



HAL
open science

Analyse de la motivation intrinsèque au cours d'une activité de résolution de problèmes.

Lola Denet

► **To cite this version:**

Lola Denet. Analyse de la motivation intrinsèque au cours d'une activité de résolution de problèmes.. [Rapport de recherche] RR-9430, Inria & Labri, Université Bordeaux. 2021, pp.183. hal-03382314v1

HAL Id: hal-03382314

<https://inria.hal.science/hal-03382314v1>

Submitted on 18 Oct 2021 (v1), last revised 28 Oct 2021 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Analyse de la motivation intrinsèque au cours d'une activité de résolution de problèmes.

Lola Denet

**RESEARCH
REPORT**

N° 9430

Octobre 2021

Project-Team Mnemosyne



Analyse de la motivation intrinsèque au cours d'une activité de résolution de problèmes.

Lola Denet

Équipe-Projet Mnemosyne

Rapport de recherche n° 9430 — Octobre 2021 — 183 pages

Résumé : On cherche ici à aider des chercheuses et chercheurs en sciences du numérique (informatique et mathématiques appliquées), des neurosciences cognitives et des sciences de l'éducation à s'allier pour tenter de mieux comprendre, dans un cadre précis, comment les personnes apprenantes apprennent, dans le cas d'une tâche de résolution de problème en lien avec l'apprentissage de la pensée informatique.

Plus précisément, on explore ici les recherches menées sur la motivation intrinsèque de l'apprenant au cours de l'apprentissage afin de comprendre dans quelle mesure elle y est impliquée, au sein de l'équipe flowers, que nous résumons ici de manière accessible pour les collègues des différentes disciplines, en allant jusqu'au détails techniques de la modélisation.

Ces recherches ont soulevé une problématique nécessitant de définir plus précisément les concepts indispensables à la compréhension des mécanismes impliqués dans l'apprentissage, tout particulièrement du fait de leur usage pluridisciplinaire, et souvent polysémique.

Une revue de la littérature a pour alors but d'explorer les recherches menées sur la motivation intrinsèque de l'apprenant au cours de l'apprentissage afin de comprendre dans quelle mesure elle y est impliquée. Cela permettra de contribuer à l'amélioration du modèle de l'apprenant et ainsi de s'approcher davantage de la compréhension des mécanismes de l'apprentissage humain.

Réalisée dans le cadre d'un stage de recherche en bioinformatique, elle n'est ni exhaustive, ni généraliste, mais spécifique aux domaines traités. Elle représente cependant une production unique en matière de revue de la littérature francophone sur ces sujets.

Mots-clés : cognition, modélisation de l'apprenant, motivation intrinsèque, résolution de problèmes, ontologie

**RESEARCH CENTRE
BORDEAUX – SUD-OUEST**

200 avenue de la Vieille Tour
33405 Talence Cedex

Analysis of intrinsic motivation during a problem-solving activity.

Abstract: Our aim is to help researchers in digital sciences (computer science and applied mathematics), cognitive neurosciences and educational sciences to join their forces to better understand, in a specific framework, how learners learn, in the case of a problem-solving task related to computational thinking learning.

More precisely, we explore the research carried out on the intrinsic motivation of the learner, during a learning task, in order to understand to what extent it is involved in such process, mainly reporting the flowers research team work, summarized here, in an accessible way for colleagues from these different disciplines, including going to the technical details of modeling.

This research raises an issue, requiring a more precise definition of the concepts essential to understanding the mechanisms involved in learning, especially because of their multidisciplinary, and often polysemous, use.

The aim of a review of the literature is thus to explore the research carried out on the intrinsic motivation of the learner during learning in order to understand to what extent it is involved in it. This will help to improve the learner model and getting closer to understanding the mechanisms of human learning.

Carried out as part of a research internship in bioinformatics, it is neither exhaustive nor generalist, but specific to the fields covered. However, it represents a unique production in terms of reviewing the French-speaking literature on these subjects.

Key-words: Cognition, Learner modeling, Intrinsic motivation, Problem solving, Ontologies

Remerciements

Je tiens à remercier Thierry VIÉVILLE, Chloé MERCIER, Didier ROY, Frédéric ALEXANDRE et Margarida ROMERO pour leur accompagnement, leur expertise et leur soutien tout au long de ce stage et pour m'avoir permis de contribuer à l'action exploratoire AIDE.

Je remercie également Benjamin CLÉMENT et Hélène SAUZÉON pour leurs interventions riches d'apprentissage concernant les travaux de l'équipe FLOWERS.

Table des matières

Introduction	1
1 Contextualisation et problématique	2
1.1 Apprendre : un objet d'étude multidisciplinaire	2
1.1.1 Les neurosciences	3
1.1.2 Les sciences de l'éducation	3
1.1.3 La neuroéducation	4
1.2 Apprendre : un processus complexe	5
1.2.1 Des concepts généraux	5
1.2.2 Des concepts spécifiques	6
1.3 Problématique	7
2 Matériel et méthode	8
2.1 Réalisation de la revue de la littérature	9
2.2 Conception de l'ontologie	10
3 Résultats	12
Discussion et conclusion	22
Références	24
Appendices	I
A Discussion autour du modèle allostérique de l'apprendre dans le paradigme des théories du changement conceptuel	I
B Revue de la littérature	II

Table des figures

1	Hierarchie des classes	13
2	Visualisation de la hierarchie de la classe Motivation	14
3	Vue Protégé des usages de la classe Motivation	15
4	Hierarchie des propriétés	17
5	Relations entre apprentissage et curiosité	18
6	Vue Protégé de l'usage des propriétés	19
7	Graphe issu d'une partie de l'ontologie de l'apprenant	20
8	Théorie de l'autodétermination de Edward DECI et Richard RYAN	21

Introduction

Ce rapport de stage s'intègre dans le travail mené au sein de l'action exploratoire AIDE (*Artificial Intelligence Devoted to Education*)¹. L'équipe à l'origine de ce travail² permet à des chercheuses et chercheurs en sciences du numérique (informatique et mathématiques appliquées), des neurosciences cognitives et des sciences de l'éducation de s'allier au sein de cette action exploratoire pour tenter de mieux comprendre, dans un cadre précis, comment les personnes apprenantes apprennent, dans le cas d'une tâche de résolution de problème en lien avec l'apprentissage de la pensée informatique.

Pour ce faire, une tâche de résolution de problème (CreaCube)³ est proposée aux apprenants afin de recueillir des données observables concernant la tâche elle-même, le médium⁴ qui sert de support d'apprentissage dans la tâche, mais aussi le comportement de la personne apprenante au cours de la résolution du problème posé. Les informations recueillies sont alors formalisées de manière symbolique grâce au développement d'une ontologie. Lisa ROUX et ses collaborateurs [Roux *et al.*, 2020] ont élaboré une ébauche de cette ontologie afin de proposer une modélisation de la personne apprenante qui prend en compte les stimuli reçus, la découverte d'affordances⁵, la pose d'hypothèses et les connaissances contextuelles. Dans le rapport de recherche de Lisa ROUX [Roux *et al.*, 2020], puis le travail de Chloé MERCIER [Mercier *et al.*, 2021b] actuellement en cours, les concepts de croyances, d'exploration et d'exploitation, mais aussi les différents types de mémoires impliquées dans cette tâche d'apprentissage humain ont été définis. Les notions de buts et d'engagement y sont également abordées.

Par ailleurs, l'équipe FLOWERS (*FLOWing Epigenetic Robots and Systems*)⁶ travaille sur des algorithmes d'intelligence artificielle dont le but est de proposer, en collaboration avec des équipes éducatives, des tâches d'apprentissage adaptées au niveau de l'apprenant afin de favoriser son engagement et ainsi améliorer sa progression, ceci tant au niveau de l'apprentissage humain que de l'apprentissage machine bio-inspiré. Au centre de leur approche est la notion de **motivation intrinsèque**.

Les travaux menés par l'équipe FLOWERS sur les implications de la motivation intrinsèque dans l'apprentissage humain offrent une nouvelle dimension à intégrer à la modélisation de l'apprenant initiée par l'action exploratoire AIDE. Ce travail commun pourrait permettre de mieux comprendre le fonctionnement de l'apprentissage humain, avec comme finalité de limiter les inégalités éducatives tout en favorisant l'implication de la personne apprenante dans son éducation.

1. <https://www.inria.fr/fr/aide-nouvelle-action-exploratoire-chez-inria>

2. <https://team.inria.fr/memosyne/en/aide/>

3. <https://creamaker.wordpress.com>

4. Dans le cadre des activités éducatives en psychologie et psychiatrie, un médium (média au pluriel) est ce qui caractérise l'objet manipulable à l'origine de l'apprentissage. Par exemple, la pâte à modeler, la peinture, les cubes sont des média.

5. Les affordances représentent les utilisations potentielles et intuitives d'un objet.

6. <https://flowers.inria.fr>

Le travail décrit dans ce rapport est réalisé dans le cadre d'un stage de recherche en bioinformatique ayant pour but de s'approcher davantage de la compréhension des mécanismes de l'apprentissage humain. Pour cela il s'est avéré nécessaire d'explorer les recherches menées sur la motivation intrinsèque de l'apprenant au cours de l'apprentissage afin de comprendre dans quelle mesure elle y est impliquée. Ces recherches ont soulevé une problématique nécessitant de définir plus précisément les concepts indispensables à la compréhension des mécanismes impliqués dans l'apprentissage, tout particulièrement du fait de leur usage pluridisciplinaire, et souvent polysémique.

Une étape de contextualisation est alors à effectuer ici afin de caractériser précisément la problématique rencontrée. Les outils et méthodes employés pour y répondre seront aussi explicités avant d'aboutir à la présentation des résultats obtenus au cours du stage.

1 Contextualisation et problématique

Comment apprend-on ? C'est l'une des questions auxquelles l'action exploratoire AIDE tente de répondre, dans un paradigme spécifique. Mais qu'est-ce que l'apprentissage ? En quoi étudier le fonctionnement du cerveau peut-il avoir un impact sur l'éducation ? Et le numérique ? Dans quelle mesure intervient-il dans le domaine des neurosciences et est-il au cœur des sciences de l'éducation ?

À ce stade, un éclairage contextuel et conceptuel s'avère nécessaire, pour introduire le travail réalisé.

1.1 Apprendre : un objet d'étude multidisciplinaire

Il est complexe de définir ce qu'est "apprendre" car ce processus peut être analysé selon différentes perspectives tant épistémologiques que méthodologiques. En effet, Sylvain CONNAC rappelle que l'acte d'apprendre est "*complexe, dans le sens d'un tissage entre activités intellectuelles différentes et dans celui de savoirs issus de diverses disciplines*", et il aurait pu ajouter, des savoir-faire et savoir-être. Au niveau neurobiologique, il rappelle que l'acte d'apprendre "*s'exprime par l'intermédiaire de près de 100 milliards de neurones, chaque neurone étant potentiellement en liaison synaptique avec 10 000 autres, voisins ou éloignés dans le cerveau*" [Connac, 2018].

Avec l'émergence, déjà ancienne, de ce qui est nommé intelligence artificielle⁷, la notion d'apprentissage s'enrichit d'un nouveau sens : la capacité pour un algorithme d'adapter ses paramètres

7. "L'intelligence artificielle (IA, ou AI en anglais pour Artificial Intelligence) consiste à mettre en œuvre un certain nombre de techniques visant à permettre aux machines d'imiter une forme d'intelligence biologique. L'IA se retrouve implémentée dans un nombre grandissant de domaines d'application. La notion voit le jour dans les années 1950 grâce au mathématicien Alan Turing" en ligne : <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-intelligence-artificielle-555/>

à partir de données pour automatiquement fournir un calcul avec les propriétés escomptées [Rougier, 2015]. L'établissement plus récent de liens entre intelligence artificielle et éducation [Viéville et Guitton, 2020], tant au niveau de l'apprentissage avec le numérique, que de l'apprentissage au numérique [Gérard *et al.*, 2020], a permis de faire émerger l'idée d'utiliser les formalismes de l'intelligence artificielle pour mieux modéliser le comportement humain [Romero *et al.*, 2020].

La collaboration entre les différents domaines de recherche à l'origine de ce travail est alors essentielle pour tenter de comprendre ce processus complexe. Ces différentes disciplines se rejoignent en un intérêt commun qui est de comprendre les mécanismes cognitifs de l'acte d'apprendre et ainsi permettre aux professionnels de l'éducation de mieux comprendre cet acte d'apprendre, avec la finalité d'améliorer l'efficacité des tâches proposées aux apprenants dans le but de favoriser leur apprentissage.

1.1.1 Les neurosciences

En 2018, Jean FRAYSSINHES et Florent PASQUIER [Frayssinhes et Pasquier, 2018] définissent les neurosciences comme l'ensemble des disciplines en lien avec l'étude du cerveau et ils identifient celles qui jouent un rôle important pour la recherche dans le domaine l'éducation. Ils citent les neurosciences cognitives, les neurosciences computationnelles, la neuropédagogie ainsi que les neurosciences affectives et sociales. Tandis que les neurosciences cognitives tentent de lier système nerveux (mécanismes cérébraux) et cognition, la neuropédagogie permet de comprendre la construction de l'intelligence dans le cerveau ainsi que les effets des apprentissages fondamentaux. Quant aux neurosciences affectives et sociales, elles étudient le rôle des émotions et l'importance de l'aspect social dans l'apprentissage.

Enfin, les neurosciences computationnelles cherchent à élaborer des modèles chargés de simuler le fonctionnement du cerveau. Dans le contexte de recherche où se situent ce stage, l'hypothèse de travail est que cette dernière discipline (en association avec les autres) puisse permettre de modéliser l'apprenant lors d'une tâche d'apprentissage et par conséquent de comprendre les neuro-mécanismes impliqués dans l'apprentissage.

1.1.2 Les sciences de l'éducation

Philippe MEIRIEU⁸ se base sur l'histoire des sciences de l'éducation pour identifier les disciplines qu'elles couvrent⁹. Il rappelle que les sciences de l'éducation sont nées entre 1967 et 1970 dans le but de réunir ces disciplines. Avant la création des sciences de l'éducation, il s'agissait de la pédagogie qui se concentre davantage sur l'aspect concret, pratique de l'éducation, de manière transversale aux disciplines. Puis, l'éducation se basait sur le développement du point de vue de la psychologie. Aujourd'hui, les sciences de l'éducation permettent de travailler conjointement sur la question du "comment apprendre". La psychologie, la sociologie, l'anthropologie, la linguistique,

8. <https://www.meirieu.com/BIOGRAPHIE/biographie.htm>

9. <https://www.meirieu.com/COURS/pedaetscienceseduc.pdf>

l'économie ou encore l'histoire et la philosophie sont impliquées dans les sciences de l'éducation car elles participent à l'étude des apprentissages. Cela rejoint ce que Louis MARMOZ de l'Université de Caen écrit dans une note de synthèse pour la revue française de pédagogie éditée par l'Institut Français de l'éducation¹⁰. Les sciences de l'éducation constituent alors un domaine de recherche pluridisciplinaire concernant *"les réalités éducatives"*.

Les collègues en sciences de l'éducation collaborant au sein de l'action exploratoire AIDE, proposent donc d'aller plus loin, avec l'idée de "sciences computationnelles de l'éducation" [Romero *et al.*, 2020] qui vise donc à combiner d'une part des modélisations développées en neurosciences computationnelles et en intelligence artificielle bio-inspirée et d'autre part la modélisation en sciences de l'éducation de la personne apprenante et la situation d'apprentissage dans une tâche bien définie.

1.1.3 La neuroéducation

Les neurosciences cognitives et les sciences de l'éducation se rejoignent aussi avec des travaux en neuroéducation relatifs aux problématiques éducatives. L'objectif est de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau lors de l'apprentissage et de déterminer de meilleures méthodes éducatives. D'autre part, la neuroéducation permet de dépasser les *"mythes en éducation, reconnus comme des fausses croyances, des affirmations sans fondement empirique"* [Connac, 2018].

Les domaines de recherche explicités prennent alors tout leur sens dans l'établissement d'un modèle de l'apprenant, au sein d'une tâche spécifique. En effet, il faut comprendre ce qui constitue un apprenant dans sa globalité et sa complexité pour tenter de comprendre comment fonctionne le processus d'apprentissage, dans un cas précis.

C'est en ces sens que les équipes de Mnemosyne et FLOWERS s'associent au sein de l'action exploratoire AIDE. Les chercheuses et chercheurs de Mnemosyne travaillent à la fois dans le domaine des neurosciences pour comprendre davantage le fonctionnement du cerveau et à la fois dans le domaine des sciences du numérique afin d'améliorer les algorithmes d'intelligence artificielle en se basant sur le fonctionnement humain.

L'équipe de recherche de FLOWERS crée des algorithmes d'intelligence artificielle dans le contexte des sciences de l'éducation. Cela dans le but de favoriser l'apprentissage en adaptant le niveau de difficulté à chaque apprenant par l'utilisation de ces algorithmes lors de tâches dédiées et définies en collaboration avec les enseignants.

L'association de ces équipes et de leurs travaux pourrait permettre d'aboutir à un modèle au plus proche de la réalité et ainsi de mieux comprendre le fonctionnement de l'apprentissage pour tenter d'en améliorer les méthodes.

10. http://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/revue-francaise-de-pedagogie/INRP_R_F043_5.pdf

1.2 Apprendre : un processus complexe

Sylvain CONNAC cite cette définition pour l'acte d'apprendre : "*Apprendre, c'est tout à la fois saisir par l'esprit, acquérir des connaissances, intégrer des données nouvelles à une structure existante, construire par transformation de nouvelles représentations et de nouvelles connaissances, et modifier un comportement*" [Connac, 2018].

1.2.1 Des concepts généraux

La cognition et l'apprentissage constituent le socle conceptuel du travail mené ici. Les définir n'est pas chose aisée car ils ont une multitude de caractéristiques pouvant varier selon le domaine disciplinaire qui les utilise. Seuls des aspects généraux seront abordés ici.

La cognition

Les mots "cognition" ou "processus cognitifs" viennent du latin *cognitio* qui signifie connaissance ou action d'apprendre [Lieury, 2017]. La cognition regroupe des grandes fonctions mentales comme la perception, la mémoire, le langage, le raisonnement, les fonctions exécutives, la motricité etc. Elle intervient aussi au niveau des apprentissages et des émotions [Connac, 2018].

La cognition faisant référence au concept de "connaissance", elle provoque le questionnement suivant : qu'est-ce que la connaissance ? Dans un premier temps, cette question peut paraître inutile car ce terme est employé couramment et certainement que chacun et chacune pense savoir ce qu'est la connaissance ou du moins ce que ce mot veut dire. Cependant, définir, donner un sens univoque au concept de connaissance est plus difficile qu'il n'y paraît car selon le point de vue, la discipline ou encore les croyances, la connaissance est polysémique. Lorsque le sujet de recherche est de comprendre comment un apprenant apprend et qu'il est abordé par différents domaines de recherche comme c'est le cas ici, y compris en lien avec l'apprentissage machine, il paraît pourtant essentiel de trouver une définition univoque pour ce concept afin d'établir un socle commun sur lequel se baser et éviter les contresens.

Comprendre comment un apprenant apprend nécessite donc, tout d'abord, de comprendre ce qu'est "apprendre" et ce qui est impliqué dans ce processus. La cognition et la connaissance sont les premiers concepts qu'il paraît essentiel de définir. Cependant, ces derniers font eux-mêmes appel à de nombreuses notions complexes et nécessaires pour réaliser un modèle de l'apprenant. Or, il est difficile de trouver, dans la littérature, des définitions univoques et totalement adaptées au cadre de la recherche menée dans l'action exploratoire AIDE sur l'apprentissage.

L'apprentissage

Jean FRAYSSINHES et Florent PASQUIER qualifient l'apprentissage comme une "*réaction cérébrale due à un stimulus, une nouveauté*" [Frayssinhes et Pasquier, 2018]. Ils précisent également que le cerveau "*doit être en interaction, [...] éveillé, motivé, concentré*" et qu'il "*suscite des émotions qui sont liées à la mémoire*" [Frayssinhes et Pasquier, 2018].

Alain LIEURY définit l'apprentissage comme "*la modification systématique du comportement en fonction de l'exercice*" [Lieury, 2017]. Il existe divers niveaux d'apprentissage qui seraient liés à "*la complexité du système nerveux, en particulier du cerveau*" [Lieury, 2017].

L'élaboration d'un modèle ontologique de l'apprentissage nécessite une définition conceptuelle précise pour être pertinent et cela au delà des concepts généraux. En effet, d'autres concepts plus spécifiques du contexte d'application de la recherche menée ont aussi toute leur importance et nécessitent également d'être précisés.

1.2.2 Des concepts spécifiques

Le contexte d'application de l'action exploratoire AIDE est d'étudier l'apprentissage au cours d'une tâche de résolution de problème. Cela ajoute un nouveau domaine à explorer.

D'autre part, les recherches menées par l'équipe FLOWERS pointent l'efficacité du numérique pour favoriser l'apprentissage mais aussi, et surtout, la place centrale de la motivation intrinsèque dans cela.

La résolution de problème

Selon Patrick LEMAIRE "*un problème est une situation dans laquelle une personne cherche à atteindre un but et ne dispose pas nécessairement en mémoire de la procédure pour y parvenir*" [Lemaire et Didierjean, 2018]. Ce type de situation peut être de nature intellectuelle (par exemple, des problèmes à résoudre dans le cadre scolaire) ou quotidienne, collective ou personnelle (par exemple, trouver une voiture ou bien résoudre un conflit entre soi et une autre personne).

Les tâches de résolution de problème ont été étudiées de diverses manières et il a été montré qu'elles ont un impact important sur la motivation de l'apprenant et a fortiori sur les progrès d'apprentissage.

La motivation

Fabien FENOUILLET a étudié en détail différentes théories de la motivation afin d'établir des définitions précises. Il commence par donner une définition simplifiée basée sur l'impact comportemental : "*la motivation est ce qui explique le dynamisme du comportement*" [Fenouillet, 2016]. Par cette définition, il revient au sens étymologique du mot motivation¹¹ selon lequel la motivation permettrait d'expliquer, de justifier, de soutenir et de faire persister un comportement, une action, un mouvement.

En confrontant plusieurs théories et définitions à cette définition simplifiée, l'auteur aboutit à une définition générale qui prend en compte l'individualité de la motivation : "*la motivation désigne une hypothétique force intra-individuelle protéiforme*¹², qui peut avoir des déterminants

11. Du latin *moveo* signifiant mouvoir, bouger.

12. Qui peut prendre diverses formes.

internes et/ou externes multiples, et qui permet d'expliquer la direction, le déclenchement, la persistance et l'intensité du comportement ou de l'action" [Fenouillet, 2016].

Enfin, l'auteur explique que même si les effets produits par la motivation permettent de la caractériser en partie, ils ne permettent pas d'en définir la nature. *"C'est un problème d'autant plus complexe que de nombreuses théories motivationnelles s'appuient sur des conceptualisations en termes de but, d'intérêt, d'envie, de besoin ou de curiosité pour parler de motivation"* [Fenouillet, 2016]. Il semble alors difficile d'établir une définition globale de la motivation qui permettrait d'expliquer sa nature sans être spécifique à une conception en particulier. L'auteur se propose alors de donner une définition théorique qui serait basée sur des catégories les plus générales possibles. Il cite notamment l'exemple de la théorie de l'autodétermination qui catégorise la motivation comme étant soit intrinsèque, soit extrinsèque. *"La motivation suppose non seulement qu'il y ait un motif au comportement de l'individu mais aussi que ce dernier soit en mesure d'anticiper les effets de ce comportement s'il se décide à agir"* [Fenouillet, 2016].

L'ensemble des notions balayées brièvement nécessitent d'être revisitées avec un éclairage pluridisciplinaire afin de fournir la matière à une formalisation plus poussée. Par ailleurs, alors que la littérature anglophone est bien fournie sur ces sujets, y compris de manière transdisciplinaire (ce sera mentionné au cours des développements), il n'y a pas, au niveau francophone, de revue de la littérature suffisamment approfondie pour avoir la matière en question. Or, ce besoin d'un travail francophone est double : d'une part, la cible finale sont les professionnels de l'éducation, évidemment francophones au niveau de leurs pratiques; d'autre part, la terminologie n'est pas isomorphique au niveau de ces concepts avec les termes en langue anglaise. Il est donc important d'avoir préalablement à un travail de formalisation, une large et profonde analyse de toutes les notions scientifiques à utiliser. C'est ce travail préliminaire qui a été réalisé.

1.3 Problématique

L'approche choisie est celle d'une modélisation symbolique sous forme de représentation formelle des connaissances avec un modèle informatique, ici des ontologies. Les définitions générales doivent être d'abord posées à un niveau phénoménologique pour s'entendre sur les termes et dresser le périmètre des éléments d'intérêt. Ces définitions générales ne permettent évidemment pas en elles-mêmes de modéliser précisément l'apprenant sous forme ontologique. Comme évoqué précédemment, une ontologie nécessite de définir des concepts de manière suffisamment précise afin de les mettre en relation.

Qu'est-ce qu'une ontologie ?

Xavier AIMÉ définit une ontologie comme *"un modèle formel à visée computationnelle regroupant une hiérarchie de concepts et une hiérarchie de relations"* [Aimé et Arnould, 2021]. Grâce à une ontologie il est possible pour un algorithme d'inférer à partir de la description d'un environnement donné dans le but de *"générer des connaissances implicites à partir de connaissances explicites"* [Aimé et Arnould, 2021]. Les concepts définis sont liés par des relations et chacun est

décrit grâce à des propriétés fonctionnelles et descriptives. Jacques CHAUMIER explique qu'une ontologie "*fournit le vocabulaire spécifique à un domaine de la connaissance et, selon un degré de formalisation variable, fixe le sens des concepts et des relations qui les unissent*" [Chaumier, 2007].

Xavier AIMÉ cite GUARINO, OBERLE & STAAB (2009) qui distinguent trois notions qualifiant une ontologie :

- La première est la **conceptualisation**. Les auteurs expliquent qu'il s'agit en fait d'un "*un résumé, une vision simplifiée du monde que nous souhaitons représenter dans un but donné (en référence aux travaux de Genesereth & Nilsson 1987)*" [Aimé et Arnould, 2021]. Xavier AIMÉ rapporte que "*cette vision simplifiée du monde [se définit] comme un ensemble totalement ordonné d'états du monde, correspondant à l'évolution du système dans le temps*" [Aimé et Arnould, 2021].
- La seconde est **une entité formelle, une spécification explicite** qui utilise un des langages de descriptions. "*La signification des concepts modélisés y est décrite grâce aux relations que chaque concept possède avec les autres concepts du domaine représenté*" [Aimé et Arnould, 2021].
- La troisième est une **conceptualisation partagée** exprimant un consensus "*sur la représentation qu'un ou plusieurs individus se font de leur monde*" [Aimé et Arnould, 2021]

Ji HAN donne une définition allant dans le même sens que les auteurs précédemment cités¹³.

C'est en ce sens que le besoin de réaliser une revue de la littérature, étoffée et mise en lien avec le sujet de recherche, a été identifié. Ce travail a été réalisé dans le cadre de ce stage et constitue l'état de l'art sur lequel est basé la mise en oeuvre de *la modélisation de la motivation intrinsèque lors d'une tâche de résolution de problème*. Cette revue de la littérature a été annexée à ce rapport par souci de lisibilité (voir l'annexe B).

2 Matériel et méthode

Ce stage a donc tout d'abord consisté à l'identification des principaux processus impliqués dans l'apprentissage humain dans le but de définir les concepts essentiels. Tout au long de la définition de ces concepts, leur implication dans l'apprentissage humain au cours d'une tâche de résolution

13. "*An ontology is defined as an explicit formal specification of a shared conceptualization (Gruber, 1993). It can be constructed around an individual taxonomy or several taxonomies and their relationships (Gilchrist, 2003). The aim of ontologies is to capture consensual data, knowledge, and information in a formal approach for reusing and sharing among different people and applications (Štorga et al., 2010). Ontologies have been widely applied in various areas, such as knowledge and information management, semantic webs, and natural language processing. Ontologies are often used to support design activities, for example, design knowledge representation (Gero and Kannengiesser, 2007, 2014; Cross and Bathija, 2009), design activity description (Sim and Duffy, 2003), functional knowledge systematization (Kitamura and Mizoguchi, 2004), product family development (Nanda et al., 2005), and design information extraction and retrieval (Li and Ramani, 2007). There is a potential for enhancing design, especially design creativity, by combining the aspects of analogy and ontology*" [Han et al., 2018]

de problème (CreaCube) a été identifiée et analysée. Ce travail de recherche préliminaire a conduit à la modélisation de l'apprenant sous forme d'une ontologie.

2.1 Réalisation de la revue de la littérature

Le sujet de ce stage portait donc sur l'analyse de la motivation intrinsèque au cours d'une activité de résolution de problème avec comme aboutissement de compléter l'ontologie réalisée par Lisa ROUX et Chloé MERCIER en intégrant les concepts en lien avec la motivation intrinsèque. À cette fin, il fallait reprendre précisément les notions de cognition, ses processus impliqués dans l'apprentissage qui ont servi de point de départ à cette recherche. Ensuite, les théories de l'apprentissage et la résolution de problème ont été traitées. La motivation s'est retrouvée de manière assez transversale dans les différentes étapes de l'apprentissage et plus largement dans les processus cognitifs. Elle a tout d'abord été définie de manière générale puis abordée en détail en se basant sur les recherches menées par l'équipe FLOWERS concernant plus spécifiquement la motivation intrinsèque. Une fois les recherches conceptuelles terminées, les algorithmes créés par l'équipe FLOWERS ont été étudiés. Ils consistent à proposer à l'apprenant la séquence d'activités la plus pertinente pour produire le maximum de progrès d'apprentissage en se basant sur le maintien de la motivation intrinsèque chez celui-ci.

La recherche conceptuelle a été menée de différentes manières. Tout d'abord, il s'agissait de lire les publications écrites dans le cadre de l'action exploratoire AIDE ainsi que celles de l'équipe FLOWERS.

Ensuite, afin de définir les concepts identifiés dans le cadre de l'apprentissage humain, des moteurs de recherches ont été utilisés comme Google¹⁴ et Google Scholar¹⁵. Les publications scientifiques récentes et libres d'accès ont été privilégiées. Le portail `cairn.info`¹⁶, spécialisé dans la mise en ligne d'ouvrages et de revues des sciences humaines et sociales a été grandement utilisé. Cela a été rendu possible par l'authentification institutionnelle (université de Bordeaux) qui permet un accès libre aux publications. De même, le portail Babord+¹⁷ a favorisé l'accès libre à des ressources variées. Par ailleurs, beaucoup d'ouvrages provenant de bibliothèques universitaires ou de centres de ressources documentaires spécialisés dans les domaines étudiés¹⁸, ont été utilisés.

Une fois les ressources identifiées comme pertinentes, elles ont fait l'objet de plusieurs lectures et ont été annotées selon un code couleur pour faciliter la recherche d'information. Un logiciel de gestion de référence (Zotero¹⁹) a été utilisé pour gérer et partager les données bibliographiques.

14. <https://www.google.fr>

15. <https://scholar.google.com>

16. <https://www.cairn.info>

17. <http://babordplus.u-bordeaux.fr>

18. Des ouvrages en sciences de l'éducation, en psychologie ou encore en neurosciences ont notamment été empruntés auprès du Centre de Ressources Documentaires (CRD) de l'Institut National Supérieur du Professorat et de l'Éducation (INSPÉ) de l'Académie de Bordeaux.

19. <https://www.zotero.org>

Par ailleurs, les recherches bibliographiques ont parfois abouti à trouver des documents hors du propos de la revue de la littérature mais ayant un intérêt scientifique pour le sujet d'étude de l'action exploratoire AIDE. Ces ressources ont alors été partagées avec les membres de l'équipe afin de les porter à leur connaissance et d'échanger des points de vue, des explications permettant d'enrichir la culture professionnelle. Une partie d'un échange a été retranscrit dans l'annexe A.

Pour ce qui est du formalisme de la revue de la littérature, le langage LaTeX a été utilisé pour la rédaction par le biais de l'éditeur en ligne Overleaf²⁰. Au fur et à mesure de l'avancement des recherches et de la rédaction, les différents professionnels de l'équipe ont participé à la relecture et proposer des corrections ou des précisions lorsque c'était nécessaire. Par ailleurs, pour favoriser la recherche des différents concepts clés dans la revue de la littérature, un index a été enrichi au fur et à mesure, de même qu'une table des figures.

Chaque exploration conceptuelle a été illustrée par des schémas et s'est conclue par la mise en lien des aspects théoriques avec l'aspect expérimental de la tâche CreaCube.

Une fois ces recherches terminées, les publications de l'équipe FLOWERS ont été relues et les algorithmes (RiARiT et ZPDES) ont pu être étudiés. Il s'agissait de comprendre et d'interpréter des équations mathématiques et des algorithmes en pseudocode. Cela a été retranscrit en langage humain dans la revue (annexe B) et illustré avec des schémas. Des échanges avec les auteurs des publications et avec les membres de l'équipe ont permis de valider et/ou de compléter le propos.

2.2 Conception de l'ontologie

Outre le travail de recherche présenté précédemment, l'élaboration d'une ontologie ne faisant pas partie des enseignements dispensés en master de bioinformatique, il a été nécessaire d'acquies des pré-requis. Pour ce faire, trois formations à distance ont été effectuées en début de stage : MOOC (*Massive Open Online Course*). Le premier a été réalisé par l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique) disponible sur la plateforme de formation en ligne fun-mooc²¹ et a pour titre : Intelligence Artificielle avec Intelligence (IAI)²². Il permet d'acquies les fondements de l'intelligence artificielle et de différencier mythe et réalité la concernant. Ensuite, la formation en ligne *Elements Of AI*²³ avait pour but d'approfondir et d'expérimenter des algorithmes d'intelligence artificielle. Enfin, sur la plateforme fun-mooc, la formation "Web sémantique et web de données"²⁴ constituait un support essentiel à la réalisation d'une ontologie. Elle comprend des informations historiques, des cours sur le formalisme sémantique avec différents langages (modèle RDF, langage de requête SPARQL, ontologies et schémas RDFS, formalisation

20. <https://www.overleaf.com>

21. <https://www.fun-mooc.fr/fr/>

22. <https://lms.fun-mooc.fr/courses/course-v1:inria+41021+session01/info>

23. <https://www.elementsofai.fr>

24. <https://lms.fun-mooc.fr/courses/course-v1:inria+41002+self-paced/courseware/cb6cfaf407cc47ef949b78bbffe2ee9b/>

en OWL, etc.). Des sessions de mise en pratique et d'utilisation d'outils ont aussi été effectuées. Chacune de ces formations ont abouti à l'obtention de certificats de réussite.

D'autre part, Chloé MERCIER²⁵ a poursuivi cet enseignement lors de séances de formation à l'utilisation du logiciel Protégé²⁶ permettant de créer des ontologies et de les visualiser sous forme de graphes. Il est gratuit et libre d'accès.

D'autres outils comme un éditeur de code (Visual Studio Code²⁷) et un gestionnaire de version (GitLab²⁸) ont été utilisés pour éditer l'ontologie et collaborer à son développement en OWL (*Web Ontology Language*). OWL est un langage utilisé pour la représentation de connaissances basé sur le formalisme RDF (*Resource Description Framework*). Ce dernier est un modèle de graphe permettant la description de ressources web.

Initialement, il était prévu d'ajouter les concepts identifiés à l'ontologie élaborée par Lisa ROUX²⁹ [Roux *et al.*, 2020] et Chloé MERCIER [Mercier *et al.*, 2021a] [Mercier *et al.*, 2021b]. Cette ontologie modélise la tâche d'apprentissage CreaCube que la personne apprenante découvre et doit résoudre. Elle représente le monde dans lequel l'apprenant interagit avec les objets.

Le but de ce stage a été de définir précisément les concepts nécessaires à la modélisation bio-inspirée (en prenant notamment en compte les processus cognitifs) de l'apprenant indépendamment de la tâche de façon à proposer une ontologie transférable à d'autres tâches d'apprentissage. Par ailleurs, l'ontologie modélisant la tâche prend en considération à la fois le comportement de l'apprenant dirigé par des buts ou par des stimuli. Il était alors nécessaire d'y intégrer la notion de motivation afin de modéliser le comportement dirigé par la curiosité conformément aux travaux de l'équipe de FLOWERS. Il est alors apparu plus pertinent de développer l'ontologie modélisant la personne apprenante de manière indépendante de celle modélisant la tâche de résolution de problème CreaCube.

Cette première ontologie³⁰ a malgré tout servi de socle pour le formalisme. Son étude et son analyse ont été une étape essentielle et source d'une importante collaboration avec l'équipe de l'action exploratoire AIDE.

La première étape de la modélisation a été le choix des concepts pertinents pour la représentation. Il a ensuite fallu déterminer leur hiérarchie, c'est-à-dire comment ces concepts sont inclus les uns dans les autres. Enfin, des propriétés ont été sélectionnées et ajoutées pour rendre compte des relations non hiérarchiques entre ces concepts.

25. <https://www.bordeaux-neurocampus.fr/staff/chloe-mercier/>

26. <https://protege.stanford.edu>

27. <https://code.visualstudio.com>

28. <https://gitlab.inria.fr>

29. https://hal.archives-ouvertes.fr/LINE/search/index/q*/authFullName_s/Lisa+Roux

30. Documentation et code source disponibles en ligne : <https://line.gitlabpages.inria.fr/aide-group/creacubento/>

3 Résultats

Le travail de recherche en lui-même a conduit à l'aboutissement d'une revue de la littérature francophone visible dans l'annexe B. Cette revue va faire l'objet d'une publication en tant que rapport de recherche Inria. Elle va être également présentée à la Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle³¹ dans le but de faire connaître ce document de référence francophone. Par ailleurs, ce document va être utilisé en tant que support de cours pour les étudiants en sciences de l'éducation, par exemple au sein du MSc Smart EdTech³², les sciences cognitives et leur modèles computationnels étant de plus en plus utilisés³³ pour comprendre l'apprentissage humain.

Cette revue a permis de poser les définitions qui dans un deuxième temps doivent faire l'objet d'une modélisation informatique au sens de la représentation formelle des connaissances. Ce travail de très grande ampleur est en soi un projet collectif de plusieurs mois, mais le travail a pu être défriché en identifiant un certain nombre de classes et propriétés à la fois générales et liées à ce propos plus précis sur la motivation intrinsèque. Cette ébauche montre à la fois la faisabilité d'une telle formulation et permet aussi de mettre en lumière les points de difficulté d'une telle spécification.

Le code source de l'ontologie développée dans le cadre de ce stage est disponible en ligne en accès libre³⁴. Cette ontologie, développée de manière indépendante de la tâche, pourra être importée dans l'ontologie CreaCube décrite précédemment. De cette façon, elle demeure transférable, dans une certaine mesure, à d'autres tâches d'apprentissage. Elle utilise le langage de description OWL basé sur la structuration de triplets RDF en appliquant la syntaxe Turtle.

L'ontologie est tout d'abord composée d'une hiérarchie de classes représentant les connaissances, les concepts à modéliser. Ces classes peuvent être observées dans la figure 1. Cette dernière est une vue du logiciel Protégé montrant la hiérarchie des classes qui sont intégrées au modèle. Par exemple, dans la figure 1, la Curiosité est une sous-classe³⁵ de la Motivation Intrinsèque qui elle-même est une sous-classe de la Motivation.

Les classes peuvent à la fois être sujet et/ou objet d'un triplet RDF. Un triplet RDF est une représentation déclarative mettant en relation un sujet et un objet à l'aide d'un prédicat. Le sujet est la ressource à décrire, le prédicat une propriété s'appliquant sur cette ressource et l'objet est la valeur de cette propriété. Pour continuer sur le même exemple, la figure 2 montre graphiquement la hiérarchie de la classe Motivation. Dans le monde représenté, tout est une Chose (ellipse la plus

31. <https://roia.centre-mersenne.org/>

32. <http://smartedtech.eu>

33. Par exemple, il est possible de mentionner, au niveau français, la notion de cogniclasse <https://sciences-cognitives.fr/cc-quest-ce>, ou encore les travaux sur l'attention qui conduisent à des ressources pédagogiques effectives <https://pixees.fr/atole-lattention-a-lecole>

34. <https://gitlab.inria.fr/line/aide-group/creaonto/-/raw/learner-onto/creaontoV2/learner-ontology.owl>, sous licence CC-BY.

35. Une sous-classe hérite des propriétés d'une classe et peut être sous-classe de plusieurs classes à la fois. La Curiosité est une sous-classe de la Motivation car elle sont liées par la relation "est une".

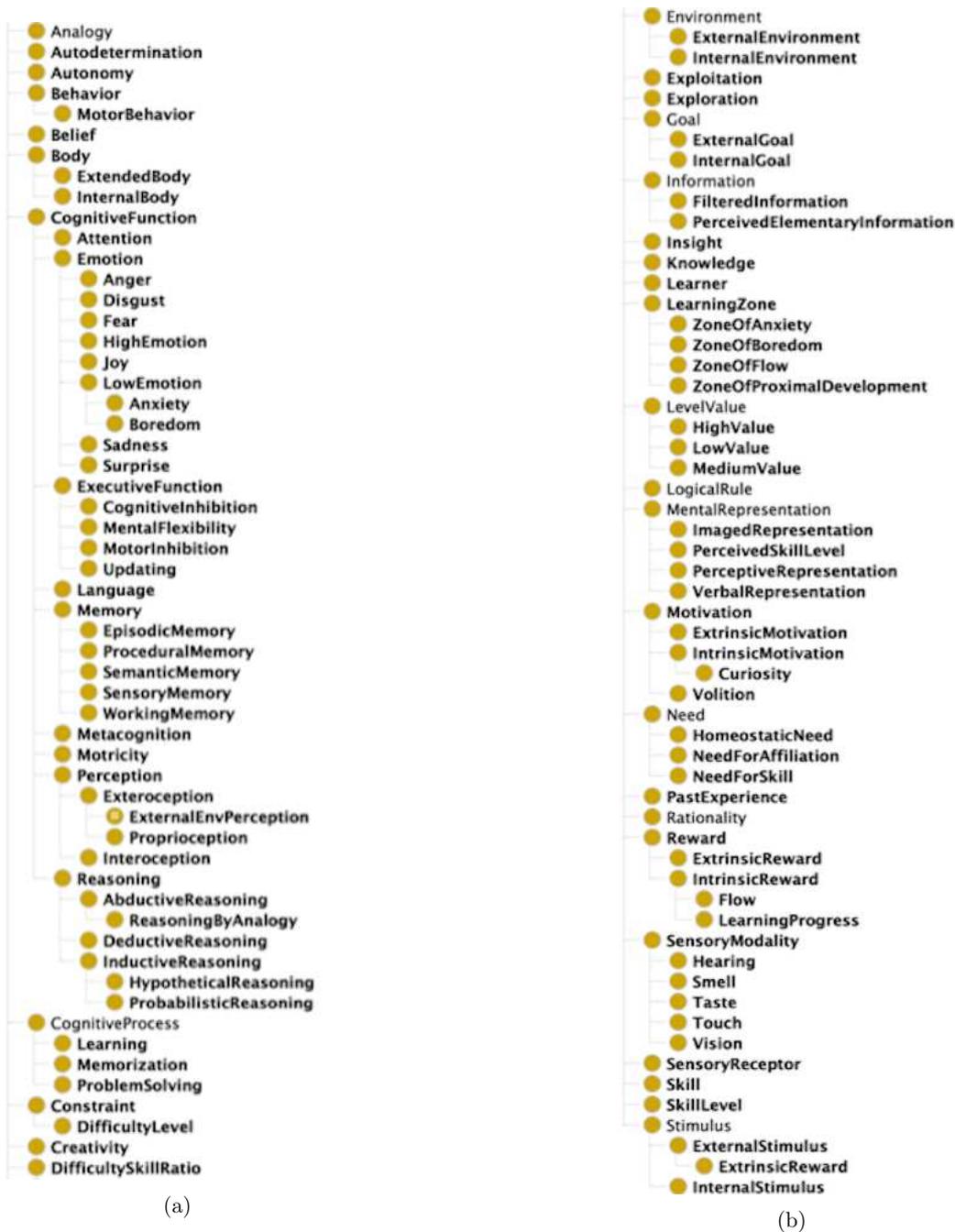


FIGURE 1 – Hiérarchie des classes.

Cette figure représente la hiérarchie des classes de l'ontologie modélisant la personne apprenante réalisée dans ce stage. Elle a été séparée en deux par souci de lisibilité (figures 1a et 1b).

à gauche dans la figure). La Motivation est une Chose : la Motivation est alors sujet, *is-a* (est une) le prédicat et la Chose (*Thing*) est l'objet. La Motivation Intrinsèque est à la fois sujet et objet : objet de la Curiosité et sujet de la Motivation.

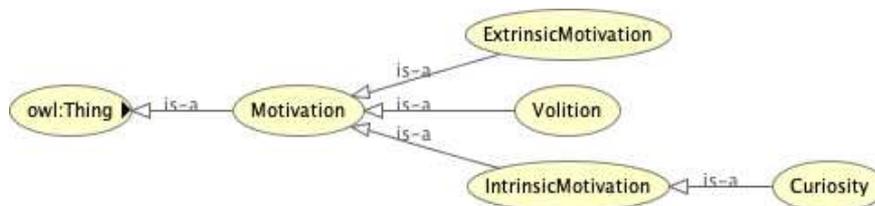


FIGURE 2 – Visualisation de la hiérarchie de la classe Motivation.

Cette figure est la visualisation de la hiérarchie de la classe Motivation. Elle est issue du logiciel Protégé grâce au *plugin* OWLViz.

Pour préciser les relations non-hiérarchiques entre classes, il est possible de définir de nouvelles propriétés. Chaque propriété est caractérisée par un domaine (la classe à laquelle peuvent appartenir les "sujets") et un co-domaine (la classe à laquelle peuvent appartenir les "objets") et éventuellement des quantificateurs sur le co-domaine afin de mieux spécifier les valeurs possibles pour l'objet (*some*, *min*, *max*, cardinalité exacte, etc). Ainsi, une classe peut être une sous-classe du domaine d'une propriété, ce qui restreint également le co-domaine. Cela s'appelle une restriction de propriété. Par exemple, la propriété *dependsOn* ("dépend de") peut a priori s'appliquer à une grande diversité de Choses ; mais, lorsqu'elle a pour sujet une instance de Motivation, au moins l'un de ses objets (*some*) devrait être une instance d'Autodétermination (cf. figure 3). En français, cela signifie que toute motivation dépend au moins d'une autodétermination.

The screenshot shows the Protégé software interface with the 'Usage: Motivation' window open. The left pane displays a class hierarchy for 'Motivation', and the right pane lists 26 uses of the class, including subclasses and instances with their associated properties and values.

Class hierarchy: Motivation

- ZoneOfFlow
- ZoneOfProximalDevelopment
- LevelValue
 - HighValue
 - LowValue
 - MediumValue
- LogicalRule
- MentalRepresentation
 - ImagedRepresentation
 - PerceivedSkillLevel
 - PerceptiveRepresentation
 - VerbalRepresentation
- Motivation**
 - ExtrinsicMotivation
 - IntrinsicMotivation
 - Curiosity
 - Volition
 - Need
 - HomeostaticNeed
 - NeedForAffiliation
 - NeedForSkill
 - PastExperience
 - Rationality
 - Reward
 - ExtrinsicReward
 - IntrinsicReward
 - Flow
 - LearningProgress
 - SensoryModality
 - Hearing
 - Smell
 - Taste
 - Touch
 - Vision
 - SensoryReceptor
 - Skill
 - SkillLevel
 - Stimulus
 - ExternalStimulus
 - ExtrinsicReward
 - InternalStimulus

Usage: Motivation

Show: this disjoints named sub/superclasses

Found 26 uses of Motivation

- Autodetermination**
 - Autodetermination SubClassOf monotonicallyIncreases some Motivation
- ExtrinsicMotivation**
 - ExtrinsicMotivation SubClassOf Motivation
- IntrinsicMotivation**
 - IntrinsicMotivation SubClassOf Motivation
- Metacognition**
 - Metacognition SubClassOf isInvolvedIn some Motivation
- Motivation**
 - Class: Motivation
 - Motivation SubClassOf leverages some Behavior
 - Motivation SubClassOf isLeveragedBy some PerceivedSkillLevel
 - Motivation SubClassOf dependsOn some Autodetermination
 - Motivation SubClassOf uses some Goal
 - Motivation SubClassOf isLeveragedBy some Emotion
- PerceivedSkillLevel**
 - PerceivedSkillLevel SubClassOf leverages some Motivation
- Reward**
 - Reward SubClassOf monotonicallyIncreases some Motivation
- Volition**
 - Volition SubClassOf Motivation
- Synchronising

Description: Motivation

Equivalent To +

SubClass Of +

- dependsOn some Autodetermination
- isLeveragedBy some Emotion
- isLeveragedBy some PerceivedSkillLevel
- leverages some Behavior
- uses some Goal

Git: learner-onto To use the reasoner click Reasoner > Start reasoner Show Inferences

FIGURE 3 – Vue Protégé des usages de la classe Motivation.

Cette figure représente une vue du logiciel Protégé lorsque l'on sélectionne une classe précise pour visualiser ses détails. Ici, il est possible d'observer tous les triplets dans lesquels la classe Motivation est utilisée, ainsi que les valeurs possibles des propriétés restreintes à cette classe.

La figure 3 montre l'interface du logiciel Protégé. Sur la partie gauche, il est possible de manipuler la hiérarchie des classes. Dans cet exemple, c'est la classe Motivation qui est sélectionnée. La partie inférieure droite de la fenêtre montre les restrictions de propriétés appliquées à la classe Motivation ; l'exemple précédent correspond à la première ligne de cette fenêtre. La fenêtre flottante dans la partie supérieure droite montre la liste des usages de la classe Motivation, c'est-à-dire toutes les occurrences où la Motivation se trouve être sujet ou objet d'un triplet RDF. Par exemple, l'Autodétermination (sujet) est une fonction croissante de (prédicat) la Motivation (objet). Cette fenêtre permet donc de voir un triplet où la Motivation n'est pas le sujet sans pour autant avoir sélectionné la classe Autodétermination qui, dans le cas de cet exemple, est le sujet du triplet.

La figure 4 montre quant à elle la hiérarchie des propriétés. Dans le cas de cette hiérarchie, la propriété *fosters* est une sous-propriété de *monotonicallyIncreases* car elles décrivent un même phénomène mais la sous-propriété le fait de manière plus précise.

Sur le côté gauche de la figure 6 sont représentées la hiérarchie des propriétés dans sur l'interface du logiciel Protégé. Pour cet exemple, c'est la propriété *fosters* qui est sélectionnée. La partie inférieure droite de la fenêtre montre la description de la propriété. Elle est une sous-propriété de *monotonicallyIncreases* et est la réciproque (*inverseOf*) de *isFosteredBy*. La fenêtre flottante dans la partie supérieure droite de la figure permet de visualiser les différents usages de la propriété sélectionnée.

Ici (fenêtre supérieure droite de la figure 6), il est possible de voir dans quels triplets la propriété est impliquée. Par exemple, la Curiosité (sujet) favorise (prédicat) l'Apprentissage (objet). Une relation réciproque serait alors : l'Apprentissage est favorisé par la Curiosité, sujet et objet s'inversent alors lorsque c'est la propriété réciproque (*inverseOf*) qui est utilisée.

Tous les exemples choisis, y compris ce dernier (la curiosité favorise l'apprentissage) est issu de la revue de la littérature. La figure 5 représente la relation entre la curiosité et l'apprentissage selon la théorie du *learning progress* (voir annexe B). Cette figure montre que les relations et les concepts modélisés dans l'ontologie sont bien issus du travail de recherche mené en amont et ayant abouti à la rédaction d'une revue de la littérature. Cette dernière était réellement nécessaire pour modéliser de manière correcte et précise les phénomènes impliqués dans l'apprentissage.



FIGURE 4 – Hiérarchie des propriétés.

Cette figure représente la hiérarchie des propriétés de l'ontologie modélisant la personne apprenante réalisée dans ce stage.

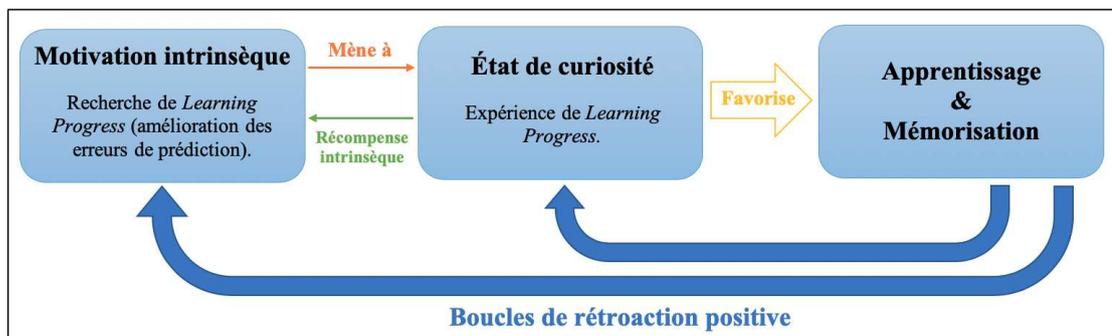


FIGURE 5 – Relations entre apprentissage et curiosité.

Cette figure est une adaptation traduite du schéma réalisé par Pierre-Yves OUDEYER [Oudeyer *et al.*, 2016]. Elle représente le lien causal existant entre l'apprentissage et la curiosité selon la théorie du *learning progress* qui intègre une boucle de rétroaction positive entre l'apprentissage et l'état de curiosité.

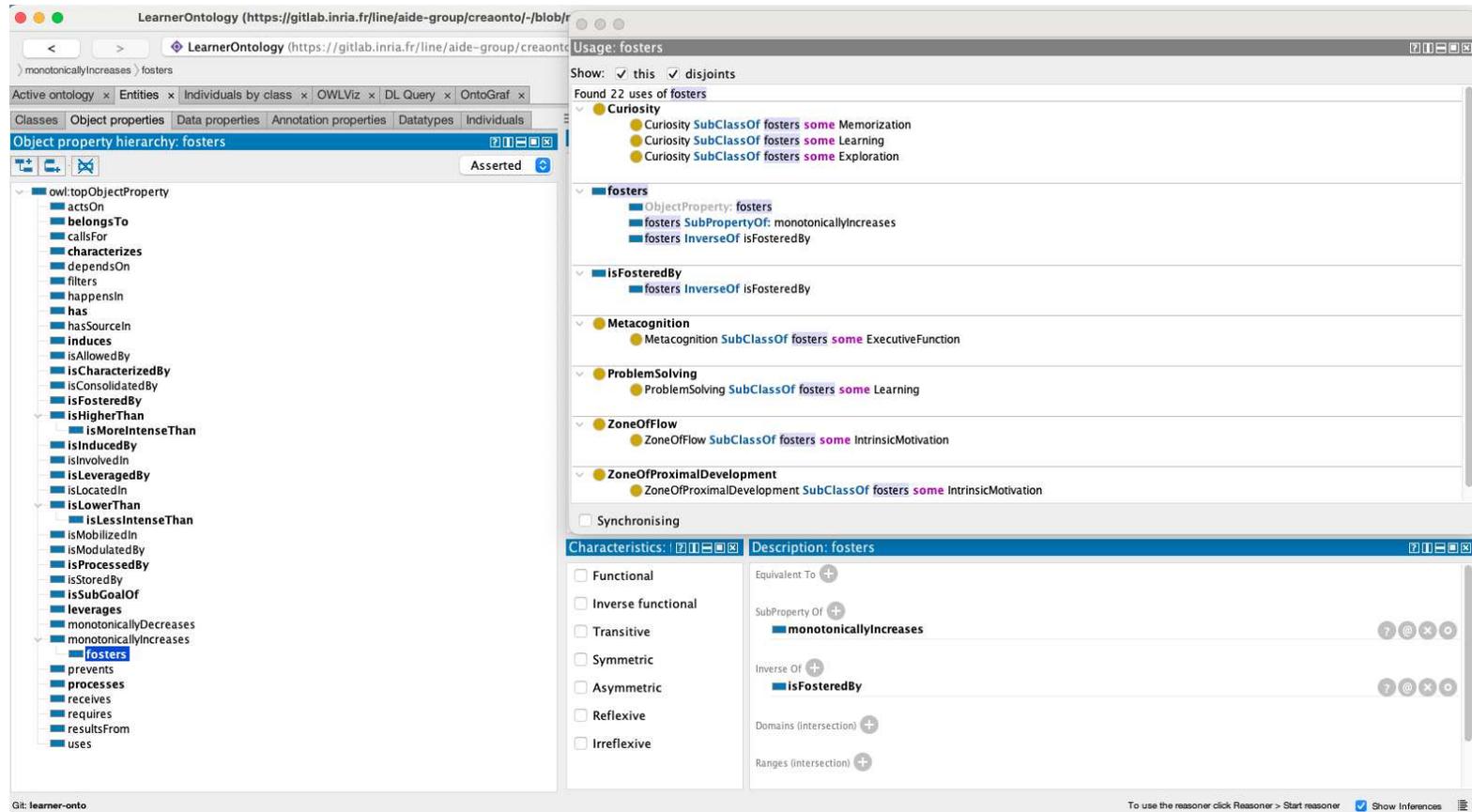


FIGURE 6 – Vue Protégé de l’usage des propriétés.

Cette figure représente la capture des propriétés de l’ontologie dans le logiciel Protégé. Plus précisément elle permet de visualiser les propriétés et leurs usages. Ici, c’est la propriété *fosters* qui est sélectionnée pour l’exemple.

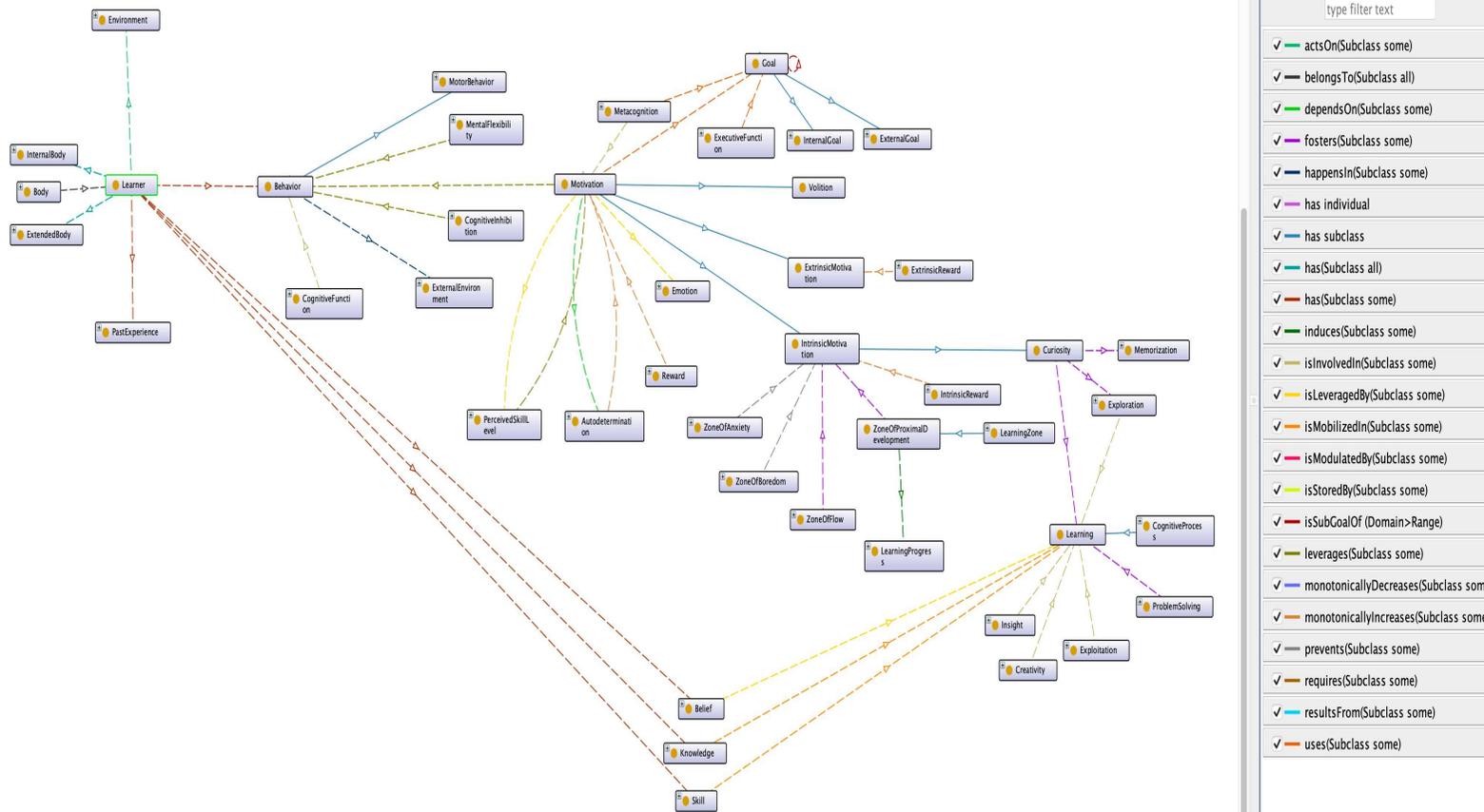


FIGURE 7 – Graphe issu d'une partie de l'ontologie de l'apprenant.

Cette figure représente un graphe issu de l'ontologie de l'apprenant réalisée dans le cadre de ce stage et visualisé dans le logiciel Protégé grâce au *plugin* Ontograf.

La figure 7 est une représentation graphique d'une partie de l'ontologie modélisant la personne apprenante. Le *plugin* Ontograf permet de sélectionner les classes d'intérêt et de choisir de représenter ou non toutes leurs relations. Pour aboutir à ce graphe, la Motivation, l'Apprenant et l'Apprentissage ont été sélectionnés et leurs relations représentées. Cette représentation n'est donc pas exhaustive mais favorise la lisibilité.

En restant sur l'exemple de la Motivation, au centre du graphe, il est possible d'identifier les restrictions de propriétés en lien avec l'Autodétermination³⁶. En effet, la relation en pointillés verts montre que la Motivation dépend de l'Autodétermination et que celle-ci est une fonction croissante de (relation en pointillés oranges) la Motivation. Les relations en traits pleins bleus pointent vers les sous-classes.

Par exemple, la Volition, la Motivation Intrinsèque et la Motivation Extrinsèque sont des sous-classes de la Motivation. Par ailleurs, et pour faire le lien avec la théorie du *learning progress* représentée dans la figure 5, il est montré que la Curiosité (sur la droite du graphe) favorise la Mémorisation et l'Apprentissage.

Toutes les relations de ce graphe ne vont pas être explicitées en intégralité afin d'éviter la redondance. Les exemples donnés ci-dessus ont été choisis en rapport avec les éléments clé du sujet de stage et de l'aboutissement de la revue de la littérature. Cependant, l'ontologie ne se limite pas à cette seule représentation graphique.

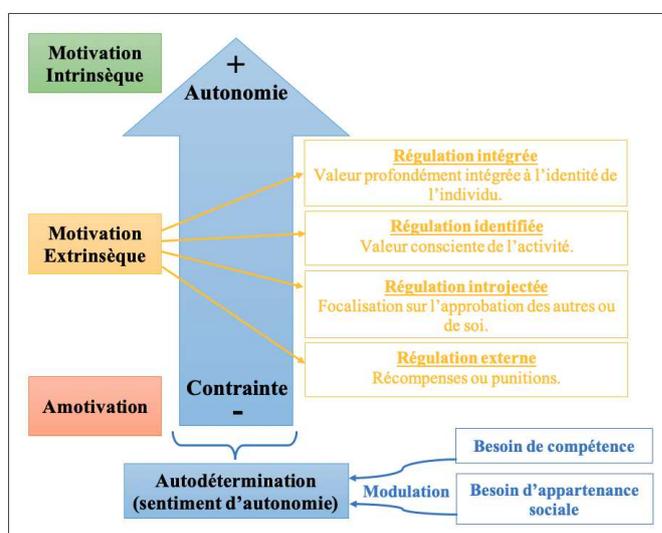


FIGURE 8 – Théorie de l'autodétermination de Edward DECI et Richard RYAN.

Cette figure illustre la théorie de l'autodétermination. Elle montre que "les différentes formes de motivation sont déterminées par un continuum d'autodétermination" [Lieury, 2017]. Ce dernier est modulé par le besoin de compétence et par le besoin d'appartenance sociale.

36. La théorie de l'autodétermination (voir la revue de la littérature dans l'annexe B) constitue un aspect essentiel dans la motivation au cours de l'apprentissage (voir figure 8).

Dans les exemples précédents, la théorie de l'autodétermination a été pointée comme essentielle pour la modélisation de l'apprenant prenant en compte l'aspect motivationnel de l'apprentissage. La figure 8 présente cette théorie selon laquelle le sentiment d'autonomie (autodétermination) influence le niveau de motivation. Celui-ci dépend du niveau de contrainte de l'activité d'apprentissage. Il est à noter que la motivation intrinsèque intervient lorsque le sentiment d'autonomie est au plus haut ce qui est à l'origine du triplet RDF : *Autodetermination monotonicallyIncreases some IntrinsicMotivation*.

Discussion et conclusion

Ce travail de modélisation informatique, bien qu'évidemment parcellaire et préliminaire, montre plusieurs choses intéressantes.

D'une part, bien que de très grande ampleur, si il devait être mené de manière exhaustive et approfondie, un tel objectif n'est pas inatteignable. D'autre part, en s'imposant de définir de manière formelle la terminologie pluridisciplinaire de ces concepts, s'impose également le fait bien fixer le sens des notions invoquées, de manière plus précise et univoque que ce que le langage courant permet. Ce travail a aussi une vocation d'inventaire, dans la perspective d'une modélisation formelle d'une personne apprenante : ici apparaît la liste de ce qui doit (ou pas selon les objectifs) être pris en compte dans un modèle formel symbolique, numérique ou hybride.

Par ailleurs, ici les moyens sont donnés de vérifier la cohérence de ce qui est spécifié, et d'obtenir automatiquement aussi les inférences les plus élémentaires qui en découlent. Bien entendu, il ne s'agit que d'une maquette préliminaire, mais la méthode est posée.

En conclusion, ce stage aura permis d'en apprendre davantage sur le fonctionnement de l'apprentissage ou du moins des processus qui y sont impliqués. La revue de la littérature qui en est issue représente une production pluridisciplinaire francophone qui pourra servir de base de travail accessible pour la poursuite de la modélisation d'une personne apprenante au cours d'une tâche de résolution de problème.

Par ailleurs, l'ontologie réalisée se veut être facilement transférable à d'autres modèles dans le cadre d'autres tâches d'apprentissage. De plus, elle pourra être utilisée comme support pour les experts dans le but de réaliser des inférences sur le comportement observé de la personne apprenante au cours de la tâche.

Cette ontologie n'étant pas exhaustive, elle pourra faire l'objet d'enrichissements futurs en collaboration avec d'autres chercheurs et chercheuses dans le but de se rapprocher encore davantage d'une modélisation bio-inspirée.

La prise en compte de la motivation dans cette ontologie est un atout permettant de mieux interpréter l'origine de certains comportements mais aussi et pourquoi pas d'améliorer les tâches d'apprentissage en elles-mêmes de sorte à favoriser le progrès d'apprentissage dans la lignée du

travail réalisé par l'équipe FLOWERS.

Références

- [Aimé et Arnould, 2021] AIMÉ, X. et ARNOULD, F. (2021). *Modélisation ontologique & psychologies. Une influence réciproque*. Éditions Matériologiques. <https://www.cairn.info/modelisation-ontologique-et-psychologies--9782373612608.htm>.
- [Chaumier, 2007] CHAUMIER, J. (2007). Les ontologies. antécédents, aspects techniques et limites. *Documentaliste-Sciences de l'Information*, 44(1). <https://www.cairn.info/revue-documentaliste-sciences-de-l-information-2007-1-page-81.htm>.
- [Connac, 2018] CONNAC, S. (2018). Neuroéducation et pédagogie. *Éducation et socialisation. Les Cahiers du CERFEE*, 49. <https://journals.openedition.org/edso/3556>.
- [Eastes, 2013] EASTES, R.-E. (2013). Processus d'apprentissage, savoirs complexes et traitement de l'information : un modèle théorique à l'usage des praticiens, entre sciences cognitives, didactique et philosophie des sciences. *HAL*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00904561>.
- [Fenouillet, 2016] FENOUILLET, F. (2016). *Les théories de la motivation*. Dunod.
- [Frayssinhes et Pasquier, 2018] FRAYSSINHES, J. et PASQUIER, F. (2018). Neurosciences et apprentissages via les réseaux numériques. *Éducation et socialisation. Les Cahiers du CERFEE*, 49. <http://journals.openedition.org/edso/3920>.
- [Gérard et al., 2020] GÉRARD, G., GUITTON, P., ROMERO, M., ROY, D. et VIÉVILLE, T. (2020). Éducation et numérique, défis et enjeux. *Livre Blanc Inria*. <https://hal.inria.fr/hal-03051329>.
- [Han et al., 2018] HAN, J., SHI, F., CHEN, L. et CHILDS, P. R. (2018). A computational tool for creative idea generation based on analogical reasoning and ontology. *Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 32(4).
- [Lemaire et Didierjean, 2018] LEMAIRE, P. et DIDIERJEAN, A. (2018). *Introduction à la psychologie cognitive*. deboeck supérieur.
- [Lieury, 2017] LIEURY, A. (2017). *35 grandes notions de psychologie cognitives*. Dunod.
- [Mercier et al., 2021a] MERCIER, C., ALEXANDRE, F. et VIÉVILLE, T. (2021a). Reinforcement symbolic learning. *The 30th International Conference on Artificial Neural Networks. ICANN'2021*, accepted.
- [Mercier et al., 2021b] MERCIER, C., ROUX, L., ROMERO, M., ALEXANDRE, F. et VIÉVILLE, T. (2021b). Formalizing problem-solving in computational thinking : an ontology approach. *IEEE International Conference on Development and Learning*.
- [Oudeyer et al., 2016] OUDEYER, P.-Y., GOTTLIEB, J. et LOPES, M. (2016). Intrinsic motivation, curiosity and learning : theory and applications in educational technologies. *Progress in brain research*, 229. <https://hal.inria.fr/hal-01404278/file/oudeyerGottliebLopesPBR16Preprint.pdf>.

-
- [Romero *et al.*, 2020] ROMERO, M., ALEXANDRE, F., VIÉVILLE, T. et GIRAUDON, G. (2020). Des neurosciences computationnelles aux sciences de l'éducation computationnelles pour la modélisation du cerveau de l'apprenant et du contexte de l'activité d'apprentissage. *Bulletin de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle, AFIA*. <https://hal.inria.fr/hal-02541099>.
- [Rougier, 2015] ROUGIER, N. (2015). L'intelligence artificielle, mythes et réalités. <https://intestices.info/lintelligence-artificielle-mythes-et-realites/>.
- [Roux *et al.*, 2020] ROUX, L., ROMERO, M., ALEXANDRE, F., VIÉVILLE, T. et MERCIER, C. (2020). *Développement d'une ontologie pour l'analyse d'observables de l'apprenant dans le contexte d'une tâche avec des robots modulaire*. <https://hal.inria.fr/hal-03040909>.
- [Viéville et Guitton, 2020] VIÉVILLE, T. et GUITTON, P. (2020). Quels sont les liens entre ia et Éducation? *Blog binaire - Le Monde*. <https://hal.inria.fr/hal-02993232>.

Appendices

A Discussion autour du modèle allostérique de l'apprendre dans le paradigme des théories du changement conceptuel

En contrepoint de l'analyse détaillée des notions permettant de mieux comprendre l'apprentissage humain, est mentionné ici des travaux alternatifs de Richard-Emmanuel EASTES [Eastes, 2013]^{37 38} sur les processus d'apprentissage qui tente d'établir un pont théorique et pratique entre les sciences de l'éducation, les sciences cognitives et la philosophie des sciences. Les notions suivantes y sont abordées :

— **Modèle allostérique :**

Thierry VIÉVILLE : *effectivement ils "détournent" le sens biologique* pour dire qu'apprendre ça te transforme mais c'est subtil. Il le définit ici https://www.hepfr.ch/sites/default/files/profile_publications_other/gymnasium_helveticum_2.pdf et le résume à la Fig. 19 page 76 de sa thèse, assez clairement. On est "ailleurs" par rapport à nos travaux : dans l'apprentissage "en général" et "à grande échelle de temps" par rapport à notre sujet commun : la résolution de problème dans un lieu donné et une durée courte.*

(*) <https://fr.wikipedia.org/wiki/Allosterie>

— **Modèle didactique :**

Thierry VIÉVILLE : *Double modèle didactique : modèle didactique disciplinaire (comment peut-on enseigner les maths ou autre) plutôt centrée sur l'enseignement et aussi modèle didactique d'apprentissage (transverse aux disciplines et centré sur la démarche de l'apprenant) en lien plus proche avec la pédagogie c'est la Fig. 1 page 26 de la thèse qui le résume bien.*

Didier ROY précise :

Ce que je sais du modèle didactique est que c'est une notion issue de la didactique du français, intéressante mais discutée dans les communautés des didacticiens. La didactique est dédiée à l'enseignement d'une discipline et aux spécificités de celle-ci, il y a donc en fait plusieurs didactiques, différentes les unes les autres. La didactique des maths par exemple est une science à part entière. Il y a des outils théoriques comme la transposition didactique de Chevallard, la théorie des situations didactiques de Brousseau, la dialectique outil-objet de Douady, etc..., mais

37. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00904561>

38. Cette ressource a été trouvée au cours d'une recherche bibliographique réalisée par Lola DENET ayant pour but l'élaboration de la revue de la littérature présente en annexe B. Cela a donné lieu à un échange pluridisciplinaire sur les notions pointées dans ce document. Cet échange a été retranscrit en partie dans cette annexe (A).

la "didactique générale" est une notion qui peut prêter à confusion parce qu'elle a peut-être plus à voir avec les sciences de la cognition qu'avec les disciplines et les savoirs enseignés spécifiques à chaque discipline.

Différence entre didactique, sciences cognitives et pédagogie : La didactique porte sur la transmission des savoirs aux élèves, partant de leurs représentations initiales et de leurs difficultés. Selon les disciplines, la pédagogie porte sur la relation prof/élève, l'organisation de la classe et les pratiques en classe, avec comme objectif de favoriser les apprentissages. Les sciences cognitives portent sur la manière dont les connaissances se construisent, s'utilisent et se transmettent. L'approche des sciences cognitives est pluridisciplinaire, traitant du langage, du raisonnement, de la perception, de la coordination motrice, planification, décision, émotion, conscience, culture...

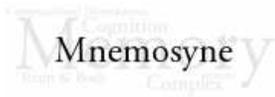
Margarida ROMERO complète :

Sur cette proposition ambitieuse dans le cadre de cette thèse, j'y vois une volonté de faire un modèle global de l'apprentissage, en articulant quelques modèles existants. Il manque les approches socioculturelles dont la théorie de l'activité, qui ont des principes proches de ceux qu'ils décrivent dans les processus de transformation des conceptions (Giordan, Pellaud & Eastes, 2002), qui pourraient être considérées comme des transformations liées aux (doubles) stimulations. Comme les modèles éducatifs sont souvent auto contenus et peu inter opérables, l'approche activité (un même phénomène observé sous différents modèles) pourrait permettre de faire entrer en dialogue des cadres différents.

B Revue de la littérature

université
de **BORDEAUX**

UNIVERSITÉ
CÔTE D'AZUR 


Mnemosyne

Inria
INVENTEURS DU MONDE NUMÉRIQUE

 Laboratoire d'Innovation et
Numérique pour l'Éducation

Revue de la littérature



ANALYSE DE LA MOTIVATION INTRINSÈQUE AU COURS D'UNE ACTIVITÉ DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

Lola DENET

Université de Bordeaux

Master 2 de bio-informatique 2020-2021

Parcours biologie computationnelle

Stage du 15 Février 2021 au 15 Août 2021

En collaboration avec :

Didier ROY - Chercheur Flowers

Thierry VIÉVILLE - Chercheur Mnemosyne
Chloé MERCIER - Doctorante Mnemosyne,
Frédéric ALEXANDRE et Margarida ROMERO

Table des matières

Introduction	1
1 De la cognition à l'apprentissage humain	2
1.1 Apprendre : un processus et objet d'étude multidisciplinaire	2
1.1.1 Les neurosciences	3
1.1.2 Les sciences de l'éducation	4
1.1.3 La neuroéducation	4
1.2 La cognition : généralités	5
1.2.1 La cognition et l'apprendre	5
1.2.2 Connaissance et croyance	6
1.2.3 Connaissance et savoir	9
1.2.4 Connaissance, compétence et expérience	10
1.2.5 Connaissance et information	12
1.2.6 Connaissance et cognition : conclusion	13
1.3 La cognition : les fonctions mentales	14
1.3.1 La perception	14
1.3.2 L'attention	19
1.3.3 Les mémoires	22
1.3.4 Le raisonnement	32
1.3.5 Les fonctions exécutives	47
1.3.6 Le langage et la motricité	50
1.3.7 Les émotions	53
1.3.8 Les fonctions mentales : conclusion	62
1.4 La métacognition	63
1.4.1 Généralités	63
1.4.2 Le fonctionnement de la métacognition	64
1.4.3 Métacognition : conclusion	68
1.5 De la cognition à l'apprentissage humain : conclusion	69
2 Le rôle de la motivation dans l'apprentissage	70
2.1 Processus d'apprentissage	70
2.1.1 Les théories de l'apprentissage humain	70
2.1.2 Modes d'acquisition	82
2.1.3 Résolution de problème	85
2.2 La motivation	97

2.2.1	Généralités	97
2.2.2	Motivation extrinsèque	104
2.2.3	Motivation intrinsèque	107
2.3	Le rôle de la motivation dans l'apprentissage humain : conclusion	109
3	Modélisation de la motivation intrinsèque dans l'apprentissage	110
3.1	Implication de la curiosité dans l'apprentissage	111
3.2	Modèles computationnels de la curiosité	115
3.2.1	Les <i>Intelligent Tutoring Systems</i>	115
3.2.2	Contextualisation des algorithmes	117
3.2.3	Présentation des algorithmes	119
3.3	Modélisation de la motivation intrinsèque dans l'apprentissage :	
	conclusion	128
	Références	129
	Index	144

Table des figures

1	Les trois mondes de la cognition	15
2	Traitement des stimuli (élaboration)	17
3	Modèle de fonctionnement de la mémoire	23
4	Mémoire Perceptive selon les 5 modalités sensorielles	24
5	Les interactions des différentes mémoires	28
6	Les mémoires et leurs localisations	29
7	Processus de mémorisation	31
8	Guide du choix de la théorie de l'incertain	46
9	Les émotions fondamentales	56
10	Les théories sur les mécanismes émotionnels	58
11	Théorie de l'évaluation cognitive	59
12	Cycles contrôle-monitoring-contrôle de la métacognition au cours du temps	66
13	Modèle comportemental de FECHNER	72
14	L'apprentissage selon le constructivisme	75
15	Compétences du 21 ^{ème} siècle	78
16	Les étapes de la résolution de problème selon la théorie gestaltiste	85
17	Étapes de résolution de problème selon la théorie cognitiviste . . .	89
18	La résolution de problème basée sur la théorie <i>General Problem Solver</i> et le modèle Tester-Opérer-Tester-Quitter	94
19	La résolution de problème basée sur la théorie <i>General Problem Solver</i> et le modèle Tester-Opérer-Tester-Quitter : version améliorée	95
20	Modèle intégratif de la motivation	103
21	Théorie de l'autodétermination de Edward DECI et Richard RYAN	106
22	Relations entre apprentissage et curiosité	112
23	Sélection d'une activité dans l'espace d'activité	137
24	Zone de développement proximal et Flow	138
25	Exemple de graphe des activités avec évolution de la zone de dé- veloppement proximal	138

Introduction

Cette revue de la littérature s'intègre dans le travail mené au sein de l'action exploratoire AIDE (*Artificial Intelligence Devoted to Education*)¹. L'équipe à l'origine de ce travail² permet à des chercheuses et chercheurs des sciences du numérique (informatique et mathématiques appliquées), des neurosciences cognitives et des sciences de l'éducation de s'allier au sein de cette action exploratoire pour tenter de comprendre, dans un cadre précis, comment les apprenants apprennent.

Pour ce faire, une tâche de résolution de problème (CreaCube)³ est proposée aux apprenants afin de recueillir des données observables concernant la tâche elle-même, le médium⁴ qui sert de support d'apprentissage dans la tâche, mais aussi le comportement de l'apprenant au cours de la résolution du problème posé. Les informations recueillies sont alors formalisées de manière symbolique grâce au développement d'une ontologie. Lisa ROUX et ses collaborateurs [Roux *et al.*, 2020] ont élaboré cette ontologie afin de proposer une modélisation de l'apprenant qui prend en compte les stimuli reçus, la découverte d'affordances⁵, la pose d'hypothèses et les connaissances contextuelles. Dans son rapport de recherche, Lisa ROUX [Roux *et al.*, 2020] définit les concepts de croyances, d'exploration et d'exploitation, mais aussi les différents types de mémoires impliquées dans cette tâche d'apprentissage humain. Les notions de buts et d'engagement y sont également abordées.

Par ailleurs, l'équipe FLOWERS (*FLOWing Epigenetic Robots and Systems*)⁶ travaille sur des algorithmes d'intelligence artificielle dont le but est de proposer, en collaboration avec des équipes éducatives, des tâches d'apprentissage adaptées au niveau de l'apprenant afin de favoriser son engagement et ainsi améliorer sa progression. Au centre de leur approche est la notion de **motivation intrinsèque**.

Les travaux menés par l'équipe FLOWERS sur les implications de la moti-

1. <https://www.inria.fr/fr/aide-nouvelle-action-exploratoire-chez-inria>

2. <https://team.inria.fr/mnemosyne/en/aide/>

3. <https://creamaker.wordpress.com>

4. Dans le cadre des activités éducatives en psychologie et psychiatrie, un médium (média au pluriel) est ce qui caractérise l'objet manipulable à l'origine de l'apprentissage. Par exemple, la pâte à modeler, la peinture, les cubes sont des média.

5. Les affordances représentent les utilisations potentielles et intuitives d'un objet.

6. <https://flowers.inria.fr>

vation intrinsèque dans l'apprentissage humain offrent une nouvelle dimension à intégrer à la modélisation de l'apprenant initiée par l'action exploratoire AIDE. Ce travail commun pourrait permettre de mieux comprendre le fonctionnement de l'apprentissage humain, avec comme finalité de limiter les inégalités éducatives tout en favorisant l'implication de l'apprenant dans son éducation.

Cette revue a donc pour but d'explorer les recherches menées sur la motivation intrinsèque de l'apprenant au cours de l'apprentissage afin de comprendre dans quelle mesure elle y est impliquée. Cela permettra de contribuer à l'amélioration du modèle de l'apprenant et ainsi de s'approcher davantage de la compréhension des mécanismes de l'apprentissage humain.

D'autre part, elle est réalisée dans le cadre d'un stage de recherche en bioinformatique ayant pour but "l'analyse de la motivation intrinsèque au cours d'une activité de résolution de problèmes". Elle n'est, par conséquent, ni exhaustive, ni généraliste, mais spécifique aux domaines traités lors de ce stage.

1 De la cognition à l'apprentissage humain

Comment apprend-on ? C'est l'une des questions auxquelles l'action exploratoire AIDE tente de répondre, dans un paradigme spécifique. Mais qu'est-ce que l'apprentissage ? En quoi étudier le fonctionnement du cerveau peut-il avoir un impact sur l'éducation ? Et le numérique ? Dans quelle mesure intervient-il dans le domaine des neurosciences et est-il au cœur des sciences de l'éducation ?

À ce stade, un éclairage contextuel et conceptuel s'avère nécessaire.

1.1 Apprendre : un processus et objet d'étude multidisciplinaire

Il est complexe de définir ce qu'est "apprendre" car ce processus peut être analysé selon différentes perspectives tant épistémologiques que méthodologiques. En effet, Sylvain CONNAC rappelle que l'acte d'apprendre est "*complexe, dans le sens d'un tissage entre activités intellectuelles différentes et dans celui de savoirs issus de diverses disciplines*". Au niveau neurobiologique, il rappelle que l'acte d'apprendre "*s'exprime par l'intermédiaire de près de 100 milliards de neurones, chaque neurone étant potentiellement en liaison synaptique avec 10 000 autres, voisins ou éloignés dans le cerveau*" [Connac, 2018].

Avec l'émergence, au cours de ces dernières années, de l'intelligence artificielle dans le domaine de l'éducation, la notion d'apprentissage s'enrichit d'un nouveau sens : la capacité pour un algorithme d'adapter ses paramètres à partir de données pour automatiquement fournir un calcul avec les propriétés escomptées [Rougier, 2015].

La collaboration entre les différents domaines de recherche à l'origine de ce travail est alors essentielle pour tenter de comprendre ce processus complexe. Ces différentes disciplines se rejoignent en un intérêt commun qui est de comprendre les mécanismes cognitifs de l'acte d'apprendre et ainsi permettre aux professionnels de l'éducation de mieux comprendre cet acte d'apprendre, avec la finalité d'améliorer l'efficacité des tâches proposées aux apprenants dans le but de favoriser leur apprentissage

1.1.1 Les neurosciences

En 2018, Jean FRAYSSINHES et Florent PASQUIER [Frayssinhes et Pasquier, 2018] définissent les neurosciences comme l'ensemble des disciplines en lien avec l'étude du cerveau et ils identifient celles qui jouent un rôle important pour la recherche dans le domaine l'éducation. Ils citent les neurosciences cognitives, les neurosciences computationnelles, la neuropédagogie ainsi que les neurosciences affectives et sociales. Tandis que les neurosciences cognitives tentent de lier système nerveux (mécanismes cérébraux) et cognition, la neuropédagogie permet de comprendre la construction de l'intelligence dans le cerveau ainsi que les effets des apprentissages fondamentaux. Quant aux neurosciences affectives et sociales, elles étudient le rôle des émotions et l'importance de l'aspect social dans l'apprentissage.

Enfin, les neurosciences computationnelles cherchent à élaborer des modèles chargés de simuler le fonctionnement du cerveau. Dans le contexte de recherche où se situent cette revue, l'hypothèse de travail est que cette dernière discipline (en association avec les autres) puisse permettre de modéliser l'apprenant lors d'une tâche d'apprentissage et par conséquent de comprendre les neuro-mécanismes impliqués dans l'apprentissage.

1.1.2 Les sciences de l'éducation

Philippe MEIRIEU⁷ se base sur l'histoire des sciences de l'éducation pour identifier les disciplines qu'elles couvrent⁸. Il rappelle que les sciences de l'éducation sont nées entre 1967 et 1970, en ce qui concerne la France⁹, dans le but de réunir ces disciplines. Avant la création des sciences de l'éducation, il s'agissait de la pédagogie qui se concentre davantage sur l'aspect concret, pratique de l'éducation, de manière transversale aux disciplines. Puis l'éducation se basait sur le développement du point de vue de la psychologie. Aujourd'hui, les sciences de l'éducation permettent de travailler conjointement sur la question du "comment apprendre". La psychologie, la sociologie, l'anthropologie, la linguistique, l'économie ou encore l'histoire et la philosophie sont impliquées dans les sciences de l'éducation car elles participent à l'étude des apprentissages. Cela rejoint ce que Louis MARMOZ de l'Université de Caen écrit dans une note de synthèse pour la revue française de pédagogie éditée par l'Institut Français de l'éducation¹⁰. Les sciences de l'éducation constituent alors un domaine de recherche pluridisciplinaire concernant *"les réalités éducatives"*.

1.1.3 La neuroéducation

Les neurosciences cognitives et les sciences de l'éducation se rejoignent avec des travaux en neuroéducation relatifs aux problématiques éducatives. L'objectif est de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau lors de l'apprentissage et de déterminer de meilleures méthodes éducatives. D'autre part, la neuroéducation permet de dépasser les *"mythes en éducation, reconnus comme des fausses croyances, des affirmations sans fondement empirique"* [Connac, 2018].

D'après l'association de recherche en neuroéducation¹¹, la neuroéducation *"se pose comme une approche complémentaire aux approches comme le cognitivisme, le constructivisme et le béhaviorisme. [...] Ce qui distingue la neuroéducation des autres approches est qu'elle situe son analyse des problématiques éducatives au niveau cérébral, en ayant recours à des techniques d'imagerie cérébrale"*.

7. <https://www.meirieu.com/BIOGRAPHIE/biographie.htm>

8. <https://www.meirieu.com/COURS/pedaetscienceseduc.pdf>

9. Dans le contexte anglophone, les *learning sciences* commencent à se développer dans les années 1980 en tant que domaine interdisciplinaire [Lee, 2018].

10. http://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/revue-francaise-de-pedagogie/INRP_RF043_5.pdf

11. <https://www.associationneuroeducation.org/a-propos>

Les domaines de recherche explicités prennent alors tout leur sens dans l'établissement d'un modèle de l'apprenant, au sein d'une tâche spécifique. En effet, il faut comprendre ce qui constitue un apprenant dans sa globalité et sa complexité pour tenter de comprendre comment fonctionne le processus d'apprentissage, dans un cas précis.

C'est en ce sens que les équipes de Mnemosyne et FLOWERS s'associent au sein de l'action exploratoire AIDE. Les chercheuses et chercheurs de Mnemosyne travaillent à la fois dans le domaine des neurosciences pour comprendre davantage le fonctionnement du cerveau et à la fois dans le domaine des sciences du numérique afin d'améliorer les algorithmes d'intelligence artificielle en se basant sur le fonctionnement humain.

Dans le cadre de ses travaux de recherche, l'équipe FLOWERS crée notamment des algorithmes d'intelligence artificielle dans le contexte des sciences de l'éducation. Cela dans le but de favoriser l'apprentissage en adaptant le niveau à chaque apprenant par l'utilisation de ces algorithmes lors de tâches dédiées et définies en collaboration avec les enseignants.

L'association de ces équipes et de leurs travaux pourrait permettre d'aboutir à un modèle au plus proche des processus d'apprentissage humain et ainsi mieux comprendre le fonctionnement de l'apprentissage pour tenter d'en améliorer les méthodes.

1.2 La cognition : généralités

1.2.1 La cognition et l'apprendre

Le mot "cognition" ou "processus cognitifs" viennent du latin *cognitio* qui signifie connaissance ou action d'apprendre [Lieury, 2017]. La cognition regroupe des grandes fonctions mentales comme la perception, la mémoire, le langage, le raisonnement, les fonctions exécutives, la motricité etc. Elle intervient aussi au niveau des apprentissages et des émotions [Connac, 2018].

Sylvain CONNAC cite cette définition pour l'acte d'apprendre : "*Apprendre, c'est tout à la fois saisir par l'esprit, acquérir des connaissances, intégrer des données nouvelles à une structure existante, construire par transformation de nouvelles représentations et de nouvelles connaissances, et modifier un comportement*" [Connac, 2018].

La cognition faisant référence au concept de "connaissance", elle provoque le questionnement suivant : qu'est-ce que la connaissance ? Dans un premier temps, cette question peut paraître inutile car ce terme est employé couramment et certainement que chacun et chacune pense savoir ce qu'est la connaissance ou du moins ce que ce mot veut dire. Cependant, définir, donner un sens univoque au concept de connaissance est plus difficile qu'il n'y paraît car selon le point de vue, la discipline ou encore les croyances, la connaissance est polysémique. Lorsque le sujet de recherche est de comprendre comment un apprenant apprend et qu'il est abordé par différents domaines de recherche comme c'est le cas ici, y compris en lien avec l'apprentissage machine, il paraît pourtant essentiel de trouver une définition univoque pour ce concept afin d'établir un socle commun sur lequel se baser et éviter les contresens.

1.2.2 Connaissance et croyance

Selon Christian GODIN, la connaissance pourrait être : *"une faculté mentale produisant une assimilation par l'esprit d'un contenu objectif préalablement traduit en signes et en idées"* [Godin, 2004]. Cette définition renvoie aux fonctions mentales abordées dans la définition de la cognition.

En lien avec la connaissance, Marie GASC définit la fonction symbolique comme *"la capacité d'évoquer les objets ou les événements même absents, grâce aux représentations mentales et au moyen de signifiants pour exprimer des signifiés"* [Gasc, 2016]. Pour cela elle s'appuie sur la définition initiale de Jean PIAGET : *"connexion spécifique entre des signifiants et des signifiés"*. Un objet, un événement ou un schème conceptuel¹² sont des exemples de signifiés alors que le langage, une image mentale ou un geste symbolique sont des exemples de signifiants.

Un autre aspect de la définition de la connaissance écrite par Christian GODIN précise pour la fonction symbolique, que celle-ci serait *"le résultat de cette opération. La connaissance est une possession symbolique des choses. Elle comprend une infinité de degrés"* [Godin, 2004]. La fonction symbolique interviendrait alors comme le processus permettant à un signifié de devenir une connaissance dans le cas où celui-ci puisse être qualifié par des signifiants.

12. Selon Kant, un schème est *"un procédé ou moyen par lequel un concept pur devient effectif par l'implication d'une intuition"*.

Il est possible d'établir un lien avec le point de vue de Jean PIAGET rappelé par Jean-Michel BESNIER. Selon lui, la connaissance serait *"la mise en relation d'un sujet et d'un objet par le truchement d'une structure opératoire"* [Besnier, 2021]. Cela peut faire penser à la structure d'un triplet RDF (*Ressource Description Framework*), formalisme symbolique utilisé lors de la modélisation ontologique de l'apprenant au cours du travail introduit précédemment. Dans un triplet RDF le sujet est la ressource à décrire, le prédicat est la propriété appliquée au sujet et l'objet est une donnée valeur de la propriété. En suivant ce raisonnement, il serait alors possible de représenter des connaissances de manière symbolique à l'aide de cette méthode.

Jean-Michel BESNIER précise que *"les structures en question pourront appartenir : 1/ au sujet ; 2/ à l'objet ; 3/ à la fois au sujet et à l'objet ; 4/ exclusivement à leur relation ; ou bien 5/ ne relever ni de l'un ni de l'autre"*. Cela constitue une manière logique d'expliquer l'acte de connaître qui ne convient pas complètement à la théorie de la connaissance car elle *ne se borne pas à décrire la structure qui conditionne la production de la vérité ; elle cherche en outre à évaluer la part qui revient au sujet et à l'objet dans la constitution d'un savoir*" [Besnier, 2021]. En philosophie, une alternative se pose alors : *"ou bien la connaissance n'est que le résultat de l'enregistrement dans le sujet d'informations déjà organisées dans le monde extérieur, ou bien elle est produite par le sujet qui possède la faculté d'agencer les données immédiates de la perception"* [Besnier, 2021].

Plusieurs courants philosophiques s'opposent concernant la connaissance et ses implications. Selon les empiristes la connaissance n'est pas innée, elle relèverait totalement de l'expérience par l'intermédiaire des sens, des impressions, des idées. À l'inverse, les rationalistes comme Kant et Schopenhauer pensent que la connaissance est intrinsèque à l'individu. *"Elle relève de l'Être et du singulier"* [Frayssinhes, 2019]. Les positivistes indiquent que *"le sujet connaissant est irréaliste (hors de la réalité) la connaissance étant une extraction du contenu de celle-ci"* alors que les constructivistes estiment *"que l'individu connaissant crée sa propre réalité, de sorte qu'elle n'est pas externe"* [Frayssinhes, 2019].

En poursuivant les recherches du point de vue philosophique, il n'apparaît pas de consensus sur une définition de la connaissance de manière générale (même s'il sera possible d'aboutir à une définition opérationnelle un peu plus loin). Une définition a pourtant été identifiée puis réfutée par Platon. La connaissance serait alors une *"croyance vraie et justifiée"* [Chappell, 2019]. Les philosophes qui ont

essayé de compléter cette définition se sont heurtés à différentes incohérences ayant provoqué le retour à la définition initiale même si elle est jugée incomplète. Platon l'avait réfutée car il est possible qu'une croyance soit vraie sans pour autant que l'individu soit capable de la démontrer.

Serge GOLDMAN étudie les différents aspects de la croyance et fait le lien avec la cognition. Il donne une première définition de la croyance en se plaçant du point de vue des neurosciences cognitives. La croyance serait alors "*un processus conscient [intentionnel] par lequel un sujet adhère à des perceptions ou des élaborations non vérifiées par les sens*" [Goldman, 2005]. La croyance implique *l'adoption active d'un choix*". Ce choix est influencé par l'intervention des fonctions mentales comme la perception ou en encore la mémoire (pour ne citer que ces deux là). La croyance prend différents aspects selon la fonction mentale impliquée. Elle est également influencée par l'environnement et l'apprentissage mais aussi par les connaissances précédemment acquises.

La définition de la connaissance précédemment identifiée dit que la connaissance est "*une croyance vraie et justifiée*". Comme la connaissance serait liée à la croyance, elle résulte des fonctions mentales et du contexte (environnement, milieu socio-culturel, etc.). La croyance est donc subjective, propre à l'individu ou à un groupe d'individus. Elle peut être une hypothèse qui s'objectivise par la vérification, la démonstration ou la constatation. Une fois objectivée elle deviendrait alors une connaissance.

Si une croyance peut devenir une connaissance, elle peut également rester une croyance qu'elle soit vraie ou fausse. En ce sens, elle peut être perçue comme vraie pour la personne qui croit. Cela en fait-il alors une connaissance individuelle qui n'existe que selon le prisme de cette personne? Plus précisément, une croyance perçue comme vraie par une personne peut-elle être qualifiée de connaissance de manière objective si elle n'est vraie que pour la personne qui la croit vraie? Par ailleurs, une connaissance passe-t-elle obligatoirement par le stade de la croyance? Ces différents aspects montrent la difficulté de donner un sens univoque à la connaissance puisque celle-ci est visiblement dépendante du contexte, des connaissances préalables et des fonctions mentales engagées et propres à l'individu.

Le point de vue des sciences de l'éducation sur la connaissance est aussi abordé par Jean FRAYSSINHES dans un article où il distingue différents concepts souvent confondus : la connaissance, le savoir, la compétence et l'expérience.

1.2.3 Connaissance et savoir

Selon lui, la connaissance se construit chez l'individu apprenant (en tant que sujet connaissant) et n'est pas absolue. Le sujet connaissant, face à une réalité extérieure, intériorise, comprend et s'approprie un savoir en fonction de ses états mentaux (pensée). Jean FRAYSSINHES écrit que l'apprenant *"transforme ce savoir en connaissance"* [Frayssinhes, 2019]. Il précise qu'en *"construisant cette connaissance, cela lui permet d'avoir une idée exacte d'une réalité, de sa situation, de son sens, de ses caractères, de son fonctionnement"* [Frayssinhes, 2019]. Par conséquent, la connaissance ne peut être parfaite puisqu'elle n'est pas identique d'un individu à l'autre. *"La dissemblance de la perception du réel par la pensée intrinsèque à chacun"* [Frayssinhes, 2019] montre qu'il existe plusieurs degrés de réalité ce qui implique plusieurs degrés de connaissance. Cela confirme que *"les connaissances se construisent à travers nos expériences et ne se transmettent pas"*. Il est cependant possible que plusieurs individus aient des connaissances sur une même réalité. Les connaissances évoluent au gré des expériences et de la réflexivité et peuvent être influencées par des connaissances préalables. Elles dépendent du contexte et peuvent être contredites ou bien *"transposées d'une problématique à une autre"* [Frayssinhes, 2019].

Jean FRAYSSINHES définit le savoir comme étant *"une donnée, un concept, une procédure ou une méthode qui existe à un temps donné, hors de tout sujet connaissant, et qui est généralement codifié dans des ouvrages de références"* [Frayssinhes, 2019]. Les savoirs constitués sont des connaissances érigées en savoir par une communauté. *"Le savoir est dépersonnalisé, décontextualisé, détemporalisé. Il est formulé, formalisé, validé et mémorisé. Il peut être linéarisé, ce qui correspond à sa nature textuelle"* [Frayssinhes, 2019]. L'auteur précise qu'il existe quatre types de savoirs qui *"représentent l'optimum de ce qu'un individu peut apprendre"* :

- Les connaissances et les procédures sont des **savoirs formalisés**.
- Les savoir-faire et expériences font référence à des **savoirs agissant**.
- L'appropriation ou élaboration de concepts relèvent des **savoirs intellectuels**.
- Le **savoir être** est ce qui permet à un individu de s'adapter à diverses situations.

La connaissance est donc un processus actif de production en fonction d'une

situation, alors que le savoir est le résultat de ce processus et dépend de l'institution. *"La qualité des savoirs dépend du processus de connaissance utilisé pour les produire, et la valeur du savoir dépend de la qualité épistémique du processus qui l'a engendré"*. Par conséquent, *"les procédés théorico-empiriques valides produisent des savoirs vrais, et ceux qui ne le sont pas, des savoirs faux ou incertains"* [Frayssinhes, 2019].

Des collaborateurs de Wikipedia se sont basés sur les travaux de Ryle GILBERT et de Bertrand RUSSEL¹³ pour définir trois types de connaissance dans le but de montrer une forme de consensus dans les points de vue philosophiques. Il est alors question de connaissance propositionnelle, de savoir-faire et de connaissance objective (ou acquaintance).

"La connaissance propositionnelle est le fait de savoir qu'une certaine proposition est vraie, par exemple, « savoir que la Terre est ronde »". Cette connaissance est vraie objectivement sans avoir été vérifiée individuellement. *"Le savoir-faire est le fait d'être capable de réussir une action, par exemple, « savoir faire une gaufre »"*. Cela rejoint la définition de Jean FRAYSSINHES citée précédemment. *"La connaissance objective, aussi appelée acquaintance, est le fait de connaître une chose particulière, par exemple, « connaître Paris »"*.

Ici, la distinction entre savoir et connaître est mise en avant. En effet, dans les deux premiers types de connaissance définis, le savoir est une connaissance établie soit par la communauté (la Terre est ronde) soit par des actions conformes à une référence (savoir faire une gaufre). Dans la dernière définition, il n'est pas question de savoir mais bien de connaissance car elle dépend de l'individualité (deux personnes peuvent connaître Paris sans forcément se baser sur les mêmes références).

Le savoir est un état fixé par une communauté dans le respect de sa discipline et de ses pratiques sociales. La connaissance est caractérisée par des propriétés de la cognition contrairement au savoir qui a des propriétés sémantiques et syntaxiques.

1.2.4 Connaissance, compétence et expérience

Au delà des connaissances, Jean FRAYSSINHES cite le Haut Conseil en Éducation qui a défini les compétences comme *"une combinaison de connaissances,*

13. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Connaissance_\(philosophie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Connaissance_(philosophie))

d'aptitudes et d'attitudes". Il dissocie trois types de compétences :

- **Les compétences scolaires** aussi qualifiées de savoirs cognitifs.
- **Les compétences techniques et méthodologiques** ou savoirs faire.
- **Les compétences comportementales ou sociales** (*soft skills*) sont associées au savoir être.

La compétence se construit au fil du temps en mobilisant différentes ressources. Elle est la *"capacité d'agir efficacement dans un type défini de situation, capacité qui s'appuie sur des connaissances, mais ne s'y réduit pas. Elle se réalise dans l'action. Elle ne lui préexiste pas"* [Frayssinhes, 2019]. La compétence s'apprend grâce aux capacités individuelles et sociales. Elle ne peut être dissociée d'une activité (compétence opératoire et finalisée). Elle se structure par l'action (savoir, vouloir et pouvoir agir). Elle n'est pas observable directement mais a des manifestations et des conséquences qui le sont (compétence abstraite et hypothétique). L'apprentissage par compétences permet de définir les connaissances préalables nécessaires à l'apprenant mais aussi leur degré de maîtrise dans un contexte particulier. *"Ainsi, les compétences offrent un référencement sémantique abondant, indispensable à une adaptation pertinente des apprentissages au regard des attentes et des besoins de l'apprenant"* [Frayssinhes, 2019]. En effet, l'objectif d'apprentissage, les moyens à mettre en oeuvre pour l'atteindre ainsi que le processus permettant le traitement de la connaissance peuvent ainsi être précisés par ce référencement sémantique.

L'expérience peut être distinguée selon deux définitions. Selon Jean FRAYSSINHES, l'expérience est le *"fait d'acquérir [...] ou de développer la connaissance des êtres et des choses par leur pratique et par une confrontation plus ou moins longue de soi avec le monde. [L'expérience] peut également être un fait observé [destiné] à vérifier une hypothèse ou à étudier des phénomènes"* [Frayssinhes, 2019]. L'expérience peut se construire par induction en s'appuyant sur la pratique, l'analyse et la réflexion ou par déduction lorsqu'elle se base sur des théories ou concepts et qu'elle se transforme en acte après leur mise en oeuvre. Jean FRAYSSINHES cite Oscar WILDE en disant que *"l'expérience est le nom que chacun donne à ses erreurs"* [Frayssinhes, 2019]. Cela sous-tend qu'elle est dépendante du temps, des situations, de pratiques répétées, d'essais-erreurs et qu'elle ne peut être transférée à une autre personne. Les compétences acquises par l'action et dont les résultats et performances atteignent un niveau d'exigence identifié peuvent ensuite être qualifiées d'expériences.

En dissociant et précisant ces termes, Jean FRAYSSINHES apporte un éclairage sur ce qui les différencie mais aussi sur ce qui les lie. Cela met en avant le fait que l'apprentissage est un processus complexe constitué de nuances et de concepts aussi différents que proches.

1.2.5 Connaissance et information

L'expertise de Anh NGUYEN-XUAN dans le domaine de la psychologie cognitive et de l'intelligence artificielle apporte un nouveau point de vue pour la compréhension des mécanismes de la cognition et de la connaissance.

Elle étudie le système cognitif humain comme *"un système de traitement de l'information"* [Nguyen-Xuan, 2021]. Pour cela elle explique qu'il est essentiel de définir certains concepts fondamentaux. Elle commence par celui d'*information*. Une information serait une donnée qui apporte de la connaissance. Elle est alors dépendante d'une situation, des acteurs qui y participent mais aussi de leurs connaissances préalables.

Bruno CHAUDET différencie les termes de donnée, information et connaissance qui font sens dans la définition précédente. Selon lui *"une donnée est un élément brut, qui n'a pas encore été interprété, mis en contexte"* [Chaudet, 2009]. Il poursuit en précisant qu'une donnée analysée, interprétée devient une information, ce qui ferait de la connaissance *"une information comprise, c'est-à-dire assimilée et utilisée, qui permet d'aboutir à une action"*. Il se base sur les travaux de NONAKA et TAKEUCHI (deux experts du *knowledge management*) pour dissocier la connaissance tacite et la connaissance explicite. Les connaissances tacites sont liées à l'expérience ou encore à l'intuition : *"elle n'est pas formalisée et difficilement transmissible"*. À l'inverse, les connaissances explicites sont *"formalisées et transmissibles"*.

Selon la théorie de la connaissance¹⁴, Edgar MORIN dit que *"la connaissance pertinente est celle qui est capable de situer toute information dans son contexte, et si possible dans l'ensemble où elle s'inscrit. [...] La connaissance progresse principalement [...] par la capacité à contextualiser et à globaliser.[...] La connaissance n'est connaissance qu'en tant qu'organisation mise en relation et en contexte des informations"* [Morin, 1999, Morin, 2011]. Cela rejoint les points de vue précédemment présentés sur la source de la connaissance. Cepen-

14. Philosophie de la connaissance.

dant, ici il n'y aurait qu'un type de connaissance alors que Bruno CHAUDET en présente deux.

Par ailleurs, Anh NGUYEN-XUAN fait le lien entre connaissances et mémoires. Elle cite notamment les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales en lien avec les mémoires de même nature, tandis qu'on pourrait ajouter la notion de connaissances épisodiques qui sont constituées de souvenirs des événements vécus avec leur contexte (date, lieu, état émotionnel).

1.2.6 Connaissance et cognition : conclusion

Après avoir exploré différents points de vue et aspects de la connaissance dans le contexte de la cognition, sans réduire les choses à une vision unique et restreinte, chaque apport a permis de cheminer vers une compréhension plus globale de ce qui est impliqué dans l'apprentissage humain.

De plus, il est possible d'identifier des points communs à ces divers points de vue. Qu'il s'agisse du couple signifiant/signifié ou sujet/objet, il y a dans les deux cas une dualité : dualité entre le concept associé au signe et la forme ou aspect du signe, versus dualité entre le sujet qui construit une connaissance sur l'objet. Cette dualité est liée par une relation, qui définit un processus ou une structure qui permet la formalisation de la connaissance, d'un sujet par rapport à un objet, ou de la méta-connaissance sur la connaissance du sujet. Cette observation pousse à considérer l'intérêt du formalisme ontologique pour modéliser les concepts introduits dans ce rapport : il est question de représenter des relations binaires entre ces concepts. L'environnement peut aussi être interprété comme la réalité externe à l'individu. D'autre part, un accord est trouvé sur le caractère individuel de la connaissance, qu'elle soit influencée par la pensée au sens d'états mentaux ou par la croyance. Par ailleurs, elle se construit et peut évoluer dans le temps.

Au cours de cette réflexion, l'implication des fonctions mentales dans la connaissance et la cognition a souvent été mentionnée mais jamais précisée. Par exemple, Anh NGUYEN-XUAN décline le concept de connaissance selon les différents types de mémoires. Il paraît donc pertinent à présent de définir les différentes fonctions mentales qui constituent la cognition et qui sont impliquées dans le processus d'apprentissage humain. Cela permettra également de comprendre le lien que fait Anh NGUYEN-XUAN entre connaissance et mémoires.

D'autre part, la présentation phénoménologique de ces notions contribue à l'élaboration d'une ontologie dans le but de pouvoir les manipuler formellement. Cette formalisation a été engagée par Lisa ROUX en 2020 [Roux *et al.*, 2020] dans le cadre de l'action exploratoire AIDE. Toujours dans ce cadre, Chloé MERCIER révisé et poursuit le travail initié [Mercier *et al.*, 2021b].

1.3 La cognition : les fonctions mentales

Les fonctions mentales ou processus cognitifs sont à l'origine du traitement de l'information permettant, entre autres, l'apprentissage. Le processus de traitement de l'information concerne aussi bien la perception de l'information que son analyse ou encore son traitement à travers les différentes mémoires.

1.3.1 La perception

Selon Alain LIEURY, la perception *"désigne l'ensemble des mécanismes neurobiologiques et psychologiques dont la fonction est la prise d'information dans l'environnement ou dans l'organisme lui-même"* [Lieury, 2017]. Cette définition rejoint le point de vue de la psychologie cognitive. Selon Marianne HABIB et ses collaborateurs, la perception *"correspond à l'activité cognitive par laquelle l'être humain prend connaissance de son environnement, c'est-à-dire par laquelle il reçoit et interprète les informations qui l'entourent"* [Habib *et al.*, 2018]. Afin d'être traitées par le système cognitif, les informations doivent tout d'abord être perçues afin d'atteindre l'étape finale qui est la représentation mentale.

Une représentation correspond à *"une unité symbolique construite et stockée dans le système cognitif. Toute information stockée dans le système cognitif est une représentation. Un même objet peut donner lieu à une multitude de représentations : représentation imagée, représentation verbale, représentation perceptive..."* [Habib *et al.*, 2018]. Les représentations perceptives englobent plusieurs types de représentations liées à la perception par les sens. Elles peuvent être liées aux perceptions d'un seul sens (une seule modalité) ou être multi-modales en associant plusieurs perceptions sensorielles.

La perception est possible grâce à l'existence de différents récepteurs sensoriels qui permettent de percevoir les stimulations aussi bien externes qu'internes. Une stimulation (ou stimulus) correspond à *"tout élément extérieur, c'est-à-dire appartenant au monde physique, qui a le pouvoir d'exciter des récepteurs spécifiques d'une modalité sensorielle donnée"* [Habib *et al.*, 2018]. Les systèmes

sensoriels sont en fait les sens. Chaque sens bénéficie d'une modalité sensorielle particulière d'entrée (visuelle, auditive, tactile, gustative ou encore olfactive) servant à percevoir des stimuli. La perception est alors dépendante de la sensation, c'est-à-dire des récepteurs sensoriels qui reçoivent le stimulus de l'environnement extérieur. En cela, la perception peut être différente d'un individu à l'autre car les récepteurs sensoriels sont individuels. Ainsi, un même stimulus pourra être perçu différemment par deux individus situés dans un même environnement externe.



FIGURE 1 – Les trois mondes de la cognition.

Cette figure est la traduction d'un schéma réalisé par Frédéric ALEXANDRE [Alexandre, 2021]. Il représente les trois mondes impliqués dans les fonctions cognitives et par conséquent dans l'apprentissage. La perception est donc incarnée (*embodied*).

De plus, Frédéric ALEXANDRE met en avant les relations qui existent entre l'environnement externe, l'environnement interne et le corps, un troisième monde à la frontière des deux précédents. Il explique qu'il est essentiel de prendre en compte ces trois mondes (cerveau, corps, environnement) pour étudier les fonctions cognitives [Alexandre, 2021].

Dans la figure 1, Frédéric ALEXANDRE montre que l'apprenant n'est pas seulement constitué d'un cerveau en interaction avec un environnement externe

mais qu'il est aussi un corps grâce auquel l'environnement interne est en relation avec l'environnement externe. L'extéroception est composée de la perception et la proprioception¹⁵. Elle permet au corps d'interagir avec le monde externe et s'exprime par des réponses externes. Quant à elle, l'interoception permet au corps de ressentir les états internes ce qui déclenche des réponses internes.

La personne est alors constituée d'un système cerveau + corps (agissant et apprenant) présent dans l'environnement externe. Les états internes représentent les besoins de cette personne se manifestant dans l'environnement interne du corps. C'est le flux d'informations sensorielles et motrices entre ces mondes qui permet la satisfaction des besoins¹⁶.

Cela fait sens avec la notion de récepteurs sensoriels mentionnée précédemment. En effet, les récepteurs à l'origine de la perception se situent sur le corps étendu et permettent de recevoir les stimuli envoyés par les objets ou agents présents dans l'environnement externe. D'autre part, l'environnement interne peut également transmettre des stimuli par le biais de sensations perçues dans le corps interne (interoception). Ces stimuli peuvent correspondre à des besoins fondamentaux en lien avec le fonctionnement homéostatique du corps interne. Les émotions sont des réponses à ces stimuli internes ou externes. Elles sont également impliquées dans l'apprentissage (ces notions seront abordées plus en détails par la suite).

Par ailleurs, la figure 2 montre qu'il existe deux types de traitement d'un stimulus. En effet, il peut être *bottom-down* (ascendant) ou *top-down* (descendant). Dans le premier cas, "*les traitements sont guidés par la stimulation, l'environnement, qui y trouvent leur origine*" alors que dans le second, les traitements "*sont guidés par les connaissances de l'individu, ils trouvent donc leur origine dans les connaissances préalablement apprises de l'individu*" [Habib et al., 2018].

Les auteurs précisent qu'un processus cognitif fait appel aux deux types de traitement dans la plupart des cas mais à différents niveaux. Ce dernier peut être qualifié de "haut niveau" dans le cas où le traitement est majoritairement *top-down*. La quantité d'opérations mentales est alors importante et plus elle l'est, plus le niveau d'élaboration est haut car il fait appel aux connaissances préalables de l'apprenant. A l'inverse, le traitement *bottom-down* est majoritairement basé

15. Perception de son propre corps.

16. "*Altogether, this defines the sensory and motor information flows of a brain + body system, acting and learning in the external environment to satisfy some needs, expressed as internal states*" [Alexandre, 2021].

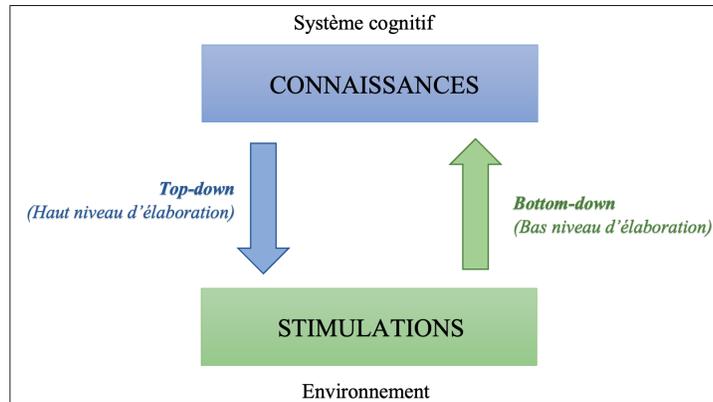


FIGURE 2 – **Traitement des stimuli (élaboration).**

Ce schéma est inspiré d'une figure réalisée par Marianne HABIB et ses collaborateurs [Habib *et al.*, 2018]. Il représente les deux types de traitement pouvant être appliqués lors d'un processus cognitif.

sur l'environnement et les stimulations ce qui réduit le nombre d'opérations mentales. Il est donc associé, la plupart du temps, à un bas niveau d'élaboration. Dans tous les cas, c'est le nombre d'opérations mentales impliquées dans le processus qui détermine le niveau d'élaboration.

Cela vient appuyer le fait qu'un stimulus peut être perçu différemment d'un individu à l'autre puisque son traitement peut être influencé par des connaissances préalables.

D'autre part, les traitements perceptifs peuvent différer selon l'intention. Lorsqu'il s'agit de reconnaître un objet, le système cognitif met en lien "*une représentation perceptive de l'objet (qui n'a pas encore de signification) avec des informations contenues en mémoire sémantique et épisodique*" [Habib *et al.*, 2018]. Les auteurs précisent qu'il n'est pas toujours nécessaire de reconnaître un objet pour pouvoir agir dessus. De plus, les traitements perceptifs servant à la reconnaissance d'un objet seraient indépendants de ceux qui guident l'action.

Il existe différents types de percepts qui intègrent plusieurs modalités autres que les modalités sensorielles. C'est le cas dans la perception de l'espace, du temps et de la quantité qui interagissent entre elles. En effet, des expérimentations ont montré que la perception de la quantité était liée à la perception de l'espace "*observables sur les réponses motrices des sujets*" [Habib *et al.*, 2018].

"Ces données comportementales sont appuyées pas des études d'imagerie cérébrale et électrophysiologiques qui ont pu mettre en évidence des bases physiologiques partagées pour le codage de la magnitude numérique et spatiale" [Habib *et al.*, 2018]. Par exemple, le cortex pariétal est impliqué à la fois dans ces bases et dans le guidage de l'action.

De même, la perception du temps et de l'espace sont liées car les représentations spatiales peuvent impacter la perception du temps.

Ces trois dimensions de perception sont donc liées les unes aux autres. Par conséquent, une modification de l'une pourrait engendrer des modifications sur les autres. Cela pourra s'observer par la modification de l'action effectuée en réponse (par exemple : augmentation ou diminution du temps de réaction).

Il existe d'autres dimensions de perception qui ne dépendent pas seulement des modalités sensorielles et qui peuvent intégrer "*des représentations proprioceptives, des informations contextuelles, des émotions, etc.*" [Habib *et al.*, 2018]. Par ailleurs, il est établi que l'action n'est pas seulement une réponse motrice (*output*) et que celle-ci peut également influencer les perceptions. L'action et la perception ne peuvent donc pas être envisagée indépendamment l'une de l'autre.

Ces notions permettent d'apporter un éclairage quant à l'interprétation des comportements de l'apprenant qui participe à une tâche de résolution de problème telle que CreaCube¹⁷. Il sera alors possible de mettre en lien les stimuli provoqués par la tâche et le comportement de l'apprenant lors de la perception de ces stimuli. Une ontologie établie sur cette base pourrait aussi permettre d'inférer les perceptions de l'apprenant compte tenu des observations recueillies. Les inférences faites à ce niveau ont pour but de permettre la modélisation de la personne apprenante pour mieux comprendre l'apprentissage [Mercier *et al.*, 2021b]. À plus long terme, elles pourraient permettre d'adapter la tâche en optimisant les éléments partagés avec l'apprenant, comme c'est le cas pour des applications avec des assistants algorithmiques portés par l'équipe du projet FLOWERS¹⁸ [Clément *et al.*, 2014b].

17. <https://creamaker.wordpress.com>

18. <https://flowers.inria.fr/research/kidlearn/>

1.3.2 L'attention

Les réactions comportementales observées dans les expériences précédemment citées en ce qui concerne l'étude de la perception, sont également liées aux processus attentionnels. En effet, l'attention est un processus cognitif spontané qui permet de trier les informations perçues (entrant dans le système cognitif) afin de ne pas surcharger le système cognitif en identifiant les informations pertinentes et utiles dans un contexte donné. Cependant, elle n'a pas qu'une fonction de triage. Pascale TOSCANI et ses collaborateurs rappellent le point de vue neuroscientifique qui propose trois fonctions principales avec des circuits identifiés : celui de l'alerte (ou vigilance), celui de filtrage (ou orientation) et celui du contrôle exécutif [Toscani *et al.*, 2017].

La vigilance permet une réaction rapide à un évènement en lien avec la noradrénaline (neurotransmetteur avec des effets accélérateurs sur l'organisme). Cette forme d'attention *"présente un rythme particulier, circadien, endogène, qui peut varier au cours des saisons et surtout qui peut être perturbé par nos activités quotidiennes"* [Toscani *et al.*, 2017]. Les fonctions cognitives utilisées dans les activités quotidiennes peuvent être moins efficaces et générer de la fatigue si le rythme de ces activités ne correspond pas au rythme personnel de vigilance. *"La fatigue générée altère particulièrement notre attention et notre mémoire"* [Toscani *et al.*, 2017]. À l'inverse, une sur-concentration (sur-sollicitation de l'attention) peut altérer le rythme personnel en perturbant le sommeil par exemple. Par ailleurs, cette forme d'attention permet une réaction rapide de l'individu en cas de stress.

La fonction de filtrage fait référence à ce qui a été abordé dans un premier temps concernant l'attention. En effet, cette fonction permet d'identifier les stimuli les plus pertinents en fonction des objectifs personnels. Cette fonction est aussi appelée orientation car le corps réagit spontanément (mouvement des yeux par exemple) en direction des stimuli repérés comme pertinents. Ce processus n'est pas intentionnel. Par ailleurs, il utilise différents filtres qui permettent justement de sélectionner les stimuli. Ils peuvent être innés (formes, couleur, mouvements), en lien avec des circuits neuronaux "pré-cablés" ou acquis (appris par l'expérience, par exemple le prénom), grâce à l'apprentissage. Ainsi, l'attention se façonne au cours du temps en fonction de l'environnement et des expériences. De plus, *"le détournement volontaire de l'attention et la gestion des distracteurs"*

va s'acquérir progressivement à partir de 4-6 mois. La capacité d'orienter son attention se développe conjointement avec l'acuité des sens durant la première année puis de façon continue de l'enfance à l'adolescence" [Toscani et al., 2017]. Par conséquent, il est possible de dire que l'apprenant ayant pour objectif de résoudre une tâche sera capable de diriger volontairement son attention sur la tâche et d'identifier les éléments qui la constituent. Ces capacités pourront varier d'un apprenant à l'autre en fonction de l'âge, de l'environnement, de l'expérience et des connaissances préalables.

L'attention exécutive "*permet de réguler notre attention en sélectionnant des processus mentaux. Il peut faire appel à la conscience et programmer dans le temps nos fonctions cognitives (telles que la mémoire de travail, la flexibilité cognitive et l'inhibition cognitive qui permet la gestion des conflits cognitifs*" [Toscani et al., 2017]. Ce processus se différencie du premier car il est conscient¹⁹, c'est-à-dire intentionnel. L'apprenant peut alors choisir de diriger son attention vers certains stimuli identifiés comme utiles à la résolution de la tâche. Cette forme d'attention se différencie de la fonction de filtrage par son action plus lente en raison de l'implication des régions préfrontales du cerveau, plus éloignées des régions dédiées aux perceptions, qui sont plutôt dans les zones pariétales. Elle peut cependant "*influencer la perception [...] en créant des biais de filtrage, en forçant la recherche de certaines caractéristiques*" [Toscani et al., 2017], qui est un exemple de processus top-down précédemment cité.

Pascale TOSCANI rappelle, par ailleurs, que l'attention et la mémorisation se développent ensemble. Elle cite cet exemple : "*en agissant sur la perception, l'attention va influencer sur l'encodage du contexte des souvenirs et inversement le contexte associé à un souvenir va influencer la façon d'y être attentif lors du rappel*" [Toscani et al., 2017]. L'influence qu'elle aborde concerne à la fois la mémoire à long terme et la mémoire de travail en augmentant le nombre d'éléments conservés durant quelques secondes. Cela permet "*ainsi de garder en tête les objectifs à poursuivre, les projets à mener et les informations qui s'y rapportent*" [Toscani et al., 2017].

19. Du point de vue cognitiviste, la conscience se scinde en deux formes : "*D'une part, la conscience « cognitive », caractérisée par sa référence (« intentionnalité ») à des objets « réels » ou abstraits, mettant en jeu des langages, des calculs, des formes de mémoire et de prospection à long terme, associée à des comportements orientés; d'autre part, la conscience comme vécu, expérience subjective caractérisée de façon unique non pas par un objet mais par ses propriétés intrinsèques, sa qualité.*" [Delacour, 2001]

L'attention a cependant des limites. En effet, Pascale TOSCANI cite la distraction et la cécité inattentionnelle comme ces limites, opposées l'une de l'autre : *"d'un côté l'hyperdistractabilité nous rend inapte à une tâche donnée mais nous permet d'accueillir toutes les sollicitations et de l'autre côté l'hyperfocalisation nous permet d'être efficaces sur la tâche mais aveugles à ce qui nous entoure"* [Toscani et al., 2017].

Par ailleurs, Patrick LEMAIRE explique que les ressources attribuées à l'attention sont limitées ce qui implique de ne pouvoir la distribuer que sur un nombre très limité de tâches. Il évoque la possibilité d'automatiser des processus par l'apprentissage. Ainsi la répétition de certains processus peuvent amener à l'automatisation de celui-ci (la conduite par exemple). Cela permet alors de distribuer les ressources attentionnelles différemment d'une tâche à l'autre puisque un processus automatisé demande beaucoup moins de ressources attentionnelles. Pour éviter une surcharge du système cognitif, il est recommandé de répartir les ressources attentionnelles au cours du temps. Par exemple, il sera possible de combiner un processus automatisé et un non automatisé (la conduite et tenir une conversation par exemple) sur une même période mais il y aura une surcharge du système cognitif si les deux tâches en cours ne sont pas automatisées (lire un manuel et tenir une conversation par exemple) [Lemaire et Didierjean, 2018]. De plus, Pascale TOSCANI rejoint ce point de vue et précise que cette répartition des ressources attentionnelles est appelée la flexibilité attentionnelle et qu'elle *"permet de basculer d'une tâche à l'autre"* [Toscani et al., 2017] dans la mesure où une part de ces tâches est automatisée. L'autrice précise que *"les tâches en concurrence doivent être maintenues en mémoire de travail, ce qui implique une charge cognitive supplémentaire"* [Toscani et al., 2017].

Ces limites impliquent donc de ne pas multiplier les consignes données à l'apprenant lors d'une tâche de résolution de problème. Dans le contexte de la tâche CreaCube (présentée en introduction), il est pertinent d'énoncer la consigne avant même de présenter les cubes qui serviront à la résoudre afin de ne pas multiplier les stimuli et de ne pas surcharger le système cognitif de l'apprenant (écouter et comprendre la consigne + reconnaître les formes, les couleurs des cubes). La répartition de ces tâches au cours du temps permettra à l'apprenant de mieux appréhender le problème à résoudre dans son environnement.

1.3.3 Les mémoires

Les stimuli perçus dans l'environnement externe et interne grâce au corps sont identifiés et filtrés par le processus attentionnel. Ce sont les premières étapes du traitement de l'information. À plusieurs reprises, l'implication de la mémoire dans les différents processus abordés précédemment a été citée. En effet, le stockage des informations identifiées et filtrées est rendu possible grâce à la mémoire. La durée du stockage est différente selon le type de mémoire engagée. Il est admis qu'il n'existe pas une mais des mémoires caractérisées par la durée de stockage mais aussi par les régions cérébrales engagées et le type de traitement qui s'y effectue. Il est alors question de mémoire à court terme et de mémoire à long terme qui sont elles-mêmes différenciées en d'autres "sous-types" de mémoire.

Les mémoires à court terme et mémoire de travail

Généralités

D'après Marianne HABIB, la mémoire à court terme "*concerne l'ensemble des processus permettant de maintenir active et de manipuler l'information nécessaire aux activités courantes ici et maintenant*" [Habib et al., 2018]. Elle différencie 3 types d'informations qui alimentent la mémoire à court terme : l'information perçue par les modalités sensorielles, l'information issues de la mémoire à long terme (expériences antérieures) et l'information résultant des activités cognitives ayant lieu au sein même de la mémoire à court terme. Ces informations peuvent être utilisées pour raisonner par exemple ou être dirigées vers la mémoire à long terme afin d'être mobilisée ultérieurement. La mémoire à court terme est une fonction cognitive capitale car elle intervient dans toutes les autres fonctions même si sa durée de stockage est de l'ordre de quelques secondes. Cela est représenté dans la figure 3.

Dans la littérature, les termes "mémoire à court terme" et "mémoire de travail" sont souvent utilisés indifféremment. Cependant, le premier fait référence à la durée de stockage de l'information en mémoire. La mémoire de travail est "à court terme" puisque les informations y sont stockées seulement quelques secondes. Par ailleurs, il est aussi question de "mémoire perceptive" qui n'est pas toujours différenciée. Ces divergences ne mettent pas en doute le fonctionnement mnésique à court terme mais plutôt des différences de classifications des notions.

Ici, le choix est fait de considérer la mémoire perceptive et la mémoire de

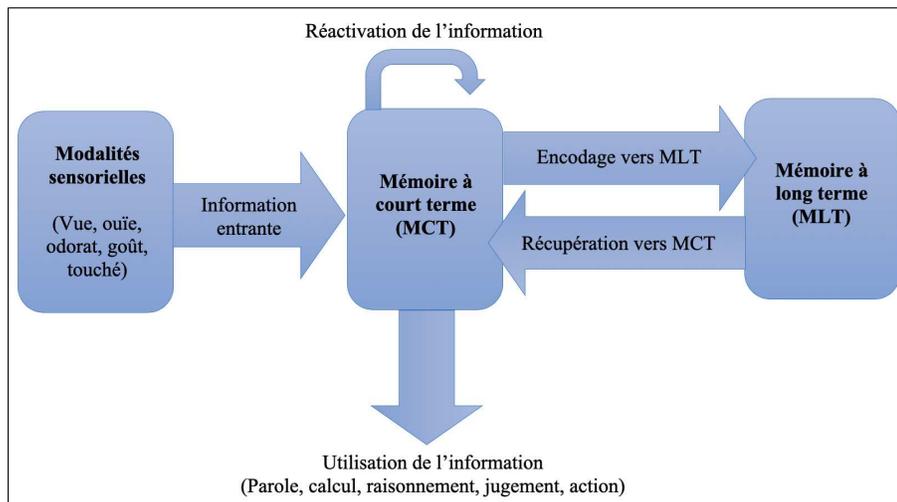


FIGURE 3 – **Modèle de fonctionnement de la mémoire.**

Cette figure est une reproduction du schéma de Marianne HABIB [Habib *et al.*, 2018]. Il représente le fonctionnement général de la mémoire.

travail comme des mémoires à court terme. Cela permettra de rendre plus clair les étapes de traitement de l'information.

Mémoire perceptive

La mémoire perceptive est, comme son nom l'indique, liée à la perception, aux modalités sensorielles. Elle se différencie donc selon ces cinq modalités. Cela est représenté dans la figure 4. Elle permet de garder pendant un très court instant les stimuli sensoriels afin de pouvoir les traiter ensuite dans la mémoire de travail. Elle fonctionne de manière automatique, à l'insu de l'individu²⁰.

Elle permet de mémoriser ce qui résulte de la perception sans forcément en connaître la signification (qui résulte de la mémoire sémantique). D'après Joseph STORDEUR cette mémoire est implicite et *"garde assez rapidement une trace de tout percept rencontré. C'est ce qui est qualifié de phénomène d'amorçage. C'est-à-dire que la présentation initiale d'un percept [...] facilite la reconnaissance ultérieure de ce percept, même dans un contexte plus complexe"* [Stordeur, 2014]. Il est alors possible de dire qu'elle interagit avec la mémoire sémantique et épisodique.

20. <https://www.inserm.fr/dossier/memoire/>

Lisa ROUX [Roux *et al.*, 2020] évoque la perceptive (ou mémoire sensorielle) comme le lieu où sont encodées les informations entrantes. C'est seulement lorsque ces informations sont filtrées comme utiles qu'elles peuvent être stockées dans la mémoire de travail.

Mémoire de travail

Lisa ROUX précise que la mémoire de travail (mémoire opérationnelle) ne se limite pas à un stockage d'informations limité dans le temps mais aussi au traitement de celles-ci. Cette dernière "*permet de conserver les informations utiles aux traitements impliqués dans la réalisation de la tâche, en les mettant à jour au fur et à mesure de la progression*" [Roux *et al.*, 2020].

Pascale TOSCANI fait le même constat. Cette dernière serait "*caractérisée par une rétention très limitée, une capacité réduite (empan²¹ entre 5 et 9 éléments à*

21. En psychologie cognitive, "*l'empan est la quantité limitée d'informations (mots, chiffres etc.)*

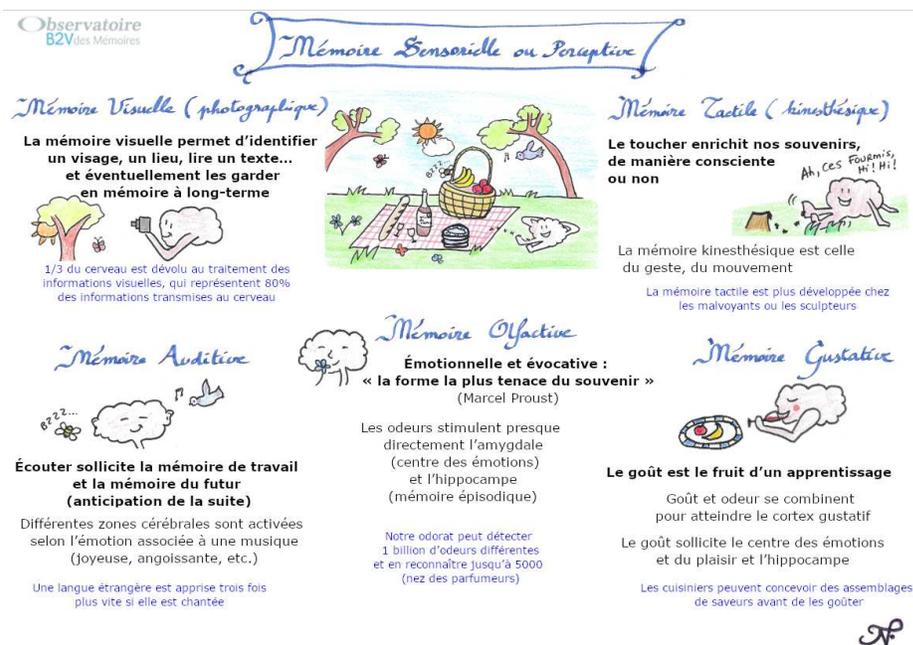


FIGURE 4 – Mémoire Perceptive selon les 5 modalités sensorielles.

Cette figure est un schéma réalisé par l'Observatoire B2V des mémoires^a. Il représente la mémoire perceptive selon les cinq modalités sensorielles.

a. <https://www.observatoireb2vdesmemoires.fr/decouvrir/la-memoire-individuelle/la-memoire-perceptive>

traiter en même temps) et une sensibilité aux interférences (bruits...)" [Toscani et al., 2017]. Selon l'auteur, la mémoire de travail serait considérée comme "un système cognitif qui sert à réaliser des tâches plus complexes comme calculer, comprendre, comparer, décider, identifier, résoudre, vérifier... [...] elle mobilise des ressources attentionnelles importantes" [Toscani et al., 2017].

Par ailleurs, Éric TARDIF explique que la mémoire de travail se développe au cours des années en lien avec la maturation du système nerveux central, au delà du développement cognitif et donc en lien avec les développements neurologiques. Au cours de ces derniers, la perte d'informations entre l'encodage d'une information et son rappel serait diminuée, la capacité de stockage serait augmentée ainsi que la vitesse de traitement²² [Tardif et Doudin, 2016].

Les mémoires à long terme

Marianne HABIB indique que contrairement à la mémoire à court terme, la mémoire à long terme permet le stockage d'informations durant plusieurs années, voire tout au long de la vie (pour un souvenir ayant eu un fort "impact" émotionnel par exemple ou qui a été sollicité par le rappel avec des traces mnésiques fortes). Il n'est pas non plus possible de fixer une limite quantitative à la capacité de stockage de ce type de mémoire²³. Elle distingue trois types de mémoire à long terme : la mémoire procédurale, la mémoire sémantique et la mémoire épisodique.

La mémoire procédurale

D'après Marianne HABIB, la mémoire procédurale permet le stockage des savoir-faire. Pascale TOSCANI précise que ce type de mémoire "*s'acquiert par répétition d'une tâche*" [Toscani et al., 2017]. Ces savoir-faire sont acquis à la suite de "*procédures motrices*" [Habib et al., 2018] et permettent d'effectuer diverses activités. C'est une mémoire implicite et non déclarative, c'est-à-dire qu'elle est automatique et qu'il est difficile d'expliquer une activité qui utilise la mémoire procédurale (faire du vélo, marcher, conduire...). Son caractère automatique lui permet de ne pas mobiliser beaucoup de ressources cognitives. Comme évoqué lors de

qui peut être stockée dans la mémoire à court terme". [Miller, 1956]

22. La capacité de stockage augmente principalement entre 3 et 8 ans puis plus lentement jusqu'à l'âge adulte (jusqu'à 4 ou 6 items entre 3 et 8 ans et jusqu'à 7 items à l'âge adulte). Quant au traitement des informations, la période qui compte la plus grande évolution est entre 6 et 13 ans [Tardif et Doudin, 2016].

23. Il y a la possibilité que d'anciens souvenirs soient remplacés par des nouveaux. La durée de stockage serait alors influencée par la capacité de stockage dans ce cas, mais ce n'est pas prouvé.

la définition du concept d'attention, les ressources cognitives ou ressources attentionnelles pouvant être mobilisées simultanément sont limitées. Ainsi il est difficile de cumuler des tâches à moins que l'une de ces tâches soit une activité "automatique" (relevant de la mémoire procédurale).

La mémoire sémantique

Pascale TOSCANI explique que la mémoire sémantique "*permet de relier des connaissances les unes aux autres pour leur donner du sens*" [Toscani et al., 2017]. Selon Marianne HABIB, les informations stockées dans la mémoire sémantique ne sont pas liées à un contexte (lieu ou période) et sont abstraites. C'est une mémoire explicite et déclarative car il est possible de mettre des mots sur les informations stockées [Habib et al., 2018] (être capable de définir un mot et de faire le lien avec des informations qui s'y rapportent, par exemple). Éric TARDIF dit que "*la mémoire sémantique constitue notre répertoire de connaissances du monde*" [Tardif et Doudin, 2016]. Quant à elle, Marianne HABIB la qualifie comme "*une sorte de dictionnaire (des noms communs et des noms propres)*" [Habib et al., 2018]. Par ailleurs, Joseph STORDEUR précise que "*pour bien fonctionner, la mémoire sémantique doit être organisée, hiérarchisée, structurée*" [Stordeur, 2014]. Selon lui, c'est essentiel afin de pouvoir accéder efficacement aux connaissances qui y sont stockées.

La mémoire épisodique

Selon Marianne HABIB, la mémoire épisodique stocke les événements et serait liée au temps et à l'espace. Elle est déclarative, explicite. Éric TARDIF ajoute que la mémoire épisodique peut être accidentelle ou volontaire [Tardif et Doudin, 2016]. De plus, les souvenirs qui y sont stockés "*ont une structure narrative (avec un début, un milieu et une fin) et font appel à la représentation mentale*" [Habib et al., 2018]. L'autrice précise que cette représentation mentale est fonction des perceptions sensorielles et des émotions. "*La composante affective est étroitement liée à la mémoire épisodique, et des souvenirs associés à des affects sont plus robustes que des souvenirs neutres (non affectifs)*" [Habib et al., 2018]. Cela s'oppose aux deux autres types de mémoire à long terme pour lesquelles les émotions n'ont pas ou peu d'influence. Par ailleurs, la mémoire épisodique permet de revivre consciemment une expérience ainsi que les sensations et affects associés.

Interactions entre mémoire épisodique et sémantique

D'autre part, l'auteur mentionne le fait que les mémoires épisodique et sémantique sont dépendantes l'une de l'autre et fonctionnent ensemble. En effet, par ses expériences, l'individu va acquérir des connaissances sémantiques en associant des mots à ces expériences. Ces connaissances sémantiques peuvent être acquises par généralisation de certaines propriétés partagées par un élément. *"Ce processus de généralisation fait appel à ce qu'on appelle l'induction, une forme de raisonnement à laquelle l'esprit humain fait fortement appel. Ce processus d'induction permet à l'esprit humain de créer des catégories sémantiques, basées sur un mécanisme de généralisation des propriétés"* [Habib et al., 2018]. Cela permet d'économiser les ressources cognitives. Quant à elle, la mémoire épisodique fait aussi appel à la mémoire sémantique pour mettre du sens sur les événements vécus. *"Ces connaissances [sémantiques] permettent de qualifier le souvenir, de lui donner de la substance, et de le rendre intelligible"* [Habib et al., 2018].

Joseph STORDEUR fait référence à la mémoire épisodique lors de l'apprentissage. Il explique qu'il est possible de rappeler à l'apprenant une situation vécue afin de l'aider à résoudre un problème. L'apprenant va alors puiser dans sa mémoire épisodique (en association avec la mémoire sémantique) afin de transposer ce qu'il a déjà appris lors d'une précédente tâche [Stordeur, 2014]. Par ailleurs, Pascale TOSCANI explique que la mémoire épisodique ne peut être sollicitée avant l'acquisition du langage car, pour cela, l'individu doit être capable *"d'évoquer ses souvenirs avec le langage"* [Toscani et al., 2017]. Cela serait corroboré par "l'amnésie infantile" (les individus auraient très peu de souvenirs datant d'avant l'âge de 5 ans).

La figure 5 représente une synthèse des interactions entre les différentes mémoires selon le modèle MNESIS. Elle est décrite en détail par Olivier HOUDÉ. Pour commencer, il explique que la mémoire de travail, au centre de ce modèle, *"comprend des composantes spécifiques au traitement du matériel verbal (la boucle phonologique), visuo-spatial (registre visuo-spatial), multimodal (buffer épisodique), le tout coordonné par l'administrateur central"* [Houdé et al., 2018]. Ces différents éléments constituant la mémoire de travail sont impliqués dans l'apprentissage procédural et dans l'actualisation de la mémoire procédurale chargée de stocker les constituantes des apprentissages procéduraux (cognitif, perceptivo-verbal, perceptivo-moteur). La mémoire de travail intervient aussi dans *"le fonctionnement des systèmes de mémoire manipulant des repré-*

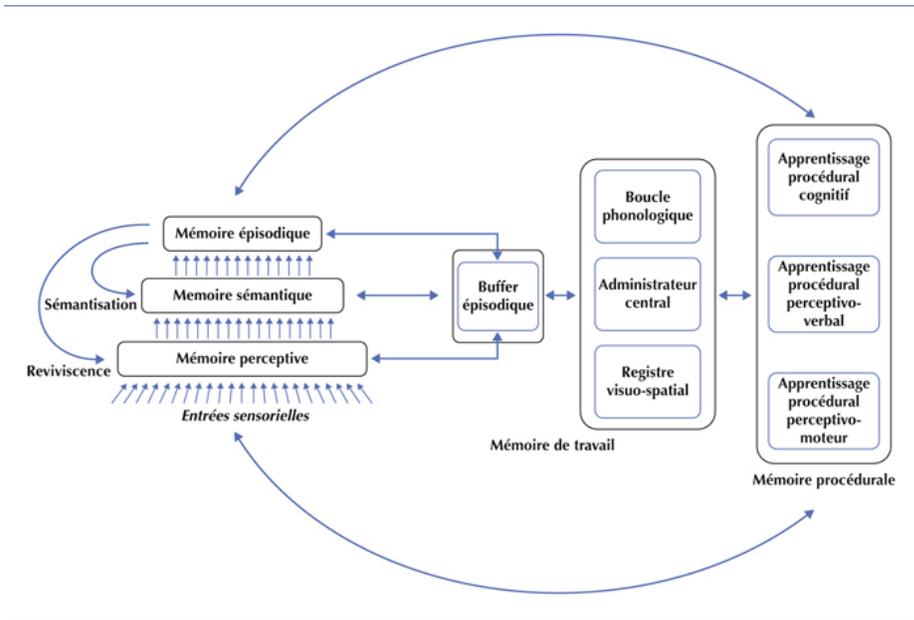


FIGURE 5 – Les interactions des différentes mémoires.

Cette figure est issue du modèle Modèle NEo-Structural Inter-Systémique (MNESIS) de Alan BADDELEY. Elle a été reproduite par différents auteur(e)s et notamment par Olivier HOUDÉ [Houdé *et al.*, 2018].

sentations mentales : la mémoire perceptive, la mémoire sémantique [...], et la mémoire épisodique". L'auteur précise que pour stocker un souvenir dans la mémoire épisodique, il est nécessaire de passer par les mémoires perceptive et sémantique afin d'encoder les percepts et la signification. Par ailleurs, il explique que *"les souvenirs peuvent se sémantiser au fil du temps, notamment via la répétition et devenir une connaissance"* [Houdé *et al.*, 2018] (comme pour les apprentissages par exemple). À l'inverse, *"d'autres souvenirs resteront très vivaces, émaillés de nombreux détails perceptivo-sensoriels et rappelés avec un sentiment de reviviscence"* [Houdé *et al.*, 2018].

La mémorisation

Le processus de mémorisation mobilisant les différents types de mémoires agissant en réseau, il est intéressant de présenter une synthèse de ces mémoires avec leur localisation, avant d'aborder plus précisément leurs interactions et le fonctionnement de la mémorisation. La figure 6 synthétise les principaux éléments abordés précédemment et précise les zones cérébrales impliquées pour chacune

des fonctions mnésiques.

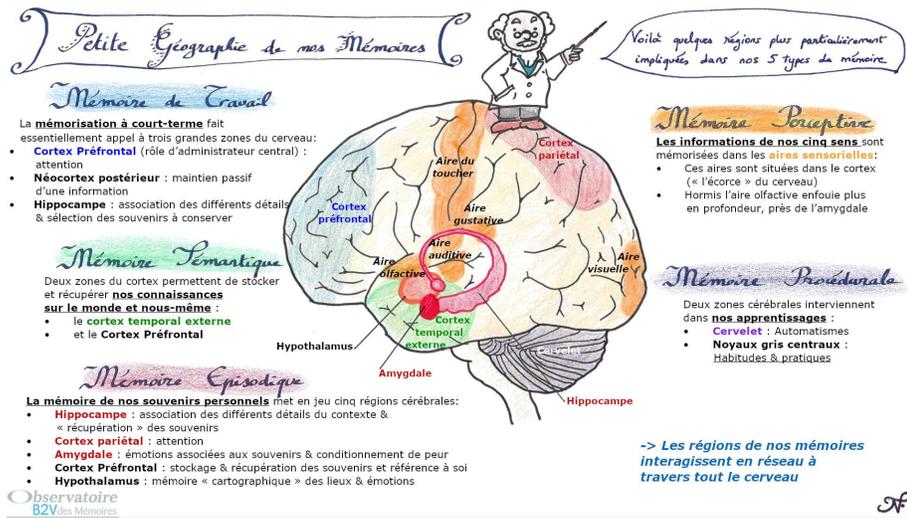


FIGURE 6 – Les mémoires et leurs localisations.

Cette figure est issue de l'Observatoire B2V^a des mémoires. Elle cite les différentes mémoires, localise les zones cérébrales impliquées et rappelle les fonctions de chacune.

a. <https://www.observatoireb2vdesmemoires.fr/le-fonctionnement-de-la-memoire>

Jean-Philippe ABGRALL [Abgrall, 2012] et Patrick LEMAIRE [Lemaire et Didierjean, 2018] citent quatre étapes dans le processus de mémorisation :

1. **L'encodage** est la première étape. Elle concerne la transmission de l'information "par l'hippocampe à un ou plusieurs lobes spécialisés qui vont la traiter et en faire une 'trace mnésique' : un circuit nerveux dans le cerveau" [Abgrall, 2012]. L'auteur précise que la précision de l'encodage détermine la profondeur de la trace mnésique. Plus la profondeur est importante, meilleur est l'enregistrement de l'information. Par ailleurs, il évoque que la profondeur de la trace mnésique est une fonction croissante de l'état émotionnel²⁴ et de la motivation au moment de l'encodage. Grzegorz MARKOWSKI définit l'encodage comme "le traitement et l'élaboration de l'information pour en créer un véritable souvenir ou encore le traitement

24. dans une certaine mesure car des états émotionnels trop violents peuvent aussi avoir l'effet inverse.

consistant à établir des associations d'idées, d'images, entre diverses informations qui permettront, à l'aide de ces liens mentaux, de retrouver une information"²⁵.

2. **Le stockage de l'information** se fait dans différentes zones du cerveau impliquées dans le processus de mémorisation en fonction du type de l'information. Ces zones sont toutes reliées à et par l'hippocampe. Un souvenir est donc composé de plusieurs éléments reliés entre eux par les traces mnésiques créées lors de l'encodage. L'auteur précise qu'en multipliant les types d'informations stockées (plusieurs modalités sensorielles à la fois qui sont chacune mémorisée dans les zones sensorielles correspondantes), les liens sont multipliés également ce qui rend plus facile la reconstitution du souvenir, non sans poser le problème du *binding*²⁶, c'est-à-dire de la mise en correspondance de plusieurs informations lors de la reconstitution de cette représentation distribuée.

3. **Le rappel ou restitution** est un processus qui peut être volontaire ou involontaire se produisant lors de la perception d'un indice impliqué dans l'encodage de l'information stockée. *"Plus un souvenir sera codé, élaboré, organisé, structuré, plus il sera facile à retrouver"*²⁷.

4. **L'oubli** est cité par l'auteur non pas comme une étape de mémorisation mais pour aider à la compréhension de l'étape du rappel. Il cite quatre théories concernant l'oubli : la théorie du déclin, de l'oubli motivé, de l'entrave et celle de l'interférence. La première concerne la dégradation de la mémoire au cours du temps par les processus biologiques, par l'absence de rappel, de réactivation des souvenirs provoquant ainsi la détérioration

25. <https://gerflint.fr/Base/Pologne1/types.pdf>

26. Le *binding* est une notion qui n'a pas de terme français équivalent mais qu'il est possible de définir. Selon Violette HOAREAU, *"le binding est un terme utilisé pour décrire le fait de relier différentes caractéristiques ou éléments en un même objet. Par exemple, si l'on présente une couleur rouge et une forme carrée sur un écran, ces deux éléments peuvent se regrouper simplement en un seul élément : un carré rouge. Ce terme peut également définir le fait de relier différents événements en un même épisode cohérent"* [Hoareau, 2018].

Par ailleurs, Franck BURGLÉN différencie le *binding* perceptif du *binding* mnésique. La définition précédente fait référence au premier et est automatique alors que le deuxième n'est pas automatique et a *"un coût cognitif"* [Burglen, 2005] plus ou moins supporté selon les caractéristiques de l'individu (âge ou pathologie par exemples). Il consiste en l'intention de mémoriser l'association de différentes informations. L'auteur cite une expérience ayant consisté à faire mémoriser à différents individus une image regroupant 3 images.

27. https://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_07/a_07_p/a_07_p_tra/a_07_p_tra.html

des traces mnésiques. La seconde concerne des mécanismes non intentionnels visant à oublier des souvenirs déplaisants. Ce mécanisme est très lié aux émotions. La troisième théorie concerne les informations qui n'ont pas suffisamment été encodées (insuffisance ou incorrection des indices) ou répétées. La dernière théorie fait référence aux souvenirs qui ne peuvent être récupérés car d'autres empêchent ce processus de récupération. C'est le cas lorsqu'un nouveau souvenir ne permet pas la mise à jour d'un souvenir plus ancien. Il va de soi que dans la réalité tous ces mécanismes sont susceptibles d'intervenir.

La figure 7 synthétise ce processus mémorisation et reprend ces étapes.

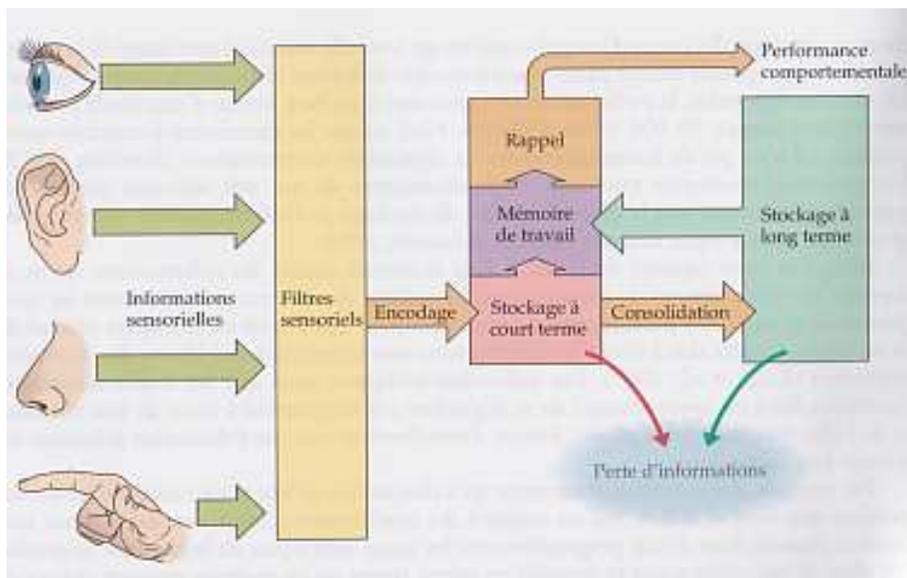


FIGURE 7 – **Processus de mémorisation.**

Cette figure est issue de l'ouvrage écrit par S. Marc BREEDLOVE [Breedlove *et al.*, 2012]. Elle présente les mécanismes de la mémorisation.

Compte-tenu de tous ces éléments concernant les mémoires, il est possible de dire qu'elles sont au centre des fonctions cognitives et par conséquent de l'apprentissage. Les différents types de mémoires sont mobilisés lors de l'apprentissage, à différents degrés. Cela permet de comprendre ce qui se joue dans une tâche de résolution de problème comme ici, CreaCube.

La mémoire de travail sera sollicitée tout au long de la tâche alors que les mémoires épisodique, procédurale et sémantique seront mobilisées à certains moments. Dans ce contexte, l'apprenant mobilisera sa mémoire sémantique pour comprendre et intégrer la consigne. Cette mémoire pourra être associée à la mémoire épisodique pour obtenir une représentation mentale de ce qu'est un véhicule et quelles en sont les composantes. La mémoire procédurale sera elle aussi sollicitée lors de la manipulation des cubes et des essais/erreurs.

Par ailleurs, dans cette partie, il va être question du langage, des fonctions motrices, du raisonnement et des émotions. Ces fonctions cognitives sont évidemment liées aux mémoires et impliquées dans le processus de mémorisation. Elles vont donc être abordées ensuite.

1.3.4 Le raisonnement

Selon Marianne HABIB, "*raisonner nous aide à comprendre et interpréter notre environnement, à faire des prédictions sur les événements et sur les comportements à venir et, in fine, à prendre des décisions*" [Habib et al., 2018]. Le raisonnement permet la compréhension et le contrôle de l'environnement. L'auteur cite trois types de raisonnement : abductif, inductif et déductif. Elle évoque également le raisonnement créatif.

Le raisonnement abductif

Selon Marcel KADOSCH l'analogie serait à l'origine de l'abduction, terme utilisé pour la première fois par PEIRCE. Il définit l'analogie comme "*le fondement de la possibilité de passage d'un terme à un autre sans négation d'un terme par le suivant. Elle a été définie comme une identité de rapports, pour la distinguer de la ressemblance qui serait seulement un rapport d'identité*" [Kadosch, 2019]. Il explique également que BATESON appelait (à tort) ce type de raisonnement "*sylogisme²⁸ de la métaphore*" [Kadosch, 2019]. Le "sylogisme de la métaphore serait une "*opération qui choisit dans des champs différents les traits qu'ils ont en commun*" [Kadosch, 2019].

Quant à Ji HAN, il définit l'analogie comme un processus cognitif utilisé pour produire des inférences ainsi que de nouvelles idées en utilisant les connaissances

28. Un syllogisme est un raisonnement mettant en jeu des prémisses (au moins deux) et une conclusion. Une proposition (prémisse) met en relation un sujet et un prédicat. Cependant, le terme syllogisme désigne plutôt un raisonnement déductif car il fait appel à la logique.

et l'expérience antérieures²⁹. Selon lui, la capacité de percevoir et d'utiliser la similitude relationnelle dans différents contextes sont les constituants de l'analogie. Il précise que ces constituants sont aussi fondamentaux dans la créativité en science et en art³⁰.

Dans son travail, l'auteur lie l'utilisation du raisonnement par analogie et l'utilisation d'ontologies pour étudier la créativité. Cet aspect pourra permettre l'approfondissement (plus loin dans ce document) de la notion d'ontologie qui est au coeur des travaux de l'action exploratoire AIDE.

Le travail de Ji HAN [Han *et al.*, 2018] fait apparaître la notion de "proximité" entre deux notions "analogues", essentielle à approfondir pour comprendre ce mécanisme d'analogie. Il semble qu'il faille tout d'abord distinguer³¹ la notion :

- de **similarité** sémantique (le cerveau regroupe les éléments qui paraissent semblables, c'est-à-dire partageant un certain nombre de propriétés tant descriptives que fonctionnelles) qui quantifie donc uniquement la différence entre les deux,
- de celle de **proximité** sémantique (le cerveau regroupe les éléments qui apparaissent souvent ensemble, qui sont proches dans une même zone perceptive), entre deux constituants.

Dans ce deuxième cas, il y a un ingrédient de plus, les constituants sont implicitement vus comme situés dans un espace abstrait : la distance entre ces deux constituants est associée à un plus court chemin qui permet de relier l'un à l'autre, quantifiant la proximité [Mercier *et al.*, 2021a].

Formellement ces deux notions sont liées³², en particulier, avec la notion de distance d'édition, qui se définit comme le nombre minimal d'opérations de transformation élémentaire pour passer d'un élément à un autre (par exemple, en changeant une valeur ou en ajoutant ou retirant un composant) [Mercier *et al.*, 2021a]. Le "coût" est donc défini en nombre d'opérations qui quantifie la proximité et un chemin minimal de transformation entre les deux constituants qui

29. "Analogy is a core cognition process used to produce inferences as well as new ideas using previous knowledge and experience" [Han *et al.*, 2018].

30. "Analogy is described as the ability to perceive and use relational similarity across different contexts, which is widely regarded as a fundamental component of creativity in science and art" [Han *et al.*, 2018].

31. Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Similarité_sémantique#Similarité_sémantique_vs._proximité_sémantique.

32. Au sens anglo-saxon la similarité (au delà de la similarité sémantique) est quantifiée comme quelque chose dont la valeur augmente lorsque la distance entre les deux éléments diminue : voir <https://en.wikipedia.org/wiki/Similarity>.

définit la proximité.

Avec cette notion spatialisée il est alors possible de parler d'analogie : deux concepts, éloignés dans l'absolu, peuvent être considérés comme analogues, dans deux contextes différents, si leur proximité *relative* à un constituant de référence de chaque contexte est forte.

Christian GEORGE cite PEIRCE comme l'auteur ayant analysé l'abduction : *"l'abduction est le processus de formation d'une hypothèse explicative[. Elle] infère à partir des faits d'une sorte des faits d'une autre sorte"* [George, 1997]. Ce type de raisonnement fait appel à l'activation de connaissances présentes en mémoire. Ces dernières doivent être exprimées sous la forme "Si A alors B" où A est un facteur absent des prémisses et B est le fait cible. Sans connaissance exprimée de cette manière, les hypothèses seront élaborées à partir d'autres connaissances *"ce qui peut entraîner le recours à divers subprocessus de raisonnement, notamment par spécification ou analogie"* [George, 1997]. Après le processus d'activation, c'est celui de l'évaluation de la plausibilité des hypothèses qui intervient afin d'identifier celle qui est la plus probable compte tenu des connaissances mobilisées. Si ces dernières ne permettent pas cette identification, alors *"c'est la cohérence interne de l'histoire, sa capacité à intégrer toutes les informations en une séquence crédible, qui devient l'indicateur de la plausibilité de la cause invoquée en conclusion"* [George, 1997].

Le raisonnement abductif est aussi appelé raisonnement hypothétique car le produit de ce raisonnement est une hypothèse. En effet, un individu face à un événement pour lequel il connaît l'une des causes possibles et pour lequel il privilégie une cause plutôt qu'une autre relève du raisonnement abductif. Marianne HABIB donne l'exemple suivant : *"par exemple, un médecin observe qu'un patient tousse (= événement observé). Il sait que le rhume (= cause possible) provoque la toux. Il conclut que le patient a un rhume (= rhume cause toux)"* [Habib et al., 2018]. Or, ceci n'est qu'une hypothèse (hypothèse de cause à effet), une cause possible parmi d'autres qui a été privilégiée car il est plus probable d'être atteint d'un rhume que d'être atteint d'un cancer du poumon lorsque le symptôme est une toux³³. Ce raisonnement implique le principe de parcimonie : *"l'hypothèse*

33. C'est ce qui est formalisé dans le théorème de Bayes utilisé dans la théorie de la décision : *"Le théorème de Bayes vise à calculer les probabilités a posteriori d'un événement en fonction des probabilités a priori de cet événement. A priori et a posteriori s'entendent par rapport à la connaissance d'une information"* http://tecaetu.unige.ch/staf/staf-h/voisard/staf17/projet/cours/cours_4.pdf. Ici on se sert de nos connaissances a priori sur la fréquence des rhumes et des cancers du poumon.

la plus simple est la plus probable" [Habib et al., 2018]. Ce type de raisonnement est utilisé de manière quotidienne par un individu et implique une recherche en mémoire soit épisodique en essayant de rapprocher l'épisode actuel à un épisode déjà vécu, soit sémantique en essayant d'appliquer de manière inductive, comme discuté plus loin.

Par ailleurs, Simone MORGAGNI précise que *"les affordances émergent lors d'un processus global d'abduction"* [Morgagni, 2011]. Elle cite la définition de GIBSON selon laquelle une affordance désignerait *"toute possibilité d'interaction offerte aux sujets par leur environnement"* [Morgagni, 2011]. Lisa ROUX rejoint cette définition qu'elle complète (en référence à la définition de Donald NORMAN³⁴). Selon elle, l'apprenant découvre des potentialités dans son environnement matériel *"en lien avec les connaissances générales préalables dont il dispose"* [Roux et al., 2020]. La notion de connaissance préalable est fondamentale pour le concept d'affordance car c'est ce qui permet de les détecter. En effet, sans ces connaissances l'apprenant ne peut pas détecter d'affordances. De plus, l'évolution de ces connaissances peut également permettre la détection de nouvelles affordances. De plus, l'auteurice précise que les affordances *"participent à constructions des traces mémorielles, puisque ce sont elles qui lui [l'apprenant] permettent de découvrir, peu à peu, son environnement matériel et sa logique, afin de savoir comment l'employer pour résoudre le problème auquel il est confronté"* [Roux et al., 2020]. Simone MORGAGNI ajoute que *"nos manipulations et nos actions peuvent produire de nouvelles affordances qui n'étaient pas jusque là disponibles et qui nous montrent à quel point créer une certaine affordance consiste en une activité d'en imaginer la faisabilité"* [Morgagni, 2011]. En ce sens, les affordances sont subjectives puisqu'elles dépendent à la fois des connaissances préalables, des processus cognitifs engagés lors de leur traitement mais surtout de la perception que l'apprenant a de son environnement.

L'auteurice explique le point de vue de NORMAN selon lequel *"le pouvoir des affordances est de montrer implicitement où aller et comment faire. Elles ne font que construire une voie privilégiée pour optimiser le comportement, sans même que le sujet ait besoin de s'en apercevoir"* [Morgagni, 2011].

Lisa ROUX distingue deux types d'affordance : des **affordances perceptibles** et des **affordances fonctionnelles**. Les premières sont *"directement suggérées par des informations sensibles obtenues à travers la découverte des objets"*

34. Les potentialités suggérées à l'apprenant (affordances) sont dépendantes de ses buts, de ses croyances, de ses connaissances acquises et de ses expériences passées [Norman, 1988].

[Roux *et al.*, 2020]. Les secondes sont "découvertes lors de l'interaction d'un objet avec d'autres" [Roux *et al.*, 2020].

Simone MOGAGNI fait référence à ZHANG et PATEL à l'origine de la théorie de la cognition distribuée. Selon cette théorie, les affordances pourraient se distinguer en cinq types : **biologiques** ("construites sur des processus biologiques"), **physiques** ("construites sur la structure physique"), **perceptives** ("construites par les trajets spatiaux"), **cognitives** ("construites par des conventions culturelles") et **mixtes** ("constituées par une combinaison de plusieurs catégories parmi celles qu'on vient d'énumérer") [Morgagni, 2011].

Finalement, selon Simone MORGAGNI, "les affordances ne seraient [...] rien d'autre que les actions rendues possibles et saillantes par l'activité cognitive elle-même et pourraient être conçues comme des réponses concevable à une action pratique" [Morgagni, 2011].

Lors de la tâche CreaCube, l'apprenant peut trouver, par exemple, l'affordance suggérée par la "roue" sur l'un des cubes en lien avec le concept "véhicule" stocké en mémoire. Cela le conduit, par le raisonnement, à poser le cube muni de roues au contact du plan horizontal sur lequel le véhicule doit avancer.

Le raisonnement créatif est une forme de raisonnement abductif. Marienne HABIB l'aborde comme la capacité à "trouver des solutions créatives à des problèmes auxquels [l'être humain] faisait face dans son environnement" [Habib *et al.*, 2018]. Elle entend par solution créative, une solution inédite permettant la résolution d'un problème ou une solution venant en remplacer une autre moins adaptée.

Selon le point de vue de Joy Paul GUILFORD, la créativité serait la capacité d'un individu à imaginer ou construire et mettre en oeuvre un concept neuf, un objet nouveau ou à découvrir une solution originale à un problème. Cette originalité se définit dans un contexte donné. L'auteur explique que la démarche créative [Guilford, 1956] commence par la reconnaissance d'un problème. C'est à partir de là qu'un processus de divergence s'engage. Ce dernier correspond à une exploration (à partir d'éléments connus³⁵) de combinaisons ou de déformations inédites. Elle se termine, par convergence, dans une nouvelle solution du problème, par un mécanisme de vérification et d'évaluation de la nouvelle propo-

35. Selon Arne DIETRICH, la créativité *ex-nihilo* n'a jamais été observée. Quatre types de créativité sont distinguées, toutes basées sur des mécanismes (émotionnels ou cognitifs et délibérés ou spontanés) de nouvelles combinaisons et sélections d'éléments existants [Dietrich, 2004].

sition.

La cognition créative englobe les processus cognitifs qui contribuent "*à la production d'idées créatives et au raisonnement créatif*" [Habib et al., 2018]. Elle correspond à un ensemble de compétences, opérations et méthodes permettent d'aboutir à des idées nouvelles, originales et contextualisées. Elle demande l'accès aux concepts stockés en mémoires de manière flexible afin de créer de nouvelles associations. Ces processus d'associations sont automatiques et permettent de réorganiser les connaissances préalables d'une manière nouvelle et utile. "*Plus ces associations sont lointaines, et plus les idées générées sont créatives*" [Habib et al., 2018]. L'expertise facilite donc ce processus car la quantité de données accumulées dans un domaines permet de combiner plus facilement les connaissances et ainsi aboutir à une solution nouvelle. Compte tenu de ces éléments donne la définition suivant de la créativité : *la créativité consiste, notamment, à faire appel et à rassembler de façon nouvelle des connaissances anciennes, afin de générer de nouvelles propriétés à partir des anciennes*" [Habib et al., 2018].

La mémoire apparaît donc comme essentielle à la créativité mais peut paradoxalement devenir un biais à cette pensée créative. Il s'agit d'un effet de fixation intervenant dans le raisonnement créatif. Cet effet est provoqué, par exemple, par des réactions spontanées face à des objets du quotidien pour lesquels il faudrait "détourner" l'utilisation. "*Il se réfère à un blocage ou une entrave dans l'accès à une activité mentale, un élément qui bloque l'accomplissement de la pensée créative*" [Habib et al., 2018]. Les représentations habituelles et facilement accessibles en mémoires en sont à l'origine. Cela correspond la rigidité fonctionnelle³⁶. Cependant, il est possible de contourner cette rigidité, cet effet de fixation.

Certaines fonctions exécutives³⁷ permettent en effet de contourner ce problème de fixation. Le contrôle cognitif et la flexibilité mentale permettraient de résister aux comportements habituels intervenant spontanément en évitant ainsi la production de réponses peu originales, ce qui favoriserait la proposition de solutions alternatives plus créatives.

Par ailleurs, Marianne HABIB précise que "*le raisonnement par analogie pourrait contribuer à la production d'idées créatives*" [Habib et al., 2018]. C'est parce qu'il s'appuie sur des connaissances ou expériences antérieures pour les transférer

36. La rigidité fonctionnelle se produit lorsque l'apprenant est incapable de modifier le mode d'utilisation d'un objet habituel, c'est-à-dire de contourner les automatismes d'utilisation de cet objet.

37. Les fonctions exécutives seront présentées dans la section 1.3.5.

à une nouvelle situation³⁸. L'autrice cite trois étapes indispensables pour contourner l'effet de fixation lors d'une tâche de résolution de problème. *"Il s'agirait dans un premier temps de résister à la fixation, de redéfinir ensuite le problème et enfin d'utiliser des indices ou des pistes pour provoquer des idées nouvelles"* [Habib et al., 2018]. Le raisonnement par analogie (ou abductif) permettrait la restructuration de la pensée *"en reliant la structure et les attributs d'un objet ou d'une situation (la source) à un autre objet ou une autre situation (la cible)"* [Habib et al., 2018].

Dans le contexte de la tâche CreaCube, la créativité fait partie des critères observés lors de la résolution de problème. En effet, il est constaté que certaines réponses automatiques peuvent survenir concernant la manipulation des cubes. Par exemple, une des réponses automatiques serait de les empiler. Or, la création d'un véhicule sous forme de tour provoque inévitablement des problèmes d'équilibre au moment du déplacement, conduisant à un essai échoué. Cela s'explique par la sollicitation de la mémoire pour accéder aux connaissances préalables concernant le concept "cube".

Il est tout à fait possible que l'étude des fonctions exécutives, dans la section 1.3.5, puisse permettre de comprendre plus précisément comment l'apprenant contourne l'effet de fixation afin de résoudre la tâche et dans quelle mesure ces fonctions impactent la créativité.

Le raisonnement inductif

Au même titre que le raisonnement abductif, l'inductif est hypothétique car il ne permet pas d'aboutir à une conclusion certaine. En revanche, il n'est pas basé sur le même principe. En effet, *"le raisonnement inductif implique une généralisation à partir d'observations ou de connaissances (lorsqu'un verre tombe sur une surface dure, il se brise ; lorsqu'une assiette tombe sur une même surface, elle se brise ; alors si un vase tombe sur une surface dure, il se brisera)"* [Habib et al., 2018]. Comprendre et maîtriser les probabilités est nécessaire dans ce type de raisonnement : il est très probable que le vase se brisera mais ce n'est pas sûr. Le raisonnement inductif est un raisonnement probabiliste.

Patrick LEMAIRE précise que le raisonnement inductif débouche toujours sur une information nouvelle contrairement au raisonnement déductif. Par ailleurs, l'auteur explique la conception fonctionnaliste du raisonnement : *"faire du raisonnement inductif, c'est trouver des régularités entre des événements [qui] per-*

³⁸. Voir le paragraphe précédent au sujet du raisonnement abductif.

mettent de formuler des prédictions sur l'occurrence des évènements à venir et de réduire notre incertitude face à notre environnement et à ce qui s'y passe" [Lemaire et Didierjean, 2018]. Cela permet l'adaptation à l'environnement. Les régularités peuvent prendre différentes formes : *"une règle, une loi, une hypothèse, une équation, un concept ou une catégorie"* [Lemaire et Didierjean, 2018].

Le raisonnement déductif

Le raisonnement déductif est un raisonnement logique. Les conclusions tirées de ce type de raisonnement *"sont nécessairement correctes si les énoncés sont vrais et que les inférences³⁹ sont tirées de façon rigoureuse"* [Habib et al., 2018]. Contrairement aux précédents types de raisonnement, celui-ci ne nécessite pas la création de nouvelles informations mais une réorganisation de celles déjà présentes. *En somme, les déductions sont une façon de reformuler une information qui était déjà présente de manière implicite*" [Habib et al., 2018].

Par ailleurs, Patrick LEMAIRE différencie deux théories concernant le raisonnement déductif : la théorie des modèles mentaux et celle de la logique mentale. Il précise que ces deux théories diffèrent complètement même si *"elles partagent le postulat commun selon lequel les performances des sujets aux différentes tâches de raisonnement déductif peuvent s'expliquer par la mise en oeuvre de processus communs et généraux"* [Lemaire et Didierjean, 2018].

Trois étapes de traitement seraient mises en oeuvre dans le raisonnement selon la **théorie des modèles mentaux** :

1. **Compréhension** : les connaissances du langage et de l'environnement sont mobilisées pour comprendre les prémisses⁴⁰ ce qui permet de *"de construire [...] des modèles mentaux. Ces modèles mentaux sont des éléments ou des individus particuliers aux groupes décrits dans les prémisses et des relations entre ces éléments"* [Lemaire et Didierjean, 2018].
2. **Inférence** : l'individu décrit sommairement les éléments de la situation (pouvant comprendre une étape de reformulation de l'énoncé). Cette description conduit à établir une première conclusion concernant des termes non reliés dans les prémisses.

39. *"Opération qui consiste à admettre une proposition en raison de son lien avec une proposition préalable tenue pour vraie"* <https://www.cnrtl.fr/definition/inference>

40. Les prémisses correspondent aux affirmations qui permettent, par le raisonnement, d'aboutir à une conclusion.

3. **Réfutation (ou falsification)** : cette étape permet la recherche de modèles alternatifs qui valident ou invalident la conclusion établie à l'étape précédente. Si aucun modèle alternatif n'est trouvé alors la conclusion est jugée valide. Dans le cas inverse, le modèle alternatif est étudié lors d'une nouvelle étape d'inférence afin d'aboutir à une nouvelle conclusion qui passera elle aussi par l'étape de réfutation jusqu'à ce que l'individu ne trouve plus de modèle alternatif.

Cette théorie peut aboutir à deux types d'erreur : d'encodage ou d'inférence. Une erreur d'encodage surviendrait lors de l'étape de compréhension ("certains A sont B" au lieu de "tous les A sont B", par exemple). L'erreur d'inférence est provoquée par la difficulté de l'individu à chercher des modèles alternatifs (contre-exemples) face à la première conclusion établie. Cette difficulté serait en lien avec la limite de la mémoire de travail car certains types de raisonnements consomment plus de ressources que d'autres. Ce serait lors de ces raisonnements plus coûteux en ressources que la recherche de modèles alternatifs deviendrait plus difficile. De plus, les capacités cognitives de l'individu interviennent aussi dans la difficulté à établir des modèles alternatifs.

La théorie de la logique mentale rejoint le point de vue cité par Marianne HABIB. Elle est basée sur trois postulats :

1. Le système cognitif posséderait les règles fondamentales de la logique.
2. Le déclenchement et l'application de ces règles constituent le mécanisme du raisonnement.
3. Des règles logiques non disponibles dans le système cognitif peuvent découler de la recombinaison d'autres règles, elles-mêmes disponibles. Le raisonnement se ferait alors séquentiellement par activation des règles à appliquer.

Dans cette théorie, l'information serait d'abord stockée en mémoire de travail sous forme de propositions encodées par un mécanisme de compréhension. Les prémisses sont alors représentées sous une forme abstraite similaire à une règle logique (si A, alors B). Les règles logiques seraient ensuite appliquées à ces propositions stockées. Toutefois, si le raisonnement ne permet pas d'aboutir à une conclusion directe basée sur les règles logiques alors les réponses fournies seront biaisées ou erronées et approximatives.

Cette théorie implique aussi la possibilité de commettre des erreurs. Elles peuvent intervenir lors de l'étape de compréhension en lien avec une mauvaise représentations des prémisses mais aussi lors de l'inférence en lien avec un mésusage d'une règle, soit erronée (par exemple que A est forcément vrai du fait que A ou B soit vrai), soit qui ne s'applique pas (erreur dans les prémisses). Par ailleurs, les erreurs peuvent également être d'origine cognitive (erreurs d'inattention ou de maintien de l'information en mémoire de travail, par exemple).

Ces deux théories divergent car l'une est "*est fondée sur les principes de la logique (logique mentale), l'autre sur des principes sémantiques (modèles mentaux)*" [Lemaire et Didierjean, 2018]. Les règles logiques utilisées pour le raisonnement dans le cadre de la théorie de la logique mentale sont indépendantes du contenu. À l'inverse, la théorie des modèles mentaux postule que "*le raisonnement humain a lieu en se représentant mentalement la situation décrite dans un problème de raisonnement et en essayant d'envisager des modèles alternatifs*" [Lemaire et Didierjean, 2018].

Ces notions de "logique" et de "modèle" se retrouvent en logique mathématiques. Dans ce contexte, un ensemble de propositions logiques peut être vrai, faux ou indécidable, à un certain niveau. Il peut également avoir des modèles⁴¹ ou non. L'objectif de vérifier cet ensemble de propositions par un modèle, ou des modèles, est l'interprétation des structures syntaxiques⁴² dans les structures mathématiques⁴³ de façon à leur associer des concepts sémantiques^{44 45}.

Logique, rationalité et intuition

Marianne HABIB fait une mise en garde sur le sens du mot "logique". Elle explique que ce terme est utilisé de manière abusive dans le langage courant au détriment de l'intuition. Elle précise que "*la logique permet de vérifier la validité d'un argument, en testant sa cohérence*" [Habib et al., 2018]. Elle est basée sur des règles formelles, elles-même "*à la base de toute rationalité*" [Habib et al., 2018].

Le raisonnement humain a pour cadre de référence des règles logiques et probabilistes. Il est considéré que plus l'individu se conforme à ce cadre plus il fait

41. Les modèles sont des objets qui vérifient ces propositions logiques

42. Par exemples : termes logiques, formules, démonstrations, etc.

43. Par exemple : ensemble des entiers naturels, groupes, univers, etc.

44. Par exemple : le sens ou la vérité.

45. Plus précisément, pour les prédicats mathématiques dits du 1er ordre (le formalisme le plus utilisé) il y a complétude, c'est à dire équivalence entre une formule vérifiée dans tous les modèles et une formule démontrée syntaxiquement.

preuve de rationalité. Michel MÉTAYER définit la rationalité comme *"la caractéristique d'une pensée qui enchaîne ses idées d'une manière consciente, ordonnée et contrôlée pour atteindre un but déterminé, en s'appuyant sur de bonnes raisons"* [Métayer, 2012]. Les termes de cette définition sont précisés par Mathieu GAUVIN dans une capsule vidéo⁴⁶. Pour cela, il différencie trois types de pensées : **la pensée intuitive**, **la pensée rationnelle** et **la pensée irrationnelle**.

La pensée rationnelle implique la mise en place de moyens, que l'individu est capable de justifier, pour atteindre un but. Elle est contrôlée et nécessite des efforts cognitifs. A l'inverse, la pensée intuitive n'a pas de but ni de contrainte mais est plutôt dictée par l'imagination, la créativité, les émotions et la spontanéité. L'intuition ne fait pas appel au raisonnement mais est très liée à la perception. Quant à la pensée irrationnelle, elle est observée lorsqu'un individu a un but à atteindre mais qu'il ne se donne pas les moyens de l'atteindre. Il multiplie alors des décisions qui l'éloignent de son but ou s'appuient sur des justifications infondées.

En ce sens, il est possible de dire que le raisonnement est motivé par l'atteinte d'un but. Lors d'une tâche de résolution de problème comme CreaCube, l'apprenant met en place un certain nombre de moyens qu'il est en mesure de justifier afin d'atteindre son but : assembler les cubes de sorte qu'il forme un véhicule. Cet aspect fait donc référence au raisonnement, à la logique et à la pensée rationnelle. Cependant, il est aussi possible que les deux autres types de pensées interviennent. Lorsque l'apprenant est dans un contexte de pensée intuitive, il effectue des actions qui ne sont pas motivées par un but mais qui pourraient potentiellement le conduire à l'atteindre. Par exemple, il pourrait manipuler les cubes et les assembler au gré de ses envies parce qu'il ressent du plaisir à le faire sans même avoir le but de ressentir cette émotion. Dans le cadre de la pensée irrationnelle, l'apprenant connaît le but à atteindre pour résoudre la tâche mais "sabote" les moyens mis en oeuvre pour y arriver et se met en échec.

Heuristiques et biais de raisonnement

Paradoxalement, *"le raisonnement déductif humain ne se conforme souvent pas aux règles de la logique"* [Habib et al., 2018]. L'autrice précise que les individus ont plutôt tendance à faire appel aux heuristiques⁴⁷ (simplifications) qui amplifieraient l'influence des croyances ou des aspects superficiels du problème,

46. <https://www.youtube.com/watch?v=vSjCIsA0on0>

47. Selon Olivier HOUDÉ, l'heuristique est une *"réponse rapide, automatisée, imposant un faible coût cognitif et une faible charge en mémoire de travail"* [Houdé, 2018a]

au détriment *"des algorithmes⁴⁸ correspondant à la logique ou aux règles mathématiques et probabilistes, pour résoudre les problèmes de raisonnement"* [Habib et al., 2018]. Par conséquent, les heuristiques peuvent être considérés comme des biais de raisonnement. Jonathan EVANS explique qu'un biais de raisonnement *"se produit lorsque la majorité des personnes (plus de 50%) échoue à donner la réponse correcte à un problème de logique et fournit la même réponse erronée. Ces biais consistent donc en conduites massivement irrationnelles chez l'adulte dans le domaine du raisonnement"* [Evans, 2011].

Il existerait deux types de traitement pouvant expliquer la survenue des biais cognitifs. Le premier rappelle la pensée intuitive présentée précédemment. Il permet de traiter *"une quantité importante d'informations indépendamment de la charge en mémoire de travail et des capacités cognitives"* [Habib et al., 2018]. La réponse issue de ce traitement peut paraître correcte sans pour autant avoir une explication. L'individu est alors dans l'incapacité d'expliquer le processus l'ayant conduit à donner cette réponse. À l'inverse, le deuxième type de traitement fait appel aux algorithmes, des processus plus lents nécessitant des efforts faisant appel à la pensée rationnelle. Ce deuxième type de traitement peut aussi être mobilisé en relais du premier type. Par ailleurs, ces deux types de traitement peuvent aussi entrer en conflit conduisant ainsi l'apprenant à fournir une réponse erronée au problème posé. Ce conflit se produit lorsqu'une réponse intuitive erronée s'oppose à une réponse logique analytique. Cependant, il est possible de détecter ce conflit même si la stratégie heuristique est plus facilement privilégiée lors des conflits de traitement (l'apprenant sait que l'issue de son intuition s'oppose au résultat de la stratégie analytique mais choisit malgré tout la réponse la plus rapide même si elle est erronée). En revanche, il est possible de faire appel à un processus d'inhibition chargé d'écarter la réponse intuitive au profit de la réponse logique analytique.

Raisonnement et émotions

Il a été évoqué précédemment que les émotions pouvaient jouer un rôle dans le raisonnement. Marianne HABIB explique qu'en effet les émotions peuvent influencer négativement le raisonnement en agissant sur la performance cognitive. Elle explique cependant qu'il est possible de contrôler cela mais aussi qu'il peut exister un effet bénéfique des émotions sur le raisonnement.

48. Les algorithmes sont des *"stratégies plus lentes, plus coûteuses sur le plan de la charge cognitive que les heuristiques, mais qui conduisent toujours à un bon résultat car elles s'appuient sur les règles de la logique déductive"* [Houdé, 2018a]

L'autrice évoque une étude qui a démontré que la performance logique était impactée par une condition émotionnellement négative soit par l'usage de mots "*sémantiquement émotionnels (par exemple : mort, souffrance ou maladie)*" [Habib et al., 2018], soit par l'humeur induite (positive ou négative). "*Ceci suggère qu'au delà de leur valeur référentielle (i.e, le mot table réfère à un meuble qui a quatre pieds et sert pour poser des objets), la valeur affective des contenus à propos desquels les participants raisonnent influence le raisonnement*" [Habib et al., 2018]. Elle explique que les émotions et le stress ont généralement un effet négatif sur la performance cognitive et notamment sur "*la vigilance, l'attention sélective ou la mémoire*" [Habib et al., 2018]. Cela s'explique par la consommation d'une grande quantité de ressources cognitives nécessaire au traitement des contenus émotionnels. Ces ressources ne peuvent donc pas être dédiée au raisonnement de type 2 (faisant appel aux algorithmes) et cela affecterait la rationalité du raisonnement. Ainsi, l'apprenant favoriserait l'utilisation des heuristiques "*aux dépens des réponses fondées sur la logique ou sur la probabilité*" [Habib et al., 2018].

Dans un second temps, Marianne HABIB explique que "*l'effet négatif des émotions sur le raisonnement peut diminuer, voire s'inverser et devenir positif, dans certaines situations*" [Habib et al., 2018]. Une étude a montré que des émotions pertinentes avec le contenu émotionnel traité, favorisait le raisonnement logique. Dans cette situation les individus présentaient des états émotionnels intenses en lien avec le sujet traité, ce sujet faisant appel à des événements marquant pour ces personnes. Ces dernières raisonnaient de manière plus efficace, étaient moins affectés par leurs croyances car ils étaient concernés émotionnellement par le sujet à traiter. Des individus non concernés montraient des émotions beaucoup moins intenses mais étaient paradoxalement moins performants que les individus précédemment cités. Les états émotionnels jugés pertinents correspondent au vécu de la personne. Ainsi, une personne ayant participé à une guerre (par exemple) sera plus performant cognitivement sur des sujets y faisant référence que des personnes non concernées par ce type de sujet. "*Nous entendons par là que les réactions affectives évoquées par les contenus sémantiques du problème de raisonnement concordent avec des émotions vécues dans le passé suite à des événements personnellement significatifs*" [Habib et al., 2018].

Le contenu sémantique, le ressenti affectif et l'historique affectif associés ont donc un impact fort sur la performance de raisonnement. En revanche, la concordance entre ces éléments est moins vraie lorsque les contenus objets du raisonnement sont neutres ou que les "*contenus émotifs ne sont pas liés à une expérience*

passée" [Habib *et al.*, 2018]. Dans ce cas, les émotions ont un effet délétère sur le raisonnement. C'est *la pertinence des réactions affectives relativement à la sémantique des contenus dans le contexte de la tâche et de l'historique affectif*" [Habib *et al.*, 2018] qui module de façon importante l'impact des émotions sur la motivation intrinsèque de l'individu et sur sa capacité à raisonner efficacement.

Du raisonnement humain à sa modélisation

Dans le but de modéliser l'apprenant et compte tenu de ce qui a été abordé précédemment, il est essentiel de pouvoir modéliser le raisonnement. Cela peut être rendu possible par l'utilisation de systèmes d'intelligence artificielle qui permettraient l'automatisation du raisonnement.

Imène KHANFIR KALLEL a consacré sa thèse à ce sujet et a exploré les différentes théories qui permettraient d'aboutir à cette modélisation tout en prenant en compte l'incertitude des informations interagissant avec le modèle. *"C'est pourquoi, l'intelligence artificielle, de par ses préoccupations de représentations fidèles et adéquates du monde réel, a été amenée à s'intéresser à différents cadres de traitement de l'incertitude dans l'information, allant de la théorie des probabilités, aux théories encore plus récentes d'intérêt telles que celles des possibilités, des fonctions de croyance, et des probabilités imprécises"* [Khanfir Kallel, 2019].

Ces théories ne seront pas détaillées ici mais permettent de mettre en avant des éléments pointés par l'autrice comme les notions de possibilité et de nécessité présentes dans les "théories de l'incertain" et qui permettraient de gérer les incertitudes, imprécisions, incomplétudes, conflits et ambiguïtés des informations traitées lors du raisonnement. En ce sens, l'autrice a réalisé un tableau d'aide au choix de la théorie la plus adaptée au traitement des imperfections précédemment citées. Il est présenté dans la figure 8.

Les différentes formes de traitement de l'incertitude ont un enjeu important pour la représentation des connaissances et la formalisation des raisonnements par les méthodes d'intelligence artificielle. Afin de comprendre ces théories, il est nécessaire de procéder à un éclairage théorique et conceptuel, notamment concernant les différences entre imprécision, incertitude, gradualité et granularité. Ces éléments sont cités à titre informatif et ont été abordé plus précisément par Salem BENFERHAT, Thierry DENOEU, Didier DUBOIS et Henri PRADE⁴⁹.

Il y est distingué, notamment, les notions d'**imprécisions** (par exemple, une

49. Pour en savoir plus : https://www.hds.utc.fr/~tdenoeux/dokuwiki/_media/en/publi/book-cepuades-test.pdf

<i>Théories de l'incertain</i>	<i>Connaissances</i>	<i>Imperfections traitées</i>
Probabilités	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Taille importante de l'échantillon est requise ⇒ Connaissance théorique (relative à la loi de distribution de données) 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Incertitude aléatoire ⇒ Imprécision (de façon implicite)
P-boxes	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Taille de l'échantillon non contraignante ⇒ Modèle paramétrique imprécis en connaissant la loi de distribution des données 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Incertitude, ⇒ Imprécision, ⇒ Incomplétude
Evidence	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Informations de type quantiles (écart type, médiane, etc) 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Incertitude ⇒ Imprécision ⇒ Incomplétude ⇒ Conflit ⇒ Ambiguïté (ignorance totale)
Possibilités	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Grande tolérance sur une taille réduite de l'échantillon ⇒ Grandeur fixe mais imprécise à base d'avis d'expert (intervalles de confiance) 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Incertitude ⇒ Imprécision ⇒ Ambiguïté

FIGURE 8 – **Guide du choix de la théorie de l'incertain.**

Ce tableau est extrait du travail de Imène KHANFIR KALLEL [Khanfir Kallel, 2019]. L'auteur y présente de façon synthétique les raisons motivant le choix d'une théorie de l'incertain parmi les autres.

mesure effectuée à un millimètre près liée à la précision de l'outil) qui est une notion relative à l'échelle de mesure et à l'usage fait de la valeur, d'**incertitude** qui correspond plus à des événements imprédictibles par rapport à un modèle (événement surprenant). La notion d'**événement aléatoire** (dont le fonctionnement peut être connu, comme un tirage de dé) est distinguée de celle d'**événement partiellement connu** (qui peut ne pas être aléatoire). Distinguer ces notions au niveau théorique est important quand il est nécessaire de comprendre les processus cognitifs qui en dépendent, tandis que des formalismes différents permettent de les formaliser.

Les théories citées s'intègrent dans le principe de la logique modale que Nicolas SZCZEPANSKI définit comme "*une logique à laquelle on a ajouté des modificateurs, qu'on pourrait comprendre en langage naturel comme des adverbes*" [Szczepanski, 2012]. Ces derniers sont des modalités utilisées pour modifier une

proposition en présentant le fait énoncé comme "*nécessaire, possible ou vrai*" [Szczepanski, 2012]. Possibilité et nécessité sont des opérateurs modaux pouvant être utilisés pour la modélisation du raisonnement humain à l'aide de systèmes d'intelligence artificielle.

1.3.5 Les fonctions exécutives

Jean-Philippe LACHAUX définit les fonctions exécutives comme "*un ensemble de processus permettant d'éviter que notre comportement ne soit une simple succession de réactions réflexes à notre environnement*" [Lachaux, 2018]. Il précise que c'est grâce à elles que l'être humain est capable d'envisager les étapes pour atteindre un but qu'il s'est lui-même fixé. Elles permettent de se contrôler soi-même (gestes, émotions...), de contrôler "*sa propre vie mentale*" [Lachaux, 2018], principalement grâce au cortex préfrontal. Ève LELEU-GALLAND explique que ces processus cognitifs permettent "*de réguler intentionnellement la pensée et les actions dans l'atteinte d'un but précis*" [Leleu-Galland et al., 2021] et qu'ils jouent un rôle-clef dans les apprentissages fondamentaux, lire, écrire, compter, raisonner et pour les aptitudes socio-émotionnelles" [Leleu-Galland et al., 2021].

Marianne HABIB [Habib et al., 2018] s'accorde avec Ève LELEU-GALLAND [Leleu-Galland et al., 2021] et Olivier HOUDÉ [Houdé et al., 2018] pour citer trois fonctions constituant les fonctions exécutives : **l'inhibition motrice et cognitive**, **la flexibilité mentale** (*shifting*) et **la mise à jour en mémoire de travail** (*updating*). Ève LELEU-GALLAND et Olivier HOUDÉ précisent que des fonctions exécutives de plus haut niveau se construisent sur la base de ces dernières : "*la planification, la résolution de problème et le raisonnement*" [Leleu-Galland et al., 2021] [Houdé et al., 2018]. Selon l'autrice, *les fonctions exécutives sont les capacités du cortex préfrontal, plus exactement d'un circuit pariéto-frontal, qui contrôlent l'exécution des conduites, le choix des stratégies et la prise de décision*" [Leleu-Galland et al., 2021].

Sandrine CENSABELLA rejoint elle aussi ces points de vue et cite d'autres auteurs ayant mentionné d'autres fonctions exécutives. Elle conclut sur cette variété en considérant que les fonctions exécutives recouvrent "*tout un ensemble de processus dont la fonction principale est de faciliter l'adaptation de la personne aux exigences et fluctuations soudaines de l'environnement et, en particulier, aux situations nouvelles*" [Censabella, 2007].

L'inhibition motrice et cognitive

Selon Olivier HOUDÉ, il existe trois modes de pensée dans le cerveau : *"le système heuristique, correspondant aux pensées automatiques, le système algorithmique, celui de la pensée logico-mathématique et le système de l'inhibition qui intervient lorsqu'il existe un conflit entre les deux premiers systèmes"* [Houdé, 2018b]. Dans le cas d'un conflit, le système heuristique est interrompu par le processus d'inhibition afin de privilégier le système des algorithmes. En ce sens, Ève LELEU-GALLAND définit l'inhibition cognitive comme *"le processus du cerveau qui permet de résister aux heuristiques perceptives et cognitives qui court-circuitent le raisonnement efficace"* [Leleu-Galland et al., 2021]. Cette fonction de contrôle est intentionnelle et concerne les pensées, le comportement et les impulsions. Marianne HABIB rejoint cela en écrivant que l'inhibition *"permet de supprimer temporairement une réponse habituelle, dominante, sur-apprise ou automatisée"* [Habib et al., 2018].

Selon Sandrine CENSABELLA, il y a deux types d'inhibition : motrice et cognitive. Elles concernent respectivement les processus moteurs et cognitifs. Le premier type d'inhibition fait référence au contrôle des comportements moteurs automatiques ou prédominants. Quant à elle, l'inhibition cognitive renvoie au contrôle de l'information traitée (automatique, non pertinente ou conflit d'information). Olivier HOUDÉ explique que le contrôle inhibiteur intervient à différents moments du traitement de l'information que ce soit lors de sa sélection ou encore de la sélection et de l'exécution de la réponse. Il agit également sur *"différents types d'informations (perceptives, motrices, cognitives, émotionnelles)"* [Houdé et al., 2018] et permet de focaliser l'attention de façon volontaire et guidée par le but à atteindre.

Un répertoire d'actions prêtes à être exécutées se retrouve au sein des boucles cortico-thalamiques impliquant les ganglions de la base, et la sélection d'une de ces actions se fait justement par la levée d'une des inhibitions, ici motrices [Alexandre, 2021]. C'est aussi le cas pour les traitements cognitifs.

Sandrine CENSABELLA précise qu'en *"réalité, les deux versants de l'inhibition [cités précédemment] sont fortement liés et ne sont pas toujours faciles à distinguer, du moins sur le plan théorique (par exemple, est-ce le comportement en soi, l'acte moteur, ou plutôt la planification et l'exécution de celui-ci sur le plan cognitif qui est inhibé ?)"* [Censabella, 2007]. C'est pour cette raison que, dans son écrit, elle préfère considérer *"non pas le type de processus mais plutôt le type de réponse qui est inhibée"* [Censabella, 2007]. En ce sens, Olivier HOUDÉ ajoute que le contrôle inhibiteur agit *"sur toutes nos réponses comportementales comme"*

un signal 'stop' qui permet à notre organisme d'attendre avant d'agir, de prendre une décision ou de donner une réponse" [Houdé et al., 2018]. Ce sont l'impulsivité, les comportements, les émotions et les actions qui sont ainsi contrôlés par l'inhibition.

La mise à jour en mémoire de travail

Selon Marianne HABIB, la mise à jour en mémoire de travail *"permet d'actualiser l'information maintenue en assurant le suivi des informations successives, le filtrage de certaines d'entre elles, la substitution de l'information devenue inappropriée par une nouvelle"* [Habib et al., 2018]. Olivier HOUDÉ et Ève LELEU-GALLAND [Leleu-Galland et al., 2021] s'accordent pour expliquer que la mémoire de travail *"permet de maintenir activement des informations et de les manipuler pendant quelques dizaines de secondes pour atteindre un but défini a priori"* [Houdé et al., 2018].

Elle est utilisée lors de la résolution de problèmes afin d'organiser des informations. Elle se distingue en deux types : la mémoire de travail verbale et la mémoire de travail visuo-spatiale. L'une ou l'autre (ou même les deux) est mobilisée selon le type d'information à traiter. C'est principalement le cortex préfrontal qui est engagé dans ce processus afin *"d'allouer des ressources attentionnelles aux informations à maintenir et de gérer les interférences potentielles d'informations présentes dans l'environnement"* [Houdé et al., 2018]. Ce processus repose également *"sur les aires cérébrales impliquées dans le traitement perceptif des informations maintenues en mémoire de travail"* [Houdé et al., 2018].

La flexibilité mentale

Sandrine CENSABELLA définit la flexibilité mentale (ou flexibilité cognitive) comme *"la capacité à passer d'un type de traitement de l'information à un autre de manière fluide et rapide"* [Censabella, 2007]. Marianne HABIB rejoint ce point de vue en écrivant que la flexibilité mentale *"permet le désengagement d'un ensemble de réponses ou d'un type de représentations pertinentes à une tâche donnée afin de s'engager dans une nouvelle catégorie de réponse ou de représentations pertinentes pour une autre tâche"* [Habib et al., 2018]. Olivier HOUDÉ et Ève LELEU-GALLAND [Leleu-Galland et al., 2021] précisent encore davantage cela en définissant la flexibilité cognitive comme *"la capacité à s'adapter aux changements dans notre environnement, qu'il s'agisse de changer de stratégie, d'adopter une perspective différente sur un problème ou plus généralement de chercher d'autres manières de raisonner et de penser"* [Houdé et al., 2018].

Cette flexibilité permet l'adaptation à toute situation impliquée dans un *"changement de règles, de stratégies de de résolution de problème, ou d'activités"* [Houdé et al., 2018]. Elle fait appel aux fonctions exécutives de l'inhibition et de la mémoire de travail car les stratégies impliquées nécessite le stockage en mémoire de travail afin d'être analysées. C'est à ce moment là que l'inhibition intervient afin de choisir la réponse la plus adaptée ou plutôt d'écarter celle qui l'est le moins selon la situation.

Le recours à la métacognition (abordée dans la section 1.4) peut permettre à l'apprenant d'améliorer l'efficacité de ses fonctions exécutives par le contrôle et l'évaluation de ses propres fonctions cognitives.

1.3.6 Le langage et la motricité

Le langage

Il a été abordé précédemment que le langage était impliqué dans les interactions entre les différentes mémoires et participe à la mémorisation comme présenté dans la figure 5 détaillée dans la section 1.3.3⁵⁰ dans laquelle il est question de la boucle phonologique. Cela est en lien avec *"les mécanismes de représentation mentale"* [Lieury, 2017] existant chez l'être humain. Alain LIEURY explique que ces mécanismes ne servent pas seulement à la mémoire mais aussi à la communication. En ce sens, il cite différents moyens de représentation même si le principal est le langage phonétique. Marie-Pascale NOËL précise que *"le langage a une double fonction : il permet la communication interindividuelle et fait partie des outils cognitifs permettant des raisonnements complexes et évolués"* [Noël, 2007]. Marianne HABIB cite une définition où le langage est défini comme *"la capacité, dont est doté tout être humain normalement constitué, d'apprendre et d'utiliser un ou plusieurs systèmes de signes verbaux pour communiquer avec ses semblables"* [Habib et al., 2018]. Jean PIAGET évoque que le langage égocentrique⁵¹ comme permettant *"la structuration de la pensée et régulation de l'activité psychique"* [Habib et al., 2018]. Dale PURVES ajoute que le langage est *"la faculté d'associer des symboles arbitraires avec des significations particulières pour exprimer, à nous-même ou aux autres, des pensées ou des émotions, que ce soit lorsque nous réfléchissons, lorsque nous parlons ou lorsque nous écrivons"* [Purves et al., 2015]. Il est donc à la fois symbolique, sémantique et arbitraire.

50. Dans la section 1.3.3, paragraphe "Les mémoires à long terme", sous-paragraphe "Interactions entre mémoire épisodique et sémantique".

51. Le langage égocentrique est aussi appelé langage intérieur ou subvocalisation.

Il est également structuré car il est régi par des règles (grammaticales, syntaxiques...), évolutif puisque ces règles évoluent au cours du temps, générateur car *"un ensemble fini de symboles est utilisé pour créer un nombre infini de combinaisons ayant une signification"* [Habib et al., 2018] et *"composé d'unités sonores"* [Habib et al., 2018] (prononciation).

Le langage sollicite d'autres fonctions cognitives comme la perception, l'attention, la mémoire ou encore les émotions. En effet, la mémoire contient un lexique mental qui *"correspond à l'ensemble des connaissances dont un locuteur dispose sur les mots de sa langue et qui permet d'en comprendre le sens"* [Habib et al., 2018]. Ce lexique mental est sollicité lors de la perception de stimuli afin de reconnaître et de comprendre la signification de la symbolique utilisée en sollicitant les connaissances stockées en mémoire et ainsi aboutir à une représentation mentale. Ce processus est peu coûteux en ressources attentionnelles et peut être automatisé de manière plus ou moins efficace. Quant aux émotions, il a été abordé précédemment qu'elles avaient un impact sur les fonctions cognitives et le langage ne fait pas exception. Celles-ci interviendraient lors de l'apprentissage de nouveaux mots c'est-à-dire au cours de la formation et de la mise à jour du lexique mental. Cependant, très peu d'études ont été réalisées sur ce sujet pour en évaluer les effets réels. Par ailleurs la production du langage fait également appel aux fonctions motrices.

Il existe différents modèles pouvant représenter le traitement du langage. Chacun d'entre eux possède des avantages et des inconvénients mais les *"conceptions interactives fournissent une description plus proche de la façon dont les systèmes cognitifs interagissent en réalité"* [Habib et al., 2018]. Cette approche tient compte de la sollicitation des connaissances de l'apprenant qu'elles soient conceptuelles ou qu'elles fassent référence aux règles d'inférences.

La motricité

La motricité peut être étudiée selon trois modèles distincts : cognitif, écologique et dynamique.

Marie-Pascale NOËL commence par présenter l'**approche cognitive** basée sur le traitement de l'information. Le système nerveux central contrôlerait la motricité permettant la sélection d'une réponse et l'élaboration d'une suite de commandes à exécuter afin de permettre le déplacement de segments corporels. La sélection de la réponse dépend de différents facteurs : le but à atteindre, les informations perçues dans l'environnement et celles relatives à la position de

l'apprenant dans cet environnement et aussi les informations mémorisées. Ces informations ainsi prises en compte, le déplacement engendré par la réponse sélectionnée provoque la perception d'informations proprioceptives. Les informations perçues en retour (rétroactions sensorielles) de la réponse "*permettent au système nerveux central de détecter d'éventuelles erreurs de trajectoire et de les corriger en modifiant les commandes motrices*" [Noël, 2007]. Il est donc possible de noter trois étapes, prises en charge par des structures du système nerveux central, dans ce processus : "*la sélection, la programmation et l'exécution contrôlée de la réponse motrice*" [Noël, 2007].

L'auteur poursuit en abordant **l'approche écologique** : "*l'approche écologique s'appuie sur les liens, ou le couplage, entre perception et action et sur la notion d'affordance*" [Noël, 2007], c'est-à-dire le relation entre les propriétés l'environnement et celles de l'apprenant qui s'y trouve. Dans ce cas, l'affordance est à l'origine de l'action engagée par l'apprenant. Les propriétés perçues dans l'environnement sont ainsi utilisées par l'apprenant. Cette utilisation est dépendante des "*capacités perceptives et motrices*" [Noël, 2007] de l'apprenant. Par conséquent, pour l'action en réponses aux affordances présentes dans l'environnement dépendra de l'apprenant et de ses capacités. Il est alors possible d'obtenir des réponses différentes d'un apprenant à l'autre.

Enfin, elle traite **l'approche dynamique** (ou auto-organisation) qui considère que l'action motrice ne dépend pas uniquement du système nerveux central mais qu'elle résulterait "*d'une interaction entre un organisme, complexe par définition et de ce fait instable, et l'environnement*" [Noël, 2007]. Elise FAUGLOIRE précise à quel niveau l'organisme est perçu comme un système complexe. Cette complexité se situe en fait au niveau biologique qui prend en compte tous les constituants du corps engagés dans la motricité : articulations, muscles, cellules... L'auto-organisation ou coordination⁵² serait alors "*la maîtrise des degrés de liberté redondants de l'organisme pour en faire un système contrôlable*" [Faugloire, 2007]. Selon l'autrice, c'est par l'apprentissage que cette maîtrise s'acquiert.

"*Selon l'approche dynamique, la coordination est considérée comme un problème d'auto-organisation, où le mouvement produit n'est pas la conséquence directe d'une instruction externe*" [Faugloire, 2007] à l'inverse de l'approche cognitive selon laquelle le contrôle des mouvements se fait de manière prescriptive

52. "*La coordination peut être définie comme étant l'agencement des parties d'un tout pour une fin déterminée, dans une mise en ordre mutuelle*" [Faugloire, 2007]

avec le système nerveux central à l'origine des ordres moteurs. Ici, *"les composants du système coopèrent et agissent en interaction afin de réaliser un but commun"* [Faugloire, 2007]. Il s'agirait alors d'une auto-régulation du système effecteur : *"le contrôle n'est pas centralisé par une instance supérieure, il est distribué entre les différents éléments constitutifs du système"*⁵³ [Faugloire, 2007]. L'organisme (au niveau biologique et cognitif), l'environnement et la tâche (en lien avec les buts à atteindre) génèrent des contraintes qui limitent les libertés et par conséquent les mouvements possibles. Cela permet d'exclure les actions qui ne se conforment pas à ces contraintes et qui par conséquent ne seraient pas adaptées à la résolution du problème.

Pour faire le lien entre ces aspects et la tâche CreaCube, il est possible de conclure que le langage n'entre pas directement en jeu dans la résolution de la tâche, tout du moins au sens commun qui lui est donné. En revanche, cette fonction cognitive sera bien sollicitée dans l'interprétation et la compréhension de la consigne en faisant appel au lexique mental et la subvocalisation. Ainsi le mot-clé "véhicule" présent dans la consigne fera appel à ce lexique en interaction avec la sémantique du terme permettant la représentation mentale de ce qui peut composer un véhicule. Par ailleurs, le langage pourrait aussi être sollicité de manière verbale afin que l'apprenant explique son raisonnement et ses actions, mettant ainsi en jeu la métacognition dans la tâche d'apprentissage.

La motricité sera sollicitée sur différents plans. En effet, elle peut être impliquée dans le langage si l'apprenant est invité à verbaliser ses actions mais aussi est surtout dans la résolution du problème lui-même. La perception et la proprioception entrent alors en jeu afin qu'il évalue l'environnement et sa propre position dans l'environnement. Cela permettra à l'apprenant de programmer, de contrôler et de corriger les actions motrices mises en place pour manipuler les cubes et atteindre le but fixé : réaliser un véhicule qui avance seul d'un point A vers un point B.

1.3.7 Les émotions

Dans les parties précédentes, il a été constaté que les émotions étaient impliquées dans les processus cognitifs quels qu'ils soient, à différents degrés. Il paraît alors essentiel de définir et de comprendre ce qu'est une émotion, comment elle

⁵³. Système au sens des composantes de l'organisme biologique ainsi que celles de son environnement.

fonctionne et ce qu'elle implique dans le corps et dans quelle mesure elle impacte l'apprentissage.

Qu'est-ce qu'une émotion ?

Virginie GOUTTE explique la difficulté de définir l'émotion. En effet, elle cite deux auteurs ([Kleinginna et Kleinginna, 1981]) qui ont répertorié pas moins de 92 définitions de l'émotion ayant assez peu de points communs [Goutte et Ergis, 2011]. Sur cette base, les auteurs ont élaboré leur propre définition des émotions. Selon eux, *"les émotions sont le résultat de l'interaction de facteurs subjectifs et objectifs, réalisés par des systèmes neuronaux ou endocriniens, qui peuvent : a) induire des expériences telles que des sentiments d'éveil, de plaisir ou de déplaisir; b) générer des processus cognitifs tels que des réorientations pertinentes sur le plan perceptif, des évaluations, des étiquetages; c) activer des ajustements physiologiques globaux; d) induire des comportements qui sont, le plus souvent, dirigés vers un but adaptatif"* [Kleinginna et Kleinginna, 1981].

L'autrice cite également une autre définition qui qualifie l'émotion comme une *"manifestation somatique de courte durée dont la survenue est automatique"* [Goutte et Ergis, 2011]. Elle fait référence à six émotions de base : la colère, la joie, le dégoût, la tristesse, la peur et la surprise. Elle précise cependant, que les émotions sont à distinguer des sentiments. Ce point de vue est porté par Antonio DAMASIO qui explique que le domaine de la recherche aurait tout intérêt à faire cette distinction. Selon lui, un ensemble de réponses seraient déclenchées dans plusieurs parties du cerveau et envoyées vers le corps ou d'autres parties du cerveau par des voies neurale et humorale. C'est cet ensemble de réponses qui constitueraient les émotions. L'état émotionnel résulterait de la collecte de ces émotions provoquant ainsi des manifestations corporelles et cérébrales⁵⁴.

Antonio DAMASIO poursuit en expliquant cet état émotionnel serait à l'origine d'états mentaux : les sentiments. Les changements corporels produits par l'état émotionnel, signalés aux structures représentant le corps dans le système nerveux central, aboutissent à la formation de représentations qui constituent une partie de l'état mental. Ce dernier comprend également les altérations du traitement cognitif causées par des signaux provoqués par des réponses cerveau-

54. *"The term emotion should be rightfully used to designate a collection of responses triggered from parts of the brain to the body, and from parts of the brain to other parts of the brain, using both neural and humoral routes. The end result of the collection of such responses is an emotional state, defined by changes within the body-proper, e.g., viscera, internal milieu, and within certain sectors of the brain, e.g., somatosensory cortices; neuro-transmitter nuclei in brain stem"* [Damasio, 1998].

cerveau⁵⁵.

Stephen Marc BREEDLOVE, quant à lui, identifie quatre dimensions constituant les émotions dont les sentiments :

1. **Les sentiments** qui seraient l'expression intime et subjective des émotions. L'être humain expérimentent différents types d'états mentaux (sentiments).
2. **Les actions** sont induites par les émotions et peuvent être qualifiée d'actions "émotionnelles". Ces actions agissent en fait en réaction aux manifestations corporelles ayant lieu lors d'états émotionnels.
3. **L'excitation physiologique** correspond aux manifestations corporelles ou "*réponses somatiques autonomes*" [Breedlove et al., 2012] coordonnant les comportements. "*La force des émotions dont nous faisons l'expérience est corrélée avec notre niveau d'excitation physiologique*" [Breedlove et al., 2012].
4. **La motivation** coordonne les réponses cognitives et motrices intervenant dans le but de résoudre des problèmes adaptatifs précis. "*Les émotions sont aussi des programmes de motivation*" [Breedlove et al., 2012].

Contrairement à Virginie GOUTTE, Stephen Marc BREEDLOVE identifie non pas six mais huit émotions fondamentales représentées dans la figure 9. Ces émotions seraient assemblées par paires d'antagonistes chacune représentée par l'une face à l'autre dans le diagramme : joie/tristesse, affection/répugnance, colère/peur, attente/surprise. Les émotions d'intensité moyenne sont considérées comme les émotions de base et elles varient selon leur intensité.

Stephen Marc BREEDLOVE précise que le nombre d'émotions, qu'il soit de six ou bien de huit, n'est pas formellement établi. Il n'existe pas de moyen de

55. "*The term feeling should be used to describe the complex mental state that results from the emotional state. That mental state includes : (a) the representation of the changes that have just occurred in the body-proper and are being signaled to body-representing structures in the central nervous system (or have been implemented entirely in somatosensory structures via 'as-if-body-loops')*; and it also includes (b) a number of alterations in cognitive processing that are caused by signals secondary to brain- to-brain responses, for instance, signals from neurotransmitter nuclei towards varied sites in telencephalon" [Damasio, 1998].



FIGURE 9 – Les émotions fondamentales.

Cette figure est issue de l'ouvrage de Stephen Marc BREEDLOVE [Breedlove *et al.*, 2012] et représente schématiquement les émotions fondamentales selon leur niveau d'intensité. Elles sont classifiées en paires antagonistes, à différent niveau d'intensité et réparties en modalités. Ce modèle est proche de celui de Robert PLUTCHIK ^a qui associe aussi chaque émotion à un comportement animal de base (par exemple, la terreur qui conduit à se figer, la colère à attaquer, etc.) ce qui est discuté dans le texte.

a. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Émotion>

dénombrer avec certitude les émotions. La plupart des chercheurs se basent cependant sur l'étude des expressions faciales reconnaissables sans ambiguïté par une autre personne. C'est pour cette raison qu'il prend le parti, au même titre que les chercheurs à l'origine de ces études, d'en identifier huit.

Pascale TOSCANI aborde également les émotions sociales qui "*sont déclenchées par des situations sociales et interviennent d'une manière importante dans notre vie*" [Toscani *et al.*, 2017]. L'autrice explique que l'intensité et les facteurs déclenchant varient d'un individu à l'autre en fonction de l'éducation, de l'environnement familial ou de la culture par exemple. Elle cite la compassion, l'envie, l'orgueil, l'embarras, la honte, la jalousie, la culpabilité, le mépris et l'admiration comme étant les émotions sociales. Même si ces émotions sont provoquées par des facteurs sociaux, elles n'en restent pas moins propres à l'individu et ressenties de

manière subjective et interne.

Les mécanismes de l'émotion

Jean-Jacques PAILLER a repris le point de vue de Antonio DAMASIO pour expliquer le déclenchement d'une émotion. Selon lui, la perception d'un stimulus émotionnellement compétent⁵⁶ provoque sa représentation dans les zones cérébrales liées aux organes sensoriels percevant le stimulus. Il appelle ce phénomène **la présentation**. Des sites déclencheurs d'émotion sont stimulés par des signaux. La stimulation n'est possible que si les sites déclencheurs correspondent aux signaux envoyés. C'est ce qu'il appelle **l'induction**. *Ces sites vont alors activer, ailleurs, d'autres sites dits d'exécution. La cascade d'événements qui s'ensuivra deviendra une émotion* [Pailler, 2004].

Stephen Marc BREEDLOVE présente quatre théories expliquant le mécanisme des émotions. La figure 10 résume ces conceptions.

La première théorie représentée sur la figure 10.a est une théorie populaire selon laquelle *"les réactions autonomes sont causées par les émotions"* [Breedlove et al., 2012]. L'auteur précise cependant, que *"la relation entre l'émotion et l'excitation physiologique est bien plus subtile que cela"* [Breedlove et al., 2012].

La deuxième théorie présentée (figure 10.b) est celle de William JAMES et Carl G. LANGE selon laquelle les émotions seraient des perceptions des modifications somatiques, c'est-à-dire que l'émotion est ressentie lorsque l'activation du corps (par des stimulations) est perçue par l'individu. Cette conception a par la suite été écartée car elle *"ne donnait pas une explication satisfaisante des émotions [même si] cette théorie apporta sa contribution à la notion que l'expérience des émotions implique une 'lecture' de l'état somatique de l'individu"* [Breedlove et al., 2012].

La troisième théorie (figure 10.c) est celle de Walter CANNON et Philip BARD. Ces physiologistes n'étaient pas en accord avec la théorie précédente car *"l'expérience des émotions débute vraisemblablement bien avant que les modifications somatiques n'apparaissent"* [Breedlove et al., 2012], et cela serait justifié par la lenteur de ces dernières. Selon eux, les réactions somatiques sont *"des réponses d'alerte d'un organisme face à une menace soudaine [ou événement], qui produisent une activation maximale du système sympathique afin de préparer l'orga-*

56. Un 'stimulus émotionnellement compétent' (SEC) est détecté par un appareil perceptif filtrant, parmi les stimuli de l'environnement, réels ou remémorés par une situation donnée. [...] La compétence du SEC (son caractère de déclencheur) est reconnue comme telle, de façon innée ou acquise" [Pailler, 2004].

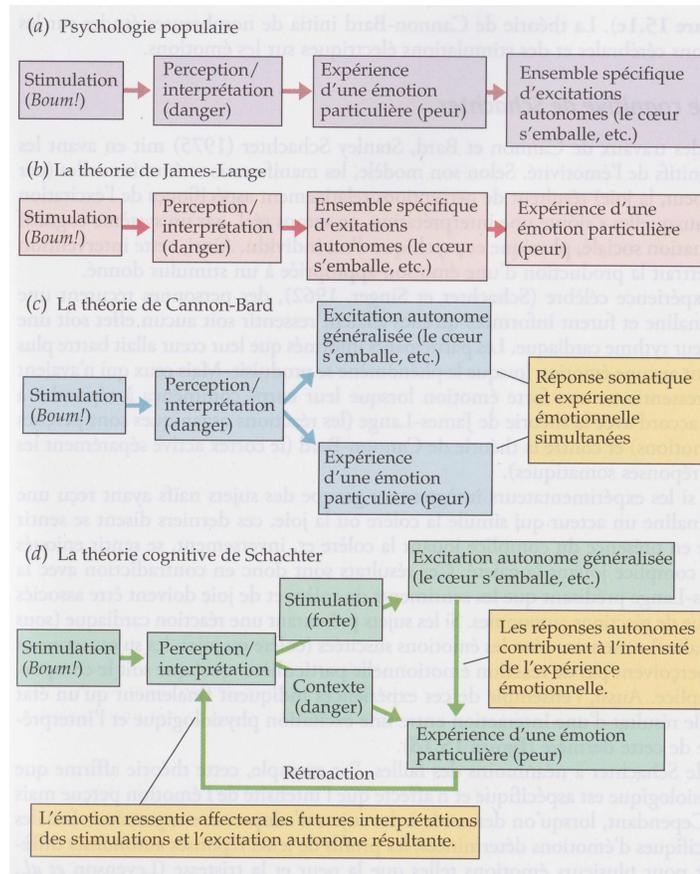


FIGURE 10 – Les théories sur les mécanismes émotionnels.

Cette figure est issue de l'ouvrage de Stephen Marc BREEDLOVE [Breedlove *et al.*, 2012] et représente schématiquement les mécanismes émotionnels selon quatre théories différentes. L'exemple utilisé est celui d'une déflagration ("Boum!").

nisme" [Breedlove *et al.*, 2012] à réagir. Les émotions auraient alors une fonction psychobiologique qui permettraient à l'individu d'affronter les variations environnementales. Dans cette théorie, ce serait au cerveau de décider quelle émotion en particulier constitue une réponse adéquate à un stimulus. Le cortex déciderait alors *"de la réponse émotionnelle la plus adaptée et active en même temps le système autonome afin que le corps soit prêt à réagir de la façon que le cerveau estime appropriée"* [Breedlove *et al.*, 2012].

Stanley SCHACHTER est à l'origine de la dernière théorie (figure 10.d) citée par Stephen Marc BREEDLOVE. Selon lui, *"les manifestations émotionnelles*

résultent de perceptions relativement aspécifiques de l'excitation physiologique, auxquelles s'ajoute une interprétation, en temps réel, par un système cognitif interne de la situation sociale, physique et psychique d'un individu [Breedlove et al., 2012]. L'émotion est alors produite de manière appropriée au stimulus par une intervention cognitive. Selon Stephen Marc BREEDLOVE, cette théorie présente également plusieurs failles concernant le fait que l'excitation physiologique serait aspécifique et qu'elle n'affecterait que l'intensité de l'émotion perçue sans en affecter la qualité.

Ces théories sont également citées par Marianne HABIB qui en ajoute d'autres comme les théories dimensionnelles ou encore les théories de l'évaluation cognitive (théories de référence à l'heure actuelle). Dans ces dernières, l'émotion est définie comme un processus et non comme un état. La perception et l'évaluation de la situation ont une place centrale dans les théories de l'évaluation cognitive. Elles place la cognition au centre du processus émotionnel *"puisque l'émotion est le résultat direct de l'évaluation cognitive"* [Habib et al., 2018]. L'autrice définit l'évaluation cognitive comme un processus capable de détecter et d'évaluer *"l'importance de l'environnement pour le bien-être de l'individu. Cette notion de bien-être s'appuie sur des concepts tels que les valeurs, les besoins, les croyances ou encore les objectifs actuels"* [Habib et al., 2018]. Selon ces théories, l'émotion serait un processus dynamique et multidimensionnel doté de cinq composantes. Quatre d'entre elles sont les mêmes que celles définies par Stephen Marc BREEDLOVE et présentées précédemment. La cinquième est donc **"l'évaluation"**

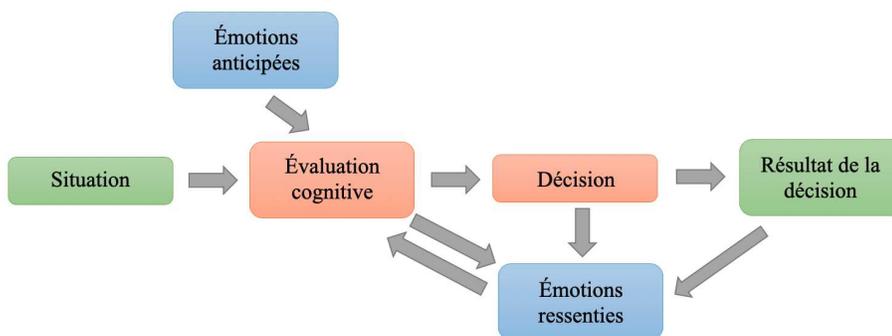


FIGURE 11 – **Théorie de l'évaluation cognitive.**

Cette figure est inspirée de l'ouvrage de Marianne HABIB et représente la schématisation de la place des émotions dans le processus décisionnel selon les théories de l'évaluation cognitive.

cognitive des objets ou des situations, qui permet le déclenchement et la différenciation des émotions et la différenciation des émotions et s'opère au niveau du système nerveux central" [Habib et al., 2018].

La figure 11 illustre le propos de Marianne HABIB et montre que l'évaluation cognitive intervient lors d'une situation afin de conduire l'individu à prendre une décision qui aboutira à un résultat. Les émotions ont une place prédominante dans ce modèle. En effet, les émotions anticipées et ressenties influencent l'évaluation cognitive. Cette dernière influence réciproquement les émotions ressenties. La décision a également un impact sur les émotions ressenties au même titre que le résultat de la décision. Ainsi, les émotions ont une place centrale dans le processus décisionnel.

Certaines zones du cerveau sont particulièrement impliquées dans les mécanismes décrits. L'amygdale est à l'origine du décodage des émotions et notamment des stimuli menaçants pour l'organisme. Le thalamus et l'hippocampe lui communiquent l'information sensorielle ce qui lui permet de mettre en lien les stimuli perçus avec l'état somatique adéquat. L'hippocampe est principalement impliqué dans la mémoire à long terme et par conséquent dans le stockage et la remémoration des souvenirs explicites. Il garde en mémoire les expériences émotionnelles ce qui permet d'apprendre de ces dites expériences afin d'adapter son comportement lorsque des situations similaires se produisent à nouveau. L'hypothalamus intervient dans l'activité du système nerveux autonome et réalise la liaison avec le système endocrinien. Le gyrus cingulaire relie les deux hémisphères du cerveau et permet par conséquent la communication des informations entre les différentes régions cérébrales du système limbique. Les quatre zones citées ici constituent le système limbique qui est considéré comme *"la région émotionnelle du cerveau"* [Habib et al., 2018].

Anna TCHERKASOFF et Laurie MONDILLON évoque la capacité d'autorégulation des émotions. Elles expliquent que *"la régulation émotionnelle consiste à atténuer, intensifier ou maintenir une émotion positive ou négative [...]. Elle réfère aux processus, tant intrinsèques qu'extrinsèques qui permettent d'apprendre à reconnaître, à explorer, à évaluer et à modifier une réaction émotionnelle"*⁵⁷. Ces processus permettent de modifier la durée et/ou l'intensité d'un ou plusieurs

⁵⁷. https://www.lippc2s.fr/wp-content/uploads/2013_Tcherkassof-Mondillon_Emotion_Chapt_deBoeck.pdf

composants émotionnels. Il existe principalement deux manières de réguler ses émotions : la réévaluation cognitive et la distraction. La première consiste à modifier la méthode d'évaluation de l'antécédent émotionnel afin d'en altérer la signification émotionnelle. Quant à elle, la distraction consiste à détourner son attention de l'expérience émotionnelle vers une tâche cognitivement prenante afin d'utiliser les ressources de la mémoire de travail sur l'activité focale au détriment de l'information émotionnelle négative. L'autorégulation émotionnelle permet notamment à l'individu d'adapter son comportement social. Il serait alors question "*d'intelligence émotionnelle*". Cela favoriserait le bien-être social mais aussi la bonne santé.

Implication des émotions dans l'apprentissage

Slim MASMOUDI et Abdelmajid NACEUR mettent en avant des études en psychologie et en neurobiologie qui montrent que les émotions peuvent avoir un impact positif sur les fonctions cognitives et l'apprentissage. Ils citent différentes recherches qui montrent l'importance des émotions dans le fonctionnement cognitif et leur implication dans la prise de décision. Les auteurs identifient deux processus distincts constituant cette dernière : l'intelligence logico-mathématique et l'intelligence émotionnelle. La première faisant référence au raisonnement, à la logique et à la rationalité. La seconde serait plutôt dépendante des "*habiletés dédiées à la gestion des émotions intra- et inter-individuelles*" [Masmoudi et Naceur, 2010] (la capacité d'autorégulation). C'est la collaboration de ces deux formes d'intelligence qui favoriserait la prise de décision, la résolution de problème, le langage, etc. Cela rejoint ce qui a été abordé dans la section 1.3.4⁵⁸ sur le fait que des émotions "positives" pourrait favoriser l'efficacité du raisonnement et inversement pour les émotions "négatives". Les auteurs citent six études qui explorent l'implication des émotions dans la prise de décision. Ils ont également réalisé leur propre étude exploratoire.

L'analyse de ces différentes études a montré que l'émotion n'est pas "*simple-ment un facteur qui colore nos choix, mais plus important encore, l'émotion est considérée comme un traitement spécifique laissant des traces dans nos activités cognitives de la décision et façonnant nos styles décisionnels*" [Masmoudi et Naceur, 2010]. La capacité de l'individu à identifier, comprendre, évaluer et réguler ses émotions contribue "*au contrôle des processus mentaux qui peuvent soutenir la prise de décision, la perception de l'information utile qui favorise l'atteinte d'un but précis, la récupération et la régulation des connaissances nécessaires*"

58. Section 1.3.4, paragraphe "Raisonnement et émotions".

[Masmoudi et Naceur, 2010]. Il en résulte que l'émotion permet de mettre en avant les actions les plus positivement marquées et d'inhiber leurs antagonistes. L'émotion permet aussi "d'étiqueter" les sous-butts élaborés lors d'une tâche de résolution de problème de façon positive ou négative. Il est par conséquent établi que les émotions ont un impact sur les fonctions cognitives comme le raisonnement mais l'inverse est aussi vrai. En effet, l'autorégulation des émotions fait appel aux processus cognitifs dont le raisonnement afin d'aboutir au maintien ou à l'inhibition de l'émotion en jeu. Émotions et fonctions cognitives interagissent et collaborent pour aboutir à des décisions, des choix qui permettront d'atteindre le but fixé.

Le résultat de ces études a permis de comprendre le rôle que jouent les émotions dans la prise de décision et par extension dans une tâche de résolution de problème. Il est alors possible de faire le lien entre ces constats et l'apprentissage de manière générale. Ainsi, les émotions tant intra- qu'inter-personnelles interviennent lorsque l'apprenant est dans une situation d'apprentissage. Agir sur ces émotions ou plutôt accompagner l'apprenant à agir sur ses émotions peut lui permettre d'améliorer ses performances cognitives ou tout du moins l'aider à ne pas faire d'elles un frein à l'apprentissage.

Dans le contexte de la tâche CreaCube, il n'y a pas d'interaction avec un enseignant pour l'accompagner en ce sens. Pour autant, cela ne veut pas dire que les émotions de l'apprenant n'entrent pas en jeu. Le but de cette mise en situation n'a pas pour but initial d'analyser les émotions de l'apprenant. Cependant, la prise en compte de cet aspect et l'observation des réactions corporelles (faciales par exemple) pourrait permettre d'identifier les points de difficulté ou d'aisance de l'apprenant au cours de la tâche, par exemple en détectant l'ennui ou l'intérêt. Dans le but de comprendre comment un apprenant apprend, identifier ces marqueurs somatiques lors de la résolution de la tâche pourrait permettre d'identifier dans quelle mesure il est nécessaire de prendre en compte les émotions au cours d'une situation d'apprentissage.

1.3.8 Les fonctions mentales : conclusion

Les différentes fonctions cognitives ici présentées permettent de conclure que chacune d'entre elles, à son niveau, intervient dans le processus d'apprentissage. Elle collaborent et interagissent les unes avec les autres pour permettre à l'apprenant de tirer parti au mieux d'une situation d'apprentissage. C'est leur prise

en compte, leur observation et leur analyse qui pourra conduire à la compréhension du "comment l'apprenant apprend". Comme cela a été évoqué, ce n'est pas si simple car ces fonctions cognitives peuvent aussi bien favoriser que freiner l'apprentissage selon le contexte interne ou externe de l'apprenant et il est difficile de mesurer chacun de ces facteurs. Cependant, identifier les mécanismes en jeu à chaque moment de la tâche peut déjà permettre d'en apprendre plus sur le fonctionnement de l'apprentissage et sur le degré d'implication des fonctions cognitives au cours de celui-ci.

1.4 La métacognition

1.4.1 Généralités

Un autre aspect de la cognition et des processus mentaux est à prendre en compte pour l'apprentissage. En effet, Jean-Philippe LACHAUX explique que la métacognition est capitale pour l'apprentissage et la transférabilité des compétences [Lachaux, 2018].

Olivier HOUDÉ définit précisément la métacognition comme *"l'ensemble des processus, des pratiques et des connaissances permettant à chaque individu de contrôler et d'évaluer ses propres activités cognitives, c'est-à-dire de les réguler"* [Houdé et al., 2018]. Il précise que l'activité cognitive est constituée de *"tout ce que l'on fait lorsque l'on pense"* [Houdé et al., 2018].

Jean-Philippe LACHAUX évoque l'accompagnement métacognitif lors d'un jeu, dans une expérience ou encore dans une tâche de résolution de problème comme étant essentiel afin de permettre à l'apprenant d'identifier les processus mentaux engagés et ainsi pouvoir transférer ses acquisitions à d'autres situations. Olivier HOUDÉ confirme ce point de vue en écrivant : *"de même que l'enseignant choisit ses gestes d'apprentissage, l'élève choisit (ou refuse) d'agir cognitivement, de répondre aux sollicitations d'attention et d'effort de la manière requise pour accomplir la tâche proposée"* [Houdé et al., 2018]. Ainsi l'élaboration de la tâche, la tâche en elle-même et sa résolution sont dépendantes de l'investissement cognitif et métacognitif du concepteur de la tâche et de l'apprenant tentant de la résoudre. L'auteur constate qu'*"il est essentiel pour l'enseignant comme pour l'élève de s'approprier de manière pratique et concrète sa part de l'activité cognitive partagée, et de comprendre ce qui en conditionne le succès"* [Houdé et al., 2018].

Par ailleurs, la métacognition est mise en jeu par les fonctions mentales dans

un processus d'évaluation en amont (prédiction) et en aval de la tâche (évaluation). Cela se fait en lien avec la perception de celle-ci par l'apprenant mais aussi avec la perception qu'il a de lui-même.

En 2004, Margarida ROMERO étudie le rôle de la métacognition dans l'apprentissage, cela contextualisé dans un Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain (EIAH). Elle cite plusieurs définitions de la métacognition en lien avec les informations précédentes. La métacognition serait alors "*une prise de conscience de l'expérience cognitive et des connaissances acquises*" [Romero, 2004]. Cette prise de conscience permettrait la sélection, la révision et l'abandon "*de certaines tâches cognitives, buts ou stratégies*" [Romero, 2004]. Par ailleurs, l'autrice explore les notions de connaissances métacognitives (connaissances sur la cognition⁵⁹) et d'habiletés métacognitives (processus de surveillance, de contrôle et de régulation de la cognition).

Didier LE GALL et ses collaborateurs rejoignent les éléments précédemment abordés en définissant la notion de métacognition comme se rapportant "*à la connaissance qu'on a de ses propres processus cognitifs, de leurs produits de tout ce qui y touche*" [Le Gall et al., 2009]. Il précise qu'elle se rapporte "*à la surveillance active, à la régulation et à l'orchestration de ces processus en fonction des objets cognitifs ou des données sur lesquels ils portent habituellement pour servir un but ou un objectif concret*" [Le Gall et al., 2009]. La connaissance est une composante de la métacognition. Elle intervient lors de l'étape de planification ayant lieu avant la résolution de la tâche. Celle-ci renvoie à un savoir général indépendant de l'activité cognitive en cours. À l'inverse, la connaissance renvoyant à un savoir dépendant de cette activité intervient au cours de la réalisation de la tâche et permet de réguler la cognition.

1.4.2 Le fonctionnement de la métacognition

D'après Didier LE GALL [Le Gall et al., 2009], la planification et le contrôle sont les principales fonctions de la régulation cognitive. La première permet l'élaboration d'un plan d'action et dépend des connaissances métacognitives de l'apprenant alors que la deuxième permet d'évaluer l'efficacité de ce plan au cours même de sa mise en place dans la résolution de la tâche.

La planification de l'apprentissage est rendue possible par la mise place de stratégies métacognitives en tant que techniques de régulation. Ces stratégies

59. sur les processus cognitifs impliqués et nécessaires à la résolution de la tâche

permettent en outre de surmonter les difficultés rencontrées par la révision des buts et/ou sous-buts. *"Elles peuvent être soit acquises implicitement, par tâtonnements successifs, soit être explicitement enseignées"* [Houdé et al., 2018]. Il existe trois types de stratégies métacognitives : **directives** (optimisation de l'atteinte d'un but cognitif), **préventives** (protection contre les illusions et les biais de raisonnement) et **motivacionnelles** (*"visent à élever la conscience de l'importance d'un apprentissage, à voir l'erreur de manière constructive, entretenir une représentation flexible de sa propre intelligence etc."* [Houdé et al., 2018]).

Quant à Olivier HOUDÉ, il évoque les termes d'activité cognitive de contrôle et d'évaluation. Il précise cependant que tout n'est pas contrôlé et stocké en mémoire. En effet, les fonctions mentales et notamment *"la perception, la mémoire et le raisonnement ont une dimension réceptive"* [Houdé et al., 2018]. La perception peut s'exercer sans l'existence d'un but spécifique. Il est également possible d'apprendre de manière implicite (sans le vouloir, sans en avoir l'intention) et avoir des flashes mémoriels non contrôlés. Néanmoins, *"la perception, la mémoire et le raisonnement sont contrôlés par un but de connaissance [...] L'essentiel de la vie mentale consiste à s'efforcer d'identifier, de reconnaître, d'apprendre, de résoudre des problèmes ou de rappeler des connaissances"* [Houdé et al., 2018]. Les efforts cognitifs sont modulés par la métacognition selon quatre dimensions lors d'une étape de prédiction ou évaluation prédictive (première étape du contrôle) : *"1/ l'importance du but, 2/ l'intérêt intrinsèque⁶⁰ de l'activité, 3/ l'effort probablement demandé par son accomplissement, 4/ la probabilité de l'atteindre, étant donné les circonstances présentes"* [Houdé et al., 2018].

Lorsque le contrôle a été effectué et que l'apprenant s'est engagé dans la tâche, vient l'étape du monitoring. Une évaluation rétrospective de l'action mise en place suite à la planification est nécessaire pour vérifier l'atteinte du but ou du sous-but. Lors de cette évaluation, des prédictions implicites (heuristiques) permettent la comparaison entre la divergence possible entre les caractéristiques du résultat obtenu et celles attendues.

Comme évoqué précédemment, la métacognition intervient en amont de la tâche par l'évaluation préalable de la situation (faut-il agir ou non) puis par la planification. Par ailleurs, elle intervient également *"de manière rétrospective,*

60. L'intérêt intrinsèque (ou motivation intrinsèque) sera défini dans la section 2

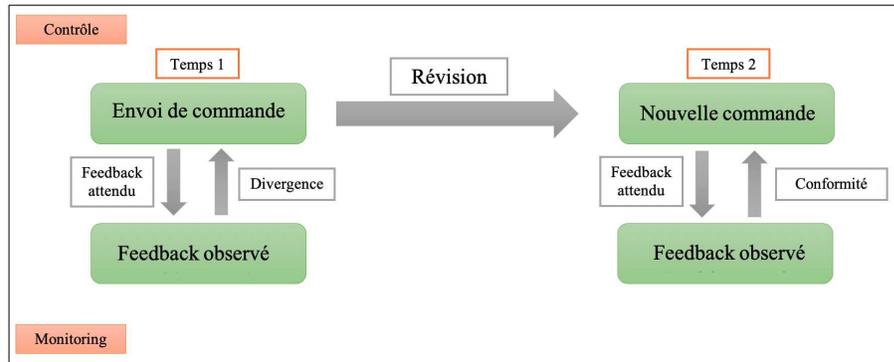


FIGURE 12 – Cycles contrôle-monitoring-contrôle de la métacognition au cours du temps.

Cette figure est inspirée du schéma réalisé par Olivier HOUDÉ [Houdé *et al.*, 2018]. Elle représente les cycles contrôle-monitoring-contrôle. Les commandes correspondent aux ordres donnés et les *feedback* aux observations de progrès. Le niveau supérieur est le niveau actif donneur d'ordre alors que le niveau inférieur correspond au niveau subordonné pourvoyeur de rapports d'activité.

pour renseigner le système sur la réalisation correcte de l'action. Dans les deux cas, prédiction ou évaluation, ce qui est estimé est la divergence entre le 'feedback attendu' [...] et le 'feedback observé' [Houdé *et al.*, 2018]. Lorsque la divergence se produit, un signal d'erreur est produit engendrant un abandon ou une révision de l'action. A l'inverse, s'il n'y a pas divergence, l'apprenant poursuit son action ou accepte le résultat. "Les cycles successifs de contrôle-monitoring-contrôle sont donc à la base de toute l'activité cognitive" [Houdé *et al.*, 2018]. Ce phénomène est représenté dans la figure 12.

Par ailleurs, Olivier HOUDÉ explique que les affects jouent un rôle important dans la métacognition. Il parle de sentiments noétiques, c'est-à-dire liés à l'acquisition de connaissance. "C'est un sentiment de difficulté qui motive la décision de traiter ou non le problème et module l'effort requis. C'est le sentiment de progresser qui pousse à persévérer" [Houdé *et al.*, 2018]. Ces derniers sont le produit d'un traitement cérébral automatique évaluant "les opportunités d'agir cognitivement et [adaptant] la cognition individuelle aux difficultés rencontrées" [Houdé *et al.*, 2018]. Ce sont les heuristiques (au sens, ici, d'associations entre certains paramètres de l'activité et le résultat obtenu⁶¹) qui rendent possible ce traitement cérébral. Elles rendent possible l'utilisation d'indices à visée prédictive ou à

61. Dans ce cas, ces associations sont implicitement formées.

visée d'évaluation concernant le succès de la tâche en cours. Des sentiments noétiques (au sens défini plus haut et qui permet ici une dénomination plus précise que le terme de pensée⁶²) de savoir⁶³ ou d'ignorer sont provoqués par l'ampleur de la divergence entre les indices attendus et observés. *"Plusieurs heuristiques peuvent se combiner, et donner lieu à un sentiment noétique unique qui intègre toutes les informations prédictives"* [Houdé et al., 2018]. L'une des heuristiques impliquées dans le sentiment de savoir est l'heuristique de fluence⁶⁴.

Les heuristiques impliquées dans les sentiments métacognitifs se construisent et se réalisent à l'insu de l'apprenant. Les sentiments cognitifs servent d'interface entre les processus automatiques implicites (les heuristiques précédemment citées) et les processus explicites contrôlés.

L'auteur met aussi en lien⁶⁰ la motivation intrinsèque et l'attention avec la métacognition. Il précise que l'engagement de l'apprenant dépend de sa motivation intrinsèque envers la tâche. C'est l'adaptation de cette tâche dans une juste mesure qui permettra à l'apprenant de se fixer des sous-buts pour atteindre le but de la résolution du problème posé. De plus, la motivation intrinsèque influence les formes d'attention engagées au cours de la tâche. Il existe quatre types de buts attentionnels identifiés par Michelene T. H. CHI et Ruth WYLIE dans le modèle ICAP [Chi et Wylie, 2014] :

1. **L'attention passive** : l'apprenant *"se borne à suivre ce qui est dit, ou du moins ce qu'il en comprend. Les connaissances restent atomiques et non intégrées"* [Houdé et al., 2018]. Elle donne lieu à des sentiments métacognitifs de facilité de traitement (maîtrise d'un lexique).
2. **L'attention active** : l'apprenant *"manipule les contenus, prend des notes, relit"* [Houdé et al., 2018]. L'aisance lexicale devient alors aisance conceptuelle. Les sentiments métacognitifs de compréhension et de plaisir de découverte entrent en jeu.
3. **L'attention constructive** : l'apprenant *"reformule le contenu dans ses*

62. Les sentiments noétiques sont également appelés "sentiments cognitifs".

63. *"Feeling of knowing"*, notion introduite par Joseph T. HART en 1965 [Hart, 1965] et citée par Didier LE GALL [LE GALL et al., 2009] EN 2009.

64. *"la rapidité d'une réponse prédit la correction et la cohérence entre les représentations évoquées par une question"*[Houdé et al., 2018]

propres termes, établit des liens entre plusieurs concepts, etc." [Houdé et al., 2018]. L'attention se libère peu à peu du lexique proposé et les sentiments métacognitifs en jeu dans le niveau précédent s'intensifient.

4. **L'attention interactive** : l'apprenant *"discute du matériel avec un pair, débat avec lui sur la valeur des arguments, etc."* [Houdé et al., 2018]. Elle est centrée sur la communication structurée par un enjeu de connaissance ce qui implique des évaluations métacognitives implicites de plausibilité, de cohérence, de pertinence et de justification rationnelle de ce qui est proposé.

La performance de l'apprenant est améliorée entre la première forme attentionnelle et la dernière. Des formes différentes de contrôle et de suivi de l'activité cognitive sont alors en jeu.

1.4.3 Métacognition : conclusion

Il est alors possible d'établir le rôle que pourrait jouer l'exploitation de la métacognition sur la résolution de la tâche CreaCube et plus largement dans l'apprentissage par le jeu. En effet, l'apprenant pourrait verbaliser son cheminement tout au long de la résolution du problème de façon à identifier les processus cognitifs engagés en mettant en oeuvre des stratégies métacognitives et ainsi mettre en avant les connaissances préalables ou encore la curiosité justifiant les actions et la progression de l'apprenant dans la tâche. De plus, il serait possible de comprendre la stratégie mise en place par l'apprenant pour atteindre le but fixé par la verbalisation des sous-buts qu'il a identifié comme lui permettant d'aboutir à la solution.

Comprendre ce que l'apprenant mobilise ("le quoi") et met en place mais aussi sa manière de le mettre en place ("le comment") au cours d'une tâche de résolution de problème, pourrait permettre d'en apprendre davantage sur le processus d'apprentissage. Quant à l'apprenant, cela lui permettrait de favoriser son apprentissage. En effet, en identifiant les processus en jeu et en justifiant ses actions, son raisonnement, il pourra plus facilement transférer ses acquisitions lors d'une prochaine tâche différente. D'autre part, comme Jean-Philippe LACHAUX [Lachaux, 2018] l'explique, en multipliant les supports et les formes de tâches tout en mettant à profit la métacognition, l'apprenant aura davantage de facilité à transférer ses acquis. Cela permettra également à l'apprenant de mettre en jeu

une forme attentionnelle plus performante impliquée dans la métacognition.

1.5 De la cognition à l'apprentissage humain : conclusion

Au cours de cette exploration conceptuelle, il a été mis en avant la place de la cognition dans chacun de ses aspects lors de l'apprentissage. L'aspect multidisciplinaire de cela conduit à prendre en compte la diversité et la complexité des interactions en jeu dans ce processus. L'information, la connaissance, les savoirs, les fonctions cognitives, la métacognition, tous ces éléments sont constitutifs de l'apprentissage humain. Leurs implications ont été explorées et ont montré à quel point ce dernier est un processus aussi complexe qu'essentiel au développement humain. Cela confirme l'importance de comprendre comment ce processus fonctionne.

Certaines notions ont été abordées de manière transversale sans pour autant avoir été définies avec précision. La motivation, la curiosité, l'intuition, les buts, le numérique font parties de ces notions et sont au coeur de la problématique à l'origine de ce travail. En effet, l'équipe du projet FLOWERS a mis en évidence que la motivation joue un rôle fondamental dans l'amélioration de la qualité des apprentissages. Cette équipe a créé des algorithmes⁶⁵ qui permettent cela, dans une certaine mesure. Par ailleurs, il a été abordé dans cette première partie que la mise en jeu des différentes fonctions cognitives dans la résolution de problème étaient rendue possible en partie grâce au but. Plus précisément, c'est l'existence d'un but intrinsèque ou extrinsèque qui motive l'apprenant à s'engager dans une tâche et a fortiori dans une tâche d'apprentissage. Cela est au coeur du travail mené au sein de l'action exploratoire AIDE.

Ainsi, aboutir à la modélisation de l'apprenant et tenter de comprendre comment ce dernier apprend impose d'explorer ces notions. À la lumière de ces éclairages conceptuels, le processus d'apprentissage et ce qui le constitue vont pouvoir être explicités. Cela conduira ensuite à la définition des notions précédemment citées afin de lever les ambiguïtés et d'identifier leur rôle dans ce processus. Enfin, l'étude du travail réalisé par l'équipe FLOWERS permettra de compléter l'ontologie chargée de représenter de manière symbolique l'apprenant qui apprend lors d'une tâche de résolution de problème.

65. Voir la section 3.

2 Le rôle de la motivation dans l'apprentissage

2.1 Processus d'apprentissage

Jean FRAYSSINHES et Florent PASQUIER qualifient l'apprentissage comme une *"réaction cérébrale due à un stimulus, une nouveauté"* [Frayssinhes et Pasquier, 2018]. Ils précisent également que le cerveau *"doit être en interaction, [...] éveillé, motivé, concentré"* et qu'il *"suscite des émotions qui sont liées à la mémoire"* [Frayssinhes et Pasquier, 2018].

Alain LIEURY définit l'apprentissage comme *"la modification systématique du comportement en fonction de l'exercice"* [Lieury, 2017]. Il existe divers niveaux d'apprentissage qui seraient liés à *"la complexité du système nerveux, en particulier du cerveau"* [Lieury, 2017].

En ce sens, il apparaît évident que différents facteurs peuvent influencer le processus d'apprentissage. Les aspects cognitifs engagés et nécessaires dans ce processus ont été détaillés précédemment. Par ailleurs, plusieurs théories ont été élaborées au cours des années afin de préciser les mécanismes en jeu et leur évolution au fil du temps et des progrès réalisés dans ce domaine. Ces théories vont donc être présentées ici et permettront de préciser les concepts qui ne l'ont pas été jusqu'à présent.

2.1.1 Les théories de l'apprentissage humain

D'après Mohammed CHEKOUR, l'apport des théories de l'apprentissage et leur évolution permet de progresser dans la compréhension du processus d'apprentissage : *"les théories de l'apprentissage visent à expliquer le phénomène d'acquisition des connaissances"* [Chekour et al., 2015]. Il en cite cinq qui se sont succédées : le behaviorisme, le cognitivisme, le constructivisme, le socio-constructivisme et le connectivisme. Il est question ici des théories de l'apprentissage humain et non des théories permettant de formaliser l'apprentissage machine : le lien entre les deux champs reste à construire.

Le behaviorisme

Le behaviorisme est aussi appelé comportementalisme puisqu'il se concentre sur l'étude des comportements. Mohammed CHEKOUR explique que cette théorie *"est une théorie de l'apprentissage qui s'intéresse à l'étude des comportements observable, sans faire appel à des mécanismes internes au cerveau ou à des processus mentaux non directement observables"* [Chekour et al., 2015].

Le psychologue John WATSON est à l'origine du behaviorisme et s'est inspiré du physiologiste Ivan PAVLOV sur le conditionnement pour élaborer la théorie du "stimulus-réponse".

Alain LIEURY évoque le conditionnement et les apprentissages sensori-moteurs comme des modes d'apprentissage primitifs qui requièrent des dizaines voire des centaines d'essais. Il illustre ce phénomène par une expérience pavlovienne menée sur la salivation chez le chien dans le processus de digestion. Le chien salive de manière réflexe à la vue ou au contact de nourriture (stimulus inconditionnel). L'expérience consiste à associer ce stimulus inconditionnel à un stimulus conditionnel, le son d'un métronome. Au bout de 30 essais, le chien salive autant à l'écoute du métronome qu'à la vue de nourriture. Chez l'humain, le conditionnement se retrouve lors de l'apprentissage du vélo, taper à la machine ou conduire une voiture par exemples.

Frédéric ALEXANDRE a aussi étudié la théorie pavlovienne. Il explique que les réponses aux stimuli sont stéréotypées et sont les conséquences des associations apprises (conditionnement). Ces réponses sont aussi appelées des "réflexes pavloviens". Selon l'auteur, l'apprentissage pavlovien permet l'anticipation des caractéristiques positives ou négatives d'un stimulus inconditionnel dès l'arrivée du stimulus conditionnel, préparant ainsi l'individu à l'évènement qui va se produire [Alexandre, 2021].

Aujourd'hui, le conditionnement et les apprentissages sensorimoteurs sont regroupés sous le terme de *mémoire implicite* [Lieury, 2017]. Plus précisément, le conditionnement émotionnel et les réflexes conditionnés sont des apprentissages associatifs reliant un stimulus à une réponse émotionnelle ou comportementale, comme dans le cadre pavlovien. Au delà, la *mémoire procédurale* permet l'acquisition des habiletés motrices (qui concerne les habitudes et les compétences), éventuellement complexes (faire du vélo est l'exemple le plus souvent cité, qui une fois mémorisé ne demande plus de souvenir précis pour une réutilisation). De plus, l'effet d'amorçage⁶⁶ est une augmentation des capacités suite à l'exposition préalable d'une information pertinente.

Mohammed CHEKOUR cite également Gustav Theodor FECHNER concernant le modèle stimulus-réponse. Celui-ci *"compare l'individu à une boîte noire, dont on ne sait rien sur ce qui se passe à l'intérieur, mais dont on peut prévoir certains comportements puisqu'en proposant des stimuli particuliers on obtient toujours*

66. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Amorçage_\(psychologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Amorçage_(psychologie))

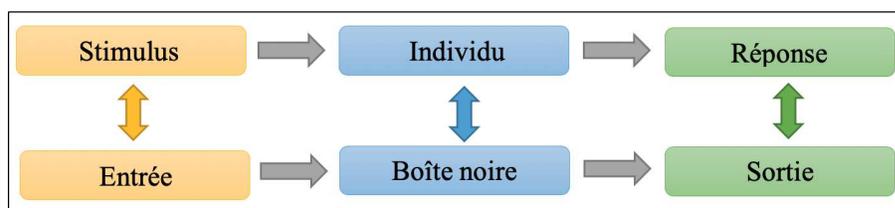


FIGURE 13 – **Modèle comportemental de FECHNER.**

Cette figure est inspiré du schéma présenté dans l'article de Mohammed CHEKOUR [Chekour *et al.*, 2015]. Elle représente le modèle comportemental de FECHNER. Les flèches colorées représentent les comparaisons entre l'individu apprenant et ce qui est observable scientifiquement selon la théorie d'apprentissage behavioriste. Les flèches grises représentent la succession des étapes d'apprentissage.

les mêmes résultats à la sortie" [Chekour *et al.*, 2015]. Le modèle issu de cette théorie est représenté dans la figure 13.

L'auteur explique que, pour le behaviorisme, l'apprentissage est considéré comme *"une modification durable du comportement résultant d'un entraînement particulier"* [Chekour *et al.*, 2015]. Par exemple, selon le modèle de Fechner, le stimulus pourrait correspondre à une notion abordée en classe et la réponse serait le manifestation d'un comportement attendu montrant que le notion est assimilée en tant que connaissance. Cela est rendu possible par la répétition, et le renforcement positif. L'observation d'un comportement inattendu, suggérant que l'apprenant n'a pas intégré les connaissances issues de la notion transmise, implique la nécessité de répéter le processus jusqu'à ce que la réponse comportementale attendue soit observée. Lorsque la réponse est conforme aux attentes, le renforcement positif entre en jeu pour valider l'intégration des connaissances. *"Dans cette théorie, l'apprenant est un élève qui écoute, regarde, réagit et tente de reproduire face à un enseignant qui est transmetteur d'information, de connaissances, qui présente, décrit, schématise, planifie et vérifie"* [Chekour *et al.*, 2015]. Cela signifie que l'apprenant n'attribue pas véritablement de sens aux connaissances ainsi restituées et qu'il n'a pas consciences des différentes étapes de son apprentissage.

Mohammed CHEKOUR met en avant la facilité d'application de cette théorie tout en pointant le fait qu'elle soit insuffisante pour aboutir à une modélisation réaliste de l'apprentissage : *"Si cette théorie est confortable dans l'optique d'une introduction de la machine numérique⁶⁷, elle semble trop pauvre pour être du-*

67. L'auteur précise sa pensée en donnant ces exemples : *"L'enseignant behavioriste sera porté à*

nable" [Chekour et al., 2015]

Emmanuel DUPLÀA identifie deux limites à la théorie cognitiviste (ou ce qu'il appelle computationnaliste) : *"la première concerne le « goulot d'étranglement de Von Neumann » qui oblige l'établissement de règles séquentielles pour le traitement de l'information symbolique ; la deuxième réside dans le fait que le traitement symbolique est localisé et que la perte ou le dysfonctionnement d'une partie des symboles ou des règles du système provoque un dysfonctionnement de l'ensemble"* [Duplâa et Talaat, 2011].

Le cognitivisme

Le cognitivisme, aussi appelé rationalisme, se concentre sur les façons de penser et de résoudre des problèmes. Cette théorie a été élaborée par George Armitage MILLER et Jerome Seymour BRUNER à la naissance de l'intelligence artificielle. Le point de vue cognitiviste est de considérer que *"l'apprentissage ne peut être limité à un enregistrement conditionné, mais doit plutôt être envisagé comme nécessitant un traitement complexe de l'information reçue"* [Chekour et al., 2015]. Cette théorie est basée sur la structure de la mémoire qui *"implique l'organisation de l'information et le recours à des stratégies pour gérer cette organisation"* [Chekour et al., 2015]. Les connaissances sont ainsi organisées selon leur type : déclaratives, procédurales ou conditionnelles. Par conséquent, les stratégies d'intégration sont différentes puisque les différents types de connaissances ne sont pas représentés de la même façon dans la mémoire. Selon Mohammed CHEKOUR et d'après la psychologie cognitive, *"les connaissances déclaratives répondent en effet au QUOI, les connaissances procédurales au COMMENT et les connaissances conditionnelles au QUAND et au POURQUOI"* [Chekour et al., 2015].

Frédéric ALEXANDRE explique plus précisément ce qui est impliqué par ces questions et rajoute le "où", sachant que le "quand" correspond à une localisation temporelle, tandis que le "où" est une localisation spatiale.

Selon lui, le "quoi" et le "pourquoi" permettent de relier le corps interne et l'environnement externe⁶⁸. La question "quoi" serait un moyen d'encoder un stimulus conditionnel (objectif actuel du comportement) ainsi que son impact émotionnel. Le "pourquoi" correspond aux caractéristiques de l'impact motivationnel sur le corps. Il est utile pour encoder l'impact des stimuli inconditionnels

utiliser des exercices, des quizz, des jeux éducatifs et/ou des animations lors de la conception et la réalisation d'une formation à distance" [Chekour et al., 2015].

68. Pour rappel, les trois mondes de la cognition sont représentés dans la figure 1

ou encore le coût corporel d'une réponse pour l'obtenir. Cette question permet d'identifier pourquoi l'individu agit (dans quel but) et pourquoi il accepte de dépenser de l'énergie (jusqu'à quel niveau) pour agir de la sorte.

L'auteur poursuit en disant que les questions "où" et "comment" font la liaison entre le corps étendu et l'environnement extérieur. Le "où" permet de récolter des informations sur la localisation d'un objet dans l'environnement extérieur et ceci par rapport au corps (ou à certaines parties du corps). C'est ce qui permet également de s'orienter dans l'environnement. Enfin, la question "comment" fait référence au besoin d'apprendre de quelle manière les objets peuvent être modifiés par l'action de certaines parties du corps [Alexandre, 2021].

Le cognitivisme considère que l'apprenant *"l'apprenant est un système actif de traitement de l'information, semblable à un ordinateur : il perçoit des informations qui lui proviennent du monde extérieur, les reconnaît, les emmagasine en mémoire, puis les récupère de sa mémoire lorsqu'il en a besoin pour comprendre son environnement ou résoudre des problèmes"* [Chekour et al., 2015]. Il ne s'agit plus seulement d'acquérir des comportements observables, comme le suggère la théorie behavioriste, mais d'intégrer à ses schémas mentaux des connaissances en tant que réalité externe. Cela implique une diversité dans le processus d'apprentissage puisque, selon cette théorie, l'individualité est un facteur qui influence la manière de traiter l'information.

Mohammed CHEKOUR présente, cependant une limite à la théorie cognitive concernant l'aspect motivationnel qui doit être pris en compte dans la réalisation du modèle car c'est cet aspect qui conduit l'apprenant à investir ses ressources dans la tâche d'apprentissage.

Le constructivisme

Selon Pierre CIEUTAT et Sylvain CONNAC, le constructivisme ou théorie de la construction cognitive, est basée sur le fait qu'apprendre *"n'est pas ajouter, mais transformer une organisation interne existante, au regard d'un environnement qui induit une appropriation"* [Cieutat et Connac, 2017]. Jean PIAGET est à l'origine de cette théorie *"fondée sur l'idée que la connaissance est élaborée par l'apprenant sur la base d'une activité mentale"* [Kerzil, 2009].

Selon Jennifer KERZIL l'apprenant doit s'approprier les connaissances par le biais de l'exploration mais aussi par l'apprentissage actif et la mise en pratique. Les savoirs sont alors construits de l'expérience, le but étant que l'apprenant

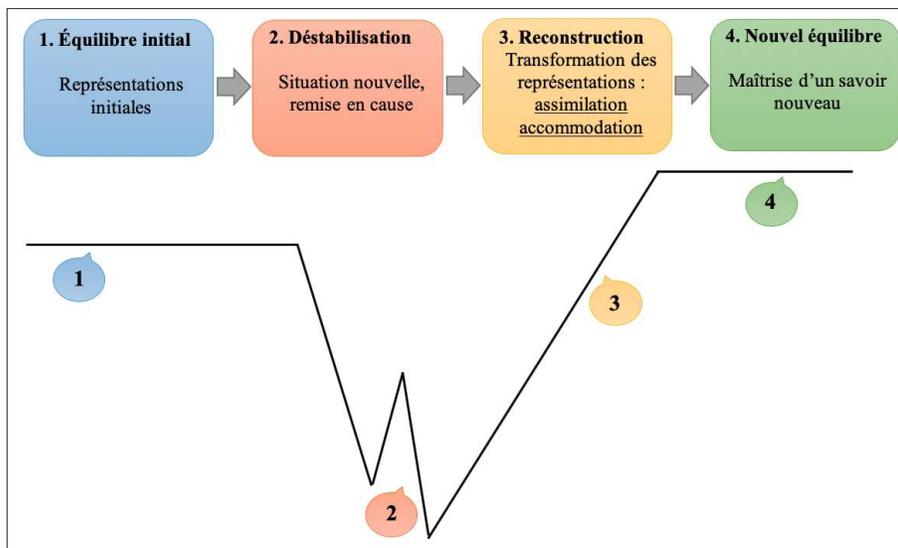


FIGURE 14 – L'apprentissage selon le constructivisme.

Cette figure représente les 4 étapes successivement rencontrées lors de l'apprentissage, du point de vue constructiviste. (1) L'équilibre initial de l'apprenant est constitué de ses représentations, de ses connaissances préalables basées sur ses expériences. (2) S'ensuit une nouvelle situation ou un problème à résoudre qui provoque un déséquilibre. (3) La phase de reconstruction est constituée des processus d'assimilation et d'accommodation qui permettent d'incorporer de nouvelles représentations (assimilation) ou de modifier les représentations initiales en incorporant les éléments nouveaux (accommodation). (4) C'est lorsque les nouvelles connaissances sont maîtrisées qu'un nouvel état d'équilibre plus riche est atteint.

crée sa propre signification des situations et des problèmes qu'il rencontre. "La démarche d'apprentissage consiste alors à partir de l'action à penser pour aboutir à la résolution du problème rencontré" [Kerzil, 2009].

L'autrice explique que des schèmes opératoires ⁶⁹ vont être mobilisés de sorte que l'apprenant pourra soit "incorporer les informations perçues au sein de sa structure cognitive (assimilation), soit modifier sa structure cognitive afin d'incorporer les éléments nouveaux provenant de la situation (accommodation)" [Kerzil, 2009]. Cela est représenté dans la figure 14.

Mohammed CHEKOUR cite le point de vue de Jean PIAGET concernant les définitions d'assimilation et d'accommodation : "l'assimilation et l'accommodation forment un couple indispensable à l'activité cognitive dont les différents processus d'équilibration seront développés dans l'équilibration des structures cog-

69. Structures cognitives mobilisées par une personne face à une situation ou à un problèmes.

nitives [...] L'assimilation désigne la réintégration d'éléments externes nouveaux dans une structure interne préexistante; l'accommodation désigne l'adaptation de l'organisme aux variations externes qu'il ne réussit pas à assimiler" [Chekour et al., 2015].

L'auteur cite également Peter DOOLITTLE et liste les huit conditions indispensables à la pédagogie constructiviste :

1. Présenter des situations d'apprentissage complexes similaires à celles rencontrées au quotidien.
2. Encourager les interactions et la collaboration entre les apprenants.
3. Expliquer le sens des apprentissages aux apprenants.
4. Les apprentissages doivent partir des acquis de l'apprenant.
5. Fournir une évaluation formative continue.
6. Responsabiliser les apprenants quant à leurs apprentissages.
7. Faciliter l'apprentissage en guidant l'apprenant.
8. Utiliser différentes perspectives pour présenter les contenus.

Selon l'auteur, le constructivisme est encore aujourd'hui une théorie intéressante car elle permet d'engager les apprenants dans leur apprentissage en préservant leur autonomie leurs permettant ainsi d'avancer à leur rythme. Cela grâce à l'utilisation d'outils diversifiés, collaboratifs ou coopératifs.

Le socio-constructivisme

Comme son nom l'indique, la théorie socio-constructiviste reprend les principes du constructivisme en mettant l'accent sur le rôle social des apprentissages. Ce modèle a été élaboré par Lev VYGOTSKY selon lequel l'apprentissage passe également par les interactions sociales. Mohammed CHEKOUR explique que les tâches d'apprentissage doivent se trouver dans la zone de développement proximal de l'apprenant, c'est-à-dire des tâches ni trop difficiles, ni trop faciles, ce qui augmente l'efficacité de l'apprentissage et qui contribue à préserver l'intérêt de l'apprenant pour la tâche (motivation intrinsèque). La particularité du socio-constructivisme est de favoriser le débat (conflit socio-cognitif) en faisant travailler les apprenants en groupe. Par ailleurs, l'auteur ajoute que "*dans ce modèle, les erreurs correspondent également à un point d'appui pour la construction de nouvelles connaissances*" [Chekour et al., 2015].

Le connectivisme

La théorie du connectivisme est née de l'évolution de l'apprentissage ou plutôt des outils d'apprentissage. L'entrée des nouvelles technologies dans le quotidien de l'apprenant s'intègre également dans le système éducatif. *"Développée par George SIEMENS et Stephen DOWNES, le connectivisme interroge le processus de l'apprentissage à l'ère du numérique et dans un monde connecté en réseaux en s'appuyant sur les limites du behaviorisme, du cognitivisme, du constructivisme et du socio-constructivisme"* [Chekour et al., 2015]. George SIEMENS définit l'apprentissage comme un processus ayant lieu dans des environnements et avec des éléments changeant échappant au contrôle total de l'apprenant⁷⁰. L'auteur identifie plusieurs éléments essentiels à l'apprentissage selon la théorie connectiviste :

1. Les bases sur lesquelles sont fondées la prise de décision se modifient rapidement.
2. *"De nouvelles informations sont constamment acquises"* [Chekour et al., 2015].
3. Savoir distinguer les informations importantes des informations sans importance est capital.
4. *"La capacité de reconnaître quand de nouvelles informations modifient le paysage en fonction des décisions prises hier est également critique"* [Chekour et al., 2015].

Le développement des technologies de l'information et de la communication *"a permis d'introduire un potentiel éducatif nouveau, des approches et des méthodes pédagogiques plus ludiques, où l'interactivité joue un grand rôle, de diversifier les outils employés et de s'adapter davantage au processus d'apprentissage de l'apprenant"* [Duplâa et Talaat, 2011]. En ce sens, Chun-Yen CHANG cite les *serious game* et la robotique cognitive éducative. Ces activités présentent de sérieux atouts car l'apprenant est alors acteur de son apprentissage (il produit) lors *"situations pour lesquelles on recueille des traces, qu'on peut rejouer pour se voir en train de produire et surtout qui peuvent se paramétrer pour être au plus près des besoins en travail cognitif de l'élève, dans ce rapport entre effort mental à fournir et aide à recevoir pour progresser"* [Chang et al., 2015].

70. Cela peut rappeler ce qui a été abordé dans la section 1.3.4, paragraphe "Du raisonnement humain à sa modélisation, où il est justement question de la manière de modéliser ces éléments hors du contrôle de l'apprenant.

Emmanuel DUPLAA explique que le connexionnisme⁷¹ permet le "traitement parallèle nécessaire à des tâches complexes ainsi qu'un traitement distribué qui garantit une immunité en cas de problème d'une partie du système" [Duplâa et Talaat, 2011]. Cela s'oppose aux limites rencontrées dans la théorie cognitiviste et rejoint le point de vue de George SIEMENS concernant la théorie connectiviste, ou l'apprentissage dans un monde en réseaux. Emmanuel DUPLAA cite François GUITÉ qui caractérise le connectivisme "comme un modèle d'apprentissage qui reconnaît les bouleversements sociaux occasionnés par les nouvelles technologies, lesquelles font en sorte que l'apprentissage n'est plus seulement une activité individualiste et interne, mais est aussi fonction de l'entourage et des outils de communication dont on dispose" [Duplâa et Talaat, 2011].



FIGURE 15 – Compétences du 21^{ème} siècle

Cette image, réalisée par Leslie DUMONT dans le cadre de la conférence "Faut-il intégrer le numérique à l'école, en fait ?" de Margarida ROMERO⁷¹, est un diagramme de Venn représentant les compétences du 21^{ème} siècle mobilisées lors d'activités pédagogiques.

71. Le connexionnisme serait la discipline à l'origine du connectivisme. Ici, Emmanuel DUPLAA fait référence à sa modélisation.

71. <https://pixees.fr/faut-il-integrer-le-numerique-a-lecole-en-fait/>

En 2020, Margarida ROMERO, Gérard GIRAUDON ont analysé une vidéo de Derek MULLER dans le but de démystifier l'usage du numérique et des nouvelles technologies dans le système éducatif [Romero et Giraudon, 2020]. Ils rappellent ainsi l'impact fondamental du processus social dans l'apprentissage ainsi que le rôle de l'enseignant dans ce processus. C'est pourquoi ils expliquent que les approches computationnelles peuvent être un soutien, une évolution pour l'éducation mais pas une révolution. Margarida ROMERO aborde également cela dans une conférence en 2018 ⁷². Elle y différencie les types d'usage du numérique dans les activités pédagogiques. En effet, l'apprentissage est favorisé lorsque l'activité élaborée par l'enseignant mobilise les compétences représentées dans la figure 15. Le numérique est alors un instrument utilisé par l'enseignant pour construire de nouvelles activités d'apprentissage.

Dans la figure 15, l'apprenant est représenté au centre. Il acquiert, mobilise et associe les compétences représentées par les quatre cercles de couleur qui l'entourent. Les relations suivantes sont identifiées :

- Collaboration + Résolution de problèmes = Résolution de problèmes collaborative
- Résolution de problèmes + Pensée informatique = Résolution de problèmes à l'aide de l'informatique
- Pensée informatique + Créativité = Pensée informatique créative
- Créativité + Collaboration = Co-créativité

Ces relations s'intègrent dans un premier ensemble d'attitudes individuelles qu'est la pensée critique représentée par un cercle jaune dans le diagramme. Ces attitudes s'associent à des valeurs propres à l'apprenant mais aussi des valeurs portées par le groupe. Ces valeurs et attitudes sont nécessaires au sein du groupe social de l'apprenant et essentielles à l'apprentissage. Elles permettent de créer un environnement propice au développement et à la mobilisation des compétences.

Tous ces éléments se retrouvent dans les huit principes du connectivisme vus par George SIEMENS et résumés par Mohammed CHEKOUR :

1. *L'apprentissage et la connaissance résident dans la diversité des opinions.*
2. *L'apprentissage est un processus reliant des noeuds spécialisés ou des sources d'information.*
3. *L'apprentissage peut résider dans des appareils non-humains.*

4. *La capacité d'en savoir plus est plus critique que ce que l'on sait actuellement.*
5. *Entretenir et maintenir des connexions est nécessaire pour faciliter l'apprentissage continu.*
6. *La possibilité de voir les liens entre les domaines, les idées et les concepts est une compétence de base.*
7. *Obtenir des connaissances précises avec la capacité de les mettre à jour est l'intention de l'apprentissage basé sur le connectivisme.*
8. *La prise de décision est un processus d'apprentissage en soi. L'importance que l'on donne à une information est variable dans le temps, selon les modifications de l'environnement de cette information.*

Bien que les avantages de cette théorie aient été démontrés, elle ne fait pas l'unanimité dans la communauté scientifique. En effet Plon VERHAGEN ne considère pas le connectivisme comme une théorie de l'apprentissage mais plutôt comme un courant pédagogique qui *"discute essentiellement du type de savoir que l'élève doit acquérir et des compétences à développer pour faire ces acquisitions. Le modèle connectiviste vise davantage l'organisation de l'apprentissage et n'indique rien sur comment l'élève apprend, donc sur le processus réel de l'apprentissage"* [Duplâa et Talaat, 2011].

Emmanuel DUPLÂA cite également Bill KERR comme détracteur du connectivisme. Ce dernier *"ne considère pas le connectivisme comme un changement radical au niveau théorique. Il pense en particulier qu'il existe déjà des théories utilisables à l'ère numérique et ne voit pas une grande différence entre le connectivisme et la théorie de la cognition distribuée"*⁷³ [Duplâa et Talaat, 2011].

Les théories de l'apprentissage : conclusion

Les différentes théories présentées ont successivement apporté des éclairages et montré des évolutions concernant les fondements de l'apprentissage. Chacune présente des avantages et des limites.

⁷³. *"L'hypothèse de cognition distribuée a été formulée dans un contexte particulier où des chercheurs en sciences cognitives ont été amenés à se préoccuper de la conception d'artefacts informatisés pour réaliser des tâches à plusieurs. Elle est devenue progressivement un programme de recherche pour les sciences cognitives dont l'objectif est d'élargir l'unité d'analyse des processus cognitifs. Elle ne se réduit donc pas à une analyse des situations d'interaction entre un agent humain et un outil informatisé car l'ambition du programme est de comprendre comment fonctionne la cognition humaine"* [Conein, 2004]

La tâche de résolution de problème CreaCube, au centre de ce travail, ne relève pas d'une théorie en particulier mais tire profit de plusieurs d'entre elles.

En effet, cette tâche mobilise, entre autres, les compétences sensori-motrices de l'apprenant. Lors de la résolution de problème, ce dernier est filmé de sorte qu'il est possible d'observer son comportement face à l'outil d'apprentissage employé. Il est alors possible de faire le lien entre le système stimulus-réponse du behaviorisme et l'action de l'apprenant lors de la détection d'affordances, par exemple, lorsque l'apprenant détecte l'interrupteur et l'actionne. Il est alors possible de faire le lien entre cet exemple et la notion de réflexe pavlovien abordé par Frédéric ALEXANDRE.

Par ailleurs, lors de cette tâche, l'apprenant n'est pas considéré comme une boîte noire (comme c'est le cas dans le behaviorisme), mais bien comme un système complexe et actif qui mobilise des fonctions cognitives. Il fait notamment appel à ses mémoires pour résoudre le problème à l'aide de ses connaissances préalables (par exemple, ses connaissances sur les constituants d'un véhicule afin de répondre à la consigne). Cela fait référence au traitement complexe de l'information rencontré dans le cognitivisme. De plus, l'apprenant est considéré selon les trois mondes de la cognition, c'est-à-dire un corps (environnement externe) qui interagit avec l'environnement interne de l'apprenant et l'environnement extérieur, comme étudié par la théorie cognitiviste.

Dans la continuité de cela et en référence à la théorie constructiviste, l'apprenant est bien pris en compte comme un système complexe actif dont la construction cognitive permet la mobilisation de ses connaissances préalables mais également leur mise à jour lors de la tâche de résolution de problème. L'apprenant apprend de la situation, de son expérimentation et s'approprie les connaissances. Il est capable de faire des inférences pour arriver à la résolution du problème (par exemple, un véhicule a des roues posées sur un plan horizontal pour avancer, ce cube a des roues, alors les roues de ce cube doivent être positionnées sur le plan horizontal). Lors de cette tâche, l'apprenant peut tout aussi bien intégrer de nouvelles connaissances par un processus d'assimilation⁷⁴ ou mettre à jour des connaissances existantes par le processus d'accommodation⁷⁵.

Enfin, la théorie connectiviste s'associe aux précédentes pour favoriser l'ap-

74. Assimilation : l'apprenant ne sait pas ce qu'est un interrupteur, il apprend que le système se met en marche ou s'arrête lorsqu'il l'actionne. Il intègre alors une nouvelle connaissance concernant l'objet interrupteur, par assimilation.

75. Accommodation : l'apprenant sait qu'un interrupteur sert à allumer une lumière, il apprend que l'interrupteur permet la mise en marche du véhicule. L'apprenant procède alors à une accommodation, une mise à jour de ses connaissances sur l'objet interrupteur.

prentissage, par le biais d'un objet robotique, de manière ludique permettant de mobiliser toutes les ressources de l'apprenant dans tout ce qui le constitue lui et son environnement. Les cubes sont un objet d'apprentissage robotique favorisant l'intérêt, la curiosité de l'apprenant et donc son engagement pour résoudre la tâche d'apprentissage. C'est la nouveauté et la variété des outils pédagogiques qui permet à l'apprenant de transférer ses connaissances à diverses situations tout en s'adaptant à ce qui le constitue en tant qu'individu. En effet, dans l'exemple de la tâche CreaCube, il n'existe pas une seule solution correcte et l'apprentissage n'est pas conditionné à la réussite de la tâche. Les apprenants peuvent faire appel à diverses ressources selon leurs propres connaissances, leur créativité etc. pour réussir à résoudre le problème posé car il y a plusieurs manières de la résoudre. De plus, même un apprenant qui échoue dans la réalisation de la tâche apprend en manipulant, en faisant des essais-erreurs, en étant curieux, etc.

2.1.2 Modes d'acquisition

L'aspect théorique des différentes formes d'apprentissage humain est issu des théories de l'apprentissage précédemment explicitée. Elles conduisent à l'étude des modes d'acquisition.

L'objectif est ici de compléter brièvement le développement précédent en expliquant concrètement ce qui se joue durant l'apprentissage, ceci du point de vue de l'expérience de l'apprenant et des observables qui peuvent être mesurés et sans reprendre les éléments précédents tout en faisant le parallèle avec l'apprentissage machine.

Jean-François RICHARD écrit dans la préface de l'ouvrage de Anh NGUYEN-XUAN [Nguyen-Xuan, 2021] qu'il y a différents modes d'acquisition de l'apprentissage humain qui seraient à l'origine des compétences cognitives. Il en cite quatre :

1. Le premier est **la résolution de problème**. Il consiste en "*l'apprentissage guidé par la recherche d'un but que l'on s'efforce d'atteindre*" [Nguyen-Xuan, 2021]. La tâche CreaCube étant une tâche de résolution de problème, ce mode d'acquisition est particulièrement intéressant à analyser⁷⁶. L'apprentissage machine se rapprochant le plus de ce mode et celui agis-

76. Voir la section 2.1.3.

sant par renforcement. L'agent est mis en situation et prend des décisions en fonction de son état courant. C'est par un mécanisme d'essais-erreurs, par l'expérience qu'il apprend. Au fur et à mesure de processus décisionnel, l'environnement envoie un retour à l'agent sous forme de "récompense" ou "punition". Cela influence la suite du processus décisionnel, de façon à l'améliorer.

2. Le second mode permet **l'apprentissage de règles, de manière intentionnelle ou non, à partir d'exemples**. Cela permet d'étudier comment l'apprenant apprend sans avoir l'intention d'apprendre ou au contraire d'étudier l'élaboration de stratégies de découverte. L'apprenant perd le contrôle de la situation d'apprentissage alors que ses actions peuvent faire évoluer la situation dans le premier mode. À partir des informations ainsi obtenues, il en découvre alors les contraintes et apprend comment réussir la tâche. En apprentissage machine, il est possible de lier ce mode à l'apprentissage supervisé. Ce dernier permet d'aboutir à une réponse prédite par la machine face à une donnée d'entrée comparativement à des exemples. Cette comparaison permet l'ajustement des paramètres afin de réduire progressivement l'erreur.
3. Le troisième mode est **centré sur les connaissances préexistantes à l'apprentissage**. L'apprenant est ainsi entraîné à résoudre des tâches dans les mêmes conditions. Il doit alors mobiliser les connaissances acquises lors de ces situations d'apprentissage pour résoudre une tâche du même ordre mais avec des conditions supplémentaires. La notion de nouveauté est pointée ici. Par ailleurs, les deux précédents modes utilisent également les connaissances préexistantes que ce soit pour la résolution de problème ou pour l'apprentissage par l'exemple. L'apprentissage machine non-supervisé pourrait correspondre à ce mode d'acquisition en ce sens qu'il est basé sur des éléments a priori.
4. Le quatrième mode aborde les notions d'apprentissage intentionnel ou non intentionnel. Ces dernières sont étroitement liées dans ce quatrième mode (à l'inverse du second mode où elles apparaissent de manière distincte). Il est alors question d'**apprentissage par relations causales** (par exemple, relations de causes à effets). L'auteur cite les exemples d'acquisition phy-

sique (dessus/dessous) et conceptuelles (même/différent) lors du développement. Plusieurs recherches concernant l'apprentissage machine par inférence causale sont menées afin de modéliser ce mode d'acquisition. Philippe BROUILLARD explique qu'en "*intégrant des principes du domaine de la causalité [aux modèles d'apprentissage profond, purement statistiques], il devient possible de modéliser des changements encourus lorsque l'environnement subit des modifications* [Brouillard, 2021]. Il ajoute que "*certaines des capacités désirées de l'intelligence artificielle (généraliser, développer et utiliser des modèles conceptuels) qui ne sont pas présentes dans les modèles actuels semblent atteignables en intégrant des concepts du domaine de la causalité*" [Brouillard, 2021].

Ces modes d'acquisition sont mobilisés dans la tâche CreaCube dans le but d'étudier l'apprentissage humain. Le premier mode concernant la résolution de problème est au coeur de cette tâche. Lors de la résolution de cette dernière, les connaissances préalables sont mobilisées et ont une part importante : compréhension des consignes, connaissances accumulées sur les constituants d'un véhicule etc. Cela fait référence au troisième mode d'acquisition. Enfin, le quatrième mode est primordial dans le cadre de cette tâche puisque c'est grâce à celui-ci que l'apprenant peut s'adapter à son environnement et prendre en compte les changements qui s'opèrent lors de la manipulation des cubes par exemple. De plus, les exemples de relations causales cités précédemment par l'auteur sont tout à fait représentatifs de ce qui se joue ici : ce cube est au-dessous ou au-dessus de celui là (acquisition physique), ils se connectent entre eux sur cette face mais pas sur celle-ci (acquisition physique voire conceptuelle si le lien est fait avec la différence entre les affordances), ou encore cette face a des roues ce qui la rend différentes des autres (acquisition conceptuelle), etc.

En lien avec cela, Margarida ROMERO fait référence au *Learning Mechanics and Game Mechanics (LMGM) framework* comme un moyen de faire le lien entre les intentions pédagogiques et les éléments des actions de l'apprenant⁷⁷ [Romero et al., 2018].

⁷⁷. "*Overall, the Learning Mechanics and Game Mechanics (LMGM) model aims at providing a concise means to relate pedagogy intentions and ludic elements within a player's actions and gameplay*" [Romero et al., 2018].

2.1.3 Résolution de problème

Selon Patrick LEMAIRE *"un problème est une situation dans laquelle une personne cherche à atteindre un but et ne dispose pas nécessairement en mémoire de la procédure pour y parvenir"* [Lemaire et Didierjean, 2018]. Ce type de situation peut être de nature intellectuelle (par exemple, des problèmes à résoudre dans le cadre scolaire) ou quotidienne, collective ou personnelle (par exemple, trouver une voiture ou bien résoudre un conflit entre soi et une autre personne).

Selon l'auteur, deux théories sont à considérer dans la résolution de problème : **l'approche gestaltiste** et **l'approche cognitive**. La première *"propose de voir l'activité de résolution de problème comme une activité perceptive"* [Lemaire et Didierjean, 2018] et suppose de regarder le problème sous un autre angle pour trouver la solution. L'approche cognitive, ou dite du traitement de l'information, *"met l'accent sur la dimension continue de l'acheminement vers une solution et non sa soudaineté"* [Lemaire et Didierjean, 2018].

L'approche gestaltiste

Cette approche considère que la résolution de problème a pour objectif d'arriver à une **Gestalt**. Cette dernière *"est une forme ou configuration des éléments de la situation qui s'apparente à la solution recherchée. [...] le produit de tout processus perceptif et cognitif est la formation d'une Gestalt"* [Lemaire et Didierjean, 2018]. Selon la théorie gestaltiste, la recombinaison mentale des éléments d'un problème afin d'obtenir une configuration stable ou Gestalt correspond à la résolution d'un problème. Cette théorie étant basée sur l'aspect perceptif de la résolution de problème, elle consiste *"à assembler les parties en un tout cohérent"* [Lemaire et Didierjean, 2018].

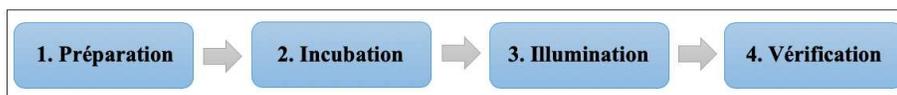


FIGURE 16 – Les étapes de la résolution de problème selon la théorie gestaltiste.

Cette figure représente les 4 étapes successives de la résolution de problème selon la théorie gestaltiste.

Afin de résoudre un problème, l'apprenant doit tout d'abord reconnaître l'existence du dit problème, c'est-à-dire constater une différence entre l'état actuel (ou état de départ) de la situation et l'état but (ou état désiré). L'atteinte

de ce but est conditionnée par la mise en place d'un certain nombre d'opérations mentales.

Quatre étapes ont été identifiées par les gestaltistes pour arriver à la résolution d'un problème. La figure 16 illustre ces quatre étapes.

1. **La préparation.** Cette étape a lieu lorsque l'apprenant admet l'existence du problème et les données qui le constitue. Comme évoqué précédemment, il constate l'écart entre l'état de départ et l'état but.
2. **L'incubation.** C'est au cours de cette dernière que l'apprenant fait des tentatives qui échouent ce qui le conduit à arrêter ses tentatives (du moins consciemment) de résolution et met le problème de côté durant une période.
3. **L'illumination.** Elle se produit après la phase précédente. L'apprenant a alors un *insight*⁷⁸ : "*en anglais, insight signifie illumination soudaine [...], la solution du problème apparaît donc soudainement*" [Lemaire et Didierjean, 2018] à l'apprenant.
4. **La vérification.** Cette étape sert à confirmer l'*insight*. L'apprenant procède à la vérification de l'illumination. C'est ici la correspondance entre la solution apparue soudainement et la solution réelle du problème, qui est vérifiée. Cela permet à l'apprenant de répondre à cette question : est-ce que la solution correspond à l'état but fixé au départ ?

Cette démarche se rapproche d'une séquence de pensée divergente puis convergente qui structure le mécanisme de la créativité, détaillé plus haut.

Par ailleurs, Patrick LEMAIRE explique que cette approche présente des limites. Les propositions implicites impliquées dans cette conception n'ont pas de validité établie. Cependant, cela ne veut pas forcément dire qu'il n'existe aucun processus mental inconscient dans la résolution d'un problème. Du point de vue des psychologues (non gestaltistes), la résolution de problème nécessite une description élaborée des opérations mentales permettant d'arriver à la résolution du

78. Selon KÖHLER, le terme anglais *insight* est issu du terme allemand *Einsicht*. L'office québécois de la langue française l'apparente au terme français "intuition". [https://fr.wikipedia.org/wiki/Insight_\(psychologie_cognitive\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Insight_(psychologie_cognitive)).

problème. "Certains ajouteront : 'suffisamment précis pour que nous puissions reproduire artificiellement cette chaîne d'opérations sur un ordinateur et faire faire à l'ordinateur ce que fait un sujet humain de la même manière que le sujet' " [Lemaire et Didierjean, 2018]. Selon l'auteur, l'approche gestaltiste serait applicable à une catégorie particulière de problèmes en lien avec l'implication de l'*insight*. Il serait alors peu probable que l'ensemble des problèmes soient résolus par la mise en place systématique et séquentielle des processus précédemment définis. Cette approche a cependant permis d'explorer les processus engagés dans la résolution de problème. Elle a aussi l'intérêt de pouvoir être rapprochée de modèles computationnels comme celui de l'équipe de Étienne KOEHLIN expliqué, par exemple, dans la thèse de Maël DONOSO [Donoso, 2013].

L'approche cognitive

L'approche cognitive considère la résolution de problème comme un processus de traitement de l'information. Selon eux, la résolution de problème concerne des problèmes avec des caractéristiques particulières :

- Ils ne nécessitent pas de connaissances préalables spécifiques⁷⁹.
- Leur niveau de difficulté implique un certain temps de résolution ainsi qu'une certaine réflexion⁸⁰, sans que les problèmes soient insolubles.
- Leurs propriétés peuvent être formalisées sous forme d'une simulation informatique ou sous forme mathématique, de manière à permettre une comparaison de performance entre l'apprenant et la simulation. "Cette comparaison débouche souvent sur des informations très intéressantes relatives au fonctionnement et à l'architecture du système humain de traitement de l'information" [Lemaire et Didierjean, 2018].

Modéliser l'apprenant lors d'une tâche de résolution de problème place l'apprenant dans une situation avec un but à atteindre sans que l'atteinte de ce but ne soit immédiate et évidente. Elle est le moyen pour l'apprenant de mobiliser, de

79. "Des problèmes **nécessitant** des connaissances spécifiques seraient, par exemple, des exercices de physique ou de mathématiques. Des problèmes **ne nécessitant pas** de connaissance spécifique sont des problèmes comme la tour de Hanoi ou le problème de l'échiquier écorné" [Lemaire et Didierjean, 2018].

80. "La réflexion est le processus cognitif qui s'engage face à une situation et qui reste limité à l'analyse de cette dernière" [Vacher, 2011]. Elle vise à rationaliser la perception d'une situation. Il ne faut pas confondre la réflexion et la réflexivité ("la réflexivité englobe la réflexion, elle est à la fois réflexion sur la situation et réflexion sur la réflexion" [Vacher, 2011]) ou encore avec le raisonnement (Voir la section 1.3.4).

vérifier et/ou de consolider ses connaissances préalables mais aussi de recevoir de nouvelles informations pour acquérir de nouvelles connaissances. Alain LIEURY évoque le transfert d'apprentissage en rapport avec la flexibilité du cerveau grâce à laquelle *"un premier apprentissage facilite le deuxième"* [Lieury, 2017]. Il est ainsi possible de faire le lien avec la mobilisation des connaissances préalables lors d'une tâche d'apprentissage comme la résolution de problème par exemple. C'est exactement la problématique posée dans l'étude CreaCube.

Anh NGUYEN-XUAN indique que résoudre un problème implique de comprendre, de se représenter le problème. Cela induit donc, a minima, la nécessité de décrire l'état de départ ainsi que l'état-but (l'état atteint par l'apprenant à la résolution du problème) mais également de décrire les moyens qu'il est possible d'utiliser pour résoudre la tâche. La compréhension du problème à résoudre constituerait alors *"une nouvelle connaissance pour la personne qui vient de construire un réseau de relations liant les diverses données qu'elle a identifiées"* [Nguyen-Xuan, 2021]. En d'autres termes, la compréhension du problème et l'établissement d'un lien entre les éléments qui le constituent sont une connaissance. Cependant, l'auteur précise qu'elle diffère des connaissances préalables puisqu'elle n'intègre pas la mémoire à long terme. Malgré cela, elle peut *"contribuer ou ne pas contribuer à renforcer la connaissance"* [Nguyen-Xuan, 2021] préalable mobilisée.

Les cognitivistes distinguent les problèmes **mal définis** des problèmes **bien définis**.

"Dans un problème mal défini, l'état initial et l'état final du problème sont parfois uniquement partiellement spécifiés" [Lemaire et Didierjean, 2018]. Les opérations nécessaires à la résolution du problème ne sont également pas clairement identifiées. Ces problèmes sont alors jugés comme étant à la fois les plus intéressants et à la fois les plus difficiles à étudier. Les études menées sur ce type de problèmes ont montré que les sujets les transformaient en problèmes bien définis afin d'atteindre la résolution. Ce processus consiste tout d'abord à spécifier l'état de départ et l'état but en élaborant des sous-problèmes précis. C'est la résolution de chacun de ces sous-problèmes qui conduirait à la résolution du problème. Par ailleurs, ce type de problèmes sollicite à la fois les connaissances générales et les connaissances spécifiques. Ainsi, un apprenant ayant des connaissances spécifiques sur les informations du problème a moins de difficulté à établir les sous-problèmes. Quant aux connaissances générales, elles sont mobili-

sées lorsque l'apprenant ne dispose pas de connaissances spécifiques sur certaines informations du problème. La tâche CreaCube est de ce type.

"Un problème bien défini est un problème dans lequel la situation de départ [(état initial)] et le but à atteindre [(état but)] sont clairement énoncés" [Lemaire et Didierjean, 2018]. Dans un problème bien défini, les critères issus du but à atteindre permettent d'en évaluer la solution. C'est l'atteinte du but qui permet de dire que le problème est résolu. En étudiant la résolution de ce type de problèmes, les chercheurs souhaitent identifier la suite des opérations mentales en jeu dans le processus de résolution. Patrick LEMAIRE cite la stratégie d'analyse "moyen-fin" élaborée par NEWELL et SIMON en 1972 dans la théorie *General Problem Solver* (GPS). *"L'analyse moyen-fin consiste à comparer l'état présent du problème et son état visé et, ensuite, à sélectionner un opérateur qui permettra de réduire la différence"* [Lemaire et Didierjean, 2018]. C'est un processus récursif qui implique, d'une part l'analyse de la différence et d'autre part, la sélection d'opérateurs permettant la réduction de la différence entre l'état de départ et l'état but jusqu'à obtenir la solution du problème. Cette stratégie suppose deux types d'habileté :

- *"l'habileté à détecter la différence entre l'état désiré et l'état actuel du problème"* [Lemaire et Didierjean, 2018] ;
- *"l'habileté à mettre en oeuvre une action qui va réduire cette différence"* [Lemaire et Didierjean, 2018].

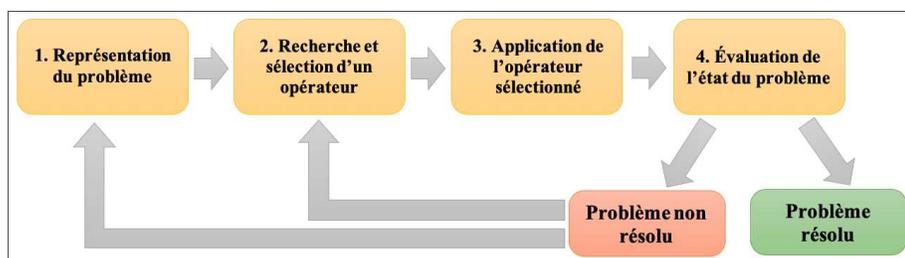


FIGURE 17 – Étapes de résolution de problème selon la théorie cognitive.

Cette figure représente les étapes de résolution de problème selon la théorie cognitive et plus précisément la théorie du *General Problem Solver*.

La théorie dite du *General Problem Solver* est une théorie computationnelle (elle a été implémentée et testée par des simulations). Elle a été conçue de telle

manière à permettre la résolution de divers problème en se basant sur des postulats très précis au sujet des processus cognitifs. Elle met en oeuvre quatre étapes de traitement de l'information permettant d'aboutir à la résolution du problème posé⁸¹. Ces étapes sont représentées dans la figure 17 et explicitées ci-dessous :

1. **La représentation du problème.** C'est au cours de cette étape que l'espace problème est construit. L'espace problème est composé de l'état initial, l'état final du problème ainsi que de ses contraintes. Il permet de récupérer les informations pertinentes en mémoire à long terme (identification de la ressemblance entre cette situation et une situation vécue antérieurement)⁸². Cet espace est construit par l'apprenant et non donné d'emblée avec le sujet du problème. Il sera affecté par tout ce que l'apprenant sait à propos du problème et de sa résolution.
2. **La sélection de l'opérateur.** Au cours de cette étape, l'apprenant cherche une opération pertinente à effectuer afin de faire évoluer l'état initial du problème. Il est possible que des ensembles d'opérateurs soient déjà associés dans l'espace problème et certains pourront être sélectionnés ou inventés. Plus l'espace problème est petit, plus il est facile d'identifier les opérateurs adéquats. À l'inverse plus l'espace problème est grand plus l'opérateur est difficile à trouver et plus l'utilisation d'heuristiques⁸³ est privilégiée par les apprenants. Le choix de l'opérateur est conditionné par le niveau de réduction de l'écart entre l'état initial et l'état but (plus l'opérateur amenuise la différence entre les deux états, plus il est jugé adéquat).
3. **L'application de l'opérateur sélectionné.** Un nouvel état du problème est ici atteint pouvant correspondre ou non à l'état but, s'en rapprocher ou non. L'état but peut être atteint avec un seul opérateurs ou peut en nécessiter plusieurs.
4. **L'évaluation de l'état du problème.** L'état atteint, par la mise en action de l'opérateur sélectionné précédemment, est ici évalué. L'état actuel

81. Cette structuration a influencé différentes architectures cognitives traitées par Antonio LIETO [Lieto *et al.*, 2018, Lieto, 2021] mais qui ne seront pas abordées ici.

82. Il est ici question de l'analogie : "*l'analogie est une heuristique qui cherche les similitudes entre un problème à résoudre et un problème résolu par le passé*" [Lemaire et Didierjean, 2018].

83. "*Une heuristique est une règle d'actions non systématiques ou une stratégie générale qui peut conduire à une réponse (correcte ou non) assez rapidement*" [Lemaire et Didierjean, 2018].

peut correspondre à l'état but et l'apprenant considère alors que le problème est résolu. À l'inverse, l'état actuel diffère de l'état but et l'apprenant reprend le processus de résolution à l'étape 1 (il réévalue sa représentation du problème) ou à l'étape 2 (il recherche et sélectionne un nouvel opérateur).

"La mise en oeuvre de chacune de ces étapes est fortement influencée par les contraintes générales qui pèsent sur la cognition humaine, comme les limites de la mémoire de travail ou comme les connaissances déclaratives et procédurales stockées en mémoire à long terme, ainsi que par certaines caractéristiques individuelles" [Lemaire et Didierjean, 2018] des apprenants.

Le modèle *General Problem Solver* est constitué de deux composants primordiaux dans le processus de résolution de problème : **la représentation du problème** et **la recherche de la solution**.

Le premier composant, **la représentation du problème**, a été modélisé dans le cadre de la théorie *General Problem Solver*. La modélisation qui en résulte est appelée UNDERSTAND. *"Il s'agit d'un programme de lecture qui extrait la structure profonde (syntaxique et sémantique) des phrases et construit, à partir de là, une description globale du problème et de ses parties"*[Lemaire et Didierjean, 2018].

Le second composant, **la recherche de la solution**, se divise en deux méthodes : les algorithmes^{84 85} et les heuristiques.

La recherche en arrière, l'analogie et l'analyse moyen-fin sont des exemples d'heuristiques. Les deux derniers (l'analogie et l'analyse moyen-fin) ont déjà été abordés précédemment. Le premier exemple, la recherche en arrière se limite à une certaine catégorie de problèmes dont le but est clairement défini. Cette forme d'heuristique *"commence par identifier le but à atteindre, l'état initial du problème et cherche à aller du but à l'état initial"* [Lemaire et Didierjean, 2018] (par exemple, lorsque le problème à résoudre est un labyrinthe). Ce type de recherche peut également servir à mieux identifier des sous-buts faciles à atteindre.

84. *"Un algorithme est une règle ou une séquence d'actions qui, si elle est appliquée correctement, aboutit nécessairement à une réponse correcte"* [Lemaire et Didierjean, 2018].

85. *"La recherche dans l'espace problème peut mettre en oeuvre deux algorithmes : une recherche aléatoire ou une recherche systématique"* [Lemaire et Didierjean, 2018].

La résolution de problème nécessite de faire preuve de créativité notamment lors de la recherche d'opérateurs. Cela nécessite cependant la capacité d'explorer de nouvelles voies en sortant des schémas classiques de pensée. La créativité et donc la résolution de problème peuvent être entravées par deux obstacles : **la fixité fonctionnelle** et **l'ancrage dans un contexte** (aussi appelé effet *Einstellung*).

La fixité fonctionnelle correspond à l'incapacité d'attribuer d'autres fonctions à un objet que sa fonction habituelle. Il s'agit comme dans le problème de la bougie⁸⁶ d'être capable de découvrir d'autres fonctions possibles d'un objet dans un contexte donné, donc d'autres affordances au sens défini dans ce document. Lorsqu'un individu peut passer outre cette limite, il peut faire d'avantage preuve de créativité et résoudre des problèmes plus compliqués.

L'ancrage dans un contexte ou effet *Einstellung* est un "*effet de fixation mentale observé en résolution de problèmes. Pour résoudre un problème, les sujets utilisent la même stratégie que celle utilisée à une série de problèmes précédents, même si la stratégie n'est pas la plus adaptée pour résoudre ce problème particulier*" [Lemaire et Didierjean, 2018]. L'apprenant a alors du mal à se détacher de la solution qu'il connaît déjà alors qu'une autre, plus créative, serait plus pertinente et efficace. Cette première idée est comme fixée, ancrée dans le contexte.

De l'état présent à l'état but

Tout au long de ce travail, il a été question de but, de sous-but, d'état but. Cependant, le terme but n'a pas été précisément défini même si le sens commun permet de comprendre les éléments abordés précédemment. Ici, il apparaît nécessaire d'en donner une définition. "*Un but est tout ce qu'un individu s'efforce d'accomplir. [...] Plus précisément, un but est une représentation cognitive centrée sur le futur d'un état final désiré qui guide le comportement*" [Reeve, 2017].

Comme énoncé précédemment, la résolution de problème consiste à réduire la différence entre l'état présent et l'état visé (le but). Cette différence correspond à un écart, une divergence, une incongruité. Celle-ci aurait des propriétés motivationnelles qui permettent de remédier à cette incongruité par l'élaboration d'un plan d'action afin d'accéder à l'état but et ainsi retrouver la congruité.

Le modèle Tester-Opérer-Tester-Quitter représente le mécanisme cognitif "*par*

86. Dans le problème de la bougie de Karl Duncker https://fr.wikipedia.org/wiki/Problème_de_la_bougie, un objet doit être utilisé de manière non conventionnelle pour résoudre un problème de prime abord insoluble.

lequel les plans dynamisent et dirigent le comportement" [Reeve, 2017]. La première étape (tester) de ce modèle correspond à une évaluation de l'état actuel par rapport à l'état but. Il y a incongruité si une divergence entre les deux états est constatée ce qui engage l'élaboration d'un plan d'action (étape "opérer". C'est lorsque les actions mises en place permettent d'obtenir l'état de congruité au test suivant que le processus s'arrête (étape "quitter"). À l'inverse, lorsque la première phase de test ne révèle pas de divergence, il y a congruité ce qui permet de passer directement à l'étape "quitter" sans avoir à effectuer d'actions.

Selon Johnmarshall REEVE, il existe deux types d'écart : **la réduction de l'écart** et **la création d'écart**.

Le premier type est fondé *"sur un feed-back qui détecte la divergence et qui sous-tend des plans d'actions et une motivation corrective"* [Reeve, 2017]. Ce *feed-back* est en fait un retour d'information provenant de l'environnement et qui concerne le niveau de performance de l'apprenant quant à la différence entre l'état actuel et l'état but. C'est une boucle de rétroaction négative qui réduit les écarts : *"une divergence apparaît, une action est entreprise, et la rétroaction négative (la divergence se réduit) met fin à cette action"* [Reeve, 2017].

Le second type est fondé sur un système de proaction *"dans lequel la personne envisage et définit d'avance un but futur de niveau supérieur"* [Reeve, 2017] qui n'existe pas encore dans l'espace problème. Dans ce cas, il s'agit d'une boucle de rétroaction positive : *"une divergence est créée, une action est entreprise, et la rétroaction positive énergise davantage de création d'écart"* [Reeve, 2017]. Cette boucle agrandit la divergence.

La divergence ou l'incongruité (ou l'écart) est à la base de la motivation qui engendre l'action, quelque soit son type. La réduction d'écart correspond à **la motivation corrective**, elle est réactive, cherche à dépasser l'insuffisance et fait référence à un système de rétroaction. Par ailleurs, la création d'écart correspond à **la motivation de fixation des buts**, elle est proactive, cherche la croissance et fait référence à un système de prévention.

"La motivation corrective active un processus de prise de décision, dans lequel l'individu envisage de nombreuses façons de réduire l'inadéquation présent-idéal : changer de plan, changer de comportement (augmenter l'effort) ou quitter le plan dans sa totalité" [Reeve, 2017]. il s'agit d'un processus dynamique et flexible qui pousse l'apprenant à poursuivre l'action la plus adaptée. La motivation corrective est ce qui permet de réévaluer le plan d'action afin d'aboutir à la

résolution du problème.

La fixation de buts "génère une motivation en focalisant l'attention des [apprenants] sur la divergence (ou l'incongruité) entre leur niveau présent d'accomplissement [...] et leur niveau idéal d'accomplissement [...]. Les chercheurs désignent cette divergence [...] par l'expression 'écart but-performance' " [Reeve, 2017]. Cela permet d'augmenter la performance, notamment dans une tâche de résolution de problème.

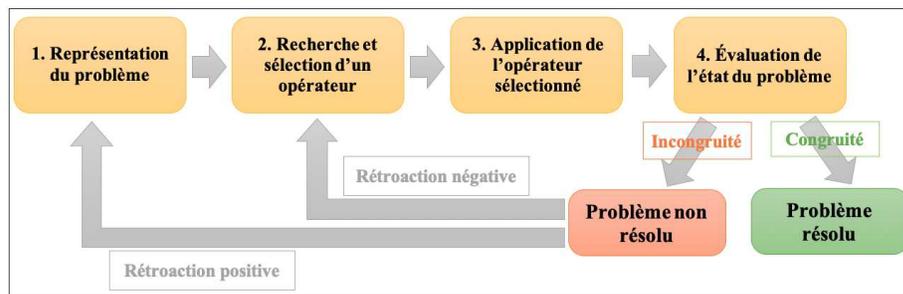


FIGURE 18 – La résolution de problème basée sur la théorie *General Problem Solver* et le modèle *Tester-Opérer-Tester-Quitter*.

Cette figure reprend la figure 17 basée sur la théorie *General Problem Solver* en y ajoutant les éléments du modèle TOTE (*Test-Operate-Test-Exit*) ou TOTQ en français (Tester-Opérer-Tester-Quitter).

Compte tenu de tous ces éléments il est possible d'établir un parallèle entre la théorie *General Problem Solver* et le modèle Tester-Opérer-Tester-Quitter. Pour cela, la figure 17 a été reprise pour tenter d'y intégrer ces nouvelles informations. La figure 18 en est le résultat. Les étapes de la résolution de problème ont été préservées mais certains processus ont été précisés. En effet, à l'issue de l'évaluation, l'incongruité (divergence entre l'état présent et l'état but) ou la congruité (concordance entre les deux états) sont mis en avant et permettent d'aboutir à une conclusion sur l'état du problème : résolu ou non résolu, but atteint ou non atteint. Le plus délicat est d'identifier à quel moment les rétroaction négative et positive interviennent. L'étape "opérer" du modèle pourrait correspondre à l'étape 2 de la théorie à la base de cette figure. De l'état "problème non résolu" au retour à l'étape 2, ce serait le processus de rétroaction négative qui interviendrait. En effet, elle fait référence à la motivation corrective qui permet de réévaluer le plan d'action et donc de sélectionner de nouveaux opérateurs. Par ailleurs, de manière moins évidente, ce serait la rétroaction positive qui condui-

rait l'apprenant à retourner à l'étape 1 à l'issue de l'évaluation. Cela fait référence à la motivation de fixation de buts. En effet, c'est lors de la représentation du problème que les buts sont identifiés. Cependant, dans ce type de rétroaction, chaque nouveau but fixé doit être plus difficile que le précédent. Or, si à l'issue de l'évaluation, le problème n'est pas résolu mais que l'état but n'est pas différent du précédent, il n'est pas possible de parler de rétroaction positive. De plus, si le retour à l'étape 1 conduit à la fixation d'un nouveau but, il sera forcément d'un niveau inférieur⁸⁷ pour faciliter la résolution du problème. Par conséquent, la rétroaction positive pourrait être vraie pour la fixation de nouveaux sous-buts conduisant à l'état but, à condition que cet état final n'ait pas été fixé d'emblée⁸⁸. Compte tenu de cela, le modèle décrit dans la figure 18 n'est pas tout à fait correct.

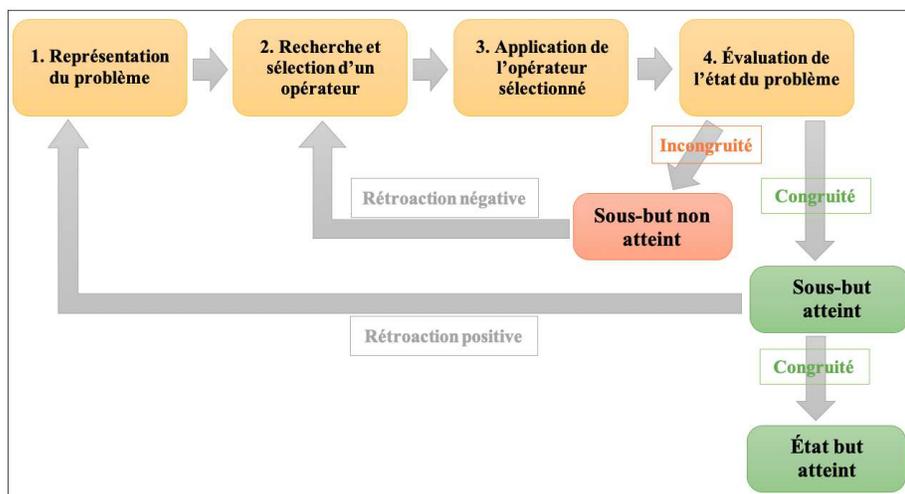


FIGURE 19 – La résolution de problème basée sur la théorie *General Problem Solver* et le modèle *Tester-Opérer-Tester-Quitter* : version améliorée.

Cette figure reprend la figure 18 basée sur la théorie *General Problem Solver* avec les éléments du modèle TOTE (*Test-Operate-Test-Exit*) ou TOTQ en français (*Tester-Opérer-Tester-Quitter*) et en intégrant la distinction entre but et sous-but.

Concernant les réserves précédemment citées au sujet du processus de rétroaction positive, il a été nécessaire de revoir la figure 18. C'est dans la figure 19

87. Il sera une étape intermédiaire conduisant à l'état but.

88. C'est-à-dire que les buts doivent être fixés de sorte que leur difficulté soit croissante à l'issue de chaque rétroaction positive.

que cela a été réalisé. Il est possible d'y voir apparaître la notion de sous-but. En effet, pour atteindre l'état but (qui correspond à la résolution du problème) il sera nécessaire d'identifier, lors de la représentation du problème, un sous-but plus facilement atteignable que l'état but. L'évaluation de la mise en action du plan établit s'il y a incongruité ou congruité. Dans le premier cas, le sous-but n'est pas atteint. Il y a alors une rétroaction négative conduisant à la révision du plan par le biais de la motivation corrective. Dans le second cas, la congruité fait référence à l'atteinte du sous-but. Cette atteinte peut conduire à deux nouveaux états selon deux nouveaux processus. Si le sous-but est atteint et qu'il y a congruité avec l'état but alors le problème est résolu. À l'inverse c'est le processus de rétroaction positive qui entre en jeu menant à une nouvelle représentation du problème avec l'identification d'un nouveau sous-but plus difficile. Ce processus fait appel à la motivation de fixation des buts.

Résolution de problème : conclusion

Cette partie a permis de poser le cadre théorique de la résolution de problème en abordant les courants gestaltiste et cognitiviste. Il en est ressorti que l'approche gestaltiste était relativement précurseur des autres recherches menées dans ce domaine. C'est cependant l'approche cognitiviste qui est la plus pertinente pour le sujet travaillé ici. Cette approche a permis d'identifier et de définir les notions essentielles à la compréhension du processus de résolution de problème ainsi que l'importance des buts dans celui-ci.

Dans le cadre de la tâche de résolution de problème CreaCube, l'espace problème est construit par l'apprenant afin de se représenter les éléments et moyens à mettre en oeuvre pour atteindre l'état but : assembler les quatre cubes pour constituer un véhicule qui avance de manière autonome d'un point A vers un point B. Il établit des sous-buts à atteindre pour constituer ce véhicule. Par exemple, un véhicule a des roues donc le sous-but est de trouver des roues. Le plan d'action consiste alors à explorer, manipuler les cubes pour chercher et identifier des roues. Il peut atteindre ce sous-but et ainsi arriver par rétroaction positive à la fixation d'un nouveau sous-but après avoir procédé à une nouvelle représentation du problème : par exemple, un véhicule a un moteur, le sous-but consiste alors à trouver un moteur. À l'inverse, l'apprenant peut ne pas atteindre ce sous-but faisant appel à la motivation corrective qui lui permettra de revoir, d'affiner son plan d'action : par exemple, prendre chaque cube un par un, explorer chacune des faces... Une fois ce processus répété plusieurs fois, l'apprenant peut atteindre le dernier sous-but qui correspondra alors à l'état but et le

conduira à la réussite de la tâche.

Au sein de ce travail, et d'autant plus dans cette partie, la notion de motivation est apparue comme transversale et primordiale pour solutionner une tâche de résolution de problème. Ici, il a été question de motivation correctrice et de motivation à la fixation de buts. Les notions de motivation intrinsèque et extrinsèque, de curiosité et d'engagement ont également été citées dans les sections précédentes. Elles sont au coeur du sujet traité ici et plus spécifiquement du sujet traité par l'équipe FLOWERS. Elles vont donc être abordées plus en détail notamment par l'analyse des travaux menés au sein de l'équipe FLOWERS.

2.2 La motivation

2.2.1 Généralités

Alain LIEURY explique, en 2020, que différents termes du langage courant sont utilisés, plus ou moins indifféremment, pour parler de motivation sans pour autant avoir le même sens. Il propose donc de définir la motivation comme *"comme l'ensemble des mécanismes biologiques et psychologiques qui permettent le déclenchement de l'action, l'orientation (vers un but ou, à l'inverse, pour s'en éloigner) et enfin l'intensité et la persistance : plus on est motivé et plus l'activité est grande et persistante"* [Lieury et Léger, 2020]. Cela fait le lien avec les différents éléments abordés dans les sections précédentes sur les processus cognitifs et les mécanismes de la résolution de problème.

L'auteur avait déjà utilisé cette définition dans un autre ouvrage en 2017 [Lieury, 2017] et dans lequel il y différencie deux types de besoins : les besoins innés ou besoins primaires en lien avec les mécanismes biologiques (faim, soif...) et les besoins ou motivations apprises qualifiés de secondaires plutôt en lien avec les mécanismes psychologiques. Ce deuxième type de besoins résulterait de l'apprentissage ou du moins se complexifieraient avec les apprentissages.

Jean-Philippe ABGRALL définit la motivation comme un processus dynamique résultant de deux besoins : **la compétence perçue** et **l'autodétermination**. La compétence perçue serait *"la représentation⁸⁹ que l'on a de ses*

89. Catherine GARNIER définit le concept de représentation comme *"un phénomène mental qui correspond à un ensemble plus ou moins conscient, organisé et cohérent, d'éléments cognitifs, affectifs et du domaine des valeurs concernant un objet particulier. On y retrouve des éléments conceptuels, des attitudes, des valeurs, des images mentales, des connotations, des associations, etc. C'est un univers symbolique, culturellement déterminé, où se forment les théories spontanées, les opinions, les*

capacités cognitives, c'est-à-dire la métacognition" [Abgrall, 2012]. L'autodétermination correspondrait à la *"représentation de soi dans la société, dans son environnement"* [Abgrall, 2012].

Il précise que les émotions jouent un rôle décisif au niveau de ces deux types de représentation. Des émotions "positives" vont favoriser des représentations positives et a fortiori la motivation. À l'inverse, des émotions "négatives" vont être à l'origine des stratégies d'évitement (en opposition avec la motivation)⁹⁰. Dans ce cas, *"les perceptions sont en général faussées par le côté affectif trop important qui prime sur la réalité du cognitif et la négation de la personne"* [Abgrall, 2012]. Les représentations qu'a l'apprenant vis-à-vis de lui-même au sein de son environnement ainsi que celles qu'il attribue aux autres⁹¹ ont une influence importante sur l'engagement cognitif de l'apprenant dans la résolution d'une tâche d'apprentissage.

Cet engagement sera aussi fonction *"de ses orientations, de ses choix généraux, de ses convictions"* [Abgrall, 2012] et détermine une implication personnelle positive ou négative : cela est nommé le conatif.

Pour résumer, selon Jean-Philippe ABGRALL, la motivation est influencée par le conatif, le cognitif et l'affectif.

Par ailleurs, Fabien FENOUILLET a étudié en détail différentes théories de la motivation afin d'établir des définitions précises. Il commence par donner une définition simplifiée basée sur l'impact comportemental : *"la motivation est ce qui explique le dynamisme du comportement"* [Fenouillet, 2016]. Par cette définition, il revient au sens étymologique du mot motivation⁹² selon lequel la motivation permettrait d'expliquer, de justifier, de soutenir et de faire persister un comportement, une action, un mouvement.

En confrontant plusieurs théories et définitions à cette définition simplifiée, l'auteur aboutit à une définition générale qui prend en compte l'individualité de la motivation : *"la motivation désigne une hypothétique force intra-individuelle protéiforme⁹³, qui peut avoir des déterminants internes et/ou externes multiples, et qui permet d'expliquer la direction, le déclenchement, la persistance et l'intensité du comportement ou de l'action"* [Fenouillet, 2016].

préjugés, les décisions d'action, etc." [Garnier et Sauvé, 1999].

90. Les émotions, leur classification, leur niveau d'intensité ainsi que leurs mécanismes ont été abordés dans la section 1.3.7. Il y est notamment question de leur impact sur les processus cognitifs, la prise de décision et l'apprentissage dans lesquels la motivation est impliquée.

91. Ce qu'il pense que les autres pensent de lui.

92. Du latin *moveo* signifiant mouvoir, bouger.

93. Qui peut prendre diverses formes.

L'auteur qualifie la motivation de "force interne" ayant des effets variés appartenant à une des quatre catégories suivantes :

- **Direction.** *"La motivation est une force qui oriente l'individu vers certaines finalités. Le comportement motivé a un sens qui peut être interprété ou analysé en fonction du ou des résultats produits"* [Fenouillet, 2016].
- **Déclenchement.** *"Un des effets les plus visibles de la motivation est lié à la modification du comportement. [...] Le déclenchement n'est donc pas lié à un simple ajustement comportemental, mais révèle la présence d'une nouvelle motivation"* [Fenouillet, 2016].
- **Persistance.** *"Adopter un comportement sur la durée peut s'expliquer d'un point de vue motivationnel à partir du moment où son maintien nécessite l'exercice volontaire d'une certaine force⁹⁴. [...] Expliquer la persistance consiste donc à comprendre la nature de cette volonté de faire perdurer l'action ou le comportement"* [Fenouillet, 2016].
- **Intensité.** *"L'intensité est sans doute l'effet motivationnel le moins ambigu. La production d'un effort s'explique nécessairement par la présence d'une force. [...] Un individu peut produire un effort avec pour objectif de paraître motivé [...]. Dans ce cas, la finalité est d'apparaître motivé, et ce, indépendamment de la finalité de l'activité considérée"* [Fenouillet, 2016].

Fabien FENOUILLET explique que même si les effets produits, mentionnés précédemment, permettent de caractériser en partie la motivation, ils ne permettent pas d'en définir la nature. *"C'est un problème d'autant plus complexe que de nombreuses théories motivationnelles s'appuient sur des conceptualisations en termes de but, d'intérêt, d'envie, de besoin ou de curiosité pour parler de motivation"* [Fenouillet, 2016]. Il semble alors difficile d'établir une définition globale de la motivation qui permettrait d'expliquer sa nature sans être spécifique à une conception en particulier. L'auteur se propose alors de donner une définition théorique qui serait basée sur des catégories les plus générales possibles. Il cite notamment l'exemple de la théorie de l'autodétermination qui catégorise la motivation comme étant soit intrinsèque, soit extrinsèque. *"La mo-*

94. *"Les théories volitionnelles se basent sur le concept de volonté⁹⁵ pour expliquer la persistance de l'action; la théorie de l'autodétermination estime que le self cherche à satisfaire ses besoins fondamentaux"* [Fenouillet, 2016].

tivation suppose non seulement qu'il y ait un motif au comportement de l'individu mais aussi que ce dernier soit en mesure d'anticiper les effets de ce comportement s'il se décide à agir" [Fenouillet, 2016]. Cette définition relève d'un modèle intégratif (représenté dans la figure 20) visant à "proposer une classification globale des théories motivationnelles et repose sur des catégories relativement générales" [Fenouillet, 2016].

L'auteur a défini sept ensembles conceptuels regroupant les catégories conceptuelles de la motivation :

1. Motif primaire. "Les motifs primaires, qui visent à expliquer l'origine de la motivation d'un point de vue psychologique, sont de deux ordres : les **instincts** et les **besoins**" [Fenouillet, 2016]. L'instinct est ce qui pousse un individu à faire une action dirigée vers un but dont il n'a pas conscience. Les besoins peuvent être physiologiques (faim, soif, etc.) ou psychologiques (en lien avec les relations sociales par exemple).
2. Motif secondaire. Ils sont à différencier des motifs primaires car "ils ne cherchent pas à expliquer l'origine absolue (du point de vue psychologique) du comportement et ils admettent que l'environnement puisse contenir des facteurs à même d'être à l'origine de la motivation" [Fenouillet, 2016]. Cet ensemble regroupent douze catégories conceptuelles⁹⁶ : **valeur**, **but**, **intérêt**, **estime de soi**, **drive** (énergie, dynamisme), **dissonance**, **émotion**, **curiosité**, **intention**, **trait de personnalité** et **motifs originaux**.
3. Prédiction. La prédiction est une des deux facettes du but⁹⁷. Le but faisant référence à la prédiction est en fait l'anticipation de la réalisation d'un état final. La probabilité subjective du succès ou de l'échec repose sur cette anticipation : le terme d'expectation est utilisé pour décrire cela. Cet ensemble comporte quatre catégories conceptuelles : **relation expectation-**

96. Ces douze catégories ne seront pas définies ici. Certains de ces concepts ont été abordés, définis dans les sections précédentes et d'autres seront abordés plus en détail dans la suite de ce travail (comme la motivation dirigée par le but ou encore par la curiosité).

97. Le but peut aussi faire référence à l'anticipation de l'état final. Il s'agit alors d'un but au sens de motif.

valeur⁹⁸, distinction expectation-valeur⁹⁹, expectation de contrôle¹⁰⁰
et la prédiction imaginaire¹⁰¹.

4. La prise de décision. Dans cet ensemble, c'est "*la sélection d'une action par l'individu parmi toutes les alternatives possibles*" [Fenouillet, 2016] qui est présenté comme l'un des enjeux de la motivation. La volition est ici une variable explicative de la prise de décision et s'associe à la motivation pour effectuer un choix. Cet ensemble comporte deux catégories conceptuelles : **l'engagement**¹⁰² et **la décision**¹⁰³.

5. La stratégie. Cet ensemble va au delà des aspects théoriques traités dans les ensembles précédents. Il met en avant que la mise en place d'un but ne permet pas à la motivation d'influencer la performance si la manière d'y parvenir n'est pas identifiée. "*Si l'individu ne connaît pas la meilleure stratégie à mettre en oeuvre, le fait de le motiver au travers de l'assignation d'un objectif peut même être contre-productif*" [Fenouillet, 2016]. Cet ensemble intègre deux catégories conceptuelles : **la stratégie cognitive**¹⁰⁴ et **la stratégie émotionnelle**¹⁰⁵.

98. "*Probabilité qu'un niveau d'effort donné produise un certain niveau de performance. [...] Le terme d'instrumentalité [qualifie] une expectation de second niveau qui permet d'établir la probabilité qu'un niveau de performance produise un résultat donné*" [Fenouillet, 2016].

99. Ici, l'expectation est utilisée comme le synonyme de "l'attente". Elle se définit comme "*une croyance de l'individu en sa capacité d'organiser et d'exécuter la ligne de conduite requise pour produire des résultats souhaités*" [Fenouillet, 2016]. L'impact sur la valeur n'est plus considéré dans la relation entre l'expectation et la probabilité qu'un résultat se produise.

100. "*L'expectation de résultat est assujettie aux croyances de contrôle. [...] Cette croyance de contrôle spécifie dans quelle mesure le self peut produire des événements désirés ou prévenir des événements non désirés*" [Fenouillet, 2016].

101. C'est ici une composante subjective de la prédiction qui est considérée. C'est une prédiction qui n'est pas basée sur des probabilités objectives mais sur des croyances issues des expériences passées.

102. Il est nécessaire de différencier la phase pré-décisionnelle des phases post-décisionnelles. C'est durant la première que "*l'individu délibère sur les différentes motivations qui le poussent à agir*" [Fenouillet, 2016]. Durant les phases post-décisionnelles "*la réflexion de l'individu n'est plus de savoir pourquoi il agit mais comment faire. Autrement dit, une fois que l'individu a prise la décision de s'engager dans l'action, il remet plus en cause la motivation qui l'a conduit dans l'action. Il est engagé*" [Fenouillet, 2016]. Les notions de persistance et de prolongation dans l'activité ont une place centrale dans le concept d'engagement.

103. "*Le principe de décision [...] semble être basé sur une évaluation de coûts et de bénéfices qui peuvent prendre de multiples formes [...]. Cette évaluation peut être appréhendée comme un calcul, ce qui suppose que l'Homme soit un être rationnel*" [Fenouillet, 2016]. Cela est basé notamment sur le raisonnement humain.

104. "*Les stratégies cognitives sont des plans, des moyens généralement explicites, que met en oeuvre un individu pour parvenir à une fin*" [Fenouillet, 2016]. Elles sont mises en oeuvre lorsque l'effort seul ne suffit pas à atteindre une performance.

105. Les stratégies émotionnelles "*sont des plans ou des moyens, plus ou moins explicites pour l'individu, mis en oeuvre pour gérer les émotions en général et l'anxiété en particulier*" [Fenouillet,

6. Le comportement. *"Le terme comportement a un double sens : au sens restreint, on désigne surtout l'action que le sujet exerce sur une situation (la réaction à un stimulus dans le modèle behavioriste), dans un sens plus large, le terme comportement réfère à l'ensemble des fonctions et processus psychologiques"* [Fenouillet, 2016]. Pour comprendre la motivation, il serait nécessaire de comprendre l'intention à l'origine du comportement observable¹⁰⁶. La motivation déclenche, oriente, augmente l'intensité et la persistance du comportement.
7. Le résultat. Le résultat correspond à *"l'aboutissement d'une action ou d'un comportement"* [Fenouillet, 2016]. Lors de l'évaluation d'un résultat, la motivation peut être un facteur parmi d'autres (facteur de la performance, de la résignation ou du bien-être). D'autres résultats ne sont *"explicables qu'uniquement en rapport avec une explication motivationnelle"* [Fenouillet, 2016]. Le *flow* (ou flux) est une forme de résultat. C'est *"une expérience optimale surgissant quand les compétences ne sont ni dépassées ni sous-utilisées. [...] Le flow est conçu comme une expérience qui procure une récompense intrinsèque"* [Fenouillet, 2016].

Ces ensembles sont représentés par les carrés mauves dans la figure 20. Les relations entre chacun de ces ensembles sont imagées par les différentes flèches de couleur.

L'autorégulation (en jaune) agit à trois niveaux de la motivation : le motif secondaire (celui de l'action), la prise de décision (les moyens, les coûts et les bénéfices du choix effectué sont reconsidérés) et au niveau des stratégies (modification des stratégies permettant de garantir un apprentissage optimal ou une gestion du stress efficace).

La satisfaction (en vert) est un retour du résultat vers le motif initial : l'individu est satisfait lorsque le résultat répond au motif initialement identifié.

L'orientation (en bleu) est la relation inverse de la satisfaction : elle part des motifs pour aller vers le résultat. Cette relation explique l'orientation du comportement (le motif orienterait alors le comportement).

2016].

106. *"Mesurer la motivation de l'élève uniquement sur ses performances scolaires par exemple peut laisser penser que l'élève n'est pas motivé si les performances n'augmentent pas alors que c'est peut-être uniquement l'effet du comportement sur la performance qui n'est pas visible"* [Fenouillet, 2016].

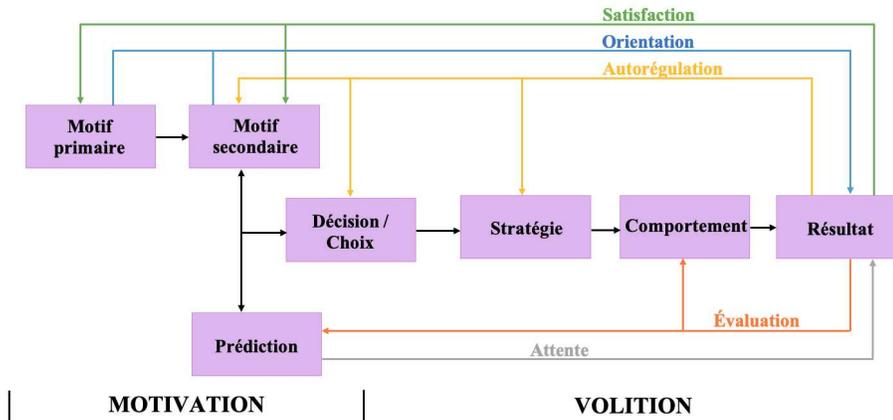


FIGURE 20 – Modèle intégratif de la motivation.

Cette figure est inspirée d'un schéma réalisé par Fabien FENOUILLET [Fenouillet, 2016] et représente le modèle intégratif de la motivation.

L'attente (en gris) va de la prédiction vers le résultat. Elle correspond au temps de latence entre l'élaboration des probabilités d'échec ou de réussite et leur vérification. **L'évaluation** (en orange) est le *feedback* qui permet d'adapter ces prédictions ou d'ajuster le comportement. Ces deux relations impactent fortement la motivation.

La figure 20 est divisée en deux parties faisant référence à la **motivation** et à la **volition**. Ces deux parties sont en fait deux étapes de la motivation.

Les motifs et la prédiction font partie de l'étape purement motivationnelle. La prise de décision est une frontière qui la sépare de l'étape volitionnelle. C'est l'orientation du comportement (but, besoin, intérêt, etc.) qui entre en jeu ici. Cela permet de comprendre ce qui est à l'origine (déclenchement) de ce comportement ainsi que son intensité.

La deuxième étape prend sa source au niveau de la prise de décision. *"La question centrale, pour nombre de modèles volitionnels, est de comprendre de quoi est faite cette volonté qui fait persister le comportement pour atteindre le résultat qui motive effectivement l'individu"* [Fenouillet, 2016].

Ces deux notions peuvent être liées à celle de désir et intention du modèle belief-desire-intention¹⁰⁷ de Michael BRATMAN pour rendre compte de l'équi-

107. <https://en.wikipedia.org/wiki/Belief\T1\textendashdesire\T1\textendashintent>

libre entre passer du temps à délibérer pour choisir un plan d'action et investir dans la réalisation de ce plan [Rao, 1995].

D'autre part, à l'image de Fabien FENOUILLET, Alain LIEURY différencie motivation intrinsèque et motivation extrinsèque. Cette dernière pourrait être liée au renforcement, c'est-à-dire qu'un individu est d'autant plus motivé à réaliser une tâche que la récompense est importante. À l'inverse, *"les motivations intrinsèques (curiosité, manipulation) n'auraient de but que l'intérêt pour l'activité en elle-même"* [Lieury et Léger, 2020].

2.2.2 Motivation extrinsèque

Selon Johnmarshall REEVE, la motivation extrinsèque *"résulte des incitations et des conséquences environnementales [internes et/ou externes.] [Elle] provient d'une conséquence qui est séparée de l'activité elle-même"* [Reeve, 2017].

Johnmarshall REEVE différencie trois types de besoins impliqués dans la motivation extrinsèque :

- **Les besoins physiologiques.** Un besoin physiologique est une *"condition biologique au sein de l'organisme qui synchronise ses structures cérébrales, ses hormones et ses principaux organes pour réguler le bien-être corporel et corriger les déséquilibres corporels qui peuvent être des menaces pour la croissance, le développement et la vie"* [Reeve, 2017]. La faim et la soif sont des besoins physiologiques. La motivation extrinsèque résulte alors d'incitations dans l'environnement interne de la personne et ayant des conséquences sur ce même environnement.
- **Les besoins psychologiques.** Un besoin psychologique est *"un processus psychologique inné qui sous-tend le désir proactif de chercher des interactions avec l'environnement qui promeuvent le développement personnel, le développement social et le bien-être psychologique"* [Reeve, 2017]. L'autonomie est un exemple de besoin psychologique.
- **Les motifs implicites.** Un motif implicite est *"un processus acquis par développement (socialisation) qui pousse à chercher et à passer du temps*

à vivre des événements qui ont été associés avec des émotions positives durant l'histoire de socialisation de la personne" [Reeve, 2017]. La réussite est un exemple de motif implicite.

À l'inverse des besoins physiologiques, les besoins psychologiques et les motifs implicites nécessitent des interactions avec l'environnement externe et impliquent les besoins de compétence et d'appartenance sociale. Ce sont les besoins psychologiques et les motifs implicites qui sont notamment impliqués dans les tâches d'apprentissage telles que la résolution de problème.

L'auteur cite le modèle du conditionnement opérant de BALDWIN et BALDWIN en 1986. Le conditionnement opérant est un processus qui permet à l'apprenant d'apprendre à fonctionner de manière efficace dans son environnement. C'est-à-dire *"apprendre et s'engager dans des comportements qui produisent des conséquences attrayantes [...] et également dans des comportements qui permettent d'éviter les conséquences désagréables"* [Reeve, 2017].

$$\mathbf{S} : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{C} \quad (1)$$

L'équation 1 est la conceptualisation du comportement selon le modèle du conditionnement opérant où :

- **S** est le signal situationnel (ou stimulus).
- **R** est la réponse comportementale.
- **C** est la conséquence.
- Les deux points entre **S** et **R** *"montrent que le signal situationnel fixe l'occasion pour la réponse comportementale (mais ne la provoque pas)"* [Reeve, 2017].
- La flèche entre **R** et **C** montre que c'est la réponse comportementale qui provoque la conséquence.
- **S : R** *"explique la portée motivationnelle des incitations. [...] Les incitations sollicitent, encouragent et soudoient les personnes à avoir des comportements qu'ils n'auraient autrement pas entrepris"* [Reeve, 2017].
- **R → C** montre la portée motivationnelle des conséquences.

Ce modèle montre que la motivation extrinsèque est conduite par un stimulus (*stimulus driven*) perçu dans l'environnement (interne et/ou externe).

D'autre part, Alain LIEURY reprend la théorie de l'autodétermination de Edward DECI et Richard RYAN pour différencier quatre types de motivation extrinsèque. Cette théorie part du principe que l'humain a besoin d'autodétermination et que celle-ci est impliquée dans toutes les formes de motivations (intrinsèque et extrinsèque) mais aussi dans l'amotivation qui équivaudrait à l'absence d'autonomie ou à la contrainte. Par ailleurs, l'autodétermination serait modulée par le besoin de compétence perçue ainsi que par celui d'appartenance sociale (notions abordées dans la section 2.2.1). Tout cela est résumé dans la figure 21.

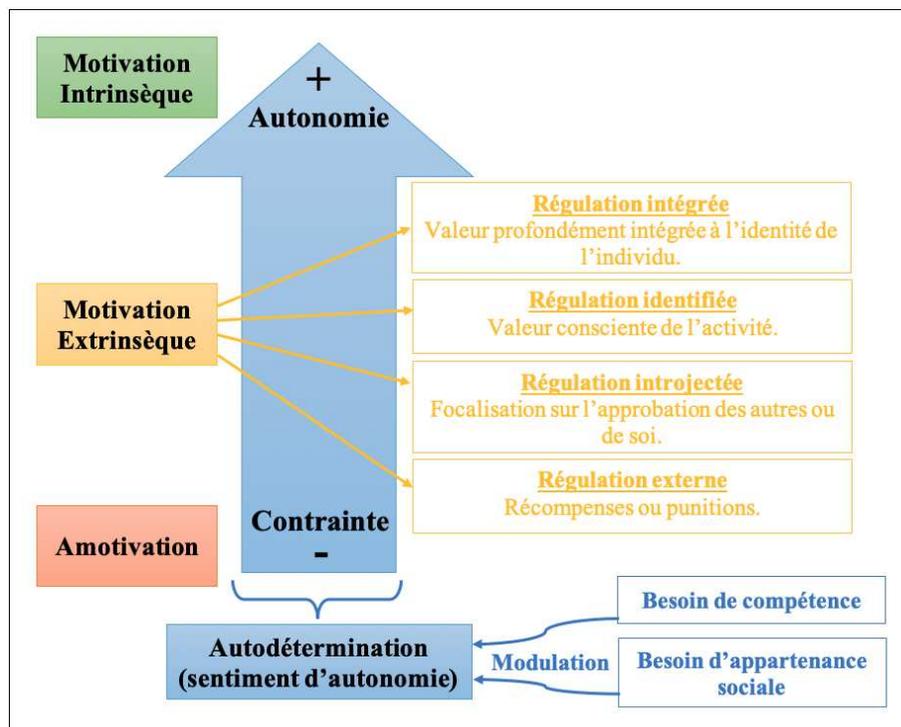


FIGURE 21 – Théorie de l'autodétermination de Edward DECI et Richard RYAN.

Cette figure illustre la théorie de l'autodétermination. Elle montre que "les différentes formes de motivation sont déterminées par un continuum d'autodétermination" [Lieury, 2017]. Ce dernier est modulé par le besoin de compétence et par le besoin d'appartenance sociale.

Dans cette figure, le sentiment d'autonomie (ou autodétermination) est représenté par une large flèche bleue et part du niveau le plus bas qui correspond à la contrainte pour arriver au niveau le plus haut, l'autonomie. Comme dit précédemment, l'amotivation représente le niveau le plus bas, c'est-à-dire la dé-

motivation : *"lorsque l'individu ne voit plus de relations entre ce qu'il fait et les résultats de son activité ou que cette activité n'a aucun sens pour lui"* [Lieury, 2017]. Le niveau le plus haut d'autonomie correspond à la motivation intrinsèque (qui sera évoquée plus en détail dans la section 2.2.3). La motivation extrinsèque se situe à un niveau intermédiaire d'autodétermination. L'individu est alors régulé de différentes manières par l'environnement extérieur.

La motivation extrinsèque se distinguerait alors en quatre formes :

- **La régulation externe** : *"l'individu est régulé par les renforcements extérieurs (l'élève va à l'école par obligation légale)"* [Lieury, 2017].
- **La régulation introjecté** : les règles à l'origine de cette régulation ne sont plus externes mais internes (l'apprenant fait une action par peur de décevoir par exemple).
- **La régulation identifiée** : l'activité réalisée par l'apprenant a de la valeur pour lui et il le sait, il l'a identifié.
- **La régulation intégrée** : l'activité n'est pas intéressante mais correspond aux valeurs profondes de l'apprenant (ranger sa chaise en sortant de classe par exemple).

Ces quatre formes de motivation extrinsèque supposent la présence d'un but. Cela rejoint ce qui a été évoqué dans les sections précédentes, où le but est une source de motivation extrinsèque. Cependant, le modèle présenté au début de cette section montre que la motivation extrinsèque peut aussi être suscitée par des stimuli (incitations situationnelles). Il est alors possible d'identifier deux grandes catégories de motivation extrinsèque : celle dirigée vers un but (*goal driven*) et celle dirigée en réponse à un stimulus (*stimulus driven*).

La section suivante va permettre d'explicitier l'origine et les implications de la motivation intrinsèque sur le comportement et notamment lors d'une tâche d'apprentissage.

2.2.3 Motivation intrinsèque

La motivation intrinsèque est un mécanisme différent de la motivation extrinsèque. Elle permet de présenter des comportements intrinsèquement gratifiants

tels que l'exploration et la curiosité, sans être forcément en rapport avec un stimulus organique interne ou externe.

Selon François GUILLEMETTE, *"la motivation favorise le développement de l'autonomie lorsqu'elle est intrinsèque, c'est-à-dire lorsque ce qui pousse l'apprenant à s'engager et à persévérer dans son apprentissage est un avantage qu'il trouve dans l'apprentissage lui-même (intrinsèque) et non dans une retombée de l'apprentissage (extrinsèque)"* [Guillemette, 2004]. C'est alors l'objet d'apprentissage et/ou l'acte d'apprendre lui-même qui suscite l'intérêt. L'auteur explique que la motivation intrinsèque (ou curiosité) influence positivement l'apprentissage par son action sur les processus cognitifs : augmentation de l'intensité de l'attention, de la capacité de concentration, de l'efficacité de la mémoire ou encore le courage lors de la prise de décision face à une situation inconnue. L'engagement, la participation et la persévérance dans une tâche d'apprentissage sont des indicateurs de la motivation intrinsèque.

Stanislas DEHAENE écrit que la curiosité est une force, suscitée par des informations nouvelles, qui inciterait l'apprenant à explorer. Elle serait la manifestation de la motivation intrinsèque [Dehaene, 2018]. Il ajoute que la curiosité dirige l'apprenant vers des éléments nouveaux ou surprenants mais accessibles. C'est-à-dire ni trop simple à comprendre ni trop compliqué. L'auteur cite les travaux de Frédéric KAPLAN et Pierre-Yves OUDEYER¹⁰⁸ sur ces aspects.

Le phénomène précédemment évoqué en terme de complexité et de nouveauté intermédiaires recherchées par la curiosité est appelé le flux (*flow*)¹⁰⁹ ou expérience optimale. Philippe CARRÉ cite CSIKSZENTMIHALYI qui a établi les caractéristiques du *flow* [Carré et Fenouillet, 2019] :

- *"La tâche entreprise est réalisable, mais constitue un défi et exige une aptitude particulière."*
- *"L'individu se concentre pleinement sur ce qu'il fait, sans se laisser distraire."*
- *"La cible visée est claire et l'activité en cours fournit une rétroaction immédiate."*
- *"La personne exerce le contrôle sur ses actions."*
- *"La préoccupation de soi disparaît, mais, paradoxalement, le sens du soi est renforcé à la suite de l'expérience optimale."*

108. Ces travaux ont été réalisés au sein de l'équipe FLOWERS et seront traités en détails dans la section 3.

109. Terme à l'origine du nom de l'équipe FLOWERS.

— *"La perception de la durée est altérée"*.

D'autre part, Alain LIEURY cite des expériences ayant montré que la motivation intrinsèque était diminuée par l'intégration de récompenses (récompenses monétaires par exemple) dans la tâche au même titre que les contraintes (surveillance, évaluation sociale, temps limité, etc.). C'est-à-dire qu'une activité préalablement récompensée cesse de susciter la motivation intrinsèque dès lors qu'elle ne présente plus de récompense, alors qu'une même activité sans récompense du tout continue de susciter la curiosité [Lieury, 2017]. Il met également en avant l'impact du sentiment de compétence perçue (ou estime de soi) sur la motivation intrinsèque : *"cette composante de compétence a été ajoutée pour expliquer que de bons résultats renforçaient en général la motivation, et à l'inverse pour de mauvais résultats"* [Lieury et Léger, 2020]. Le besoin d'autodétermination ou libre arbitre impacte également la motivation intrinsèque : les résultats d'une tâche seraient alors améliorés lorsque l'individu est libre de réaliser la tâche sans surveillance, sans autres contraintes, sans récompense et avec le sentiment d'être compétent dans la résolution de la tâche.

Concernant l'apprentissage, un sentiment autodéterminé négatif (se sentir incompetent) favorisé par un niveau de difficulté trop élevé, ou des contraintes (jugement social, évaluation, etc.) peuvent provoquer l'abandon ou la résignation lors des tâches d'apprentissage. Dans cette situation, l'apprenant ne serait pas dans le *flow*. À l'inverse, l'auteur explique que la pédagogie active, c'est-à-dire l'implication des apprenants dans le choix des tâches et dans les moyens à mettre en oeuvre pour les résoudre, permettrait de favoriser le sentiment d'autodétermination et la motivation intrinsèque.

2.3 Le rôle de la motivation dans l'apprentissage humain : conclusion

Dans la section 2, l'étude du processus d'apprentissage a permis de relever différentes théories qui contribuent à la compréhension de ce qu'est l'apprentissage et de son fonctionnement. Différents modes d'acquisition ont aussi été cités dont la résolution de problème qui est utilisée dans le cadre de la tâche Crea-Cube. Il est apparu que ces théories influencent de diverses manières et à divers degrés cette tâche de résolution de problème. En outre, la fixation de sous-buts et l'identification de l'état but sont essentielles non seulement à la résolution de la tâche par l'apprenant mais aussi à sa représentation et sa modélisation.

Par ailleurs, les recherches menées sur la motivation (en terme d'apprentissage) montrent qu'elle peut être de deux types : extrinsèque ou intrinsèque. La tâche CreaCube intègre ces deux types de motivation. En effet, les stimuli envoyés par la consigne et par les objets déclenchent la motivation extrinsèque avec notamment l'identification de l'état but par l'apprenant et la fixation de sous-buts qui lui permettront de parvenir à cet état final. D'autre part, le caractère ludique et l'autonomie laissée à l'apprenant pour résoudre cette tâche conduit à la motivation intrinsèque agissant comme un moteur à son exploration et sa créativité.

Comme évoqué précédemment, l'équipe FLOWERS a étudié le processus de motivation intrinsèque dans l'apprentissage ainsi que sa modélisation. Les chercheurs et chercheuses de cette équipe ont créé des algorithmes qui permettent de favoriser l'engagement de cette motivation dans des tâches à visée éducative mais aussi de conduire l'apprenant à rester dans un état de *flow* tout au long de son apprentissage de sorte que sa curiosité reste mobilisée. Leurs travaux vont ainsi être étudiés dans la section suivante (section 3).

3 Modélisation de la motivation intrinsèque dans l'apprentissage

L'équipe de recherche FLOWERS (*FLOWing Epigenetic Robots and Systems*)¹¹⁰ s'est, entre autres, intéressée au rôle de la motivation intrinsèque dans l'apprentissage. Elle a cherché à élaborer des algorithmes qui permettent de favoriser la curiosité au cours d'apprentissages en utilisant des applications numériques à visée éducative. C'est ce qui va être traité dans cette section.

Par ailleurs, la collaboration entre cette équipe et l'équipe Mnemosyne au sein de l'action exploratoire AIDE (*Artificial Intelligence Devoted to Education*)^{111 112} qui a pour but d'élaborer une modélisation de l'apprenant, sera aussi abordée ici.

Pour ce faire, la tâche de résolution de problème (CreaCube)¹¹³ permettra de recueillir différentes données afin d'aboutir à leur représentation symbolique

110. L'équipe <https://flowers.inria.fr>

111. <https://www.inria.fr/fr/aide-nouvelle-action-exploratoire-chez-inria>

112. <https://team.inria.fr/mnemosyne/en/aide/>

113. <https://creamaker.wordpress.com>

sous forme d'une ontologie. Ce modèle prendra en compte les motivations¹¹⁴ qui conduisent l'apprenant à agir dans son environnement pour résoudre la tâche et ainsi tenter de mieux comprendre les mécanismes qui permettent à l'apprenant d'apprendre.

3.1 Implication de la curiosité dans l'apprentissage

Pierre-Yves OUDEYER explique que la curiosité est une forme de motivation intrinsèque¹¹⁵ fondamentale pour rendre l'apprentissage plus efficace. Elle rendrait l'apprenant plus actif dans son apprentissage et favoriserait l'exploration spontanée ainsi que la mémorisation. Cela est rendu possible par un système de récompense intrinsèque qui serait activé lorsque l'apprenant fait l'expérience d'un gain d'informations, d'une nouveauté ou d'une complexité. La théorie du *flow*¹¹⁶ de CSIKSZENTMIHALYI a toute son importance ici puisqu'il s'agirait de proposer à l'apprenant des activités présentant un niveau de nouveauté¹¹⁷ et de complexité intermédiaire pour favoriser la curiosité. La nouveauté permettrait de mobiliser les ressources attentionnelles de manière à augmenter la durée d'implication, la persévérance dans l'activité.

La théorie du *learning progress* (progrès d'apprentissage) permettrait d'expliquer ce que signifie "une activité avec un niveau intermédiaire de complexité". Cette théorie propose de concevoir le cerveau comme une machine prédictive intrinsèquement motivée à poursuivre des activités pour lesquelles le degré d'incertitude diminuerait à mesure que l'apprentissage a lieu, ce qui correspondrait au processus d'amélioration des prédictions¹¹⁸. Cela signifie que l'apprenant perd l'intérêt pour la tâche si celle-ci est trop facile ou trop compliquée. Dans ce cas la prédiction d'incertitude serait soit trop basse pour générer de l'apprentissage, soit trop haute sans pouvoir être diminuée (c'est-à-dire, que l'activité serait trop difficile pour observer une progression dans l'apprentissage)¹¹⁹.

114. Motivation extrinsèque dirigée par des stimuli et/ou des buts et motivation intrinsèque dirigée par la curiosité

115. La motivation intrinsèque est définie dans la section 2.2.3. Elle se différencie de la motivation extrinsèque (définie dans la section 2.2.2).

116. La théorie du *flow* a été présentée en détail dans la section 2.2.3.

117. C'est-à-dire le degré de similarité ou de distance entre le stimulus perçu et les représentations internes présentes en mémoire : "*approach or avoidance of novelty would depend on the degree of novelty, ie, the degree of distance/similarity between the perceived stimuli and existing internal representations in the brain*" [Oudeyer et al., 2016].

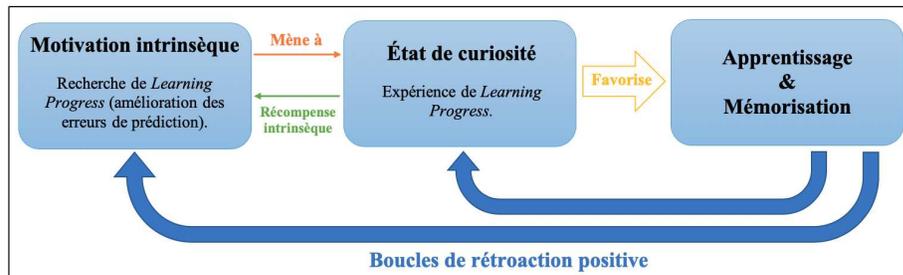
118. "*This hypothesis proposes that the brain, seen as a predictive machine constantly trying to anticipate what will happen next, is intrinsically motivated to pursue activities in which predictions are improving, ie, where uncertainty is decreasing and learning is actually happening*" [Oudeyer et al., 2016].

119. "*This means that the organism loses interest in activities that are too easy or too difficult*

Par ailleurs, des recherches menées en neurosciences et en psychologie sur la curiosité postulent qu'il y aurait un lien causal unidirectionnel entre l'apprentissage et la curiosité. En effet, le cerveau serait motivé à trouver une activité pour laquelle le niveau de nouveauté et de complexité serait "intermédiaire" ce qui générerait un état de curiosité permettant l'amélioration de l'apprentissage et la mémorisation¹²⁰. Cependant, à ce stade, le modèle montre que l'apprentissage lui-même n'a pas d'incidence sur l'état de curiosité alors que la théorie du *learning progress* inclurait une rétroaction positive entre l'apprentissage et la motivation intrinsèque dirigée par la curiosité.



(a) Lien causal unidirectionnel entre apprentissage et curiosité.



(b) Théorie du *learning progress* : lien causal avec rétroaction positive.

FIGURE 22 – Relations entre apprentissage et curiosité.

Cette figure est une adaptation traduite du schéma réalisé par Pierre-Yves OUDEYER [Oudeyer *et al.*, 2016]. La figure 22a est une représentation du lien causal unidirectionnel entre la curiosité et l'apprentissage selon les recherches menées en neurosciences et en psychologie. La figure 22b représente le même lien causal mais selon la théorie du *learning progress* qui intègre une boucle de rétroaction positive entre l'apprentissage et l'état de curiosité.

La figure 22 illustre cette dualité. Le premier point de vue abordé correspond

to predict (ie, where uncertainty is low or where uncertainty is high but not reducible) and focuses specifically on learnable activities that are just beyond its current predictive capacities" [Oudeyer *et al.*, 2016].

120. *"The brain would be motivated to search for (intermediate) novelty or complexity, and then when finding it would be in a curiosity state that would foster learning and memory retention"* [Oudeyer *et al.*, 2016].

à la figure 22a selon laquelle la motivation intrinsèque (premier rectangle bleu) à rechercher un niveau intermédiaire de nouveauté et de complexité mènerait (flèche orange) à l'état de curiosité (deuxième rectangle bleu) qui lui-même produit une récompense intrinsèque (flèche verte) en *feed back*. L'état de curiosité atteint favorise l'apprentissage et la mémorisation (troisième rectangle bleu). Il n'y a pas de rétroaction dans ce processus. Cela impliquerait donc que l'apprentissage n'aurait pas d'impact sur la curiosité ou sur la motivation intrinsèque.

La théorie du *learning progress* est illustrée dans la figure 22b et montre la même relation causale à ceci près qu'une boucle de rétroaction positive (flèches bleues) permet de comprendre que l'apprentissage et la mémorisation influent de manière causale sur l'état de curiosité et la motivation intrinsèque. Ce phénomène permettrait alors à l'apprenant de persévérer dans la tâche et de maintenir un état de curiosité tant que celle-ci génère une progression dans l'apprentissage (c'est-à-dire tant qu'elle présente un niveau de nouveauté et de complexité intermédiaire adapté à la progression de l'apprenant dans son apprentissage). C'est cette progression dans l'apprentissage qui permet de maintenir l'état de curiosité favorisant ainsi l'apprentissage lui-même et la mémorisation. La boucle de rétroaction agissant sur la motivation intrinsèque permet de réajuster les prédictions en fonction des erreurs (écarts entre les prédictions d'apprentissage précédemment faites et l'apprentissage effectivement réalisé).

Dans un contexte où l'apprenant aurait le choix entre plusieurs activités, l'exploration active spontanée (selon la théorie du *learning progress*) le dirigera vers l'activité qui, selon ses prédictions, lui permettra une progression maximale dans l'apprentissage en évitant les activités jugées trop faciles ou trop difficiles. L'apprenant persévérera dans cette activité jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de progression dans l'apprentissage. Il reprendra ensuite une phase d'exploration à la recherche d'une autre activité lui permettant à nouveau d'obtenir une progression maximale.

Afin de comprendre précisément ce qui se joue pour l'apprenant et son environnement lors de cette phase d'exploration, il est nécessaire de donner une définition de celle-ci. Selon Jacqueline GOTTLIEB l'exploration est un processus consistant à choisir des actions dont le but est d'obtenir de l'information. Les actions à visée exploratoire sont différentes des actions physiques. Ces actions exploratoires peuvent cependant impliquer des actions physiques. La différence entre ces deux types d'action est que les actions physiques ont pour but de chan-

ger l'environnement externe ou interne de l'apprenant, d'interagir avec lui physiquement (attraper un objet, par exemple). Les actions exploratoires ne cherchent pas à impacter l'environnement mais a pour but de recueillir des informations sur cet environnement et de modifier l'état épistémique de l'apprenant ¹²¹.

Par ailleurs, Frédéric ALEXANDRE [Alexandre, 2021] précise que l'apprenant explore bien dans le but d'obtenir de nouvelles informations mais qu'il peut le faire de deux façons : soit en suivant un stratégie, soit au hasard (lorsqu'il n'y a pas d'autre solution). Parallèlement à cela, l'auteur explique que l'exploration peut se faire par des simulations internes (*covertly*) ou par des actions réelles (*overtly*). Le choix entre ces deux formes d'exploration se fait par la prise en compte du coût qu'elles génèrent et de leur faisabilité. La simulation peut être moins coûteuse et sera donc privilégiée. Sa mise en oeuvre peut cependant être impossible dans certains cas, ce sont par conséquent les actions réelles qui seront privilégiées. D'autre part, les actions réelles peuvent également être moins coûteuses d'emblée ce qui écartera le choix de la simulation.

Ces explications concernant le rôle de l'exploration dans l'apprentissage, et plus particulièrement dans le *learning progress*, complètent les travaux de Joy Paul GUILFORD cités dans la section 1.3.4 concernant son implication dans la créativité, dans la section 2.1.1 où Jennifer KERZIL fait le lien avec la théorie de l'apprentissage constructiviste, ou encore dans la section 2.2.3 où François GUILLEMETTE définit la motivation intrinsèque.

Enfin, Pierre-Yves OUDEYER et Jacqueline GOTTLIEB expliquent que des modèles computationnels basés sur un formalisme mathématique ont été élaborés afin d'étudier l'apprentissage par renforcement motivé par la curiosité. Certains de ces modèles vont être présentés dans la section 3.2.

121. "Multiple paradigms have been devoted to the study of exploration and have used a common definition of this process as the choice of actions with the goal of obtaining information. Although exploratory actions can involve physical acts, they are distinct from other motor acts in that their primary goal is not to exert force on the world, but to alter the observer's epistemic state. For instance, when we turn to look at a new storefront, the goal of the orienting action is not to affect a change in the external world (as we would, for instance, when we reach for and grasp an apple). Instead, the goal is to obtain information" [Gottlieb et al., 2013].

3.2 Modèles computationnels de la curiosité

3.2.1 Les *Intelligent Tutoring Systems*

Benjamin CLÉMENT et ses collaborateurs de l'équipe FLOWERS ont travaillé sur les *Intelligent Tutoring Systems* (ITS)¹²² et ont développé des algorithmes qui permettent d'améliorer les performances d'apprentissage en agissant sur la motivation de l'apprenant par l'utilisation d'activités numériques, comme observé expérimentalement. L'auteur explique que ces systèmes de tutorat permettent une éducation plus accessible, plus efficace et dans le même temps de recueillir des mesures objectives sur l'apprentissage¹²³. Ils sont composés de quatre modèles principaux :

- **Modèle cognitif.** Il définit le domaine de connaissance ou les étapes à réaliser pour résoudre des problèmes d'un domaine particulier¹²⁴.
- **Modèle de l'apprenant.** Il considère comment l'apprenant apprend, l'évolution de son état cognitif lors d'activités d'apprentissage particulières¹²⁵.
- **Modèle d'apprentissage.** Il définit les activités à présenter aux apprenants en se basant, de manière générale, sur le modèle cognitif et le modèle de l'apprenant¹²⁶.
- **Modèle d'interface utilisateur.** Il permet de représenter la manière dont les interactions avec l'apprenant ont lieu et comment les problèmes leur sont proposés¹²⁷.

Les auteurs ont pour objectif de créer un *intelligent tutoring system* en travaillant au niveau du modèle d'apprentissage dans le but d'identifier la séquence d'activités qui maximiserait le niveau de compétence moyen de l'apprenant pour l'ensemble des compétences travaillées. Le travail se concentre sur la manière de choisir les activités qui procureraient la meilleure expérience d'apprentissage en se basant sur une estimation du niveau de compétence de l'apprenant, sur sa

122. Littéralement, "Systèmes de Tutorat Intelligents".

123. "*Intelligent Tutoring Systems (ITS) have been proposed to make education more accessible, more effective and simultaneously as a way to provide useful objective metrics on learning*" [Clément et al., 2014a].

124. "*A cognitive model that defines the domain knowledge or which steps need to be made to solve problems in a particular domain*" [Clément et al., 2014a].

125. "*A student model that considers how students learn, what is the evolution of their cognitive state depending on particular teaching activities*" [Clément et al., 2014a].

126. "*A tutoring model that defines, based on the cognitive and the student model, what teaching activities to present to students*" [Clément et al., 2014a].

127. "*A user interface model that represents how the interaction with the students occurs and how problems are proposed to the learners*" [Clément et al., 2014a].

progression et sur les connaissances issues du modèle cognitif et du modèle de l'apprenant. Les chercheurs souhaitent proposer à chaque apprenant les activités qui leur apporteront le meilleur *learning progress*.

L'approche consiste à prendre en compte les activités estimées comme apportant le gain d'apprentissage maximal, cela à l'exécution de l'activité et en se basant sur les résultats de l'apprenant. Trois principaux avantages ont été identifiés :

- **Dépendance plus faible au modèle cognitif/apprenant.** L'indépendance du modèle d'apprentissage (le plus indépendant possible du modèle cognitif et apprenant¹²⁸) nécessite que l'*intelligent tutoring system* explore et expérimente diverses activités pour estimer leur potentiel de progrès d'apprentissage (*learning progress*) pour chaque apprenant. Les expériences doivent être suffisamment informatives sur le niveau de compétence actuel de l'étudiant mais doivent aussi permettre d'estimer l'efficacité de chaque exercice pour améliorer ces compétences. C'est ce qui a été appelé le compromis "exploration/exploitation" en apprentissage automatique, où de nouvelles activités doivent être essayées pour savoir lesquelles sont les meilleures, mais aussi sélectionner simultanément les meilleures pour que l'apprenant apprenne réellement¹²⁹.
- **Méthodes d'optimisation efficaces.** Ces méthodes ne font aucune hypothèse spécifique sur la façon dont les apprenants apprennent et n'exigent que des informations sur les progrès d'apprentissage estimés de chaque activité. L'auteur fait l'hypothèse que les activités qui sont estimées comme offrant un bon gain d'apprentissage au cours de l'activité doivent être sélectionnées plus souvent. Il cite le formalisme *Multi-Armed Bandits*^{130 131}.

128. Ces deux modèles nécessitent un nombre trop important de données sur l'apprenant et les activités pour être réalisables à l'échelle d'une classe d'élèves par exemple. Ils prennent en compte les particularités et les difficultés de chaque apprenant. L'analyse de ces particularités doit permettre d'identifier quelle activité apportera le niveau maximum de *learning progress*. Cela suppose la prise en charge individuelle de chaque apprenant.

129. "The technical challenge is that these experiments must be sufficiently informative about the student's current competence level and also to estimate the effectiveness of each exercise to improve those competences (a form of stealth assessment). This boils down to what has been called the "exploration/exploitation" trade-off in machine learning, where we have to simultaneously try new activities to know which ones are the best, but also select the best ones so that the student actually learns" [Clément et al., 2014a].

130. Ce formalisme sera abordé ci-après.

131. "We will rely on methods that do not make any specific assumptions about how students learn and only require information about the estimated learning progress of each activity. We make a simple assumption that activities that are currently estimated to provide a good learning gain, must

- **Expérience plus motivante.** Cela fait référence à la zone de développement proximal¹³² qui cherche à favoriser l'émergence de l'état de *flow*¹³³ afin d'améliorer l'apprentissage.

3.2.2 Contextualisation des algorithmes

Leur travail a notamment porté sur l'élaboration de deux algorithmes d'apprentissage automatique (plus particulièrement, l'apprentissage par renforcement) :

- **RiARiT (*Right Activity at Right Time*¹³⁴)** qui estime explicitement le niveau de l'apprenant concernant différentes composantes de compétence (*Knowledge Components*¹³⁵ : KC). L'algorithme se base sur ces estimations pour proposer les activités à l'apprenant¹³⁶.
- **ZPDES (*Zone of Proximal Development and Empirical Success*¹³⁷)** qui utilise un graphe et suit la progression de l'apprenant pour choisir les activités à proposer¹³⁸.

Dans les deux cas, un espace d'activités pédagogiques (***Pedagogical Activity Space***) est défini au préalable. C'est un ensemble d'activités que l'apprenant peut réaliser pour acquérir des compétences ou des composantes de compétence¹³⁹.

Pour concevoir leurs algorithmes, les auteurs se sont inspirés d'un algorithme *Multi-Armed Bandit*^{140 141} (*Exponential Weights for Exploration and Ex-*
be selected more often. A very efficient and well studied formalism for these kind of problems is Multi-Armed Bandits" [Clément et al., 2014a].

132. Cela a été traité dans la section 3.1 et correspond à la motivation intrinsèque de l'apprenant lorsqu'il est face à une activité qui est ni trop facile ni trop difficile mais juste au-delà de ses capacités, comme le présente la théorie du *learning progress*.

133. Voir la section 3.1.

134. La bonne activité au bon moment.

135. Cette notion renvoie à des compétences élémentaires impliquant des connaissances et des savoir-faire, elles sont nommées *knowledge components* par les auteurs. Elle est caractérisée par le terme "composantes de compétence" dans ce document francophone.

136. "*The first one is RiARiT, which explicitly estimates the level of the student's proficiency for different KCs to base its choice of activities*" [Clément, 2018].

137. Zone de développement proximal et de réussite empirique.

138. "*The second is ZPDES, which uses a "graph" of activities and tracks progress to choose the next activity; it does not use a student model based on KCs*" [Clément, 2018].

139. "*A pedagogical Activity Space is considered to be a set of activities that a learner can practice to acquire skills or knowledge components*" [Clément, 2018].

140. Algorithme du "bandit manchot" notamment utilisé pour choisir la machine à sous qui maximisera les gains du joueur selon des probabilités.

141. *Multi-Armed Bandits* est un ensemble de techniques différentes mais basées sur un même prin-

exploitation¹⁴²). Cette variante de l'algorithme *Multi-Armed Bandit* aide à déterminer automatiquement, par tirage aléatoire¹⁴³, la part d'exploitation et d'exploration à un temps t , c'est-à-dire à déterminer si le joueur doit continuer à utiliser une machine donnée ou s'il doit en essayer d'autres à cet instant.^{144 145 146}.

Du point de vue de l'apprentissage, et dans le contexte étudié par les auteurs, leurs algorithmes permettent de proposer à l'apprenant une séquence d'activités qui a la plus grande probabilité de maximiser le *learning progress* et par conséquent de lui permettre de préserver l'état de *flow*¹⁴⁷ durant la session d'apprentissage.

Ainsi, le mécanisme de *Multi-Armed Bandit* est utilisé dans ces algorithmes à ceci près que ce ne sont plus des bras de machines à sous qui sont recommandés mais des activités d'apprentissage humain, et cela à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique (ou apprentissage machine) par renforcement¹⁴⁸. Le gain d'argent est, quant à lui, remplacé par le progrès d'apprentissage de l'apprenant.

Pour faire le lien entre cela et l'approche identifiée dans la section précédente (3.2.1), il est important de rappeler que les auteurs ont fait le choix de favoriser le modèle d'apprentissage en minimisant le plus possible, notamment, la dépendance avec les modèles cognitifs/apprenant. Cela implique donc de ne pas (ou peu) donner, en entrée, d'informations concernant les compétences et les particularités de l'apprenant. Parallèlement les informations concernant les activités sont elles aussi limitées. Pour cela, l'expert pédagogique (par exemple, un enseignant) définit l'espace d'activités et, si nécessaire, quelques contraintes grossièrement définie sur la séquence pédagogique¹⁴⁹.

cipe. Comme les détails de ces techniques ne seront pas abordées dans ce travail, le terme "algorithme *Multi-Armed Bandit*" sera utilisé dans le but de simplifier le propos.

142. Poids exponentiels pour l'exploration et l'exploitation.

143. La notion de choix aléatoire est importante dans la différence entre exploitation et exploration. L'exploration fait davantage appel au choix aléatoire que l'exploitation qui est plutôt basée sur l'utilisation des acquis préalables.

144. <http://www.math.univ-toulouse.fr/~jlouedec/demoBandits.html>

145. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Bandit_mancho_t_\(math%C3%A9matiques\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bandit_mancho_t_(math%C3%A9matiques))

146. <https://hal.inria.fr/tel-01420663v1/document>

147. Pour rappel, "*theories of intrinsic motivation clearly suggest motivation and learning improve if exercises are proposed at levels that are only slightly higher than the current level*" [Clément *et al.*, 2015].

148. Attribution de récompenses en fonction de la concordance entre la prédiction et le résultat.

149. "*Our approaches assume that an instructional expert defines a set of skills to acquire, a set of potential activities/exercises to practice and, if necessary, coarse constraints on the pedagogical sequence*" [Clément *et al.*, 2015].

L'algorithme ZPDES respecte ce principe puisqu'il n'a pas d'information a priori sur les compétences de l'apprenant et très peu sur le problème¹⁵⁰. Il utilise la zone de développement proximal et estime de manière empirique¹⁵¹ les progrès d'apprentissage¹⁵².

L'algorithme RiARiT est lui beaucoup plus dépendant des modèles cognitifs/apprenant puisqu'il utilise un tableau de données sur les niveaux de compétence attendus pour chaque paramètre d'activité, afin de mettre en relation les compétences de l'apprenant et les paramètres des activités. Ses estimations de progrès d'apprentissage sont directement liées à cette relation¹⁵³.

Pour aller plus loin, et dans l'hypothèse où ces algorithmes pourraient participer à la modélisation de l'apprenant au cours d'une tâche de résolution de problème générant un gain d'apprentissage, il est envisageable d'établir un lien avec la tâche CreaCube. En effet, l'apprenant modélisé doit effectuer un certain nombre d'actions pour résoudre la tâche. Ici, l'algorithme ne proposerait pas une activité mais une action à effectuer. Les notions d'exploitation et d'exploration restent vraies dans le sens où l'apprenant peut explorer totalement au hasard les cubes, explorer de façon un peu plus dirigée (implication de la notion de probabilité tout en préservant une part de hasard) ou exploiter les compétences et/ou connaissances acquises. Cela pourra être davantage précisé avec l'étude des algorithmes dans la section suivante (3.2.3).

3.2.3 Présentation des algorithmes

L'efficacité des algorithmes dépend de différents éléments. Tout d'abord, un expert (ou plusieurs) doit définir l'espace d'activités à l'intérieur duquel l'apprenant va évoluer. Ensuite, ceux-ci étant basés sur un algorithme de type *Multi-Armed Bandit* (MAB), il est nécessaire d'en comprendre les grands principes avant de pouvoir les étudier plus précisément.

150. Voir la section 3.2.3.

151. Les estimations sont basées sur l'observation de la réussite ou de l'échec de l'apprenant lors des activités précédentes.

152. *"Our first approach uses very little knowledge about the problem and is inspired by the zone of proximal development and the empirical estimation of learning progress hence the name "Zone of Proximal Development and Empirical Success" (ZPDES)"* [Clément et al., 2015].

153. *"Our second approach further assumes the existence of a simple relation between the activities and the skills. Then, at any given point in time, the system estimates the learning progress obtained for each activity by the student. The system then proposes to the student the activities which provide an higher learning progress, hence the name of the algorithm : the "Right Activity at the Right Time" (RiARiT)"* [Clément et al., 2015].

Espace d'activité

Chaque activité de l'espace d'activité (*activity space*) est caractérisée par des paramètres (par exemple : type d'activité) pouvant prendre différentes valeurs (par exemple : type A ou type B). Ces paramètres et leurs valeurs respectives définissent toutes les activités possibles pouvant être instanciées à l'intérieur de cet espace¹⁵⁴. Ces paramètres peuvent être organisés en groupes selon leur nature et leur signification. Les groupes peuvent être structurés de manière hiérarchique puisque certains paramètres dépendent d'autres paramètres afin d'être utilisés dans une activité¹⁵⁵. Par ailleurs, tous les groupes de paramètres ne sont pas nécessairement utilisés pour définir toutes les activités de l'espace.

Une activité est caractérisée par une combinaison de valeurs de paramètres sélectionnées dans chaque groupe de l'*activity space* (nécessaire à sa caractérisation) dans le respect de la hiérarchie. Un espace d'activité regroupe toutes les combinaisons distinctes possibles de valeurs de paramètres pouvant définir une activité dans cet espace¹⁵⁶.

La figure 23 est un exemple du processus de sélection d'une activité dans un espace d'activité. Dans cet espace, le groupe 1 est le premier dans la hiérarchie. Elle regroupe les paramètres "type d'activité". Ce groupe est composé d'un seul paramètre (T) ayant 2 valeurs (1 et 2). L'activité peut donc être de type T1 ou T2. En suivant la hiérarchie, chaque type T d'activité doit passer par un groupe particulier de difficulté (groupe 2 pour T1 ou groupe 3 pour T2). Ces groupes ont chacun un paramètre (niveau) qui comporte trois valeurs (1,2 et 3). Ensuite, le groupe 4 est le dernier de la hiérarchie et permet l'attribution des modalités. Ce groupe comporte deux paramètres (forme et couleur) ayant respectivement 2 (carré et cercle) et 3 valeurs (Noir, Bleu et Rouge). La combinaison de l'exemple aboutit à la proposition d'une activité de type T2 (groupe 1), de difficulté de niveau 1 (groupe 3) et a deux modalités (groupe 4) : carré, bleu.

Les algorithmes cités précédemment vont permettre d'utiliser efficacement cet espace d'activité dans le but de proposer des activités pertinentes, personnalisées et motivantes pour l'apprenant. Ils vont être étudiés plus en détail dans les

154. "These parameters and their respective values define all the possible activities that can be instantiated inside the activity space" [Clément, 2018].

155. "Depending on their nature and meaning, these parameters can be organized in different groups. [...] In addition, these parameter groups can be structured hierarchically, since some parameters depend on others to be used in an activity" [Clément, 2018].

156. "An activity space groups all possible distinct combinations of parameter values that can define an activity in this space" [Clément, 2018].

paragraphes suivants.

Multi-Armed Bandit

L'algorithme *Multi-Armed Bandit* EXP4 consiste, globalement, à attribuer un poids initial à chaque action, qui quantifie l'intérêt de cette action dans la tâche en cours. Une action est ensuite tirée au sort en fonction à la fois des poids et du hasard, en lien avec une probabilité de gain. La probabilité de gain est estimée grâce au compromis exploration/exploitation. Ce compromis nécessite de faire un choix entre ce qui est connu pour obtenir une récompense proche de ce qui est attendu (exploitation), et ce qui relève de l'incertitude pour éventuellement en apprendre davantage (exploration)¹⁵⁷.

Initialement, la part d'exploration est plus forte puisque qu'aucune récompense n'est connue. C'est l'observation de la récompense obtenue qui permet de mettre à jour les poids attribués et par conséquent les probabilités de gain. Ainsi, les activités donnant un bon niveau de *learning progress* (récompense) doivent être celles sélectionnées le plus souvent. Étant donné que le progrès d'apprentissage n'est pas une récompense stable, il nécessite des mécanismes spécifiques pour suivre son évolution. En effet une activité peut cesser d'apporter une progression d'apprentissage une fois que l'apprenant a atteint un certain niveau d'expertise de la compétence travaillée ou de l'activité elle-même¹⁵⁸. Cela suppose que les récompenses diffèrent d'un apprenant à l'autre. C'est pourquoi la variante EXP4 de l'algorithme *Multi-Armed Bandit* a été sélectionnée par Benjamin CLÉMENT et ses collaborateurs.

Un ensemble "d'agents experts"¹⁵⁹ est alors pris en compte et le modèle fait un choix sur la base des propositions de chaque agent-expert interne. Dans le cas présenté ici, les experts sont un ensemble de variables qui suivent l'évolution de la récompense fournie par chaque activité. Ces "experts bandits" sont utilisés pour évaluer la qualité de chaque valeur de paramètre d'activité pendant la session de

157. *"The exploration-exploitation trade-off is a fundamental dilemma whenever you learn about the world by trying things out. The dilemma is between choosing what you know and getting something close to what you expect ("exploitation") and choosing something you aren't sure about and possibly learning more ("exploration")"* [Clément, 2018].

158. *"A particularity here is the reward (learning progress) which is non-stationary. This requires specific mechanisms to track its evolution. Indeed, a given activity will stop providing a reward, or learning progress, after the student reaches a certain mastery level of the skill or of the activity"* [Clément, 2018].

159. Le terme général "expert" est emprunté à Cesa-Bianchi et al. (1997). Ils l'utilisent pour désigner les stratégies utilisées dans les algorithmes de "prédiction avec avis d'experts", "en combinant les prédictions de plusieurs stratégies de prédiction". [Clément, 2018].

travail de l'apprenant ¹⁶⁰.

Ainsi, Benjamin CLÉMENT explique que, pour chaque paramètre à l'intérieur d'un groupe, la qualité de ses valeurs est évaluée par un "agent-expert bandit". Un expert suit la récompense fournie par chaque valeur sur les derniers échantillonnages pour calculer sa qualité. À un instant donné, la valeur à utiliser pour chaque paramètre est échantillonnée en fonction des probabilités. Cette méthodologie d'échantillonnage conduit à sélectionner stochastiquement (par l'effet du hasard) une valeur, proportionnellement à sa qualité et à son taux d'exploration. Lorsque le taux d'exploration est faible, la valeur du paramètre est choisie en fonction de sa qualité. À l'inverse, lorsque le taux d'exploration est élevé, les valeurs de paramètre de faible qualité ont une plus grande probabilité d'être sélectionnées. Pour générer une activité, ce processus est effectué de manière récursive sur les groupes impliqués dans la génération d'activité, conformément aux dépendances hiérarchiques entre les groupes de paramètres ¹⁶¹. Ceci conduit à un tirage stochastique de l'activité, résultant de la combinaison de chaque valeur de paramètre échantillonnée en fonction de l'évaluation de leur qualité par chaque agent-expert [Clément, 2018].

L'activité ainsi sélectionnée est proposée à l'apprenant pour résolution. Le niveau de récompense obtenu (progrès d'apprentissage) permet aux agents-experts de mettre à jour la qualité de chaque valeur de paramètre utilisées. Tout cela provoquerait l'exploration de toutes les activités générées dans l'espace d'activité. Cela mène l'auteur [Clément, 2018] à identifier deux inconvénients qui en résultent :

- Le type et la difficulté des exercices proposés pourraient changer trop souvent et réduire la motivation et l'engagement des apprenants.
- Il pourrait ne pas être possible d'explorer tous les paramètres d'activité pour estimer leurs progrès d'apprentissage.

C'est pour pallier ces inconvénients que l'auteur s'est inspiré de la théorie

160. "Thus, the framework introduced here rely on a variant of the EXP4 algorithm, proposed initially by (Auer et al., 2003), which considers a set of experts and make a choice based on the proposals of each expert. In case presented here, the experts are a set of variables that track how much reward each activity is providing (Lopes and Oudeyer, 2012). These bandit experts are used to evaluate the quality of each activity parameter value during the learner's working session" [Clément, 2018].

161. Voir la section 3.2.3, paragraphe "Activity Space" et la figure 23.

de la zone de développement proximal (*Zone of proximal development* : ZPD) et sur le concept de *flow*¹⁶². C'est alors un expert pédagogique (ou plusieurs) qui définit l'espace d'activité et, par conséquent, la hiérarchie des activités s'y trouvant ainsi que les couples paramètres/valeurs. Cela dans le but de proposer seulement les activités les plus pertinentes et de maintenir l'apprenant dans la zone de développement proximal ou dans la zone de *flow*.

Le niveau de difficulté des activités mis en relation avec le niveau de compétence de l'apprenant détermine dans quel état se trouve ce dernier lors de l'apprentissage, comme représenté dans la figure 24. Ainsi un niveau de difficulté trop élevé par rapport au niveau de compétence de l'apprenant générera un état d'anxiété. Inversement, un niveau de difficulté insuffisant par rapport au niveau de compétence provoquera un état d'ennui. L'état de *flow* est atteint lorsque le niveau de compétence et le niveau de difficulté sont quasiment proportionnels. La zone de développement proximal se situe un niveau au-dessus, c'est-à-dire que l'activité proposée est légèrement au dessus des capacités actuelles de l'apprenant ce qui permet de générer le niveau maximal de progrès d'apprentissage tout en préservant la motivation et l'engagement de l'apprenant. Par ailleurs, l'utilisation de la zone de développement proximal permet de réduire les besoins de mesures quantitatives initialement nécessaires pour l'expert et permet de fournir un choix d'activité plus prédictif¹⁶³.

L'algorithme ZPDES

L'algorithme ZPDES a pour but de proposer à l'apprenant les activités permettant le maximum de *learning progress* tout en réduisant le plus possible la dépendance du modèle avec les modèles cognitifs/apprenant¹⁶⁴. C'est la zone de développement proximal établie par un expert pédagogique qui permet de définir l'ensemble des activités pouvant être proposées de façon cohérente avec le niveau de compétence estimé de l'apprenant. Benjamin CLÉMENT et ses collaborateurs ont représenté cela sous la forme d'un graphe comme illustré dans la figure 25.

162. "Inspired by the Zone of Proximal Development theory (Vygotsky, 1930-1934/1978) and the concept of Flow (M. Csikszentmihalyi and I. Csikszentmihalyi, 1975), a pedagogical expert has the possibility to specify rules that define an evolving set of possible/activated activities, judged relevant for the student. These activities keep the student in the zone of Flow or in the Zone of Proximal Development (ZPD) based on his successive results" [Clément, 2018]

163. "The use of the ZPD offers three advantages : it helps to improve motivation as discussed before, it further reduces the need of quantitative metrics for the educational design expert and it provides a more predictive choice of activities" [Clément, 2018].

164. "Two sources of inspiration are used to simplify the algorithm [RiARiT] : Zone of Proximal Development (C. D. Lee, 2005) and the empirical estimation of learning progress (Oudeyer and Kaplan, 2007)" [Clément, 2018]

Dans l'exemple illustré par la figure 25, le graphe des activités est représenté dans trois états. Il montre trois types d'activité (disques oranges) de difficulté variable. La difficulté des activités est croissante selon leur type (C est plus difficile que B qui est plus difficile que A). Un type regroupe plusieurs activités de niveau croissant (A3 est plus difficile que A2 qui est plus difficile que A1).

L'état initial (figure 25a) montre que l'activité 1 de type A a été proposée à l'apprenant (cercle bleu). Elle se situe dans la zone de développement proximal (zone jaune) et a le niveau de difficulté le plus bas.

Dans la figure 25b, l'apprenant a effectué l'activité et l'a réussie (cercle vert). L'algorithme propose alors une autre activité dans la zone de développement proximal qui a évolué grâce à la mise à jour du niveau de progrès de l'apprenant. Le niveau de progrès a été mis à jour compte tenu du résultat obtenu à la première activité. La seconde activité proposée (cercle bleu) est du même type mais d'un niveau de difficulté supérieur.

La figure 25c montre l'état suivant du graphe. Ici, l'apprenant n'a pas réussi l'activité proposée précédemment (cercle noir). La zone de développement proximal a de nouveau été adaptée en tenant compte du niveau de progrès. Comme l'activité A2 n'a pas été réussie, des activités de niveau intermédiaire ont rejoint la zone et celle de niveau supérieur a été enlevée (A3). C'est donc l'activité B1 qui a été proposée.

Les activités peuvent être proposées avec une certaine part d'aléatoire parmi les activités de la zone de développement proximal susceptibles de maximiser le niveau de progrès, c'est-à-dire l'état (réussite ou échec) des activités précédemment effectuées (les plus proches). Ainsi, dans le graphe 25c, si l'apprenant réussit l'activité B1, il est possible que l'activité B2 ou C1 lui soit proposée en fonction de l'évolution de la zone de développement proximal qui est définie selon le niveau de difficulté des activités dans le graphe et l'état de réussite des activités précédentes.

Pour résumer, un (ou plusieurs) expert pédagogique crée l'*activity space* représenté sous forme de graphe. Les activités sont réparties dans le graphe selon leur type et leur niveau de difficulté, comme dans la figure 25. Le graphe est parcouru selon les résultats de l'apprenant et l'évolution de la zone de développement proximal.

La zone de développement proximal est établie en prenant en compte la hiérarchie du graphe de l'espace d'activité afin de maintenir la progression d'apprentissage. La zone englobe les activités du graphe d'un niveau de difficulté

supérieure à l'activité réalisée par l'apprenant¹⁶⁵. Le *learning progress* constitue la récompense de l'algorithme¹⁶⁶.

Une fois la zone de développement proximal établie, l'algorithme propose stochastiquement une activité contenue dans la zone. C'est-à-dire que le choix de l'activité dépend de probabilités calculées avec une part d'aléatoire (exploration) tout en prenant en compte le niveau de compétence (exploitation). C'est le compromis exploration/exploitation.

L'apprenant réalise l'activité proposée. Sa réussite ou son échec permet de mettre à jour la récompense, c'est-à-dire le niveau de progression qui prend également en compte les résultats des activités précédentes. Lorsque la progression stagne, la zone de développement proximal évolue de sorte à proposer des activités plus difficiles. De même, si la récompense diminue, la zone de développement proximal est réévaluée proposant ainsi un autre type d'activité de même niveau ou une activité de niveau inférieur.

L'algorithme RiARiT

L'algorithme RiARiT est fortement renseigné sur le domaine d'activité et sur l'apprenant, ce qui le rend assez dépendant du modèle de l'apprenant. Les informations nécessaires à l'algorithme sont utilisées pour concevoir le modèle cognitif en estimant le niveau de compétence de l'apprenant en fonction de ses réponses à chaque activité et de la définition d'un ensemble de composantes de compétences pour chaque activité¹⁶⁷. Le modèle ainsi établi sert aussi à adapter la zone de développement proximal.

RiARiT prend un tableau en entrée contenant les composantes de compétence travaillées dans l'*activity space*. Cet espace d'activité est lui-même caractérisé par des paramètres d'activité et des valeurs. L'auteur utilise ce qui est appelé les *q-values*¹⁶⁸. Les *q-values* (*quality values*) sont des nombres continus entre 0 et 1, où 1 signifie que la valeur du paramètre apporte l'intégralité du niveau de

165. Ce sont les activités les plus proches de l'activité réalisée qui constituent la zone de développement proximal afin de proposer des activités légèrement plus difficiles de façon à favoriser la progression d'apprentissage.

166. Puisqu'il s'agit d'apprentissage automatique par renforcement, il adapte ses prédictions en fonction du niveau de récompense qu'il reçoit.

167. "It is strongly informed about the activities domain and the student. This information will be used to build a cognitive model of the student by estimating the knowledge level of the learner depending on his answer to each activity and the definition of a set of Knowledge Component (KC) related to each activity" [Clément, 2018].

168. "The *q-values* notion take its inspiration from the work of Barnes (2005) where she defines a *Q-matrix* or "attribute by item incidence matrix" to define relations between questions (activities in our case) and concepts (KCs in our case) and contains a one if a question is related to a concept and a zero if not" [Clément, 2018].

compétence qu'il est possible d'acquérir avec ce paramètre pour la composante de compétence travaillée. À l'inverse une *q-value* égale à 0 indique que la valeur du paramètre ne permet pas d'acquérir cette composante de compétence.

L'algorithme prend en compte ces composantes et ces paramètres, fixés par un (ou plusieurs) expert, pour établir la zone de développement proximal. Pour cela, il estime le niveau de compétence de l'apprenant et ajuste la zone en fonction de la différence entre le niveau attendu (fixé dans le tableau) et le niveau estimé de manière à proposer l'activité la plus pertinente à un instant t . C'est cette différence qui constitue la récompense de l'algorithme pour chaque composante.

Plus précisément, si le niveau de compétence estimé est inférieur au niveau de compétence attendu alors le niveau de l'apprenant a été sous-estimé (l'activité était trop simple) ce qui donne une récompense positive. À l'inverse, si le niveau de compétence estimé est supérieur au niveau de compétence attendu alors le niveau de l'apprenant a été sur-estimé (l'activité était trop difficile) ce qui donne une récompense négative.

Lorsque l'apprenant donne une **réponse correcte et** que la **récompense est positive** alors le niveau de compétence estimé est mis à jour. De même, lorsque l'apprenant donne une **réponse fausse et** que la **récompense est négative**, le niveau de compétence estimé est aussi mis à jour. En revanche, en dehors de ces cas, le niveau de compétence estimé est conservé jusqu'à la prochaine mise à jour.

La zone de développement proximal est elle aussi mise à jour en fonction de la nouvelle valeur de la compétence estimée.

Par ailleurs, l'évolution de la zone de développement proximal peut reposer sur des valeurs explicites du niveau de compétence de l'apprenant. L'expert pédagogique peut spécifier le niveau minimal de compétence requis dans une composante de compétence donnée. Ainsi, chaque valeur de paramètre ne sera exploré que si le niveau de compétence de l'apprenant est au-dessus de la valeur seuil. Les experts pédagogiques sont autorisés à définir le seuil pour lequel un paramètre donné est retiré de l'exploration, son agent-expert bandit est alors désactivé¹⁶⁹.

169. "Here the evolution of the ZPD can rely on explicit values of the estimated competence level of the learner. Thus, the expert can specify minimal competence levels in given KC that are required to allow the algorithm to try a given parameter values and activate its related bandit expert. Each parameter value is only explored if the learner is already above this minimum threshold. The teaching

Ces éléments concordent avec les théories de la motivation intrinsèque qui suggèrent clairement que la motivation et l'apprentissage progressent si le niveau des activités proposées est juste un peu supérieur au niveau actuel¹⁷⁰.

Pour conclure, cet algorithme utilise beaucoup d'informations sur le domaine d'activité. L'expert pédagogique définit des tableaux avec la relation entre les valeurs des paramètres et les composantes de compétence, ainsi qu'un ensemble de niveaux de compétence minimum pour activer une nouvelle valeur de paramètre. La relation entre la réussite d'une activité, le niveau de compétence estimé et le niveau de compétence requis d'une activité permet deux choses :

- Estimer le niveau de l'apprenant.
- Calculer une récompense pour cette activité¹⁷¹.

Les informations requises pour cet algorithme sont plus calculées au fil de l'eau que beaucoup d'autres *Intelligent Tutoring Systems*, car ces informations a priori peuvent être très difficiles à donner pour un expert pédagogique lorsque le nombre d'activités, ou de composantes de compétence, est élevé. Des méthodes automatiques pour remplir ces connaissances existent déjà et font l'objet d'une recherche active¹⁷².

Comparaison des algorithmes RiARiT et ZPDES

Des expérimentations ont été réalisées afin de tester l'efficacité de ces algorithmes [Clément *et al.*, 2014b] [Clément *et al.*, 2014a] [Clément *et al.*, 2015] [Clément, 2018]. Il apparaît que les apprenants progressent plus et plus vite en utilisant ces algorithmes. L'algorithme RiARiT étant basé sur des données a priori est un peu plus efficace que ZPDES. Cependant, il est difficilement transférable

experts are allowed to define threshold for which a given parameter is removed from the exploration, its bandit expert is deactivated" [Clément, 2018]

170. "This follows well known instructional design methodologies (Gagne and Briggs, 1974) and concurs with theories of intrinsic motivation which clearly suggest motivation and learning improve if exercises are proposed at levels that are only slightly higher than the current level (Engeser and Rheinberg, 2008; Habgood and Ainsworth, 2011)" [Clément, 2018].

171. "RiARiT algorithm uses a lot of information about the domain. The teaching expert defines tables with the relation between the parameter values and the KC, and also a set of minimum competence levels to activate a new parameter value. The relation between the success of an exercise, the estimated competence level and the required competence level of an exercise allows two things : a) to estimate the level of the student; and b) to compute a reward for that activity" [Clément, 2018]

172. "The information required for this algorithm is more online than a lot of other ITS systems but this amount of information might be really difficult to give for a teaching expert when the number of activities, or KC, is high. Automatic methods to fill such knowledge already exist and is an area of active research (Baker *et al.*, 2008; Dhanani *et al.*, 2014; González-Brenes, Huang, *et al.*, 2014; González-Brenes and Mostow, 2012)" [Clément, 2018].

à d'autres domaines présentant plus de données car le recensement des composantes et des paramètres serait trop important pour être réalisable. La différence d'efficacité avec ZPDES, en terme de *learning progress*, est suffisamment minime pour favoriser ce dernier, notamment pour des domaines où les données de départ sont trop nombreuses ou insuffisamment définies.

Par ailleurs, l'utilisation de ces algorithmes en tant que *Intelligent Tutoring Systems* a permis, non seulement, de favoriser le progrès d'apprentissage mais aussi de maintenir l'état de *flow* chez les apprenants [Oudeyer *et al.*, 2016]. En revanche, ils ne permettent pas d'identifier la cause (environnement, outil, particularités de l'apprenant, etc.) et le sujet (une composante de compétence ou un paramètre d'activité, etc.) des erreurs réalisées au cours de la séquence d'activité. Cela suppose d'une part, la possibilité d'utiliser l'apprentissage automatique pour susciter la curiosité et la motivation intrinsèque des apprenants et ainsi favoriser la progression et, d'autre part, de superviser humainement ces activités de sorte à identifier les difficultés de chacun afin de les travailler différemment ou d'agir sur les conditions d'apprentissage.

3.3 Modélisation de la motivation intrinsèque dans l'apprentissage : conclusion

Cette section a mis en avant le rôle de la motivation intrinsèque dans l'apprentissage. Les travaux de l'équipe FLOWERS ont permis de comprendre les mécanismes des *Intelligent Tutoring Systems* et le rôle que peut jouer le numérique dans l'amélioration de l'apprentissage par la prise en compte de la motivation intrinsèque.

Les algorithmes de l'équipe FLOWERS et les expérimentations menées montrent l'importance d'ajouter la dimension motivationnelle au modèle ontologique de l'apprenant initié au sein de l'action exploratoire AIDE.

Références

- [Abgrall, 2012] ABGRALL, J.-P. (2012). *Stimuler la mémoire et la motivation des élèves*. esf éditeur.
- [Alexandre, 2021] ALEXANDRE, F. (2021). A global framework for a systemic view of brain modeling. *Brain Informatics*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03143843>.
- [Besnier, 2021] BESNIER, J.-M. (2021). *Les théories de la connaissance*. Presses Universitaires de France. <https://www.cairn.info/les-theories-de-la-connaissance--9782715406032.htm>.
- [Breedlove et al., 2012] BREEDLOVE, S. M., ROSENZWEIG, M. R. et WATSON, N. V. (2012). *Psychobiologie. De ma biologie du neurone aux neurosciences comportementales, cognitives et cliniques*. de boeck.
- [Brouillard, 2021] BROUILLARD, P. (2021). Apprentissage de modèles causaux par réseaux de neurones artificiels. *Université de Montréal*. <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/25096>.
- [Burglen, 2005] BURGLEN, F. (2005). Etudes du mécanisme de binding en mémoire de travail et de la boucle phonologique chez le patient schizophrène. *Université Louis Pasteur, Strasbourg*.
- [Carré et Fenouillet, 2019] CARRÉ, P. et FENOUILLET, F. (2019). *Traité de psychologie de la motivation*. Dunod. <https://www.cairn.info/traite-de-psychologie-de-la-motivation--9782100783045.htm>.
- [Censabella, 2007] CENSABELLA, S. (2007). *Bilan neuropsychologique de l'enfant*. Mardaga. <https://www.cairn.info/bilan-neuropsychologique-de-1-enfant--9782870099643-page-117.htm>.
- [Chang et al., 2015] CHANG, C.-Y., TIJUS, C. et ZIBETTI, E. (2015). Les apprentissages à l'heure des technologies cognitives numériques. *Administration & éducation*, 146(2). <https://www.cairn.info/revue-administration-et-education-2015-2-page-91.htm?contenu=article>.
- [Chappell, 2019] CHAPPELL, T. (2019). *Plato on knowledge in the Theaetetus*. Stanford Encyclopedia of Philosophy.
- [Chaudet, 2009] CHAUDET, B. (2009). Donnée, information, connaissance. <https://brunochaudet.wordpress.com/2009/03/30/donnee-information-connaissance/>.

- [Chekour *et al.*, 2015] CHEKOUR, M., MOHAMMED, L. et JANATI-IDRISSI, R. (2015). L'évolution des théories de l'apprentissage à l'ère du numérique. *Association EPI*. <https://www.epi.asso.fr/revue/articles/a1502b.htm#PAGE>.
- [Chi et Wylie, 2014] CHI, M. T. H. et WYLIE, R. (2014). The icap framework : Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4).
- [Cieutat et Connac, 2017] CIEUTAT, P. et CONNAC, S. (2017). Constructivisme ou enseignement explicite? *Les cahiers pédagogiques - Cercle de recherche et d'action pédagogiques*. <https://www.cahiers-pedagogiques.com/constructivisme-ou-enseignement-explicite/>.
- [Clément, 2018] CLÉMENT, B. (2018). Adaptive personalization of pedagogical sequences using machine learning. *Artificial Intelligence [cs.AI]. Université de Bordeaux*. https://hal.inria.fr/tel-01968241/file/CLEMENT_BENJAMIN_2018.pdf.
- [Clément *et al.*, 2014a] CLÉMENT, B., ROY, D., OUDEYER, P.-Y. et LOPES, M. (2014a). Developmental learning for intelligent tutoring systems. *IEEE ICDL-Epirob - The Fourth Joint IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics*. <https://hal.inria.fr/hal-01061195v2>.
- [Clément *et al.*, 2014b] CLÉMENT, B., ROY, D., OUDEYER, P.-Y. et LOPES, M. (2014b). Online optimization of teaching sequences with multi-armed bandits. *7th International Conference on Educational Data Mining*. <https://hal.inria.fr/hal-01016428>.
- [Clément *et al.*, 2015] CLÉMENT, B., ROY, D., OUDEYER, P.-Y. et LOPES, M. (2015). Multi-armed bandits for intelligent tutoring systems. *Journal of Educational Data Mining*, 7(2). <https://hal.inria.fr/hal-00913669>.
- [Conein, 2004] CONEIN, B. (2004). Cognition distribuée, groupe social et technologie cognitive. *Réseaux*, 124(2). <https://www.cairn.info/revue-reseaux1-2004-2-page-53.htm>.
- [Connac, 2018] CONNAC, S. (2018). Neuroéducation et pédagogie. *Éducation et socialisation. Les Cahiers du CERFEE*, 49. <https://journals.openedition.org/edso/3556>.
- [Damasio, 1998] DAMASIO, A. R. (1998). Emotion in the perspective of an integrated nervous system. *Brain Research Reviews*, 26. <https://edisciplinas>

- .usp.br/pluginfile.php/5706589/mod_resource/content/1/emotion-in-the-perspective-of-an-integrated-nervous-system.pdf.
- [Dehaene, 2018] DEHAENE, S. (2018). *Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines*. Odile Jacob.
- [Delacour, 2001] DELACOUR, J. (2001). Conscience et cerveau : La nouvelle frontière des neurosciences. *Neurosciences & cognition*. <https://www.cairn.info/conscience-et-cerveau--9782804137663-page-5.htm>.
- [Dietrich, 2004] DIETRICH, A. (2004). The cognitive neuroscience of creativity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11. <https://doi.org/10.3758/BF03196731>.
- [Donoso, 2013] DONOSO, M. (2013). Le cerveau stratège : les fondements du raisonnement dans le cortex préfrontal humain. *Université Pierre et Marie Curie, Paris 6*. <http://www.theses.fr/2013PA066535>.
- [Duplâa et Talaat, 2011] DUPLÂA, E. et TALAAT, N. (2011). Connectivisme et formation en ligne. *Distances et savoirs*, 9(4). <https://www.cairn.info/revue-distances-et-savoirs-2011-4-page-541.htm>.
- [Evans, 2011] EVANS, J. (2011). Dual-process theories of reasoning : Contemporary issues and developmental applications. *Developmental Review*, 31(2-3).
- [Faugloire, 2007] FAUGLOIRE, E. (2007). Approche dynamique de l'apprentissage de coordinations posturales. *Université Paris Sud - Paris XI*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00128845/document>.
- [Fenouillet, 2016] FENOUILLET, F. (2016). *Les théories de la motivation*. Dunod.
- [Frayssinhes, 2019] FRAYSSINHES, J. (2019). Compétence, expérience, connaissances et savoirs transférables. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02939062/document>.
- [Frayssinhes et Pasquier, 2018] FRAYSSINHES, J. et PASQUIER, F. (2018). Neurosciences et apprentissages via les réseaux numériques. *Éducation et socialisation. Les Cahiers du CERFEE*, 49. <http://journals.openedition.org/edso/3920>.
- [Garnier et Sauvé, 1999] GARNIER, C. et SAUVÉ, L. (1999). Apport de la théorie des représentations sociales à l'éducation relative à l'environnement - conditions pour un design de recherche. *CIRADE, université du Québec*.
- [Gasc, 2016] GASC, M. (2016). Étude de la fonction symbolique chez des enfants de 3 à 5 ans présentant un retard de parole et/ou de langage. <http://theses.ante.ups-tlse.fr/1756/1/3405A201611.pdf>.

- [George, 1997] GEORGE, C. (1997). *Polymorphisme du raisonnement humain*. Presses Universitaires de France.
- [Godin, 2004] GODIN, C. (2004). *Dictionnaire de philosophie*. Paris Fayard.
- [Goldman, 2005] GOLDMAN, S. (2005). La croyance : aux confins mystérieux de la cognition. *Cahiers de psychologie clinique*, 25(2). <https://www.cairn.info/revue-cahiers-de-psychologie-clinique-2005-2-page-87.htm>.
- [Gottlieb et al., 2013] GOTTLIEB, J., OUDEYER, P.-Y., LOPES, M. et BARANES, A. (2013). Information-seeking, curiosity, and attention : computational and neural mechanisms. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(11). <http://www.pyoudeyer.com/TICSCuriosity2013.pdf>.
- [Goutte et Ergis, 2011] GOUTTE, V. et ERGIS, A.-M. (2011). Traitement des émotions dans les pathologies neurodégénératives : une revue de la littérature. *Revue de neuropsychologie*, 3. <https://www.cairn.info/revue-de-neuropsychologie-2011-3-page-161.htm?contenu=article>.
- [Guilford, 1956] GUILFORD, J. P. (1956). Structure of intellect. *Psychological Bulletin*, 53.
- [Guillemette, 2004] GUILLEMETTE, F. (2004). Favoriser l'apprentissage en favorisant la motivation intrinsèque. *Observatoire de la pédagogie en enseignement supérieur*. https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/Gsc/Portail-ressources-enseignement-sup/documents/PDF/Motivation_intrinseque_motivation_extrinseque.pdf.
- [Habib et al., 2018] HABIB, M., LAVERGNE, L. et CAPAROS, S. (2018). *Psychologie cognitive*. Armand Colin.
- [Han et al., 2018] HAN, J., SHI, F., CHEN, L. et CHILDS, P. R. (2018). A computational tool for creative idea generation based on analogical reasoning and ontology. *Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 32(4).
- [Hart, 1965] HART, J. T. (1965). Memory and the feeling-of-knowing experience. *J Educat Psychol*, 56(4):208-216. <https://psycnet.apa.org/record/1965-13971-001>.
- [Hoareau, 2018] HOAREAU, V. (2018). Etudes des mécanismes de maintien en mémoire de travail chez les personnes jeunes et âgées : approches computationnelle et comportementale basées sur les modèles tbrs et sob-cs. *Université Grenoble Alpes*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01746120>.

- [Houdé, 2018a] HOUDÉ, O. (2018a). *"Le raisonnement"*. Presses Universitaires de France.
- [Houdé, 2018b] HOUDÉ, O. (2018b). *L'école du cerveau*. Margada.
- [Houdé et al., 2018] HOUDÉ, o., BORST, G., ANDRÉ, C., BERTHOZ, A., CHANGÉUX, J.-P., DAMASION, A., DAMASIO, H., EUSTACHE, F., FAYOL, M., LACHAUX, J.-P., PEIGNEUX, P., PRADO, J., PROUST, J., JEANNE, S.-F. et JOHANNES, Z. (2018). *Le cerveau et les apprentissages*. Nathan.
- [Kadosch, 2019] KADOSCH, M. (2019). L'analogie, modèle de l'abduction. <http://www.marcel-kadosch.eu/lanalogie-modele-de-labduction/>.
- [Kerzil, 2009] KERZIL, J. (2009). *L'ABC de la VAE*. Erès. <https://www.cairn.info/l-abc-de-la-vae--9782749211091-page-112.htm>.
- [Khanfir Kallel, 2019] KHANFIR KALLEL, I. (2019). Mécanismes de raisonnement possibiliste pour l'aide à la décision et l'interprétation de scènes. *Traitement du signal et de l'image*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02868499>.
- [Kleinginna et Kleinginna, 1981] KLEINGINNA, P. et KLEINGINNA, A. (1981). A categorized list of emotion definitions with suggestions for a consensual definition. *Motiv Emotion*, 5.
- [Lachaux, 2018] LACHAUX, J.-P. (2018). Éduquer la métacognition, la clé du succès pour les enfants! *Cerveau et psycho*, 105:82-84.
- [Le Gall et al., 2009] LE GALL, D., BESNARD, J., HAVET, V., PINON, K. et ALLAIN, P. (2009). Contrôle exécutif, cognition sociale, émotions et métacognition. *Revue de neuropsychologie*, 1(1):24-33. <https://www.cairn.info/revue-de-neuropsychologie-2009-1-page-24.htm?contenu=article>.
- [Lee, 2018] LEE, V. (2018). *A Short History of the Learning Sciences*. In R. E. West, *Foundations of Learning and Instructional Design Technology : The Past, Present, and Future of Learning and Instructional Design Technology*. EdTech Books. <https://edtechbooks.org/lidtfoundations>.
- [Leleu-Galland et al., 2021] LELEU-GALLAND, E., GALLOIS, J.-B. et LÉTANG, M. (2021). *Comment apprend le cerveau ?* Nathan.
- [Lemaire et Didierjean, 2018] LEMAIRE, P. et DIDIERJEAN, A. (2018). *Introduction à la psychologie cognitive*. deboeck supérieur.
- [Lieto, 2021] LIETO, A. (2021). *Cognitive Design for Artificial Minds*. Routledge. Cité en ligne : https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_architecture.

- [Lieto *et al.*, 2018] LIETO, A., BHATT, M., OLTRAMARI, A. et VERNON, D. (2018). The role of cognitive architectures in general artificial intelligence. *Cognitive Systems Research*, 48(1-3). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138904171730222X?via%3Dihub>.
- [Lieuury, 2017] LIEURY, A. (2017). *35 grandes notions de psychologie cognitives*. Dunod.
- [Lieuury et Léger, 2020] LIEURY, A. et LÉGER, L. (2020). *Introduction à la psychologie cognitive*. Dunod. <https://www.cairn.info/introduction-a-la-psychologie-cognitive--9782100801862.htm>.
- [Masmoudi et Naceur, 2010] MASMUDI, S. et NACEUR, A. (2010). *Du percept à la décision : Intégration de la cognition, l'émotion et la motivation*. De Boeck Supérieur. <https://www.cairn.info/du-percept-a-la-decision--9782804137984.htm>.
- [Mercier *et al.*, 2021a] MERCIER, C., ALEXANDRE, F. et VIÉVILLE, T. (2021a). Reinforcement symbolic learning. *The 30th International Conference on Artificial Neural Networks*. ICANN'2021, accepted.
- [Mercier *et al.*, 2021b] MERCIER, C., ROUX, L., ROMERO, M., ALEXANDRE, F. et VIÉVILLE, T. (2021b). Formalizing problem-solving in computational thinking : an ontology approach. *IEEE International Conference on Development and Learning*.
- [Miller, 1956] MILLER, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63.
- [Morgagni, 2011] MORGAGNI, S. (2011). Repenser la notion d'affordance dans ses dynamiques sémiotiques. *Intellectica. Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, 55(1). https://www.persee.fr/doc/intel_0769-4113_2011_num_55_1_1170.
- [Morin, 1999] MORIN, E. (1999). *La tête bien faite. Repenser la réforme. Réformer la pensée*. Paris, Seuil.
- [Morin, 2011] MORIN, E. (2011). *La voie. Pour l'avenir de l'humanité*. Paris, Fayard.
- [Métayer, 2012] MÉTAYER, M. (2012). *Qu'est-ce que la philosophie ? À la découverte de la rationalité*. Pearson (Erpi).
- [Nguyen-Xuan, 2021] NGUYEN-XUAN, A. (2021). *Les mécanismes cognitifs de l'apprentissage*. iSTE éditions.

- [Norman, 1988] NORMAN, D. (1988). *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books.
- [Noël, 2007] NOËL, M.-P. (2007). *Bilan neuropsychologique de l'enfant*. Mardaga. <https://www.cairn.info/bilan-neuropsychologique-de-l-enfant--9782870099643-page-117.htm>.
- [Oudeyer *et al.*, 2016] OUDEYER, P.-Y., GOTTLIEB, J. et LOPES, M. (2016). Intrinsic motivation, curiosity and learning : theory and applications in educational technologies. *Progress in brain research*, 229. <https://hal.inria.fr/hal-01404278/file/oudeyerGottliebLopesPBR16Preprint.pdf>.
- [Pailler, 2004] PAILLER, J.-J. (2004). Spinoza avait raison. joie et tristesse, le cerveau des émotions, d'antonio r. damasio. *Revue française de psychosomatique*, 1(25). <https://www.cairn.info/revue-francaise-de-psychosomatique-2004-1-page-165.htm?contenu=article>.
- [Purves *et al.*, 2015] PURVES, D., AUGUSTINE, G. J., FITZPATRICK, D., HALL, W. C., LAMANTIA, A.-S. et WHITE, L. E. (2015). *Neurosciences*. de boeck supérieur.
- [Rao, 1995] RAO, M. G. (1995). Bdi-agents : From theory to practice. *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems (ICMAS'95)*.
- [Reeve, 2017] REEVE, J. (2017). *Psychologie de la motivation et des émotions*. De Boeck supérieur.
- [Romero, 2004] ROMERO, M. (2004). Métacognition dans les eiah. *LIUM. Le Mans*. https://www.researchgate.net/publication/237012128_Metacognition_dans_les_EIAH.
- [Romero *et al.*, 2018] ROMERO, M., DAVID, D. et LILLE, B. (2018). Creacube, a playful activity with modular robotics. *Games and Learning Alliance*. https://www.researchgate.net/publication/329040986_CreaCube_a_playful_activity_with_modular_robotics.
- [Romero et Giraudon, 2020] ROMERO, M. et GIRAUDON, G. (2020). Le numérique va révolutionner l'éducation ... vraiment ? <https://hal.inria.fr/hal-02895694>.
- [Rougier, 2015] ROUGIER, N. (2015). L'intelligence artificielle, mythes et réalités. <https://interstices.info/lintelligence-artificielle-mythes-et-realites/>.

- [Roux et al., 2020] ROUX, L., ROMERO, M., ALEXANDRE, F., VIÉVILLE, T. et MERCIER, C. (2020). *Développement d'une ontologie pour l'analyse d'observables de l'apprenant dans le contexte d'une tâche avec des robots modulaire*. <https://hal.inria.fr/hal-03040909>.
- [Stordeur, 2014] STORDEUR, J. (2014). *Comprendre, apprendre, mémoriser : les neurosciences au service de la pédagogie*. de boeck éducation.
- [Szczepanski, 2012] SZCZEPANSKI, N. (2012). Méthodes efficaces de raisonnement en logique modale. *Centre de Recherche en Informatique de Lens, Université d'Artois*. <http://www.cril.univ-artois.fr/~szczepanski/res/Methodes%20efficaces%20de%20raisonnement%20en%20logique%20modale%20-%20Szczepanski%20Nicolas.pdf>.
- [Tardif et Doudin, 2016] TARDIF, E. et DOUDIN, P.-A. (2016). *Neurosciences et cognition : Perspectives pour les sciences de l'éducation*. de boeck supérieur.
- [Toscani et al., 2017] TOSCANI, P., EUSTACHE, F., DEVIÈRE, F., ALLARD, B., ASSELINE, S., AUBIN, C., AVRILLON, C., AVRILLON, D., BEAUPERIN, C., BERNARD, M.-F., BOURDIN, F., BOURGET, C., CAMPEDEL, M., DAVID, B., DELANOUE, J., GARNIER, A., GAUVRIT, A., GOUYETTE, J., HELSENS, O., JURRET, D., LEGOFF, C., LOISEAU, T., MOREAU, C., PHILIBERT, C., RÉTO, G., RÉTO-LAOURT, M., REULIER, J., ROSE, F., SUBILEAU, T., THONON, M. et ZENDRERA, N. (2017). *Les neurosciences de l'éducation, de la théorie à la pratique en classe*. Chronique Sociale. Auteur(e)s membres du GRENE : Groupe de Recherche En Neurosciences Educatives.
- [Vacher, 2011] VACHER, Y. (2011). La pratique réflexive. *Recherche et formation*, 66. <http://journals.openedition.org/rechercheformation/1133>.

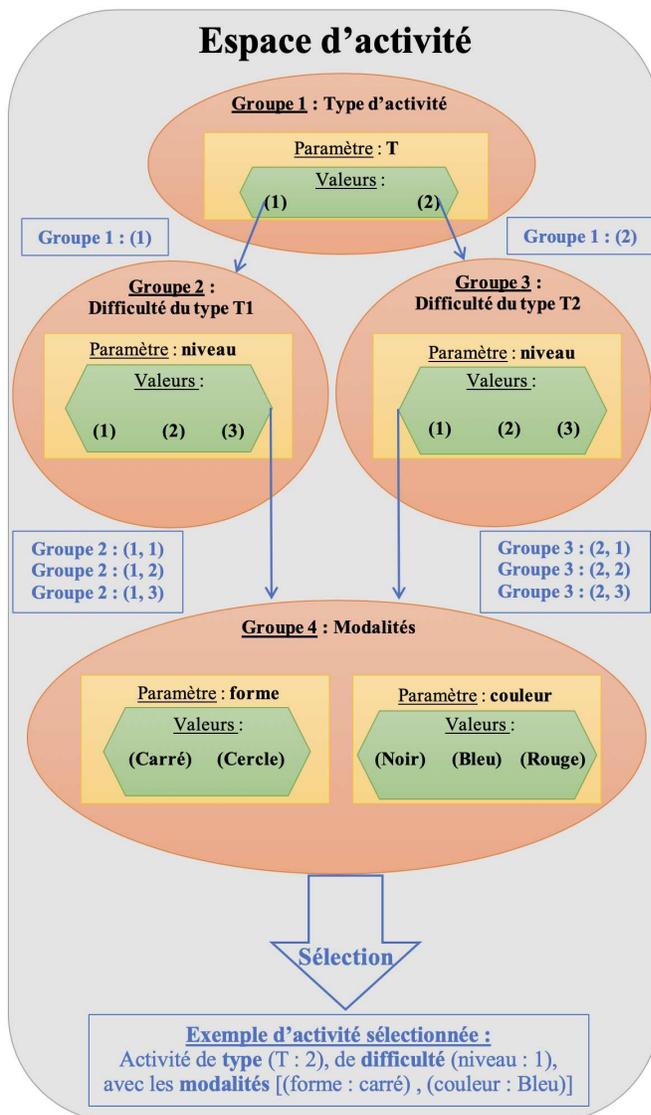


FIGURE 23 – Sélection d'une activité dans l'espace d'activité.

Cette figure est inspirée d'un schéma réalisé par Benjamin CLÉMENT [Clément, 2018]. Elle représente un exemple de sélection d'activité dans l'espace d'activité (forme grise) comportant quatre groupes hiérarchisés (formes oranges). Chaque groupe a un ou plusieurs paramètres (rectangles jaunes) qui eux mêmes ont des valeurs (formes vertes). Les fines flèches bleues montrent la hiérarchie entre les groupes tandis que la grosse flèche bleue représente le processus de sélection pointant vers un grand rectangle bleu. Celui-ci est une possibilité de sélection (un exemple de sélection d'activité). Les petits rectangles bleus à gauche et à droite représentent les combinaisons de valeurs possibles à l'issue de chaque groupe.

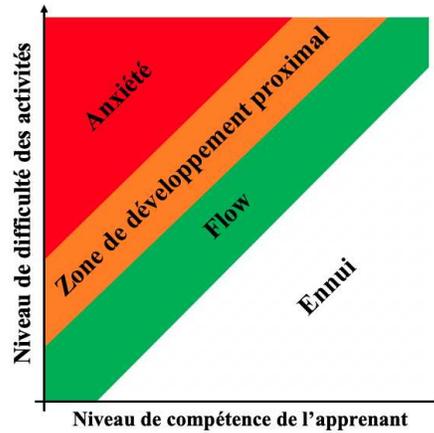


FIGURE 24 – Zone de développement proximal et Flow.

Cette figure est l'adaptation traduite d'un schéma réalisé par Benjamin CLÉMENT [Clément, 2018].

C'est un graphique représentant les états dans lesquels un apprenant peut se trouver lors de la réalisation d'une activité^a. Le niveau de difficulté se trouve sur l'axe des ordonnées alors que le niveau de compétence de l'apprenant est représenté en abscisse.

a. "Basawapatna et al. (2013) propose the concept of Zones of Proximal Flow where they come up with the idea of the Zone of Proximal Development being located in between regions of Flow and anxiety" [Clément, 2018].

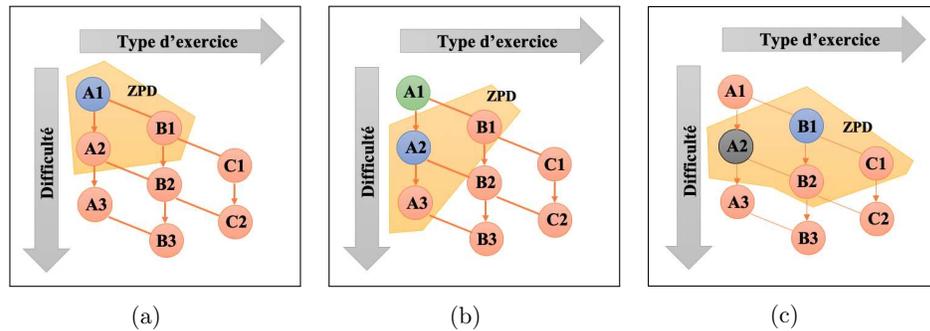


FIGURE 25 – Exemple de graphe des activités avec évolution de la zone de développement proximal.

Cette figure est une reproduction traduite d'un schéma effectué par Benjamin CLÉMENT [Clément et al., 2015]. Il s'agit d'un exemple de répartition des activités faite par un expert pédagogique. Les activités sont organisées par niveau de difficulté et par type.

La zone de développement proximal (ZPD) représente l'ensemble des activités de l'espace d'activité pouvant être proposées pour favoriser le plus efficacement possible le progrès d'apprentissage.

Index

- abduction, 34
- accommodation, 75
- accompagnement
 - métacognitif, 63
- acquaintance, 10
- action
 - exploratoire, 113
 - physique, 113
- activité
 - cognitive, 63, 65
- administrateur
 - central, 27
- affordance, 35
 - biologique, 36
 - cognitive, 36
 - fonctionnelle, 35
 - mixte, 36
 - perceptible, 35
 - perceptive, 36
 - physique, 36
- algorithme, 43
- amorçage, 23
- analogie, 32, 34
- analyse
 - moyen-fin, 89
- ancrage
 - dans un contexte, 92
- apprendre, 2, 5
- apprentissage, 5, 70, 110, 111, 118
 - de règles à partir d'exemples, 83
 - expérience d', 115
 - modes d'acquisition, 82
 - non-supervisé, 83
 - par relations causales, 83
 - par renforcement, 83
 - primitif, 71
 - processus d', 70
 - procédural, 27
 - cognitif, 27
 - perceptivo-moteur, 27
 - perceptivo-verbal, 27
 - sensorimoteur, 71
 - supervisé, 83
 - théorie de l', 70
 - transfert d', 88
- approche
 - computationnelle, 79
- assimilation, 75
- attente, 103
- attention, 19
 - active, 67
 - alerte, 19
 - constructive, 67
 - contrôle exécutif, 19
 - filtrage, 19
 - interactive, 68
 - passive, 67
- attitude
 - individuelle, 79
- autorégulation, 102
- behaviorisme, 70
- besoin, 100
 - physiologique, 100
 - psychologique, 100
- biais
 - de raisonnement, 43
- binding, 30
- bottom-down, 16

boucle
 phonologique, 27
 buffer
 épisodique, 27
 but, 65, 67, 68, 82, 87, 92, 100, 111
 attentionnel, 67
 sous-, 65, 67, 68

 cognition, 3, 5, 8, 64
 créative, 37
 distribuée, 80
 cognitivisme, 70, 73
 collaboration, 79
 co-créativité, 79
 complexité, 111
 comportement, 102
 comportementalisme, 70
 compréhension, 39, 88
 compétence, 8, 10, 11, 78, 79
 comportementale, 11
 méthodologique, 11
 niveau de, 115
 perçue, 97
 scolaire, 11
 sociale, 11
 technique, 11
 conatif, 98
 conditionnement, 71
 opérant, 105
 connaissance, 6–8, 12, 88
 déclarative, 13
 explicite, 12
 métacognitive, 64
 objectuelle, 10
 procédurale, 13
 propositionnelle, 10
 préalable, 8, 12, 16, 68, 83, 88

 tacite, 12
 théorie de la , 12
 épisodique, 13
 connectivisme, 70
 connexionnisme, 78
 construction
 cognitive, 74
 constructivisme, 70, 74
 socio-, 70
 contrainte, 83
 contrôle, 64, 65
 cognitif, 37
 croyance, 7, 8
 créativité, 36, 37, 79
 co-créativité, 79
 curiosité, 68, 100, 110–114
 intrinsèque, 110
 cécité
 inattentionnelle, 21

 direction, 99
 dissonance, 100
 distance
 d'édition, 33
 distraction, 21
 donnée, 12
 drive, 100
 décision, 101
 prise de, 101
 déclenchement, 99
 démarche
 créative, 36

 effet
 de fixation, 37
 effort
 cognitif, 65

encodage, 29
 engagement, 101
 environnement, 79
 externe, 15, 114
 interne, 15, 114
 espace
 d'activité, 117
 problème, 90
 estime
 de soi, 100
 espace
 d'activité, 120
 expectation
 de contrôle, 101
 valeur, 101
 exploitation, 118
 exploration, 113, 118, 121
 active
 spontanée, 113
 spontanée, 111
 expérience, 8, 11
 extéroception, 16

 fixité
 fonctionnelle, 92
 flexibilité
 cognitive, 49
 mentale, 37, 47, 49
 flow, 102, 111, 117
 fonction
 exécutive, 5, 37, 47
 mentale, 8
 symbolique, 6

 Gestalt, 85
 groupe
 social, 79

 généralisation, 27

 habileté
 métacognitive, 64
 heuristique, 42, 66
 de fluence, 67

 incertitude, 111
 incongruité, 93
 induction, 27
 information, 12, 113, 114
 gain d', 111
 prise d', 14
 stockage de l', 30
 traitement de l', 12
 inférence, 39
 causale, 84
 inhibition, 47, 48
 cognitive, 47, 48
 motrice, 47, 48
 instinct, 100
 instrumentalité, 101
 intelligence, 3
 logico-mathématique, 61
 émotionnelle, 61
 Intelligent Tutoring Systems, 115
 intensité, 99
 intention, 17, 83, 100
 interaction, 70
 interoception, 16
 intuition, 6, 12, 41
 intérêt, 100
 investissement
 cognitif, 63
 métacognitif, 63

 langage, 5
 intérieur, 50

- phonétique, 50
- égocentrique, 50
- learning
 - progress, 111
- learning progress, 116, 121
- lexique
 - mental, 51
- logique, 41
 - modale, 46
- modalité
 - sensorielle, 15
- monitoring, 65
- motif
 - original, 100
 - primaire, 100
 - secondaire, 100
- motivation, 97, 103, 115
 - corrective, 93
 - extrinsèque, 104, 111
 - intrinsèque, 45, 65, 67, 104, 111, 113
- motricité, 5, 51
- mémoire, 5, 22, 65, 70
 - de travail, 22, 24, 27, 49
 - implicite, 71
 - opérationnelle, 24
 - perceptive, 22, 23
 - procédurale, 25, 27, 71
 - sémantique, 23, 25, 26
 - à court terme, 22
 - à long terme, 22, 25
 - épisode, 23, 25, 26
- mémorisation, 28, 29, 111
- métacognition, 50, 63, 64
- neuropédagogie, 3
- neurosciences, 3
 - affectives et sociales, 3
 - cognitives, 3, 8
 - computationnelles, 3
- neuroéducation, 4
- nouveauté, 70, 83, 111
- numérique, 79, 110
- nécessité, 45
- objet, 7
- ontologie, 33, 111
- oubli, 30
- pensée
 - critique, 79
 - créative, 37
 - informatique, 79
 - créative, 79
 - intuitive, 42
 - irrationnelle, 42
 - rationnelle, 42
- percept, 17
- perception, 5, 14, 65
 - de l'espace, 17
 - de la quantité, 17
 - du temps, 17
- persistance, 99
- planification, 47, 64, 65
- possibilité, 45
- principe
 - de parcimonie, 34
- prise
 - de décision, 47
- problème
 - bien défini, 89
 - mal défini, 88
 - résolution de, 47, 79, 82, 85, 87, 88, 110

collaborative, 79
 processus
 cognitif, 64
 mentaux, 63
 social, 79
 progression, 113
 proprioception, 16
 proximité, 33
 prédicat, 7
 prédiction, 65, 100, 111
 imaginaire, 101
 prémisse, 39
 pédagogie, 4

 raisonnement, 5, 27, 32, 43, 47, 65
 abductif, 32, 34
 créatif, 32, 36, 37
 déductif, 32, 39
 hypothétique, 34
 inductif, 32, 38
 logique, 39
 probabiliste, 38
 rappel, 30
 rationalisme, 73
 rationalité, 42
 registre
 multimodal, 27
 visuo-spatial, 27
 relation
 causale, 113
 représentation, 14, 97
 imagée, 14
 interne, 111
 mentale, 14, 50
 perceptive, 14
 symbolique, 110
 verbale, 14

 ressource
 attentionnelle, 111
 restitution, 30
 reviviscence, 28
 rigidité
 fonctionnelle, 37
 récepteur
 sensoriel, 14, 15
 récompense
 intrinsèque, 111
 réflexion, 87
 réflexivité, 87
 réfutation, 40
 régulation
 cognitive, 64
 externe, 107
 réseau
 de relations, 88
 résultat, 102
 rétroaction, 113
 positive, 113

 satisfaction, 102
 savoir, 8, 9
 agissant, 9
 cognitif, 11
 constitué, 9
 faire, 10, 11
 formalisé, 9
 intellectuel, 9
 être, 9, 11
 schème
 conceptuel, 6
 opérateur, 75
 sciences de l'éducation, 4
 sensation, 15
 sentiment, 54

noétique, 66
 shifting, 47
 signifiant, 6
 signifié, 6
 similarité, 33
 spécification, 34
 stimulation, 14
 stimulus, 14, 111
 conditionnel, 71
 inconditionnel, 71
 perçu, 111
 stratégie, 101
 cognitive, 101
 de découverte, 83
 métacognitive, 64, 68
 directive, 65
 motivationnelle, 65
 préventive, 65
 émotionnelle, 101
 subvocalisation, 50
 sujet, 7
 connaissant, 9
 système
 cognitif
 humain, 12
 heuristique, 48
 sensoriel, 15
 sémantisation, 28
 théorie
 de l'entrave, 30
 de l'interférence, 30
 de l'oubli motivé, 30
 de la logique mentale, 39
 des modèles mentaux, 39
 du déclin, 30
 top-down, 16
 trace
 mnésique, 29
 trait
 de personnalité, 100
 traitement
 perceptif, 17
 triplet
 RDF, 7
 updating, 47, 49
 valeur, 100
 portée
 par le groupe, 79
 propre, 79
 vigilance, 19
 volition, 99, 103
 zone
 de développement proximal,
 117
 de flow, 117
 élaboration
 haut niveau d', 16
 niveau d', 16
 émotion, 3, 5, 43, 53, 54, 100
 sociale, 56
 état
 but, 88
 de départ, 88
 mental, 54
 émotionnel, 54
 épistémique, 114
 évaluation, 65
 cognitive, 59



**RESEARCH CENTRE
BORDEAUX – SUD-OUEST**

200 avenue de la Vieille Tour
33405 Talence Cedex

Publisher

Inria

Domaine de Voluceau - Rocquencourt

BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex

inria.fr

ISSN 0249-6399