l'expérimentation a également montré les difficultés de conception tant au niveau de l'implémentation du modèle DRI que des éléments de guidage destinés à aider les étudiants. Nous montrons que lorsqu'elle s'appuie sur des objets connectés, la médiation de savoirs scientifiques implique un travail important de création, d'adaptation et de transposition didactique. Enfin, en rapprochant la théorie et la pratique, l'usage d'objets connectés bouscule la représentation objective et empiriste naïve des étudiants à propos des savoirs scientifiques.

Conclusions et perspectives de recherche

> L'homme animé par l'esprit scientifique désire sans doute le savoir, mais c'est aussitôt pour mieux interroger
>
> – Gaston Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique*, 1938

La diffusion des savoirs dans une société, entre les personnes et les groupes sociaux, s'exerce de manière formelle et informelle en passant par des canaux variés. La médiation des savoirs s'opère aussi bien dans un cadre institutionnel (e.g. système éducatif) et professionnel (e.g. compagnonnage) qu'à travers les échanges avec les proches et l'utilisation de dispositifs socionumériques. Pour chacune de ces situations, la médiation met en jeu des valeurs, des normes et des représentations sociales propres à une culture sur le rôle de la transmission et le processus d'apprentissage.

Depuis les années 2010, le développement de l'IdO correspond à une nouvelle étape dans l'évolution des TIC : celle de leur imbrication avec les objets du quotidien. Transformés en objets connectés, ils servent de supports à l'ensemble de technologies, d'applications et de services que constitue l'IdO. Les objets connectés sont dotés de capacités de calcul, de communication, de collecte de données et d'action sur l'environnement. Leur multiplication bouscule les usages et les pratiques en prise avec l'environnement physique, du contrôle médical à l'assemblage de machine industrielle en passant par la domotique et la gestion de troupeaux de bêtes. Parallèlement, l'essor de l'apprentissage artificiel pour la conception de systèmes d'IA (SIA) ouvre la voie à des objets connectés capables de simuler un comportement intelligent dans l'environnement. La pervasivité des systèmes d'automatisation et des fonctions d'assistance intelligente ainsi que l'abondance d'informations masquent une part de la complexité du réel. Ainsi, la capacité à apprendre et les moyens disponibles pour favoriser l'apprentissage sont cruciaux pour comprendre le monde dans lequel nous vivons.

Le travail de recherche que nous présentons dans ce manuscrit étudie les possibilités médiatiques apportées par les objets connectés et la manière dont elles peuvent contribuer à la médiation des savoirs. À l'instar de la micro-informatique, d'internet, du web social et de l'informatique mobile, nous avons posé comme hypothèse de travail qu'il doit se trouver des usages d'objets connectés pour l'apprentissage. Plus précisément, les fonctions des objets connectés étant en lien avec l'environnement physique (e.g. collecte de données sur l'environnement), celles-ci pourraient servir pour la création d'activités pratiques, en accord avec les

théories constructiviste et socioconstructiviste de l'apprentissage. Conséquemment, il s'agissait d'étudier les usages existants et potentiels des objets connectés pour l'apprentissage ainsi que les conditions d'utilisation dans lesquelles ils peuvent enrichir la médiation des savoirs. Nous avons répondu à notre problématique en établissant les spécificités des objets connectés et leurs articulations avec les mécanismes de l'apprentissage. Puis, nous avons élaboré une approche visant à exploiter les spécificités des objets connectés dans le cadre de la médiation des savoirs scientifiques. En vue d'évaluer cette approche, nous avons conçu un ensemble de dispositifs d'apprentissage et mené une expérimentation avec des apprenants.

Ces résultats ont été obtenus tout d'abord en faisant l'état des connaissances apportées par la psychologie cognitive et les neurosciences sur les mécanismes d'apprentissage du cerveau et le processus de construction des connaissances. Il a été montré que les mécanismes de l'apprentissage sont, d'une part modulés par l'attention, les mémoires, les émotions et, d'autre part, qu'ils sont stimulés par l'engagement cognitif, physique et social. L'apprenant construit ses connaissances en traitant activement les informations transmises pour élaborer des représentations sur le monde. Le contexte socio-culturel influence également les représentations que l'apprenant construit ; celles-ci dépendent, par exemple, des opinions de ses proches ou des groupes sociaux auxquels il appartient. Par suite, nous avons souligné le rôle clé de l'expérience pour favoriser l'apprentissage, car elle confronte l'apprenant à une situation-problème authentique l'incitant à observer attentivement, à formuler des hypothèses et à expérimenter.

Toutefois, nous avons vu que la transmission des informations est un processus complexe relevant de problématiques techniques, mais surtout communicationnelles et sémio-cognitives. La réception des informations transmises est influencée par la perception de l'environnement, elle-même conditionnée par les sensations, les expériences passées et les connaissances déjà acquises. Ainsi, les TIC sont utilisées dans le cadre de dispositifs opérant une médiation entre l'apprenant et les savoirs pour créer des conditions favorables à la construction des connaissances. Cette médiation vise la transmission des informations ainsi que l'organisation de la situation de communication dans laquelle se déroule l'apprentissage pour favoriser la réception des informations. À cette fin, les dispositifs de médiation doivent articuler des spécificités techniques avec une stratégie d'apprentissage, des savoirs à apprendre, des modalités de présentation, etc. Dès lors, pour traiter notre problématique, nous avons examiné les possibilités techniques apportées par les objets connectés, leurs spécificités et la manière dont elles peuvent servir des objectifs de médiation.

Lors de l'état de l'art sur le contexte historique et technologique du développement des objets connectés et de l'IdO, nous avons pu montrer que celui-ci s'inscrit dans la continuité des évolutions marquantes des TIC. L'idée d'un objet physique du quotidien embarquant un système informatique et un moyen de communication est apparue avec les premiers pas d'internet et du web. Cependant, un flou conceptuel entoure les objets connectés et l'IdO, et ce pour plusieurs raisons : la pluralité de leurs origines conceptuelles (e.g. informatique ubiquitaire, M2M), l'hétérogénéité des technologies qu'ils mobilisent (e.g capteurs, protocole réseau), la diversité des acteurs qui s'y intéressent (e.g. chercheur en SIC ou en informatique, industriel, publicitaire). Ainsi, une partie de notre travail a consisté à lever le flou conceptuel afin de délimiter notre objet de recherche et d'étudier les spécificités des objets connectés pour la médiation des savoirs.

Modèle DIAP : synthèse des spécificités des objets connectés

La première des contributions que nous présentons dans ce manuscrit est le modèle DIAP créé pour analyser les spécificités des objets connectés au sein de dispositifs d'apprentissage. Le modèle DIAP synthétise les spécificités techniques des objets connectés et de l'IdO au travers de quatre dimensions : Données, Interfaces, Agents et Pervasivité. Nous avons défini ces dimensions à partir de l'état de l'art sur le développement de l'IdO, en particulier en observant les points communs des usages d'objets connectés dans différents domaines (e.g. santé, agriculture). De ces quatre dimensions, nous pouvons en dégager le trait caractéristique des objets connectés et de l'IdO : leur rapport étroit avec l'environnement.

La dimension Données désigne les grandeurs physiques collectées par les capteurs des objets connectés dans l'environnement. Ces Données sont des paramètres environnementaux (e.g. humidité, luminosité), comportementaux (e.g. gestes, mouvements des yeux) et physiologiques (e.g. pouls, température de la peau). La seconde dimension, Interfaces, décrit l'orientation des modes d'interaction entre les usages et les objets connectés vers des modalités dites naturelles pour l'humain (e.g. gestes, voix). Nous avons distingué les interfaces surfaciques (e.g. écran tactile), tangibles (e.g. matière programmable, jouet réalisant un couplage physique/numérique) et ambiantes (lorsqu'elles ne sollicitent pas directement l'attention de l'utilisateur). La dimension Agents correspond aux systèmes d'IA, embarqués dans les objets connectés ou situés dans le *cloud*, permettant d'analyser les Données collectées par les capteurs. Dans le cadre de cette dimension, nous avons pointé l'apport de l'apprentissage artificiel pour analyser les données et ainsi assurer la cohérence du comportement de l'objet connecté en fonction des données collectées. Enfin, la Pervasivité, dernière dimension du modèle DIAP, fait référence à la réduction des contraintes d'accès à l'information liée à la multiplication des objets connectés dans l'environnement. Cela se traduit par une extension du champ des activités possibles en mobilité, la continuité de l'expérience utilisateur à travers plusieurs appareils et la prise en compte du contexte.

À partir de la synthèse opérée par les quatre dimensions, il est possible de discerner les dispositifs relevant ou non de l'IdO, mais également d'envisager les potentielles applications et services de l'IdO. Bien que le modèle ait été élaboré pour analyser les dispositifs d'apprentissage, nous avons pu démontrer avec l'exemple de la santé que son applicabilité va au-delà de notre problématique de recherche. Nous pensons que cet outil conceptuel sera utile pour décrire et penser les possibilités médiatiques apportées par les objets connectés pour d'autres problématiques de recherche.

Usages des objets connectés pour l'apprentissage

Dans le cadre de notre recherche, le modèle DIAP a permis d'identifier et de répertorier les usages existants d'objets connectés parmi les nombreux travaux sur les technologies éducatives. Ce travail d'identification a été la première étape vers la constitution d'une classification des usages des objets connectés pour l'apprentissage.

Pour aboutir à cette classification, nous avons rassemblé puis classé un corpus de dispositifs d'apprentissage en fonction de leurs utilisations des objets connectés. Notre classification comporte des limites, inhérentes à la manière dont nous l'avons construite. Les catégories de

dispositif ne correspondent pas à des niveaux de granularité équivalents (certaines étant plus générales et transversales que d'autres) et leurs intitulés sont des idéaltypes masquant parfois la complexité de la réalité qu'elles décrivent. Néanmoins, l'intérêt de ce travail d'identification et de classification réside dans le paysage qu'il donne à voir de la façon dont les objets connectés sont utilisés pour l'apprentissage. Ce paysage facilite la lecture de l'état de l'art et, en ceci, pourra servir de bases à de nouvelles recherches dans ce domaine.

Selon notre classification, les Données des objets connectés ont deux usages pour l'apprentissage : l'observation de l'environnement et le suivi de l'apprenant. Dans le premier cas, les Données issues des capteurs des objets connectés sont un matériel d'apprentissage : l'apprenant collecte des données dans l'environnement pour comprendre un phénomène (e.g. météo, montée des eaux, pollution urbaine). Dans le second cas, les Données sont exploitées pour étendre le suivi de l'apprenant en dehors des plateformes d'apprentissage, pour prendre en compte les déplacements et les activités informelles de l'apprenant.

Concernant les Interfaces des objets connectés, celles-ci sont utilisées dans le cadre de dispositifs d'apprentissage incitant l'apprenant à manipuler des objets. Les interfaces surfaciques et tangibles permettent de donner une forme concrète et palpable à des concepts abstraits (par exemple, en géométrie ou en algèbre). Cette utilisation des objets connectés souscrit à la théorie de la cognition incarnée postulant que les fonctions sensori-motrices soutiennent les fonctions cognitives (e.g. attention, mémoire, raisonnement) et donc contribuent à la construction des connaissances. Une autre utilisation des Interfaces des objets connectés est l'intégration d'informations contextuelles dans l'environnement. Les interfaces ambiantes et la réalité augmentée sont employées au sein de dispositifs visant à apporter l'information à l'apprenant au bon moment et au bon endroit.

De leur côté, les Agents (dont les SIA) sont intégrés à des dispositifs d'apprentissage pour analyser les données captées par les objets connectés et ainsi inférer l'état psychologique de l'apprenant. Cette utilisation des SIA s'appuie sur le fait que l'engagement de l'apprenant, sa motivation et, plus généralement ses émotions, ont une influence prépondérante sur le processus de construction des connaissances. Les SIA sont utilisés pour détecter l'engagement ou les émotions de l'apprenant en temps réel afin d'adapter la méthode d'apprentissage. En outre, nous avons aussi noté que les SIA pouvaient également être utilisés pour ajouter des fonctions aux objets connectés tels que la reconnaissance d'objets et la synthèse vocale. Ces fonctions servent alors à assister l'apprenant durant l'activité d'apprentissage.

Enfin, la Pervasivité des objets connectés permet de créer des dispositifs d'apprentissage où l'apprenant explore l'environnement, en dehors des lieux formellement dédiés à l'apprentissage. Pour cela, il peut s'appuyer sur plusieurs appareils différents sans que cela affecte l'expérience de l'apprentissage. L'objectif des dispositifs exploitant la Pervasivité est d'ancrer le processus d'apprentissage dans un cadre authentique et situé donnant du sens aux savoirs.

Lors de l'analyse de ces différents dispositifs, nous avons mis en évidence que l'apprentissage est basé sur des interactions, médiatisées par des objets connectés, entre l'apprenant et l'environnement. De par ces interactions avec l'environnement, les dispositifs d'apprentissage impliquant des objets connectés portent sur des savoirs scientifiques tels que la physique, la biologie et les mathématiques. Les dispositifs s'inscrivent essentiellement dans les théories constructiviste et socioconstructiviste et mettent en œuvre des stratégies d'apprentissage

actif, basées sur l'investigation et la présentation des savoirs sous la forme de problèmes. Les apprenants tendent à être autonomes, prenant part à des activités pratiques, voir à des situations proches de la réalité. Nous distinguons trois facteurs communs visés par les dispositifs répertoriés pour favoriser l'apprentissage : l'engagement physique de l'apprenant, la contextualisation des savoirs et l'authenticité du matériel pédagogique.

Ce travail de recherche en deux temps, de l'élaboration du modèle DIAP à la classification des dispositifs, renseigne sur les caractéristiques de l'apprentissage avec des objets connectés. Nous soutenons que dans la continuité des apprentissages mobiles et ubiquitaires, les objets connectés accentuent le rôle de l'environnement dans les dispositifs utilisant les TIC pour l'apprentissage. Dans le cadre de l'apprentissage mobile, l'environnement est inclus dans l'apprentissage sous la forme d'un moment ponctuel d'interaction puis, avec l'apprentissage ubiquitaire, l'environnement déclenche l'apprentissage. Quant aux dispositifs d'apprentissage basés sur des objets connectés, l'analyse des catégories que nous avons construites suggère qu'ils portent sur l'environnement et que les savoirs à apprendre y sont liés. Ainsi, avec les objets connectés, l'environnement est à la fois le lieu, la raison et l'objet de l'apprentissage.

Ces premiers résultats avaient pour but d'identifier les usages existants des objets connectés et d'expliciter les raisons qui les sous-tendent. Dans un second temps, notre recherche s'est portée sur les usages potentiels, à l'articulation entre les spécificités techniques des objets connectés et les mécanismes de l'apprentissage.

Approche pour la médiation des savoirs scientifiques

À partir des résultats précédents, nous avons élaboré une approche pour la médiation des savoirs scientifiques avec des objets connectés. Nous soutenons l'hypothèse selon laquelle les spécificités des objets connectés permettent de rendre intelligibles des concepts scientifiques abstraits décrivant des phénomènes intangibles. Cette hypothèse s'appuie sur plusieurs postulats établissant d'une part les difficultés propres à l'apprentissage des sciences et, d'autre part, l'intérêt des objets connectés en réponse à ces difficultés.

Selon les théories de l'apprentissage, notamment le constructivisme et le socioconstructivisme, apprendre implique de mettre en relation les nouvelles informations avec ce que nous savons déjà. Or, nos représentations du monde peuvent s'avérer erronées et entrer en contradiction avec les savoirs à apprendre. En effet, nos représentations sont élaborées de manière intuitive à partir de notre expérience quotidienne. Elles s'affinent au fil des discussions avec nos proches et au sein de groupes sociaux plus larges ou encore *via* les informations glanées sur les médias sociaux. Outre leur dimension sociale, nos représentations sont aussi influencées par l'incomplétude et la subjectivité de la perception humaine. La réalité perçue est conditionnée par les sens, dont les caractéristiques diffèrent d'un individu à l'autre (e.g. acuité visuelle, niveau de l'audition) et auxquels échappent une partie des stimuli présents dans l'environnement (e.g. infrarouge, ultrason). Les travaux des neuroscientifiques montrent que le cerveau s'appuie sur les données sensorielles pour forger des représentations mentales cohérentes avec l'expérience sensible quotidienne. L'influence de la perception sur les représentations fait partie des obstacles à l'apprentissage des sciences, car les savoirs sont souvent contre-intuitifs, abstraits et décrivent des phénomènes qui échappent aux sens.

Pour dépasser la confrontation entre notre perception quotidienne de la réalité et les savoirs scientifiques, des enseignants et des vulgarisateurs de sciences cherchent à rendre visible l'invisible. Cette pratique éducative consiste à illustrer des concepts scientifiques et à dévoiler leurs facettes cachées à l'aide d'objets du quotidien et au travers d'expériences ludiques. Nous avons pu relever que certains enseignants du secondaire et du supérieur utilisent le smartphone dans le même but dans le cadre de l'enseignement scientifique. Le smartphone est utilisé pour sa dimension Données, en tant qu'instrument de mesure permettant aux élèves de collecter individuellement des données sur l'environnement et de faire des expériences.

Notre approche s'inscrit dans la continuité de ces pratiques éducatives. Nous proposons d'utiliser les dimensions Données et Agents des objets connectés pour étendre la perception de l'apprenant afin de rendre intelligible un phénomène intangible. Le but de notre approche est de créer des interactions entre ce que l'apprenant perçoit d'un phénomène physique et ce qu'un objet connecté « perçoit » par le biais de capteurs et de systèmes d'IA. En accord avec les théories constuctiviste et socioconstructiviste, ces interactions doivent amener l'apprenant à traiter activement les informations en vue de stimuler le processus de construction des connaissances.

Afin de rendre opérable notre approche, nous avons élaboré le modèle Données - Représentations - Interactions (DRI). Celui-ci propose un cadre aux dimensions techniques, communicationnelles et sémio-cognitives inhérentes à un dispositif d'apprentissage. Selon le modèle DRI, les données collectées par les capteurs d'objets connectés et analysées par des SIA alimentent en temps réel des représentations d'un phénomène physique. L'apprenant construit ses connaissances en interagissant avec le phénomène, directement ou par l'intermédiaire des représentations proposées par l'objet connecté. En suivant une stratégie d'apprentissage par l'expérience, l'objectif est que les interactions de l'apprenant reflètent les étapes de la méthode scientifique : observation, formulation d'hypothèses, expérimentation. De plus, suivant les conditions d'utilisation, l'apprenant peut être amené à discuter ses hypothèses et à échanger avec d'autres apprenants. Nous postulons que cette stratégie conduit à l'engagement de l'apprenant, sur le plan cognitif (e.g. test des hypothèses), physique (e.g. manipulation d'objets) et social (e.g. discussions). Finalement, le modèle DRI doit permettre à l'apprenant de questionner et ré-évaluer ses représentations du monde en fonction de ce qu'il perçoit avec les objets connectés.

Dispositifs LumIoT : apprendre les grandeurs photométriques avec des objets connectés

Le dernier volet de notre recherche porte sur l'évaluation de notre approche et du modèle DRI. Dans ce cadre, nous avons présenté l'ensemble de dispositifs LumIoT et les résultats d'une expérimentation auprès d'étudiants.

Nous avons conçu l'ensemble de dispositifs LumIoT pour l'apprentissage des grandeurs photométriques et de la température de couleur qui sont des concepts abstraits et intangibles. LumIoT est composé de quatre sous-dispositifs portant chacun sur un concept spécifique : Pram (sur le flux lumineux), Ecla (sur l'éclairement), Lumi (sur la luminance) et Teco (sur les degrés Kelvins). En suivant le cadre donné par le modèle DRI, nous avons pensé les

dispositifs LumIoT de façon à engager l'apprenant dans une démarche active. Les concepts ont été présentés sous la forme de questions auxquelles les étudiants pouvaient apporter des réponses à l'aide des dispositifs. Pour concevoir ces dispositifs, nous avons détourné les fonctions standards d'ampoules connectées à l'aide d'applications pour smartphones et tablettes. Nous avons développé : l'application native pour iOS *Lumière&Couleurs* pour contrôler les ampoules ; l'application web *ConnaitreMonAmpoule* afin d'analyser les indications présentes sur une ampoule à l'aide d'un SIA ; l'application web *GrandeursPhotométriques* pour visualiser les grandeurs photométriques en réalité augmentée. Un programme pour microcontrôleur Arduino a également été adapté et implémenté pour représenter le spectre des couleurs émises par l'ampoule. En complément, nous avons sélectionné plusieurs applications mobiles existantes qui, après des tests, se sont révélées pertinentes pour les dispositifs.

Pour étudier les effets, les contraintes et les enjeux de notre approche, nous avons conduit une expérimentation avec les dispositifs LumIoT auprès d'étudiants en Master 1 « Produits et Services Multimédia » de l'Université de Franche-Comté (site de Montbéliard). L'objectif était d'évaluer les résultats en termes d'apprentissage, mais aussi d'analyser les usages des objets connectés et leurs effets sur les conditions d'apprentissage et sur le rapport aux savoirs. Nous avons fait l'hypothèse que : les dispositifs LumIoT permettraient de rendre intelligibles les grandeurs photométriques et la température de couleur ; l'utilisation d'objets connectés aurait un effet positif sur l'engagement des étudiants et que celui-ci serait aussi influencé par le niveau de maîtrise des TIC ; l'utilisation d'objets connectés change le rapport aux savoirs scientifiques des étudiants. Ces hypothèses ont été évaluées par le biais de questionnaires avant et après l'utilisation des dispositifs LumIoT.

L'expérimentation a été utile pour avancer par rapport à notre problématique de recherche néanmoins, sa portée est limitée par la taille de l'échantillon (17 étudiants), leur profil et le choix des instruments d'évaluation. Par conséquent, l'expérimentation apporte avant tout des indications sur des directions de recherche à suivre.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que les dispositifs LumIoT ont permis d'étendre la perception des étudiants afin de rendre intelligibles les grandeurs photométriques et la température de couleur. Les étudiants ont pu apprendre en observant concrètement ces concepts, en faisant des observations et des expérimentations. Les dispositifs LumIoT ont eu un effet positif sur l'engagement des étudiants cependant, celui-ci ne semble pas avoir été influencé par le niveau de maîtrise des technologies numériques des étudiants. Ces résultats ne sont pas négligeables, car les dispositifs portaient sur des concepts scientifiques et les étudiants ne suivaient pas un cursus scientifique. En outre, les réponses des étudiants aux questions ouvertes suggèrent que l'engagement est dû à l'autonomie dont ils bénéficiaient pour apprendre, la possibilité de manipuler des objets et le lien direct entre la théorie et la pratique. Toutefois, l'expérimentation a aussi mis en évidence des points à améliorer dans les dispositifs LumIoT : la clarté des éléments de guidage, le volume d'informations par dispositif et leur utilisabilité. Nous avons notamment pu observer que la conception de dispositifs tels que LumIoT doit résoudre une tension entre l'autonomie recherchée des étudiants — nécessaire pour qu'ils formulent des hypothèses et expérimentent — et le besoin d'accompagnement dans cette démarche.

Nous avons complété l'analyse des résultats de l'expérimentation en les mettant en perspective avec les usages existants des objets connectés pour la médiation des savoirs scientifiques. Dans le cadre de ces usages, les objets connectés sont présentés comme des instruments de mesure, des laboratoires de poche qui rendraient accessibles les sciences à tout un chacun. Nous avons nuancé cette présentation optimiste en montrant qu'il ne s'agit pas simplement de disposer d'un objet connecté pour apprendre les sciences. Utiliser les objets connectés pour étudier des savoirs scientifiques requiert des connaissances en SIC, en informatique, en électronique et en didactique. S'il existe néanmoins des ressources d'apprentissage (e.g. scénario pédagogique, applications mobiles) pour faciliter la conception, il est difficile de choisir parmi la quantité disponible ou, plus simplement, de les identifier. D'autre part, concevoir des dispositifs basés sur des objets connectés implique un travail de transposition didactique conséquent afin d'adapter la présentation des savoirs à l'hétérogénéité des modèles d'objets connectés, des applications mobiles et des mesures prises par les capteurs.

Finalement, nous remarquons que l'un des principaux apports des objets connectés pour l'apprentissage est le rapprochement entre les connaissances théoriques et leur application dans des conditions réelles. Les dispositifs LumIoT ont permis aux étudiants de mettre en regard les observations attendues en théorie avec ce qu'ils ont observé en pratique. Ce point a d'ailleurs été une source de difficultés pour les étudiants lorsque la théorie et la pratique divergeaient. Cependant, d'après nous, ces difficultés reflètent le rapport des étudiants aux savoirs scientifiques qu'ils tendent à objectiver selon une vision empiriste naïve des découvertes scientifiques. Les objets connectés, notamment dans le cadre de notre approche, favorisent une préhension des savoirs du point de vue de leur construction, en suivant le cheminement réflexif des scientifiques fait d'observations, de tâtonnements et d'erreurs.

Perspectives

Lorsque nous avons entamé cette recherche doctorale, notre problématique visait à interroger la manière dont les spécificités des objets connectés peuvent s'articuler avec les mécanismes de l'apprentissage. Les contributions que nous venons de rappeler mettent en évidence que les objets connectés peuvent être utilisés pour la médiation des savoirs. À travers l'analyse des usages existants, nous avons montré que les possibilités médiatiques des objets connectés concernent aussi bien leurs dimensions Données, Interfaces, Agents et Pervasivité. De plus, notre approche et le modèle DRI démontrent que le couplage des objets connectés avec des SIA permet d'enrichir la médiation des savoirs scientifiques en traitant les difficultés inhérentes à cette forme de médiation. Toutefois, ces contributions ne permettent pas de couvrir tous les aspects de la thématique de recherche liée à l'utilisation des objets connectés pour l'apprentissage ni d'étayer les nouvelles hypothèses qui en ont découlé. Plusieurs points pourraient être développés à partir de nos résultats.

En premier lieu, nous avons proposé le modèle DIAP comme outil conceptuel synthétisant les spécificités des objets connectés et de l'IdO dans le but de faciliter l'identification des usages pour l'apprentissage. Les dimensions du modèle DIAP décrivent des éléments techniques et fonctionnels de l'IdO sans tenir compte de leurs effets sociaux, politiques, éthiques ou économiques. Ces effets sont critiques au premier rang desquels nous pourrions citer les

potentielles atteintes à la vie privée et la surveillance des individus qui sont des questions traitées au niveau des TIC en général. Toutefois, certains effets sont plus spécifiques à l'IdO tels que la transformation de l'environnement pour garantir le fonctionnement des capteurs et des objets connectés. Selon nous, il est nécessaire d'étendre le modèle DIAP pour interroger les spécificités des objets connectés et de l'IdO au-delà des considérations technologiques.

En second lieu, notre travail de classification des dispositifs d'apprentissage est utile pour saisir l'état des recherches sur l'apprentissage dans le contexte de l'IdO et leurs ancrages théoriques. Dans la continuité de ce travail, une étude approfondie des usages des objets connectés par les enseignants du secondaire et du supérieur permettrait d'avoir une meilleure compréhension de la médiation opérée par les objets connectés. Nous pensons qu'il serait intéressant d'orienter l'étude sur : (i) le rapport des élèves et des enseignants aux savoirs scientifiques et son évolution après l'utilisation d'objets connectés ; (ii) la manière dont les enseignants du secondaire et du supérieur communiquent et mettent en avant leurs activités pédagogiques. Concernant ce second axe, nous avons parfois pu constater les objets connectés sont parfois mis en avant pour l'image d'innovation qu'ils véhiculent plus que pour leur apport pédagogique.

En troisième lieu, notre expérimentation avec les dispositifs LumIoT montre que les spécificités des objets connectés peuvent être utiles pour la médiation des savoirs scientifiques. Dans la perspective de futures expérimentations, il serait intéressant de mettre en place un protocole d'observation en temps réel des usages de façon à en conserver une trace. En outre, le protocole pourrait être complété par la mise en place d'un groupe témoin d'étudiants apprenant les concepts de grandeurs photométriques et de température de couleur sans les dispositifs LumIoT. Ce protocole d'observation apporterait une vue détaillée de la manière dont sont utilisés les objets connectés et les effets qu'ils induisent par comparaison à d'autres modes d'apprentissage.

Dernièrement, le modèle DRI a permis de concevoir des dispositifs couplant les spécificités des objets connectés avec des SIA pour créer les conditions d'un apprentissage par l'expérience. En ce sens, un premier pas vers la poursuite des recherches serait la création d'outils pour faciliter la conception de dispositifs selon le modèle DRI, notamment en améliorant l'accessibilité des ressources permettant de l'implémenter.

Notre recherche doctorale a montré que les spécificités des objets connectés peuvent effectivement s'articuler avec les mécanismes de l'apprentissage à des fins de médiation des savoirs. Il revient aux prochaines recherches d'affiner d'autres aspects (e.g. sociologique, didactique) des usages des objets connectés pour l'apprentissage et des effets qu'ils impliquent.

Liste des publications au cours de la thèse

Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture

ACL 1. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2020. Objets connectés : catalyseurs dans la médiation des savoirs scientifiques. *Distances et Médiations des Savoirs*. 30 | 2020. https://journals.openedition.org/dms/5028

ACL 2. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2018. Internet des Objets pour l'apprentissage humain. *Internet des Objets*. Vol. 2, n°1. ISSN 2514-8273.

ACL 3. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2017. Semantic Web Technologies to Sustain Ubiquitous Learning. In : *Proceeding of the 17th International Conference on Informatics in Economy, Education, Research & Business Technologies*. Bucarest, Roumanie : mai 2017, pp. 96-101. ISSN 2247-1480. Indexation ISI Thomson Reuters.

Communications avec actes dans un congrès international

C-ACTI 1. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2019. De l'objet connecté à l'environnement intelligent : des enjeux pour la médiation ? In : ROXIN I., SALEH I., BOUHAÏ N., LELEU-MERVIEL S., JEANNERET Y., ZACKLAD M., MASSOU L. (dirs). *H2PTM'19 - De l'hypertexte aux humanités numériques*. Montbéliard (France), ISTE éditions, pp. 368-386.

C-ACTI 2. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2019. Identification de ressources pédagogiques numériques pour un apprentissage avec les objets connectés. In : DAMOME E., AKAM N., KIYINDOU A., (dirs). *Systèmes connectés, données et économie numérique dans l'espace francophone*. Bordeaux (France), L'Harmattan, pp. 151-163.

C-ACTI 3. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2018. Using the Internet of Things for Learning. In : *Proceeding of the 18th International Conference on Informatics in Economy, Education, Research & Business Technologies*. Iasi, Roumanie : mai 2018. ISSN 2247-1480

C-ACTI 4. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2017. Semantic Annotation of Web Resources to Learn with Connected Things. In : *Proceedings of the EL2017 International Conference*. Lisbonne, Portugal : juillet 2017, pp. 213-216.

C-ACTI 5. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2017. Accessibility and Interoperability of Pedagogical Resources in the Context of Internet of Things. In : *INTED2017 Proceedings*. Valencia, Espagne : mars 2017.

Communications avec actes dans un congrès national

C-ACTN 1. BOUCHEREAU, Aymeric et ROXIN, Ioan, 2019. Objets connectés : nouveaux dispositifs pour la médiation des savoirs scientifiques ? In : ROXIN I., TAJARIOL F., HOSU I., PELISSIER N. (dirs). *Information Communication et Humanités numériques. Enjeux et défis pour un enrichissement épistémologique*. Cluj-Napoca (Roumanie), Edition Accent, pp. 109-128.

C-ACTN 2. BOUCHEREAU, Aymeric, 2018. Appréhender la réalité de l'Internet des Objets dans le cadre de l'apprentissage humain. In : *Actes du SemDoc IRIS 2018*. Metz, France : Carnets des jeunes chercheurs du CREM.

C-ACTN 3. BOUCHEREAU, Aymeric, 2018. Applications de l'Internet des Objets pour soutenir l'apprentissage. In : *Actes des Septièmes RJC EIAH 2018*. Besançon : avril 2018, pp. 33-39.

Chapitres d'ouvrage scientifique

COS 1. ROXIN, Ioan et BOUCHEREAU, Aymeric, 2017. Introduction aux technologies de l'écosystème de l'Internet des Objets. In : N. Bouhaï et I. Saleh (dir.). *Internet des Objets : Évolutions et Innovations*. Londres : ISTE Éditions, mai 2017, pp. 63-106. ISBN 978-1-78405-271-3

COS 2. ROXIN, Ioan et BOUCHEREAU, Aymeric, 2017. Écosystème de l'Internet des Objets. In : N. Bouhaï et I. Saleh (dir.). *Internet des Objets : Évolutions et Innovations*. Londres : ISTE Éditions, mai 2017, pp. 63-106. ISBN 978-1-78405-271-3

Bibliographie

Abowd, G. D., Atkeson, C. G., Bobick, A. F., Essa, I. A., MacIntyre, B., Mynatt, E. D., & Starner, T. E. (2000). Living Laboratories : The Future Computing Environments Group at the Georgia Institute of Technology. In *CHI '00 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (p. 215–216). CHI EA '00. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery.

Acemoglu, D. & Restrepo, P. (2019, mai). Automation and New Tasks : How Technology Displaces and Reinstates Labor. *Journal of Economic Perspectives*, *33*(2), 3–30.

Ackoff, R. L. (1989). From Data to Wisdom. *Journal of applied systems analysis*, *16*(1), 3–9.

Afelete, A. D. K. (2014, février). *Body Area Network - Standardization, Analysis and Application* (thèse de doct., Université des sciences appliquées Savonia, Finlande).

Albero, B. (2004). Technologies et formation : travaux, interrogations, pistes de réflexion dans un champ de recherche éclaté. *Savoirs*, *5*(2), 9–69.

Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. (2015). Smart Cities : Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives. *Journal of Urban Technology*, *22*(1), 3–21. https://econpapers.repec.org/article/tafcjutxx/v_3a22_3ay_3a2015_3ai_3a1_3ap_3a3-21.htm.

Alheit, P. & Dausien, B. (2005, mars). Processus de formation et apprentissage tout au long de la vie. *L'orientation scolaire et professionnelle*, *34*(1), 57–83.

Ali, M., Bilal, H. S. M., Razzaq, M. A., Khan, J., Lee, S., Idris, M., ... Kang, B. H. (2017, août). IoTFLiP : IoT-Based Flipped Learning Platform for Medical Education. *Digital Communications and Networks*, *3*(3), 188–194.

Alkhabbas, F., Spalazzese, R., & Davidsson, P. (2019, septembre). Characterizing Internet of Things Systems through Taxonomies : A Systematic Mapping Study. *Internet of Things*, *7*, 100084.

Alreshidi, E. (2019). Smart Sustainable Agriculture (SSA) Solution Underpinned by Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI). *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *10*(5).

Anderson, C. W. & Smith, E. L. (1986). *Children's Conceptions of Light and Color : Understanding The Role of Unseen Rays* (ResearchSeries No. N° 166). Michigan State Univ., East Lansing. Inst. for Research on Teaching.

Andler, D. (1998). Turing : Pensée Du Calcul, Calcul de La Pensée. In F. Nef & D. Vernant (Éds.), *Les Années 1930 : Réaffirmation Du Formalisme* (p. 1–41). Paris : VRIN.

Andročec, D. & Vrček, N. (2018). Machine Learning for the Internet of Things Security : A Systematic Review. In *Proceedings of the 13th International Conference on Software Technologies* (p. 563–570). Porto, Portugal : SCITEPRESS - Science and Technology Publications.

Ashton, K. (2009, juin). That 'Internet of Things' Thing. *RFID Journal*. http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986.

Astolfi, J.-P. (1992, octobre). *L'école pour apprendre*. Paris : ESF Editeur.

Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y., & Toussaint, J. (2008). Introdution. Didactique des sciences et formation des enseignants. In J.-P. Astolfi, É. Darot, Y. Ginsburger-Vogel, & J. Toussaint (Éds.), *Mots-clés de la didactique des sciences* (T. 2e éd. p. 5–13). Pratiques pédagogiques. Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur.

Athalye, A., Engstrom, L., Ilyas, A., & Kwok, K. (2018, juillet). Synthesizing Robust Adversarial Examples. In J. Dy & A. Krause (Éds.), *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning* (T. 80, p. 284–293). Proceedings of Machine Learning Research. Stockholmsmässan, Stockholm Sweden : PMLR.

Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968, janvier). Human Memory : A Proposed System and Its Control Processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Éds.), *Psychology of Learning and Motivation* (T. 2, p. 89–195). Academic Press.

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010, octobre). The Internet of Things : A Survey. *Computer Networks*, *54*(15), 2787–2805.

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2014). From "Smart Objects" to "Social Objects" : The next Evolutionary Step of the Internet of Things. *Communications Magazine, IEEE*, *52*(1), 97–105.

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017, mars). Understanding the Internet of Things : Definition, Potentials, and Societal Role of a Fast Evolving Paradigm. *Ad Hoc Networks*, *56*, 122–140.

Ausubel, D. (1968). *Educational Psychology : A Cognitive View*. Holt, Rinehart and Winston : New York.

Azémard. (2013). *100 notions pour le crossmédia et les transmédia.* Paris : L'immatériel Editions.

Baboulin, J.-C., Gaudin, J.-P., & Mallein, P. (1983). *Le magnétoscope au quotidien : un demi-poucede liberté*. Paris : Aubier Montaigne.

Bachelard, G. (1993). *La Formation de l'esprit Scientifique*. Paris : VRIN.

Baddeley, A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford : Clarendon.

Badillo, P.-Y. (2015). Usages et Technologie : Les MOOCs : Une Innovation Majeure Ou Une Romance Inconstante ? In P.-Y. Badillo & D. Roux (Éds.), *Le Numérique Pour Enseigner Autrement* (p. 150). https://archive-ouverte.unige.ch/unige:77578. Paris : Economica.

Bailey, K. D. (1994). *Typologies and Taxonomies : An Introduction to Classification Techniques*. Thousand Oaks, Calif. : Sage.

Baillargeon, R. & DeVos, J. (1991, décembre). Object Permanence in Young Infants : Further Evidence. *Child Development*, *62*(6), 1227–1246.

Balacheff, N. (2017). Seymour Papert (1928-2016) Aux sources d'une pensée innovante et engagée. *Recherches en Didactique des Mathematiques*, *37*(2/3), 383–396.

Balfour, S. (2013, juin). Assessing Writing in MOOCs : Automated Essay Scoring and Calibrated Peer Review. *Research & Practice in Assessment*, *8*(Summer 2013), 40–48.

Bandura, A. (1997). *Self-Efficacy : The Exercise of Control*. New York, NY, USA : Freeman.

Bangor, A., Kortum, P. T., & Miller, J. T. (2008, juillet). An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. *International Journal of Human–Computer Interaction*, *24*(6), 574–594.

Baron, G.-L. (2013). La recherche francophone sur les « technologies » en éducation : Réflexions rétrospectives et prospectives. *Revue STICEF*, *20*(2013), 1–16.

Barrett, T. J., Stull, A. T., Hsu, T. M., & Hegarty, M. (2015, février). Constrained Interactivity for Relating Multiple Representations in Science : When Virtual Is Better than Real. *Computers & Education*, *81*, 69–81.

Bates, A. W. ((2015, avril). *Teaching in a Digital Age*. https://opentextbc.ca/teachingina digitalage/. Vancouver, BC, CANADA : Tony Bates Associates Ltd.

Baudrit, A. (2007). Apprentissage coopératif/Apprentissage collaboratif : d'un comparatisme conventionnel à un comparatisme critique. *Les Sciences de l'education - Pour l'Ere nouvelle*, *40*(1), 115–136.

Beaufils, D. & Richoux, B. (2003). Un schéma théorique pour situer les activités avec des logiciels de simulation dans renseignement de la physique. *Didaskalia*, *2003*(23), 9–38.

Becker, S., Klein, P., Gössling, A., & Kuhn, J. (2020, octobre). Using Mobile Devices to Enhance Inquiry-Based Learning Processes. *Learning and Instruction*, *69*, 101350.

Bégin, C. (2008, octobre). Les stratégies d'apprentissage : un cadre de référence simplifié. *Revue des sciences de l'éducation*, *34*(1), 47–67.

Beland, L.-P. & Murphy, R. (2016, août). Ill Communication : Technology, Distraction & Student Performance. *Labour Economics*. SOLE/EALE Conference Issue 2015, *41*, 61–76.

Bellinger, G., Castro, D., & Mills, A. (2004). Data, Information, Knowledge, and Wisdom. http://www.systems-thinking.org/dikw/dikw.htm.

Benghozi, P.-J., Bureau, S., & Massit-Folléa, F. (2008, octobre). *L'internet Des Objets. Quels Enjeux Pour Les Européens ?* Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00405070/document. Paris.

Bengio, Y. (2016). La Révolution de l'apprentissage Profond. *Pour la Science*, *Juillet 2016*(465), 42–49.

Bengio, Y., Lamblin, P., Popovici, D., & Larochelle, H. (2007). Greedy Layer-Wise Training of Deep Networks. In B. Schölkopf, J. C. Platt, & T. Hoffman (Éds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 19* (p. 153–160). MIT Press.

Bengio, Y. & LeCun, Y. (2007). Scaling Learning Algorithms towards AI. In L. Bottou, O. Chapelle, D. DeCoste, & J. Weston (Éds.), *Large-Scale Kernel Machines* (p. 321–360). Cambridge, MA, USA : MIT Press.

Bennett, J., Lubben, F., & Hogarth, S. (2007, mai). Bringing Science to Life : A Synthesis of the Research Evidence on the Effects of Context-Based and STS Approaches to Science Teaching. *Science Education*, *91*(3), 347–370.

Bernard, R. M., Borokhovski, E., Schmid, R. F., Tamim, R. M., & Abrami, P. C. (2014, avril). A Meta-Analysis of Blended Learning and Technology Use in Higher Education : From the General to the Applied. *Journal of Computing in Higher Education*, *26*(1), 87–122.

Berners-Lee, T., Hendler, J., & Lassila, O. (2001). The Semantic Web. *Scientific american*, *284*(5), 28–37. https://www.scientificamerican.com/article/the-semantic-web/.

Berthoz, A. (2012, mars). Bases neurales de la décision. Une approche de neurosciences cognitives. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, *170*(2), 115–119.

Besse, P. & Vialaneix, N. (2014). Statistique et Big Data Analytics Volumétrie – L'Attaque des Clones. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00995801v3/document.

Bianco, A. M., De Marsico, M., & Temperini, M. (2004). *Standards for E-Learning* (rapp. tech. N° 2004-3538/001-001 ELE - ELEB14). TISIP Research Foundation.

Bingel, J., Barrett, M., & Klerke, S. (2018). Predicting Misreadings from Gaze in Children with Reading Difficulties. In *Proceedings of the Thirteenth Workshop on Innovative Use of NLP for Building Educational Applications* (p. 24–34). New Orleans, Louisiana : Association for Computational Linguistics.

Bizer, C., Heath, T., & Berners-Lee, T. (2009). Linked Data - The Story So Far. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, *5*, 1–22.

Blandin, B. (2010, octobre). Dispositifs techniques pour l'éducation, la formation et l'apprentissage. *Distances et savoirs*, *8*(2), 223–234. http://www.cairn.info/revue-distances-et-savoirs-2010-2-page-223.htm.

Bloom, B., Engelhart, M., Furst, E., Walker, H., & Krathwohl, D. (1956). *Taxonomy of Educational Objectives : The Classification of Educational Goals*. Handbook I : Cognitive Domain. New York, NY, USA : David McKay Company.

Bolt, R. (1980). "Put-That-There" : Voice and Gesture at the Graphics Interface. In *Proceedings of the 7th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (p. 262–270). New York, NY, USA : Association for Computing Machinery.

Bolton, R. N., McColl-Kennedy, J. R., Cheung, L., Gallan, A., Orsingher, C., Witell, L., & Zaki, M. (2018, octobre). Customer Experience Challenges : Bringing Together Digital, Physical and Social Realms. *Journal of Service Management*, *29*(5), 776–808.

Bomsdorf, B. (2005). Adaptation of Learning Spaces : Supporting Ubiquitous Learning in Higher Distance Education. In N. Davies, T. Kirste, & H. Schuman (Éds.), *Mobile Computing and Ambient Intelligence : The Challenge of Multimedia* (T. 05181). Dagstuhl Seminar Proceedings. Dagstuhl, Germany : Internationales Begegnungs und Forschungszentrum für Informatik (IBFI).

Bonfils, P. (2007, décembre). *Dispositifs socio-techniques et mondes persistants : quelles médiations pour quelle communication dans un contexte situé ?* (Thèse de doct., Université du Sud Toulon Var). https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00257247.

Bonfils, P., Collet, L., Durampart, M., & Duvernay, D. (2015). Penser de nouveaux moyens de formation immersifs en fonction de l'humain : le cas du dispositif d'un constructeur aéronautique. *Revue des Interactions Humaines Médiatisées (RIHM)*, *16*(1), 61–92. https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/sic_01793604.

Bordeaux, M.-C. & Renaud, L. (2018, janvier). Patrimoine « augmenté » et mobilité : Vers un renouvellement de l'expérience culturelle du territoire. *Interfaces numériques*, *1*(2), 286–286.

Borgia, E. (2014, décembre). The Internet of Things Vision : Key Features, Applications and Open Issues. *Computer Communications*, *54*, 1–31.

Bouchereau, A. (2018, avril). Applications de l'Internet des Objets pour soutenir l'apprentissage. In *Actes des 7ièmes RJC EIAH 2018* (p. 33–39). https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01769453/document. Besançon, France.

Bouchereau, A. & Roxin, I. (2018). Internet des Objets pour l'apprentissage humain. *Internet des Objets*. ISTE OpenScience, *2*(1), 1–15.

Bouchereau, A. & Roxin, I. (2019). Objets connectés : nouveaux dispositifs pour la médiation des savoirs scientifiques ? In I. Roxin, I. Hosu, N. Pélissier, & F. Tajariol (Éds.), *Information, Communication et Humanités numériques* (p. 109–128). 23e Colloque franco-roumain en Sciences de l'Information et de la Communication. https://www.researchgate.net/profile/Ioan_Hosu/publication/336603703_Information_Communication_et_Humanites_Numeriques/links/5da80d22a6fdccdad54ade6d/Information-Communication-et-Humanites-Numeriques.pdf. Cluj-Napoca, Roumanie : Edition Accent.

Bouquet, F., Dauphin, C., Bernard, F., & Bobroff, J. (2019, janvier). Low-Cost Experiments with Everyday Objects for Homework Assignments. *Physics Education*, *54*(2), 1–7.

Bourda, Y., Gauthier, G., De Regil, R.-M. G., & Catteau, O. (2010). Métadonnées Pour Ressources d Apprentissage (MLR) : Nouvelle Norme ISO de Description de Ressources Pédagogiques. *Revue STICEF*, *17*, 1–11. https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00696450/.

Bourgeois, É. (2013). Expérience et apprentissage. La contribution de John Dewey. In L. Albarello, J.-M. Barbier, É. Bourgeois, & M. Durand (Éds.), *Expérience, activité, apprentissage* (p. 13–38). Paris : Presses Universitaires de France.

Boutet, M. (2016). Expérience et projet : la pensée de Dewey traduite en action pédagogique. *Phronesis*, *5*(2), 23–34.

Bouveresse-Quilliot, R. (1998, novembre). *L'empirisme anglais. Locke, Berkeley, Hume.* Paris : Presses Universitaires de France - PUF.

Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018, octobre). The Industrial Internet of Things (IIoT) : An Analysis Framework. *Computers in Industry*, *101*, 1–12.

Braunstein, C. J. (2012). Mobile Device Management. *Army Communicator*, *37*(2), 28–30. https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA564964.

Breux, S. & Diaz, J. (2017, février). *La Ville Intelligente Origine, Définitions, Forces et Limites d'une Expression Polysémique*. INRS Université de recherche.

Brooke, J. (1996). SUS - A Quick and Dirty Usability Scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & I. McClelland (Éds.), *Usability Evaluation in Industry* (p. 189–194). London : Taylor and Francis.

Brougère, G. (2008). Jean Lave, de l'apprentissage situé à l'apprentissage aliéné. *Pratiques de formation-Analyses*, *54*, 49–63.

Brown, A. L. (1987). Metacognition, Executive Control, Self-Regulation, and Other More Mysterious Mechanisms. In F. E. Weinert & R. H. Kluwe (Éds.), *Metacognition, Motivation, and Understanding* (p. 65–116). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.

Brown, J. S., Collins, A., & Duguid, P. (1989). Situated Cognition and the Culture of Learning. *Educational Researcher*, *18*(1), 32–42.

Brown, S., Tramayne, S., Hoxha, D., Telander, K., Fan, X., & Lent, R. (2008, juin). Social Cognitive Predictors of College Students' Academic Performance and Persistence : A Meta-Analytic Path Analysis. *Journal of Vocational Behavior*, *72*, 298–308.

Bruner, J. (2015, septembre). *Le développement de l'enfant : Savoir faire, savoir dire*. Paris : Presses Universitaires de France.

Buchanan, B., Feigenbaum, E., & Lederberg, J. (1969). Heuristic DENDRAL : A Program for Generating Explanatory Hypotheses in Organic Chemistry. In B. Meltzer & D. Michie (Éds.), *Machine Intelligence* (T. 4, p. 209–254). Edinburgh University Press.

Buolamwini, J. & Gebru, T. (2018). Gender Shades : Intersectional Accuracy Disparities in Commercial Gender Classification. In S. Friedler & C. Wilson (Éds.), *Conference on Fairness, Accountability, and Transparency* (T. 81, p. 1–15). Proceedings of Machine Learning Research. New York, NY, USA : PMLR.

Bush, V. (1945). As We May Think. *The Atlantic*, *176*(1). https://www.theatlantic.com/magazine/archive/1945/07/as-we-may-think/303881/.

Buzsáki, G., Peyrache, A., & Kubie, J. (2014). Emergence of Cognition from Action. *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology*, *79*, 41–50.

Caramazza, A., Anzellotti, S., Strnad, L., & Lingnau, A. (2014, juillet). Embodied Cognition and Mirror Neurons : A Critical Assessment. *Annual Review of Neuroscience*, *37*(1), 1–15.

Cárdenas-Robledo, L. A. & Peña-Ayala, A. (2018, août). Ubiquitous Learning : A Systematic Review. *Telematics and Informatics*, *35*(5), 1097–1132.

Carre, P. & Charbonnier, O. (2003). *Les apprentissages professionnels informels*. Paris : L'Harmattan.

Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities : A Survey of Factor-Analytic Studies*. Human Cognitive Abilities : A Survey of Factor-Analytic Studies. New York, NY, US : Cambridge University Press.

Carroll, M., Ruble, M., Dranias, M., Rebensky, S., Chaparro, M., Chiang, J., & Winslow, B. (2020, mars). Automatic Detection of Learner Engagement Using Machine Learning and Wearable Sensors. *Journal of Behavioral and Brain Science*, *10*(3), 165–178.

Casey, D. M. (2008, avril). A Journey to Legitimacy : The Historical Development of Distance Education through Technology. *TechTrends*, *52*(2), 45–51.

Castoriadis, C. (1996). *La montée de l'insignifiance*. Paris : Editions du Seuil.

Castro-Alonso, J., Paas, F., & Ginns, P. (2019, août). Embodied Cognition, Science Education, and Visuospatial Processing. In J. Castro-Alonso (Éd.), *Visuospatial Processing for Education in Health and Natural Sciences* (p. 175–205). Springer, Cham.

Castro-Palacio, J. C., Velazquez-Abad, L., Gimenez, M. H., & Monsoriu, J. A. (2012, décembre). Using the Mobile Phone Acceleration Sensor in Physics Experiments : Free and Damped Harmonic Oscillations. *American Journal of Physics*, *81*(6), 472–475. http://arxiv.org/abs/1212.4403. arXiv : 1212.4403

Cattell, R. B. (1941, janvier). Some Theoretical Issues in Adult Intelligence Testing. *Psychological Bulletin*, *38*, 592. https://www.scienceopen.com/document?vid=dbfe3959-1f98-4453-9639-f914325c8da3.

Cerf, V. & Kahn, R. (1974, mai). A Protocol for Packet Network Intercommunication. *IEEE Transactions on Communications*, *22*(5), 637–648.

Chambry, É. & Platon. (1975). *Oeuvres complètes. Tome VII,1e partie : La République*. https://fr.wikisource.org/wiki/La_R%C3%A9publique_(trad._Chambry)/Livre_VII. Paris : Les Belles Lettres.

Chang, I.-H., Keh, H.-C., Dande, B., & Roy, D. S. (2020, mars). Smart Hat : Design and Implementation of a Wearable Learning Device for Kids Using AI and IoTs Techniques. *Journal of Internet Technology*, *21*(2), 593–604. https://jit.ndhu.edu.tw/article/view/2281.

Charlier, B., Deschryver, N., & Peraya, D. (2006). Apprendre en présence et à distance. *Distances et savoirs*, *4*(4), 469–496. https://www.cairn.info/revue-distances-et-savoirs-2006-4-page-469.htm.

Chartier, D. & Lautrey, J. [J.]. (1992). Peut-on Apprendre à Connaitre et à Contrôler Son Propre Fonctionnement Cognitif ? *L'orientation scolaire et professionelle*, *21*(1), 27–46.

Chaudiron, S. & Ihadjadene, M. (2010, décembre). De la recherche de l'information aux pratiques informationnelles. *Études de communication. langages, information, médiations*, *2010*(35), 13–30.

Checkland, P. & Holwell, S. (2002). Data, Capta, Information and Knowledge. In M. Hinton (Éd.), *Understanding Business Functions* (p. 5–11). https://ccourse.arabou.edu.kw/LMS_eBooks/OU_Courses'eBooks/B202/Supp%20Readings%203%20and%204%20(%20SUP733139%20)/BZD202SuppReading3and4%20i1%201%20arab%20pp1%20141(%20db2463%20).pdf#page=5. The Open University.

Cheng, H. C. & Liao, W. W. (2012, février). Establishing an Lifelong Learning Environment Using IOT and Learning Analytics. In *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)* (p. 1178–1183). PyeongChang : IEEE.

Chevallard, Y. (1991). *La transposition didactique*. Paris : La Pensée Sauvage.

Chevrier, J. (2016). Des smartphones pour faire des expériences de physique au lycée et à l'université. https://www.researchgate.net/publication/280646922_Des_smartphones_pour_faire_des_experiences_de_physique_au_lycee_et_a_l%27universite.

Chevrier, J., Madani, L., Ledenmat, S., & Bsiesy, A. (2013, septembre). Teaching Classical Mechanics Using Smartphones. *The Physics Teacher*, *51*(6), 376–377.

Chippindale, C. (2000, octobre). Capta and Data : On the True Nature of Archaeological Information. *American Antiquity*, *65*(4), 605–612.

Chomienne, E. & Lehmans, A. (2012). Réseaux sociaux et apprentissages collaboratifs à l'université. In *Colloque international de l'université à l'ère du numérique* (p. 12). https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00688562. Lyon, France.

Chomsky, N. (1959). Review of Verbal Behavior. *Language*, *35*(1), 26–58.

Chomsky, N. (2000). *New Horizons in the Study of Language and Mind*. Cambridge, MA, USA : Cambridge University Press.

Chopplet, M. (2018, mai). Smart City : quelle intelligence pour quelle action ? Les concepts de John Dewey, scalpels de la ville intelligente. *Quaderni*, (96), 71–86.

Chung, J. Y. & Lee, S. (2019, janvier). Dropout Early Warning Systems for High School Students Using Machine Learning. *Children and Youth Services Review*, *96*, 346–353.

Clark, A. (2013, juin). Whatever next ? Predictive Brains, Situated Agents, and the Future of Cognitive Science. *Behavioral and Brain Sciences*, *36*(3), 181–204.

Clark, R. E. (1994, juin). Media Will Never Influence Learning. *Educational Technology Research and Development*, *42*(2), 21–29.

Claustrat, B. (2009, janvier). Mélatonine et troubles du rythme veille-sommeil. *Médecine du Sommeil*, *6*(1), 12–24.

Clements, D. H. (2000). 'Concrete' Manipulatives, Concrete Ideas. *Contemporary Issues in Early Childhood*, *1*(1), 45–60.

Cleveland, H. (1982, décembre). Information As a Resource. *Futurist*, *16*(6), 34–39.

Coenen-Huther, J. (2007, juillet). Classifications, typologies et rapport aux valeurs. *Revue européenne des sciences sociales. European Journal of Social Sciences*, (XLV-138), 27–40.

Coffield, F., Moseley, D., Hall, E., & Ecclestone, K. (2004). *Learning Styles and Pedagogy in Post-16 Learning : A Systematic and Critical Review*. Learning and Skills Research Centre. London.

Cohen, N. J. & Squire, L. R. [L. R.]. (1980, octobre). Preserved Learning and Retention of Pattern-Analyzing Skill in Amnesia : Dissociation of Knowing How and Knowing That. *Science*, *210*(4466), 207–210.

Commission européenne. (2000, mai). *eLearning - Penser l'éducation de demain*.

Conant, S. (2015). The IoT Will Be as Fundamental as the Internet Itself. http://radar.oreilly.com/2015/06/the-iot-will-be-as-fundamental-as-the-internet-itself.html.

Conlon, T. (2004, février). A Review of Informal Learning Literature, Theory and Implications for Practice in Developing Global Professional Competence. *Journal of European Industrial Training*, *28*, 283–295.

Cormerais, F., Le Deuff, O., Lakel, A., & Pucheu, D. (2017). L'école et l'avenir de la culture digitale. In V. Liquète, B. Le Blanc, & G. Rouet (Éds.), *Les élèves, entre cahiers et claviers* (78, p. 87–95). Hermès. Paris : CNRS Éditions.

Courtier, P. (2019, décembre). *L'impact de La Pédagogie Montessori Sur Le Développement Cognitif, Social et Académique Des Enfants En Maternelle* (Thèse de Doctorat, Lyon). https://www.theses.fr/2019LYSE1286.

Couzinet, V. (2006, juin). Les connaissances au regard des sciences de l'information et de la communication : sens et sujets dans l'inter-discipline. In *Semaine de la connaissance* (p. 1–6). Université de Nantes.

Couzinet, V. (2009, mai). *Dispositifs info-communicationnels : Questions de médiations documentaires*. Paris : Hermes Science Publications.

Cox, M. (2012, décembre). Informatique et apprentissage des sciences : tendances, dilemmes et conséquences pour l'avenir. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (6), 23–52.

Cristol, D. & Muller, A. (2013, août). Les apprentissages informels dans la formation pour adultes. *Savoirs*, *n° 32*(2), 11–59.

Croisile, B. (2009, novembre). Approche neurocognitive de la mémoire. *Gerontologie et societe*, *vol. 32 / n° 130*(3), 11–29.

Cvrkel, T. (2018, juillet). The Ethics of mHealth : Moving Forward. *Journal of Dentistry*. Digital Technologies in Oral & Dental Research, *74*, S15–S20.

Dagognet, F. (1989). *Eloge de l'objet : pour une philosophie de la marchandise*. Paris : Vrin.

Damasio, A. R. (1994). *Descartes' Error : Emotion, Reason, and the Human Brain*. New York : G.P. Putnam.

Daneels, A. & Salter, W. (1999). What Is SCADA ? In *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems* (p. 339–343). https://cds.cern.ch/record/532624/files/mc1i01.pdf. Trieste, Italie.

Darwin, C. J., Turvey, M. T., & Crowder, R. G. (1972, avril). An Auditory Analogue of the Sperling Partial Report Procedure : Evidence for Brief Auditory Storage. *Cognitive Psychology*, *3*(2), 255–267.

Davallon, J. (2004a). La médiation : la communication en procès. *Médiation & information (MEI)*, (19), 37–59.

Davallon, J. (2004b). Objet concret, objet scientifique, objet de recherche. *Hermes, La Revue*, *38*(1), 30–37.

Davenport, T. H. & Prusak, L. (1997). *Information Ecology : Mastering the Information and Knowledge Environment*. New York, NY, USA : Oxford University Press, Inc.

de Singly, F. (2016). *Le questionnaire*. Paris : Armand Colin.

Deary, I. J., Penke, L., & Johnson, W. (2010, mars). The Neuroscience of Human Intelligence Differences. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(3), 201–211.

Deb, A. (2015). Phantom Vibration and Phantom Ringing among Mobile Phone Users : A Systematic Review of Literature. *Asia-Pacific Psychiatry*, *7*(3), 231–239.

Debons, A., Horne, E., & Cronenweth, S. (1988). *Information Science : An Integrated View*. Boston, MA, USA : GK Hall.

Deci, E. L. & Ryan, R. M. (2000, octobre). The "What" and "Why" of Goal Pursuits : Human Needs and the Self-Determination of Behavior. *Psychological Inquiry*, *11*(4), 227–268.

Deci, E. L. & Ryan, R. M. (2008, février). Favoriser la motivation optimale et la santé mentale dans les divers milieux de vie. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, *49*(1), 24–34.

Dede, C. [C.]. (2009, janvier). Immersive Interfaces for Engagement and Learning. *Science*, *323*(5910), 66–69.

Dede, C. [Chris], Salzman, M., & Loftin, R. (1996, janvier). ScienceSpace : Research on Using Virtual Reality to Enhance Science Education. In *Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium* (p. 246–252). Santa Clara, CA, USA.

Dehaene, S. (2014). Fondements Cognitifs Des Apprentissages Scolaires. http://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2014-2015.htm.

Dehaene, S. (2018). *Apprendre ! : les talents du cerveau, le défi des machines*. Paris, France : Odile Jacob.

Del Sol, M. (2020, avril). La Réglementation Française de l'assurance Santé à l'épreuve Des Objets Connectés et Des Pratiques de Profilage. In S. Turgis, M. Boizard, & A. Bensamoun (Éds.), *Le Profilage En Ligne : Entre Libéralisme et Régulation*. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02500864. Mare & Martin.

Delabre, U. (2019). *Smartphonique : expériences de physique avec un smartphone*. Malakoff, France : Dunod.

Depraz, N. & Husserl, E. (2012). *La crise de l'humanite europeenne et la philosophie (1935), Husserl*. La Gaya Scienza.

Derian, M. (2018, mars). *Les prothèses cognitives du corps humain*. Londres : ISTE Editions.

Déro, M. & Heutte, J. (2008). Impact des TIC sur les conditions de travail dans un établissement d'enseignement supérieur. Auto-efficacité, flow et satisfaction au travail. In *Colloque International JOCAIR'08* (p. 191–205). Amiens.

Dewey, J. (1969). *Experience and Education*. New York : Collier Books.

Dewey, J. (2005, septembre). « La réalité comme expérience ». *Tracés. Revue de Sciences humaines*, (9), 83–91.

Dhanvijay, M. M. & Patil, S. C. (2019, avril). Internet of Things : A Survey of Enabling Technologies in Healthcare and Its Applications. *Computer Networks*, *153*, 113–131.

Di Serio, Á., Ibáñez, M. B., & Kloos, C. D. (2013, octobre). Impact of an Augmented Reality System on Students' Motivation for a Visual Art Course. *Computers & Education*, *68*, 586–596.

Dillavou, S., Rubinstein, S. M., & Kolinski, J. M. (2019, mars). The Virtual Frame Technique : Ultrafast Imaging with Any Camera. *Optics Express*, *27*(6), 8112–8120.

Dillenbourg, P. (1999). What Do You Mean by Collaborative Learning ? In P. Dillenbourg (Éd.), *Collaborative-Learning : Cognitive and Computational Approaches* (Elsevier, p. 1–19). Oxford.

Dillenbourg, P. & Hong, F. (2008, mars). The Mechanics of CSCL Macro Scripts. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, *3*(1), 5–23.

Ding, H., Chen, C., Qi, S., Han, C., & Yue, C. (2018, mai). Smartphone-Based Spectrometer with High Spectral Accuracy for mHealth Application. *Sensors and Actuators A : Physical*, *274*, 94–100.

Dodge, M. & Kitchin, R. (2005, décembre). Codes of Life : Identification Codes and the Machine-Readable World. *Environment and Planning D : Society and Space*, *23*(6), 851–881.

Doherty, A. & Forés Miravalles, A. (2019, septembre). Physical Activity and Cognition : Inseparable in the Classroom. *Frontiers in Education*, *4*, 1–7.

Doise, W., Mugny, G., & Perret-Clermont, A.-N. (1975). Social Interaction and the Development of Cognitive Operations. *European Journal of Social Psychology*, *5*(3), 367–383.

Donker, A. S., de Boer, H., Kostons, D., Dignath van Ewijk, C. C., & van der Werf, M. P. C. (2014, janvier). Effectiveness of Learning Strategy Instruction on Academic Performance : A Meta-Analysis. *Educational Research Review*, *11*, 1–26.

Doueihi, M. (2016). Apprentissage et Humanités Numériques. Une Longue Histoire. In M. Bourgatte, M. Ferloni, & L. Tessier (Éds.), *Quelles Humanités Numériques Pour l'éducation ?* (p. 10–16). https://books.google.fr/books?id=CYRzDQAAQBAJ&hl=fr. MkF Editions.

Dougiamas, M. (1999, janvier). A Journey into Constructivism. https://dougiamas.com/writing/constructivism.html.

Dourish, P. & Bell, G. (2011). *Divining a Digital Future : Mess and Mythology in Ubiquitous Computing*. Cambridge, Mass : MIT Press.

Downes, S. (2005, décembre). An Introduction to Connective Knowledge. https://www.downes.ca/cgi-bin/page.cgi?post=33034.

Dreyfus, H. L. (1972). *What Camputers Can't Do : A Critique of Artificial Reason* (1st). New York, NY, USA : Harper & Row, Publishers, Inc.

Druga, S. (2018). *Growing up with AI* (Thèse de Doctorat, Massachusetts Institute of Technology).

Duffy, T. M. & Cunningham, D. J. (1996). Constructivism : Implications for the Design and Delivery of Instruction. In D. H. Jonassen (Éd.), *Handbookof Research for Educational Communications and Technology* (p. 170–199). New York, NY, USA : Simon & Schuster Macmillan.

Dufort, D. (2016, décembre). *Outils Sémantiques d'aide à La Conception de Jeux Pervasifs Pour La Médiation Culturelle* (Thèse de Doctorat, Besançon). http://www.theses.fr/2016BESA1020.

Dujol, L. & Mercier, S. (2017). *Médiation numérique des savoirs : des enjeux aux dispositifs*. Montreal QC, Canada : Éditions ASTED.

Dyer, S. (2018). Using Mobile Devices to Improve Engineering Education : A Process Control Laboratory Example. In *2018 ASEE Zone IV Conference* (p. 10). https://peer.asee.org/29632. Boulder, Colorado.

Dzedzickis, A., Kaklauskas, A., & Bucinskas, V. (2020, janvier). Human Emotion Recognition : Review of Sensors and Methods. *Sensors*, *20*(3), 592.

Ellul, J. (1965). Réflexions Sur l'ambivalence Du Progrès Technique. *La Revue administrative*, *18*(106), 380–391. https://www.jstor.org/stable/40777750.

Ellul, J. (1990). *Le Bluff technologique*. Paris : Hachette.

Ertmer, P. A. & Newby, T. J. (1993). Behaviorism, Cognitivism, Constructivism : Comparing Critical Features From an Instructional Design Perspective. *Performance Improvement Quarterly*, *6*(4), 43–71.

Eustache, F., Viard, A., & Desgranges, B. (2016, janvier). The MNESIS Model : Memory Systems and Processes, Identity and Future Thinking. *Neuropsychologia*, *87*, 96–109.

Eveno, E. (2018, mai). La Ville intelligente : objet au cœur de nombreuses controverses. *Quaderni*, (96), 29–41.

Faure, E., Herrera, F., Kaddoura, A.-R., Lopes, H., Petrovski, A., Rahnema, M., & Champion Ward, F. (1972). *Learning to Be : The World of Education Today and Tomorrow*. Le Monde sans Frontière. Paris : Unesco/Fayard.

Feher, E. & Meyer, K. R. (1992, mai). Children's Conceptions of Color. *Journal of Research in Science Teaching*, *29*(5), 505–520.

Feynman, R. P. (1987). *Lumière et matière : une étrange histoire*. Paris : InterEditions.

FitzGerald, E., Ferguson, R., Adams, A., Gaved, M., Mor, Y., & Thomas, R. (2013, octobre). Augmented Reality and Mobile Learning : The State of the Art. *International Journal of Mobile and Blended Learning*, *5*(4), 43–58.

Flavell, J. H. (1976). Metacognitive Aspects of Problem Solving. In L. B. Resnick (Éd.), *The Nature of Intelligence* (p. 231–236). Hillsdale, New Jersey, USA : Erlbaum.

Flemisch, F., Bielecki, K., Hernández, D. L., Meyer, R., Baier, R., Herzberger, N. D., & Wasser, J. (2020). Let's Get in Touch Again : Tangible AI and Tangible XR for a More Tangible, Balanced Human Systems Integration. In T. Ahram, W. Karwowski, A. Vergnano, F. Leali, & R. Taiar (Éds.), *Intelligent Human Systems Integration 2020* (T. 1131, p. 1007–1013). Cham : Springer International Publishing.

Fourquet-Courbet, M.-P. & Courbet, D. (2017, août). Anxiété, dépression et addiction liées à la communication numérique. Quand Internet, smartphone et réseaux sociaux font un malheur. *Revue française des sciences de l'information et de la communication*, (11 | 2017).

Frenkel, S. (2014). Composantes métacognitives ; définitions et outils d'évaluation. *Enfance*, *4*(4), 427–457. https://www.cairn.info/revue-enfance2-2014-4-page-427.htm.

Friesen, N. (2012). *Report : Defining Blended Learning*. https://www.normfriesen.info/papers/Defining_Blended_Learning_NF.pdf.

Frischmann, B. & Selinger, E. (2018, avril). *Re-Engineering Humanity*. Cambridge, United Kingdom ; New York, NY : Cambridge University Press.

Galibert, O. & Bonnet, J. (2015, juin). Appel à contributions n° 49 de la revue Communication & Organisation : « Organisations et savoirs : quelles médiations ? ». http://journals.openedition.org/communicationorganisation/4999.

Galili, I. & Hazan, A. (2000, janvier). Learners' Knowledge in Optics : Interpretation, Structure and Analysis. *International Journal of Science Education*, *22*(1), 57–88.

Gallegos-Cázares, L., Flores-Camacho, F., & Cadlerón-Canales, E. (2009). Preschool Science Learning : The Construction of Representations and Explanations about Color, Shadows, Light and Images. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, *3*(1), 49–73.

Gandon, F. (2017). Pour Tout Le Monde : Tim Berners-Lee, Lauréat Du Prix Turing 2016 Pour Avoir Inventé... Le Web. *Bulletin de la société informatique de France*, *1024*(11), 129–154.

García-Carmona, A. (2020, avril). From Inquiry-Based Science Education to the Approach Based on Scientific Practices. *Science & Education*, *29*(2), 443–463.

Garcia-Sanjuan, F., Jurdi, S., Jaen, J., & Nacher, V. (2018, août). Evaluating a Tactile and a Tangible Multi-Tablet Gamified Quiz System for Collaborative Learning in Primary Education. *Computers & Education*, *123*(2018), 65–84.

Gardiès, C. (2008). *L'éducation à l'information : guide d'accompagnement pour les professeurs documentalistes*. Dijon : Éducagri ed.

Gardiès, C. (2012). *Dispositifs Info-Communicationnels de Médiation Des Savoirs : Cadre d'analyse Pour l'information-Documentation* (HDR, Université de Toulouse Le Mirail, Toulouse).

Gardner, H. (1983). *Frames of Mind : The Theory of Multiple Intelligences*. New York : Basic Books.

Gardner, H. (1993). *Histoire de la révolution cognitive : la nouvelle science de l'esprit*. Paris : Editions Payot.

Gauttier, S. (2017, mai). Vers une "entreprise augmentée" : De nouveaux challenges pour la recherche en management et systèmes d'information. *Terminal. Technologie de l'information, culture & société*, *2017*(120).

Gerbier, É. & Koenig, O. (2015). Comment les intervalles temporels entre les répétitions d'une information en influencent-ils la mémorisation ? Revue théorique des effets de pratique distribuée. *L'Annee psychologique*, *115*(3), 435–462. https://www.cairn.info/revue-l-annee-psychologique1-2015-3-page-435.htm.

Géron, A. (2017). *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow*. USA : O'Reilly Media.

Glasersfeld, E. (1984). An Introduction to Radical Constructivism. In P. Watzlawick (Éd.), *The Invented Reality* (p. 17–40). http://www.vonglasersfeld.com/070.1. New York, NY, USA : Norton.

Glenberg, A. M. (1997). Mental Models, Space, and Embodied Cognition. In *Creative Thought : An Investigation of Conceptual Structures and Processes* (p. 495–522). Washington, DC, US : American Psychological Association.

Glikman, V. (2002). *Des cours par correspondance au « e-learning »*. Paris : Presses Universitaires de France.

Goldie, J. G. S. (2016, octobre). Connectivism : A Knowledge Learning Theory for the Digital Age ? *Medical Teacher*, *38*(10), 1064–1069.

Gómez, J., Huete, J. F., Hoyos, O., Perez, L., & Grigori, D. (2013, janvier). Interaction System Based on Internet of Things as Support for Education. *Procedia Computer Science*. The 4th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN-2013) and the 3rd International Conference on Current and Future Trends of Information and Communication Technologies in Healthcare (ICTH), *21*, 132–139.

Gomot, M., Giard, M.-H., Adrien, J.-L., Barthelemy, C., & Bruneau, N. (2002, septembre). Hypersensitivity to Acoustic Change in Children with Autism : Electrophysiological Evidence of Left Frontal Cortex Dysfunctioning. *Psychophysiology*, *39*(5), 577–584.

González, M. Á. [Manuel Á] & González, M. Á. [Miguel Á]. (2016, juillet). Smartphones as Experimental Tools to Measure Acoustical and Mechanical Properties of Vibrating Rods. *European Journal of Physics*, *37*(4), 045701.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2017). *Deep Learning*. Cambridge, MA, USA : MIT Press.

Goodspeed, R. (2015, mars). Smart Cities : Moving beyond Urban Cybernetics to Tackle Wicked Problems. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, *8*(1), 79–92.

Graf, P. & Schacter, D. L. (1985, juillet). Implicit and Explicit Memory for New Associations in Normal and Amnesic Subjects. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, *11*(3), 501–518.

Grandjean, D. & Scherer, K. R. (2014). Théorie de l'évaluation cognitive et dynamique des processus émotionnels. In D. Sander & K. R. Scherer (Éds.), *Traité de psychologie des émotions* (p. 51–87). Psycho Sup. Paris : Dunod.

Grant, M. M. (2019, avril). Difficulties in Defining Mobile Learning : Analysis, Design Characteristics, and Implications. *Educational Technology Research and Development*, *67*(2), 361–388.

Greenfield, A. (2007). *Every[ware] : la révolution de l'ubimedia* (C. Fiévet, Trad.). Limoges : FYP.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013, septembre). Internet of Things (IoT) : A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Future Generation Computer Systems*. Including Special Sections : Cyber-Enabled Distributed Computing for Ubiquitous Cloud and Network Services & Cloud Computing and Scientific Applications — Big Data, Scalable Analytics, and Beyond, *29*(7), 1645–1660.

Guinard, D. (2011). *A Web of Things Application Architecture-Integrating the Real-World into the Web* (Thèse de Doctorat, ETH, Zurich, Switzerland). http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.688.1395&rep=rep1&type=pdf.

Haagen-Schützenhöfer, C. (2017, juillet). Students' Conceptions on White Light and Implications for Teaching and Learning about Colour. *Physics Education*, *52*(4), 044003.

Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior : A Psychological Theory*. New York ; London : Wiley ; Chapman & Hall.

Heidegger, M. (1953). *Kant et le problème de la métaphysique* (A. de Waelhens & W. Biemel, Trad.). Paris : Gallimard.

Helmholtz, H. v. (.-1. (1867). *Optique physiologique*. Paris : V. Masson et fils.

Herrington, A. J. & Herrington, J. A. (2007). What Is an Authentic Learning Environment ? In L. A. Tomei (Éd.), *Online and Distancelearning : Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (p. 68–77). https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2212&context=edupapers. Hershey, PA : Information Science Reference.

Herrington, J., Oliver, R., & Reeves, T. (2003, janvier). Cognitive Realism in Online Authentic Learning Environments. In D. Lassner & C. McNaught (Éds.), *Proceedings of World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications 2003* (p. 2115–2121). https://ro.ecu.edu.au/ecuworks/3253. Chesapeake, VA : ACM.

Hintikka, J. (1981). On the Logic of an Interrogative Model of Scientific Inquiry. *Synthese*, *47*(1), 69–83. https://www.jstor.org/stable/20115619.

Hinton, G. E., Osindero, S., & Teh, Y.-W. (2006, juillet). A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets. *Neural Comput. 18*(7), 1527–1554.

Hirth, M., Kuhn, J., & Müller, A. (2015, février). Measurement of Sound Velocity Made Easy Using Harmonic Resonant Frequencies with Everyday Mobile Technology. *The Physics Teacher*, *53*(2), 120–121.

Hochberg, K., Becker, S., Louis, M., Klein, P., & Kuhn, J. (2020, avril). Using Smartphones as Experimental Tools. A Follow-up : Cognitive Effects by Video Analysis and Reduction of Cognitive Load by Multiple Representations. *Journal of Science Education and Technology*, *29*(2), 303–317.

Hochberg, K., Kuhn, J., & Müller, A. (2018, octobre). Using Smartphones as Experimental Tools. Effects on Interest, Curiosity, and Learning in Physics Education. *Journal of Science Education and Technology*, *27*(5), 385–403.

Hofstadter, D. & Sander, E. (2013, février). *L'Analogie, coeur de la pensée*. Paris : Odile Jacob.

Höller, J. (Éd.). (2014). *From Machine-to-Machine to the Internet of Things : Introduction to a New Age of Intelligence*. Amsterdam : Elsevier Academic Press.

Holmquist, L. E., Zuckerman, O., Ballagas, R., Ishii, H., Ryokai, K., & Zhang, H. (2019). The Future of Tangible User Interfaces. In *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI EA '19* (p. 1–6). Glasgow, Scotland Uk : ACM Press.

Horn, J. L. (1968). Organization of Abilities and the Development of Intelligence. *Psychological Review*, *75*(3), 242–259.

Houdé, O. (2018). Sciences cognitives et sciences de l'éducation. In *L'école du cerveau. De Montessori, Freinet et Piaget aux sciences cognitives* (p. 87–159). PSY-Théories, débats, synthèses. Wavre, Belgique : Mardaga.

Houdé, O. (2019). *Apprendre à résister : pour l'école, contre la terreur*. Paris : Éditions le Pommier-Humensis.

Houdé, O. & Borst, G. (2014, juin). Measuring Inhibitory Control in Children and Adults : Brain Imaging and Mental Chronometry. *Frontiers in Psychology*, *5*(616).

Houssaye, J. (2013). *Quinze Pédagogues : Idées Principales et Textes Choisis : Jean-Jacques Rousseau, Heinrich Pestalozzi, Friedrich Fröbel, Paul Robin, Francisco Ferrer, Rudolf Steiner, John Dewey, Ovide Decroly, Maria Montessori, Antón Makarenko, Adolphe Ferrière, Roger Cousinet, Célestin Freinet, Alexander S. Neill, Carl Rogers*. Paris : Fabert.

Hsu, F.-h., Campbell, M. S., & Hoane, A. J., Jr. (1995). Deep Blue System Overview. In *Proceedings of the 9th International Conference on Supercomputing* (p. 240–244). ICS '95. New York, NY, USA : ACM.

Hu, Y.-H., Lo, C.-L., & Shih, S.-P. (2014, juillet). Developing Early Warning Systems to Predict Students' Online Learning Performance. *Computers in Human Behavior*, *36*, 469–478.

Husemann, D. (2000, novembre). What Is Pervasive Computing ? https://archive.cs.st-andrews.ac.uk/dls-archive/files/2001-1-1%20Lecture1.pdf.

Hwang, G.-J., Yang, T.-C., Tsai, C.-C., & Yang, S. J. (2009, septembre). A Context-Aware Ubiquitous Learning Environment for Conducting Complex Science Experiments. *Computers & Education*, *53*(2), 402–413.

Ibarra-Esquer, J. E., González-Navarro, F. F., Flores-Rios, B. L., Burtseva, L., & Astorga-Vargas, M. A. (2017, juin). Tracking the Evolution of the Internet of Things Concept Across Different Application Domains. *Sensors*, *17*(6), 1–24.

IEEE. (2002, septembre). IEEE Standard for Learning Object Metadata. *IEEE Std 1484.12.1-2002*, 1–40.

Ifrim, C., Pintilie, A.-M., Apostol, E., Dobre, C., & Pop, F. (2017). The Art of Advanced Healthcare Applications in Big Data and IoT Systems. In C. X. Mavromoustakis, G. Mastorakis, & C. Dobre (Éds.), *Advances in Mobile Cloud Computing and Big Data in the 5G Era* (T. 22, p. 133–149). http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-45145-9_6. Cham : Springer International Publishing.

Illeris, K. (2018, mars). An Overview of the History of Learning Theory. *European Journal of Education*, *53*(1), 86–101.

IsaBelle, C., Gélinas Proulx, A., & Meunier, H. (2014). Contextes de formation formel, non formel ou informel : développement de compétences de direction d'école de langue française au Canada. *Revue suisse des sciences de l'éducation*, *36*(3), 501–521.

Ishii, H. (2008, juin). The Tangible User Interface and Its Evolution. *Communications of the ACM*, *51*(6), 32–36.

Jacquinot-Delaunay, G. (2004). Sic et Sed sont dans un bateau ... *Hermes, La Revue*, *38*(1), 198–198.

Jacquinot-Delaunay, G. (2007). Éducation et communication à l'épreuve des médias. *Hermes, La Revue*, *48*(2), 171–178.

James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. New York : Henry Holt.

Jauréguiberry, F. (2008). De l'usage des technologies de l'information et de la communication comme apprentissage créatif. *Education et societes*, *22*(2), 29–42.

Jeanneret, Y. (2000). *Y a-t-il (vraiment) des technologies de l'information ?* Villeneuve d'Ascq : Presses Univ. Septentrion.

Jeanneret, Y. (2005). Médiation. In C. Souyri (Éd.), *La "Société de l'information" : Glossaire Critique* (p. 105–107). Paris : La Documentation française.

Jeanneret, Y. (2009). La Relation Entre Médiation et Usage Dans Les Recherches En Information-Communication. *Electronic Journal Commun. Information and Innovation in Health*, *3*(3), 37–59.

Jenkins, J. G. & Dallenbach, K. M. (1924). Obliviscence During Sleep and Waking. *The American Journal of Psychology*, *35*, 605–612.

Jimena Medina, I. [I.], Gómez-Luque, M. A., Peña Amaro, J., Luque Ruiz, I., & Gómez-Nieto, M. A. (2019, février). HistoNFC : An Innovative Tool for the Practical Teaching of Histology Using NFC Technology. *Wireless Communications and Mobile Computing*, *2019*, 1–17.

Jimena Medina, I. [Ignacio], Gómez Luque, J. A., Peña Amaro, J., Luque Ruiz, I., & Gómez-Nieto, M. Á. (2018). Aplicación de la tecnología NFC (Near Field Communication) en las prácticas de Histología Médica. *Revista de innovación y buenas prácticas docentes*, *4*, 72–80.

Johnson-Laird, P. N. (1995). *Mental Models : Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cambridge : Harvard Univ. Press.

Joormann, J. & Gotlib, I. H. (2008). Updating the Contents of Working Memory in Depression : Interference from Irrelevant Negative Material. *Journal of Abnormal Psychology*, *117*(1), 182–192.

Jouët, J. (1993). Pratiques de communication et figures de la médiation. *Réseaux. Communication - Technologie - Société*, *11*(60), 99–120.

Jouët, J. (2000). Retour critique sur la sociologie des usages. *Réseaux. Communication - Technologie - Société*, *18*(100), 487–521.

Joyce, C. (2014, juin). Dragging Data Logging Back to the Drawing Board and into the Internet of Things. In *IDC 2014* (p. 1–4). Aarhus, Denmark.

Joyce, C., Pham, H., Stanton Fraser, D., Payne, S., Crellin, D., & McDougall, S. (2014). Building an Internet of School Things Ecosystem : A National Collaborative Experience. In *IDC'14* (p. 289–292). Aarhus, Denmark : ACM Press.

Jung, R. E. & Haier, R. J. (2007, avril). The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of Intelligence : Converging Neuroimaging Evidence. *The Behavioral and Brain Sciences*, *30*(2), 135–154.

Kahn, P. H. (2006). Robotic Pets in the Lives of Preschool Children. *Interaction Studies*, *7*(3), 405–436.

Kahneman, D. (2018). *Système 1, système 2 : les deux vitesses de la pensée*. Paris : Flammarion.

Kant, I. (1944). *Critique de la raison pure* (Tremesaygues A & Pacaud B, Trad.). Paris : Presses Universitaires de france.

Kaplan, A. M. & Haenlein, M. (2016, juillet). Higher Education and the Digital Revolution : About MOOCs, SPOCs, Social Media, and the Cookie Monster. *Business Horizons*, *59*(4), 441–450.

Kapucu, S. (2017, juillet). Finding the Average Speed of a Light-Emitting Toy Car with a Smartphone Light Sensor. *Physics Education*, *52*(4), 1–6.

Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J. J., & Sagi, D. (1994, juillet). Dependence on REM Sleep of Overnight Improvement of a Perceptual Skill. *Science (New York, N.Y.)* *265*(5172), 679–682.

Kassab, M. & Mazzara, M. (2020). Towards Designing Smart Learning Environments with IoT. In J.-M. Bruel, M. Mazzara, & B. Meyer (Éds.), *Software Engineering Aspects of Continuous Development and New Paradigms of Software Production and Deployment* (p. 152–166). Cham : Springer International Publishing.

Ke, Z., Ng, V., & Kraus, S. (2019). Automated Essay Scoring : A Survey of the State of the Art. In *Proceedings of the IJCAI-19* (p. 6300–6308). Macao, Chine : International Joint Conferences on Artificial Intelligence.

Keiler, P. (2012). "Cultural-Historical Theory" and "Cultural-Historical School" : From Myth (Back) to Reality. *Dubna Psychological Journal*, *5*(1), 1–33.

Keysers, C. & Gazzola, V. (2010, avril). Social Neuroscience : Mirror Neurons Recorded in Humans. *Current Biology*, *20*(8), R353–R354.

Khanna, A. & Kaur, S. (2019, février). Evolution of Internet of Things (IoT) and Its Significant Impact in the Field of Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *157*, 218–231.

Kindberg, T., Barton, J., Morgan, J., Becker, G., Caswell, D., Debaty, P., ... Spasojevic, M. (2000, décembre). People, Places, Things : Web Presence for the Real

World. In *Proceedings Third IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (p. 19–28). Monterey, California : IEEE Computer Society Press.

Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006, juin). Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work : An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching. *Educational Psychologist*, *41*(2), 75–86.

Klein, P., Hirth, M., Gröber, S., Kuhn, J., & Müller, A. (2014, juillet). Classical Experiments Revisited : Smartphones and Tablet PCs as Experimental Tools in Acoustics and Optics. *Physics Education*, *49*(4), 412–418.

Kohler, D. & Weisz, J.-D. (2018). Industrie 4.0, une révolution industrielle et sociétale. *Futuribles*, *3*(424), 47–68.

Kolb, D. (1984, janvier). *Experiential Learning : Experience As The Source Of Learning And Development*. New Jersey, USA : Prentice-Hall.

Kontra, C., Lyons, D. J., Fischer, S. M., & Beilock, S. L. (2015, juin). Physical Experience Enhances Science Learning. *Psychological Science*, *26*(6), 737–749.

Kop, R. & Hill, A. (2008, octobre). Connectivism : Learning Theory of the Future or Vestige of the Past ? *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, *9*(3), 1–13.

Korbach, A., Ginns, P., Brünken, R., & Park, B. (2020, février). Should Learners Use Their Hands for Learning ? Results from an Eye-tracking Study. *Journal of Computer Assisted Learning*, *36*(1), 102–113.

Kortuem, G., Bandara, A. K., Smith, N., Richards, M., & Petre, M. (2013, février). Educating the Internet-of-Things Generation. *Computer*, *46*(2), 53–61.

Kortuem, G., Kawsar, F., Sundramoorthy, V., & Fitton, D. (2010, janvier). Smart Objects as Building Blocks for the Internet of Things. *IEEE Internet Computing*, *14*(1), 44–51.

Krajcik, J. S. & Blumenfeld, P. C. (2006). Project-Based Learning. In *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*. Cambridge, MA, USA : Cambridge University Press.

Krichewsky, M. (2003, juin). TRANSMETTRE/APPRENDRE ? http://www.barbier-rd.nom.fr/texteKrichewsky.pdf.

Krishnamurti, J. (2010, septembre). *Apprendre est l'essence de la vie*. Paris : Le Livre de Poche.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017, mai). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Communications of the ACM*, *60*(6), 84–90.

Krokos, E., Plaisant, C., & Varshney, A. (2019, mars). Virtual Memory Palaces : Immersion Aids Recall. *Virtual Reality*, *23*(1), 1–15.

Krumm, J. (Éd.). (2010). *Ubiquitous Computing Fundamentals*. Boca Ragon : Chapman & Hall/CRC Press.

Kubicki, S., Pasco, D., Hoareau, C., & Arnaud, I. (2016). Utilisation d'une Table Interactive Avec Objets Tangibles Pour Apprendre à l'école : Études Empiriques En Milieu Écologique. In *Actes de La 28ième Conférence Francophone Sur l'Interaction Homme-Machine* (p. 155–166). New York, NY, USA : ACM.

Kuhn, J., Lukowicz, P., Hirth, M., Poxrucker, A., Weppner, J., & Younas, J. (2016, octobre). gPhysics—Using Smart Glasses for Head-Centered, Context-Aware Learning in Physics Experiments. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, *9*(4), 304–317.

Kushlev, K., Proulx, J., & Dunn, E. W. (2016). "Silence Your Phones" : Smartphone Notifications Increase Inattention and Hyperactivity Symptoms. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16* (p. 1011–1020). Santa Clara, California, USA : ACM Press.

Kutafina, E., Jovanović, M., Kabino, K., & Jonas, S. M. (2019). Learning Manual Skills with Smart Wearables. In I. Buchem, R. Klamma, & F. Wild (Éds.), *Perspectives on Wearable Enhanced Learning (WELL) : Current Trends, Research, and Practice* (p. 229–250). Cham : Springer International Publishing.

Kutafina, E., Laukamp, D., Bettermann, R., Schroeder, U., & Jonas, S. M. (2016, août). Wearable Sensors for eLearning of Manual Tasks : Using Forearm EMG in Hand Hygiene Training. *Sensors*, *16*(8), 1221.

Kwak, K. S., Ullah, S., & Ullah, N. (2010, novembre). An Overview of IEEE 802.15.6 Standard. In *3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)* (p. 1–6). Rome. arXiv : 1102.4106

Kyza, E. A. & Georgiou, Y. (2019). The Impact of Materiality on the Design of Mobile, Augmented Reality Learning Environments in Non-Formal, Outdoors Settings. In T. Cerratto Pargman & I. Jahnke (Éds.), *Emergent Practices and Material Conditions in Learning and Teaching with Technologies* (p. 183–197). Cham : Springer International Publishing.

La Banque Mondiale. (2019). *Le Travail En Mutation*. http://documents.worldbank.org/curated/en/281991545151125958/pdf/WDR-2019-FRENCH.pdf. Washington, DC, USA.

Lacroix, J.-G., Moeglin, P., & Tremblay, G. (1992). Usages de La Notion d'usages. In *Les Nouveaux Espaces de l'information et de La Communication*. Lille.

Lake, B. M., Ullman, T. D., Tenenbaum, J. B., & Gershman, S. J. (2017). Building Machines That Learn and Think like People. *Behavioral and Brain Sciences*, *40*, E253.

Lallemand, C. & Gronier, G. (2019). *Méthodes de design UX : 30 méthodes fondamentales pour concevoir des expériences optimales*. Paris : Eyrolles.

Larivée, S. & Senéchal, C. (2012). Que dit la science à propos des intelligences multiples ? *Revue québécoise de psychologie*, *33*(1), 23.

Larroche, V. (2018). *Le dispositif. Un concept pour les sciences de l'information et de la communication - Valérie Larroche*. Londres : ISTE Éditions.

Lascio, E. D., Gashi, S., & Santini, S. (2018). Unobtrusive Assessment of Students' Emotional Engagement during Lectures Using Electrodermal Activity Sensors. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous*, *2*(3), 1–21.

Lautrey, J. [Jacques]. (2006). L'approche différentielle de l'intelligence. In J. Lautrey (Éd.), *Psychologie du développement et psychologie différentielle* (p. 38). Paris : PUF.

Lave, J. (1977). Cognitive Consequences of Traditional Apprenticeship Training in West Africa. *Anthropology & Education Quarterly*, *8*(3), 177–180.

Lave, J. & Wenger, E. (1991, septembre). *Situated Learning : Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge, MA, USA : Cambridge University Press.

Lazar, J. (1993). *La science de la communication*. Paris : Presses universitaires de France.

Le Marec, J. (2001). L'usage et ses modèles : quelques réflexions méthodologiques. *Spirale - Revue de recherches en éducation*, *28*(1), 105–122.

Leclercq, D. & Van der Vleuten, C. (1998). PBL Problem Based Learning Ou APP Apprentissage Par Problèmes. In *Pour Une Pédagogie Universitaire de Qualité*. Liège, Belgique : Editions Mardaga.

LeCun, Y. (2016, février). L'apprentissage profond : une révolution en intelligence artificielle. http://www.college-de-france.fr/site/yann-lecun/course-2016-02-12-14h30.htm. Cours au Collège de France. Paris, France.

Legg, S. & Hutter, M. (2007, juin). *A Collection of Definitions of Intelligence*. http://arxiv.org/abs/0706.3639. arXiv : 0706.3639

Leleu-Merviel, S. & Useille, P. (2008). Quelques Révisions Du Concept d'information. In F. Papy (Éd.), *Problématiques Émergentes Dans Les Sciences de l'information* (p. 25–56). Traité Des Sciences et Techniques de l'information. Paris : Lavoisier.

Lemos, A. (2016, décembre). Sensibilités performatives. Les nouvelles sensibilités des objets dans les métropoles contemporaines. *Sociétés*, *132*(2), 75–87.

Lenat, D. & Guha, R. V. (1990, septembre). CYC : A Midterm Report. *AI Magazine*, *11*(3), 32–32.

Leonard, E. C. (2015, janvier). Precision Agriculture. In *Reference Module in Food Science*. Elsevier.

Levenson, R. W. (2019, février). Reflections on 30 Years of Cognition & Emotion. *Cognition & Emotion*, *33*(1), 8–13.

Lewin, K. (1946). Action Research and Minority Problems. *Journal of Social Issues*, *2*(4), 34–46.

Li, F., Lam, K.-Y., Li, X., Sheng, Z., Hua, J., & Wang, L. (2020, août). Advances and Emerging Challenges in Cognitive Internet-of-Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *16*(8), 5489–5496.

Licklider, J. (1960, mars). Man-Computer Symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, *HFE-1*, 4–11. https://groups.csail.mit.edu/medg/people/psz/Licklider.html.

Lieury, A. (2015). *Psychologie cognitive* (Fourth). Arcueil : Numilog.

Liquète, V. (2019, août). Présentation Générale : Formes et Enjeux de La Médiation. In *Médiations* (p. 9–31). Les Essentiels d'Hermès. Paris : CNRS Éditions.

Liu, X., Dastjerdi, A. V., & Buyya, R. (2016, janvier). Chapter 8 - Stream Processing in IoT : Foundations, State-of-the-Art, and Future Directions. In R. Buyya & A. Vahid Dastjerdi (Éds.), *Internet of Things* (p. 145–161). Morgan Kaufmann.

Livingston, R. (1980). Reinforcement. In G. C. Quarton, T. Melnechuk, & F. O. Schmitt (Éds.), *The Neurosciences : A Study Program* (p. 568–577). Ann Arbor, Mich. : University Microfilms International.

Livingstone, D. W. (1999). *Exploring the Iceberg of Adult Learning : Findings of the First Canadian Survey of Informal Learning Practices* (WALL Working Paper N° 10). Ontario Institute for Studies in Education. Toronto, Ontario.

Locke, J. (2007). *Œuvres philosophiques de Locke. Tome premier : De l'entendement humain* (Fourth) (M. Thurot, Trad.). https://books.google.fr/books?id=3AoQAAAAYAAJ. Paris : Firmin Didot.

Loftus, E. F., Loftus, G. R., & Messo, J. (1987, mars). Some Facts about "Weapon Focus". *Law and Human Behavior*, *11*(1), 55–62.

Losinski, M., Cuenca-Carlino, Y., Zablocki, M., & Teagarden, J. (2014, novembre). Examining the Efficacy of Self-Regulated Strategy Development for Students with Emotional or Behavioral Disorders : A Meta-Analysis : *Behavioral Disorders*, *40*(1), 52–67.

Lowyck, J. (2014). Bridging Learning Theories and Technology-Enhanced Environments : A Critical Appraisal of Its History. In J. M. Spector, M. D. Merrill, J. Elen, & M. J. Bishop (Éds.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (p. 3–20). New York, NY : Springer New York.

Lu, Y., Zhang, J., Li, B., Chen, P., & Zhuang, Z. (2019). Harnessing Commodity Wearable Devices to Capture Learner Engagement. *IEEE Access*, *7*, 15749–15757.

Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Corcier, L. B. (2016). *Intelligence Unleashed : An Argument for AI in Education*. https://www.pearson.com/content/dam/corporate/global/pearson-dot-com/files/innovation/Intelligence-Unleashed-Publication.pdf. Londres : Pearson.

Lucky, R. (1999, mars). Connections. *IEEE Spectrum*, *36*(3). http://www.boblucky.com/reflect/mar99.htm.

Lv, X. (2018, mars). A Study on the Application of Automatic Scoring and Feedback System in College English Writing. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, *13*(3), 188–196.

MacCallum, K. & Bell, H. (2015). Smart Devices for Supporting Inquiry and Conversations in Early Childhood Education. *He Kupu Word*, *4*(1), 31–39.

Mailles-Viard, S., Vayre, E., & Pelissier, C. (2015). Concevoir un Environnement Personnel d'Apprentissage (EPA), est-ce utile pour les étudiants ? *Revue canadienne de l'éducation*, *38*(4), 1–28.

Maitre de Pembroke, E. & Talbi, A. (2002, janvier). Les Théories de l'apprentissage et Les Systèmes Multimédia. In D. Legros & J. Crinon (Éds.), *Psychologie Des Apprentissages et Multimédia* (p. 23–39). Paris : Armand Colin.

Maitte, B. (2016, mars). Les théories de la lumière dans une science en mouvement. *Reflets de la physique*, (47-48), 16–23.

Mallowan, M. (2012, décembre). Intelligence et transculture de l'information. *Communication et organisation*, (42), 27–48.

Marfisi-Schottman, I., George, S., & Leconte, M. (2020, février). TurtleTablet : un jeu collaboratif et tangible sur tablette pour l'initiation à la programmation. In *Didapro – DidaSTIC* (p. 1–10). Lille.

Marquez, J., Villanueva, J., Solarte, Z., & Garcia, A. (2016, mars). IoT in Education : Integration of Objects with Virtual Academic Communities. In Á. Rocha, A. M.

Correia, H. Adeli, L. P. Reis, & M. Mendonça Teixeira (Éds.), *New Advances in Information Systems and Technologies* (T. 444, p. 201–212). Cham : Springer International Publishing.

Marquis, P., Papini, O., & Prade, H. (Éds.). (2020). *A Guided Tour of Artificial Intelligence Research : Volume III : Interfaces and Applications of Artificial Intelligence*. Cham : Springer International Publishing.

Martin, K.-U. & Hardt, W. (2016, mars). Promoting Informal Mobile Learning - An Overview on Issues and Interdisciplinary Approaches. In *Complexity, Informatics, and Cybernetics* (T. 2). Orlando, Florida, USA : International Institute of Informatics and Systemics.

Martins, S., Guillery-Girard, B., & Eustache, F. (2006, septembre). Modèles de La Mémoire Humaine : Concepts et Modèles En Neuropsychologie de l'adulte et de l'enfant. *Epilepsies*, *18*(2), 4–14.

Massou, L. (2010). Chapitre 4. Dispositif et enseignement à distance. In *Les dispositifs d'information et de communication* (p. 59–76). Culture & Communication. Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur.

Mateescu, A. & Clare Elish, M. (2019). *AI in Context. The Labor of Integrating New Technologies.* Data&Society. https://datasociety.net/wp-content/uploads/2019/01/DataandSociety_AIinContext.pdf.

Mateos-Aparicio, P. & Rodríguez-Moreno, A. (2019, février). The Impact of Studying Brain Plasticity. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, *13*, 1–5.

Mattern, F. & Floerkemeier, C. (2010). From the Internet of Computers to the Internet of Things. In K. Sachs, I. Petrov, & P. Guerrero (Éds.), *From Active Data Management to Event-Based Systems and More* (p. 242–259). Berlin, Heidelberg : Springer.

Maurines, L. & Beaufils, D. (2011, octobre). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *3*(3), 271–305.

Maurines, L., Fuchs-Gallezot, M., & Ramage, M.-J. (2018). Représentations Des Étudiants Sur Les Scientifiques et Les Savoirs Scientifiques : Exploration Des Caractéristiques Associées et de Leurs Spécificités. *Recherches en Education*, *32*, 51–71.

Maurines, L., Gallezot, M., Ramage, M.-J., & Beaufils, D. (2013, novembre). La nature des sciences dans les programmes de seconde de physique-chimie et de sciences de la vie et de la Terre. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, *7*(7), 19–52.

Mavrikis, M. & Holmes, W. (2019). Intelligent Learning Environments : Design, Usage and Analytics for Future Schools. In S. Yu, H. Niemi, & J. Mason (Éds.), *Shaping Future Schools with Digital Technology : An International Handbook* (p. 57–73). Singapore : Springer Singapore.

Mavrikis, M., Holmes, W., Zhang, J., & Ma, N. (2018). Fractions Lab Goes East : Learning and Interaction with an Exploratory Learning Environment in China. In C. Penstein Rosé, R. Martínez-Maldonado, H. U. Hoppe, R. Luckin, M. Mavrikis, K. Porayska-Pomsta, ...B. du Boulay (Éds.), *Artificial Intelligence in Education* (p. 209–214). Cham : Springer International Publishing.

Mayer, R. E. & Wittrock, M. C. (1996). Problem-Solving Transfer. In *Handbook of Educational Psychology* (p. 47–62). Londres : Prentice Hall International.

McCartney, M. (2019, juillet). Heart on Your Sleeve. *New Scientist*, *243*(3239), 23.

McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. [David E]. (1985). Distributed Memory and the Representation of General and Specific Information. *Journal of Experimental Psychology : General*, *114*(2), 159–188.

Mcculloch, W. S. & Pitts, W. (1943). A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, *5*, 115–133.

McDermott, K. & Roediger, H. (2018). Memory (Encoding, Storage, Retrieval). In A. Butler (Éd.), *General Psychology (Fall 2018)* (T. 2, p. 118–141). Psychology Curricular Materials. ValpoScholar.

McGrew, K. S. & Flanagan, D. P. (1998). *The Intelligence Test Desk Reference (ITDR) : Gf-Gc Cross-Battery Assessment*. Needham Heights, MA, US : Allyn & Bacon.

Mehmood, R., Alam, F., Albogami, N. N., Katib, I., Albeshri, A., & Altowaijri, S. M. (2017). UTiLearn : A Personalised Ubiquitous Teaching and Learning System for Smart Societies. *IEEE Access*, *5*, 2615–2635.

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019, mars). A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT Deployment. *ICT Express*, *5*(1), 1–7.

Mershad, K., Damaj, A., Wakim, P., & Hamieh, A. (2020). LearnSmart : A Framework for Integrating Internet of Things Functionalities in Learning Management Systems. *Education and Information Technologies*, *25*, 2699–2732.

Meunier, J.-P. (2003). Le problème de la représentation mentale : représentation propositionnelle et/ou representation imagée. *Recherches en communication*, *19*(19), 103–112.

Meyer, M., Adkins, V., Yuan, N., Weeks, H. M., Chang, Y.-J., & Radesky, J. (2019, janvier). Advertising in Young Children's Apps : A Content Analysis. *Journal of Developmental & Behavioral Pediatrics*, *40*(1), 32–39.

Meyriat, J. (1985). Information versus Communication ? In A.-M. Laulan (Éd.), *L'espace Social de La Communication : Concepts et Théories* (p. 63–69). Paris : Retz-CNRS.

Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, *E77-D*(12), 1321–1329.

Miller, G. A. (1956, mars). The Magical Number Seven plus or Minus Two : Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychological Review*, *63*(2), 81–97.

Minsky, M. L. (2007). *The Society of Mind*. New York : Simon & Schuster Paperbacks.

Minsky, M. & Papert, S. (1969, juin). *Perceptrons : An Introduction to Computational Geometry*. Cambridge, MA, USA : MIT Press.

Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. (2012, septembre). Internet of Things : Vision, Applications and Research Challenges. *Ad Hoc Networks*, *10*(7), 1497–1516.

Moatti, A. (2016, juin). Pour une critique raisonnée de la technique et de l'Internet. *Commentaire*, *2*(154), 398–400.

Moore, G. E. (2006, septembre). Progress in Digital Integrated Electronics. *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, *11*(3), 36–37.

Moravec, H. P. (1986). *Mind Children : The Future of Robot and Human Intelligence*. Pittsburgh, PA.

Morel, P.-M. (1998). DÉMOCRITE. CONNAISSANCE ET APORIES. *Revue Philosophique de la France et de l'Étranger*, *188*(2), 145–163.

Morin, E. (2008). *La Méthode*. Sciences Humaines. Paris : Editions du Seuil.

Morozov, E. (2014). *Pour tout résoudre, cliquez ici : l'aberration du solutionnisme technologique*. Innovation. Limoges : Fyp éditions.

Mouri, K., Ogata, H., & Uosaki, N. (2017). Learning Analytics in a Seamless Learning Environment. In *Proceedings of the Seventh International Learning Analytics & Knowledge Conference* (p. 348–357). LAK '17. Vancouver, British Columbia, Canada : ACM Press.

Mucchielli, A. (2006, octobre). Deux modèles constructivistes pour le diagnostic des communications organisationnelles. *Communication et organisation*, *30*(30), 12–46.

Mugny, G. & Doise, W. (1978). Socio-Cognitive Conflict and Structure of Individual and Collective Performances. *European Journal of Social Psychology*, *8*(2), 181–192.

Mulligan, G. (2007). The 6LoWPAN Architecture. In *Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors* (p. 78–82). EmNets '07. Cork, Ireland : ACM.

Munnerley, D., Bacon, M., Wilson, A., Steele, J., Hedberg, J., & Fitzgerald, R. (2012, août). Confronting an Augmented Reality. *Research in Learning Technology*, *20*, 39–48.

Murphy, E. (1997). *Constructivism : From Philosophy to Practice* (Reports - Descriptive N° 141). https://eric.ed.gov/?id=ED444966.

Negi, P. S., Pawar, R., & Lal, R. (2020). Vision-Based Real-Time Human–Computer Interaction on Hand Gesture Recognition. In D. K. Sharma, V. E. Balas, L. H. Son, R. Sharma, & K. Cengiz (Éds.), *Micro-Electronics and Telecommunication Engineering* (p. 499–507). Singapore : Springer.

Nelson, T. H. (1965). Complex Information Processing : A File Structure for the Complex, the Changing and the Indeterminate. In *Proceedings of the 1965 20th National Conference* (p. 84–100). ACM '65. New York, NY, USA : ACM.

Nelson, T. O. & Narens, L. (1990). Metamemory : A Theoretical Framework and New Findings. *Psychology of Learning and Motivation*, *26*, 125–173.

Newell, A. [A.] & Simon, H. (1956, septembre). The Logic Theory Machine–A Complex Information Processing System. *IRE Transactions on Information Theory*, *2*(3), 61–79.

Newell, A. [Allen] & Simon, H. A. (1976, mars). Computer Science As Empirical Inquiry : Symbols and Search. *Commun. ACM*, *19*(3), 113–126.

Newton, I. (2015). *Optique* (J.-P. Marat, Trad.). Paris : Dunod.

Nickerson, R. C., Varshney, U., & Muntermann, J. (2013, mai). A Method for Taxonomy Development and Its Application in Information Systems. *European Journal of Information Systems*, *22*(3), 336–359.

Nieuwdorp, E. (2007, avril). The Pervasive Discourse : An Analysis. *Computers in Entertainment*, *5*(2), 1–17.

Nilsson Benfatto, M., Öqvist Seimyr, G., Ygge, J., Pansell, T., Rydberg, A., & Jacobson, C. (2016, décembre). Screening for Dyslexia Using Eye Tracking during Reading. *PLoS ONE*, *11*(12), 1–16.

Ning, H. & Hu, S. (2012, septembre). Technology Classification, Industry, and Education for Future Internet of Things. *International Journal of Communication Systems*, *25*(9), 1230–1241.

Nitti, M., Pilloni, V., Colistra, G., & Atzori, L. (2016). The Virtual Object as a Major Element of the Internet of Things : A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *18*(2), 1228–1240.

Njeru, A. M., Omar, M. S., & Yi, S. (2017, mai). IoTs for Capturing and Mastering Massive Data Online Learning Courses. In *2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)* (p. 91–94). Wuhan, Chine.

Norman, D. A. (2010, mai). Natural User Interfaces Are Not Natural. *Interactions*, *17*(3), 6–10.

Nortvig, A.-M., Petersen, A. K., & Balle, S. H. (2018). A Literature Review of the Factors Influencing E-Learning and Blended Learning in Relation to Learning Outcome, Student Satisfaction and Engagement. *Electronic Journal of e-Learning*, *16*(1), 46–55. https://eric.ed.gov/?id=EJ1175336.

Noura, M., Atiquzzaman, M., & Gaedke, M. (2019, juin). Interoperability in Internet of Things : Taxonomies and Open Challenges. *Mobile Networks and Applications*, *24*(3), 796–809.

Ohtani, K. & Hisasaka, T. (2018, août). Beyond Intelligence : A Meta-Analytic Review of the Relationship among Metacognition, Intelligence, and Academic Performance. *Metacognition and Learning*, *13*(2), 179–212.

O'Neil, C. (2018, novembre). *Algorithmes : la bombe à retardement*. Paris : Les Arènes.

O'Reilly, T. (2007, mars). *What Is Web 2.0 : Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software* (rapp. tech. N° 4578). University Library of Munich, Germany. https://ideas.repec.org/p/pra/mprapa/4578.html.

Otlet, P. (1934). *Traité de Documentation*. Mons, Belgique : Editiones Mundaneum.

Paas, F. G. (1992). Training Strategies for Attaining Transfer of Problem-Solving Skill in Statistics : A Cognitive-Load Approach. *Journal of Educational Psychology*, *84*(4), 429–434.

Papert, S. (1994). *L'Enfant et la machine à connaitre : repenser l'école à l'ère de l'ordinateur*. Paris : Dunod.

Paquienséguy, F. (2018, février). L'usage au fil des Tic : Une genèse à raviver pour mieux le repenser ? *Interfaces numériques*, *6*(3), 481–481.

Pecore, J. L. (2015). From Kilpatrick's Project Method to Project-Based Learning. In P. Lang (Éd.), *International Handbook of Progressive Education* (p. 155–171). New York, NY.

Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., ... Tsourlidaki, E. (2015, février). Phases of Inquiry-Based Learning : Definitions and the Inquiry Cycle. *Educational Research Review*, *14*, 47–61.

Pekrun, R., Goetz, T., Frenzel, A. C., Barchfeld, P., & Perry, R. P. (2011). Measuring Emotions in Students Learning and Performance : The Achievement Emotions Questionnaire (AEQ). *Contemporary Educational Psychology*, *36*(1), 36–48.

Peraya, D. (1999). Médiation et médiatisation : le campus virtuel. *Hermes, La Revue*, *25*(3), 153–167.

Peraya, D. (2010). Médiatisation et Médiation. Des Médias Éducatifs Aux ENT. In V. Liquète (Éd.), *Médiations* (p. 33–48). Les Essentiels d'Hermès. Paris : CNRS Éditions.

Peraya, D. & Bonfils, P. (2015, janvier). Détournements d'usages et nouvelles pratiques numériques : l'expérience des étudiants d'Ingémédia à l'Université de Toulon. *21*, 239–268.

Peraya, D. & Papi, C. (2018). Médiation et Médiatisation. Entretien Avec Daniel Peraya. *Médiations et médiatisations*, *1*(1), 102–111.

Perrault, R., Shoham, Y., Brynjolfsson, E., Clark, J., Etchemendy, J., Grosz, B., ... Mishra, S. (2019, décembre). *Artificial Inteligence Index*. Human-Centered AI Institute, Université de Stanford.

Perriault, J. (1985). Applications éducatives des machines à communiquer de l'I.N.R.P. *Enfance*, *38*(1), 43–48.

Perriault, J. (1989). *La logique de l'usage : essai sur les machines à communiquer*. Paris : Flammarion.

Perriault, J. (2002). *L'accès au savoir en ligne*. Paris : Odile Jacob.

Persing, I. & Ng, V. (2015). Modeling Argument Strength in Student Essays. In *Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing (Volume 1 : Long Papers)* (p. 543–552). Beijing, China : Association for Computational Linguistics.

Pessoa, L. (2018, février). Understanding Emotion with Brain Networks. *Current opinion in behavioral sciences*, *19*, 19–25.

Peterson, L. & Peterson, M. J. (1959). Short-Term Retention of Individual Verbal Items. *Journal of Experimental Psychology*, *58*(3), 193–198.

Piaget, J. (1969). *Psychologie et Pédagogie*. Paris, France : Denoël.

Platon & Brisson, L. (2011). *Oeuvres complètes*. Paris : Flammarion.

Pool, E., Brosch, T., Delplanque, S., & Sander, D. (2016). Attentional Bias for Positive Emotional Stimuli : A Meta-Analytic Investigation. *Psychological Bulletin*, *142*(1), 79–106.

Poovendran, R. (2010, août). Cyber–Physical Systems : Close Encounters Between Two Parallel Worlds [Point of View]. *Proceedings of the IEEE*, *98*(8), 1363–1366.

Popper, K. (1973). *La Logique de la découverte scientifique*. Payot.

Posner, M. I. & Rothbart, M. K. (2018, avril). Temperament and Brain Networks of Attention. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *373*(1744), 1–4.

Prabha, A. J. & Bhargavi, R. (2019, juin). Prediction of Dyslexia from Eye Movements Using Machine Learning. *IETE Journal of Research*, *65*, 1–10.

Privat, G. (2002). Des objets communicants à la communication ambiante. *Les Cahiers du numerique*, *Vol. 3*(4), 23–44. https://www.cairn.info/revue-les-cahiers-du-numerique-2002-4-page-23.htm.

Przybylski, A. K., Murayama, K., DeHaan, C. R., & Gladwell, V. (2013, juillet). Motivational, Emotional, and Behavioral Correlates of Fear of Missing Out. *Computers in Human Behavior*, *29*(4), 1841–1848.

Püschel, L., Roeglinger, M., & Schlott, H. (2016, décembre). What's in a Smart Thing ? Development of a Multi-Layer Taxonomy. In *ICIS 2016 Proceedings* (p. 1–19). Dublin, Ireland.

Putjorn, P., Ang, C. S., & Farzin, D. (2015). Learning IoT Without the "I"- Educational Internet of Things in a Developing Context. In *Proceedings of the 2015 Workshop on Do-It-Yourself Networking : An Interdisciplinary Approach* (p. 11–13). DIYNetworking '15. New York, NY, USA : ACM.

Putjorn, P., Siriaraya, P., Deravi, F., & Ang, C. S. (2018). Investigating the Use of Sensor-Based IoET to Facilitate Learning for Children in Rural Thailand. *PloS one*, *13*(8), 1–23.

Qin, Y., Sheng, Q. Z., Falkner, N. J., Dustdar, S., Wang, H., & Vasilakos, A. V. (2016, avril). When Things Matter : A Survey on Data-Centric Internet of Things. *Journal of Network and Computer Applications*, *64*, 137–153.

Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020, avril). A Systematic Review of Immersive Virtual Reality Applications for Higher Education : Design Elements, Lessons Learned, and Research Agenda. *Computers & Education*, *147*, 1–29.

Raja, S. P., Rajkumar, T. D., & Raj, V. P. (2018, novembre). Internet of Things : Challenges, Issues and Applications. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, *27*(9), 1–16.

Ranzato, M. A., Poultney, C., Chopra, S., & LeCun, Y. (2007). Efficient learning of sparse representations with an energy-based model. In *Advances in Neural Information Processing Systems 19 - Proceedings of the 2006 Conference* (p. 1137–1144). Vancouver, BC, Canada.

Rayward, W. B. (1991, septembre). The Case of Paul Otlet, Pioneer of Information Science, Internationalist, Visionary : Reflections on Biography. *Journal of Librarianship and Information Science*, *23*(3), 135–145.

Rescorla, R. & Wagner, A. (1972, janvier). A Theory of Pavlovian Conditioning : The Effectiveness of Reinforcement and Non-Reinforcement. In A. H. Black & W. F. Prokasy (Éds.), *Classical Conditioning II : Current Research and Theory* (p. 64–99). New York, NY, USA : Appleton-Century-Crofts.

Resnick, M. (2007). All I Really Need to Know (about Creative Thinking) I Learned (by Studying How Children Learn) in Kindergarten. In *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI Conference on Creativity & Cognition - C&C '07* (p. 1–6). Washington, DC, USA : ACM Press.

Resnick, M., Martin, F., Berg, R., Borovoy, R., Colella, V., Kramer, K., & Silverman, B. (1998, janvier). Digital Manipulatives : New Toys to Think With. In *Proceedings*

of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (p. 281–287). CHI '98. Los Angeles, California, USA : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

Reuter, Y., Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre, I., & Lahanier-Reuter, D. (2013). Transposition didactique. In Y. Reuter, C. Cohen-Azria, B. Daunay, I. Delcambre, & D. Lahanier-Reuter (Éds.), *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques* (T. 3e éd. p. 221–226). Hors collection. Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur.

Rhode, J., Richter, S., Gowen, P., Miller, T., & Wills, C. (2017, septembre). Understanding Faculty Use of the Learning Management System. *Online Learning*, *21*(3), 68–86.

Rifkin, J., Chemla, F., & Chemla, P. (2016, février). *La nouvelle société du coût marginal zéro : L'internet des objets, l'émergence des communaux collaboratifs et l'éclipse du capitalisme*. Paris : Babel.

Rosenblatt, F. (1958). The Perceptron : A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, *65*(6), 386–408.

Rothberg, M. B., Arora, A., Hermann, J., Kleppel, R., Marie, P. S., & Visintainer, P. (2010, décembre). Phantom Vibration Syndrome among Medical Staff : A Cross Sectional Survey. *BMJ : British Medical Journal*, *341*, c6914.

Roux, J.-P. (2003). Socio-Constructivisme et Apprentissages Scolaires.

Rouxel, O. (2013, septembre). L'Internet des objets : les limites d'un concept essentiellement marketing. *Annales des Mines - Realites industrielles*, *Mai 2013*(2), 74–79.

Roxin, I. & Bouchereau, A. (2017a, mai). Ecosystème de l'Internet des Objets. In N. Bouhaï & I. Saleh (Éds.), *Internet des Objets : Evolutions et Innovations* (p. 33–62). Londres : ISTE Éditions.

Roxin, I. & Bouchereau, A. (2017b, mai). Introduction aux technologies de l'écosystème de l'Internet des Objets. In N. Bouhaï & I. Saleh (Éds.), *Internet des Objets : Evolutions et Innovations* (p. 63–106). Londres : ISTE Éditions.

Roxin, I. & Mercier, D. (2004). *Multimédia, les fondamentaux : Introduction à la représentation numérique*. Paris : Vuibert.

Ruckenstein, M. & Pantzar, M. (2017, mars). Beyond the Quantified Self : Thematic Exploration of a Dataistic Paradigm. *New Media & Society*, *19*(3), 401–418.

Ruiz-Rosero, J., Ramirez-Gonzalez, G., Williams, J. M., Liu, H., Khanna, R., & Pisharody, G. (2017, décembre). Internet of Things : A Scientometric Review. *Symmetry*, *9*(12), 1–32.

Rumelhart, D. E. [David E.], Durbin, R., Golden, R., & Chauvin, Y. (1995). Backpropagation : The Basic Theory. In D. E. Rumelhart & Y. Chauvin (Éds.), *Backpropagation : Theory, Architectures, and Applications. Developments in Connectivist Theory* (p. 1–34). Hillsdale, New Jersey, USA : Erlbaum.

Rumelhart, D. E. [David E.], Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986, octobre). Learning Representations by Back-Propagating Errors. *Nature*, *323*, 533–536.

Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., ... Fei-Fei, L. (2015, décembre). ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*, *115*(3), 211–252.

Russel, S. & Norvig, P. (2010, décembre). *Intelligence artificielle 3e édition : Avec plus de 500 exercices*. Paris : Pearson France.

Russell, T. L. (1997). *The "No Significant Difference" Phenomenon as Reported in 248 Research Reports, Summaries, and Papers*. Raleigh, N.C. : North Carolina State University.

Saddik, A. E. (2018, avril). Digital Twins : The Convergence of Multimedia Technologies. *IEEE MultiMedia*, *25*(2), 87–92.

Saffo, P. (1997). Sensors : The Next Wave of Infotech Innovation : Paul Saffo. https://www.saffo.com/essays/sensors-the-next-wave-of-infotech-innovation/.

Saleh, I. (2018). Internet Des Objets (IdO) : Concepts, Enjeux, Défis et Perspectives. *Internet des Objets*, *2*(1), 1–19.

Sallam, A. & Malik, O. (2018, octobre). Scada Systems. In A. Sallam & O. Malik (Éds.), *Electric Distribution Systems, Second Edition* (p. 465–485). Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons.

Sander, D. (2013). Models of Emotion : The Affective Neuroscience Approach. In J. Armony & P. Vuilleumier (Éds.), *The Cambridge Handbook of Human Affective Neuroscience* (p. 5–53). New York, NY, US : Cambridge University Press.

Sans, J. A., Gea-Pinal, J., Gimenez, M. H., Esteve, A. R., Solbes, J., & Monsoriu, J. A. (2017, mars). Determining the Efficiency of Optical Sources Using a Smartphone's Ambient Light Sensor. *European Journal of Physics*, *38*(2), 1–9.

Sans, J. A., Manjón, F. J., Pereira, A. L. J., Gomez-Tejedor, J. A., & Monsoriu, J. A. (2013, novembre). Oscillations Studied with the Smartphone Ambient Light Sensor. *European Journal of Physics*, *34*(6), 1349–1354.

Santos, M. A. G., Munoz, R., Olivares, R., Filho, P. P. R., Ser, J. D., & de Albuquerque, V. H. C. (2020, janvier). Online Heart Monitoring Systems on the Internet of Health Things Environments : A Survey, a Reference Model and an Outlook. *Information Fusion*, *53*, 222–239.

Schmidt, H. G. (1983). Problem-Based Learning : Rationale and Description. *Medical Education*, *17*(1), 11–16.

Schneider, B., Jermann, P., Zufferey, G., & Dillenbourg, P. (2011, juillet). Benefits of a Tangible Interface for Collaborative Learning and Interaction. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, *4*(3), 222–232.

Schultz, W., Dayan, P., & Montague, P. R. (1997, mars). A Neural Substrate of Prediction and Reward. *Science (New York, N.Y.) 275*, 1593–1599.

Segal, M. (2018, novembre). How Automation Is Changing Work. *Nature*, *563*, S132–S135.

Serres, M. (2007). Les Nouvelles Technologies : Révolution Culturelle et Cognitive. https://www.youtube.com/watch?v=ZCBB0QEmT5g. Lille, France.

Serres, M. (2018). *Le tiers-instruit*. Paris : Le Pommier.

Seydoux, N., Alaya, M. B., Hernandez, N., Monteil, T., & Haemmerlé, O. (2015). Sémantique et Internet Des Objets : D'un État de l'art à Une Ontologie Modulaire. In *26es Journées Francophones d'Ingénierie Des Connaissances* (p. 1–12). Rennes, France.

Sharples, M., Taylor, J., & Vavoula, G. (2006). A Theory of Learning for the Mobile Age. In R. Andrews & C. Haythornthwaite (Éds.), *The Sage Handbook of Elearning Research* (p. 221–247). Londres : Sage publications.

Siemens, G. (2005). Connectivism : A Learning Theory for the Digital Age. *International Journal of Instructional Technology & Distance Learning*, *2*(1), 1–10.

Siemens, G. & d. Baker, R. S. J. (2012, avril). Learning Analytics and Educational Data Mining : Towards Communication and Collaboration. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge* (p. 252–254). LAK '12. Vancouver, British Columbia, Canada : Association for Computing Machinery.

Siewiorek, D., Smailagic, A., & Starner, T. (2008, janvier). Application Design for Wearable Computing. *Synthesis Lectures on Mobile and Pervasive Computing*, *3*(1), 1–66.

Silem, A. & Lamizet, B. (1997, novembre). *Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'information et de la communication*. Paris : Ellipses Marketing.

Silva, R. B. D. (2014, mars). Taxonomie et typologie : comment rapprocher les cadres conceptuels des différentes écoles de pensée ? *Sante Publique*, *26*(1), 87–88.

Silvia, P. J. (2010, mai). Confusion and Interest : The Role of Knowledge Emotions in Aesthetic Experience. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, *4*(2), 75–80.

Simard, C. (2002). *Normalisation de La Formation En Ligne : Enjeux, Tendances et Perspectives*. Agence Universitaire de la Francophonie (AUF).

Simon, H. A. (1983). Why Should Machines Learn ? In R. S. Michalski, J. G. Carbonell, & T. M. Mitchell (Éds.), *Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach* (p. 25–37). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.

Skinner, B. F. (1971). *L'analyse expérimentale du comportement : un essai théorique*. Bruxelles : Dessart et Mardaga.

Smyrnaios, N. (2017). *Les GAFAM contre l'Internet : une économie politique du numérique*. Bry-sur-Marne, France : INA.

So, H.-J., Hwang, Y.-E., Wang, Y., & Lee, E. (2018). Unpacking the Potential of Tangible Technology in Education : A Systematic Literature Review. *Educational Technology International*, *19*(2), 199–202.

Söderström, O., Paasche, T., & Klauser, F. (2014, mai). Smart Cities as Corporate Storytelling. *City*, *18*(3), 307–320.

Soualah-Alila, F., Nicolle, C., & Mendes, F. (2014). Une Approche Web Sémantique et Combinatoire Pour Un Système de Recommandation Sensible Au Contexte Appliqué à l'apprentissage Mobile. In *14èmes Journées Francophones, Extraction et Gestion Des Connaissances* (p. 1–4). https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01238293/. Rennes, France.

Spearman, C. (1904). "General Intelligence," Objectively Determined and Measured. *The American Journal of Psychology*, *15*(2), 201–292.

Squire, L. R. [Larry R.]. (2004, novembre). Memory Systems of the Brain : A Brief History and Current Perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*. Multiple Memory Systems, *82*(3), 171–177.

Stahl, G., Koschmann, T., & Suthers, D. (2006). Computer-Supported Collaborative Learning : An Historical Perspective. In R. K. Sawyer (Éd.), *Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (p. 409–426). Cambridge, UK : Cambridge University Press.

Stapic, Z., Mihaljinac, K., & Džeko, M. (2019, mars). Designing Iot Infrastructure Layer in an Iot-Supported Learning Environment. In *Proceedings of INTED2019 Conference* (p. 9290–9300). Valence, Espagne.

Steinbuch, K. (1966). *Die informierte Gesellschaft. Geschichte und Zukunft der Nachrichtentechnik.* Stuttgart : Deutsche Verl.-Anst.

Steiner, P. (2005). Introduction cognitivisme et sciences cognitives. *Labyrinthe*, *20*(1), 13–39.

Strzys, M. P., Thees, M., Kapp, S., Knierim, P., Schmidt, A., Lukowicz, P., & Kuhn, J. (2019). Smartglasses as Assistive Tools for Undergraduate and Introductory STEM Laboratory Courses. In I. Buchem, R. Klamma, & F. Wild (Éds.), *Perspectives on Wearable Enhanced Learning (WELL) : Current Trends, Research, and Practice* (p. 35–58). Cham : Springer International Publishing.

Strzys, M. P., Thees, M., Kapp, S., & Kuhn, J. (2018, août). Smartglasses in STEM Laboratory Courses – the Augmented Thermal Flux Experiment. In *Hysics Education Research Conference 2018* (p. 1–4). PER Conference. Washington, DC.

Suárez, Á., Specht, M., Prinsen, F., Kalz, M., & Ternier, S. (2018, mars). A Review of the Types of Mobile Activities in Mobile Inquiry-Based Learning. *Computers & Education*, *118*, 38–55.

Sullivan, J. V. (2018, juillet). Learning and Embodied Cognition : A Review and Proposal. *Psychology Learning & Teaching*, *17*(2), 128–143.

Sutherland, I. (1965). The Ultimate Display. In *Proceedings of IFIP Congress* (T. 1, p. 506–508). Londres : Macmillan and Co.

Sutjarittham, T., Gharakheili, H. H., Kanhere, S. S., & Sivaraman, V. (2019). Experiences with IoT and AI in a Smart Campus for Optimizing Classroom Usage. *IEEE Internet of Things Journal*, *5*(6), 7595–7607.

Swan, M. (2013, juin). The Quantified Self : Fundamental Disruption in Big Data Science and Biological Discovery. *Big Data*, *1*(2), 85–99.

Sweller, J. (1988, avril). Cognitive Load during Problem Solving : Effects on Learning. *Cognitive Science*, *12*(2), 257–285.

Sweller, J., Merrienboer, J. J. G. V., & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, *10*, 251–296.

Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. (2019). Cognitive Architecture and Instructional Design : 20 Years Later. *Educational Psychology Review*, *31*, 261–292.

Taddei, F., Becchetti-Bizot, C., & Houzel, G. (2017). *Vers Une Société Apprenante.* Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

Tahir, Z. M., Haron, H., & Singh, J. K. G. (2018, juillet). Evolution of Learning Environment : A Review of Ubiquitous Learning Paradigm Characteristics. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *11*(1), 175.

Takiddeen, N. & Zualkernan, I. (2020). Smartwatches for Context-Aware Ubiquitous Learning. In M. Rehm, J. Saldien, & S. Manca (Éds.), *Project and Design Literacy as Cornerstones of Smart Education* (p. 191–205). Singapore : Springer Singapore.

The Cognition And Technology Group At Vanderbilt. (1990, août). Anchored Instruction and Its Relationship to Situated Cognition. *Educational Researcher*, *19*(6), 2–10.

Theureau, J. (2004, octobre). L'hypothèse de la cognition (ou action) située et la tradition d'analyse du travail de l'ergonomie de langue française. *Activités*, *1*(2), 11–25.

Thorndike, E. L. (L. (1911). *Animal Intelligence ; Experimental Studies*. New York, The Macmillan company.

Tingir, S., Cavlazoglu, B., Caliskan, O., Koklu, O., & Intepe-Tingir, S. (2017, août). Effects of Mobile Devices on K-12 Students' Achievement : A Meta-Analysis. *Journal of Computer Assisted Learning*, *33*(4), 355–369.

Todd, R. M., Miskovic, V., Chikazoe, J., & Anderson, A. K. (2020, janvier). Emotional Objectivity : Neural Representations of Emotions and Their Interaction with Cognition. *Annual Review of Psychology*, *71*(1), 25–48.

Traxler, J. (2009, janvier). Learning in a Mobile Age. *International Journal of Mobile and Blended Learning (IJMBL)*, *1*(1), 1–12.

Tricot, A. (1998). Charge cognitive et apprentissage. Une présentation des travaux de John Sweller. *Revue de Psychologie de l'Education*, *1*, 37–64.

Trifa, V. M. (2011). *Building Blocks for a Participatory Web of Things* (thèse de doct., ETH, Zurich, Suisse). http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:4641.

Truman, T. E., Pering, T., Doering, R., & Brodersen, R. W. (1998, octobre). The InfoPad Multimedia Terminal : A Portable Device for Wireless Information Access. *IEEE Transactions on Computers*, *47*(10), 1073–1087.

Tse, C.-S., Balota, D. A., & Roediger, H. L. (2010). The Benefits and Costs of Repeated Testing on the Learning of Face–Name Pairs in Healthy Older Adults. *Psychology and Aging*, *25*(4), 833–845.

Tsiatsis, V., Karnouskos, S., Höller, J., Boyle, D., & Mulligan, C. (2019). Origins and IoT Landscape. In V. Tsiatsis, S. Karnouskos, J. Höller, D. Boyle, & C. Mulligan (Éds.), *Internet of Things* (p. 9–30). Elsevier.

Tulving, E. (1995). Organization of Memory : Quo Vadis ? In M. S. Gazzaniga (Éd.), *The Cognitive Neurosciences* (p. 839–853). Cambridge, MA, US : The MIT Press.

Turing, A. M. (1936). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, *43*, 230–265.

Turing, A. M. (1950, octobre). I.—COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. *Mind*, *59*(236), 433–460.

Ullmer, B., Ishii, H., & Jacob, R. J. K. (2005, mars). Token+constraint Systems for Tangible Interaction with Digital Information. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, *12*(1), 81–118.

Urrutia, F. J. Z., Loyola, C. C., & Marín, M. H. (2019, décembre). A Tangible User Interface to Facilitate Learning of Trigonometry. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, *14*(23), 152–164.

Uttal, D. H., Scudder, K. V., & DeLoache, J. S. (1997, janvier). Manipulatives as Symbols : A New Perspective on the Use of Concrete Objects to Teach Mathematics. *Journal of Applied Developmental Psychology*, *18*(1), 37–54.

Vallerand, R. J. & Thill, E. E. (1993). *Introduction à la psychologie de la motivation*. Laval, Qué : Vigot.

van Dam, A. (1997, février). Post-WIMP User Interfaces. *Communications of the ACM*, *40*(2), 63–67.

Vayre, J.-S. (2018, novembre). Comment décrire les technologies d'apprentissage artificiel ? *Réseaux*, *211*(5), 69–104.

Vieillard-Baron, J.-L. (1991). *Le Problème de l'âme et du dualisme*. Paris : Vrin.

Vogel, F., Wecker, C., Kollar, I., & Fischer, F. (2017, septembre). Socio-Cognitive Scaffolding with Computer-Supported Collaboration Scripts : A Meta-Analysis. *Educational Psychology Review*, *29*(3), 477–511.

Vosniadou, S. & Brewer, W. F. (1992, octobre). Mental Models of the Earth : A Study of Conceptual Change in Childhood. *Cognitive Psychology*, *24*(4), 535–585.

Vygotski, L. S. (1997). *Pensée et Langage* (La Dispute). Paris, France.

Walker, M. P. & Stickgold, R. (2004, septembre). Sleep-Dependent Learning and Memory Consolidation. *Neuron*, *44*(1), 121–133.

Wallace, D. P. (2007). *Knowledge Management : Historical and Cross-Disciplinary Themes*. Westport, CT, USA : Libraries Unlimited.

Walter, J., Douyère, D., Bouillon, J.-L., & Ollivier-Yaniv, C. (2018, septembre). *Dynamiques Des Recherches En Sciences de l'information et de La Communication*. https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01885229. Conférence permanente des directeurs×trices des unités de recherche en sciences de l'information et de la communication (CPDirSIC).

Watson, J. (1913). Psychology as the Behaviorist Views It. *Psychological Review*, *20*(2), 158–177.

Weill, M. & Souissi, M. (2010). L'Internet des objets : concept ou réalité ? *Annales des Mines - Réalités industrielles*, *Novembre 2010*(4), 90–96.

Weiser, M. [M.], Gold, R., & Brown, J. S. (1999). The Origins of Ubiquitous Computing Research at PARC in the Late 1980s. *IBM Systems Journal*, *38*(4), 693–696.

Weiser, M. [Mark]. (1999, juillet). The Computer for the 21st Century. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev. 3*(3), 3–11.

Weiser, M. [Mark] & Brown, J. S. (1996). Designing Calm Technology. *Powergrid Journal*, *1*, 1–5.

Wilson, M. (2002, décembre). Six Views of Embodied Cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(4), 625–636.

Wilson, R. A. & Foglia, L. (2011). Embodied Cognition. In E. Zalta (Éd.), *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. https://plato.stanford.edu/entries/embodied-cognition/?source=post_page----------. Stanford.

Wilson, R. & Keil, F. (Éds.). (1999). *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. Cambridge, Mass : MIT Press.

Wolton, D. (2012, février). *Indiscipliné : 35 ans de recherches*. Paris : Odile Jacob.

Wroblewski, L. & Zeldman, J. (2011). *Mobile First*. New York : A Book Apart.

Wu, Q., Ding, G., Xu, Y., Feng, S., Du, Z., Wang, J., & Long, K. (2014, avril). Cognitive Internet of Things : A New Paradigm Beyond Connection. *IEEE Internet of Things Journal*, *1*(2), 129–143.

Xie, H., Chu, H.-C., Hwang, G.-J., & Wang, C.-C. (2019, octobre). Trends and Development in Technology-Enhanced Adaptive/Personalized Learning : A Systematic Review of Journal Publications from 2007 to 2017. *Computers & Education*, *140*, 1–16.

Yagle, K., Richards, T., Askren, K., Mestre, Z., Beers, S., Abbott, R., ... Berninger, V. (2017, janvier). Relationships between Eye Movements during Sentence Reading Comprehension, Word Spelling and Reading, and DTI and Fmri Connectivity In Students with and without Dysgraphia or Dyslexia. *Journal of systems and integrative neuroscience*, *3*(1), 1–25.

Yahya, S., Arniza Ahmad, E., & Abd Jalil, K. (2010). The Definition and Characteristics of Ubiquitous Learning : A Discussion. *International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology (IJEDICT)*, *6*(1), 117–127.

Zaromb, F. M., Karpicke, J. D., & Roediger, H. L. (2010, mars). Comprehension as a Basis for Metacognitive Judgments : Effects of Effort after Meaning on Recall and Metacognition. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, *36*(2), 552–557.

Zeleny, M. (1987). From Knowledge to Wisdom : Strategic Challenges of Global Business Education. *Management*, *7*(1), 59–70.

Zerhouni, E. (2013, janvier). Les Grandes Tendances de l'innovation Biomédicale Au XXIe Siècle : Leçon Inaugurale Prononcée Le 20 Janvier 2011. Chaire d'Innovation Technologique Liliane Bettencourt. In *Les Grandes Tendances de l'innovation Biomédicale Au XXIe Siècle*. Leçons Inaugurales. http://books.openedition.org/cdf/434. Paris : Collège de France.

Zuboff, S. (1988). *In the Age of the Smart Machine : The Future of Work and Power*. New York, NY, USA : Basic Books, Inc.

Zuckerman, O. (2006). Historical Overview and Classification of Traditional and Digital Learning Objects. https://llk.media.mit.edu/courses/readings/classification-learning-objects.pdf.

Liste des figures

1.1 Communication entre deux neurones . . . 13
1.2 Anticipation de l'environnement par le bébé . . . 16
1.3 Fonctionnement du contrôle exécutif . . . 18
1.4 Apprentissage selon la règle de Rescorla-Wagner . . . 21
1.5 Modèle de Baddeley . . . 24
1.6 Les mémoires à long terme . . . 24
1.7 Rôles des mémoires pour anticiper l'environnement . . . 26
1.8 Perception des émotions . . . 27
1.9 Contrôle inhibiteur de la cognition . . . 45

2.1 Perception de l'environnement . . . 52
2.2 Données, Informations, Connaissances et Sagesse . . . 56
2.3 Processus de perception et d'apprentissage . . . 59
2.4 Continuum de la réalité mixte . . . 73
2.5 Représentation d'un neurone formel . . . 79
2.6 Perceptron multi-couches . . . 80
2.7 Vision artificielle avec l'apprentissage profond . . . 81
2.8 Système de tutorat intelligent . . . 83

3.1 Cartographie d'ARPANET en 1973 . . . 93
3.2 Développement du web mobile . . . 95
3.3 Système *Machine-to-Machine* . . . 99
3.4 Des *mainframes* à l'*infotech-biotech* . . . 100
3.5 Prototypes d'objets connectés du Xerox PARC . . . 101
3.6 Évolution des publications traitant de l'IdO (1997-2020) . . . 104
3.7 Architecture de l'IdO selon l'IEEE P2413 . . . 110
3.8 Architecture de l'IdO selon l'UIT-T . . . 110
3.9 Modes de communication entre les objets connectés . . . 112
3.10 Écosystème d'IdO . . . 114
3.11 Technologies de communication sans-fil . . . 117
3.12 Casques à réalité mixte pour professionnels . . . 123

4.1 Modèle DIAP : Données, Interfaces, Agents, Pervasivité . . . 138
4.2 Architecture de l'IdO et traitement des données . . . 138
4.3 Interface utilisateur tangible . . . 141

4.4 Couplage d'un objet connecté avec un SIA . . . 143
4.5 Méthode pour caractériser l'apprentissage dans le contexte de l'IdO. . . . 147
4.6 Dispositif OBSY . . . 150
4.7 Dispositif avec objets tangibles . . . 154
4.8 Mise en pratique du dispositif HistoNFC . . . 156
4.9 Détection de l'engagement de l'apprenant à partir de capteurs . . . 158
4.10 Initiation à la programmation avec l'application Tynker . . . 162
4.11 Application Phyphox . . . 162

5.1 Approche pour la médiation des savoirs scientifiques . . . 178
5.2 Diagramme fonctionnel du modèle DRI . . . 179
5.3 Visualisation du spectre d'une lumière . . . 180
5.4 Ressources pour dispositifs d'apprentissage . . . 181
5.5 Grandeurs photométriques . . . 186
5.6 Exemple de loi en carré inverse . . . 188
5.7 Application *GrandeursPhotométriques* . . . 190
5.8 Applications du dispositif Pram . . . 190
5.9 Utilisation du dispositif Ecla . . . 192
5.10 *Lumière&Couleurs* : modifier la couleur de l'éclairage . . . 193
5.11 Utilisation du dispositif Lumi . . . 194
5.12 Dispositif Teco . . . 196
5.13 Déroulement de l'expérimentation . . . 199
5.14 Résultats des échelles SEP-TIC et SUS . . . 203
5.15 Résultats des échelles IMI . . . 203
5.16 Évaluation des connaissances . . . 204
5.17 Tests de corrélation . . . 205

Liste des tableaux

3.1 Définitions de l'IdO par l'EPSoSS, l'IETF, l'UIT et l'IEEE 108
3.2 Technologies de l'IdO 113
3.3 Objets connectés dédiés au bien-être et à la santé 120
3.4 Référentiels de compétences pour le 21e siècle 131

4.1 Synthèse des dispositifs d'apprentissage basés sur l'IdO 164

5.1 Dispositifs d'apprentissage LumIoT 188
5.2 Commentaires sur chaque dispositif 206
5.3 Commentaires généraux des étudiants 208

Liste des équations

2.1 Inférence bayésienne 51

5.1 Intensité lumineuse 187
5.2 Eclairement 187

Liste des abréviations

AES *Automated essay scoring*. 70, 71, 125

ARPANET Advanced Research Projects Agency Network. 78, 79, 83, 237

AUI *ambiant user interfaces*. 127, 128

BYOD *Bring Your Own Device*. 59

CERN Conseil européen pour la recherche nucléaire. 79

CSCL *Computer-supported collaborative learning*. 57, 58

DARPA Defense Advanced Research Projects Agency. 78

. viii, 119, 120, 123, 124, 130–137, 153, 156, 158, 164, 238, 239

EDM *Educational Data Mining*. 69, 73

EEG électroencéphalographie. 146

EIAH environnements informatiques pour l'apprentissage humain. 54

IA intelligence artificielle. 53, 62, 63, 65, 73, 75

IdO Internet des Objets. 50, 56, 77, 78, 82, 84, 85, 88, 89, 91, 93, 95–98, 100, 101, 104–118, 120–126, 128–134, 136, 137, 140–142, 144, 145, 149, 151–155, 157, 158, 237–239

ITS *Intelligent Tutoring System*. 53, 69, 70, 125, 140, 148

LA *Learning Analytics*. 69, 73

LMS *Learning Management System*. 52, 54, 140, 141, 146, 147

M2M *Machine-to-Machine*. 84, 85, 102, 110, 111, 120

MEMS microsystème éléctromécanique. 100, 102

MOOC *Massive Open Online Course*. 52, 54, 71, 72, 139–141

OMS Organisation mondiale de la santé. 106

SCADA systèmes de contrôle et d'acquisition de données. 84, 85

SIA systèmes d'intelligence artificielle. 37, 38, 64–67, 69, 73–75, 122, 129, 148, 158, 192

SIC sciences de l'information et de la communication. 38, 43, 44, 48, 50, 54

SUI *surface user interfaces*. 127

TIC technologies de l'information et de la communication. 10, 37, 48, 49, 51, 52, 56, 57, 61, 62, 75, 77, 82, 85, 87, 88, 90, 93, 95, 105, 110, 112, 113, 117, 118, 125, 126, 130, 131, 142

TUI *tangible user interfaces*. 127

W3C World Wide Web Consortium. 80–82

WWW World Wide Web. 78, 79, 82, 83, 88

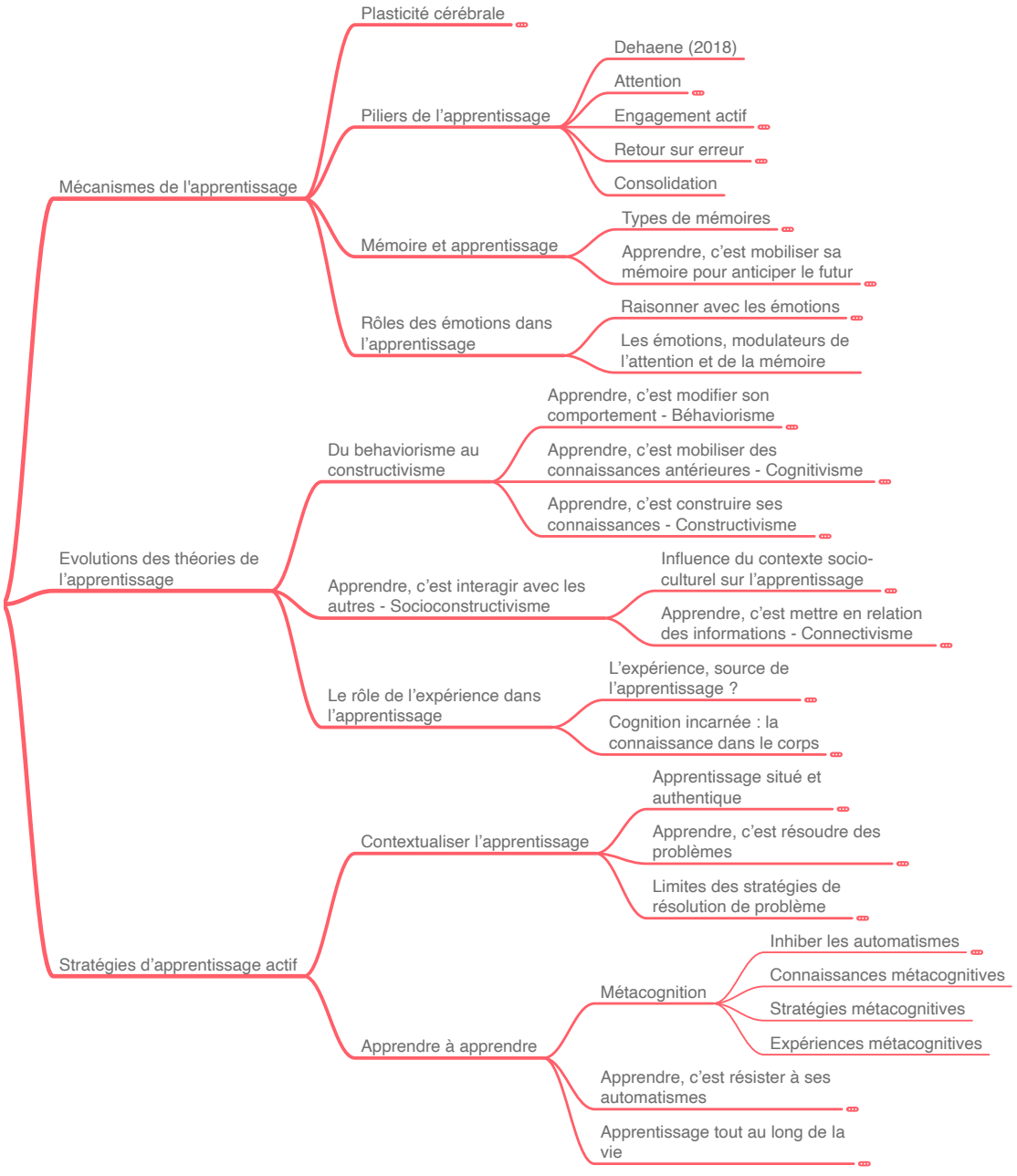
Xerox PARC Centre de recherche Xerox à Palo Alto. 85–87

Annexes

Annexe A

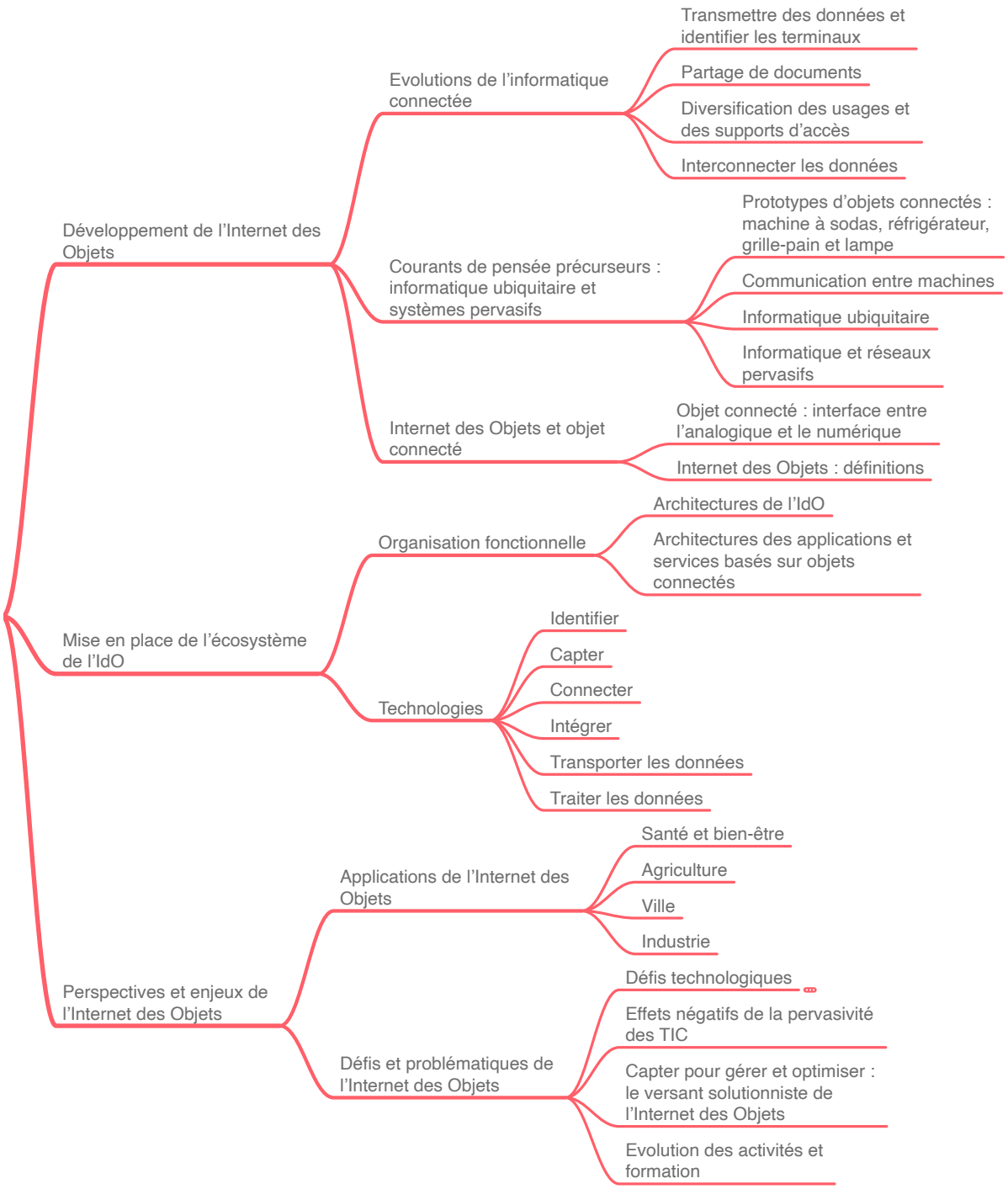
Carte conceptuelle du manuscrit

A.1 Chapitre 1. Mécanismes et processus de l'apprentissage

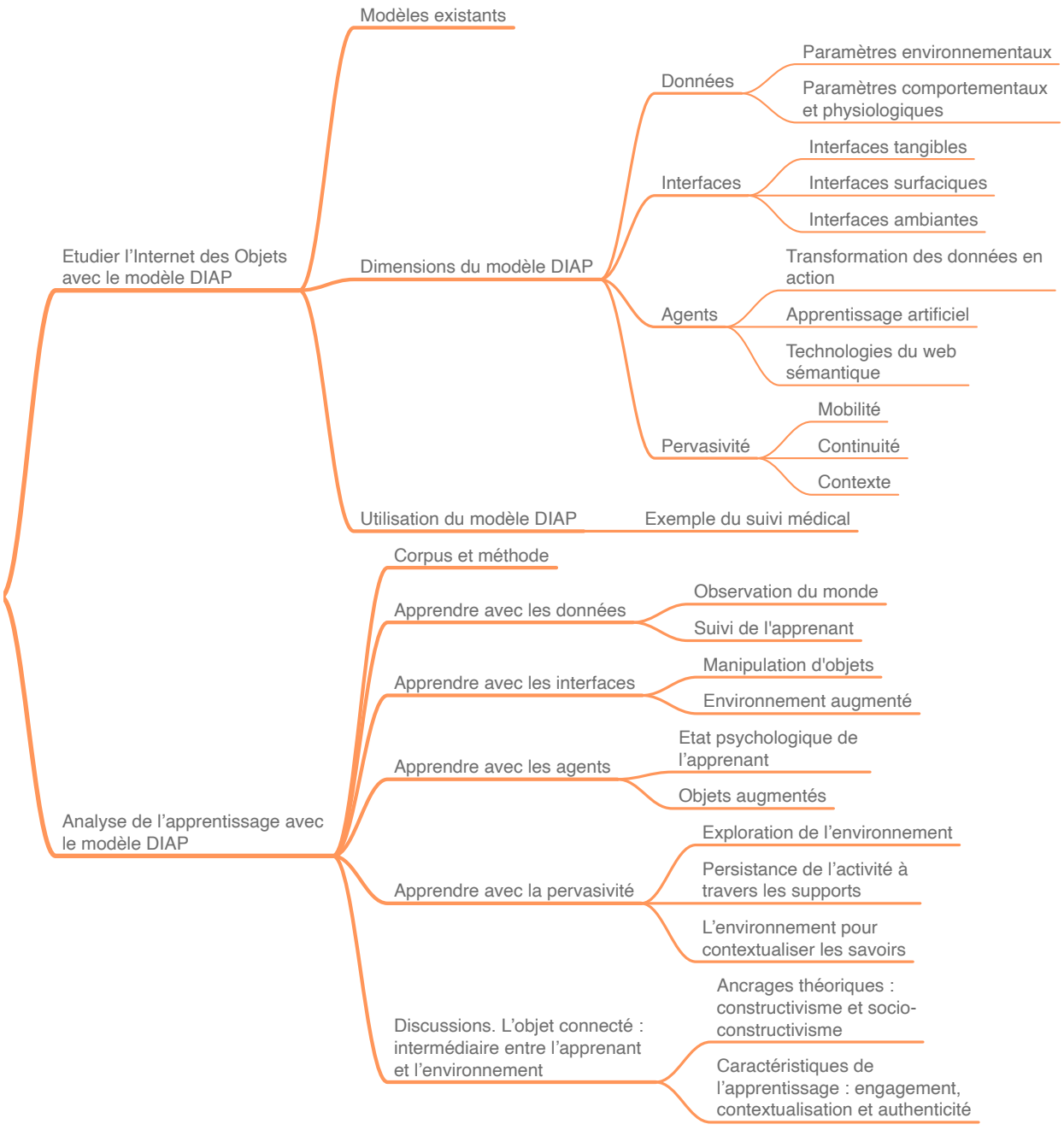


A.2 Chapitre 2. Connaître, savoir

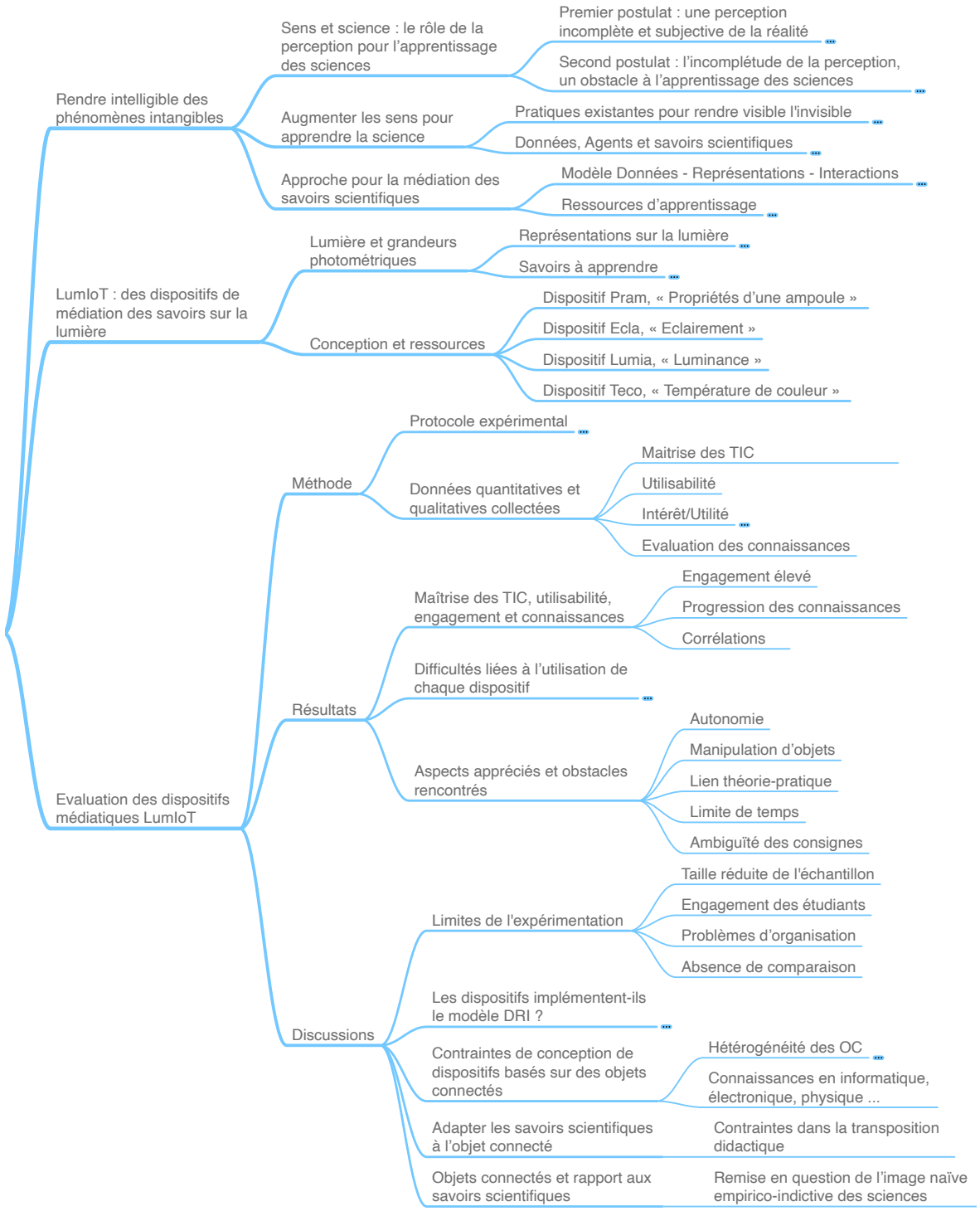
A.3 Chapitre 3. Internet des Objets : de l'ordinateur à l'objet connecté



A.4 Chapitre 4. Caractéristiques de l'apprentissage dans le contexte de l'Internet des Objets



A.5 Chapitre 5. Objets connectés : catalyseurs dans la médiation des savoirs scientifiques



Annexe B

Fiches de manipulation des dispositifs LumIoT

B.1 Dispositif Pram : propriétés d'une ampoule

Numéro du groupe : ……..

A quoi correspondent les signes indicatifs « lm », « K » et « W » présents sur une ampoule ou son emballage ? Qu'est-ce que le flux lumineux d'une ampoule, par rapport à son intensité lumineuse ?

Durée : 15 minutes

Première partie : que sont « lm », « W » et « K » ?

Préparation

L'ampoule doit être débranchée et dévissée du support en carton.

Flashez le QR code ci-après pour accéder à l'application mobile *ConnaitreMonAmpoule*. L'application vous permettra de photographier les indications sur votre ampoule, ou son emballage, et analysera le contenu de la photo.

Remarque : sur les iPads et iPhone, l'appareil photo détecte automatiquement le QR code.

Réalisation

1. A l'aide de *ConnaitreMonAmpoule*, cherchez et lisez les explications des signes ci-dessous et notez leurs noms et unités.

« lm » :

« K » :

« W » :

2. Une grandeur photométrique désigne une mesure qui quantifie la lumière. Parmi les trois signes précédents, lequel est une mesure photométrique ?

Seconde partie : qu'est-ce que l'intensité lumineuse par rapport au flux lumineux ?

Préparation

L'ampoule doit être vissée sur le support, branchée et allumée.

Flashez le QR code ci-après pour accéder à l'application mobile *GrandeursPhotométriques*. Pointez la caméra de votre appareil vers les marqueurs (séparément ou ensemble), l'application vous permettra de visualiser en réalité augmentée les grandeurs photométriques.

Réalisation

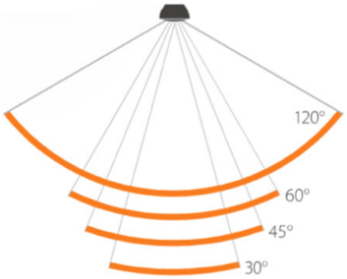
3. A l'aide de *GrandeursPhotométriques*, représentez schématiquement ci-dessous les trois grandeurs photométriques en indiquant où elles se trouvent.

4. Dans l'application, depuis le menu « Mesures », ajoutez la valeur de flux lumineux de votre ampoule. Ajoutez également le chiffre sur votre schéma précédent.

5. Le Candela est l'unité de mesure de l'intensité lumineuse : le flux lumineux dans une direction donnée. Par conséquent, pour calculer l'intensité lumineuse à partir du flux lumineux, il faut prendre en compte l'angle de diffusion de l'ampoule. Cet angle varie en fonction des ampoules.

   Sachant que l'angle de votre ampoule est de 160°, calculez l'intensité lumineuse de votre ampoule avec l'application mobile *Calculs d'éclairement*. Ajoutez le résultat dans l'application et sur votre schéma.

6. Le Lux est l'unité de l'éclairement : la quantité de lumière reçue par une surface. La formule pour calculer l'éclairement est : Intensité lumineuse/distance^2. La distance est exprimée en mètre.



Calculez l'éclairement, sans utiliser l'application *Calculs d'éclairement*. Vous utiliserez l'application pour vérifier votre calcul.

Finalement, ajoutez le résultat dans l'application et sur votre schéma.

B.2 Dispositif Ecla : éclairement

Numéro du groupe : ……..

La quantité de lumière reçue par une surface est appelée Eclairement (Lux). Quels facteurs influencent l'éclairement ? Comment varie l'éclairement en fonction de la distance ?

Durée : 20 minutes

Préparation

L'ampoule doit être branchée, allumée, et positionnée à l'horizontale.

Lancez l'application mobile Light Meter (iOS)/Lux Light Meter (Android). Ces applications permettent de mesurer l'éclairement.

Réalisation

1. Outre la distance, quel autre facteur semble influencer la mesure d'éclairement ?

   Observez les variations des mesures prises par l'application en changeant les conditions : distance, angle, orientation de l'ampoule ou de la caméra, couleur de l'ampoule.

2. Complétez le tableau ci-dessous à l'aide de l'application mobile pour mesurer l'éclairement.

Distance (cm/pas/m)						
Eclairement (lux)						

3. Dessinez la courbe de l'éclairement en fonction de la distance à l'aide de l'application GeoGebra. L'animateur du TP vous montrera comment utiliser l'application. Enregistrez votre image en indiquant le numéro de votre groupe.

4. Donnez au moins deux particularités de votre courbe.

5. L'éclairement suit la *Loi en carré inverse*, il est inversement proportionnel au carré de la distance : Eclairement = $1/d^2$ où :

   1 = valeur d'éclairement de départ, mesurée au plus près de l'ampoule

   d = distance séparant la nouvelle distance divisée par la distance de départ

   Choisissez deux distances parmi celles du tableau précédent et rapportez-les dans le tableau ci-dessous avec vos valeurs de départ.

   Complétez la dernière ligne du tableau.

	Départ	Distance 1	Distance 2
Distance (cm/m/pas)			
Eclairement mesuré (lux)			
Eclairement théorique (lux)			

   D'après vous, pourquoi les valeurs sont différentes ?

B.3 Dispositif Lumi : luminance et prise de vue

Numéro du groupe : .....

A quoi correspond la luminance ? Quel est son lien avec la prise de vue ?

Durée : 15 minutes

Première partie : à quoi correspond la luminance ?

Préparation

Plusieurs feuilles de différentes couleurs sont à disposition.

Vous utiliserez l'application mobile Light Meter (iOS)/Lux Light Meter (Android) sur deux appareils différents. Ces applications permettent de mesurer l'éclairement.

Vous utiliserez l'application mobile Lux (iOS)/Light Meter Free (Android). Ces applications affichent les paramètres de prise de vue de l'appareil photo.

Réalisation

1. Prenez en photo successivement deux feuilles noir et blanche ensemble, une feuille blanche seule puis une feuille noire seule. Observez-vous des différences ? Si oui, lesquelles ?

2. L'appareil photo ajuste la quantité de lumière que son capteur reçoit de la scène à photographier en modifiant, entre autres, le temps de pose. Il s'agit la durée pendant laquelle l'appareil laisse entrer la lumière sur son capteur. Un temps de pose de « 1/80 » (en secondes) est très court tandis que « 1/20 » est plus long.

À l'aide de l'application Lux (iOS)/Light Meter Free (Android), notez ci-dessous le temps de pose pour la feuille noire et pour la feuille blanche.

3. Comment expliquez-vous les différences ?

Pour agir ainsi, votre appareil photo doit mesurer la luminance, c'est-à-dire la quantité de lumière renvoyée par une surface ou un objet vers l'appareil photo.

4. Mesurez vous-même la luminance à l'aide de l'application mobile Light Meter (iOS)/Lux Light Meter (Android).

   a. Choisissez une feuille de couleur et positionnez l'un des appareils dessus. Paramétrez l'application afin qu'elle utilise la caméra frontale. Cet appareil mesure la lumière incidente.

   b. Avec un second appareil, mesurer la quantité de lumière réfléchie par la feuille.

   c. Observez les différences des mesures entre lumière incidente et lumière réfléchie.

   Vous pouvez utiliser la lampe torche d'un autre appareil pour changer les conditions d'éclairement.

B.4 Dispositif Teco : température de couleur

Numéro du groupe : .....

À quoi correspond visuellement la température de couleur d'une ampoule ?

Durée : 10 minutes

Préparation

L'ampoule est allumée et fixée à l'intérieur d'une boîte avec des ouvertures.

Un capteur de spectre de lumière est positionné à l'intérieur de la boîte, perpendiculairement à l'ampoule.

Un iPad est disponible avec l'application *Expérience*.

Réalisation

1. À l'aide de l'application *Expérience* présente sur l'iPad, observez la lumière de l'ampoule en faisant varier sa température de couleur.
2. Observez en parallèle de la température de couleur, les modifications du spectre de la lumière.
3. Complétez le tableau.

Kelvin	2000 K	4000 K	5000 K	6000 K
Couleurs				

4. Les changements de couleur vous semblent-ils cohérents avec ce que vous avez appris ? Essayez d'expliquer ces changements de la couleur apparente de l'ampoule.

Annexe C

Évaluation des dispositifs LumIoT

C.1 Questionnaire pré test

Nous menons une recherche sur l'utilisation des objets connectés pour l'apprentissage et dans ce cadre, nous souhaitons évaluer la façon dont sont perçus et utilisés les objets connectés et les connaissances acquises.

L'objectif de ce questionnaire, avant la participation aux ateliers, est de : 1) collecter des données sur votre expérience avec les technologies et 2) de déterminer ce que vous savez déjà sur les grandeurs photométriques.

Ce questionnaire ne fait l'objet d'aucune évaluation notée.

Durée : 10 minutes.

Anonymat

Les données collectées sont et resteront anonymes lors de l'analyse des résultats. Toutefois, nous vous demandons de bien noter l'identifiant qui vous a été transmis.

Identifiant :

Âge :

Genre :

Formation universitaire avant le Master 1 Produits et Services Multimédia :

Baccalauréat :

Expérience avec les technologies

Combien avez-vous d'ordinateurs et d'objets connectés (ordinateur de bureau, ordinateur portable, smartphone, tablette, montre/bracelet connecté, jouet connecté, etc.) ?

— Aucun

— 1

— 2

— 3

— 4

— 5

— 6 et plus

Parmi les types d'appareils ci-dessous, lesquels possédez-vous ?

— Ordinateur de bureau
— Ordinateur portable
— Tablette (e.g. iPad, Surface, Wiko)
— Liseuse numérique (e.g. Kindle)
— Smartphone
— Montre ou bracelet connecté (e.g. Apple Watch, Fitbit Charge)
— Casque de réalité virtuelle ou augmentée (e.g. Oculus Rift, Google Glass, Google Cardboard)
— Enceinte connectée à commande vocale (e.g. Google Home, Amazon Echo)
— Domotique connectée (e.g. ampoule, thermostat, grille pain)
— Microcontrôleurs (e.g. Arduino, Raspberry Pi)
— Consoles de jeu
— Autre : ...

Combien de temps passez-vous sur les appareils ci-dessous en moyenne par jour ?

	Jamais	Moins de 30 minutes	Entre 30min et 1h	Entre 1h et 2h	Entre 2h et 3h	Plus de 3h
Ordinateur de bureau						
Ordinateur portable						
Tablette						
Smartphone						

Quel est le système d'exploitation de votre smartphone ?

— Android
— iOS
— Windows
— Autre : ...
— Je ne sais pas

Lors des cours magistraux, comment prenez-vous des notes ?

— Papier et stylo
— Ordinateur portable
— Tablette
— Smartphone

Avez-vous utilisé une application mobile éducative (e.g. Duolingo, Scratch Jr, GeoGebra) lors de ces trois derniers mois ?

Si oui, laquelle ? ...

Avez-vous déjà suivi une formation en ligne (e.g. MOOC, série de vidéos) ? Si oui, combien ?

D'après vous, quelles données récupère (capte) votre smartphone sur son environnement ?

Intérêt pour la science

Merci de répondre en indiquant à quel point vous êtes en désaccord ou d'accord avec chaque proposition.

Échelle de Lickert : Tout à fait d'accord, d'accord, ni en désaccord ni d'accord, pas d'accord, pas du tout d'accord

J'aime acquérir de nouvelles connaissances en sciences

Je m'amuse généralement lorsque j'apprends des sujets scientifiques

Je suis intéressé(e) pour en savoir plus sur les sciences

J'aime lire des choses à propos de la science

Je suis content de résoudre sur des problèmes scientifiques

Que savez-vous sur les grandeurs photométriques et la température de couleur ?

Cette partie du questionnaire évalue ce que vous avez appris durant les quatre ateliers et vos réponses donneront lieu à une note prise en compte dans l'UE Fondements du Multimédia.

Indiquez l'unité de chaque grandeur photométrique :

— Flux lumineux : ...

— Intensité lumineuse : ...

— Éclairement : ...

Qu'est-ce que le flux lumineux ?

— La lumière émise par une source dans toutes les directions

— La lumière émise par une source dans une direction donnée

— La lumière incidente sur une surface

— La lumière réfléchie par une surface

Sur une ampoule, il est indiqué le nombre de lumens. Cette information est nécessaire pour connaître la ...

— Couleur de l'éclairage

— Consommation électrique

— Puissance lumineuse dans toutes les directions

— Luminosité

Qu'est-ce que l'intensité lumineuse ?

— La lumière émise par une source dans toutes les directions

— La lumière émise par une source dans une direction donnée

— La lumière incidente sur une surface

— La lumière réfléchie par une surface

Expliquez en quelques mots à quoi correspond la mesure de l'éclairement.
Quel(s) facteur(s) influence(nt) l'éclairement ?

— Aspect de la surface (e.g. rugueux, lisse, ondulé)

— Distance

— Couleur de la lumière

— Orientation de la source de lumière

— Couleur de la surface

On a mesuré un éclairement de 60 à 1 mètre et un éclairement de 15 à 2 mètres. Quel est l'éclairement à 6 mètres ?

Laquelle de ces propositions décrie le mieux la relation entre la distance entre une source de lumière et un objet éclairé :

— Au fur et à mesure que l'on éloigne la source de lumière de l'objet, l'éclairement diminue de façon linéaire ;

— Au fur et à mesure que l'on éloigne la source de lumière de l'objet, l'éclairement diminue avec des variations de plus en plus petites ;

— Au fur et à mesure que l'on approche la source de lumière de l'objet, l'éclairement est d'abord faible puis augmentent fortement jusqu'à un certain niveau et ne change plus ;

— Au fur et à mesure que l'on approche la source de lumière de l'objet, l'éclairement oscillent continuellement entre des valeurs fortes et faibles ;

Pourquoi l'appareil photo doit mesurer la luminance ?
Expliquez la différence entre luminance et luminosité.
Une pièce est éclairée avec une ampoule de température 7000K. L'éclairage de la pièce tend vers quelle(s) couleur(s) ?

— Blanc

— Rouge

— Bleu

— Jaune

— Vert

Justifiez votre réponse.

C.2 Questionnaire post test

L'objectif du questionnaire est de collecter des données : 1) sur la façon dont vous avez perçues et utilisés les objets connectés et 2) ce que vous avez appris dans le cadre des quatre ateliers.

Vos réponses pour la partie 2) sont évaluées et la note obtenue est prise en compte dans l'UE Fondements du Multimédia.

La partie 1) ne fait l'objet d'aucune évaluation et n'a aucune influence sur la note obtenue.

Durée : 20 minutes.

Anonymat

Les données collectées sont et resteront anonymes lors de l'analyse des résultats. Toutefois, nous vous demandons de bien noter l'identifiant qui vous a été transmis pour l'attribution des notes finales.

Identifiant : ...

Utilisation des objets connectés

Cette partie du questionnaire porte sur la façon dont vous avez perçu et utilisé les objets connectés et applications mobiles dans le cadre de ces ateliers.

Que pensez-vous du dispositif « objets connectés + applications mobiles » ?

Merci de répondre en indiquant dans quelle mesure vous êtes en désaccord ou d'accord avec chaque proposition.

Échelle de Lickert : Tout à fait d'accord, d'accord, ni en désaccord ni d'accord, pas d'accord, pas du tout d'accord

Utilisabilité

Je pense que je voudrais utiliser ce dispositif régulièrement

Je trouve que l'utilisation dispositif est inutilement complexe

Je trouve que le dispositif est facile à utiliser

Je pense que j'aurais besoin d'aide pour être capable d'utiliser ce dispositif

Je trouve que les fonctions du dispositif sont bien intégrées

Je trouve qu'il y a trop d'incohérences dans le dispositif

Je peux bien imaginer que mes camarades vont rapidement comprendre comment utiliser le dispositif

Je trouve le dispositif fastidieux

Je me sens à l'aise en utilisant le dispositif

J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir aborder ce dispositif

Comment avez-vous trouvé ces ateliers ?

Intérêt

J'ai beaucoup aimé faire ces ateliers

Ces ateliers étaient amusants à faire

Je pense que ces ateliers étaient ennuyeux

Ces ateliers n'ont pas du tout retenu mon attention

Je dirais que ces ateliers étaient très intéressants

Utilité

Je pense que ces ateliers pourront m'être utiles

Je pense que faire ces ateliers est utile pour mieux comprendre les grandeurs photométriques

Je serai prêt à refaire ces ateliers, car ils me semblent pertinents pour comprendre les grandeurs photométriques

Je pense que ces ateliers pourront m'aider à mieux distinguer les différentes mesures photométriques

Je pense que ces ateliers pourront m'être bénéfiques.

Votre avis sur l'expérimentation

Je pense que prendre moi-même les mesures m'a aidé à comprendre les grandeurs photométriques

J'ai été en difficulté pour comprendre ce que représentaient les mesures collectées

Contrôler une ampoule m'a aidé à comprendre les grandeurs photométriques

Je dirais que ces ateliers ont rendu les grandeurs photométriques plus concrètes

Ces ateliers étaient intéressants, car je pouvais manipuler moi-même les outils pour prendre des mesures

Questions ouvertes

Lequel des ateliers avez-vous le plus apprécié ? Pourquoi ?

Lequel des ateliers avez-vous le moins apprécié ? Pourquoi ?

Donnez au moins deux choses que vous avez appréciées sur l'ensemble des ateliers.

Donnez au moins deux choses que vous n'avez pas appréciées sur l'ensemble des ateliers ?

Quelles difficultés avez-vous rencontrées ?

Avez-vous des suggestions d'amélioration ?

Que pensez-vous de l'utilisation des objets connectés pour l'apprentissage ?

Que savez-vous sur les grandeurs photométriques et la température de couleur ?

Cette partie du questionnaire évalue ce que vous avez appris durant les quatre ateliers et vos réponses donneront lieu à une note prise en compte dans l'UE Fondements du Multimédia.

Indiquez l'unité de chaque grandeur photométrique :

— Flux lumineux : ...

— Intensité lumineuse : ...

— Éclairement : ...

Qu'est-ce que le flux lumineux ?

— La lumière émise par une source dans toutes les directions

— La lumière émise par une source dans une direction donnée

— La lumière incidente sur une surface

— La lumière réfléchie par une surface

Sur une ampoule, il est indiqué le nombre de lumens. Cette information est nécessaire pour connaître la ...

— Couleur de l'éclairage

— Consommation électrique

— Puissance lumineuse dans toutes les directions

— Luminosité

Qu'est-ce que l'intensité lumineuse ?

— La lumière émise par une source dans toutes les directions

— La lumière émise par une source dans une direction donnée

— La lumière incidente sur une surface

— La lumière réfléchie par une surface

Expliquez en quelques mots à quoi correspond la mesure de l'éclairement.
Quel(s) facteur(s) influence(nt) l'éclairement ?

— Aspect de la surface (e.g. rugueux, lisse, ondulé)

— Distance

— Couleur de la lumière

— Orientation de la source de lumière

— Couleur de la surface

On a mesuré un éclairement de 60 à 1 mètre et un éclairement de 15 à 2 mètres. Quel est l'éclairement à 6 mètres ?

Laquelle de ces propositions décrie le mieux la relation entre la distance entre une source de lumière et un objet éclairé :

— Au fur et à mesure que l'on éloigne la source de lumière de l'objet, l'éclairement diminue de façon linéaire ;

— Au fur et à mesure que l'on éloigne la source de lumière de l'objet, l'éclairement diminue avec des variations de plus en plus petites ;

— Au fur et à mesure que l'on approche la source de lumière de l'objet, l'éclairement est d'abord faible puis augmentent fortement jusqu'à un certain niveau et ne change plus ;

— Au fur et à mesure que l'on approche la source de lumière de l'objet, l'éclairement oscillent continuellement entre des valeurs fortes et faibles ;

Pourquoi l'appareil photo doit mesurer la luminance ?
Expliquez la différence entre luminance et luminosité.
Une pièce est éclairée avec une ampoule de température 7000K. L'éclairage de la pièce tend vers quelle(s) couleur(s) ?

— Blanc

— Rouge

— Bleu

— Jaune

— Vert

Justifiez votre réponse.

C.3 Réponses des étudiants aux questions ouvertes

ID	Gr	Lequel des ateliers avez-vous le plus apprécié ? Pourquoi ?
2	B	L'atelier de Bastien. Observer la différence entre les résultats attendus et obtenus était un bon moyen de comprendre l'influence des différents facteurs sur l'éclairage
6	A	Sur la température des couleurs, car on comprend mieux de quoi est composé la lumière.
8	H	L'atelier A3 Luminance et prise de vue car j'ai pu observer l'absorption du spectre lumineux par les différentes couleurs
9	F	A4, voir le graphique des couleurs en fonction de l'intensité permet de bien comprendre.
12	I	Atelier 2 "éclairement <> distance" : C'était l'atelier où l'application rendait l'exercice le plus compréhensible et simple. Facile à utiliser dans un cas pratique puis pour comprendre les aspects sur la luminance (que je ne connaissait pas)
18	E	la partie température des couleurs, puisque je vois les résultats devant moi
24	H	"A4 parce que je contrôle l'ampoule et dans chaque couleur il m'affiche ça température A2 parce que je contrôle la distance a l'aide d'un metre et dans chaque distance l'application m'affiche le lux "
26	D	L'atelier de la température de couleurs car manipuler depuis l'application mobile a été très intuitif pour changer la couleur de l'ampoule mais aussi de voir le spectre de couleur sur une interface avec la Raspberry Pi a été intéressant.
27	F	A2. Parce que enfin je puisse voir en réalité comment les teint R, V et B font la couleur en se mélangent.
30	E	Celui avec la température de couleur, car c'est celui que je pense avoir le plus compris.
33	A	mon derniere atelier avec la lampe controle a travers le table
37	D	Celui de D'océane car on voyait bien la différence entre W, k , L, ...
38	B	le second
39	C	A4 Température de couleur car c'est facile à comprendre
44	I	A4 car je trouvais intéressants les gadgets utilisés et la température des couleurs est une notion que je comprenais déjà bien au départ et dont j'ai pu voir les effets en réalité
48	C	atelier 4, comprendre la nuance dans les température de couleur est intéressante

ID	Gr	Lequel des ateliers avez-vous le plus apprécié ? Pourquoi ?
50	E	les dispositifs mis en place m'ont aidé a mieux comprendre le fonctionnement, on voit en temps réel le changement de couleur qui apparaisse dés qu'on change la valeur de température qui permet de changer la température de couleur

ID	Gr	Lequel des ateliers avez-vous le moins apprécié ? Pourquoi ?
2	B	L'atelier de Lucas. Il s'agissait d'un sujet que nous avions déjà abordé en cours et la réalisation de l'atelier ne m'a pas réellement appris quelque chose.
6	A	Celui sur l'éclairement, car les résultats obtenus n'étaient pas une découverte en soit
8	H	Atelier A1 propriété de l'ampoule car il y a une grosse quantité d'information à assimiler
9	F	A2, problèmes avec les mesures prises.
12	I	Atelier 1"propriété ampoule" : C'était l'atelier où nous avons eu le plus besoin d'aide (l'application n'a pas fonctionné directement, les applications utilisées n'étaient pas forcément facile à comprendre)... Puis par rapport aux questions proposés j'ai parfois été amené à mélanger les propriétés/valeurs (lumen, lux...).
18	E	le premier puisque ça demande trop deplacement [premier = A2]
24	H	aucun parce que toute les ateliers ils me ont bien aidé a comprendre les grandeurs photométriques
26	D	L'atelier de la luminance a été pour moi le moins intéressant car je n'ai pas compris spécialement directement le but de l'atelier, j'ai été un peu perdu.
27	F	A3. Parce que c'était le moins interactive.
30	E	Celui sur l'intensité lumineuse car j'ai mis trop de temps à comprendre le sujet
33	A	L'atelier de luminance
37	D	Pas d'atelier en particulier
38	B	le troisiéme
39	C	A2 Éclairement et distance car quand on faisait, les valeurs de lux qui n'ont pas beaucoup changé et on ne peut pas faire la courbe avec ces résultats.
44	I	A3, application qui ne marchais pas sur tablette et les directives pas toujours très claires
48	C	atelier 1, trouver les calculs et
50	E	deuxième atelier , y'avait pas des changement concret qui permettes de mieux faire comprendre le but du test

ID	Gr	Donnez au moins deux choses que vous avez appréciées sur l'ensemble des ateliers
2	B	J'ai apprécié utiliser les applications présentes sur les différentes tablettes en totale autonomie car on se familiarise très rapidement avec ces dernières et également le fait d'être confronté à divers problèmes qui pouvaient facilement être résolus à l'aide des applications fournies.
6	A	Intuitif, et nous apporte des connaissances sur la vie quotidienne (ampoule chez nous par exemple)
8	H	L'utilisation d'ampoule connecté, les applications connectés
9	F	La manipulation libre, l'utilisation des applications
12	I	Manipulation direct + lien pratique/théorique immédiat.
18	E	tout est bon
24	H	"les applications qui calcule en fonction du capteur de la caméra le capteur de température dans atelier A2 "
26	D	Utilisation des tablettes, manipulation d'ampoules, mètres...
27	F	la connectivité entre les outils numériques et les électriques.
30	E	Travailler avec du matériel réel et physique.
33	A	manipile le lumiere a travers un object connecte (table), calcule le valeur de lumiere sur une table
37	D	Devoir expérimenter avec des objets physiques. Apliccations
38	B	la mesure et les photos
39	C	"1. Plus sombre plus il faut du temps de pose. 2. Plus de kelvin plus la couleur froide."
44	I	Le fait qu'on est pu partager des connaissances avec mon binômes et réaliser ses propres expérimentations
48	C	le faite que l'on puisse manipuler par nous même, utiliser des applications à l'aide de nos smartphones
50	E	manipuler les dispositifs et le fait de constater les changement qui apparaissent au Temp réel

ID	Gr	Donnez au moins deux choses que vous n'avez pas appréciées sur l'ensemble des ateliers
2	B	Parmi les choses que j'ai moins apprécié se trouve notamment la différence entre certaines applications qui est difficilement visible et le fait d'avoir été en groupe de 2 (des groupes plus grands auraient peut-être permis plus d'interaction)
6	A	certaines consignes étaient floues
8	H	Le temps limité, la démarche à suivre aurai pu être plus détaillé
9	F	Manque d'informations, pas assez guidé
12	I	Certaines questions ambiguës + application qui ne fonctionne pas directement (atelier 1).

ID	Gr	Donnez au moins deux choses que vous n'avez pas appréciées sur l'ensemble des ateliers
18	E	le temps de latence pour le valeurs du slider en kelvin le changement prendu du temps et cest immedia
24	H	problématique dans l'atelier A2 a propos la température
26	D	On ne sait pas s'il faut être rapide ou non, certains ateliers expliquent mieux les choses que d'autres.
27	F	"Qu'on soit pressé par le temps. Je n'étais dans bon conditions de santé pour profiter bien les ateliers."
30	E	La contrainte de temps qui met la pression à la fin
33	A	"1 - les salles n'étaient pas adapte pour ce genre d'experience 2- les tables n'etaient pas muni de tout les element necessaire pour experiente ce genre de Atelier "
37	D	être chronométré. Applications
38	B	".les grandeurs et les calcules "
39	C	"1. Je n'ai pas apprécié la courbe de distance et lux. 2. Je n'ai pas apprécié la prise de vue."
44	I	Des questions pas toujours comprises à la première lecture et des dysfonctionnements (mais peu)
48	C	les calculs, les application sur androïdes qui ont plusieurs informations sur le même écran et donc ne pas savoir quelle donnée utiliser.
50	E	le faite d'être chronométrer pour passer d'une atelier a une autre

ID	Gr	Quelles difficultés avez-vous rencontrées ?
2	B	La seule difficulté rencontrée était liée à l'utilisation de l'application de l'atelier d'Océane qui proposait des calculs pas toujours très claires.
6	A	
8	H	Difficulté dans la démarche à adopter, par où commencer ....
9	F	La différenciation des différentes mesures
12	I	Bien différencier les notions acquises à chaque atelier.
18	E	les calcules de densité et canolda
24	H	lors d'utilisation des applications de calcule j'ai trouvé une difficulté
26	D	Comprendre rapidement certains énoncées, certains n'étaient pas assez explicites aux premiers abords
27	F	Avec mes malaise j'avais dur de regarder la lumière
30	E	Pas le temps de finir, le raisonnement qui me semble correct apparaît toujours à la fin dans la précipitation
33	A	"les difficiles rencontre sont : - Trouve le valeur théorique similaire de nos valeur pratique - je m'en doute le valeur de capteur de tables pour le différents espace pour trouver le valeur de couleur. -calculer le valeur lux"
37	D	comprendre et répondre aux question dans une limite de temps
38	B	c'est de comprendre le linux et le candena

ID	Gr	Quelles difficultés avez-vous rencontrées ?
39	C	La difficulté de la langue française et le lien entre le dispositif et l'application n'est pas très claire.
44	I	Ce mélanger les pinceaux entre les différentes unités
48	C	Les calculs de manières générales,
50	E	il me fallait du temps pour comprendre le but de chaque atelier

ID	Gr	Avez-vous des suggestions d'amélioration ?
2	B	Agrandir la taille des groupes, comparer les résultats avec les autres groupes en fin de TP
6	A	
8	H	réduire le volume d'information dans l'atelier A1 ou faire un ordre de passage précis afin de pouvoir assimiler les connaissance plus facilement
9	F	
12	I	Proposer un bilan à la fin des ateliers pour être sûr d'avoir assimilé les bonnes notions.
18	E	oui, la partie temperature des couleurs le changement des valeurs doit être immediate avec la couleur de la lampe
24	H	ajouter des information à propos les formules de calcule dans les application
26	D	Améliorer l'interactivité de certaines applications (c'est des détails) ou mieux expliquer dans l'énoncé ce qu'il faut faire (luminance)
27	F	Je crois que c'est bon quand même de réviser la théorie auparavant, comme ça on peut profiter plus des ateliers.
30	E	Faire une petite présentation de chaque atelier avant le début des "expérimentations"
33	A	- juste j'aimerais refairel'atelier avec un espace plus adequate
37	D	
38	B	c'est d'expliquer davantage le rôle de l'application pour faciliter son utilisation
39	C	Je pense que le temps prévu n'est pas suffisant pour finir.
44	I	Faire une grilles claire et concise des différentes unités avec leurs définitions
48	C	"2 tablettes pour l'atelier 2, pour pouvoir changer la couleur tout en mesurant l'ampoule avec l'autre tablette. Des schémas de positionnement des feuilles pour l'atelier 3 "
50	E	donner plus de temps pour l'ensemble de l'atelier , ça permet de mieux comprendre

ID	Gr	Que pensez-vous de l'utilisation des objets connectés pour l'apprentissage ?
2	B	C'est une méthode simple et interactive qui permet de se familiariser rapidement avec de nouvelles applications que nous n'aurions jamais pensé à télécharger. Elle pousse ses participants à être autonome et à se débrouiller.

ID	Gr	Que pensez-vous de l'utilisation des objets connectés pour l'apprentissage ?
6	A	C'est plus intuitif et cela donne envie de participer
8	H	Ce sont de bon outils car ils permettent d'illustrer concrètement la théorie
9	F	C'est pédagogique et ludique.
12	I	Ludique, permet de manipuler directement, bon lien entre la pratique/théorie (dans ce cas ce n'était pas juste un "gadget")
18	E	C'est bien, ça pour réduire les dépenses avec un bouton a appuyer on peut déclencher plusieurs activités
24	H	Bien
26	D	Bonne chose, c'est interactif, c'est plus interessant qu'une feuille et un papier ou d'écouter un cours, on découvre par soi même.
27	F	Cet un outil vraiment pédagogique qui peut aider à comprendre mieux des concepts qu'on pense abstrait
30	E	C'est une bonne chose, ça peut rendre certaines choses plus ludiques
33	A	J'avais deja etais dans un atelier pour une maison intelligente mais je pas encore vu ce genre de teste
37	D	oui mais toujours les relier avec des objets physiques
38	B	son utilisation a été bénéfique et m'a permis d'avoir plus clair sur les objets connectés
39	C	Les choses autour de moi ou que j'utilise tous les jours sont des composants de la vie.
44	I	C'est innovant et sors du cadre classique d'apprentissage, cela retient donc notre attention et nous sommes finalement semi-autonomes
48	C	utiles
50	E	les objets connectés ça facilite la vie,en un instant on pourrait apprendre plein de truc intéressants

Annexe D

Extraits des applications développées

D.1 Application *Lumière&Couleurs*

D.1.1 RVBViewController.swift

```
import UIKit

class RVBViewController: UIViewController {

  @IBOutlet weak var slider_R: UISlider!
  @IBOutlet weak var slider_V: UISlider!
  @IBOutlet weak var slider_B: UISlider!
  @IBOutlet weak var control_lightsSelection: UISegmentedControl!
  @IBOutlet weak var label_R: UILabel!
  @IBOutlet weak var label_V: UILabel!
  @IBOutlet weak var label_B: UILabel!

  // Connexion bridge et lampes
  var activityIndicator:ActivityDisplaying? {
    get {
      return self.navigationController as? ActivityDisplaying ?? nil
    }
  }
  var alertHandler:AlertPresenting? {
    get {
      return self.navigationController as? AlertPresenting ?? nil
    }
  }
  var bridgeController:PHBridgeController?
  var lastConnectedBridge:PHBridgeInfo? {
    get {
      if let lastConnectedBridge:PHSKnownBridge = PHSKnownBridge.
   lastConnectedBridge {
        let bridge = PHBridgeInfo(ipAddress: lastConnectedBridge.
```

```
 ipAddress, uniqueId: lastConnectedBridge.uniqueId)
      return bridge
    }
    return nil
  }
}
var selectedLight:Int = 1
var isFirstLoad:Bool = true

override func viewDidLoad() {
  super.viewDidLoad()

  // Do any additional setup after loading the view.
  // Init bridge
  bridgeController = PHBridgeController(bridgeInfo: self.
 lastConnectedBridge,
  activityIndicator: activityIndicator,
  alertHandler: alertHandler,
  pushLinkHandler: nil,
  delegate: self)
}
override func viewDidAppear(_ animated: Bool) {
  super.viewDidAppear(animated)

  if let bridgeController = self.bridgeController {
    if isFirstLoad {
      bridgeController.connect()
    }
    else{
      updateLightData()
    }
    print("APP: lampe=", self.selectedLight)
  }
  else {
    self.discoverBridges()
  }
}

func discoverBridges() {
  // Go to the Bridge selection view..

}

override func didReceiveMemoryWarning() {
  super.didReceiveMemoryWarning()
  // Dispose of any resources that can be recreated.
}

@IBAction func changeLightCouleur_slider(_ sender: Any) {
```

```
    changeLightCouleur()
  }
  func changeLightCouleur() {
    let r:Float = slider_R.value
    let v:Float = slider_V.value
    let b:Float = slider_B.value
    label_R.text = String(Int(r))
    label_V.text = String(Int(v))
    label_B.text = String(Int(b))
    self.createLightColorFromRGB(idLight: self.selectedLight, rouge: r
   , vert: v, bleu: b)
  }

  func updateLightData() {
    if let light = self.getLightAt(index: self.selectedLight) {
      // .. Traitement apres avoir recupere les donnees de la lampe
      let rvb = light.lightState.color.rgb
      label_R.text = String(Int(rvb!.red))
      label_V.text = String(Int(rvb!.green))
      label_B.text = String(Int(rvb!.blue))
      slider_R.value = Float(rvb!.red)
      slider_V.value = Float(rvb!.green)
      slider_B.value = Float(rvb!.blue)
    }
  }
}
private typealias RVBVC_LightsController = RVBViewController
extension RVBVC_LightsController {
  // Fonctions de gestion des lumieres
  func getLightAt(index:Int) -> PHSLightPoint? {
    if let devices:[PHSDevice] = self.bridgeController?.bridge.
   bridgeState.getDevicesOf(.light) as? [PHSDevice] {
      if let light = devices[index] as? PHSLightPoint {
        return light
      }
    }
    return nil
  }
  func createLightColorFromRGB(idLight:Int, rouge:Float, vert:Float,
   bleu:Float) {
    if let lightPoint = self.getLightAt(index: idLight) {
      let rvb = PHSColorRGB(red: Int32(rouge), green: Int32(vert),
   blue: Int32(bleu))
      let couleur:PHSColor = PHSColor(rgb: rvb,
      model: lightPoint.lightInfo.modelId,
      swVersion: lightPoint.lightInfo.swVersion)
      self.updateLightColor(light: lightPoint, couleur: couleur)
    }
  }
```

```
  func updateLightColor(light:PHSLightPoint, couleur:PHSColor) {
    // Nouvel etat de l'ampoule
    let lightState:PHSLightState = light.lightState
    lightState.setXYWith(couleur)
    // Mise a jour de l'etat de l'ampoule
    light.update(lightState, allowedConnectionTypes: .local,
   completionHandler: {(responses, errors, returnCode) in
      // Traitement une fois la mise a jour effectuee

    })
  }
}
private typealias RVBVC_BridgeController = RVBViewController
extension RVBVC_BridgeController : PHBridgeControllerDelegate{
  func connected() {
    print("APP: connected!")
    if let devices:[PHSDevice] = self.bridgeController?.bridge.
   bridgeState.getDevicesOf(.light) as? [PHSDevice]{
      updateLightData()
    }
  }
  func disconnected() {

  }
}
```

D.1.2 TemperatureViewController.swift

```
import UIKit

class TemperatureViewController: UIViewController {

  @IBOutlet weak var label_kelvins: UILabel!
  @IBOutlet weak var slider_kelvins: UISlider!

  // Variables connexion bridge et lampes
  var activityIndicator:ActivityDisplaying? {
    get {
      return self.navigationController as? ActivityDisplaying ?? nil
    }
  }
  var alertHandler:AlertPresenting? {
    get {
      return self.navigationController as? AlertPresenting ?? nil
    }
  }
  var bridgeController:PHBridgeController?
  var lastConnectedBridge:PHBridgeInfo? {
    get {
      if let lastConnectedBridge:PHSKnownBridge = PHSKnownBridge.
```

```
 lastConnectedBridge {
      let bridge = PHBridgeInfo(ipAddress: lastConnectedBridge.
 ipAddress, uniqueId: lastConnectedBridge.uniqueId)
      return bridge
    }
    return nil
  }
}
var selectedLight:Int = 1
var isFirstLoad:Bool = true

override func viewDidLoad() {
  super.viewDidLoad()

  // Do any additional setup after loading the view.
  AppUtility.lockOrientation(.landscape, andRotateTo: .landscapeLeft
 )

  changeSliderKelvins(slider_kelvins)

  // Init bridge
  bridgeController = PHBridgeController(bridgeInfo: self.
 lastConnectedBridge,
  activityIndicator: activityIndicator,
  alertHandler: alertHandler,
  pushLinkHandler: nil,
  delegate: self)
}

override func viewDidAppear(_ animated: Bool) {
  super.viewDidAppear(animated)

  if let bridgeController = self.bridgeController {
    if isFirstLoad {
      bridgeController.connect()
    }
    else{
      updateFromLightData()
    }
    print("APP: lampe=", self.selectedLight)
  }
  else {
    self.discoverBridges()
  }
  isFirstLoad = false
}

override func didReceiveMemoryWarning() {
  super.didReceiveMemoryWarning()
```

```
    // Dispose of any resources that can be recreated.
  }

  func discoverBridges() {
    // Go to the Bridge selection view..

  }

  @IBAction func changeSliderKelvins(_ sender:UISlider) {
    label_kelvins.text = "\\(Int(slider_kelvins.value)) Kelvins"
    self.createLightColorFromTemperature(idLight: self.selectedLight,
   kelvins: Double(slider_kelvins.value))
  }

  func updateFromLightData() {
    if let light = self.getLightAt(index: self.selectedLight) {
      // Mise a jour des infos a partir des donnees des lampes
      let kelvins:Double? = 1e6/light.lightState.ct.doubleValue
      if let k = kelvins {
        label_kelvins.text = "\\(Int(k)) Kelvins"
        slider_kelvins.value = Float(k)
      }
    }
  }

  override func viewWillDisappear(_ animated: Bool) {

    // Unlock screen orientation
    AppUtility.lockOrientation(.all)
  }

}
private typealias TemperatureVC_LightsController =
    TemperatureViewController
extension TemperatureVC_LightsController {
  // Fonctions de gestion des lumieres
  func getLightAt(index:Int) -> PHSLightPoint? {
    if let devices:[PHSDevice] = self.bridgeController?.bridge.
   bridgeState.getDevicesOf(.light) as? [PHSDevice] {
      if let light = devices[index] as? PHSLightPoint {
        return light
      }
    }
    return nil
  }
  func createLightColorFromTemperature(idLight:Int, kelvins:Double) {
    if let lightPoint = self.getLightAt(index: idLight) {
      let mired = Int32(1e6/kelvins)
      let colorTemp:PHSColor = PHSColor(ctMired: mired,
```

```
      brightness: 1.0,
      model: lightPoint.lightInfo.modelId,
      swVersion: lightPoint.lightInfo.swVersion)
      self.updateLightColor(light: lightPoint, couleur: colorTemp)
    }
  }
  func updateLightColor(light:PHSLightPoint, couleur:PHSColor) {
    // Nouvel etat de l'ampoule
    let lightState:PHSLightState = light.lightState
    lightState.setXYWith(couleur)
    // Mise a jour de l'etat de l'ampoule
    light.update(lightState, allowedConnectionTypes: .local,
   completionHandler: {(responses, errors, returnCode) in
      // Traitement une fois la mise a jour effectuee

    })
  }
}
private typealias TemperatureVC_BridgeController =
    TemperatureViewController
extension TemperatureVC_BridgeController : PHBridgeControllerDelegate{
  func connected() {
    print("APP: connected!")
    if let devices:[PHSDevice] = self.bridgeController?.bridge.
   bridgeState.getDevicesOf(.light) as? [PHSDevice]{
      updateFromLightData()
    }
  }
  func disconnected() {

  }
}
```

D.2 Application *ConnaitreMonAmpoule*

D.2.1 index.html

— Nombre total de lignes : 545 ;

— Nombre de lignes dans l'extrait : 256.

```
<!-- ... -->
<div class="row">
<div class="col-md-12" id="snapContainer">
<div class="center">
<h1>Connaitre votre ampoule</h1>
<p>
Photographier les indications sur votre ampoule (ou son emballage)
 puis cliquer sur Analyser pour avoir des explications.
</p>
</div>
```

```
<div class="row" id="infos">
<div class="col-md-12">
<div class="infos" id="lumen">
<h3>Flux lumineux</h3>
<p>
L'unite de mesure Lumen (lm) correspond au flux lumineux d'une
 source de lumiere. Il s'agit de la puissance lumineuse de l'
 ampoule, son rayonnement dans toutes les directions de l'espace.
               </p>
<p>Exemple :</p>
<ul>
<li>Lampe halogene de 70W: 1200 lm</li>
<li>Lampe eclairage urbain de 400W : 28000 lm</li>
</ul>
<div class="figure">
<img src="./img/lumen.png" alt="Le flux lumineux est le rayonnement
 de l'ampoule dans toutes les directions.">
</div>
<p>
Source : <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Flux_lumineux">
 Wikipedia</a>
</p>
</div>
<div class="infos" id="watt">
<h3>Puissance energetique</h3>
<p>
Le watt est l'unite de mesure de la puissance energetique. Elle
 exprime la consommation electrique de l'ampoule. Une ampoule est
 efficace quand elle consomme peu d'electricite, mais garde un flux
  lumineux important.
</p>
<p>
Exemple :
</p>
<ul>
<li>Ampoule a incandescence: 60W pour 800 lm</li>
<li>Ampoule LED: 8.5W pour 806 lm</li>
</ul>
<p>
Source : <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Watt">Wikipedia</a>
</p>
</div>
<div class="infos" id="kelvin">
<h3>Temperature de couleur</h3>
<p>
Les degres Kelvin sont l'unite de mesure de la temperature de
 couleur, cette derniere peut se definir comme la couleur apparente
  d'une source lumineuse. La figure ci-dessous illustre la couleur
```

```
 apparente en fonction de la temperature de couleur.
</p>
<p>Exemple :</p>
<ul>
<li>Lumiere du jour a midi : 6500 K</li>
<li>Lumiere d'un flash electronique : 6000 K</li>
<li>Lampe a incandescence : 2800 a 3200 K</li>
</ul>
<div class="figure">
<img src="./img/kelvin.png" alt="La temperature de couleur varie du
 rouge pour lorsqu'elle est faible au blanc lorsqu'elle est elevee.
 ">
</div>
<p>
Source : <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%
 A9rature_de_couleur">Wikipedia</a>
</p>
</div>
</div>
</div>

<!-- ... -->

<script type="text/javascript">
$(document).ready(function() {
  //$('#control').hide();
  initCam();
  var snapCont = $("#snapContainer");

  var video= document.getElementById('video');
  var canvas= document.getElementById('canvas');
  var context= canvas.getContext('2d');
  //var strr;
  var isPhotoOK = false;
  //var widthVideo = $("#video").width();
  //var heightVideo = $("#video").height();
  var img;
  var isGetUserMedia = false;

  // Coordonnees des cadres verts
  var xy_lumen = [];
  var xy_watt = [];
  var xy_kelvin = [];

  /* ... */

  $('#analyze').click(function(event){
    if (isPhotoOK) {
      // Affichage chargement
```

```
      $("#loading").css("display", "block");
      $("#loading div:first-child").css("display", "block");
      $("#loading div:last-child").css("display", "none");

      var nouvelle_image_b64 = canvas.toDataURL();
      $.ajax({
        method: "POST",
        url: "analyseImage.php",
        data: {imgb64: nouvelle_image_b64}
      }).done(function(msg){
        $("#analyze").css("display", "none");
        $("#loading").css("display", "none");
        $("#bruts").append(msg);
        readResults(msg);
      });
    }
  });

  /* ... */

  canvas.onclick = function(e) {
    var pas = 10;
    var rectCanvas = canvas.getBoundingClientRect();
    var x = e.clientX - rectCanvas.left;
    var y = e.clientY - rectCanvas.top;
    if (xy_lumen.length > 0) {
      if (((x+pas) >= xy_lumen[0] && (x-pas) <= xy_lumen[2]) && ( (y
+pas) >= xy_lumen[1] && (y-pas) <= xy_lumen[3])) {
        $(".infos").hide();
        $("#lumen").show();
        jump("lumen");
      }
    }
    if (xy_watt.length > 0) {
      if (((x+pas) >= xy_watt[0] && (x-pas) <= xy_watt[2]) && ( (y+
pas) >= xy_watt[1] && (y-pas) <= xy_watt[3])) {
        $(".infos").hide();
        $("#watt").show();
        jump("watt");
      }
    }
    if (xy_kelvin.length > 0) {
      if (((x+pas) >= xy_kelvin[0] && (x-pas) <= xy_kelvin[2]) && (
(y+pas) >= xy_kelvin[1] && (y-pas) <= xy_kelvin[3])) {
        $(".infos").hide();
        $("#kelvin").show();
        jump("kelvin");
      }
    }
```

```
}

/* ... */

function readResults(string){
  json = JSON.parse(string);
  console.log(json);

  // Analyse du texte present

  // Cherche le lumen
  var lemmes_lumen = ["lm", "lumen", "tumen", "tume", "umen", "
lume", "imen"];
  var mainTexte = json.results.textes[0].description;
  console.log(mainTexte);
  var lemme_lumen = "";
  for (var i = 0; i < lemmes_lumen.length; i++) {
    if (mainTexte.includes(lemmes_lumen[i])) {
      console.log(lemmes_lumen[i]+" est dans la chaine!");
      lemme_lumen = lemmes_lumen[i];
      break;
    }
  }
  if (lemme_lumen != "") {
    for (var i = 1; i < json.results.textes.length; i++) {
      var texte = json.results.textes[i];
      if (texte.description.includes(lemme_lumen)) {
        drawBox(texte.bounds, "lumen");
        break;
      }
    }
  }
  else {
    console.log("Pas de lumen..");
  }

  // Cherche les Watt
  var lemmes_watt = ["w", "Watt", "watt", "W", "Wat", "Wall", "
Walt"];
  var mainTexte = json.results.textes[0].description;
  var lemme_watt = "";
  var regex = /(([0-9]|[[:blank:]]|\\n(w|W)(att))|watt|Watt)/gm;
  for (var i = 1; i < json.results.textes.length; i++) {
    if(json.results.textes[i].description.search(regex) > -1){
      drawBox(json.results.textes[i].bounds, "watt");
      break;
    }
  }
```

```
    // Cherche les kelvins
    var lemmes_kelvin = ["K", "k", "kelvins", "kelvin", "kel", "kelv
  ", "kalvin"];
    var mainTexte = json.results.textes[0].description;
    var lemme_kelvin = "";
    for (var i = 0; i < lemmes_kelvin.length; i++) {
      if (mainTexte.includes(lemmes_kelvin[i])) {
        console.log(lemmes_kelvin[i]+" est dans la chaine!");
        lemme_kelvin = lemmes_kelvin[i];
        break;
      }
    }
    if (lemme_kelvin != "") {
      for (var i = 1; i < json.results.textes.length; i++) {
        var texte = json.results.textes[i];
        if (texte.description.includes(lemme_kelvin)) {
          drawBox(texte.bounds, "kelvin");
          break;
        }
      }
    }
    else {
      console.log("Pas de kelvin..");
    }
  }
  function drawBox(points, ancre) {
    var pas = 10;
    var x0 = points[0].x-pas;
    var y0 = points[0].y-pas
    var y1 = points[3].y+pas;
    var x1 = points[1].x+pas;
    if (ancre == "lumen" && xy_lumen.length < 1) {
      xy_lumen[0] = x0;
      xy_lumen[1] = y0;
      xy_lumen[2] = x1;
      xy_lumen[3] = y1;
    }
    else if (ancre == "watt" && xy_watt.length < 1) {
      xy_watt[0] = x0;
      xy_watt[1] = y0;
      xy_watt[2] = x1;
      xy_watt[3] = y1;
    }
    else if (ancre == "kelvin" && xy_kelvin.length < 1) {
      xy_kelvin[0] = x0;
      xy_kelvin[1] = y0;
      xy_kelvin[2] = x1;
      xy_kelvin[3] = y1;
    }
```

```
    var width = x1-x0;
    var height = y1-y0;
    context.strokeStyle="#00FF00";
    context.rect(x0, y0, width, height);
    context.stroke();
  }
  function jump(h){

    var url = location.href;                //Save down the URL
 without hash.
    location.href = "#"+h;                  //Go to the target
 element.
    history.replaceState(null,null,url);    //Don't like hashes.
 Changing it back.
  }
});
</script>
</body>
</html>
```

D.2.2 analyseImage.php

```
<?php

namespace Google\Cloud\Samples\Vision;
// ------ GOOGLE CLOUD VISION API : TEXT DETECTION --------
# includes the autoloader for libraries installed with composer
require __DIR__ . '/vendor/autoload.php';

use Google\Cloud\Vision\V1\ImageAnnotatorClient;

$img_test = './img/hue.JPG';

function detect_text($path)
{
  $imageAnnotator = new ImageAnnotatorClient([
  'credentials' => './config/KnowYourLightBulb-ca973fb492c3.json'
  ]);

  # annotate the image
  $image = file_get_contents($path);
  //$image = $path;
  //echo $image;
  $response = $imageAnnotator->textDetection($image);
  $texts = $response->getTextAnnotations();
  $json = "{ \"results\": { \"textes\": [";
      //printf('%d texts found:' . PHP_EOL, count($texts));
      $i = 0;
```

```
        foreach ($texts as $text) {
          if ($i > 0) {
            // code...
            $json .= ",";
          }

          $json .= "{ \"description\":\" ".addcslashes($text->
    getDescription(), "\n"). "\"";
            //print($text->getDescription() . PHP_EOL);

            # get bounds
            $vertices = $text->getBoundingPoly()->getVertices();
            $bounds = [];
            $json .= ", \"bounds\": [ ";
            $j = 0;
            foreach ($vertices as $vertex) {
              if ($j > 0) {
                // code...
                $json .= ",";
              }
              $json .= "{\"x\": ".$vertex->getX();
                $json .= ",\"y\": ".$vertex->getY()."}";
              $j++;
            }

            $json .= "]}";
          $i++;
        }
        $json .= "]}}";
    echo $json;
    $imageAnnotator->close();
}
//detect_text($path)
// ---- Si il y a des variables POST
if (isset($_POST['imgb64'])) {
    //echo $_POST['imgb64'];
    $img = $_POST['imgb64'];
    detect_text($img);
}
?>
```