



HAL
open science

Logique sans peine? : comment nous sommes plus performants et motivés pour raisonner logiquement à propos des connaissances primaires

Florence Lespiau

► To cite this version:

Florence Lespiau. Logique sans peine? : comment nous sommes plus performants et motivés pour raisonner logiquement à propos des connaissances primaires. Psychologie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2017. Français. NNT : 2017TOU20101 . tel-02135502

HAL Id: tel-02135502

<https://theses.hal.science/tel-02135502>

Submitted on 21 May 2019

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse - Jean Jaurès*

Présentée et soutenue le *04/12/2017* par :

Florence LESPIAU

**Logique sans peine ? Comment nous sommes plus performants et motivés
pour raisonner logiquement à propos des connaissances primaires.**

JURY

ANDRÉ TRICOT

AURÉLIA BUGAISKA

WIM DE NEYS

JEAN-FRANÇOIS BONNEFON

PHILIPPE DESSUS

Professeur des Universités

Professeure des Universités

Directeur de recherche au CNRS

Directeur de recherche au CNRS

Professeur des Universités

Directeur de thèse

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

École doctorale et spécialité :

CLESCO : Psychologie

Unité de Recherche :

Cognition, Langues, Langage, Ergonomie (CLLE), UMR 5263

Directeur de Thèse :

André TRICOT

Rapporteurs :

Aurélia BUGAISKA et Wim DE NEYS

Logique sans peine ? Comment nous sommes plus performants et motivés pour raisonner logiquement à propos des connaissances primaires.

Florence Lespiau

2017

Résumé

L'apprentissage donne souvent l'impression d'être un processus long et difficile, notamment quand il fait penser à l'école et à la difficulté que tout le monde a déjà ressentie pour maintenir sa motivation pour telle ou telle matière. Pourtant, il y a des choses que l'on apprend sans enseignement. Par exemple, apprendre à parler sa langue maternelle se fait naturellement sans effort conscient. Les connaissances primaires et secondaires sont une façon de distinguer ce qui est facile ou difficile à apprendre. Les connaissances primaires sont celles pour lesquelles nos mécanismes cognitifs auraient évolué, permettant une acquisition sans effort, intuitive et rapide alors que les connaissances secondaires sont apparues récemment : ce sont celles pour lesquelles nous n'aurions pas eu le temps d'évoluer et dont l'acquisition serait longue et coûteuse. Les écoles se focalisent essentiellement sur ce deuxième type de connaissances. Leur défi est de permettre ces apprentissages longs et coûteux, et, pour cela, de maintenir la motivation des apprenants. Une piste de recherche s'appuie sur le fait que les connaissances secondaires sont construites sur la base des connaissances primaires. En effet, personne n'est capable d'enseigner « initialement » une langue maternelle alors que l'apprentissage des langues étrangères s'appuie sur cette première langue. Le présent travail explore le caractère motivant et peu coûteux des connaissances primaires pour faciliter l'apprentissage de la logique en tant que connaissance secondaire. En modifiant la présentation de problèmes logiques avec des habillages liés aux connaissances primaires (*e.g.*, nourriture et caractéristiques d'animaux) ou secondaires (*e.g.*, règles de grammaire, mathématiques), huit premières expériences ont permis de mettre en avant les effets positifs des connaissances primaires que le contenu soit familier ou non. Les résultats montrent que les connaissances primaires favorisent la performance, l'investissement émotionnel, la confiance dans les réponses et diminuent la charge cognitive perçue. Quant aux connaissances secondaires, elles semblent miner la motivation des participants et générer une sensation de conflit parasite. De plus, présenter des problèmes avec un habillage de connaissances primaires en premier permettrait de réduire les effets délétères des connaissances secondaires présentées ensuite et aurait un impact positif global. Trois autres expériences ont alors mis ces résultats à l'épreuve de tâches d'apprentissage afin de proposer une approche qui favorise l'engagement des apprenants et leur apprentissage. Ces découvertes tendent à montrer que les recherches sur l'apprentissage bénéficieraient à prendre en considération les connaissances primaires plutôt que de les négliger car elles sont « déjà apprises ».

Mots-clés : connaissances primaires/secondaires, charge cognitive, engagement émotionnel et cognitif, type 1/2.

Abstract

Learning often gives the impression of being a long and difficult process, especially when it reminds us of school and the difficulty that everyone has already experienced in maintaining motivation for a particular subject. Yet there are things we learn without teaching. For example, learning to speak one's mother tongue is a natural process without conscious effort. Primary and secondary knowledge is a way of distinguishing what is easy or difficult to learn. Primary knowledge is the knowledge for which our cognitive mechanisms have evolved, allowing effortless, intuitive and rapid acquisition, whereas secondary knowledge has recently emerged: it is the knowledge for which we would not have had time to evolve and for which acquisition would be long and costly. Schools focus mainly on this second type of knowledge. Their challenge is to enable this lengthy and costly learning, and to do so, to maintain the motivation of learners. A research path is based on the fact that secondary knowledge is built on the basis of primary knowledge. Indeed, no one is able to teach a mother tongue "initially", whereas foreign language learning is based on that first language. This work explores the motivational and inexpensive nature of primary knowledge to facilitate the learning of logic as secondary knowledge. By varying the content of logical problems with primary (*e.g.*, food and animals' features) or secondary knowledge (*e.g.*, grammar rules, mathematics), the first eight experiments highlighted the positive effects of primary knowledge, whether or not the content was familiar. The results showed that primary knowledge promoted performance, emotional investment, confidence in responses and decreased perceived cognitive load. Secondary knowledge seemed to undermine participants' motivation and generated a feeling of parasitic conflict. In addition, presenting primary knowledge content first reduced the deleterious effects of secondary knowledge presented second and would have an overall positive impact. Three other experiments then tested these results on learning tasks in order to propose an approach that fosters learners' engagement and learning. These findings tend to show that research about learning would benefit from taking primary knowledge into account rather than neglecting it because it is "already learned".

Keywords: primary/secondary knowledge, cognitive load, emotional and cognitive involvement, type 1/2.

Remerciements

Merci à André Tricot de m'avoir fait et rendu confiance. Merci pour ton esprit critique et éternellement curieux, tes encouragements, ta bienveillance, ta disponibilité ainsi que pour toutes tes nombreuses autres qualités. Ces deux années ont été jalonnées de discussions passionnantes et d'expériences qui, je crois, m'ont fait grandir scientifiquement et humainement. Merci de m'avoir emmenée un peu partout sur le globe pour que je puisse diffuser nos travaux et en débattre avec le maximum de personnes. Merci de m'avoir rendu fière de mon grain de folie. Je ne suis pas prête d'arrêter de te dire merci.

Merci à Jean-François Bonnefon de m'avoir donné envie de travailler sur le raisonnement pendant ses cours de Master et de m'avoir suivie et encouragée depuis. Merci de m'avoir intégrée dans les *Lab meetings* et de m'avoir prodigué tant de conseils. J'aime penser que mes compétences en termes de rigueur scientifique et de synthèse se sont améliorées grâce à eux.

Merci aux deux autres membres des *Lab meetings* qui m'ont accompagnée depuis le début du doctorat : Andrei Ivănescu et Marina Miranda Lery Santos. Nos échanges m'ont aidée à développer mes perspectives de recherche et je n'ai plus honte de m'exprimer en anglais grâce à vous.

Merci à Aurélia Bugaiska, à Wim De Neys et à Philippe Dessus d'avoir accepté d'évaluer mon travail et de me permettre d'en discuter avec eux pour faire évoluer ma réflexion.

Merci à tous les participants qui ont cliqué sur « j'accepte de participer à cette étude » et à ceux qui m'ont accueillie dans leur classe. Merci aux établissements scolaires et aux enseignants qui se sont intéressés à mon projet de thèse, particulièrement à Hélène Baudouy et à Amélie Labrande.

Merci à Rui Da Silva Neves de m'avoir présentée à la tâche de Wason pour la première fois en Licence 1.

Merci à l'équipe de l'école doctorale CLESCO et à celle du CLLE, particulièrement à l'axe 3 du LTC, de m'avoir permis d'effectuer ces trois années dans les meilleures conditions possibles.

Merci à tous mes proches, ceux qui ont toujours été derrière moi et qui se sont assurés que je ne perde jamais confiance. Merci de m'avoir aidée à devenir ce que je suis. Merci même à ceux qui n'ont cessé de me demander de répéter ce sur quoi je travaillais et à quoi cela servait. Merci pour votre amour, votre force et votre soutien inconditionnels. Merci de m'avoir toujours poussée à chercher une voie professionnelle qui me plaisait. Je pense que j'ai trouvé. Merci à Mylène, ma chère amie, pour avoir un caractère et une vision du monde totalement différents et complémentaires des miens. Merci pour toutes tes qualités que j'admire. Merci d'avoir grandi avec moi et de continuer à le faire.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	L'apprentissage dans les écoles et la motivation des apprenants.....	2
1.1.1	Apprendre, enseigner et la place des écoles	3
1.1.2	L'importance de la motivation dans l'apprentissage.....	6
1.2	L'approche évolutive : une nouvelle conceptualisation des connaissances	9
1.3	La logique formelle au centre de tous les apprentissages mais délaissée par l'enseignement.....	11
1.4	Vue générale	13
2	Le raisonnement humain et la logique	15
2.1	Les syllogismes et les règles conditionnelles.....	15
2.1.1	La théorie des modèles mentaux	17
2.1.2	Les différences individuelles dans la résolution de syllogismes	19
2.2	Les « biais » de raisonnement et la question de la rationalité humaine	21
2.2.1	La différence entre concret et abstrait	23
2.2.2	Les biais de croyance	27
2.3	L'approche <i>dual-system</i> ou <i>dual-process</i>	30
2.3.1	Système 1 et système 2.....	30
2.3.2	Les interactions entre les deux systèmes et l'explication des biais de raisonnement	33
3	L'approche évolutive des connaissances	39
3.1	Connaissances primaires et secondaires	39
3.1.1	Caractéristiques évolutives humaines	39
3.1.2	L'individu selon Geary.....	42
3.1.3	Caractéristiques des connaissances primaires et secondaires	43
3.1.4	La psychologie évolutive de l'éducation.....	53
3.2	Les mécanismes en jeu et la question de la charge cognitive.....	55
3.2.1	La théorie de la charge cognitive	58
3.2.2	La théorie des difficultés désirables	63
3.3	Favoriser l'apprentissage grâce aux connaissances primaires	65
3.3.1	La mémoire de travail collective et la collaboration	68
3.3.2	Le mouvement humain	69

3.3.3	La cognition incarnée	71
4	Synthèse des apports de la revue de littérature.....	73
5	Contribution empirique	74
5.1	Influence des connaissances primaires et secondaires dans la résolution de problèmes logiques	76
5.1.1	Expérience 1.....	77
5.1.2	Expérience 2.....	80
5.1.3	Expérience 3.....	86
5.1.4	Synthèse des expériences 1 à 3 (règles conditionnelles).....	91
5.1.5	Expérience 4a.....	92
5.1.6	Expérience 4b.....	98
5.1.7	Expérience 5.....	102
5.1.8	Expérience 6.....	107
5.1.9	Expérience 7.....	113
5.1.10	Analyse groupée et synthèse de la première partie empirique.....	118
5.2	Tâches d'apprentissage : mise à l'épreuve de l'effet motivant des connaissances primaires	127
5.2.1	Expérience 8.....	127
5.2.2	Expérience 9.....	131
5.2.3	Expérience 10 : le meilleur ordre de présentation pour favoriser l'apprentissage.....	137
6	Discussion générale et perspectives.....	145
6.1	Synthèse et discussion des résultats	145
6.2	Limites et perspectives	153
6.2.1	Objectifs proximaux fondamentaux	154
6.2.2	Objectifs proximaux plus appliqués	158
6.3	Conclusion	161
	Références.....	163

1 Introduction

Lewis Carroll est célèbre pour les devinettes et les énigmes qu'il aimait poser à son entourage et à ses lecteurs. Il inventait sans cesse des jeux de mots, souvent nonsensiques, pour amuser le plus grand nombre et rendre ses explications convaincantes. Durant la deuxième moitié de sa vie, il s'employait à utiliser son habileté à créer des jeux au service de l'enseignement des mathématiques et de la logique. Pédagogue, il avait la volonté d'« introduire dans chaque *Nœud*¹ (comme le médicament qu'on tente, avec tant d'habileté et si peu de succès, de dissimuler sous la confiture) un ou plusieurs problèmes mathématiques [...] dans l'espoir d'amuser, et peut-être d'instruire » (préface, *Une histoire embrouillée*, 1974, initialement publié en 1885). Pour lui, le raisonnement logique et les exercices qu'il proposait étaient une source de distraction inépuisable, un véritable jeu, en même temps qu'une façon de s'instruire. L'idée de plaisir à manipuler mentalement les objets et à apprendre était au cœur de la démarche de Carroll. Ce dernier semblait même « abuser » de son pouvoir en forçant les gens à réfléchir, mais « y a-t-il là matière à objection du moment que l'on en tire du plaisir ? » (traduit de la préface, *The Game of Logic*, 1887). Il est l'un des rares auteurs modernes à traiter l'apprentissage de la logique formelle. Son ouvrage *Logique sans peine* (1966, initialement publié en 1896) est selon lui la première tentative de vulgariser ce domaine car « il suffit d'avoir bien compris le mécanisme de la logique symbolique pour posséder un passe-temps non seulement passionnant, et que l'on a toujours sous la main, mais également utile, réellement utile, dans tous les domaines » (préface). Carroll est tout à fait conscient que la logique formelle est difficile à apprendre et prévient le lecteur d'étudier les parties telles qu'elles sont présentées sans en exclure une arbitrairement, de relire si la partie n'est pas comprise, etc. Il accompagne ceux qui veulent bien le lire pour faire évoluer leurs connaissances et leur façon de penser. Sa stratégie essentielle est d'habiller les choses de façon à ce qu'elles soient plus plaisantes, qu'on soit plus enclin à travailler sur ses exercices et qu'on en retire suffisamment de satisfaction pour poursuivre l'expérience.

Le présent travail se situe dans la lignée de ceux de Carroll. Il vise à concevoir et évaluer une nouvelle façon d'impliquer les individus dans des tâches de logique formelle a priori peu engageantes. La psychologie évolutive et notamment la différenciation des types de

¹ Carroll utilise le terme *knot* en référence à ses jeux de mots. Il correspond ici à l'idée de palier, d'étape d'instruction.

connaissances en jeu (Geary & Berch, 2016) permet d'entrevoir une façon inédite et pourtant ancienne de présenter les problèmes pour les rendre plus attractifs. Il suffirait pour cela de les habiller avec des thématiques de connaissances primaires pour lesquelles nous aurions plus d'aisance et d'intérêt intrinsèque. Ainsi, un exercice de type :

*Tous les A sont B,
Or tous les C sont A,
Donc tous les C sont B.*

peut revêtir ce genre d'habillage non seulement beaucoup plus séduisant mais aussi plus facile à traiter :

*Tous les gâteaux se mangent,
Or tous les marbrés au chocolat sont des gâteaux,
Donc tous les marbrés au chocolat se mangent.*

Il est en effet attesté depuis les années 1960 que la façon dont les problèmes logiques sont habillés a un effet majeur sur le raisonnement mis en œuvre et la résolution des problèmes (Griggs & Cox, 1982 ; Wason, 1966). Tout au long de cette recherche, nous nous efforcerons de comprendre pourquoi certaines connaissances sont plus facilement traitées et ce avec plus d'intérêt que d'autres pour finir par utiliser leurs caractéristiques afin de favoriser l'engagement et la performance des individus dans des tâches d'apprentissage.

1.1 L'apprentissage dans les écoles et la motivation des apprenants

Pour de nombreuses personnes, apprendre à l'école est synonyme de labeur et ne semble pas être le bon mot clé pour susciter la motivation. Pourtant, l'être humain est curieux par nature et est particulièrement doué lorsqu'il s'agit d'apprentissage (Sweller, 2015). Alors pourquoi cet être humain semble souvent si peu enthousiaste à l'idée d'aller à l'école et dans les institutions éducatives en général ? Une des réponses serait liée à la nature des connaissances apprises à l'école : elles semblent bien loin de nos préoccupations quotidiennes, si bien qu'on leur trouve rarement une utilité directe. Il paraît en effet difficile de maintenir notre motivation à apprendre le théorème de Pythagore si on ne comprend pas comment l'appliquer de façon utile (Roszkowski & Soven, 2010). L'existence d'une motivation extrinsèque comme le soutien des parents ou les attentes de la société est bien souvent nécessaire pour maintenir l'engagement des apprenants.

Les institutions éducatives ont été créées pour faire le lien entre les connaissances naïves des individus et les connaissances que l'Histoire humaine a mis à notre disposition et qui seraient impossibles à apprendre seul.

On peut cependant apprendre facilement en dehors de l'école. Personne n'a jamais enseigné à un enfant comment communiquer avec sa famille (en dehors de cas pathologiques). Personne ne connaît la façon d'enseigner à quelqu'un comment parler sa langue maternelle quand bien même on utilise cette langue maternelle comme base d'apprentissage pour toutes les autres langues. Les écoles n'existent pas dans les sociétés traditionnelles où la vie de tous les jours ne nécessite pas de savoir lire, écrire ou faire des mathématiques alors que dans certaines sociétés, l'école prend de plus en plus de place dans la vie des enfants, des adolescents et dans celle de plus en plus de jeunes adultes. Pourquoi certains apprentissages peuvent se faire aussi « simplement » et pourquoi d'autres sont beaucoup plus longs, « difficiles » et nécessitent l'intervention de l'école ?

1.1.1 Apprendre, enseigner et la place des écoles

Apprendre, c'est élaborer ou modifier une connaissance et des substrats neuronaux liés à cette connaissance, c'est modifier une connaissance sous l'effet de l'expérience (Mayer, 2011). Une connaissance correspond à tout élément de notre mémoire qui permet de comprendre le monde et d'agir sur lui sans nécessité de se souvenir de sa propre source (Tricot, 2012). L'apprentissage vise l'adaptation de l'individu à son environnement quotidien. Ainsi, nous n'apprenons que ce qui maximise notre adaptation à l'environnement (ce dont nous avons besoin pour vivre, atteindre nos buts tout en diminuant les coûts engagés). Plus un but est fréquent dans une situation, plus la connaissance relative à ce but est mobilisable et aisément mise en œuvre. Cependant, nous sommes limités par la connaissance de notre environnement et la perception que nous en avons (connaissances antérieures sur le monde). Un des buts de l'apprentissage est le transfert ou l'application d'une connaissance conceptuelle à une nouvelle situation isomorphe (Kaminski, Sloutsky & Heckler, 2006). Les apprentissages peuvent être divisés en trois types (Tricot, 2012) : (i) par développement/adaptation (élaboration de connaissances dont l'utilité est adaptative, rapide et peu coûteuse), (ii) par enseignement (élaboration de connaissances dont l'utilité est sociale ou culturelle, lente et coûteuse) et (iii) par la pratique professionnelle (élaboration de connaissances qui permettent une meilleure adaptation à l'environnement de travail, coûteuse en

temps). Le type d'apprentissage lié à la pratique professionnelle peut être rapproché de celui lié à la pratique par adaptation mais ne sera pas abordé dans ce travail.

Les écoles auraient été créées récemment à l'échelle de l'évolution (Geary & Berch, 2016) et ne seraient pas présentes dans toutes les sociétés, ce qui soutiendrait le fait que l'enseignement tel qu'on le connaît serait un produit culturel et non évolutif (Lancy, 2016). L'éducation française connaît effectivement une longue histoire allant des écoles monastiques restaurées par Charlemagne aux écoles chrétiennes plébiscitées par Louis XIV pour devenir un enjeu important à partir de la Révolution, qui rend l'éducation laïque (l'éducation devait former des citoyens éclairés pour maintenir la démocratie). L'organisation de l'école primaire devient alors une source de préoccupation pour le pouvoir politique et la place de la religion dans l'éducation est assez complexe, tantôt à y être intégrée (Napoléon Bonaparte réintègre l'Eglise dans la formation des instituteurs), tantôt à en être exclue (pendant l'ère Ferry par les Hussards noirs). L'école telle que nous la connaissons aujourd'hui est le produit d'une histoire humaine particulière.

Aux Etats-Unis, un des buts initiaux des écoles aurait été d'endoctriner les enfants, supprimant ou négligeant leurs capacités et leurs connaissances naïves pour en construire de nouvelles (Gray, 2016). Aujourd'hui, l'objectif des institutions éducatives est d'enseigner des connaissances culturellement importantes qui sont très difficiles à apprendre par soi-même ou par simples interactions sociales (Sweller, 2015). Le temps d'apprentissage à l'école est réduit (acquisition d'un maximum d'informations en un minimum de temps) ce qui le rend également différent de l'apprentissage par adaptation à un environnement. L'école se nourrit elle-même. Elle est nécessaire parce que les connaissances culturelles à apprendre sont trop importantes pour être apprises seules. Plus les apprenants à l'école seront nombreux, plus le nombre de créateurs et de découvreurs sera important et plus les connaissances culturelles à transmettre à la génération suivante seront considérables (Tricot & Roussel, 2016). On apprend aujourd'hui au lycée des choses qu'on apprenait il y a cinquante ans à l'université. Les écoles tendent également à rendre les individus plus « intelligents » que le cours du temps seul ne le ferait, montrant que les connaissances jouent un rôle critique dans l'intelligence telle que mesurée actuellement (Brinch & Galloway, 2012).

L'enseignement est une activité intentionnelle dont le but est de favoriser le développement de connaissances par autrui, ce dernier étant jugé comme présentant un manque de connaissance ou une croyance erronée (Ziv & Frye, 2004). L'éducation œuvre sur des individus dont les connaissances antérieures ne sont pas suffisantes. Sans connaissance antérieure disponible, les individus peuvent (i) procéder par essai/erreur, (ii) chercher des informations ou (iii) chercher de l'aide auprès d'une personne dont les connaissances antérieures sont jugées pertinentes (Tricot & Sweller, 2016). Enseigner peut être conceptualisé selon deux approches (von Glaserfeld & Steffe, 1991) : (i) mécaniste (les élèves reçoivent passivement les informations de la part des enseignants, les modifications des connaissances se feraient sans nécessité de comprendre le matériel pour les apprenants) ou (ii) constructiviste (les élèves sont actifs et doivent construire les connaissances pour eux-mêmes). L'enseignement constructiviste est une entreprise sociale dont le moteur est l'interaction. Cette approche tend à traiter toutes les connaissances de la même façon, mettant par exemple les règles de résolution d'équations à deux inconnues au même niveau que les règles pour repérer les champignons vénéneux. Cependant, on ne peut pas nier que toutes les connaissances ne sont pas sur un même pied d'égalité : certaines sont plus difficiles à acquérir et bien moins motivantes (Geary, 2007) sans être intrinsèquement plus complexes.

L'espèce humaine est l'une des rares à instruire et à apprendre autrement que par apprentissage implicite, imitation et observation (Fogarty, Strimling & Laland, 2011 ; Thornton & Raihani, 2008). Le fait d'enseigner sous-tend que les coûts payés par l'enseignant pour faciliter l'apprentissage d'un apprenant sont compensés par les bénéfices à long terme liés à cet apprentissage (notamment en favorisant l'apprentissage sans enseignement). Ainsi, l'enseignement n'a pas lieu d'être pour des choses « aisées » à acquérir seul mais bien pour des connaissances culturelles difficiles à apprendre autrement. La transmission des connaissances culturelles se ferait par la communication interindividuelle. Sans parler des écoles, une pédagogie naturelle, universelle et spécifique à l'espèce humaine reposerait sur un mécanisme de transmission selon lequel (i) les adultes seraient prédisposés à apprendre aux enfants et (ii) ces derniers bénéficieraient de biais leur permettant de comprendre les instructions des adultes comme quelque chose de généralisable et non comme de simples faits (Csibra & Gergely, 2011 ; Tomasello, 2009). Si les enfants sont suffisamment curieux et motivés pour imiter les individus les plus experts dans un domaine et même s'il n'y a pas toujours besoin d'école selon les

connaissances à apprendre, à minima, implicitement, la communication à visée pédagogique est indispensable (Lancy, 2016).

1.1.2 L'importance de la motivation dans l'apprentissage

Apprendre des connaissances scolaires est un processus long et difficile qui demande de la motivation. La motivation correspond au déterminant qui fait agir, qui soutient l'action orientée par un but (Cosnefroy, Nurra & Dessus, 2016). Elle est aussi conceptualisée comme l'addition de la perception que l'information à apprendre a une valeur particulière et de la sensation qu'on est capable d'apprendre cette information (Tricot & Roussel, 2016). Deux types de motivation sont communément distingués : (i) la motivation intrinsèque qui fait référence aux actions dans lesquelles un individu s'engage parce qu'elles sont intéressantes et appréciables de façon inhérente et (ii) la motivation extrinsèque qui comprend l'engagement dans des actions dont les conséquences sont désirables (récompense à la clé par exemple), dans ce cas, l'engagement est fondamentalement lié à l'atteinte d'un résultat séparable de l'action (Legault, 2016). La motivation est souvent confondue avec l'engagement (Azevedo, 2015). Dans une situation d'apprentissage, les individus sont motivés lorsqu'ils se sentent compétents pour atteindre le but fixé (but faisable) et lorsqu'ils considèrent la tâche comme plaisante (but désirable). Les perceptions de la faisabilité et la désirabilité s'influencent mutuellement et sont propres à chacun. L'apprentissage ne requiert pas uniquement des processus cognitifs, mais également des processus émotionnels et motivationnels. Il est cependant difficile de maintenir la motivation des apprenants, ce qui en fait le défi principal des enseignants et des parents (Cosnefroy, Nurra & Dessus, 2016). La motivation peut être évaluée avec des questions subjectives concernant le fait d'aimer ou non une activité (Aunola, Leskinen & Nurmi, 2006) ou des items concernant l'intérêt et le plaisir ressenti pendant la tâche (Greene, 2015 ; Ryan, 1982). Elle peut également se mesurer en matière de temps d'engagement dans une tâche (Deci, 1971).

La motivation n'est pas importante en tant que telle, mais parce que les individus motivés s'engagent dans des activités qui soutiennent leur succès académique. En effet, la motivation des apprenants, particulièrement leur motivation intrinsèque, influence leur performance, leur satisfaction et leur bien-être (Ryan & Deci, 2000). Une des clés pour l'apprentissage et l'éducation est la motivation (Ellis, 2008). De même, selon d'autres études, le type d'engagement des apprenants (comportemental, cognitif, émotionnel et agentique) serait prédictif d'un

investissement au long terme dans l'apprentissage (Sinatra, Heddy & Lombardi, 2015). Par exemple, pour l'engagement émotionnel, le plaisir ressenti lors de la tâche favoriserait l'engagement et l'attention. La motivation et les émotions sont donc cruciales dans l'apprentissage (Kim, Park & Cozart, 2014) : si les individus manquent de motivation, ils ne s'engagent pas dans le processus d'apprentissage. La principale préoccupation des enseignants et des parents est donc de favoriser la motivation, le plaisir d'apprendre, l'engagement dans les tâches d'apprentissage (Braver *et al.*, 2014 ; Cosnefroy *et al.*, 2016) et de réduire la charge cognitive perçue (*i.e.*, l'intensité perçue du traitement cognitif mis en œuvre lors d'une tâche (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 qui ne doit pas excéder les capacités en mémoire de travail, Paas, Renkl & Sweller, 2003 ; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 ; mais qui doit être suffisante pour permettre un engagement de la part des apprenants, Bjork & Bjork, 2011 ; Chi & Wylie, 2014) autant sinon plus que la performance des apprenants. Compte tenu de l'importance de l'apprentissage à l'école dans nos sociétés actuelles et des difficultés à engager les apprenants durablement dans cette activité, il est essentiel d'investiguer quels facteurs peuvent influencer cet engagement émotionnel et cognitif.

« Comment motiver les apprenants ? » est ainsi une question centrale du champ de l'éducation. Qu'est-ce qui fait « bouger » les individus ? Les recherches sur la motivation s'intéressent particulièrement aux domaines académiques (qui demandent des efforts de la part de l'apprenant) et mettent en avant une influence de la culture et des attentes d'autrui (Weiner, 1990). A l'origine, la motivation est considérée comme le moteur du comportement (liée aux besoins insatisfaits) pour être ensuite définie comme un mécanisme cognitif important visant un but. Les profils motivationnels comme les buts d'accomplissement sont alors devenus une clé pour comprendre les différences interindividuelles face à l'apprentissage. Les buts d'accomplissement rendent compte des raisons pour lesquelles un apprenant accomplit une tâche académique. Deux types principaux de buts sont généralement considérés. Les buts (i) de maîtrise (l'objectif est de développer ses compétences) et (ii) de performance (l'objectif est de démontrer sa performance, de ne pas se tromper) (Darnon & Butera, 2005). L'échelle d'Elliot et McGregor (2001) validée en français par Darnon et Butera (2005) permet de définir quatre profils de buts en ajoutant une caractéristique approche/évitement aux deux précédents buts, permettant ainsi d'évaluer le degré d'appartenance des individus aux buts de *maîtrise approche* (centré sur la réalisation des tâches et la compétence personnelle), *maîtrise évitement* (centré sur le fait d'éviter

l'incompétence personnelle), *performance approche* (centré sur le fait d'atteindre une compétence normative) et *performance évitement* (centré sur le fait d'éviter l'incompétence normative) (Elliot & Murayama, 2008). L'échelle de 2001 a été critiquée car certains items renvoyaient à des valeurs (e.g. « c'est important pour moi de... ») plutôt qu'à des buts (Elliot & Murayama, 2008). Elle permet néanmoins d'obtenir un aperçu des comportements/buts des individus. Le type de but d'accomplissement d'un apprenant permet en effet de prédire sa trajectoire d'apprentissage (stratégies d'auto-handicap ou d'auto-efficacité utilisées, difficultés rencontrées, bien-être ressenti ; Huff, Stripling, Boyer & Stephens, 2016) et ainsi d'élaborer des instructions, un discours et des *feedback* adaptés.

Le *feedback* est un autre élément crucial dans les situations d'apprentissage parce qu'il permet de soutenir et de motiver les apprenants. Il correspond à l'information donnée à un individu par rapport à sa performance ou à sa compréhension (Hattie & Timperley, 2007). Le *feedback* renseigne sur la différence entre la performance/compréhension actuelle et l'objectif visé, réduisant l'incertitude concernant la réponse donnée et permettant de centrer l'attention sur l'apprentissage. On peut distinguer quatre niveaux de *feedback* : (i) centré sur la tâche (notion de correct et d'incorrect, directions pour acquérir d'autres informations), (ii) centré sur les processus (stratégies aidant à la résolution de la tâche), (iii) centré sur la régulation de soi (compétences pour s'évaluer soi-même et confiance pour s'engager dans la tâche) et (iv) dirigé vers le soi (spécifique à une personne, souvent indépendant de la performance à la tâche, e.g. « tu es un bon étudiant »). Le *feedback* peut être motivant (Shute, 2008) et permet une réduction de la charge cognitive non désirable afin de favoriser la concentration des ressources sur les éléments importants pour l'apprentissage et la réussite de la tâche, notamment quand l'apprenant est novice (Paas *et al.*, 2003). A minima, en ce qui concerne les performances directes sur des tâches complexes, un *feedback* est généralement plus efficace lorsqu'il donne un retour sur la qualité de la réponse (correcte ou incorrecte) de façon simple et immédiate. Il permet ainsi de construire des connaissances sur des bases validées sans encoder l'erreur. La confiance des individus dans leurs réponses est également importante à évaluer. En effet, les personnes qui endossent une réponse fautive avec une grande confiance sont plus susceptibles de modifier leurs réponses lorsqu'ils bénéficient d'un *feedback* (Butterfield & Metcalfe, 2001). Ce résultat est contre-intuitif puisqu'il est facile de penser que plus la confiance dans une réponse est forte, plus la changer sera difficile. On pourrait expliquer ce phénomène par le fait que les personnes seraient davantage étonnées et

embarrassées de s'être trompées sur une question pour laquelle elles pensaient avoir répondu correctement allouant ainsi plus de ressources attentionnelles pour corriger cette réponse (Metcalfé & Finn, 2012).

Finalement, apprendre est un processus complexe, long, coûteux et très peu motivant en lui-même ou alors si « facile » qu'il est fait spontanément. Les écoles ont été créées pour apprendre en un minimum de temps les connaissances qui sont très difficiles à apprendre seul ou par simples interactions sociales (*e.g.* imitation, observation). Cependant, le défi éducatif principal de nos sociétés est de maintenir la motivation des apprenants au-delà de la curiosité naturelle première pour les impliquer dans un processus d'apprentissage au long terme. Cette motivation passe par l'engagement dans une tâche et l'affect positif associé. La question est de savoir s'il est possible d'apprendre de la même façon en classe qu'à l'extérieur de la classe (Tricot & Roussel, 2016) comme le prétendent les approches constructivistes.

1.2 L'approche évolutive : une nouvelle conceptualisation des connaissances

Personne ne sait comment enseigner à parler une langue maternelle, mais on sait comment enseigner une seconde langue. Pourquoi existerait-il des connaissances difficiles à acquérir et d'autres connaissances si simples à intégrer qu'on ne saurait même pas expliquer comment le faire ? L'approche évolutive permet d'imaginer les causes et les conséquences de ces deux types de connaissances.

Un bénéfice majeur de la perspective évolutive en psychologie est qu'elle nous force à aller au-delà de ce qui paraît évident (Park & Ackerman, 2010). La psychologie évolutive s'intéresse à la phylogénèse des processus cognitifs humains où l'architecture cognitive est considérée comme massivement modulaire (composée de modules computationnels de traitement de l'information en grande partie spécifiques et cloisonnés) et, à l'instar de n'importe quel autre organe, comme le produit de la sélection naturelle (adaptationnisme) et l'expression phénotypique de l'héritage génétique humain (pré-câblage des fonctions cognitives) (Faucher, 2007). Elle s'appuie sur la théorie de l'évolution de Darwin (1859), qui, sans connaître le gène, explique que les variations héréditaires ont une influence sur les performances de reproduction des individus. Dans ce cadre, l'esprit humain a évolué afin de répondre à des problèmes adaptatifs particuliers. Certaines fonctions sont favorisées par la sélection naturelle parce qu'elles contribuent à la survie et à l'augmentation du nombre de descendants. Les gènes et l'environnement influencent donc la

diffusion d'une fonction. A cause de la lenteur des processus d'adaptation, nos comportements ne sont paradoxalement pas adaptés de façon optimale à notre environnement moderne, mais au mode de vie des chasseurs-cueilleurs ancestraux (Cosmides & Tooby, 2004). Pour expliquer les comportements humains et leur évolution, il est nécessaire de prendre en compte l'influence des gènes, de l'environnement mais aussi de la culture (Richerson & Boyd, 2005). Ces éléments devraient également être mis en avant par les différentes disciplines qui s'intéressent aux comportements humains (Brown & Richerson, 2014). Malgré ses multiples apports, la théorie de l'évolution entraîne encore des réticences (Halpern, 2008). Néanmoins, l'approche évolutive est de plus en plus utilisée et regroupe de nombreuses thématiques de recherche, allant du choix des partenaires jusqu'aux aspects moraux du raisonnement (Buss, 2005).

Les êtres humains n'ont pas évolué pour apprendre toutes les connaissances que la société leur demande. Comment apprendre en deux mois le théorème de Pythagore sur lequel auraient travaillé de nombreux individus tout au long de leur vie (*e.g.*, lors de la démonstration du théorème) ? Les êtres humains ont cependant évolué pour créer un système commun de croyances facilitant la coopération (Haidt, 2007). Une culture avec une accumulation massive de savoirs (via les livres) nécessite une transmission verticale des connaissances pour pallier la différence entre ce que les enfants apprennent facilement et ce qu'ils doivent apprendre pour être efficaces en tant qu'adultes. Les écoles et plus généralement les institutions éducatives sont les innovations culturelles qui permettent de combler cette différence et sont des interfaces entre l'évolution et la culture (Geary, 2008). L'être humain aurait en effet évolué pour apprendre très facilement certaines connaissances alors que d'autres, plus récentes au regard du temps de l'évolution, sont beaucoup plus difficiles à maîtriser. Par ailleurs, nous aurions une préférence évolutive pour le premier type de connaissances. La psychologie évolutive de l'éducation cherche à utiliser ces biais évolutifs pour comprendre et améliorer les processus d'apprentissage. Elle investigate la façon dont un biais évolutif dans l'apprentissage et dans les systèmes motivationnels influence la capacité et la motivation d'apprendre des connaissances et des compétences évolutivement nouvelles à l'école (Geary, 2008). Cette approche part du postulat que si les individus apprenaient facilement ce qu'ils sont censés apprendre, notre société n'aurait pas besoin d'école (Geary & Berch, 2015). Or, plus le contenu est récent du point de vue de l'évolution, plus il sera difficile à apprendre (Geary, 2007). Les écoles n'existent en effet pas dans les sociétés traditionnelles, mais uniquement dans les sociétés où la différence entre les connaissances naïves

que les individus apprennent sans effort et les connaissances « académiques » difficiles à apprendre, est trop importante (Geary & Berch, 2016). Le problème majeur des approches non évolutives est qu'elles ne prennent pas en compte le type de connaissances en jeu dans les apprentissages.

Ainsi, grâce à l'approche évolutive, on peut commencer à concevoir le fait qu'il existerait au moins deux types de connaissances. Le premier regroupe les connaissances naïves que nous acquérons sans effort parce que nos mécanismes cognitifs auraient évolué pour faciliter leur acquisition. Le second concerne toutes les autres connaissances dont le nombre a exponentiellement augmenté avec l'apparition des livres et le développement de la culture humaine. Ce second type de connaissances est beaucoup plus difficile et long à apprendre et nécessiterait l'intervention des écoles pour être transmis. La grammaire, les mathématiques ou la logique formelle seraient des exemples de ces connaissances secondaires.

1.3 La logique formelle au centre de tous les apprentissages mais délaissée par l'enseignement

Est-il possible d'apprendre à raisonner ? Selon Aristote, on n'apprend pas à raisonner, on apprend à appliquer les règles de logique formelle. La logique formelle, ou l'étude de la validité des inférences, peut être considérée comme une connaissance secondaire car elle est apparue récemment. Elle a besoin d'instructions pour être apprise et son apprentissage est bien loin d'être motivant intrinsèquement pour la majorité des apprenants. Alors que la logique sous forme de cours de rhétorique était encore enseignée il y a cent ans en France, les enseignements où on la discute se font de plus en plus rares. Huit ans auparavant, une unité d'enseignement appelée « logique et épistémologie » était disponible à l'Université de Toulouse et concernait la logique mathématique. Pour l'avoir suivie, j'ai pu constater que ce cours était le plus impopulaire de l'année de Licence 2 et qu'il entraînait énormément d'échecs. Depuis, il a été supprimé des maquettes d'enseignement. Aujourd'hui, les cours de logique formelle ne sont que rarement enseignés de manière générale et réservés aux cours spécialisés dans des cursus au-delà du baccalauréat. Il semble que l'on n'apprenne plus les règles de logique formelle alors que l'on apprend des choses de plus en plus complexes et ce, de plus en plus tôt dans notre vie. L'apprentissage du raisonnement paraît être un sujet mis de côté au profit de l'étude de notre façon de raisonner et de nos biais, si bien que les grands auteurs comme Johnson-Laird (2006)

n'évoquent pas la manière d'apprendre à raisonner dans leurs ouvrages sur le raisonnement. Or, la logique formelle est une partie importante et omniprésente dans l'acquisition et l'application des connaissances enseignées à l'école.

En effet, il est souvent demandé aux élèves d'appliquer des règles de façon logique qui peuvent être différentes de la logique qu'ils utilisent tous les jours (Stanovich & West, 2000). Les apprenants doivent pouvoir mettre en œuvre une règle de grammaire de façon stricte, démontrer un théorème mathématique, résoudre des équations de chimie ou de physique, appliquer un raisonnement scientifique, *etc.* Malgré l'omniprésence de la logique formelle, elle est très peu enseignée en elle-même et le contexte de son apprentissage est sous-exploité. Les problèmes logiques ne sont à priori pas engageants. Par exemple, « *si A, alors B. B. Est-ce que A ?* » est une question pour laquelle les apprenants peuvent sentir qu'ils vont se tromper, ne pas s'attribuer les capacités de réussir et donc se désengager facilement de la tâche. En effet, comme cela sera abordé plus loin, les êtres humains ont naturellement des biais de raisonnement qui mènent à faire des erreurs au regard de la logique formelle. Le raisonnement lié à la logique formelle tel qu'on l'entend dans les institutions éducatives est donc un domaine complexe à maîtriser. Plus généralement, quel que soit le domaine d'apprentissage, même quand les élèves sont motivés pour apprendre, il n'est pas rare qu'ils se démotivent en cours de route et abandonnent l'apprentissage.

Tout comme les mathématiques, en tant que règles complètement décontextualisées, les capacités liées à la logique formelle véhiculent le mythe de la règle abstraite parfaite, indépendante du contexte (Cosmides & Tooby, 2004) qui permettrait de résoudre tous les problèmes. En effet, le but de l'enseignement est de parvenir à maîtriser l'analogie qui permet de raisonner à propos d'un problème nouveau en identifiant les informations pertinentes sur la base de similarités avec un autre problème et de transférer ces connaissances à de nouveaux problèmes (Hummel & Holyoak, 2005). Par l'apprentissage, les enseignants cherchent à former des individus capables d'utiliser efficacement des règles décontextualisées pour faire face à chaque problème rencontré (Binkley *et al.*, 2012). Néanmoins, un individu capable d'utiliser des règles décontextualisées en toute situation est extrêmement rare pour ne pas dire chimérique. Pourtant, de manière générale, notre vie actuelle est de plus en plus régie par des demandes liées aux

capacités d'abstraction. Non seulement ces capacités de raisonnement analytique sont extrêmement valorisées, mais elles sont aussi réellement utiles pour les individus qui changent fréquemment d'environnement professionnel (par exemple) et doivent faire face à des contextes inconnus. Il est donc important pour les enfants de développer ces capacités analytiques ainsi que l'ensemble des métacognitions qui l'accompagne afin de ne pas se laisser porter sans le savoir par des réponses et des choix intuitifs et de ne pas se fier aveuglément à leurs connaissances antérieures (Stanovich & West, 2000).

Les règles de logique formelle élaborées il y a vingt-cinq siècles semblent donc être de parfaites candidates pour constituer un exemple de connaissances secondaires difficiles à acquérir et peu motivantes en elles-mêmes. Elles semblent occuper peu de place dans l'enseignement général alors que les capacités de raisonnement liées à la logique formelle sont fortement valorisées et communes à de nombreux domaines (Binkley *et al.*, 2012 ; Chinn & Duncan, 2017 ; Engelmann, Neuhaus & Fischer, 2016 ; Fischer, Hetmanek, Engelmann & Opitz, 2017). Alors, comment faciliter l'apprentissage du raisonnement logique, non seulement en termes de performance, mais aussi en termes d'engagement émotionnel et cognitif ? Qu'est-ce que l'approche évolutive peut apporter comme nouvel éclairage sur cette question ?

1.4 Vue générale

L'objectif principal de ce travail de thèse est avant tout de mettre à l'épreuve l'approche évolutive des connaissances en explorant les caractéristiques des deux types de connaissances qui semblent entrer en jeu dans l'Histoire humaine : les connaissances naïves ou primaires pour lesquelles nos mécanismes cognitifs auraient évolué (acquisition intuitive et rapide) et les connaissances secondaires pour lesquelles nous n'aurions pas eu le temps d'évoluer (acquisition coûteuse et longue). Notamment, les recherches de ce présent travail tentent d'évaluer le potentiel motivationnel des deux types de connaissances. Elles investiguent si les connaissances primaires ont un effet positif sur l'engagement émotionnel et cognitif mais également sur la performance à des problèmes logiques. Un second objectif découle de ce travail d'exploration et vise à mettre à l'épreuve les résultats obtenus lors de tâches d'apprentissage. Le corollaire de ce second objectif consiste ensuite à proposer des bases méthodologiques (liées à la façon de présenter des contenus pédagogiques) peu coûteuses à mettre en place mais pourtant efficaces pour favoriser l'engagement et l'apprentissage des individus.

Dans une première partie, la thématique de la logique formelle est présentée. Elle constitue le socle de connaissances secondaires que les participants devront traiter ou acquérir dans la partie empirique. D'abord, les bases des problèmes logiques sont abordées avec les syllogismes afin de discuter des biais de raisonnement qu'ils peuvent entraîner notamment à travers le rôle conflictuel des connaissances antérieures (positif dans les contextes déontiques, négatif avec le biais de croyance), pour finir par une explication de ces biais grâce à l'approche du modèle à double système ou à double traitement (*dual-system* ou *dual-process*).

Dans une seconde partie, l'approche évolutive est décrite afin de bien comprendre les concepts de connaissances primaires et secondaires, centraux dans ce travail. D'abord, les caractéristiques évolutives humaines sont abordées pour en venir à la conception de l'individu selon Geary (2008) et à la théorisation des connaissances primaires et secondaires. Ensuite, les changements qu'a permis l'approche de la psychologie évolutive de l'éducation, notamment dans la théorie de la charge cognitive, sont discutés. Enfin, plusieurs preuves empiriques de la façon dont on peut favoriser l'apprentissage de connaissances secondaires grâce aux connaissances primaires sont apportées.

La partie empirique comporte deux parties. La première regroupe huit études exploratoires concernant l'influence positive des connaissances primaires en termes de performance et d'engagement comparativement aux connaissances secondaires. Cette première série d'études a naturellement mené à la seconde (trois études) où les résultats ont été mis à l'épreuve de tâches d'apprentissage plus réalistes en incluant pour les participants la possibilité de poursuivre ou d'arrêter les exercices et le *feedback*.

Enfin, dans une dernière partie, une synthèse des résultats est proposée afin de discuter des implications possibles au regard des théories actuelles. Les limites de ce travail exploratoire et quelques pistes de nouvelles expériences sont également évoquées.

2 Le raisonnement humain et la logique

Dans cette première partie, un aperçu des syllogismes est présenté avant de discuter des biais impliquant les connaissances antérieures pour enfin proposer une explication de ces « erreurs » communes.

Le raisonnement est l'application de schémas d'inférence afin de générer ou d'évaluer une conclusion (Bonneton, 2011). Son étude a d'abord été influencée par la logique formelle supposée être la base de la pensée humaine jusque dans les années 1960 (logicisme). La rationalité est alors synonyme de logique formelle. Les problèmes logiques sont nombreux mais l'utilisation du syllogisme et des règles conditionnelles est fréquente lorsqu'on cherche à étudier le raisonnement. La force principale d'un syllogisme est qu'un argument réputé valide garantit la véracité de la conclusion lorsque les prémisses sont vraies (Evans, 2005). Cependant, un argument valide peut présenter une conclusion valide lorsque les prémisses sont fausses, ce qui constitue un non-sens pour les personnes qui jugeraient la « véracité » ou la « vraisemblance » de la conclusion plutôt que sa validité sur le plan de la logique formelle. La distinction entre le raisonnement économique (optimal) et écologique (efficace) est alors importante à évoquer puisqu'elle a entraîné un récent changement de paradigme dans les recherches sur la rationalité ou l'irrationalité humaine.

2.1 Les syllogismes et les règles conditionnelles

Un syllogisme consiste à élaborer une conclusion à partir de deux propositions initiales (prémisses) concernant la propriété d'entités :

Tout A est B,

Or C est A,

Donc C est B.

Pour chaque proposition, quatre modes sont possibles. Ils donnent un aspect quantitatif (universel ou particulier) et qualitatif (affirmatif ou négatif) : « *tout A est B* » (universel positif, noté A), « *quelques A sont B* » (particulier positif, noté I), « *aucun A n'est B* » (universel négatif, noté E) et « *quelques A ne sont pas B* » (particulier négatif, noté O), soit 64 combinaisons de modes. En fonction de l'enchaînement des termes (*ABC*) dans le syllogisme, quatre figures (*i.e.*, forme,

enchaînement des termes dans le syllogisme) sont possibles ce qui donne un total minimal de 256 sortes de syllogismes (Evans, 2005 ; Khemlani & Johnson-Laird, 2012). Par exemple, la figure 1 correspond à un enchaînement de type « AB, CA », la figure 2 à un enchaînement de type « AB, CB » et la figure 3 à un enchaînement de type « AB, AC ». Un syllogisme est considéré comme une inférence valide lorsque la conclusion est vraie à chaque fois que les prémisses sont vraies (Jeffrey, 1981). Les négations tout comme les figures 2 et 3 sont considérées comme plus difficile (Dickstein, 1978). Les syllogismes procèdent d'une logique monotone alors que dans le monde réel, toute règle peut avoir une exception.

Tous les arguments logiques peuvent être représentés sous la forme de syllogisme et les règles de scholastique décrivent comment juger de la validité d'un syllogisme (Cohen & Nagel, 1934). Par exemple, le *Modus Ponens* pourrait se représenter comme « *Si A alors B. Or A. Donc B.* ». En tant que syllogisme particulier, les phrases conditionnelles sont omniprésentes dans les langages quotidiens et scientifiques. « *Si* » est utilisé pour provoquer la simulation de possibilités, la génération d'hypothèses sur l'avenir et favoriser la pensée déductive (Evans, Handley, Neilens & Over, 2007). Les conditionnelles sont donc nécessaires si on cherche à imaginer des conséquences ou des actions alternatives pour soutenir nos prises de décision. Les problèmes conditionnels de type « *si A, alors B* » impliquent quatre types d'inférences : *Modus Ponens (MP)* « *A. Est-ce que B ?* », *Modus Tollens (MT)* « *Non B. Est-ce que A ?* », Affirmation du Conséquent (AC) « *B. Est-ce que A ?* » et Déni de l'Antécédent (DA) « *Non A. Est-ce que B ?* ». Suivant les normes logiques, MP et MT sont des inférences valides où MP est vraie et MT fausse alors que AC et DA sont des inférences invalides où la réponse ne peut pas être donnée de façon certaine. Les inférences conditionnelles sont basées sur la compréhension et sont plus rapides que les raisonnements syllogistiques (Evans, Handley & Bacon, 2009). Presque tous les individus résolvent MP, la majorité résout MT, mais peu réussissent AC et DA (faible résistance aux inférences invalides, implication interprétée comme bidirectionnelle, difficulté à répondre « on ne peut rien conclure ») (De Neys, Schaeken & d'Ydewalle, 2005 ; Evans *et al.*, 2007 ; Newstead, Handley, Harley, Wright & Farrelly, 2004). L'influence des capacités cognitives et des deux systèmes dans ces quatre inférences est beaucoup moins précise que dans les syllogismes avec biais de croyance qui seront abordés plus loin (De Neys *et al.*, 2005).

Le paradigme standard pour étudier les syllogismes implique d'informer les participants de la nécessité de considérer les prémisses comme vraies et du fait que la conclusion ne doit être acceptée que si elle découle logiquement des prémisses (Evans, 2005). La plupart des études propose aux participants d'évaluer la validité de la conclusion du syllogisme (sur le modèle initial d'Evans, Barston & Pollard, 1983) mais le paradigme d'étude des syllogismes permet aussi de demander directement à générer une conclusion (Robert, Newstead & Griggs, 2001), de faire remplir un texte à trous (Politzer, 2007) ou de forcer le choix entre deux syllogismes (Trippas, Verde & Handley, 2014) pour ne citer que ces possibilités. Plusieurs théories tentent actuellement d'expliquer comment le système cognitif humain traite les syllogismes (Khemlani & Johnson-Laird, 2012).

2.1.1 La théorie des modèles mentaux

Si les syllogismes ont été formalisés par Aristote, cela fait à peine cent ans que les psychologues en ont fait une théorie et les ont utilisés pour investiguer les mécanismes cognitifs et les biais associés. Plusieurs approches tentent de les expliquer comme les théories heuristiques (*e.g.*, basées sur l'atmosphère des prémisses et les termes présentés, Wetherick & Gilhooly, 1995 ; explication des biais via un défaut de conversion lorsque la prémisse « tous les A sont B » est entendue comme une double implication par exemple, Revlis, 1975), celles basées sur les règles formelles d'inférence (Rips, 1994) ou celles basées sur la théorie des ensemble (*e.g.* diagramme d'Euler et modèles mentaux, Bucciarelli & Johnson-Laird, 1999).

Selon la théorie des modèles mentaux (Johnson-Laird, 1983, 2005, 2006), les êtres humains raisonnent en construisant un modèle de la situation représentant les relations explicites et implicites des termes en jeu (pragmatique). Ils se représentent un problème comme une liste de modèles des prémisses qu'ils combinent pour obtenir un modèle du problème entier permettant d'inférer la conclusion. C'est l'examen de ce modèle mental et non celui des prémisses qui révèle la validité d'un syllogisme. Selon Johnson-Laird (1983, 2005, 2006), les modèles mentaux sont régis par des principes d'iconicité (un modèle mental possède une structure correspondant à la structure de ce qu'il représente), de possibilité (chaque modèle mental représente une possibilité), de vérité (un modèle mental représente une possibilité vraie) et de variation stratégique (stratégies de manipulation et d'exploration des modèles mentaux : trouver les éléments nécessaires, des contre-exemples, *etc.*). La sélection naturelle aurait également doté les êtres humains d'un

module d'inférences basées sur les fréquences naturelles. Les êtres humains peuvent donc faire une inférence correcte sans utiliser consciemment des règles de logique formelle. La déduction dépend du contenu du problème, de son interprétation, la recherche de contre-exemples se faisant davantage aléatoirement que par inspection systématique. Une inférence est valide si sa conclusion est valable dans tous les modèles des prémisses. Ainsi, la nature logique entre deux prémisses importe moins que leur association observée ou non dans le monde réel. Le raisonnement serait donc une affaire d'organisation des connaissances en mémoire afin que les informations pertinentes soient facilement accessibles en cas de situation problématique.

La théorie des modèles mentaux postule trois étapes de résolution d'un syllogisme : (i) une étape de compréhension basée sur l'interprétation des éléments du problème (influence des expériences et des connaissances antérieures) entraînant la construction d'une série de modèles mentaux concernant ces éléments. Puis, (ii) une étape de description dans laquelle l'individu essaye de tirer une conclusion et (iii) une étape de validation de cette conclusion par recherche de modèles alternatifs ou de contre-exemples (retour à l'étape (ii) s'il trouve des contre-exemples). Les individus se représentent mentalement le plus d'informations implicites possibles. La performance à résoudre le problème réside dans la manipulation des modèles mentaux pour amener à des contre-exemples. La performance sera donc plus importante si la charge est faible, les capacités en mémoire de travail importantes et les modèles mentaux moins nombreux.

Les syllogismes sont considérés comme difficiles parce qu'ils nécessitent de générer des modèles mentaux des prémisses et des tests de concordance de ces modèles avec la conclusion (Morsanyi & Handley, 2012). Les individus semblent faire des erreurs lorsque les capacités cognitives en mémoire de travail ne sont pas suffisantes (De Neys *et al.*, 2005) et considérer une conclusion comme valide s'ils n'ont pas réussi à générer de contre-exemple (Stanovich & West, 2000). Dans les problèmes conditionnels, les contre-exemples peuvent être des causes alternatives (cause possible pouvant produire l'effet mentionné) ou des conditions invalidantes (élément qui empêche l'effet même si la cause est présente) (De Neys *et al.*, 2005). Par exemple, « *si je mange trop de chocolat, j'aurai mal au ventre* » peut mener à une cause alternative « *j'ai l'appendicite* » ou à une condition invalidante « *je n'ai rien mangé d'autre de la journée* », potentiellement source d'erreur. Les erreurs sur les inférences conditionnelles peuvent également venir de modèles mentaux incomplets ou de présupposition de vérité concernant le premier terme

(Evans *et al.*, 2007). Les réponses biaisées peuvent être influencées par plusieurs caractéristiques individuelles.

2.1.2 Les différences individuelles dans la résolution de syllogismes

De nombreux éléments sont connus pour influencer les performances de résolution des syllogismes. Les stratégies utilisées par chacun en fonction du type de problème présenté peuvent être différentes (diagramme d'Euler, interprétation des prémisses et recherche de modèles alternatifs, Bucciarelli & Johnson-Laird, 1999 ; Van der Henst, Yang & Johnson-Laird, 2002). Mais la littérature met surtout en avant une influence positive de l'intelligence et particulièrement des capacités en mémoire de travail sur les performances de logique formelle (Evans, 2003 ; Evans, Handley, Neilens & Over, 2010 ; Stanovich, 1999 ; l'implication de l' « intelligence » dans les compétences logiques serait cependant à nuancer puisqu'elle est souvent mesurée, en partie, par des raisonnements de logique formelle). Le raisonnement lié à la logique formelle pourrait également être influencé par les connaissances antérieures et l'accessibilité de ces connaissances (Markovits & Barrouillet, 2002). Les études montrent que les capacités cognitives influencent positivement les performances de logique formelle notamment face à des tâches abstraites en permettant la génération de représentations mentales alternatives (Newstead *et al.*, 2004). Les individus avec des capacités plus importantes seraient capables d'aller au-delà du contexte de l'information et de penser en termes de structures abstraites. Par ailleurs, l'habileté acquise à raisonner logiquement est spécifique (Bonneton, 2011). Ainsi, une personne capable de raisonner logiquement dans son domaine de prédilection scientifique peut en être incapable dans sa vie personnelle ou dans n'importe quel domaine qui n'est pas le sien (Tricot & Sweller, 2014, 2016).

D'un point de vue développemental, le raisonnement syllogistique serait possible dès que les enfants (vers 5 ans) comprennent les quantifieurs. Il ne différerait alors pas du raisonnement adulte (Khemlani & Johnson-Laird, 2012 ; Tardif, Gelman, Fu & Zhu, 2012). Il est intéressant de noter que les jeunes enfants seraient plus « logiques » que les plus âgés. La raison avancée est que les plus jeunes n'auraient pas acquis les capacités d'interprétation pragmatiques gricéennes de la logique des connecteurs (le langage est utilisé de manière efficace pour communiquer le plus d'informations possible avec un minimum de mots ; Grice, 1989) (Noveck, 2001) ou auraient moins de connaissances concernant le thème impliqué dans les problèmes (Morsanyi &

Handley, 2008). Les réponses heuristiques augmenteraient ainsi avec l'accumulation de connaissances, l'âge et la capacité en mémoire de travail (Morsanyi & Handley, 2008). D'autres études montrent que les adolescents à partir de 12 ans semblent détecter la nature biaisée de leurs jugements (De Neys & Feremans, 2013) et donner plus de réponses normatives (correspondant aux réponses attendues selon la logique formelle) avec l'âge (Klaczynski, 2001).

Le niveau en mathématiques pourrait également jouer un rôle dans le raisonnement logique. Les enfants de 10 ans doués en mathématiques montreraient en effet de meilleures performances concernant les problèmes logiques concrets (Morsanyi, Devine, Nobes & Szűcs, 2013). Ce résultat serait un argument en faveur d'un lien entre le développement des habiletés mathématiques (spécifiques) et le développement des capacités logiques (générales). Les mathématiques demandent en effet de pouvoir faire des inférences logiques sur la base de prémisses afin de déterminer ce qui peut être considéré comme vrai en évitant de se baser sur les croyances que l'on a du problème. Ainsi, les enfants qui ont un niveau en mathématiques plus faible raisonnent plus facilement sur la base de leurs croyances alors que ceux ayant un niveau plus élevé essaient de juger de la validité des conclusions. Tous les enfants quel que soit leur niveau en mathématiques n'ont cependant pas de bonnes performances aux problèmes abstraits dénotant d'une difficulté d'abstraction trop importante encore à cet âge (acquisition tardive).

En effet, les problèmes abstraits seraient les plus difficiles et demanderaient un développement conséquent de l'imagination. Les enfants commenceraient à raisonner sur des problèmes familiers (rappel implicite des connaissances), puis, lorsqu'ils sont suffisamment entraînés, encoderaient les problèmes de manière de plus en plus réduite pour finir par les abstraire. Ainsi, suivant le cours du développement, les étapes proposées par la littérature sont (i) raisonner à partir d'éléments connus (6-7 ans), (ii) raisonner à partir de prémisses fausses (9-11 ans) et (iii) raisonner de façon abstraite (16 ans) (Markovits & Lortie-Forgues, 2011). Les problèmes abstraits et concrets seraient traités de la même façon une fois la compréhension des problèmes abstraits acquise (Venet & Markovits, 2001). Les enfants pourraient raisonner consciemment de façon formelle à 10-12 ans et leurs compétences seraient influencées par les capacités en mémoire de travail et d'inhibition (Handley, Capon, Beveridge, Dennis & Evans, 2004).

Finalement, les différences individuelles principales qui influencent la résolution des syllogismes sont les capacités cognitives et l'accessibilité des connaissances antérieures. Ces différences impacteraient l'apparition de biais dans le raisonnement.

2.2 Les « biais » de raisonnement et la question de la rationalité humaine

Les biais sont des déviations systématiques et prévisibles des normes de logique formelle (Evans, 2005). Depuis 1960, une multitude d'études a démontré l'existence de biais dans la pensée humaine (Bonnefon, 2011). En effet, les humains ont tendance à baser leurs jugements sur des impressions rapides et intuitives (heuristiques) qui sont le plus souvent utiles et efficaces. Mais cette façon de penser mène également à des réponses allant à l'encontre des normes formelles. Le fait que les personnes avec le plus de capacités cognitives donnent la réponse normative a encouragé la croyance que les êtres humains sont idéalement faits pour penser normativement, en accord avec les règles de logique formelle. Le terme « *biais* » sous-tend que ces mécanismes n'amènent pas à formuler la réponse normative « correcte ». Cependant, ces biais ne renseignent en aucune façon sur le caractère irrationnel de la pensée humaine (Cohen, 1981). Les êtres humains dévient de la performance prédite par les modèles normatifs (raisonnement rationnel), mais ne sont pas irrationnels pour autant. La norme qu'on attendrait d'eux ne serait simplement pas la plus adaptée (Evans, Newstead & Byrne, 1993 ; Morsanyi & Handley, 2012) : en effet, les individus ne sont pas faits pour réfléchir sur des problèmes abstraits si éloignés de la vie quotidienne. Ils interprètent les tâches présentées et, de fait, n'appliquent pas forcément la norme attendue, faisant de la réponse biaisée la réponse la plus fréquente (Stanovich & West, 2000).

Avant les années 1990, l'individu est perçu comme une machine à calculer sans aucun but ou désir qui œuvre sur des termes décontextualisés (Bonnefon, 2011). Cependant, habituellement, on ne raisonne pas seulement pour le plaisir de raisonner. Chaque individu est unique, mu par des buts et des désirs et doit traiter des informations imparfaites, incomplètes, vagues ou même contradictoires, auxquelles il peut plus ou moins accorder de crédit, le tout par le biais du langage et de sa pragmatique. Les biais de raisonnement observés viennent du fait que les conditions réelles ne sont absolument pas les mêmes que dans l'approche de la logique formelle. L'être

humain qui paraissait irrationnel il y a quarante ans devient tout à fait rationnel au vu de ces biais qui lui permettent de s'adapter efficacement à son environnement (Bonnefon, 2011). Ainsi, au lieu d'utiliser des processus analytiques, les individus se basent essentiellement sur des heuristiques parce qu'elles seraient plus adéquates et pas seulement parce qu'elles seraient moins coûteuses et plus rapides (« *homo heuristicus* », Gigerenzer & Brighton, 2009). L'hypothèse « tous les individus possèdent les mêmes processus donc tous doivent donner la même réponse logique » des anciens modèles est donc remise en cause : nous aurions tous les mêmes processus mais pas tous les mêmes buts ou interprétations des problèmes.

Les biais sont nombreux dans le raisonnement syllogistique. Concernant le problème en lui-même, on peut citer le biais de conclusion négative (lorsqu'une prémisse est négative et la conclusion positive, les performances chutent ; Schroyens, Schaeken & d'Ydewalle, 2001), le biais d'atmosphère (tendance à accepter certains quantifieurs dans la conclusion en fonction des quantifieurs dans les prémisses, Wetherick & Gilhooly, 1995) ou une tendance à accepter la majorité des conclusions sans égard pour leur validité (Shynkaruk & Thompson, 2006). La pragmatique du langage entraîne un autre biais bien connu. En effet, on est influencé par l'information mais également par le fait qu'elle nous soit communiquée dans un but spécifique. Lorsque quelqu'un dit quelque chose, il cherche à être efficace et à donner le maximum d'informations en peu de temps (Grice, 1989). Par exemple, la politesse change la signification du message (Bonnefon, Feeney & De Neys, 2011), le connecteur « et » peut être perçu comme un rapport temporel ou causal (Hertwig, Benz & Krauss, 2008), le quantifieur « quelques » mène à l'interprétation que « tout » est exclu (Schmidt & Thompson, 2008) et la négation d'une prémisse entraîne les individus à se demander pourquoi ils devraient penser que c'est faux et à chercher un contre-exemple (*Modus Schmollens*, Bonnefon & Villejoubert, 2007). Par ailleurs, les individus raisonnent sur les préférences des acteurs du problème logique et pas sur un contexte complètement désintéressé. Ils peuvent donc être influencés par la croyance qu'ils ont de la connaissance qu'ont les agents à propos de leurs actions et de l'importance que ces conséquences ont pour eux tout en considérant que les agents vont agir dans leur intérêt (Bonnefon, Girotto & Legrenzi, 2012). Les individus ont également de moins bonnes performances quand des affects négatifs sont en jeu (Eliades, Mansell, Stewart & Blanchette, 2012 ; Trémolière, Gagnon & Blanchette, 2017) et lorsque les émotions ne sont pas liées aux contenus sémantiques des problèmes (Blanchette, Gavigan & Johnston, 2014). En effet, comme on le verra plus loin,

raisonner de manière réfléchie requiert des ressources en mémoire de travail. Ainsi, tout contexte qui augmente la charge en mémoire de travail nuit potentiellement aux capacités des individus à mettre en place un raisonnement conscient. Enfin, les biais de contenu et de contexte des syllogismes sont bien connus et sont dus à la familiarité des connaissances en jeu. Cette familiarité peut favoriser la performance (tâches déontiques et raisonnement intéressé) ou au contraire créer des biais (biais de croyance) (Evans, 2005).

2.2.1 La différence entre concret et abstrait

Les connaissances antérieures entrent d'abord en jeu lorsqu'on utilise des habillages de problèmes logiques concrets (connaissances antérieures présentes) ou abstraits (aucune connaissance antérieure). Une tâche de raisonnement est abstraite lorsque les termes sont artificiels et non familiers (Evans, 2002). On considère un habillage comme abstrait lorsqu'on utilise des chiffres ou des lettres (Dominowki, 1995 ; Evans *et al.*, 2007 ; Newstead *et al.*, 2004), des mots inconnus, sans sens particulier, faisant en sorte que la conclusion ne soit ni croyable, ni incroyable (Handley, Newstead & Trippas, 2011 ; Morsanyi & Handley, 2012) ou lorsque les individus n'ont pas de connaissances antérieures à propos de la relation exprimée (De Neys *et al.*, 2005). Travailler sur un problème abstrait demande des capacités de décontextualisation coûteuses en ressources cognitives.

2.2.1.1 Les connaissances antérieures

Dans les années 1970, les chercheurs pensent que l'effet facilitateur des thèmes concrets, réalistes ou familiers est lié au fait que ces versions permettent l'activation plus aisée de contre-exemples, la mémoire jouant un rôle déterminant dans l'effet du contenu (Valiña & Martín, 2016). L'avantage des problèmes réalistes est leur sensation de familiarité qui permet de lever des ambiguïtés liées à la compréhension des prémisses (par exemple « *tous les A sont B* » peut être aisément interprété comme « *tous les B sont aussi A* » alors qu'avec des termes familiers, la levée de l'ambiguïté est plus aisée) (Van Duyne, 1974). Les connaissances antérieures influencent la plausibilité d'une conditionnelle au travers des modulations sémantiques et pragmatiques des représentations mentales concernant les possibilités alternatives (Byrne, 2016). L'implication des connaissances antérieures peut augmenter la performance de logique formelle en engageant des

ressources en mémoire de travail (processus plus lent) (Verschueren, Schaeken & d'Ydewalle, 2005) mais aussi la diminuer via un processus automatique et rapide (biais) (De Neys, 2006).

Rechercher des contre-exemples en se basant sur les connaissances du thème concret peut en effet mener à des biais (De Neys *et al.*, 2005). Par exemple, même s'il est facile à résoudre, il est toujours possible de trouver une condition invalidante pour rejeter un *Modus Ponens*. Ce processus de recherche de contre-exemples est coûteux en ressources cognitives : face à des inférences conditionnelles, les individus doivent construire et maintenir une représentation mentale des prémisses en mémoire de travail puis activer automatiquement des contre-exemples associés en mémoire à long terme plus ou moins rapidement en fonction de leur saillance (De Neys *et al.*, 2003) ou mettre en place une stratégie de recherche active de contre-exemples (Morsanyi & Handley, 2008). Les ressources en mémoire de travail sont utilisées pour générer ou se souvenir d'un contre-exemple et pour inhiber l'activation de ce contre-exemple lorsqu'il entre en conflit avec la validité logique de l'argument (De Neys *et al.*, 2005). Le raisonnement conditionnel quotidien (contenu familier) est un jeu extrêmement coûteux entre le développement du rappel de contre-exemples et le processus d'inhibition des contre-exemples inappropriés. Les adolescents dont les neurones frontaux sont en cours de myélinisation montrent effectivement des difficultés à inhiber les contre-exemples inadéquats (De Neys & Everaerts, 2008). Finalement, les problèmes concrets familiers ne sont pas si faciles qu'on le pense intuitivement et les individus avec des capacités cognitives importantes seraient plus performants en termes de recherche de contre-exemples même face à ce type de contenu concret (Verschueren *et al.*, 2005). De plus, si les ressources en mémoire de travail sont insuffisantes pour la recherche de contre-exemples, les individus optent pour une stratégie heuristique moins coûteuse comme l'évaluation de la probabilité des prémisses.

Mais l'influence des connaissances antérieures ne s'arrête pas à la génération de contre-exemples. Son impact principal dans le raisonnement syllogistique concerne une catégorie très particulière de problèmes concrets qui a été explorée via la tâche de Wason.

2.2.1.2 Les tâches déontiques

La tâche de sélection de Wason (1966) est un outil d'étude du raisonnement concernant des règles conditionnelles et a été fréquemment utilisée pour tester les différences entre les contenus

abstraites et concrètes (Evans, 2002). Elle est également l'expérience princeps qui a permis de s'interroger sur la théorie *dual-process* (Evans, 2016) qui sera abordée dans la partie 2.3. Les consignes de la tâche de sélection donnent une règle conditionnelle de type « *si P alors Q* » et montrent au participant quatre cartes dont les informations se rapportent à la règle. Chaque carte représente un item qui peut satisfaire ou non la règle : un côté de la carte montre si l'item a la propriété *P* et l'autre côté montre si l'item a la propriété *Q*. Le participant peut voir un seul côté de carte à la fois et les côtés montrés initialement montrent les valeurs *P*, *non-P*, *Q* et *non-Q*. Le participant doit ensuite choisir quelles cartes retourner pour confirmer la règle. La solution est de retourner les cartes *P* et *non-Q*. Cependant, très peu d'individus (moins de 10%) arrivent à cette conclusion et retournent la carte *P* seulement, ou ajoutent la carte *Q* (Fiddick, Cosmides & Tooby, 2000).

Cette tâche initiale, abstraite, est très difficile à résoudre et demande de se représenter ce qui est faux (Johnson-Laird, 2013). Cependant, lorsqu'un contexte plus réaliste lui est apposé, la majorité des individus arrivent à la résoudre (effet facilitateur). Dans leur tâche du débit de boisson (Griggs & Cox, 1982), les participants s'imaginent être à la place d'un policier qui observe des personnes dans un bar et doivent contrôler certaines choses pour s'assurer que la règle « *si une personne boit une bière, alors cette personne doit avoir plus de 19 ans* ». Quatre cartes leur sont présentées. D'un côté de la carte se trouve un buveur et de l'autre côté sa boisson. Les cartes sont montrées comme suit : *Boit une bière – Boit un soda – 21 ans – 16 ans*. Bien que la tâche soit similaire à celle de Wason, 75% des participants la réussissent.

À l'origine, les chercheurs pensent que cet effet facilitateur est lié au caractère concret des éléments présentés. Cependant, le problème de débit de boisson n'est pas seulement un problème plus réaliste. Il implique également une règle sociale et un contexte rendant la recherche des hors-la-loi saillante. En réalité, c'est l'aspect déontique (implication de règles même implicites) qui favorise la performance et pas simplement l'aspect indicatif des problèmes (proposition concrète sur le monde qui peut être vraie ou fausse). Il ne s'agit donc pas de changer simplement le contexte d'abstrait en concret, mais bien d'ajouter une nouvelle dimension. Une règle déontique ne peut pas être vraie ou fausse, elle peut être en vigueur/obéie ou non (Evans, 2005). La stratégie de vérification utilisée dans les contenus descriptifs devient une stratégie de détection des violations potentielles de la règle (Valiña & Martín, 2016). Dans un contexte déontique, la

sélection des cartes à retourner se fait en fonction des buts des participants (Manktelow & Over, 1991). En effet, le raisonnement des individus se base sur la représentation des utilités associées par rapport aux acteurs du problème (celui qui fait la loi et la fait respecter vs. celui qui peut suivre cette loi ou la violer par son comportement). La règle « *si vous dépensez plus de 100 euros, alors vous pourrez avoir un bon d'achat* » ne sera pas vérifiée de la même façon par un client que par un employé du magasin (Bonnefon, 2011). Le raisonnement devient utile et ne se réduit pas au plaisir de raisonner. L'effet déontique peut être fort (prohibition) ou faible (permission) (Beller, 2010). Ainsi, les croyances, les désirs et les intentions des individus en jeu, inférés par les raisonneurs joueraient un rôle fondamental dans la performance de logique formelle. Par exemple, les règles conditionnelles créent une attente sur la vérité ou non des antécédents basée sur la désirabilité des conséquences. La capacité de raisonner logiquement viendrait alors de la compatibilité entre la validité de l'argument et la désirabilité du conséquent (Haigh & Bonnefon, 2015).

L'influence du raisonnement déontique s'observe principalement lorsque les individus doivent détecter un tricheur qui cherche à profiter de la violation de la loi au détriment des autres (Cosmides, Barrett & Tooby, 2010). Si on enlève cette dimension de recherche de tricheur (le fait de jouer un policier), les performances retombent à celle de la tâche neutre initiale (Pollard & Evans, 1987). Le fait de justifier la règle peut améliorer la performance de logique formelle (Dominowki, 1995). Les règles dictant les obligations et les permissions sont très bien comprises par les individus et n'ont pas besoin d'exister réellement ou d'être concrètes (Cosmides & Tooby, 2004 ; Dominowki, 1995 ; Gigerenzer & Hug, 1992). Lorsque le but est de repérer des tricheurs éventuels, la familiarité de la règle n'a aucune influence sur les performances, si bien que l'effet répliquable des habillages concrets se résume à la présence d'un contrat social (Cosmides & Tooby, 1992). Les choix déontiques seraient en effet déterminés par des algorithmes darwiniens concernant les contrats sociaux, menant par exemple à la détection des tricheurs et à leur éviction (Fiddick *et al.*, 2000). Les raisonnements sont rarement désintéressés dans la vie de tous les jours, ils servent tous un but autre que celui d'arriver à une conclusion valide. Le but du module est alors de réduire les risques lors de situations hasardeuses liées aux échanges sociaux. On devrait donc montrer de meilleures performances dans les tâches habillées d'échanges sociaux que dans la tâche de logique pure de Wason. Seulement 5 à 30% des individus donnent la réponse correcte face à des règles descriptives, même si ces règles impliquent des termes de la vie de tous les jours

alors qu'ils sont bien plus performants lorsqu'il s'agit d'échanges sociaux (Cosmides & Tooby, 2004). Une autre approche explicative similaire stipule que les individus posséderaient des schémas pragmatiques concernant l'évaluation de la compliance ou de la violation face à une loi (Holyoak & Cheng, 1995). De son côté, la théorie des modèles mentaux initiale ne parvient pas à rendre compte des différences de performances de logique formelle entre les problèmes descriptifs et déontiques. Un ajout de son auteur stipule que les mécanismes sémantiques et pragmatiques seraient modulés en fonction du type de contenu et amèneraient à la construction de modèles alternatifs (Johnson-Laird, 2013). Les enfants de 3-4 ans présentent également cette capacité de raisonnement déontique à détecter les tricheurs (Cummins, 1996). Le système déontique serait acquis à 2-3 ans même si la compréhension des règles morales n'est entière que des années après (Beller, 2010).

En suivant l'approche évolutive, on pourrait s'attendre à ce que des règles à propos de nourriture, de ce qu'il est possible ou non de manger, entraînent également de meilleures performances. La littérature ne rend néanmoins pas compte d'un effet facilitateur des thèmes concrets par rapport aux thèmes abstraits (Manktelow & Evans, 1979 ; Yachanin & Tweney, 1982) ou faiblement (Dominowski, 1995). Cependant, le type de règle « *si vous mangez de la viande, alors vous devez manger un légume* » ou « *si vous mangez des pâtes, alors vous ne buvez pas de champagne* » choisi dans ces recherches est assez éloigné des considérations évolutives.

Les contenus réalistes notamment déontiques entraînent de meilleures performances de logique formelle mais s'exposent également davantage aux biais de croyance.

2.2.2 Les biais de croyance

Le biais de croyance est la tendance intuitive à juger de la validité d'un syllogisme en évaluant le caractère croyable de sa conclusion (Oakhill, Johnson-Laird & Garnham, 1989). Par exemple :

Tous les gâteaux se mangent, (1)

Or les marbrés au chocolat se mangent,

Donc les marbrés au chocolat sont des gâteaux.

Tous les mammifères peuvent marcher, (2)
Or les chats sont des mammifères,
Donc les chats peuvent marcher.

Les problèmes considérés comme conflictuels sont des énoncés dont le statut logique de la conclusion entre en conflit avec les croyances/connaissances antérieures, par exemple lorsque la conclusion est croyable mais invalide logiquement (1) ou incroyable et valide. La première réponse que nous sommes tentés d'endosser est erronée et remettre cette réponse en question pour en élaborer une nouvelle demande des efforts. Les problèmes non conflictuels sont ceux pour lesquels la validité de la conclusion est consistante avec son aspect croyable ou non (2). La première réponse étant correcte, il n'y a pas besoin d'investir plus d'effort dans la réflexion. Les individus sont donc bien plus performants pour les problèmes non conflictuels que conflictuels et ne diffèrent pas entre eux selon leurs capacités cognitives lorsqu'il s'agit de problèmes non conflictuels (De Neys, 2006). Cependant, face à des problèmes conflictuels, les individus devraient mettre en œuvre des ressources cognitives et des habiletés particulières pour répondre correctement, notamment via la génération de contre-exemples (Newstead *et al.*, 2004).

Dans le cadre d'un biais de croyance, les individus sont influencés par leurs croyances alors que les consignes leur stipulent de raisonner « logiquement ». De manière générale, quand des problèmes logiques impliquent des connaissances antérieures, les individus ont tendance à penser qu'on leur demande d'évaluer la solidité des arguments et pas leur validité (Thompson, 2001). Les résultats montrent (i) un effet principal du caractère logique pour lequel les conclusions valides sont plus souvent acceptées que les conclusions invalides, (ii) un effet principal du caractère croyable pour lequel les conclusions croyables sont plus souvent acceptées et (iii) une interaction où le biais de croyance est plus marqué pour les syllogismes invalides (Evans, 2003, 2005, 2007) (Figure 1). Ce pattern illustre le passage entre un raisonnement basé sur les croyances et les connaissances antérieures à un raisonnement plus analytique.

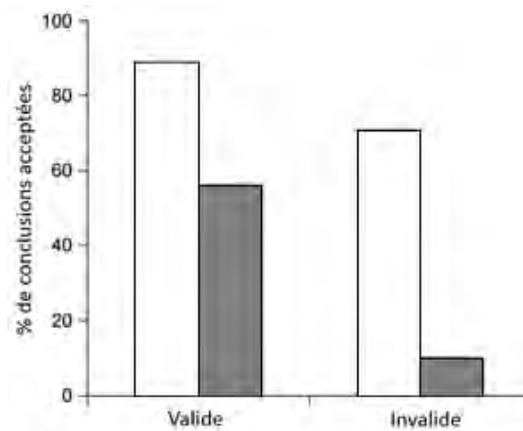


Figure 1 : Biais de croyance dans le raisonnement syllogistique. L'axe des y représente le pourcentage de conclusions acceptées en fonction de la validité du syllogisme (axe des x) et du caractère croyable de sa conclusion (blanc=croyable ; gris=incroyable) (traduit de Evans, 2003).

Les études sur les biais de croyance ont utilisé d'autres types de problèmes logiques en plus des syllogismes. De manière générale, comparativement aux problèmes non conflictuels, les problèmes conflictuels, en outre de leur performance plus faible, entraînent un temps de réponse plus long (De Neys & Glumicic, 2008) et les individus semblent avoir moins confiance dans leurs réponses (De Neys & Feremans, 2013 ; Johnson, Tubau & De Neys, 2016). Par ailleurs, le fait qu'une conclusion entre en conflit avec les croyances peut entraîner les participants à davantage réfléchir au sujet de la structure logique du problème lorsque le temps attribué est suffisant (Handley & Trippas, 2015).

Face à un problème logique conflictuel, 90% des individus donnent la réponse adaptative biaisée. Ils utilisent une autre forme de rationalité qui intègre l'optimisation de l'efficacité communicationnelle, du gain d'information, de la satisfaction des buts, *etc.* Si 90% des personnes interrogées donnent la même réponse, c'est qu'elle doit avoir une validité d'un certain point de vue (Bonneton, 2011 ; Stanovich & West, 2000). Comment expliquer qu'il y ait deux réponses si différentes (la réponse normative, valide du point de vue de la logique formelle, et la réponse modale, celle la plus fréquemment donnée) ? Différentes réponses à un même problème peuvent refléter des différences qualitatives (traitements mentaux) ou quantitatives (capacités cognitives). Comme on l'a vu, les individus ayant des capacités cognitives plus importantes donnent plus souvent la réponse normative (De Neys, 2006). Est-ce pour autant que leurs traitements mentaux sont différents ? L'approche des modèles duels propose que, bien que les participants tentent de

raisonner logiquement, conformément aux instructions qui leur sont données, l'influence des connaissances/croyances antérieures est extrêmement difficile à inhiber et, de fait, ces connaissances prennent part à la réponse donnée.

2.3 L'approche *dual-system* ou *dual-process*

Selon l'approche *dual-system*, les réponses fondées sur les croyances ou sur le caractère formel du problème peuvent être attribuées à deux systèmes ou deux types de traitements différents, l'un heuristique et rapide (type 1) et l'autre analytique et lent (type 2) (Evans, 2003). Lorsqu'il y a conflit entre les deux réponses, la capacité d'inhiber la réponse heuristique pour donner la réponse analytique est corrélée aux capacités cognitives et déclinent avec l'âge. De même la « mauvaise » performance à la tâche de Wason abstraite est supposée être fortement liée aux réponses de type 1 avec l'heuristique de confirmation. Dans les tâches déontiques, la performance est améliorée grâce aux connaissances antérieures pertinentes et au module de détection des tricheurs qui est un mécanisme de type 1 également. Dans certains cas de charge cognitive élevée, la performance aux tâches déontiques est diminuée alors que selon l'approche *dual-system*, cette tâche ne devrait pas subir l'occupation des ressources en mémoire de travail (McKinnon & Moscovitch, 2007). L'explication pourrait être que l'activation des connaissances et leur évaluation consciente serait coûteuse en ressources (Handley *et al.*, 2011).

2.3.1 Système 1 et système 2

De nombreuses théories ont tenté de décrire l'architecture cognitive humaine (Evans & Stanovich, 2013). La théorie *dual-system* vient initialement de la théorie heuristique-analytique développée par Evans (1989). Si ces systèmes ont endossé plusieurs noms (implicite/explicite, associatif/basé sur des règles, expérientiel/rationnel), leur conceptualisation se fait toujours à partir de deux systèmes (Stanovich & West, 2000). Le système 1 est un système modulaire ancien, inné, implicite (seule la production finale est consciente), automatique (génération d'actions sans réflexion consciente), pragmatique et dont le développement se fait par association. Le système 2 est un système évolutivement récent, spécifique aux humains, lent, séquentiel, nécessitant des ressources cognitives en mémoire de travail (lié aux capacités cognitives individuelles) et agissant par raisonnements abstraits (Evans, 2005) (Tableau 1). Une remarque d'Evans (2008) a permis de souligner que le système 1 n'est pas un système unique

mais est constitué d'un ensemble de systèmes autonomes (connaissances évolutives et compilées par expérience, ensemble des modules darwiniens et des connaissances/mécanismes de type 2 automatisées). Le système 2 comprend également deux entités que sont l'esprit réflexif (ensemble des croyances, buts et connaissances générales) et l'esprit algorithmique (stratégies) (Stanovich, West & Toplak, 2011). Les deux types de processus s'influencent mutuellement par échange d'informations. L'appellation de « type » plutôt que « système » serait alors plus adéquate. Ces deux appellations sont confondues dans la suite de ce travail pour plus de facilité langagière.

Le système 1 contiendrait des outils évolutifs universels soutenant la survie alors que le système 2 suivrait des règles normatives qui maximiseraient l'utilité personnelle (Stanovich & West, 2000). Par exemple, notre système 1 nous inclinerait à manger gras, salé et sucré pour maximiser nos chances de survie et de reproduction dans un environnement moins accueillant que celui de nos sociétés modernes alors que le système 2 nous permettrait de réfléchir à notre nutrition et de manger plus sain, ce comportement étant valorisé dans notre société. Les comportements qui servent l'intérêt des gènes ne servent donc pas forcément les intérêts de l'individu. La rationalité évolutive ne garantit en effet aucunement la rationalité normative. Pour revenir aux problèmes logiques, la tendance à contextualiser les problèmes (lorsqu'ils impliquent des connaissances antérieures) sert les gènes alors que procéder par raisonnement abstrait est quelque chose de valorisé et d'attendu dans nos sociétés et servirait l'individu (Stanovich & West, 2003). Les êtres humains auraient en effet acquis des habiletés cognitives et des stratégies comportementales afin de faire face à des conditions récurrentes dans l'environnement de nos ancêtres. Cependant, ces stratégies ou habiletés ne sont pas toujours adaptées aux conditions modernes (Cosmides & Tooby, 1992). Par exemple, l'éducation actuelle n'est pas « naturelle » car ce que les enfants apprennent aujourd'hui n'a jamais été rencontré par nos ancêtres. De la même façon, la logique formelle est une connaissance secondairement acquise car on n'apprend pas primordialement à être logique de façon formelle, on apprend à être efficace la plupart du temps (Geary & Bjorklund, 2000).

Tableau 1 : Caractéristiques fréquemment attribuées aux deux systèmes (inspiré de Evans, 2008 ; Evans & Stanovich, 2013).

Système 1 (intuitif)		Système 2 (réfléchi)
Conscience	Inconscient, implicite, rapide, automatique	Conscient, explicite, lent, contrôlé

Evolution	Evolutivement ancien, rationalité évolutive, partagé par le règne animal	Evolutivement récent, rationalité individuelle, spécifique à l'espèce humaine
Caractéristiques fonctionnelles	Contextualisé, spécifique au domaine, associatif, pragmatique, parallèle, grande capacité	Abstrait, général au domaine, basé sur des règles, logique, sériel, faible capacité
Mémoire de travail	Ne requiert pas de ressources en mémoire de travail, indépendant des capacités cognitives	Requiert des ressources en mémoire de travail, dépendant des capacités cognitives

Une même information peut être traitée par des processus de type 1 ou de type 2. Ces deux types de processus peuvent mener à une même réponse ou à des réponses conflictuelles. L'individu doit alors trancher entre ces deux réponses. Les réponses de type 1 ne sont pas influencées par la pression temporelle (Evans *et al.*, 2009) ou les capacités cognitives (Newstead *et al.*, 2004). Alors que les réponses de type 2 sont préférentiellement données si les individus ont des capacités cognitives élevées, ne sont pas soumis à une autre tâche les empêchant d'utiliser leur mémoire de travail (De Neys, 2006) et ont réfléchi plus longtemps (processus plus lent, pas de pression temporelle ; Evans & CurtisHolmes, 2005 ; Stupple, Ball, Evans & Kamal-Smith, 2011 ; Bonnefon, 2011). L'activation de traitements de type 2 est facilitée si les instructions stipulent de faire un effort de réflexion (Evans, 2005 ; Evans *et al.*, 2010). Elle augmente avec l'âge, l'intelligence générale et le contrôle exécutif (Evans, 2005). Cependant, les réponses de type 1 ou 2 ne renseignent en aucun cas sur leur caractère correct ou non. Une réponse normative n'est pas forcément liée à un type 2 comme une réponse non normative ne découle pas obligatoirement d'un type 1 (Stanovich *et al.*, 2011). Chaque individu est doté de ce double système de traitement. Les différences interindividuelles influencent la probabilité qu'un individu active son système 2 et mène à bien son raisonnement.

L'évolution du système 2 est clairement lié au développement des capacités cognitives et entre en compétition avec les processus de type 1 qui persistent tout au long de la vie sans jamais être remplacés par ceux du système 2 (Evans, 2011 ; Stanovich *et al.*, 2011). Les réponses de type 2 sont en effet plus influencées par l'âge que celles du système 1 (Markovits & Barouillet, 2002). Le système 2 serait apparu avec le langage et serait donc évolutivement plus récent que le système 1 plus ou moins partagé par l'ensemble des espèces animales (par exemple, le module de la théorie de l'esprit serait un type 1 mais spécifique aux êtres humains et certaines stratégie d'apprentissage de type 2 seraient partagées par les autres animaux) (Evans, 2008). Le raisonnement se développerait selon de trois étapes : (i) non-contextualisé, (ii) contextualisé sans inhibition et (iii) contextualisé avec inhibition (Evans, 2011). Les différences individuelles en

fonction de l'âge précédemment abordées peuvent être alors expliquées par l'approche des *dual-system*. Particulièrement, les recherches ont observé que les réponses normatives sont données plus fréquemment par les jeunes enfants et les jeunes adultes alors que les réponses heuristiques augmentent pendant l'enfance tardive, donnant des courbes de performances de logique formelle en forme de U au cours du temps (Morsanyi & Handley, 2008 ; Stanovich *et al.*, 2011). Ce pattern de résultat est lié au développement des systèmes 1 et 2 ainsi qu'à l'acquisition des ressources utilisables par les deux systèmes. En effet, les enfants âgés auraient une moins bonne performance de logique formelle parce qu'ils sont particulièrement tentés d'utiliser les heuristiques qu'ils viennent d'acquérir. Cette baisse de performance n'aurait pas de lien avec une perte de raisonnement analytique (De Neys & Vanderputte, 2011). De plus, les capacités d'inhibition augmentent du début de l'adolescence à l'âge adulte puis déclinent. Ainsi, face à des problèmes conflictuels (où l'inhibition est nécessaire pour produire la réponse correcte), les performances suivent une courbe en U inversé : les adolescents de 12 ans réussissent moins bien que les jeunes adultes de 20 ans qui performant mieux que les adultes de 65 ans et plus, alors que les problèmes non conflictuels n'entraînent pas de différence de performance (De Neys & Van Gelder, 2008).

2.3.2 Les interactions entre les deux systèmes et l'explication des biais de raisonnement

Initialement, le raisonnement des individus repose sur le système 1. Le système 2 délibéré sera mobilisé uniquement si la réponse guidée par l'intuition entre en conflit avec la réponse du système délibéré (Kahneman & Frederick, 2005 ; Stanovich & West, 2000). Dans la vie quotidienne, les réponses de type 1 et 2 sont souvent en adéquation car les heuristiques sont la plupart du temps tout à fait efficaces (Morsanyi & Handley, 2008). S'il y a conflit, la mise en œuvre du système délibéré peut être vue de manière parallèle (en même temps que la réponse intuitive) ou sérielle (après la création de la réponse intuitive). Selon les modèles parallèles, l'information serait traitée en même temps par les deux types de traitements/systèmes et si les ressources cognitives s'avèrent être suffisantes, la réponse de type 2 pourra émerger (Banks & Hope, 2014 ; Stupple & Ball, 2008 ; Stupple & Waterhouse, 2009). Dans le cas des modèles sériels comme le modèle interventionniste, la réponse de type 1 est d'abord générée puis doit être inhibée par les traitements de type 2 grâce aux ressources cognitives disponibles et produire un modèle alternatif des prémisses (Evans, 2007, 2011). La clé de l'interaction entre les deux

systèmes semble être l'inhibition de la réponse première qui serait coûteuse en ressources cognitives (De Neys, 2006 ; Stanovich & West, 2000).

Les recherches peuvent également être divisées en trois groupes en fonction de la cause attribuée aux biais de raisonnement (De Neys & Bonnefon, 2013). Les erreurs peuvent survenir au niveau de la phase de (Figure 2A) :

(i) *Stockage* : les individus ne posséderaient pas les connaissances formelles nécessaires en mémoire (e.g., pas de connaissances sur les lois de logique formelle). Les différences interindividuelles sont alors liées aux connaissances accumulées.

(ii) *Contrôle* : les individus posséderaient les connaissances mais ne les utiliseraient pas et échoueraient à détecter le conflit entre les connaissances formelles stockées et les réponses intuitives (Kahneman & Frederick, 2005). Les heuristiques permettent en effet de prendre une décision plutôt efficace en peu de temps mais amènent à des biais potentiels. Pour détecter le conflit, il faut que les connaissances nécessaires soient activées. Les individus peuvent ne pas se rendre compte que leur première réponse a besoin d'être corrigée en ne détectant pas que leurs connaissances sont appropriées. La détection du conflit peut aussi prendre la forme de détection de l'erreur d'une réponse intuitive et dans ce cas, elle serait médiée par le système 1 en même temps que l'émergence de la réponse (pas d'influence de la charge cognitive) (Johnson, Tubau & De Neys, 2016). L'utilisation non adaptée d'une réponse intuitive entraînerait un signal d'alerte pour le système 1 (sans qu'il connaisse la réponse correcte). La détection du conflit serait rarement défaillante (détection implicite) et ne demanderait aucun coût en mémoire de travail. Même si les individus n'ont pas une idée claire des règles ou des connaissances formelles, les connaissances implicites suffisent à détecter le conflit (De Neys, 2012). Par exemple, les participants prennent plus de temps pour traiter les problèmes conflictuels et sont plus susceptibles de rappeler des détails concernant les problèmes logiques conflictuels alors qu'ils n'évoquent pas verbalement de sensation de conflit (De Neys & Glumicic, 2008), ils se souviennent davantage des problèmes conflictuels que des problèmes non conflictuels et ce souvenir ne serait pas influencé par la charge cognitive (Franssens & De Neys, 2009). De façon similaire, les adolescents ayant bien répondu aux syllogismes ont une mémoire altérée des connaissances en lien avec les croyances conflictuelles (Steege & De Neys, 2012). Même les individus qui donnent une réponse biaisée semblent détecter un conflit (activation du système

autonome, attestée par la conductance électro-dermale, De Neys, Moyens & Vansteenwegen, 2010 ; évidence cérébrale, De Neys, Vartanian & Goel, 2008) et sont moins confiants après avoir donné leur réponse lorsqu'elle entre en conflit avec la réponse normative, illustrant une sorte de conscience que la réponse heuristique n'est pas garantie (De Neys, Cromheeke & Osman, 2011). Les individus, adultes comme adolescents (fin de l'école primaire), semblent avoir l'intuition que quelque chose ne va pas dans leur réponse même s'ils sont tentés de donner la réponse heuristique et la confiance dans leur choix s'en trouve diminuée (De Neys & Feremans, 2013). Les biais ne peuvent donc pas être attribués à une non détection de conflit après l'école primaire.

(iii) *Inhibition* : le conflit serait bien détecté, mais les individus échoueraient à inhiber la réponse heuristique. Les différences interindividuelles sont alors liées aux niveaux de motivation ou de ressources cognitives nécessaires pour compléter le processus d'inhibition très coûteux.

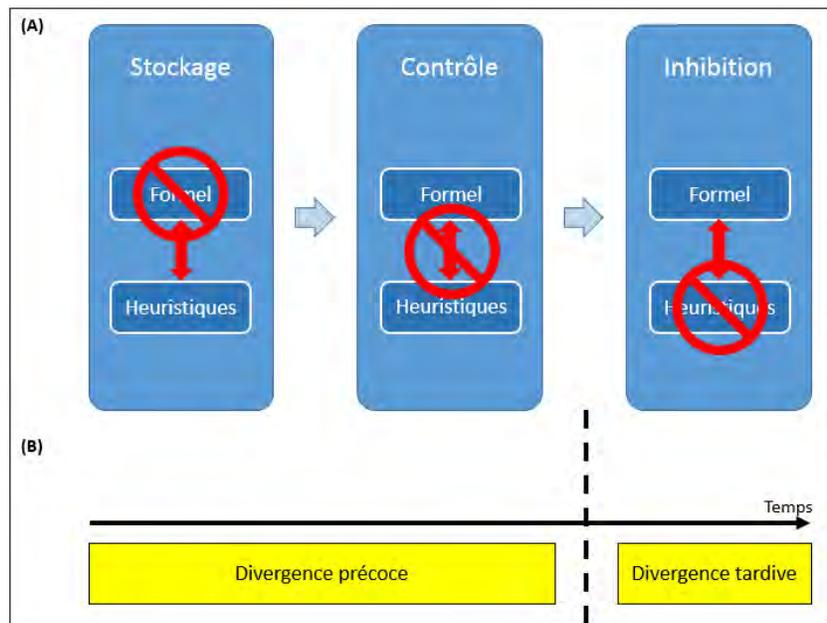


Figure 2 : Pourquoi et quand les individus divergent-ils ? (A) Les biais et la différence entre les individus biaisés et non biaisés qui en résulte peuvent venir d'une erreur dans chacun des trois modules du processus de raisonnement (stockage, contrôle, inhibition). « Formel » et « heuristiques » font références aux systèmes 2 et 1. (B) Les modules peuvent être ordonnés sur une ligne temporelle concernant le processus de raisonnement. (Traduit de De Neys & Bonnefon, 2013).

Les biais seraient liés à une erreur dans un de ces trois modules. Il est important de souligner que cela ne signifie en rien qu'un individu rencontre une erreur toujours dans le même module, tout dépendrait du contexte, des tâches et des buts de la personne. Si on ordonne dans le temps ces modules de traitement de l'information, les biais de raisonnement liés à l'inhibition semblent

survenir tard dans le processus de raisonnement. Tout le monde aurait donc le même chemin de raisonnement et divergerait à la toute fin (Figure 2B).

Pour rejeter la conclusion d'un syllogisme conflictuel, il faut que l'individu ait construit un modèle mental dans lequel la conclusion est incompatible avec les prémisses (Morsanyi & Handley, 2012). Ensuite, il cherche à inhiber la réponse de type 1 si bien que les mots liés à la réponse de type 1 deviennent temporairement moins accessibles en mémoire (temps de réponse allongé dans une tâche lexicale) (De Neys & Franssens, 2009). Si l'inhibition est un échec, l'individu donne la réponse de type 1. Si l'inhibition est une réussite, il faut encore que le système 2 mène à bien son processus pour produire sa réponse. Les deux processus sont donc similaires et ne semblent différer que très tard. De plus, la détection intuitive du conflit aurait lieu même lorsqu'on demande aux individus de répondre en fonction de leurs croyances : la validité des conclusions interférerait avec les jugements de croyance alors que le caractère croyable n'aurait qu'une influence limitée sur le jugement de validité illustrant que certaines inférences logiques seraient produites tôt dans le processus de raisonnement au contraire du modèle duel sériel standard (Handley *et al.*, 2011).

Certaines conceptions des deux systèmes mettent en avant le fait que les jugements logiques peuvent se faire de manière intuitive, inconsciemment et sans effort. Par exemple, lorsqu'on demande aux participants s'ils aiment la conclusion et non si elle est valide, les performances sont améliorées. Le traitement des informations, s'il est fluide, entraînerait un sentiment positif pouvant être consciemment perçu sans que l'individu ait conscience des processus sous-jacents (Morsanyi & Handley, 2012). L'émotion ressentie est consciente et témoignerait d'un traitement inconscient lié aux arguments sans que les participants n'en connaissent l'origine. Le fait d'aimer une conclusion serait donc un indicateur des processus intuitifs en jeu alors que la performance est basée sur un effort conscient d'évaluation des modèles mentaux. Par ailleurs, le fait d'aimer ou non une conclusion ne serait pas influencé par les capacités en mémoire de travail ou par les instructions orientant les participants vers un raisonnement conscient mais seulement par l'humeur des individus qui devient problématique si elle est liée à autre chose que le matériel de l'étude (Morsanyi & Handley, 2012). L'intuition des participants viendrait d'un traitement conjoint des systèmes 1 et 2 impliquant les connaissances antérieures (croyances) et le sentiment de logique (Handley *et al.*, 2011) bien que cette hypothèse soit discutée (Klauer & Singmann,

2013). De la même façon, les individus aiment davantage les conclusions valides qu'invalides (Trippas, Handley, Verde & Morsanyi, 2016) et ce, même si les problèmes sont abstraits (Nakamura & Kawaguchi, 2016). La structure logique serait donc traitée automatiquement et intuitivement (De Neys, 2012 ; 2014). Les individus pourraient également donner une première réponse intuitive correcte (Bago & De Neys, 2017). On aurait alors un système hybride parallèle/sériel : deux réponses de type 1 seraient possibles (l'intuition heuristique et l'intuition logique comme sensibilité à la structure logique des arguments) et auraient des forces différentes. Cette différence de force ferait émerger la première réponse. Le conflit entre ces deux types de réponses pourrait entraîner l'implication du système 2, qui mettrait à l'épreuve la première réponse (Bago & De Neys, 2017 ; Pennycook, Fugelsang & Koehler, 2015).

Finalement, l'approche des *dual-system* ou *dual-process* met en avant le fait qu'une information peut être traitée par deux systèmes ou deux types de mécanismes différents. Les types 1 sont des processus rapides, automatiques et qui ne sont pas limités par les capacités en mémoire de travail. Ils sont systématiquement mis en œuvre et sont responsables de la première réponse des individus face à un problème de logique formelle. Les types 2 sont plus longs. Ils sont mis en œuvre uniquement lorsqu'un conflit est détecté entre la réponse de type 1 et celle de type 2 et sous condition d'inhibition de la réponse première et de ressources suffisantes disponibles en mémoire de travail. Ce cadre théorique permet d'investiguer quels mécanismes sont en jeu dans les problèmes avec biais de croyances. De nombreuses recherches ont en effet montré que l'ajout d'une charge cognitive en mémoire de travail avec une *Dot Memory Task* (Bethell-Fox & Shepard, 1988; Miyake, Friedman, Rettinger, Shah & Hegarty, 2001) augmente le nombre de réponses heuristiques dans les problèmes de logique formelle (De Neys, 2006 ; Trémolière *et al.*, 2017) : les ressources cognitives en mémoire de travail sont utilisées pour réaliser la tâche interférente (modalité charge forte) et sont moins disponibles pour raisonner de manière consciente. Un surplus de charge cognitive peut gêner le raisonnement correct quand le fait qu'une conclusion soit croyable ou non entre en conflit avec sa validité (mais pas lorsque les croyances guident les individus vers la bonne réponse). Les individus ayant une grande capacité en mémoire de travail obtiennent de meilleures performances mais l'effet de charge cognitive ajoutée impacte tout le monde. Ce résultat permettrait d'argumenter en faveur du fait que les deux systèmes de raisonnement seraient universels et que les différences interindividuelles

viendraient des capacités d'inhibition de la réponse de type 1 et d'élaboration de la réponse de type 2 (De Neys, 2006).

Les mécanismes de type 1 et 2 peuvent être comparés dans leurs caractéristiques et leur fonctionnement aux connaissances primaires et secondaires. Notamment, les mécanismes et connaissances de type 1 sont exploités facilement et rapidement sans coût particulier en mémoire de travail. La première réponse élaborée nécessite également d'être inhibée pour construire une nouvelle réponse de type 2. Une discussion de ces points communs est proposée dans le chapitre 3.1.3.3.

Cette première partie a permis de poser les bases du raisonnement lié à la logique formelle ainsi que des principaux mécanismes en jeu. De façon contre-intuitive, les contenus concrets familiers ne facilitent pas obligatoirement les performances et l'implication des connaissances antérieures a plutôt tendance à desservir la réflexion. Les règles déontiques sont un des seuls cas de contenu « concret » pour lequel les individus ont de meilleures performances grâce au module évolutif concernant les échanges sociaux. La règle déontique peut néanmoins être « abstraite » (règles et mots qui n'existent pas) et entraîner de la même façon des performances plus importantes que les problèmes « concrets » non déontiques. De plus, les biais de raisonnement, notamment les biais de croyance, permettraient d'investiguer l'implication des systèmes 1 et 2 dans le raisonnement. Ainsi, parce qu'ils constituent un idéal naïf d'apprentissage, qu'ils peuvent endosser différents habillages facilement et qu'ils permettent d'investiguer l'implication des systèmes 1 et 2 dans le raisonnement (notamment via les biais de croyances), les problèmes logiques constituent un excellent thème d'exploration de l'influence des différents types de connaissances.

3 L'approche évolutive des connaissances

Dans cette seconde partie, deux types de connaissances sont décrites au regard des caractéristiques évolutives humaines afin d'en comprendre les potentiels bénéfiques respectifs dans le cadre de l'apprentissage, ainsi que l'intégration de ces types de connaissances dans la théorie de la charge cognitive et ses applications actuelles.

Selon la théorie de la sélection naturelle, les comportements sont partiellement héréditaires et influencent les capacités de survie ou de reproduction des individus au cours des générations (Darwin, 1859). Ainsi, certaines fonctions perdurent car elles favorisent l'adaptation des individus. Comme nos autres compétences, la capacité d'apprendre est un trait qui aurait été favorisé au cours de l'évolution (Geary, 2008).

3.1 Connaissances primaires et secondaires

Les êtres humains possèdent la capacité extraordinaire de construire de nouvelles connaissances (secondaires). Cependant, l'accumulation de connaissances secondaires s'est produite trop rapidement au regard du temps de l'évolution : les biais attentionnels et cognitifs qui facilitent la modification des systèmes naïfs (connaissances primaires) n'ont pas évolué assez vite pour favoriser l'apprentissage des connaissances secondaires (Richerson & Boyd, 2005). La différence entre connaissances primaires et secondaires est avant tout une question de temps d'adaptation au regard de l'évolution.

3.1.1 Caractéristiques évolutives humaines

L'humain a évolué dans l'objectif de maîtriser son environnement (modification de la taille du cerveau en fonction des fluctuations environnementales notamment climatiques, Ash & Gallup, 2007 ; Bailey & Geary, 2009 ; techniques de chasse créatives, Kaplan, Hill, Lancaster & Hurtado, 2000) et ses semblables dont les comportements deviennent de moins en moins prévisibles au cours du temps (Flinn, Geary & Ward, 2005). Le but final est de contrôler le meilleur environnement possible. Pour cela, l'être humain possède des biais à son avantage. Par exemple, il favorise les membres de son groupe même de façon non intentionnelle (Fiske, 2002) et entre en compétition avec les autres groupes (Horowitz, 2001). Il encode automatiquement les alliances sur la base des accords ou des désaccords exprimés, la clé étant le partage d'une

apparence liée au favoritisme de l'endogroupe et à l'indifférence voire l'hostilité envers l'exogroupe (Kurzban, Tooby & Cosmides, 2001). Ce biais peut avoir une influence sur les comportements racistes, mais il n'est initialement pas fixé sur l'ethnie des individus. En effet, nos ancêtres chasseurs-cueilleurs n'ont sans doute jamais rencontré d'autres ethnies que la leur puisqu'ils se déplaçaient à pied et sans doute peu.

Nous traitons depuis longtemps des informations sur les alliances que nous pouvons faire, sur les membres de notre famille ne serait-ce que pour les reconnaître, sur les tricheurs dans les échanges sociaux, *etc.* si bien que nous ne savons pas comment nous le faisons. Les êtres humains ont évolué spécifiquement pour acquérir des connaissances naïves (Spelke & Kinzler, 2007) réparties en (i) *psychologie naïve* (conscience de soi, reconnaissance des visages, expressions faciales, langage, dynamiques de groupes, théorie de l'esprit), (ii) *biologie naïve* (faune et flore, nourriture) et (iii) *physique naïve* (navigation dans l'espace) (Geary, 2007, 2008 ; Geary & Berch, 2015, 2016). Les capacités cognitives sont modulaires et faites pour répondre à des formes spécifiques d'information mais aussi plastiques avec un potentiel adaptatif en fonction des variations de l'information. La prématurité des enfants joue un rôle important dans cette plasticité essentielle à la survie. En effet, l'humain naît prématuré pour pouvoir adapter son cerveau (et son pré-câblage) à la culture dans laquelle il grandit, pour s'entraîner à acquérir des compétences qui permettront sa survie et sa reproduction (Geary & Bjorklund, 2000). L'être humain bénéficie d'une longue période de développement qui est utilisée pour mettre en œuvre les modules naïfs et les connaissances qui y sont liées. L'apprentissage serait donc une sorte d'adaptation des systèmes naïfs à l'environnement. Le développement cognitif humain correspond à l'adaptation basée sur l'expérience des compétences modulaires biologiquement primaires aux écologies locales sociales, physiques et biologiques.

Par ailleurs, les groupes humains s'engagent dans des pratiques culturelles qui modifient les circonstances de sélection des gènes. Par exemple, la constitution des groupes et la pression de la norme centrée sur l'utilité sociale (favoritisme de l'endogroupe) favorisent la survie de ces groupes (Haidt, 2007). La pensée morale serait le fruit de l'évolution car elle permet une cohésion et la construction d'un référentiel commun. Les rapports entre gènes et culture sont complexes : les gènes ne rendent pas compte de la culture et deux populations vivant dans des environnements semblables peuvent tout à fait avoir un mode de vie complètement différent.

Gènes, environnement et culture semblent être intimement liés dans les comportements humains. Les gènes donneraient les bases à l'évolution cumulative de la culture (pré-requis cognitifs comme la capacité d'apprendre par imitation), l'environnement avec ses changements importants (de l'ordre d'une centaine ou d'un millier d'année plus que de 100 000 ans auparavant) aurait orienté la culture vers la maîtrise de cet environnement et la culture permettrait l'adaptation rapide à des conditions hétérogènes. De manière générale, la transmission culturelle des comportements et des normes sociales faciliterait la trajectoire évolutive des êtres humains (Richerson & Boyd, 2005). Quelles que soient leur influence respective, la culture et la génétique sont les deux éléments importants à mettre en relation lorsqu'on cherche à expliquer les comportements humains (Fisher & Ridley, 2013). Les modifications génétiques peuvent être considérées comme un précurseur nécessaire à la culture. Par exemple, il est nécessaire que le cerveau ait évolué pour permettre les fonctions cognitives de haut niveau puis le langage, l'utilisation d'outils, les sciences et l'art et ainsi soutenir l'évolution culturelle (Somel, Liu & Khaitovich, 2013 ; Vallender, Mekel-Bobrov & Lahn, 2008). Les modifications génétiques peuvent également être perçues comme guidées par la culture (Fisher & Ridley, 2013 ; Richerson & Boyd, 2005). La transmission de la culture en tant qu'ensemble de traditions et d'informations qui varie selon les groupes, se fait par interactions sociales (imitation, apprentissage) et la sélection culturelle est assurée par des pressions similaires à celles de la sélection génétique (variation, pression de sélection, hérédité et accumulation des modifications au cours du temps) (Danchin, Giraldeau, Valone & Wagner, 2004 ; Mesoudi, Whiten & Laland, 2004).

Les connaissances et l'expertise qui entraînent une meilleure adaptation sociale ou environnementale sont transmises à travers les générations notamment via le biais d'artefacts (livres) ou de traditions d'apprentissage (maître/apprenti). L'humain est un être curieux par nature (trait évolutif), mais la complexité des connaissances secondaires actuelles est telle qu'elle dépasse largement les biais d'apprentissage des systèmes naïfs (Geary, 2008). Pourtant, on s'attend à ce que les enfants soient capables d'un tel exploit ! Heureusement, l'individu, en plus de ses biais, est doté d'un système psychologique qui le rend adaptable et créatif.

3.1.2 L'individu selon Geary

Pour Geary (2008), l'individu humain est un système psychologique conscient. Ce système est une fusion de (i) la conscience de soi (Tulving, 2002), (ii) du voyage dans le temps mental (Suddendorf & Corballis, 1997) et (iii) des modèles mentaux (Johnson-Laird, 1983, 2005).

On distingue généralement deux mémoires déclaratives (Tulving, 2002). La mémoire sémantique correspond aux connaissances du monde dans lequel l'individu évolue. La mémoire épisodique est un système neurocognitif permettant de se souvenir des expériences personnelles passées (auto noétiques). La mémoire épisodique repose sur trois concepts : (i) le soi, (ii) la conscience auto noétique et (iii) le sentiment du temps passé. Elle permet de faire l'expérience des faits passés à nouveau. Les animaux ont une bonne connaissance du monde dans lequel ils vivent (mémoire sémantique) et peuvent se souvenir d'une expérience passée (puisqu'ils apprennent de leurs expériences) mais ils ne semblent pas être capables de manipuler consciemment ces faits ou de les situer dans le temps. L'autonoësis comme habileté neurocognitive à faire l'expérience du temps comme d'une série d'épisodes subjectifs est donc primordiale dans la mémoire épisodique humaine.

La capacité de voyager mentalement dans le temps semble être une spécificité de l'espèce humaine, les autres animaux ne semblant se penser que dans le présent, sans pouvoir revivre leur passé ou imaginer leur futur. Cette capacité comprend la reconstruction mentale des événements passés personnels (mémoire épisodique) et la construction des possibles (Suddendorf & Corballis, 1997). Elle dépend d'autres mécanismes cognitifs comme la conscience de soi, les attributions mentales, la compréhension et la perception, les méta-représentations ou la dissociation des états mentaux imaginés et réels qui apparaissent vers l'âge de quatre ans (Suddendorf & Corballis, 1997). Voyager mentalement dans le temps n'est finalement que la combinaison et la recombinaison d'éléments familiers mais permet une adaptation rapide et flexible aux changements environnementaux complexes. En effet, la capacité de se projeter et d'imaginer ce qui pourrait être est plus efficace que l'instinct ou que l'apprentissage conventionnel.

Enfin, la capacité de penser nous permet d'anticiper des états du monde et de choisir les actions adéquates (Johnson-Laird, 1983, 2005) (partie 2.1.1.). En effet, le fait de pouvoir créer des alternatives à la réalité constitue le socle de notre capacité à expliquer le passé et à préparer le futur (Byrne, 2016).

Le système psychologique conscient soutient la capacité de construire des représentations mentales explicites de situations centrées sur soi, autrui et l'accès aux ressources biologiques et physiques (Geary, 2008). La capacité de simulation de ce qui a été, de ce qui est et de ce qui pourrait être permet également une comparaison du monde réel au monde parfait (un monde dans lequel on aurait le contrôle total des ressources afin de favoriser au maximum sa survie et sa reproduction). Les êtres humains ont tous tendance à rechercher le monde parfait, à éviter les manipulations et à manipuler les autres. Ce système est soutenu par plusieurs mécanismes cognitifs comme la mémoire de travail, le contrôle de l'attention, la capacité d'inhiber les systèmes naïfs et la mémoire de faits passés ainsi que la relation de faits potentiels. En effet, si l'individu est confronté à des problèmes que les heuristiques ne peuvent résoudre, il met en œuvre des mécanismes d'inhibition de ces heuristiques pour utiliser des stratégies de résolution de problème conscientes comme la comparaison fin/moyens ou le raisonnement analogique. Si ce type d'interaction est répété, l'individu apprend des connaissances sémantiques qui lui permettent de créer des heuristiques pour des problèmes similaires. Le système primaire supporte une certaine plasticité et la manipulation des données en mémoire de travail peut modifier ce système.

Ce système psychologique conscient est actuellement confronté à deux types de connaissances dont les caractéristiques doivent être prises en compte si l'on veut comprendre comment l'individu apprend et comment il peut apprendre des choses impossibles.

3.1.3 Caractéristiques des connaissances primaires et secondaires

3.1.3.1 Les connaissances naïves ou primaires

Les biais cognitifs dus à l'évolution orientent l'attention des individus (*e.g.* vers les visages, pas les pierres) et la façon dont ils interprètent l'information (*e.g.* intentions sous-jacentes). Ces biais nous permettent de nous connaître nous-mêmes, les autres espèces et le monde physique

(Geary & Berch, 2015 ; Wellman & Gelman, 1992). Ils sont universels et nuancés en fonction de l'environnement (social et biologique) (Gelman, 1990) par le jeu, l'imitation, l'interaction avec autrui et l'exploration de l'environnement (Geary & Berch, 2016 ; Lancy, 2016 ; Pellegrini, 2016). Les connaissances naïves ou primaires sont des systèmes de traitement de l'information. Elles correspondent à des formes de connaissance et de compétences universelles qui émergent d'une combinaison de biais cognitifs inhérents et d'expériences évolutives (Geary & Berch, 2016). Elles ont pour fonction de focaliser les comportements sur l'accès et le contrôle (non conscient) de l'environnement social, biologique et physique, facilitant ainsi la survie et la reproduction au cours de l'évolution. Les connaissances primaires définies par Geary correspondent aux connaissances fondamentales de Spelke et Kinzler (2007) pour qui ces connaissances sont peu nombreuses, séparées en modules spécifiques et seraient la base des capacités humaines, essentielles à l'acquisition d'autres connaissances. Les connaissances naïves ont trait à la psychologie, la biologie et la physique (Geary, 2007, 2008 ; Geary & Berch, 2015, 2016) (Figure 3).

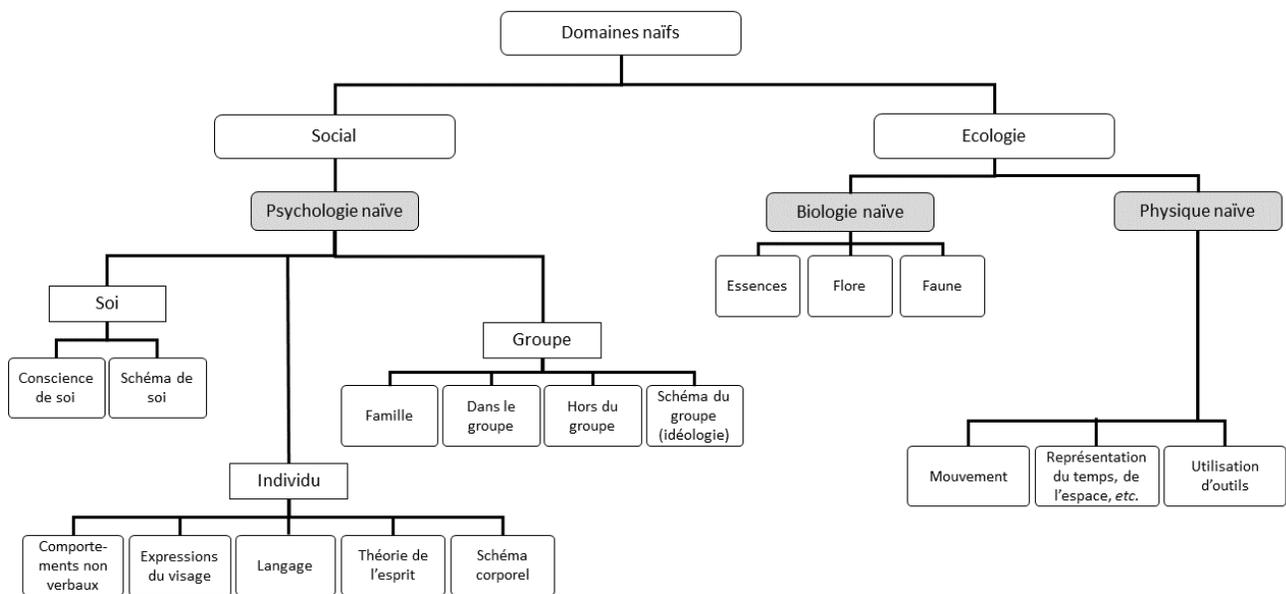


Figure 3 : Domaines de connaissances naïves ou primaires (selon Geary & Berch, 2016).

Les domaines de connaissances naïves ou primaires sont entendus comme détaillés ci-dessous (Geary, 2007, 2008 ; Geary & Berch, 2015, 2016) :

(i) *La psychologie*. Ce module englobe le système cognitif émotionnel et comportemental (lié à la compétition sociale et à la coopération). Il concerne la conscience de soi (représentation consciente en mémoire de travail de l'unicité de notre personne dans un réseau, mémoire autobiographique, projection dans l'avenir), les relations avec autrui, la communication non verbale, les expressions faciales, le langage, la théorie de l'esprit (capacité de faire des inférences sur les désirs d'autrui, ses croyances ou ses émotions et savoir qu'ils peuvent différer des nôtres) dont le but est de pouvoir prévoir les comportements d'autrui voire de comprendre les buts de l'enseignant par exemple (Leslie, Friedman & German, 2004). Nous sommes pré-câblés pour orienter préférentiellement notre attention vers les visages (Fantz, 1961 ; Morton & Johnson, 1991), puis par adaptation à notre environnement, nous parvenons à différencier le visage de notre mère (par les traits du visage et ses comportements, Bushnell, 2001 ; Pascalis, Schonen, Morton, Deruelle & Fabre-Grenet, 1995 ; Walton, Bower & Bower, 1992), l'endo- et l'exogroupe (Anzures *et al.*, 2014 ; Bar-Haim, Ziv, Lamy & Hodes, 2006), l'humain et le singe (De Haan, Pascalis & Johnson, 2002) et les émotions même subtiles (Ichikawa & Yamaguchi, 2014 ; Nelson & de Haan, 1997). Nous favorisons nos apparentés (Hamilton, 1964) ainsi que les personnes qui partagent nos intérêts et coopèrent avec nous (endogroupe) alors que nous aurons tendance à nous comporter plus négativement envers l'exogroupe (Fiske, 2002 ; Hewstone, Rubin & Willis, 2002), les rapports avec autrui étant déterminés par domaines (attachement aux parents, coalition pour se défendre, recherche de partenaire, hiérarchie, *etc.*, Bugental, 2000).

(ii) *La biologie*. Ce module a trait au comportement et au développement des autres espèces dans le cadre d'activités visant à identifier et à sécuriser les ressources. Les enfants sont pré-câblés pour aller à la rencontre de l'environnement et créer des taxonomies implicites permettant de catégoriser la flore et la faune ainsi que de stocker des informations concernant les besoins de chaque entité pour se développer (nécessaire à la chasse et l'horticulture). Cette catégorisation se ferait particulièrement pour les espèces utilisées pour se nourrir, se guérir ou pratiquer des rituels sociaux (Atran, 1998 ; Berlin, Breedlove & Raven, 1973 ; Hickling & Gelman, 1995 ; Inagaki & Hatano, 1996 ; Medin & Atran, 2004), permettant l'adaptation à chaque milieu de vie spécifique. Même les individus qui n'ont pas une grande expérience du monde naturel (novices qui ne vivent pas à la campagne par exemple) développent des aspects taxonomiques rudimentaires (Bailenson, Shum, Atran, Medin & Coley, 2002 ; Medin & Atran, 2004). Les connaissances sur la morphologie des animaux, leur comportement, leur développement et leur habitat aident à définir

l'essence des espèces. Les concepts de classification des animaux sont différents en fonction des populations, mais les bases restent les mêmes (Berlin *et al.*, 1973).

(iii) *La physique*. Ce module permet de négocier avec le monde physique. Les enfants se représentent facilement leur lieu de vie et les points de repères principaux tout comme les distances entre ces différents points (Chen, 2007 ; Mandler, 1992) et ont une habileté primaire à l'utilisation d'objets pour explorer et modifier leur environnement (Lockman, 2000 ; Pellegrini, 2016). Ce module traite également les aspects de navigation dans l'espace (référentiels ego- ou allocentriques) permettant l'exploration mentale de l'espace (Byrne, Becker & Burgess, 2007), la représentation mentale des objets physiques (Shepard, 1994), le sens intuitif des nombres/quantités (Feigenson, Dehaene & Spelke, 2004). Les jeunes enfants ont déjà une intuition de la façon dont vont se comporter les objets physiques comme la trajectoire d'une balle en fonction de son mouvement initial (Kaiser, McCloskey & Proffitt, 1986) mais ne savent pas comment l'expliquer et ont beaucoup de mal à inhiber leurs théories primaires pour endosser les règles de Newton (Clement, 1982 ; Dunbar, Fugelsang & Stein, 2007).

Les informations de ces domaines naïfs sont facilement traitables, organisables et intrinsèquement motivantes (Geary & Berch, 2015). Par nature, les connaissances naïves s'adaptent à l'environnement local (Geary, 2007) et sont acquises sans enseignement (apprentissage par maturation, imprégnation et adaptation). Il existe un ensemble central de compétences cognitives mais les phénotypes associés sont modifiables par l'expérience, les compétences émergeant grâce aux processus épigénétiques (Geary & Bjorklund, 2000). La plasticité de ces connaissances est en effet nécessaire et plus ou moins importante selon les domaines (Geary & Berch, 2016). Par exemple, le domaine de la psychologie naïve doit évoluer dans un environnement extrêmement plus dynamique que le domaine de la biologie naïve. Par ailleurs, ces connaissances primaires sont traitées inconsciemment et n'ont pas besoin des ressources en mémoire de travail. Ainsi, on traite inconsciemment la forme de la bouche d'une personne pour connaître ses émotions (Schyns, Bonnar & Gosselin, 2002) et la réponse comportementale est produite presque automatiquement : si le visage exprime de la colère, on aura tendance à fuir. Les connaissances primaires sont modulaires (*e.g.* modularité de la sensation de nombre, Mandelbaum, 2013 ; module de détection des tricheurs, Cosmides, Barrett & Tooby, 2010 ; module de théorie de l'esprit, Scholl & Leslie, 1999 ; module de reconnaissance des visages, Kanwisher, McDermott & Chun, 1997) principalement parce que ces connaissances ont

été acquises à différents moments au niveau de l'évolution (Tricot & Sweller, 2014, 2016). Par exemple, il est facile de s'imaginer qu'on aurait appris à reconnaître les visages avant d'apprendre à parler. Les systèmes modulaires sont des processus mentaux spécifiques, inconscients et automatiques, sous-tendus par une architecture neurale (Fodor, 2003).

Les enfants sont précocement motivés pour s'engager dans des activités liées à l'apprentissage de connaissances naïves : ils cherchent à avoir davantage d'informations sur autrui, à apprendre comment est organisé leur environnement, ils s'orientent eux-mêmes par jeu dans des parties de chasse (observation d'experts puis imitation), aiment écouter les histoires morales (règles culturelles des comportements sociaux), explorent leur environnement, *etc.* (Geary, 2008 ; Geary & Berch, 2016 ; Geary & Bjorklund, 2000). Le jeu est une représentation des habiletés primaires comme expérience des rôles sociaux par imitation des comportements (Geary, 2005). Le contenu des apprentissages primaires est dirigé vers des contenus sociaux ou écologiques que l'enfant doit maîtriser pour devenir adulte. Dans cette approche, les mécanismes universels primaires supportent l'apprentissage des informations culturelles. Par ailleurs, les êtres humains sont des spécialistes de ce qu'ils consomment (Kaplan *et al.*, 2000). Ils visent à acquérir les meilleurs plantes et animaux en terme de qualité nutritionnelle et s'aident de créativité et de techniques pour exploiter les ressources au maximum. Cette efficacité demande un apprentissage plus long que celui des autres espèces animales (prise de décision en fonction des informations recueillies, planification). Un individu peut également adopter la croyance culturelle commune concernant quel type de nourriture manger ou imiter le succès des individus qui mangent ce type de nourriture (Richerson & Boyd, 2005).

3.1.3.2 Les différences entre connaissances primaires et secondaires

Les connaissances secondaires se définissent par opposition aux connaissances primaires. Alors que ces dernières sont facilement, inconsciemment et très rapidement acquises parce que notre cerveau aurait évolué pour cela, les connaissances secondaires sont difficiles et longues à acquérir notamment parce que notre cerveau n'a pas eu le temps de s'y adapter (Taleau 2). De façon générale, les connaissances secondaires regroupent toutes les connaissances académiques. Par ailleurs, les connaissances qui ne font pas partie de notre environnement seraient des connaissances secondaires qu'on doit apprendre à l'école tout comme les concepts apparus tardivement au cours de l'évolution (Tricot & Roussel, 2016). Un continuum pourrait être

envisagé avec, à un extrême, les connaissances primaires de notre environnement direct et, à l'autre extrême, les connaissances secondaires, l'étape intermédiaire serait les connaissances « primaires » qui ne font pas partie de notre environnement direct. Des exemples de duos de connaissances primaires/secondaires pourraient être parler/écrire, estimation d'une quantité/nombre, courir/faire un 100m, se battre/le judo (Tricot & Roussel, 2016). La différence entre connaissances primaires et secondaires n'est néanmoins pas liée à la complexité des informations en jeu : parler est extrêmement complexe (moteur, son, mouvements) et pourtant on parvient à le faire sans même y penser.

L'histoire évolutive n'est pas précise si bien qu'il est impossible de dire que telle ou telle habileté appartient aux domaines primaire ou secondaire de façon stricte. Le consensus pour déterminer une connaissance ou une compétence primaire est le fait qu'elle n'a pas besoin d'être expliquée pour être comprise (Paas & Sweller, 2012). De plus, comme les connaissances secondaires sont construites à partir des connaissances primaires, un deuxième continuum pourrait représenter les pourcentages relatifs entre ces deux types de connaissances. Il est extrêmement difficile de trouver un domaine uniquement fait de connaissances primaires (Tricot & Sweller, 2014, 2016). On pourrait imaginer des connaissances intermédiaires comme la musique et la fabrication d'outils (Tanguy, Foulin & Tricot, 2013).

Tableau 2 : Principales caractéristiques attribuées aux connaissances primaires et aux connaissances secondaires selon Geary & Berch (2016), Paas & Sweller (2012), Tricot & Sweller (2014) et Tricot & Roussel (2016).

	Connaissances primaires	Connaissances secondaires
Définition	Toutes les connaissances pour lesquelles notre cerveau a évolué afin de faciliter leur apprentissage (plus de 200 000 ans)	Toutes les « autres » connaissances pour lesquelles notre cerveau n'a pas eu le temps d'évoluer (moins de 7 000 ans)
Utilité	Directe, adaptation à l'environnement social, biologique et physique « réel »	Indirecte, préparation à la vie sociale et professionnelle future
Apprentissage	Inconscient, sans effort, rapide	Conscient, demande des efforts, lent
Voies d'apprentissage	Interactions sociales, imitation, exploration, jeu	Pratique délibérée, pratiques professionnelles, instructions
Motivation	Intrinsèque	Extrinsèque souvent nécessaire
Charge cognitive	Aucune	Présente
Mécanismes	Heuristiques, généraux	Analytiques, spécifiques (s'appliquent à des contenus)

Distinction fin/moyens	Non	Oui
Exemples	Reconnaissance faciale, langue maternelle orale, règles pour se nourrir, caractéristiques des animaux	Mathématiques, règles de grammaire, connaissances « académiques » ou culture « récente »

Les enfants sont intrinsèquement motivés pour développer les relations avec leurs pairs (psychologie naïve), mais beaucoup moins pour apprendre l’algèbre (connaissance secondaire). L’école a pour but principal la transmission verticale des connaissances. Les enfants sont curieux et ont une habileté à apprendre de nouvelles informations (biais évolutif), mais il existe de grandes différences inter-individuelles dans la motivation et les capacités d’apprentissage (différences dans les mécanismes de l’intelligence fluide ou dans la mémoire de travail par exemple ; Geary, 2008 ; l’intelligence fluide étant la capacité à résoudre des problèmes et à s’adapter à des situations nouvelles, Cattell, 1971). De manière générale, on est plus enclin à perdre notre motivation face à des connaissances secondaires que primaires. Nos vies seraient beaucoup plus simples si nous étions autant motivés à apprendre nos cours de mathématiques qu’à apprendre comment interagir avec autrui. Parce qu’il est fréquent de l’oublier, il est important de rappeler qu’apprendre est un processus long et difficile. Les élèves croient souvent qu’avoir de bonnes notes en mathématiques ne fait appel qu’au talent (pas aux efforts) et se désengagent des cours parce qu’ils sont trop coûteux. Les apprenants auraient différentes théories concernant la nature de l’intelligence notamment sur sa nature fixe ou malléable (Dweck, 1999). Combattre la croyance d’une intelligence fixe en expliquant qu’apprendre demande des efforts (et pas du talent) permettrait d’augmenter les performances des apprenants (Blackwell, Trzesniewski & Dweck, 2007).

Nous sommes pré-câblés pour acquérir les connaissances primaires, il suffit d’avoir le plaisir de faire et l’occasion (expérience) pour développer les systèmes naïfs (Geary, 2005). A contrario, les connaissances secondaires se développent en fonction de l’accent qui est mis sur la compétence associée (par exemple à l’école). Dans une étude comparant les performances en mathématiques d’enfants asiatiques et américains (Geary, 1995), la culture n’influence pas les habiletés primaires mais bien les habiletés secondaires. Les enfants n’aiment pas s’engager de façon inhérente dans des activités liées aux connaissances secondaires d’où la nécessité d’une motivation extrinsèque. L’éducation des enfants asiatiques met en avant l’importance de la réussite alors que l’éducation des enfants américains semble favoriser le plaisir direct et laisse le

choix aux apprenants de se désinvestir de certains cours. Cette différence éducative entraînerait des performances plus importantes chez les enfants asiatiques quand il s'agit d'habiletés mathématiques secondaires. De manière générale, l'investissement est plus important lorsque les activités impliquent des connaissances primaires (*e.g.*, thèmes souvent relayés par la télévision, les jeux vidéo ou les livres) et une curiosité pour les objets nouveaux. Les connaissances primaires sont partagées dans le monde animal. Par exemple, le principe primaire de numérosité (déterminer la quantité d'une chose sans la compter ou l'estimer) et les relations ordinales se rencontrent chez la plupart des espèces (Davis & Perusse, 1988). Les individus humains auraient d'abord un système numérique approximatif (traitement des quantités non symboliques) avant d'arriver à leur associer des nombres puis à élaborer un système de connaissances explicites du système numérique (Geary, 2013). Ce système numérique approximatif pourrait trouver ses bases dans un système d'approximation des quantités (Miravete, Tricot, Kalyuga & Amadiou, 2017) et serait le socle sur lequel se construirait la connaissance des valeurs cardinales symboliques (Chu, vanMarle & Geary, 2015).

Les connaissances primaires sont considérées comme acquises dans des conditions spécifiques mais à terme généralisables (utilisables quel que soit le domaine d'application et la situation) alors que les connaissances secondaires sont davantage spécifiques, définies par leur nécessité à la réalisation d'une tâche (Tricot & Sweller, 2014, 2016). Par exemple, le théorème de Pythagore ne s'applique que sur des problèmes qui le requièrent pour être résolus. Par définition, les habiletés générales procèdent d'une acquisition automatique et ne peuvent s'apprendre. Par contre, il est possible d'apprendre à étendre ces habiletés à de nouveaux domaines même si cette nouvelle acquisition est spécifique à tel ou tel autre domaine. En effet, les êtres humains ont évolué pour acquérir aisément des connaissances primaires, mais ces biais évolutifs ne sont pas suffisants pour utiliser les habiletés primaires dans chaque activité culturelle apparue récemment (Youssef, Ayres & Sweller, 2012).

Les connaissances primaires et secondaires partagent des caractéristiques communes avec les systèmes 1 et 2 du raisonnement humain, notamment dans leurs interactions mutuelles qui sont représentées par l'inhibition et modulées par les capacités en mémoire de travail.

3.1.3.3 Connaissances primaires/secondaires et systèmes 1/2 : processus d'inhibition et charge cognitive

Les systèmes naïfs ont évolué afin de faire face à des conditions redondantes au travers des générations et dans le temps de vie d'un individu. Ce sont des mécanismes qui attirent l'attention vers ces informations consistantes et qui engendrent une réponse quasi-automatique. Ce genre de situation, rencontré tout au long de l'évolution, se retrouve aujourd'hui quotidiennement et nous y répondons inconsciemment. Ces mécanismes entraînent cependant des biais et l'être humain doit s'adapter à des changements écologiques ou sociaux rapides d'où la nécessité de l'évolution d'un système moins automatique et plus réfléchi (Geary, 2008). De manière générale, si une situation ne peut pas être réglée par des heuristiques naïves, le système analytique inhibe ce dernier pour produire sa propre réponse (Evans, 2002).

Les réponses liées aux connaissances primaires sont automatiques et rapides. Lorsque la situation ne peut pas être résolue par ces systèmes autonomes, l'attention est dirigée vers cette situation et la mémoire de travail est sollicitée pour créer une représentation de la situation et permettre l'adaptation (Geary, 2007). Plus précisément, les mécanismes de la mémoire de travail et ceux de l'intelligence fluide permettraient l'inhibition des biais automatiques liés aux systèmes naïfs (Geary, 2008). Les mécanismes naïfs sont des liens entre l'environnement et les comportements humains sélectionnés par l'évolution. Les êtres humains ont une importante capacité à inhiber ces biais et à construire de nouvelles réponses. Les connaissances secondaires étant trop éloignées des connaissances primaires, les enfants ressentent souvent un conflit à s'engager dans des activités liées aux connaissances secondaires face aux connaissances primaires. Le mécanisme d'inhibition des connaissances primaires est central pour Geary et peut s'apparenter à de l'autodiscipline. L'autodiscipline (contrôler les réactions impulsives, inhiber les comportements, repousser la satisfaction immédiate contre la satisfaction future avec l'apprentissage, *etc.*) serait alors un meilleur prédicteur de la performance scolaire que l'intelligence alors que la plupart des études se concentrent sur l'intelligence (Duckworth & Seligman, 2005).

De façon analogue, les personnes capables de logique formelle (qui arrivent à inhiber les premières réponses et à s'engager dans une activité réflexive) font des erreurs communes de raisonnement (Stanovich & West, 2008). En effet, comme cela a été présenté précédemment, la deuxième réponse (analytique) nécessite l'inhibition de la première et l'intervention des connaissances antérieures. Ce genre d'activité n'est mis en place que si la situation l'oblige (heuristiques non suffisantes pour résoudre le problème) et est influencé par des caractéristiques interindividuelles comme l'intelligence fluide et la flexibilité cognitive (*i.e.*, la capacité de déplacer le focus attentionnel entre différentes activités ou stimuli, Chevalier & Chevalier, 2009) (explications alternatives des phénomènes) (Geary & Berch, 2016).

La théorie des deux systèmes de pensées (Evans, 2011) met en avant deux types de systèmes qui ont accès à des formes différentes et distinctes de connaissances. Le système 1 utilise les connaissances acquises de l'apprentissage par expérience via des mécanismes acquis par évolution menant à des comportements instinctifs autonomes, alors que le système 2 manipulerait des représentations explicites grâce à la mémoire de travail. Ainsi, les connaissances primaires et le système 1 partageraient la rapidité et la facilité de traitement sans charger la mémoire de travail à l'opposé des connaissances secondaires et du système 2 qui nécessiteraient une bonne partie des ressources en mémoire de travail. Les interactions entre les deux types de connaissances comme entre les deux types de systèmes seraient également semblables puisque l'inhibition de la première réponse serait la clé pour l'élaboration de la deuxième réponse.

Le modèle de Geary est récent et encore imparfait puisqu'il manque de puissance (explique tout mais perd également son pouvoir d'explication en étant trop général), n'entraîne pas des hypothèses réellement falsifiables (Halpern, 2008) et ne semble pas toujours être soutenu par des preuves biologiques (Ellis, 2008). Cependant, cette approche permet de voir plusieurs théories et modèles sous un nouvel angle et d'imaginer de nouvelles pistes d'exploration. En effet, de par leurs caractéristiques opposées, il semble essentiel de tenir compte du type de connaissances en jeu lorsqu'on est face à une situation d'apprentissage quelle qu'elle soit, quand bien même la plupart des habiletés apprises par enseignement contient plus ou moins de connaissances primaires ou secondaires. Les connaissances primaires générales et acquises sans effort ne nécessiteront en effet pas les mêmes approches d'instruction que les connaissances secondaires spécifiques et difficiles à apprendre (Sweller, 2016). La psychologie évolutive de l'éducation

propose de prendre en compte ces caractéristiques évolutives humaines afin de les considérer lors de situations d'apprentissage actuelles dans lesquelles la société recherche la formation d'experts.

3.1.4 La psychologie évolutive de l'éducation

Les experts d'un domaine sont fortement valorisés par nos sociétés, mais l'expertise n'est pas innée, elle est acquise au prix d'une longue expérience, de beaucoup d'efforts, de motivation et n'est spécifique qu'à un seul domaine (Ericsson & Charness, 1994 ; Ericsson, Krampe & Tesch-Römer, 1993). Les experts sont des personnes capables de mobiliser efficacement de nombreuses connaissances secondaires spécifiques en mémoire à long terme mais leurs capacités primaires seraient les mêmes que tout un chacun (Tricot, 2012 ; Tricot & Sweller, 2014, 2016). Apprendre des compétences nouvelles d'un point de vue évolutif est nécessaire au succès économique des individus, mais ces derniers n'apprennent pas aussi facilement qu'espéré, parce qu'apprendre demande beaucoup d'efforts et de motivation. En effet, l'acquisition des compétences académiques ne pourrait pas s'appuyer sur les systèmes naïfs seuls de manière suffisamment efficace puisqu'ils ne sont pas adaptés à ces nouvelles connaissances (Geary & Berch, 2015). Les écoles sont des lieux où émergent des compétences qui ne peuvent pas apparaître ailleurs, d'où l'importance capitale de la mémoire de travail, d'un focus motivationnel sur l'effort et d'instructions explicites organisées.

La psychologie évolutive de l'éducation propose une fondation théorique pour (i) conceptualiser l'apprentissage et les motivations à apprendre, (ii) générer des hypothèses testables empiriquement sur l'apprentissage et la motivation et (iii) discuter des implications au sujet de la compréhension et mettre à l'épreuve l'éducation. C'est l'étude de la relation entre les connaissances naïves et les habiletés, les biais d'attribution et d'inférence qui en découlent ainsi que de l'influence de cette relation sur l'apprentissage académique, notamment dans les écoles (Geary, 2008). Cette conception suppose que les aspects de l'esprit et du cerveau humain ont évolué pour attirer l'attention des individus et faciliter les processus d'information correspondant aux connaissances naïves. Ces habiletés primaires sont considérées comme modifiables et adaptables aux conditions locales. De plus, les enfants seraient intrinsèquement motivés pour apprendre ce qui a trait aux connaissances naïves : leur attention et leurs comportements mèneraient à des expériences qui, automatiquement et intrinsèquement, mettraient en scène et adapteraient les systèmes naïfs aux conditions locales. Enfin, les mécanismes cognitifs acquis au

cours de l'évolution permettraient aux individus de faire face à des variations sociales et écologiques durant leur vie (*e.g.* la capacité de créer un espace mental des possibilités futures ; intelligence fluide qui permet de s'adapter à de nouveaux problèmes, Cattell, 1971).

L'apprentissage secondaire correspond à l'acquisition d'informations et de compétences culturelles par le biais de mécanismes qui ont évolué pour permettre aux individus de répondre à la nouveauté et aux modifications de l'environnement au cours de leur vie, permettant le transfert vertical de connaissances culturelles (Geary, 2008). Particulièrement, cet apprentissage nécessite les mécanismes (i) d'adaptation des systèmes naïfs, (ii) de la mémoire de travail et ceux (iii) de l'intelligence fluide (mécanismes de résolution de problèmes conscients) pour générer les simulations mentales des dynamiques en jeu (sociales, écologiques, physiques) et des comportements permettant l'adaptation aux modifications environnementales. L'intelligence fluide permettrait la transformation des systèmes naïfs pour répondre à de nouveaux problèmes et construirait les compétences secondaires. Ainsi, on apprendrait à écrire en se rendant compte qu'on peut influencer les autres par ce biais (psychologie naïve) ; la compréhension de la lecture est basée sur la théorie de l'esprit et son apprentissage est lié à la compréhension du langage oral (découpé en syllabes). Parce que les romans impliquent souvent des thèmes liés aux connaissances naïves (relations amoureuses, dynamiques sociales), les individus s'engageraient plus facilement dans leur lecture (Geary, 2008).

Les enfants sont curieux face à la nouveauté et sont motivés pour apprendre leur culture. C'est suffisant pour leur faire débiter l'école mais pas assez pour les maintenir motivés. Pour maintenir cet engagement dans l'apprentissage, la psychologie évolutive de l'éducation (Geary & Berch, 2015) propose de (i) jouer sur les premières années d'école lorsque la distinction entre connaissances primaires et secondaires est encore floue pour les enfants et leur apprendre les compétences qui vont leur permettre de maintenir une motivation académique constante, et (ii) faire comprendre aux apprenants qu'apprendre demande des efforts (valorisation de l'effort). La « bonne » méthode d'instruction (dirigée ou exploratoire) n'est pas prédéterminée et doit être testée au cas par cas (Geary & Berch, 2016). Le meilleur type de pédagogie devrait néanmoins tenir compte (i) des instructions, (ii) du contexte de la classe (s'il est proche des problèmes quotidiens ou non) et (iii) de l'utilisation de mécanismes liés aux connaissances primaires ou secondaires ainsi que des variables modératrices (notamment la capacité en mémoire de travail).

Par exemple, en mathématiques, utiliser un habillage de problèmes de la vie de tous les jours pertinents dans le cadre d'une tâche favoriserait la compréhension de sa structure mais réduirait certaines capacités de transfert des apprenants (De Bock, Deprez, Van Dooren, Roelens & Verschaffel, 2011 ; Kaminski *et al.*, 2006 ; Kaminski, Sloutsky & Heckler, 2008).

Les assumptions et les recommandations de la psychologie évolutive de l'éducation s'appuient sur une architecture cognitive particulière dont les composants et processus peuvent s'apparenter à ceux de la sélection naturelle. Ces éléments et les différents types de connaissances pris en considération ont inspiré un changement majeur dans la façon de penser la charge cognitive.

3.2 Les mécanismes en jeu et la question de la charge cognitive

Les modèles classiques de l'architecture cognitive mettent en avant au moins deux composantes : (i) une mémoire à long terme à capacité illimitée comme stockage des informations notamment sous forme de schémas et (ii) une mémoire de travail à capacité limitée, responsable des pensées conscientes et des apprentissages (Tricot, 1998 ; Sweller, 2004). La mémoire de travail a une capacité limitée en quantité et en temps (Paas & Ayres, 2014) : les individus peuvent retenir entre six éléments actifs en mémoire de travail (Miller, 1956), ou quatre éléments selon Cowan (2001, 2010) et les maintenir en mémoire 20 secondes sans répétition/rafraîchissement (Peterson & Peterson, 1959). Cette capacité dépend du domaine de connaissances activé. Si la mémoire de travail est d'abord décrite comme un système unique gérant les informations nouvelles et familières de la même façon (Atkinson & Shiffrin, 1968), il s'avère en réalité que les traitements des informations nouvelles et familières ne sont pas identiques. Face à des informations nouvelles, non familières, la capacité de la mémoire de travail est bien limitée à six items (mémoire de travail à court terme) mais face à des informations pour lesquelles on dispose de connaissances antérieures, la capacité est plus ou moins augmentée via la mise en place de schémas en mémoire à long terme (Ericsson & Kintsch, 1995). L'apprentissage permet de développer des connaissances sous formes de schémas aisément mobilisables dans la mémoire de travail (réduction de la charge cognitive associée) parce que ces schémas sont alors traités comme un seul item (Sweller *et al.*, 2011). Les informations complètement nouvelles sont organisées aléatoirement (pas de concept de rangement préalable), puis, en fonction de l'expérience, elles sont évaluées par rapport à leur utilité et sont organisées en conséquence

(Sweller, 2004). La limitation de la mémoire de travail est évolutive puisqu'elle permet d'éviter le traitement d'une infinité de possibilités dans l'espace problème de notre environnement. En effet, face à une situation nouvelle, nous pouvons mettre en œuvre des stratégies fin/moyen ou essai/erreur, soit procéder par analogie avec une situation connue et, à chaque fois, vérifier l'état de la situation par rapport à notre but. Cependant, cela est extrêmement coûteux tant au niveau des efforts cognitifs que du temps. Grâce à notre mémoire de travail limitée, les combinaisons des possibles que nous étudions sont seulement celles qui « font sens » (Tricot, 2012), la mémoire de travail faisant le lien entre la mémoire à long terme et l'environnement. Les connaissances antérieures, lorsqu'elles sont disponibles, sont plus efficaces que les stratégies générales de résolution de problème : donner la consigne d'utiliser de telles stratégies profite aux novices mais pas aux experts (Youssef-Shalala, Ayres, Schubert & Sweller, 2014). Les limitations de la mémoire de travail (dans l'apprentissage de nouvelles tâches) et sa capacité à coopérer avec la mémoire à long terme (pour des tâches familières) ont permis aux êtres humains de s'adapter efficacement à des situations complexes et d'acquérir des connaissances et des compétences tout aussi complexes (Paas & Ayres, 2014).

L'acquisition des connaissances spécifiques secondaires requiert donc (i) une mémoire à long terme (stockage de l'information illimité), (ii) un mécanisme pour acquérir cette connaissance (enseignement, imitation), (iii) une mémoire de travail afin de limiter la quantité de connaissances nouvelles acquises et s'assurer que les connaissances en mémoire à long terme ne soient pas altérées (réorganisation pertinente) et (iv) une mémoire de travail à long terme (processus permettant la mobilisation rapide des connaissances à long terme en mémoire de travail, dirigé vers l'action) (Tricot & Sweller, 2014, 2016). Pourquoi a-t-on évolué pour avoir une mémoire à long terme illimitée et une mémoire de travail extrêmement limitée ? L'architecture cognitive humaine aurait vraisemblablement évolué de la même façon que les autres structures et fonctions biologiques (Sweller, 2004). En tant qu'entité du monde naturel, elle partagerait des bases communes avec d'autres systèmes de traitement de l'information naturels comme ceux de l'évolution par sélection naturelle. Ce système cognitif naturel dépendrait de cinq principes (Sweller, 2016 ; Sweller & Sweller, 2006) :

(i) Le premier est la *capacité de stockage de la mémoire à long terme* (comparable au génome), les connaissances se construisant sur des connaissances.

(ii) Le deuxième est le *principe d'emprunt et de réorganisation* qui permet de construire rapidement des connaissances (comparable à la fusion de deux individus pour en former un nouveau). Les connaissances présentes dans la mémoire à long terme sont empruntées aux autres êtres humains via imitation et enseignement par exemple puis reconstruites par chacun (sous forme de schémas).

(iii) Le troisième est que *le hasard permet de générer de nouvelles informations* (comparable aux mutations aléatoires qui sont testées par l'environnement). Quand les connaissances antérieures sont insuffisantes, les individus procèdent par essais/erreurs, fin/moyens. Sans savoir quelle alternative est la meilleure, toutes les possibilités envisagées (déjà limitées par la mémoire de travail) sont testées et de là se forment les nouvelles connaissances.

(iv) Le quatrième est le fait que les nouvelles connaissances sont générées dans la *mémoire de travail dont la capacité est limitée* (comparable au fait que les mutations génétiques sont rares car corrigées et orientées par l'environnement). Face à un nouveau problème, les individus sont contraints par le temps. Grâce à la mémoire de travail limitée, les solutions testées sont celles qui font sens au regard de l'environnement. Tous les changements en mémoire à long terme se font via la mémoire de travail, progressivement, limitant ainsi le risque de destruction des informations en mémoire à long terme.

(v) Le cinquième est le *principe d'organisation et de lien avec l'environnement* (comparable au système épigénétique). L'information stockée en mémoire à long terme oriente les attentes et les actions face à une situation (mémoire de travail à long terme, Ericsson & Kintsch, 1995), le but étant de survivre dans un environnement. La mémoire de travail n'est limitée que lorsque des informations nouvelles sont en jeu. Face à des informations connues, la mémoire de travail peut gérer énormément de connaissances qui ont été stockées en mémoire à long terme.

Les deuxième et troisième principes correspondent aux mécanismes d'apprentissage par lesquels le système de traitement de l'information modifie les informations stockées. Cette conceptualisation de l'architecture cognitive humaine est importante à prendre en compte lorsqu'on s'intéresse à l'apprentissage et notamment aux procédures d'instructions comme le fait la théorie de la charge cognitive. Par exemple, si les connaissances en mémoire à long terme sont utiles face à des situations familières, elles sont inutiles lorsque les individus sont confrontés à de la nouveauté, menant les personnes à procéder par essais/erreurs. Pour être efficaces, les

instructions doivent pouvoir compenser cette structure manquante face à des informations nouvelles (Sweller, 2004).

3.2.1 La théorie de la charge cognitive

La théorie de la charge cognitive est une théorie de l'ingénierie pédagogique (*instructional design*) basée sur l'architecture cognitive humaine définie ci-dessus (Sweller, 2016 ; Sweller & Sweller, 2006). Le but de l'enseignement est de construire des schémas (*i.e.* des connaissances) en mémoire de travail pouvant être transférés en mémoire à long terme. L'objectif est de favoriser l'apprentissage ou l'accumulation de connaissances spécifiques à un domaine en mémoire à long terme. La contrainte principale est la capacité limitée de la mémoire de travail.

3.2.1.1 Les différents types de charge cognitive

La charge cognitive correspond à l'intensité du traitement cognitif mis en œuvre par un individu lorsqu'il réalise une tâche donnée dans un contexte particulier (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007). Cette conception permet une amélioration de la compréhension des mécanismes et des processus cognitifs en jeu lors de la réalisation d'une tâche. La notion de charge cognitive fait référence à la charge imposée en mémoire de travail par un environnement d'information ou de traitement. Comme la mémoire de travail est limitée, il convient de ne pas la saturer pour permettre l'apprentissage. Le but de la théorie de la charge cognitive est de créer des environnements d'apprentissage favorables (notamment via les instructions) en utilisant le lien entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme. Dans cette approche, la caractéristique importante de l'information est son interactivité avec les autres éléments d'apprentissage. Une faible interactivité caractérise une information qui peut être comprise sans références aux autres (Paas, Renkl & Sweller, 2003). La charge cognitive peut être :

(i) *Intrinsèque* : liée à l'interactivité des éléments du matériel à apprendre. Cette interactivité est gérée par la mémoire de travail et la mémoire à long terme (dont les schémas automatisés permettent d'augmenter l'interactivité sans augmenter le coût en mémoire de travail). Elle peut être réduite par production de schémas et par modification du matériel (informations plus ou moins interconnectées, Kirschner, Paas & Kirschner, 2011).

(ii) *Extrinsèque* : liée à la présentation des informations/consignes, aux aspects personnels et aux situations d'apprentissage qui doivent être traitées en même temps que la tâche (Choi, Van Merriënboer & Paas, 2014). C'est une charge inefficace qui interfère dans la relation entre l'individu et la tâche (partage attentionnel). Le but de la théorie de la charge cognitive est de réduire cette charge, notamment quand l'interactivité des éléments et donc la charge intrinsèque est forte (risque de saturation de la mémoire de travail).

(iii) *Germane* ou *essentielle* : liée à la présentation des informations et des activités d'apprentissage nécessaires comme la charge cognitive extrinsèque. Cependant, la charge *germane* favorise les apprentissages. Les ressources cognitives sont alors utilisées pour acquérir des schémas et les automatiser. Elle est également liée aux buts de l'apprenant.

Ces trois formes de charge cognitive sont additives et ne peuvent excéder les capacités de la mémoire de travail. La charge intrinsèque est irréductible et constitue la charge cognitive de base. La capacité restante en mémoire de travail est ensuite distribuée entre les charges *germane* ou extrinsèque. Si cette dernière est réduite, les ressources cognitives sont utilisées pour créer des schémas et réduire la charge intrinsèque en retour. Une augmentation de l'effort ou de la motivation pourrait augmenter les ressources cognitives disponibles. La théorie de la charge cognitive implique que plus l'expertise grandit, plus le contrôle de l'enseignant doit diminuer au profit de celui de l'apprenant (Paas, Renkl & Sweller, 2003).

La charge cognitive reflète l'interaction entre la tâche et l'apprenant. Elle est évaluée par les indicateurs de charge mentale, d'effort mental et de performance. On estime que les apprenants sont capables d'introspection concernant leurs processus cognitifs et peuvent renseigner leur degré d'effort mental (essence de la charge cognitive) lors d'une tâche (Paas, Tuovinen, Tabbers & Van Gerven, 2003). Ainsi, la plupart des études utilisent les items subjectifs, suffisamment sensibles, valides, fiables et non intrusifs (Paas, Van Merriënboer & Adam, 1994). Ce type d'items peut être utilisé pour évaluer un changement dans la charge cognitive totale à minima (Sweller, 2010) et semble sensible aux différences de charge cognitive intrinsèque notamment (Haji, Rojas, Childs, Ribaupierre & Dubrowki, 2015), même s'il ne permet pas de définir strictement la charge cognitive évaluée (Kirschner, Ayres & Chandler, 2011 ; Brunken Plass & Leutner, 2003). Le simple fait de demander à quel point la tâche est difficile donnerait un aperçu de la charge cognitive globale (Ayres, 2006). Un questionnaire de dix items subjectifs peut

permettre de différencier les trois types de charges cognitives (Leppink, Paas, Van der Vleuten, Van Gog & Van Merriënboer, 2013). La charge cognitive peut également être évaluée via d'autres mesures comme les mesures physiologiques (*e.g.*, le rythme cardiaque, l'activité cérébrale, la dilatation pupillaire, *etc.*) (Leppink, van Gog, Paas & Sweller, 2015).

En considérant les différents types de charge, la théorie de la charge cognitive peut expliquer plusieurs effets d'instructions et recommander certaines méthodes pour faciliter l'apprentissage. Ces dernières sont mises au défi par l'introduction du système cognitif naturel et des différents types de connaissances.

3.2.1.2 Les applications de la théorie de la charge cognitive

Une expérience fondatrice de la théorie de la charge cognitive a mis à jour l'effet de double modalité de présentation. En accord avec le modèle de Baddeley et Hitch (1974), la mémoire de travail est constituée des processeurs calepin visuo-spatial et boucle phonologique, coordonnés par un administrateur central. Ainsi, présenter des informations sous deux modalités auditive et visuelle augmenterait la taille de la mémoire de travail effective (Ginns, 2005 ; Owens & Sweller, 2008). Cette méthode de double modalité de présentation entraînerait un meilleur apprentissage comparativement à une seule forme de présentation notamment visuelle (Ginns, 2005). L'efficacité relative d'un mode de présentation (oral ou visuel) dépend de la complexité des informations à traiter pour un individu donné. Ainsi, pour des novices, une présentation écrite sera plus propice à l'apprentissage si le texte est complexe car l'information ne sera pas transitoire alors que le texte lu augmentera la charge en mémoire de travail (Leahy & Sweller, 2011 ; 2016).

Les applications de la théorie de la charge cognitive se retrouvent particulièrement dans la manière de concevoir et de présenter les consignes et les supports dans des tâches d'apprentissage, domaine qui concerne le deuxième principe du système cognitif naturel (emprunt et réorganisation). Le but est de rendre compte des processus cognitifs qui facilitent l'acquisition de nouvelles connaissances via de nouvelles procédures d'instruction (Sweller *et al.*, 2011). Par exemple, il vaudrait mieux initialement travailler sur des exemples de problèmes résolus à forte interactivité parce qu'ils permettent de focaliser l'attention des apprenants sur les éléments importants (plutôt que sur la simple reconnaissance du problème) tout en diminuant la

charge cognitive (Chen, Kalyuga & Sweller, 2016 ; Paas & Van Merriënboer, 1994 ; Retnowati, Ayres & Sweller, 2010). Présenter les informations de manière intégrée pourrait réduire les effets de dissociation de l'attention. Par exemple, un schéma devrait être légendé directement et non pas dans une partie à part (Ginns, 2006). Par ailleurs, ce type de matériel très légendé peut s'avérer contenir un surplus d'information inutile pour un expert ayant une mémoire de travail plus organisée et efficace (schémas spécifiques) (Kalyuga, Ayres, Chandler & Sweller, 2003). De manière générale, un bon support est conçu en fonction de la difficulté du matériel à apprendre et du niveau de connaissances des apprenants (Kalyuga *et al.*, 2003). Ainsi, l'effet de l'exemple de problème résolu avec des problèmes à forte interactivité est converti en effet de génération dans le cas d'une interactivité plus faible (Chen *et al.*, 2016), et un exemple corrigé est plus efficace auprès de novices qu'auprès des experts qui perçoivent alors un effet de redondance (Kalyuga, Chandler, Tuovinen & Sweller, 2001).

La mémoire de travail limitée contraint l'apprentissage de nouvelles informations. Jusqu'à récemment, cette capacité limitée s'appliquait à l'acquisition de toutes sortes d'informations (Paas & Sweller, 2012). Cependant, comme notre système cognitif a évolué pour traiter facilement et rapidement les informations primaires, le coût en mémoire de travail est minimisé pour ce type d'information (Geary & Berch, 2015). Les travaux inspirés de la théorie de la charge cognitive peuvent ainsi trouver une nouvelle explication dans l'approche évolutive. Par exemple, le célèbre effet de double modalité de présentation serait expliqué par le fait que cette double modalité de présentation est la façon habituelle d'apprendre à l'âge de pierre (Geary & Berch, 2015) : les individus apprenaient vraisemblablement en voyant un objet tout en ayant la description orale d'un pair (Paas & Sweller, 2012).

D'autres approches comme l'apprentissage constructiviste (Kirschner, Sweller & Clark, 2006) mettent l'accent sur le fait d'encourager les apprenants à générer leur propres connaissances (troisième principe du système cognitif naturel : génération par hasard) au lieu de présenter ces nouvelles connaissances avec des instructions explicites qui les parasiteraient comme le propose la théorie de la charge cognitive. Cette approche est soutenue par le fait que les individus apprennent très bien sans enseignement en dehors de l'école alors qu'ils apprennent difficilement à l'école. L'idée est donc tentante de vouloir utiliser les mêmes procédures d'apprentissage à l'école qu'en dehors de l'école même si plusieurs études ont exposé le fait que

les apprentissages guidés étaient bien plus efficaces (Kirschner *et al.*, 2006). En effet, selon la théorie de la charge cognitive, l'exploration d'un environnement complexe et nouveau entraîne une forte charge cognitive qui nécessite un guidage pour que l'apprentissage soit possible (libération des ressources pour la charge *germane*). L'effet du guidage dépendrait également de l'expertise et du domaine d'application des connaissances. Un guidage directif sera par exemple moins efficace sur des problèmes concernant des connaissances primaires comme la catégorisation d'être vivants (Tanguy *et al.*, 2013). Les apprenants pourraient ainsi être guidés dans leur découverte de nouvelles connaissances (de Jong, 2006).

La théorie de Geary permet également de poser un nouvel argument contre les approches de l'apprentissage constructiviste : elles ne différencient pas les types de connaissances en jeu (Sweller, 2008). En effet, le problème est que notre système cognitif n'a pas évolué pour apprendre les connaissances secondaires colossales que l'école nous demande d'assimiler. Quand nous sommes face à des connaissances secondaires, nous n'avons ni la motivation ni les capacités (inspirées par la génétique) pour les assimiler automatiquement. Rappelons que le développement de ces connaissances a pris des milliers d'années à toute une espèce. La théorie de la charge cognitive ne s'applique donc qu'aux connaissances secondaires (Sweller, 2008). L'idée que les apprenants puissent acquérir des connaissances secondaires de la même façon que les connaissances primaires serait donc fautive (Sweller, 2016). Un autre point important, soulevé par l'introduction des connaissances primaires et secondaires dans la théorie de la charge cognitive, est qu'il est impossible d'apprendre des compétences générales puisqu'elles sont déjà apprises (Ritchie, Bates & Deary, 2015 ; Sweller, 2016 ; Tricot & Sweller, 2014, 2016).

La théorie de la charge cognitive enrichie des apports de la psychologie évolutive de l'éducation met en avant deux points importants lorsqu'on s'intéresse à l'apprentissage : les supports d'enseignement devraient donner des informations explicites plutôt que de guider les apprenants de façon minimale et les enseignements devraient se concentrer sur les domaines spécifiques plutôt que d'essayer de faire apprendre des compétences générales déjà apprises (Sweller, 2016). Cette théorie suppose qu'un minimum de charge est nécessaire pour permettre l'apprentissage. Notamment, face à un matériel à faible interactivité, l'effet de l'exemple corrigé n'est pas probant et il vaut mieux inciter les apprenants à générer eux-mêmes leurs réponses

(Chen *et al.*, 2016). Une autre approche rend ainsi compte d'un ensemble de difficultés désirables pour l'apprentissage.

3.2.2 La théorie des difficultés désirables

Selon la théorie des difficultés désirables, les conditions qui favorisent la performance ne soutiendraient pas forcément la rétention en mémoire à long terme et le transfert, alors que les conditions qui créent un défi et diminuent « à priori » l'apprentissage optimiseraient souvent la rétention et le transfert (Bjork & Bjork, 2011). L'idée principale est de différencier la performance, objet mesurable, de l'apprentissage indirectement observable. En effet, la performance ne serait pas un bon indicateur de l'apprentissage puisqu'un apprentissage peut se faire sans performance et une performance peut être bonne sans apprentissage (Soderstrom & Bjork, 2015). La performance serait liée à la force de rappel des connaissances (accessibilité des représentations en mémoire) alors que l'apprentissage en tant que modification de la structure de la mémoire à long terme serait davantage lié à la force de stockage (inter-association des représentations en mémoire). Ainsi, plusieurs conditions d'apprentissage pourraient être considérées comme des difficultés désirables. Faire en sorte de confronter les apprenants aux conditions d'apprentissage les plus faciles possible ne serait donc pas toujours enviable pour l'organisation des connaissances en mémoire à long terme (Bjork, 1994). Au contraire, plus les conditions matérielles sont difficiles, plus le traitement serait profond et moins les représentations associées seraient susceptibles d'être oubliées (Bjork, 2013). Les effets des difficultés désirables seraient particulièrement visibles lorsque la performance est testée après un certain délai (Roediger & Karpicke, 2006). Trois difficultés désirables sont fréquemment étudiées dans la littérature :

(i) Le fait de varier les conditions d'apprentissage plutôt que de les organiser de façon constante et prévisible pour les apprenants. Si les conditions sont invariantes, les apprentissages sont contextualisés et leur rappel est favorisé dans ce même contexte. Les performances ne sont cependant pas meilleures lors d'une tâche de transfert ou lors d'un rappel différé. Cet argument s'entend d'un point de vue évolutif puisque les conditions d'apprentissage au cours de l'évolution n'ont sans doute pas toujours été immuables. De la même façon, il semble délétère à long terme de présenter automatiquement un retour aux apprenants sur leur performance à des problèmes

mathématiques (Fyfe & Rittle-Johnson, 2017) : si le retour est automatique, les apprenants auraient tendance à moins s'investir dans la tâche.

(ii) Le fait d'espacer les sessions/instructions plutôt que de les regrouper sous un même thème. L'objectif est de donner le temps aux apprenants de créer des schémas et d'intégrer les informations entre elles. Effectivement, si l'enseignant présente un cours sur le théorème de Pythagore, les apprenants savent pertinemment que tous les exercices qu'ils auront à faire dans le cadre de ce cours feront appel à ce théorème (Rohrer, Dedrick & Stershic, 2015). Ainsi, mélanger les thèmes requiert des ressources cognitives pour que les apprenants identifient le problème et choisissent la stratégie de résolution adéquate, mais favorise aussi les capacités de compréhension et de rétention à long terme. L'apprentissage massé (par thématique) peut donner l'illusion d'apprendre de façon très efficace mais l'apprentissage espacé donne en réalité de meilleurs résultats (Kornell & Bjork, 2008). Lors d'un cours sur l'art, le regroupement par thématique (par artiste) mettrait l'accent sur les points communs des objets alors qu'intercaler les thèmes rendrait plus difficile l'identification des points communs (traitement plus profond) et favoriserait la distinction des différences. On peut aussi penser que lors d'un apprentissage espacé, les connaissances sur un thème sont réactivées plus fréquemment, rendant l'apprentissage plus efficace.

(iii) Le fait de faire passer des tests plutôt que présenter simplement les cours (effet de génération, Bjork & Kroll, 2015). L'approche des difficultés désirables considère que rechercher la solution par soi-même plutôt que de voir la solution est un moyen d'apprentissage efficace quand bien même la performance initiale est médiocre et les erreurs nombreuses. Faire des erreurs et avoir un feed-back juste après serait favorable à la rétention en mémoire du feed-back et de la bonne réponse (Potts & Shanks, 2014). Les tests présentent aussi des bénéfices métacognitifs puisqu'ils mettent l'accent sur les points à travailler. Il est donc important pour les apprenants de se tester et non pas de s'exposer de nouveau au matériel lors d'une révision par exemple. Le problème est que les tests à l'école sont perçus comme des moyens d'évaluation autant par les apprenants que par les enseignants et non comme des moyens d'apprentissage.

Ces difficultés désirables augmentent à priori la charge cognitive en mémoire de travail mais engendreraient également un traitement plus profond des informations. Elles sont désirables car elles favorisent l'encodage et le rappel et supportent ainsi les apprentissages, la compréhension et le souvenir. Cependant, si l'apprenant n'a pas les connaissances ou les compétences nécessaires

pour répondre à ces difficultés, elles deviennent des difficultés indésirables (Bjork & Bjork, 2011).

L'approche des difficultés désirables est particulièrement intéressante dans le domaine de l'apprentissage multimédia dans lequel plusieurs sources d'informations doivent être intégrées. Par exemple, les informations visuelles et auditives conjointes augmentent les performances directement après la tâche comme le prévoit la théorie de la charge cognitive. Néanmoins, lorsqu'un délai est ajouté à la tâche, le texte et les images (modalité visuelle unique) entraînent de meilleures performances (Schweppe & Rummer, 2016). Les présentations visuelles cumulées, alors qu'elles augmentent la charge cognitive, supporteraient donc l'apprentissage à long terme.

Que la charge cognitive ait des effets positifs ou négatifs, il est nécessaire de la prendre en considération lors de tâches d'apprentissage et de comprendre l'influence que les types de connaissances peuvent avoir sur elle. Par ailleurs, les connaissances primaires servant de base à l'élaboration des connaissances secondaires, il serait intéressant d'explorer la possibilité d'utiliser les connaissances ou mécanismes primaires pour favoriser l'apprentissage des connaissances secondaires.

3.3 Favoriser l'apprentissage grâce aux connaissances primaires

On apprend « une » langue française en tant que connaissance primaire de façon rapide et sans effort. Elle dépend de notre milieu de vie direct. A l'école, on apprend « la » langue française (Tricot & Roussel, 2016) et d'autres formes d'oral comme les exposés qui, bien que construites sur des connaissances primaires, demandent des efforts en tant que connaissances secondaires (Sweller *et al.*, 2011). Est-ce qu'il est alors possible d'utiliser les connaissances primaires pour faciliter le développement des connaissances secondaires ? De manière naturelle, lorsqu'on manque de connaissances sur un sujet, on a tendance à ancrer nos comportements dans des connaissances primaires. Par exemple, avant d'apprendre à soutenir la compréhension et l'apprentissage des élèves, les enseignants s'appuient sur leurs habiletés de communication sociale (Dessus, Tanguy & Tricot, 2015).

Les connaissances primaires s'adaptent à l'environnement à travers l'expérience et constituent la base de l'acquisition des connaissances secondaires (Geary & Berch, 2016 ; Tricot & Roussel, 2016). Cependant, il est naïf de croire qu'il suffit de dire aux enfants de jouer, d'explorer ou d'imiter pour apprendre des connaissances secondaires comme dans l'approche de la pédagogie constructiviste (Kirschner *et al.*, 2006). Tout simplement car ces mécanismes sont primaires et ne suffisent pas à l'acquisition de connaissances secondaires (Geary & Berch, 2016). Ce serait en effet grandement sous-estimer la difficulté des connaissances secondaires. Selon la psychologie évolutive éducative, pour faciliter l'acquisition de connaissances secondaires, il faudrait faire entendre aux apprenants que le processus d'apprentissage est complexe et s'appuyer sur l'attrait de la nouveauté et de l'importance culturelle de ces connaissances (Geary, 2008). S'aider des mécanismes primaires permettrait d'apprendre plus facilement et de continuer à apprendre même lorsque la différence entre les connaissances primaires et secondaires est extrêmement grande. Par ailleurs, les habiletés secondaires développées dans un environnement culturel particulier reflètent la cooptation des compétences primaires pour des buts différents des buts originaux évolutifs. Par exemple, les personnes surdouées auraient une meilleure adaptation des habiletés primaires pour développer leurs habiletés secondaires. Les êtres humains ont donc bien la capacité d'utiliser les habiletés primaires au profit des connaissances secondaires (Geary, 2005). Les deux types de connaissances sont étroitement liés dans les différents domaines d'apprentissage. Par exemple, la notion de nombre découle de la notion de quantité et la géométrie est basée sur des habiletés primaires de navigation. Les enfants mettent en scène les habiletés primaires par le jeu : ils s'amuse à compter leurs jouets et explorent leur habitat.

L'approche de Chi et Wylie (2014) montre qu'il est possible d'utiliser des mécanismes auxiliaires pour apprendre des connaissances secondaires sans pour autant minimiser la tâche à accomplir. Pour ces auteurs, chaque mode d'apprentissage correspond à un type de traitement des connaissances en mémoire, les connaissances demeurant les mêmes quel que soit le mode de traitement. Ces modes peuvent être classés du moins au plus efficace : passif (réception des informations) < actif (manipulation des supports) < génératif (construction d'informations au-delà de ce qui est présenté) < interactif (deux individus ou plus collaborent pour co-construire les connaissances). Certes, les modes plus efficaces comportent des tâches plus engageantes (lire un texte étant considéré comme moins motivant que discuter de notre compréhension du texte) mais également plus coûteuses notamment en termes de temps et de connaissances antérieures. Par

ailleurs, les modes efficaces peuvent s'apparenter à des mécanismes primaires (interaction sociale). Cette approche va à l'encontre de la théorie de la charge cognitive et apporte un argument pour la théorie des difficultés désirables puisque les activités les plus demandeuses en ressources cognitives ont un effet positif plus important sur l'apprentissage (les apprenants plus investis et motivés par les activités ont une charge cognitive *germane* plus intéressante). L'idée serait donc de déterminer les forces des mécanismes primaires pour promouvoir l'apprentissage des connaissances secondaires (Geary & Berch, 2016).

D'autres études ont apporté des arguments en faveur du fait que les connaissances primaires seraient le socle de toute connaissance. Les individus sont capables d'apprendre comment un mécanisme primaire peut être appliqué à différents contextes grâce à la consigne que le problème peut être résolu par une stratégie qu'on a déjà apprise. En effet, sous certaines conditions (consignes explicitant le fait d'utiliser une stratégie donnée), des individus novices peuvent apprendre à utiliser des stratégies primaires pour résoudre une variété de problèmes secondaires spécifiques, favorisant l'apprentissage et le transfert (Youssef *et al.*, 2012). Il n'est pas possible d'apprendre quelque chose qui est déjà acquis (connaissances primaires) mais il est possible de signifier aux apprenants que ces stratégies primaires sont intéressantes à mettre en œuvre dans un problème lié aux connaissances secondaires. Habituellement, les stratégies générales, comme l'heuristique fin/moyens ou l'heuristique génération/test (stratégie non guidée par les buts), sont utilisées lorsque les connaissances antérieures sur le domaine sont insuffisantes. Elles génèrent peu de nouvelles connaissances quel que soit le domaine, notamment si la pratique associée est minimale (Sweller *et al.*, 2011). Ainsi, expliquer aux novices que les stratégies de résolution de problème générales leur permettraient de résoudre les problèmes présentés favorise l'apprentissage, les stratégies primaires agissant comme substitut aux connaissances manquantes et permettant la génération de nouvelles solutions. L'idée d'essayer de mettre en place des activités faisant appel aux connaissances primaires des apprenants est donc prometteuse, notamment lorsqu'ils ont peu de connaissances antérieures.

En effet, via le biais d'instructions promouvant leur usage, les connaissances ou habiletés primaires faciliteraient l'apprentissage des connaissances secondaires (Paas & Sweller, 2012). Les connaissances et compétences primaires qui demandent peu ou pas de ressources cognitives, alors qu'elles n'ont pas besoin d'être enseignées, pourraient être un atout indéniable pour

améliorer l'acquisition des connaissances secondaires. L'approche de Geary permet de construire un nouveau contexte pour réfléchir les apprentissages et la présentation d'instructions. Notamment, elle propose un champ d'investigation vaste à la question « comment utiliser les connaissances/habiletés primaires pour faciliter l'apprentissage des connaissances secondaires ? ». Trois thèmes de recherches peuvent être discutés sous cet angle.

3.3.1 La mémoire de travail collective et la collaboration

Lorsqu'un apprenant collabore dans une tâche d'apprentissage, il peut bénéficier des capacités des mémoires de travail de ses collègues. Les individus du groupe sont considérés comme des systèmes de traitement de l'information pouvant créer un espace de travail commun (Kirschner, Paas & Kirschner, 2011 ; Kirschner, Paas, Kirschner & Janssen, 2011). Chaque mémoire de travail se trouve alors regroupée dans une seule mémoire de travail collective. La capacité totale de la mémoire de travail est donc virtuellement augmentée. De la même façon, la charge cognitive est partagée (tout comme la charge *germane*). Les informations étant la clé du succès, nous aurions évolué pour communiquer et coordonner nos actions. La collaboration (à minima l'observation et l'imitation d'autrui) est le moyen primaire de récupérer des informations pour nourrir la mémoire à long terme (Sweller & Sweller, 2006). L'apprentissage serait donc naturellement une situation de face à face collaboratif. En tant qu'habileté primaire, le fait de se coordonner requiert peu de ressources cognitives mais les échanges spécifiques à la tâche d'apprentissage (liée aux connaissances secondaires) exigent un coût cognitif. La question est alors de déterminer le rapport coûts/bénéfices acceptable du fait de diviser la charge cognitive liée au problème (et autres bénéfices comme la mise en commun des connaissances, les explications, les corrections d'erreur, l'apprentissage par observation) et de diviser la charge cognitive liée à l'activité de collaboration sur une tâche secondaire (coûts de coopération, obstacle dans la remémoration) (Nokes-Malach, Richey & Gadgil, 2015). Face à des tâches complexes, l'activité collaborative semble plus efficace alors que face à des tâches moins complexes, l'activité individuelle est préférable (augmentation du nombre de schémas produits car les ressources ne sont pas utilisées pour collaborer/communiquer) (Kirschner, Paas & Kirschner, 2011; Kirschner, Paas, Kirschner & Janssen, 2011). La collaboration dans l'apprentissage est donc un mécanisme à mettre en avant dans certaines situations. Ces résultats sont à interpréter avec précaution puisque la plupart des études inspirées de la théorie de la

charge cognitive utilisent des environnements structurés qui minimisent l'effet de la motivation et des facteurs sociaux impliqués dans la collaboration (paresse sociale, échanges peu efficaces, *etc.*).

Cependant, l'effet de la mémoire de travail collective montre bien que les compétences primaires de communication/collaboration avec nos pairs peuvent être utilisées pour réduire la charge cognitive individuelle et motiver les apprenants lors de l'acquisition de connaissances secondaires. Néanmoins, dans nos sociétés, nous apprenons de moins en moins en situation de face à face (humain) collaboratif mais face à un ordinateur (Paas & Sweller, 2012). Est-ce qu'il est toujours possible d'apprendre face à un ordinateur et non pas face à une personne ? La réponse tendrait à être oui. Les individus ont tendance à traiter avec les nouvelles technologies comme si elles étaient de vraies personnes parce que le système cognitif n'a pas évolué assez vite pour assimiler ces technologies (Reeves & Nass, 1996). Les indices sociaux des messages multimédia peuvent ainsi susciter une réponse sociale entraînant un traitement plus profond des processus cognitifs et un meilleur apprentissage. Ces indices provoquent un sentiment de partenariat avec l'apprenant qui l'incite à davantage s'engager dans la tâche, favorisant l'apprentissage (Mayer & DaPra, 2012). Par exemple, on apprend plus facilement quand le cours est présenté sous forme de dialogue (première et deuxième personnes du singulier utilisées) que sous forme impersonnelle (Moreno & Mayer, 2004) ou quand la voix qu'on écoute est celle d'un humain et pas celle d'une machine (Atkinson, Mayer & Merrill, 2005).

Si ce premier thème de recherche peut être lié au domaine de la psychologie naïve, les deux suivants font davantage appel à celui de la physique naïve.

3.3.2 Le mouvement humain

Apprendre par observation et imitation est une stratégie très efficace (Van Gog, Paas, Marcus, Ayres & Sweller, 2009). Les neurones miroirs constituent la base neurale de ces apprentissages. Les mêmes réseaux neuronaux sont en effet activés lorsqu'on fait une action, lorsqu'on regarde quelqu'un faire cette même action et lorsqu'on l'imagine (Rizzolatti & Craighero, 2004 ; Cross, Hamilton & Grafton, 2006). Les neurones miroirs sont les médiateurs de l'imitation : ils permettent la compréhension des actions faites par autrui et préparent le cerveau à l'action observée. L'imitation serait donc rationnelle : l'individu sait comment l'autre a fait et pourquoi il

l'a fait. Ainsi, le fait de montrer aux apprenants une personne effectuant une procédure motrice ne devrait pas ou peu charger la mémoire de travail. Pour un apprenant novice, l'apprentissage par observation serait plus efficace puisqu'il éviterait de chercher la solution par lui-même de façon inefficace (pas de connaissances antérieures). Plusieurs études montrent qu'une représentation dynamique de la procédure est plus efficace pour l'apprentissage (application des gestes) qu'une représentation statique de cette procédure (Wong *et al.*, 2009 avec des élèves de primaires face à une procédure de pliage origami ; Ayres, Marcus, Chan & Qian, 2009 avec des étudiants à l'université face à une procédure de nouage et de puzzles ; Garland & Sanchez, 2013 avec une procédure de nouage, effet favorisé lorsque la vue est à la première personne (au-dessus de l'épaule du manipulateur plutôt qu'en face à face) ; Castro-Alonso, Ayres & Paas, 2015 avec une construction lego). Selon la théorie de la charge cognitive, les informations dynamiques devraient être plus coûteuses à traiter que les informations statiques, notamment parce que l'individu doit maintenir en mémoire une information qui évolue. Cependant, il semblerait que lorsqu'il s'agit de mouvements humains, cette charge ne s'applique pas ou peu. Nous aurions en effet évolué pour apprendre par imitation et l'objet de nos imitations serait le mouvement humain.

De manière générale, les présentations dynamiques favorisent l'apprentissage parce que les individus peuvent se représenter la temporalité et les étapes des mouvements alors que dans une représentation statique, ils infèrent seulement les étapes. Il est cependant nécessaire de maintenir en mémoire ces étapes (informations transitoires) (Van Gog *et al.*, 2009). Les neurones miroirs sont également activés lorsqu'un robot fait un mouvement, lorsqu'on s'imagine faire l'action ou lorsqu'on lit une description de l'action. Les représentations dynamiques seraient préférentiellement efficaces lorsque des mouvements humains sont à reproduire parce que ce type de mouvement est traité automatiquement par les neurones miroirs (connaissances primaires) et le caractère transitoire des informations impacte donc peu leur intégration.

Ce deuxième thème de recherche est étroitement lié au troisième puisque le mouvement humain fait partie de la cognition incarnée.

3.3.3 La cognition incarnée

Les neurones miroirs sont la preuve que les humains ont évolué pour avoir une cognition incarnée, c'est-à-dire une architecture cognitive qui associe la perception et les actions corporelles pour permettre la maîtrise de l'environnement (Barsalou, 2010). Les processus cognitifs se développent à partir d'interactions entre les organismes et leur environnement et sont orientés par les buts (Rueschemeyer, Lindermann, Van Elk & Bekkering, 2009). Ces processus sont considérés comme davantage ancrés dans la perception et dans l'action que dans la manipulation d'objets abstraits. Or les expériences sensori-motrices comme le geste ou la manipulation directe d'objets sont des connaissances primaires qui pourraient faciliter l'acquisition des connaissances secondaires.

Par exemple, l'implication du système moteur le plus basique comme le geste diminue la charge cognitive durant l'apprentissage lorsqu'un objet est absent ou présent (Ping & Goldin-Meadow, 2010). Ce qui est important est partagé par le geste qui servirait d'aide-mémoire externe et libérerait la mémoire de travail. On pourrait également augmenter les compétences de lecture grâce au mouvement (Glenberg, Goldberg & Zhu, 2011). Dans cette étude, des enfants écoutent la lecture d'un texte décrivant certaines activités au sein d'une ferme et doivent imaginer les scènes ou les reproduire (mouvements des personnages) sur un support type playmobil ou sur un ordinateur. Les conditions dans lesquelles les enfants manipulent les objets (réellement avec les jouets ou virtuellement avec l'ordinateur) entraînent une meilleure compréhension du texte que l'imagination seule. Le besoin de manipuler (connaissance primaire) est efficace car il s'applique à un texte écrit (connaissance secondaire). Les auteurs ne discutent pas l'influence de la manipulation d'objet sur la charge cognitive en mémoire de travail, mais on peut imaginer que l'action de manipuler permettrait une réduction de la charge cognitive (Paas & Sweller, 2012). En tant que compétences primaires, le geste et la manipulation d'objets peuvent donc être utilisés pour acquérir les compétences secondaires associées au contenu pédagogique.

Le fait que l'environnement soit réel (manipulation directe des objets) ou virtuel (manipulation via un ordinateur par exemple) n'influence pas l'apprentissage : les conditions sont équivalentes (Baki, Kosa & Guven, 2011 ; de Jong, Linn & Zacharia, 2013 ; Zacharia & Olympiou, 2011). La manipulation, et non le caractère physique, est donc primordiale dans l'apprentissage. L'environnement virtuel pourrait même être plus efficace car plus facilement

interactif, mettant l'accent sur les éléments pertinents de la tâche comme dans une étude dans le domaine de l'apprentissage de la chimie complexe (Barrett, Stull, Hsu & Hegarty, 2015).

Récemment, des études ont montré que les enfants sont plus motivés et apprennent plus facilement des mots en langue étrangère lorsqu'ils effectuent les mouvements liés ou dépeints par les mots (Mavilidi, Okely, Chandler, Cliff & Paas, 2015 ; Toumpaniari, Loyens, Mavilidi & Paas, 2015). Le geste en tant qu'élément intermédiaire de concrétude entre l'action et la parole serait également favorable à l'apprentissage des matières plus abstraites comme les mathématiques (Novack, Congdon, Hemani-Lopez & Goldin-Meadow, 2014). Plus précisément, une étude montre que pour décrire des algorithmes de résolution de problèmes, les enfants utilisent spontanément le geste et sont moins performants si on les empêche d'utiliser ces gestes. Le geste aurait trois fonctions possibles : (i) transformer la pensée en « action », (ii) constituer une manière inconsciente d'attirer l'attention d'autrui ou (iii) être une aide à la pensée et aux simulations mentales. Le geste semble réduire la demande en mémoire de travail pour décrire les actions et aide les enfants à se souvenir de l'état du problème (Bucciarelli, Mackiewicz, Khemlani & Johnson-Laird, 2016).

Par ailleurs, les systèmes cognitifs incarnés sont davantage activés lorsqu'on regarde des mouvements humains que robotiques (Press, Bird, Flach & Heyes, 2005) ou quand les mouvements présentés sont naturels, fluides et non saccadés (Shimada & Oki, 2012). De la même façon, voir des mains en action aurait des effets positifs sur la perception, l'attention et la mémoire (Brockmole, Davoli, Abrams & Witt, 2013) quand bien même la présentation du mouvement sans les mains serait suffisante pour activer les mécanismes cognitifs incarnés (Wong *et al.*, 2009 ; Castro-Alonso *et al.*, 2014).

Ainsi, les êtres humains pourraient utiliser des habiletés primaires comme la collaboration (mémoire de travail collective), le mouvement humain et le geste pour favoriser leur apprentissage de connaissances secondaires. Ce travail propose de continuer ces recherches et de mettre à l'épreuve les bénéfices que peuvent apporter les connaissances primaires à l'apprentissage.

4 Synthèse des apports de la revue de littérature

Apprendre des connaissances secondaires est un processus qui demande des efforts conscients, beaucoup de temps et une grande motivation. L'école permet d'apprendre des connaissances culturellement importantes, difficiles à acquérir par soi-même ou par simples interactions sociales. Le problème principal est que les apprenants perdent rapidement leur motivation lorsqu'ils doivent s'exercer à utiliser des règles d'algèbre alors qu'ils sont toujours ravis de pratiquer leurs compétences sociales notamment pendant les pauses. En effet, à l'inverse des connaissances secondaires, les connaissances primaires pour lesquelles notre cerveau aurait évolué, sont intrinsèquement motivantes et ne demandent aucun effort pour être acquises et développées. Ces deux caractéristiques des connaissances primaires sont particulièrement intéressantes lorsqu'on cherche à les utiliser pour favoriser l'apprentissage des connaissances secondaires. La logique comme la capacité de raisonner formellement est une des connaissances secondaires les plus valorisées dans notre société actuelle. Elle est cependant facilement oubliée dans l'enseignement général, alors que les compétences de logique formelle des apprenants sont mises à l'épreuve dans toutes les autres matières enseignées. Les problèmes logiques ont par ailleurs l'avantage méthodologique de pouvoir facilement endosser des habillages différents. De plus, les syllogismes avec biais de croyance permettent d'investiguer les mécanismes de raisonnement liés aux systèmes 1 et 2.

Cette thèse cherche à mettre à l'épreuve l'approche de la psychologie évolutive de l'éducation et la différenciation des connaissances proposée. Elle s'inspire des travaux qui utilisent des mécanismes liés aux connaissances primaires pour faciliter l'acquisition des connaissances secondaires. Ainsi, nous espérons que l'utilisation de connaissances primaires dans un matériel de connaissances secondaires favorisera l'engagement des individus dans la tâche, leurs performances ainsi que leurs capacités de transfert.

5 Contribution empirique

Ce travail mêle la toute nouvelle psychologie évolutive de l'éducation et l'approche plus ancienne du raisonnement logique dont le changement de paradigme récent ne souligne que davantage l'intérêt de l'approche évolutive. Des tâches de raisonnement (connaissances secondaires) sont utilisées pour mettre à jour l'influence respective des connaissances primaires et secondaires via l'habillage des problèmes. Nos travaux ont un double objectif fondamental et appliqué : (i) mettre à l'épreuve le modèle des connaissances primaires et secondaires dans le cadre de la résolution de problèmes logiques et (ii) élaborer des bases méthodologiques (liées à la façon de présenter des contenus pédagogiques) simples à mettre en œuvre pour favoriser efficacement l'engagement et l'apprentissage des individus. La contribution empirique se découpe en deux parties.

La première partie (chapitre 5.1.) cherche à vérifier le potentiel effet bénéfique des connaissances primaires sur l'engagement émotionnel et cognitif comme sur la performance aux problèmes logiques, le sous-but étant de déterminer les éléments les plus propices à l'apprentissage. Pour cela, huit expériences ont été menées ([Annexe A](#) pour une synthèse des variables utilisées par expérience). Les participants répondent à différents types de problèmes logiques (règles conditionnelles, syllogismes avec ou sans biais de croyance selon les expériences). Nous avons fait varier l'habillage des problèmes (connaissances primaires ou secondaires) ainsi que leur ordre de présentation (connaissances primaires présentées en premier ou connaissances secondaires présentées en premier). Les problèmes présentés peuvent maximiser ou minimiser les connaissances antérieures disponibles. L'influence de la charge cognitive (faible ou forte) sur les deux types de connaissances est également étudiée dans les expériences 2 à 7 : les participants doivent remplir l'une des deux tâches cognitives utilisées, l'une interne au problème (les participants lisent le problème logique dont l'ordre des mots dans la phrase est inversé) et l'autre externe au problème (*Dot Memory Task*). La performance des participants est mesurée mais également leur plaisir à répondre aux questions, leur envie de trouver les bonnes réponses, leur confiance dans les réponses, la charge cognitive perçue ainsi que la vitesse de résolution des problèmes. L'hypothèse principale au regard de la littérature est que les connaissances primaires devraient favoriser la performance, le plaisir à répondre aux questions, l'envie de trouver les bonnes réponses, la confiance dans les réponses et diminuer la

charge cognitive perçue. Quant à la vitesse de résolution, elle est renseignée dans la plupart des études pour contrôler que les différences observées entre les connaissances primaires et secondaires ne sont que peu liées au temps passé sur la tâche.

La seconde partie (chapitre 5.2.) met les résultats du premier travail d'exploration (dont une analyse groupée est fournie dans la partie 5.1.10) à l'épreuve. Elle permet de proposer une façon de présenter les contenus pédagogiques peu coûteuse à mettre en œuvre afin de promouvoir l'investissement des individus et soutenir leur apprentissage. Cette méthode de présentation sera utilisée dans de futures études concernant l'apprentissage. Dans cette deuxième partie, l'idée principale est de confronter les participants à des connaissances primaires ou secondaires (en inter-groupe) et d'observer leurs réponses lors d'un test de transfert final. Trois expériences ont été menées. Dans les expériences 8 et 9, les participants sont confrontés à deux phases : une phase d'entraînement habillée de connaissances primaires ou secondaires et une phase de test final. Dans l'expérience 8, la phase d'entraînement est obligatoire alors que dans l'expérience 9, les participants ont le choix de continuer la phase d'entraînement ou de passer directement au test final. Enfin, dans l'expérience 10, les participants sont confrontés à trois phases : (i) une phase d'amorce constituée de problèmes à habillages de connaissances primaires ou secondaires, puis (ii) une phase d'entraînement constituée de connaissances secondaires et (iii) le test final.

5.1 Influence des connaissances primaires et secondaires dans la résolution de problèmes logiques

Cette première partie empirique vise à mieux cerner les influences relatives des types de connaissances sur la performance de résolution de problèmes logiques, mais aussi et surtout, sur l'engagement émotionnel et cognitif des participants dans cette tâche ainsi que la charge cognitive perçue. Pour cela, les problèmes logiques (règles conditionnelles ou syllogismes) varient en fonction de leur habillage. Les habillages liés aux connaissances primaires contiennent des références à la nourriture ou aux caractéristiques de la faune et les habillages liés aux connaissances secondaires des références à des règles de grammaire ou de mathématiques.

Par définition, les connaissances primaires tendent à renvoyer un aspect plus concret/familier que les connaissances secondaires. Toutefois, les caractéristiques de la faune, même dans l'environnement proche, peuvent être bien moins parlantes pour certains participants comme les élèves de collège et lycée que les règles de grammaire qu'ils doivent appliquer chaque jour. L'implication de la familiarité devrait donc être minime dans nos études. Plus précisément, conformément à la revue de littérature, la différence liée à la concrétude/familiarité réside principalement dans le caractère déontique des thèmes que nous n'avons pas manipulés. Afin de rendre compte de l'intérêt pour les différentes thématiques liées aux deux types de connaissances, un sondage a été mené tout au long des premières études ([Annexe B](#)). Les résultats ont mis en avant un intérêt général plus important pour les thématiques liées aux connaissances primaires. Cependant, si l'intérêt peut être considéré comme modérateur de l'ensemble des variables que nous avons étudiées (Tobias, 1994), la différence entre connaissances primaires et secondaires est loin de se réduire à cette dimension. Les résultats du sondage illustrent également que les individus interrogés ne déclarent pas préférer systématiquement les thématiques liées aux connaissances primaires (par rapport aux thématiques liées aux connaissances secondaires). De plus, l'ensemble des études montre que le type de connaissances influence la majorité de nos variables de façon systématique (dont une variable s'apparentant à l'intérêt), et ce, même lorsque les termes utilisés sont connus ou inconnus. Par ailleurs, pour un type de connaissances donné, les performances des participants ne mettent pas en avant des différences récurrentes selon les thématiques ([Tableau 3](#)).

Tableau 3 : Influence des thématiques utilisées sur la performance moyenne des participants pour chaque type de connaissances. Les résultats sont ceux de t-tests à mesures répétées.

Expérience	Thématiques connaissances primaires						Thématiques connaissances secondaires					
	Nourriture		Caractéristiques faune		<i>t</i>	<i>p</i>	Grammaire		Mathématiques		<i>t</i>	<i>p</i>
	M	σ	M	σ			M	σ	M	σ		
4a (n=146)	69.35	32.53	69.86	23.66	-0.24	.81	56.34	30.34	65.24	30.71	-4.05	<.001
4b (n=147)	59.35	30.58	64.62	23.19	-2.47	.01	49.83	27.05	55.44	28.89	-2.41	.02
5 (n=204)	66.79	22.40	62.13	21.27	3.26	.001	45.34	26.89	64.58	23.64	-7.28	<.001
6 (n=102)	58.82	18.16	61.03	21.27	-1.19	.23	42.89	21.51	45.34	19.50	-1.08	.28
7 (n=212)	84.43	23.33	85.97	21.37	-1.16	.25	73.23	25.64	65.57	23.33	4.30	<.001

5.1.1 Expérience 1

Cette première étude explore l'influence des types de connaissances sur la performance et d'autres variables importantes dans l'apprentissage comme le fait d'avoir plaisir à faire les tâches ainsi que la charge cognitive perçue.

5.1.1.1 Participants et procédure

Les participants sont 138 étudiants (31 hommes, 107 femmes) d'âge moyen 21.19² ans (± 4.04) recrutés sur les groupes Facebook universitaires français. La passation a été faite en ligne grâce au logiciel Qualtrics et dure environ 20 minutes. Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 43.44/100 (± 29.48) (questionnaire d'auto-évaluation). Les consignes sont les suivantes :

Nous allons maintenant vous proposer des énoncés. Chaque énoncé a valeur de règle. Cette règle est considérée comme absolument vraie. Pour chaque énoncé, plusieurs propositions vous seront présentées. Vous devrez juger de leur validité.

La règle conditionnelle est affichée en haut de la page internet. Par exemple, les participants peuvent lire :

En Tasmanie, si un fruit est rouge, alors les habitants locaux l'évitent ou Au sud de la Patagonie, si vous voulez dire bonjour à une personne, alors, vous devez froter votre front contre le sien. (habillages de connaissances primaires notés K1)

Dans un dialecte du nord de l'Europe, si vous dites que vous êtes « dans » un endroit, alors vous rajoutez un « n » à la fin du mot indiquant l'endroit ou En thermodynamique, à

² Dans la suite du texte, le point sera utilisé pour séparer les décimales à la place de la virgule.

une température et une pression données, si deux gaz parfaits ont le même volume, alors ils contiennent le même nombre de moles. (habillages de connaissances secondaires notés K2)

Si ofteg existe, alors hrit existe ou Si A existe, alors B existe. (habillages abstraits notés NK)

Les thèmes ont été choisis afin de minimiser l'influence des connaissances antérieures. Les participants répondent ensuite à 6 questions impliquant un *Modus Ponens* (MP, « *A. Est-ce que B ?* », e.g., « *En Tasmanie, un fruit est rouge. Est-ce que les habitants locaux l'évitent ?* »), un *Modus Tollens* (MT, « *Non B. Est-ce que A ?* »), une affirmation du conséquent (AC, « *B. Est-ce que A ?* »), un déni de l'antécédent (DA, « *Non A. Est-ce que B ?* ») et deux questions jouant le rôle de distracteur de type « *Non B. Est-ce que C ?* » et « *C. Est-ce que D ?* » (e.g., « *En Tasmanie, les habitant locaux font cuire un fruit. Est-ce que ce fruit est vert ?* »). Les participants répondent par « oui » (MP), « non » (MT) ou « peut-être » (AC, DA et les deux distracteurs, concernant les réponses considérées comme correctes) en cochant la case appropriée. Chaque participant est confronté à tous les problèmes mentionnés. L'ordre de passation peut être K1-K2-NK (n=35), K2-K1-NK (n=37), K1-NK-K2 (n=31) ou K2-NK-K1 (n=35). Pour chaque règle conditionnelle, en plus de leur (i) performance (exprimée en pourcentage), les participants renseignent sur une échelle visuelle analogique (de 0 à 100) (ii) à quel point réfléchir sur les phrases leur a plu (mesure de l'engagement émotionnel) et (iii) à quel point ils sont d'accord avec les phrases « *le sujet abordé était complexe* » et « *vous vous êtes beaucoup concentré(e) pour réaliser cette tâche* » (mesure de la charge cognitive perçue) ; (iv) la vitesse moyenne (nombre de problèmes résolus en une minute) pour chaque règle conditionnelle est également mesurée par Qualtrics (temps passé sur chaque page). Enfin, les participants répondent à quelques informations personnelles notamment leur niveau estimé en mathématiques.

Cette première étude devrait mettre en avant une influence des types de connaissances : les habillages de connaissances primaires devraient entraîner de meilleures performances, un plus grand plaisir ressenti à la tâche et une charge cognitive moindre.

Aucun effet d'ordre de présentation n'a été retrouvé (que ce soit en tenant compte des quatre modalités de passation ou de deux modalités : les connaissances primaires présentées en premier vs. les connaissances secondaires présentées en premier). Des modèles linéaires à mesures

répétées et des corrélations de Pearson ont été utilisés pour analyser les données. Dans un souci de représentativité des résultats, les moyennes sont notées M et les écarts-types (\pm). Les résultats non significatifs ne sont pas renseignés (sauf signification marginale). Toutes les variables de ce travail ont été centrées réduites et analysées avec R 3.3.2.

5.1.1.2 Résultats et discussion

Les problèmes ayant trait à la nourriture sont mieux réussis ($M=75.24\pm 20.85$) que tous les autres problèmes ($p < .001$) dont ceux ayant pour thème des règles sociales ($M=63.89\pm 16.06$). Concernant les problèmes à habillage de connaissances secondaires, celui ayant pour thème la grammaire ($M=59.18\pm 20.44$) a été moins bien réussi que celui sur la thermodynamique ($M=64.73\pm 17.33$) ($p < .001$). Les problèmes abstraits n'entraînent pas de différence de performance ($M=68.12\pm 19.98$ pour les mots inconnus et $M=66.55\pm 18.94$ pour les lettres) ($p = .86$). Conformément à la littérature, les inférences *MP* sont les mieux réussies ($M=92.39\pm 21.65$), puis les *MT* ($M=75,00\pm 37.27$), les *AC* ($M=34.78\pm 40.55$) et les *DA* ($M=28.02\pm 36.16$), toutes les différences sont significatives ($p < .01$). Les problèmes distracteurs sont bien réussis dénotant une implication importante des participants lors de la tâche ($M=88.41\pm 26.01$ pour les problèmes CD et $M=79.11\pm 32.71$ pour les problèmes non BC). La variable performance regroupe les scores aux six problèmes (les scores aux items distracteurs pouvant dénoter d'une certaine désorientation ; aucune différence n'a été retrouvée dans les modèles en fonction de la performance aux quatre inférences principales ou aux six inférences).

Les problèmes à habillage de connaissances primaires entraînent une meilleure performance, un investissement émotionnel plus fort et une charge cognitive ressentie plus faible que les problèmes à habillage de connaissances secondaires ou que les problèmes abstraits (Tableau 4). Par ailleurs, par rapport à un habillage abstrait, un habillage de connaissances secondaires amène des performances et un investissement émotionnel plus faibles ainsi qu'une charge cognitive ressentie plus forte. Cela pourrait s'expliquer par le nombre de mots plus important dans la condition connaissances secondaires (augmentation de la charge en mémoire de travail).

Tableau 4 : Résultats concernant l'influence des types de connaissances sur la performance, l'investissement émotionnel, la charge cognitive ressentie et la vitesse. Le χ^2 correspond à la comparaison de notre modèle avec le modèle nul. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires K1		Connaissances secondaires K2		Abstraction NK		K1-K2		K1-NK		K2-NK	
	M	σ	M	σ	M	σ	χ^2	<i>p</i>	χ^2	<i>p</i>	χ^2	<i>p</i>
Performance	69.56	15.66	61.97	16.14	67.33	17.64	113.95	<.001	7.92	.005	49.22	<.001
Investissement émotionnel	62.18	24.61	47.56	30.12	56.03	26.68	86.29	<.001	18.64	<.001	24.78	<.001
Charge cognitive	28.60	20.15	46.18	25.44	32.39	22.35	151.38	<.001	11.95	<.001	90.21	.04
Vitesse (pb/min)	7.91	13.43	7.65	18.29	10.77	17.77	0.04	.85	4.67	.03	4.21	<.001

Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance est élevée ($r=0,13$; $p<.001$) et plus le plaisir ressenti à la tâche est important ($r=0.17$; $p<.001$).

Cette première étude laisse penser que les types de connaissances influencent non seulement la performance, mais aussi le plaisir ressenti lors de la tâche et la charge cognitive perçue. Les connaissances primaires semblent avoir un effet facilitateur et motivant comparativement aux connaissances secondaires (qu'elles soient concrètes ou abstraites). Néanmoins, 15 participants (10.87%) connaissaient la règle concernant la thermodynamique alors que les autres règles semblaient inconnues. La prochaine étude doit s'attacher à confirmer l'influence des types de connaissances de manière plus nette et dans le cadre de règles conditionnelles complètement inconnues afin de limiter les biais des connaissances antérieures.

5.1.2 Expérience 2

5.1.2.1 Participants et procédure

Les participants sont 126 étudiants (21 hommes, 105 femmes) d'âge moyen 22.15 ans (± 7.03) recrutés sur les groupes Facebook universitaires français. La passation est faite en ligne grâce au logiciel Qualtrics et dure environ 20 minutes. Tous les participants ont un niveau de français suffisant. Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 48.50/100 (± 27.18) et ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 67.07/100 (± 26.54) (questionnaires d'auto-évaluation). Les instructions initiales sont les mêmes que dans l'expérience 1. Une règle

conditionnelle est affichée en haut de chaque page internet. Les termes utilisés sont des termes non-existants ou extrêmement peu connus afin que la familiarité et les connaissances antérieures influencent les réponses le moins possible. Aucun participant n'a considéré les thèmes abordés dans les tâches comme familiers. A la différence de l'expérience 1, les règles conditionnelles incluent uniquement des habillages liés aux connaissances primaires ou aux connaissances secondaires (i.e., les habillages abstraits sont exclus), par exemple :

Dans une communauté de Jamaïque, si un ugli est ramassé rouge, alors il est pelé entièrement pour être mangé (habillage de connaissance primaire impliquant des règles à propos de nourriture).

En quenya, si un verbe fort est conjugué au parfait, alors ce verbe fort finit par –ie (habillage de connaissance secondaire impliquant des règles grammaticales).

L'ensemble des problèmes utilisés dans l'expérience 2 ainsi que ceux des expériences suivantes (3 à 7) est présenté en annexe ([Annexe C](#)). Les participants répondent ensuite à quatre questions impliquant des inférences *MP*, *MT*, *AC* et *DA*. Chaque participant est confronté à trois règles conditionnelles à habillage de connaissances primaires (nourriture) et à trois règles conditionnelles à habillage de connaissances secondaires (règles de grammaire) : une sur chaque page internet. L'ordre de présentation des connaissances primaires et secondaires est contrebalancé. Quel que soit le type de connaissances, la première règle conditionnelle contient environ 20 mots, la seconde 25 mots et la troisième 30 mots. En plus de leur (i) performance (exprimée en pourcentage), pour chaque règle conditionnelle, les participants renseignent sur une échelle visuelle analogique (de 0 à 100) (ii) à quel point répondre aux questions leur a plu, (iii) à quel point ils ont eu envie de trouver les bonnes réponses, (iv) à quel point ils sont confiants dans leurs réponses et (v) à quel point ils sont d'accord avec les phrases « *le sujet abordé était complexe* » et « *vous vous êtes beaucoup concentré(e) pour réaliser cette tâche* » (charge cognitive perçue) ([Annexe D](#) pour un exemple de présentation). La (vi) vitesse moyenne (nombre de problèmes résolus en une minute) pour répondre à une page de questions est également mesurée (ajout des variables (iii) et (iv) par rapport à l'expérience 1). Enfin, les participants renseignent quelques informations personnelles comme leur niveau estimé en mathématiques et leur enthousiasme à participer à des jeux de logique.

La charge cognitive est manipulée en inter-groupe en inversant l'ordre des mots dans plusieurs parties de la tâche. Les participants dans la modalité charge cognitive forte (noté *CC forte* dans le détail des résultats) sont confrontés à des règles conditionnelles et des questions dont l'ordre des mots est inversé. Pour reprendre l'exemple de la règle de 20 mots à habillage de connaissances primaires, l'application d'une charge cognitive forte donne :

Règle conditionnelle : *Mangé être pour entièrement pelé est il alors, rouge ramassé est ugli un si, Jamaïque de communauté une dans.*

Question : *Dans une communauté de Jamaïque, un ugli est ramassé rouge. Mangé être pour pelé entièrement est ugli cet que ce est ?*

Dans une phase d'entraînement, des consignes indiquent aux participants que les phrases à mots inversés doivent être lues de droite à gauche. Les participants dans la modalité charge cognitive faible (notée *CC faible* dans le détail des résultats) lisent les mots dans le sens conventionnel.

Concernant la répartition par modalités croisées, 65 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier (30 avec une charge cognitive forte, 35 avec une charge cognitive faible) et 61 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances secondaires en premier (28 avec une charge cognitive forte, 33 avec une charge cognitive faible).

Suivant l'expérience 1, nous espérons observer une influence des types de connaissances sur chaque variable dépendante de manière plus nette. Par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires devraient entraîner une performance, un investissement émotionnel et cognitif et une confiance plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible. Un effet d'interaction devrait également être observé : la modalité charge cognitive forte devrait gêner les réponses des participants (notamment la performance) uniquement pour les problèmes à habillage de connaissances secondaires. Des modèles linéaires à effets mixtes et des corrélations de Pearson ont été utilisés pour les analyses. Les scores *estimates* (résultats des modèles linéaires donnant une idée de la taille d'effet) leurs erreurs standards (ES) et les χ^2 comparant les modèles

complets et les modèles nuls sont notés pour les analyses principales. Les modèles linéaires complets à effets mixtes incluent le type de connaissances, le type de charge cognitive manipulée, l'ordre de présentation des types de connaissances, le niveau estimé en mathématiques et le sexe des participants. Le premier paragraphe des résultats contient des analyses préliminaires, puis les données sont présentées par variable indépendante (influence du type de connaissances, de la charge cognitive manipulée, de l'ordre de présentation et du niveau estimé en mathématiques).

5.1.2.2 Résultats et discussion

Les règles conditionnelles de 20 mots ($M=65.38\pm 25.91$) ne provoquent pas de différence de performance par rapport à celles de 25 mots ($M=62.30\pm 24.60$) ou celles de 30 mots ($M=65.57\pm 26.18$) ($p>.08$), mais les problèmes des règles de 25 mots sont moins bien réussis que ceux de 30 mots ($p=.03$). Concernant l'influence du type d'inférence, comme attendu, les inférences *MP* ($M=83.47\pm 28.62$) entraînent de meilleures performances mais ne se différencient pas des inférences *MT* ($M=78.44\pm 29.72$) ($p=.39$). Ces deux types d'inférences impliquent de meilleures performances que les inférences *AC* ($M=49.07\pm 39.18$) et *DA* ($M=46.69\pm 39.50$) ($ps<.001$).

Par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires entraînent une performance, un plaisir à répondre aux questions, une envie de trouver les bonnes réponses, une confiance dans les réponses données et une vitesse plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible (Tableau 5 et Figure 4). Plus précisément, les règles conditionnelles de 30 mots rendent compte d'une différence significative de performance ($M_{K1}=77.18\pm 23.03$ vs. $M_{K2}=53.97\pm 23.96$) ($estimate=-0.89$, $ES=0.09$; $\chi^2=101.89$, $p<.001$), ainsi que les inférences *MP* ($M_{K1}=86.51\pm 26.73$ vs. $M_{K2}=80.42\pm 30.19$) ($estimate=-0.21$, $ES=0.09$; $\chi^2=5.96$, $p=.02$), *MT* ($M_{K1}=81.75\pm 26.20$ vs. $M_{K2}=75.13\pm 32.64$) ($estimate=-0.22$, $ES=0.09$; $\chi^2=5.78$, $p=.02$) et *AC* ($M_{K1}=53.97\pm 36.72$ vs. $M_{K2}=44.18\pm 41.06$) ($estimate=-0.25$, $ES=0.07$; $\chi^2=11.21$, $p=.001$).

Tableau 5 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 2. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		χ^2	p
	M	σ	M	σ		
Performance	67.79	19.99	61.04	21.05	527.56	<.001
Aimer répondre aux questions	52.52	28.02	43.22	30.03	262.00	<.001
Envie de trouver les bonnes réponses	63.90	27.60	55.73	29.98	210.74	<.001
Confiance dans les réponses données	59.96	29.55	49.96	31.06	253.26	<.001
Charge cognitive perçue	39.89	22.35	48.11	23.81	288.55	<.001
Vitesse (pb/min)	4.22	6.80	3.49	5.25	13.25	<.001

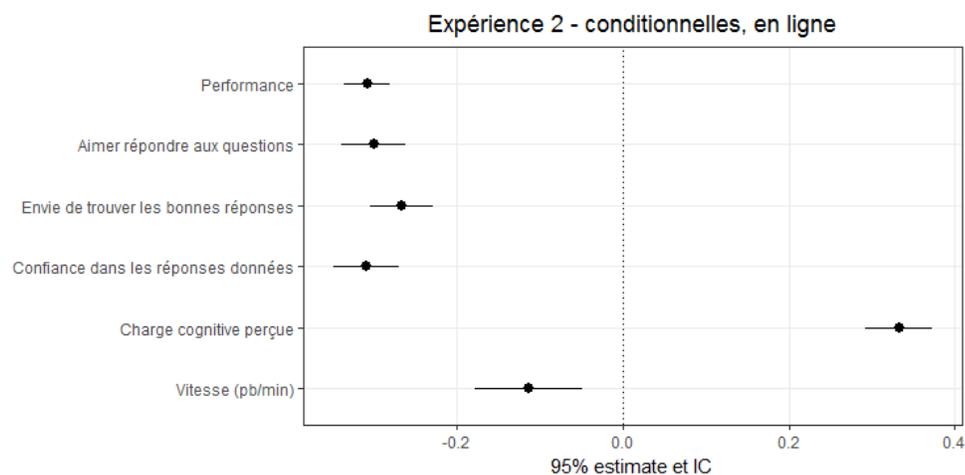


Figure 4 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 2. Les moustaches représentent 95% de l'estimate et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »).

Par rapport à la modalité charge cognitive faible, la modalité charge cognitive forte provoque une performance moins importante ($M_{CC \text{ faible}}=8.08\pm 2.38$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=7.32\pm 2.56$) ($estimate=-0.33$, $ES=0.16$; $\chi^2=4.22$, $p=.04$), une envie de trouver les bonnes réponses plus importante ($M_{CC \text{ faible}}=55.67\pm 30.12$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=64.68\pm 27.08$) ($estimate=0.30$, $ES=0.15$; $\chi^2=3.96$, $p=.04$) et une vitesse plus faible ($M_{CC \text{ faible}}=4.47\pm 7.14$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=3.13\pm 4.44$) ($estimate=-0.21$, $ES=0.08$; $\chi^2=6.54$, $p=.01$). Concernant les problèmes à habillage de connaissances secondaires, la modalité charge cognitive forte entraîne une performance moins importante ($M_{CC \text{ faible}}=65.44\pm 20.83$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=55.89\pm 20.13$) ($estimate=0.48$, $ES=0.16$; $\chi^2=7.05$, $p=.009$) et montre une tendance à réduire la vitesse ($M_{CC \text{ faible}}=7.85\pm 2.50$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=6.71\pm 2.42$) ($estimate=0.20$, $ES=0.10$; $\chi^2=3.51$, $p=.06$). Concernant les problèmes à habillage de connaissances primaires, la modalité charge cognitive forte entraîne une envie de trouver les bonnes réponses plus importante (M_{CC

faible=59.46±28.67 vs. $M_{CC\ forte}$ =69.11±25.35) ($estimate$ =0.33, ES =0.16; χ^2 =4.12, p =.04) et une vitesse plus faible ($M_{CC\ faible}$ =4.93±8.29 vs. $M_{CC\ forte}$ =3.38±4.33) ($estimate$ =-0.22, ES =0.11; χ^2 =3.93, p =.05) (Annexe E, Tableau E5, première ligne).

L'ordre de présentation a une influence sur les problèmes à habillage de connaissances secondaires uniquement. Quand les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier, les participants ont moins envie de trouver les bonnes réponses aux problèmes à habillage de connaissances secondaires ($M_{K1premier}$ =51.73±28.25 vs. $M_{K2premier}$ =59.98±31.18) ($estimate$ =0.33, ES =0.16; χ^2 =4.36, p =.04) mais ressentent une charge cognitive plus faible ($M_{K1premier}$ =44.29±23.07 vs. $M_{K2premier}$ =52.18±23.92) ($estimate$ =0.31, ES =0.15; χ^2 =4.64, p =.03) (Annexe E, Tableau E5, deuxième ligne).

Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance (r =0.10; p <.001), le plaisir ressenti à la tâche (r =0.07; p <.001), l'envie de trouver les bonnes réponses (r =0.17; p <.001) et la confiance dans les réponses données (r =0.19; p <.001) sont importants et moins la charge cognitive perçue est forte (r =-0.21; p <.001) ($-0.006 < estimates < 0.009$, $0.002 < ESs < 0.003$; $4.85 < \chi^2s < 9.05$, $.003 < ps < .02$) (Annexe E, Figure E3).

L'expérience 2 confirme nos hypothèses et les résultats de l'expérience 1 : comparées aux connaissances secondaires, les connaissances primaires augmentent la performance, la vitesse/efficacité, l'investissement émotionnel et cognitif et diminuent la charge cognitive perçue. De plus, les résultats montrent qu'une forte charge cognitive diminue la performance aux problèmes à habillage de connaissances secondaires seulement. Les connaissances secondaires auraient donc bien besoin de plus de ressources cognitives disponibles pour être traitées. D'autre part, les connaissances primaires semblent préserver la motivation des participants qu'elles soient présentées en premier ou en second, alors que les connaissances secondaires minent complètement leur motivation dès qu'elles sont présentées. Enfin, présenter des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier réduit la charge cognitive ressentie face à des problèmes à habillage de connaissances secondaires.

Inverser l'ordre des mots des énoncés des problèmes logiques auxquels les individus doivent répondre semble bien augmenter la charge cognitive en diminuant la vitesse de traitement des problèmes et la performance. Toutefois, l'inversion de l'ordre des mots n'a aucun impact

significatif sur la charge cognitive ressentie. Le but de l'expérience 3 est donc de consolider ces résultats en les mettant à l'épreuve d'une autre tâche de charge cognitive bien connue pour diminuer les ressources en mémoire de travail (*Dot Memory Task*) (Bethell-Fox & Shepard, 1988; De Neys, 2006; Miyake, Friedman, Rettinger, Shah & Hegarty, 2001). De plus, des études ayant montré que les adolescents raisonnent de manière assez similaire aux adultes (Khemlani & Johnson-Laird, 2012; Markovits & Lortie-Forgues, 2011), nous voulions tester l'approche évolutive des connaissances (et l'influence positive des habillages liés aux connaissances primaires) avec des participants plus jeunes, autant, sinon plus, sujets à la démotivation face aux connaissances secondaires. Enfin, afin de tester les capacités d'abstraction des participants, une nouvelle tâche impliquant les lettres AB est ajoutée à la fin de la procédure.

5.1.3 Expérience 3

5.1.3.1 Participants et procédure

Les participants sont 101 élèves de collège/lycée des Hautes-Pyrénées (56 hommes, 45 femmes ; âge moyen 15.07 ans ± 0.82) ; 6 participants ont été écartés des analyses car ils ont montré des signes qui ont pu faire douter de leur implication dans la tâche (« peut-être » pour chaque réponse, échelles visuelles analogiques répétitives à 0, *etc.*). Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 50.17/100 (± 27.53) et ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 66.09/100 (± 30.98). Aucun participant n'a trouvé les thèmes familiers de près ou de loin et 81% (n=82) n'ont jamais joué à des jeux de logique ou très rarement.

La méthode et le matériel sont similaires à ceux de l'expérience 2 à l'exception de quatre modifications. Premièrement, l'expérience 3 est une étude papier-crayon menée en salle de classe lors d'un temps attribué aux cours (une heure). Deuxièmement, afin de manipuler la charge cognitive, une *Dot Memory Task* est utilisée : avant chaque page contenant les problèmes de logique (incluant la règle conditionnelle, les quatre inférences et les échelles visuelles analogiques des variables d'intérêt), les participants doivent mémoriser la position de plusieurs points dans un tableau 3*3 projeté sur le tableau pendant 850 ms. Après avoir répondu à chaque question de la page, ils replacent les points dans un tableau identique sur la page suivante. Le but est ici de charger la mémoire de travail tout en répondant aux questions. Les participants dans la modalité charge cognitive forte doivent retenir un pattern de quatre points (dont deux maximum

sont côte à côte) (Figure 5a) et les participants dans la modalité charge cognitive faible doivent retenir un pattern de trois points alignés (Figure 5b). Chaque participant a quatre minutes pour compléter les questions d'intérêt et doit attendre la fin de ces quatre minutes pour passer à la page suivante et replacer les points. La vitesse n'a donc pas été mesurée dans cette expérience. Troisièmement, les mêmes règles conditionnelles que celles de l'expérience 2 ont été utilisées, mais nous avons ajouté des mots afin que chaque conditionnelle contienne environ 30 mots (e.g. « Dans une communauté de Jamaïque, si un ugli est ramassé rouge, alors il est pelé entièrement pour être mangé » devient « Dans une communauté de Jamaïque, pays dont la capitale est Kingston, si un ugli est ramassé rouge, alors il est pelé entièrement pour être mangé sur le sable de Frenchman's cove ») (cf. Annexe C pour l'intégralité des énoncés). Quatrièmement, avant de demander aux participants quelques informations personnelles, à la fin de l'expérience, une dernière page a été ajoutée, similaire aux autres pages de questions : la règle conditionnelle est « Si A existe, alors B existe ». Ces dernières inférences logiques devraient permettre d'avoir un aperçu de l'influence de l'ordre de présentation sur chaque variable dépendante de façon plus précise que dans l'expérience 2.

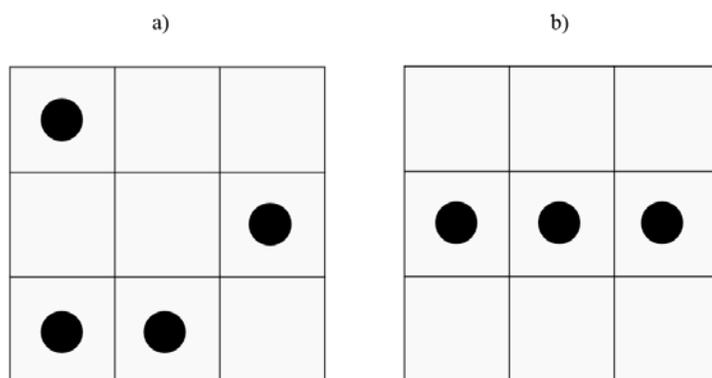


Figure 5 : Exemples de pattern pour la Dot Memory Task a) modalité charge cognitive forte, b) modalité charge cognitive faible.

Concernant la répartition par modalités croisées, 52 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier (27 avec une charge cognitive forte, 25 avec une charge cognitive faible) et 49 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances secondaires en premier (26 avec une charge cognitive forte, 23 avec une charge cognitive faible).

Les analyses statistiques sont similaires à celles de l'expérience 2. Des t-tests intra- et inter-groupe (concernant les performances à la *Dot Memory Task*) ainsi que des ANCOVAs incluant l'ordre de présentation, le type de charge cognitive manipulée, le sexe, l'âge et le niveau estimé en mathématiques des participants (concernant les réponses aux problèmes AB) ont également été utilisés.

5.1.3.2 Résultats et discussion

La *Dot Memory Task* est réussie à 97.92% (± 6.55) pour la modalité de charge cognitive faible et à 67.92% (± 27.12) pour la modalité de charge cognitive forte ($t(99)=7.80, p<.001$). Le type de connaissances n'influence pas la réussite à la *Dot Memory Task* ($p=.26$). Les premiers problèmes ($M=52.60\pm 20.78$) n'entraînent pas de différence de performance par rapport aux deuxièmes problèmes (49.75 ± 20.86) et aux troisièmes/derniers problèmes ($M=53.71\pm 22.96$) ($ps>.08$). Cependant, les deuxièmes problèmes sont moins bien réussis que les derniers ($estimate=0.5, ES=0.11; \chi^2=5.13, p=.02$) (pattern similaire à celui de l'expérience 2). Concernant l'influence du type d'inférence, comme attendu, les inférences *MP* ($M=82.67\pm 29.96$) sont mieux réussies. Elles diffèrent significativement des inférences *MT* ($M=72.11\pm 32.03$) ($estimate=-0.38, ES=0.10; \chi^2=22.02, p<.001$). Ces deux types d'inférence entraînent de meilleures performances que les inférences *AC* ($M=28.05\pm 33.16$) et *DA* ($M=25.25\pm 31.64$) ($ps<.001$).

Par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires entraînent une performance, un plaisir à répondre aux questions, une envie de trouver les bonnes réponses et une confiance dans les réponses données plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible (Table 6 et Figure 6). Plus précisément, les deuxièmes règles conditionnelles ($M_{K1}=52.97\pm 20.09$ vs. $M_{K2}=46.53\pm 21.22$) ($estimate=-0.31, ES=0.12; \chi^2=6.18, p=.01$) et les troisièmes règles conditionnelles ($M_{K1}=64.11\pm 22.75$ vs. $M_{K2}=43.32\pm 17.99$) ($estimate=-0.90, ES=0.11; \chi^2=59.73, p<.001$) rendent compte d'une différence significative de performance ainsi que les inférences *MP* ($M_{K1}=87.46\pm 27.43$ vs. $M_{K2}=77.89\pm 31.72$) ($estimate=-0.32, ES=0.10; \chi^2=10.69, p=.001$), *MT* ($M_{K1}=75.58\pm 29.77$ vs. $M_{K2}=68.65\pm 33.93$) ($estimate=-0.22, ES=0.10; \chi^2=4.30, p=.04$) et *AC* ($M_{K1}=34.98\pm 33.46$ vs. $M_{K2}=21.12\pm 31.52$) ($estimate=-0.42, ES=0.10; \chi^2=17.90, p<.001$).

Tableau 6 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 3. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		χ^2	<i>p</i>
	M	σ	M	σ		
Performance	56.52	17.38	47.52	14.96	661.07	<.001
Aimer répondre aux questions	50.53	34.20	39.03	32.62	250.53	<.001
Envie de trouver les bonnes réponses	65.92	32.57	60.73	33.24	59.90	<.001
Confiance dans les réponses données	57.39	33.20	49.71	33.71	93.40	<.001
Charge cognitive perçue	42.49	27.11	48.47	26.52	98.12	<.001

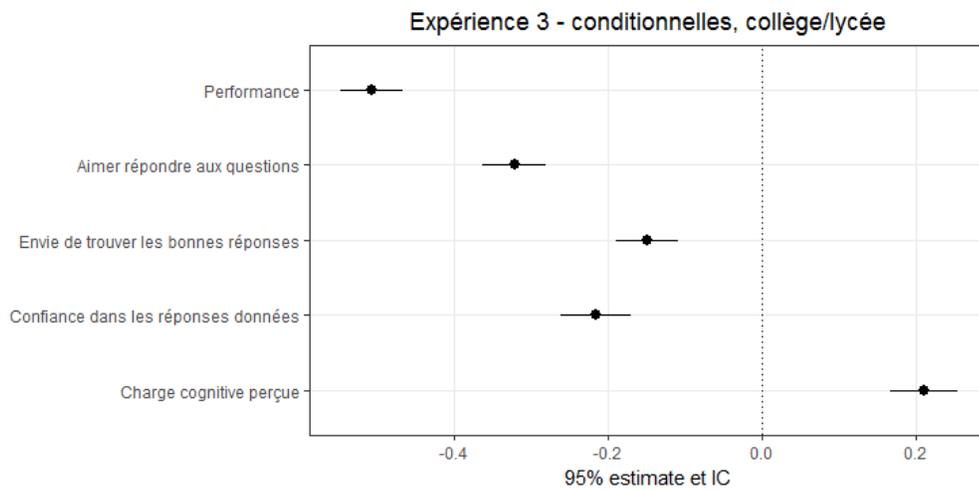


Figure 6 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 3. Les moustaches représentent 95% de l'estimateur et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »).

Par rapport à la modalité charge cognitive faible, la modalité charge cognitive forte entraîne une meilleure performance ($M_{CC\ faible}=50.08\pm 15.80$ vs. $M_{CC\ forte}=53.77\pm 17.52$) ($estimate=0.30$, $ES=0.15$; $\chi^2=4.37$, $p=.04$), particulièrement pour les problèmes à habillage de connaissances primaires ($M_{CC\ faible}=52.95\pm 15.65$ vs. $M_{CC\ forte}=59.75\pm 18.23$) ($estimate=0.30$, $ES=0.15$; $\chi^2=4.36$, $p=.04$), pouvant dénoter d'un intérêt plus important des collégiens/lycéens face à la tâche *Dot Memory Task* complexe (Annexe E, Tableau E6, première ligne).

Les participants ont une meilleure performance globale lorsque les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier ($M_{K1\ premier}=55.29\pm 17.15$ vs. $M_{K2\ premier}=48.55\pm 15.76$) ($estimate=-0.36$, $ES=0.15$; $\chi^2=5.82$ $p=.02$) et perçoivent moins de charge cognitive ($M_{K1\ premier}=40.72\pm 25.27$ vs. $M_{K2\ premier}=50.53\pm 27.81$) ($estimate=0.35$, $ES=0.16$; $\chi^2=4.57$,

$p=.03$). L'ordre de présentation des types de connaissances a une influence uniquement sur les réponses aux problèmes à habillage de connaissances secondaires. Lorsque les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier, les participants ont une meilleure performance aux problèmes à habillage de connaissances secondaires ($M_{K1\text{premier}}=52.88\pm 15.68$ vs. $M_{K2\text{premier}}=41.84\pm 11.73$) ($estimate=0.61$, $ES=0.15$; $\chi^2=17.15$, $p<.001$), sont plus confiants dans leurs réponses à ces problèmes ($M_{K1\text{premier}}=57.31\pm 33.91$ vs. $M_{K2\text{premier}}=41.65\pm 31.58$) ($estimate=-0.34$, $ES=0.16$; $\chi^2=4.35$, $p=.04$) et perçoivent moins de charge cognitive ($M_{K1\text{premier}}=40.62\pm 24.98$ vs. $M_{K2\text{premier}}=56.80\pm 25.57$) ($estimate=0.61$, $ES=0.17$; $\chi^2=12.89$, $p<.001$) ([Annexe E, Tableau E6](#), deuxième ligne).

Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance ($r=0.24$; $p<.001$), le fait d'aimer répondre ($r=0.09$; $p<.001$) et la confiance dans les réponses données ($r=0.34$; $p<.001$) sont importants et moins la charge cognitive perçue est forte ($r=-0.19$; $p<.001$) ($-0.006<estimates<0.009$, $ESs=0.003$; $4.61<\chi^2s<19.03$, $.001<ps<.03$) ([Annexe E, Figure E3](#)).

Concernant les derniers problèmes AB (règle abstraite), l'ordre de présentation influence significativement la confiance dans les réponses données ($M_{K1\text{premier}}=69.01\pm 25.17$ vs. $M_{K2\text{premier}}=50.55\pm 32.83$) ($F(1,95)=10.06$; $p=.002$; $\eta^2_p=0.10$) et marginalement la charge cognitive perçue ($M_{K1\text{premier}}=41.99\pm 25.32$ vs. $M_{K2\text{premier}}=50.27\pm 26.92$) ($F(1,95)=3.04$; $p=.08$; $\eta^2_p=0.03$). La charge cognitive manipulée influence significativement la charge cognitive perçue sur les problèmes AB ($F(1,95)=15.81$; $p<.001$; $\eta^2_p=0.14$) ($M_{CC\text{ faible}}=36.05\pm 23.70$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=55.02\pm 25.53$), validant la procédure de *Dot Memory Task*.

L'expérience 3 réplique les résultats principaux de l'expérience 2 : les connaissances primaires entraînent bien une performance, un engagement émotionnel et cognitif, une confiance plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible que les connaissances secondaires. L'expérience 3 apporte de nouvelles données concernant l'impact de l'ordre de présentation. Les résultats montrent que lorsque les connaissances primaires sont présentées en premier, la performance, l'investissement émotionnel et la confiance des participants sont plus importants. De plus, les problèmes à habillage de connaissances primaires ne subissent pas l'influence de l'ordre de présentation, ce qui impliquerait qu'elles sont intrinsèquement motivantes alors que les connaissances secondaires minent les participants et augmentent leur charge cognitive.

5.1.4 Synthèse des expériences 1 à 3 (règles conditionnelles)

A niveau d'abstraction semblable, les trois premières expériences montrent indubitablement qu'un contenu coloré de connaissances primaires favorise la performance (sur la majorité des inférences), l'engagement émotionnel et cognitif, la confiance et diminue la charge cognitive perçue. Cette observation va dans le sens du modèle de Geary (Geary & Berch, 2016) pour lequel les connaissances primaires sont intrinsèquement motivantes et traitées facilement. Par ailleurs, les différences de performance entre les problèmes à habillage de connaissances primaires et ceux à habillage de connaissances secondaires ont surtout été observées pour les derniers problèmes (expériences 2 et 3) : les connaissances secondaires induiraient de la fatigue ou désengageraient plus facilement les individus que les connaissances primaires.

Dans l'expérience 2, une charge cognitive manipulée forte diminue les performances des participants et ne le ferait que pour les problèmes à habillage de connaissances secondaires. Cela tendrait donc bien à valider les implications de la théorie de la charge cognitive (Sweller, 2008) uniquement dans le cadre des connaissances secondaires. Les résultats sont un peu plus troubles pour l'expérience 3 mais vont plutôt dans le sens de la théorie des difficultés désirables (Bjork & Bjork, 2011) : une forte charge cognitive (*Dot Memory Task* ici) favoriserait l'intérêt et l'implication des participants, augmentant par-là leurs performances. L'effet est visible notamment pour les connaissances primaires qui demanderaient moins de ressources cognitives que les connaissances secondaires et permettraient une allocation de ressources pour la *Dot Memory Task* alors que les connaissances secondaires satureraient la mémoire de travail plus facilement.

De plus, présenter les connaissances primaires en premier a eu un effet global intéressant dans l'expérience 3 : les participants ont montré de meilleures performances et moins de charge cognitive perçue. Pour les expériences 2 et 3, l'ordre de présentation n'a aucune influence majeure sur les problèmes à habillage de connaissances primaires. Par contre, présenter des connaissances primaires en premier peut augmenter les performances et la confiance ainsi que diminuer la charge cognitive perçue notamment dans des problèmes à habillage de connaissances secondaires présentés ensuite. L'effet sur la performance peut s'expliquer par un biais d'apprentissage (meilleure performance sur les problèmes présentés par la suite). Il n'en reste pas moins que l'absence d'un effet d'ordre de présentation sur les connaissances primaires souligne

une caractéristique motivante des connaissances primaires et une caractéristique démotivante des connaissances secondaires. Les connaissances primaires seraient donc une bonne étape d'introduction à l'apprentissage d'une nouvelle matière et motiveraient les participants pour la suite. L'ordre de présentation n'a pas influencé la performance sur les derniers problèmes AB. Cette absence d'effet semblerait montrer qu'il n'y a pas eu d'apprentissage. La procédure ne met cependant pas en avant une consigne liée à ce dernier. Dans le contexte d'une tâche plus longue et ciblée sur l'acquisition de compétences, des différences intéressantes seraient observées concernant l'influence de l'ordre de présentation.

Si ces premières expériences montrent que les connaissances secondaires consomment plus de ressources cognitives que les connaissances primaires, elles ne permettent pas de mettre en avant les rapports entre systèmes 1/2 et connaissances primaires/secondaires ni d'évaluer les implications cognitives des types de connaissances. C'est ce que proposent de faire les expériences suivantes grâce à une procédure impliquant des syllogismes avec biais de croyance.

5.1.5 Expérience 4a

5.1.5.1 Participants et procédure

Les participants sont 146 étudiants (39 hommes, 107 femmes) d'âge moyen 22.18 ans (± 5.75) recrutés sur les groupes Facebook universitaires français. La passation est faite en ligne grâce au logiciel Qualtrics et dure environ 20 minutes. Tous les participants ont un niveau de français suffisant. Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 50.85/100 (± 31.04) et ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 63.05/100 (± 22.89). Les consignes sont les suivantes :

Nous allons maintenant vous proposer des énoncés. Ces énoncés se présenteront comme suit:

« Toutes les choses qui ont un moteur ont besoin d'huile,

Or les voitures ont un moteur,

Donc les voitures ont besoin d'huile. »

Les prémisses (deux premières lignes) doivent être considérées comme vraies.

La conclusion (dernière ligne) ne devrait être acceptée que si elle découle logiquement des prémisses.

Pour chaque énoncé, vous allez devoir juger si les différentes conclusions que nous allons vous proposer découlent de leurs prémisses ou non.

Sur chaque page internet, des blocs de quatre syllogismes sont affichés à chaque fois. Chaque bloc contient deux syllogismes conflictuels (le statut logique de la conclusion entre en conflit avec les croyances) et deux syllogismes non conflictuels (le statut logique de la conclusion est en accord avec les croyances) :

Habillages liés aux connaissances primaires (nourriture et caractéristiques de la faune) :

Tous les gâteaux se mangent,

Or les marbrés au chocolat se mangent,

Donc les marbrés au chocolat sont des gâteaux (conflictuel : statut logique invalide vs. conclusion croyable).

Tous les mammifères peuvent marcher,

Or les chats sont des mammifères,

Donc les chats peuvent marcher (non conflictuel : statut logique valide vs. conclusion croyable).

Habillages liés aux connaissances secondaires (grammaire et mathématiques) :

Tous les nombres premiers sont impairs,

Or 2 est un nombre premier,

Donc 2 est impair (conflictuel : statut logique valide vs. conclusion incroyable).

Tous les verbes français du premier groupe finissent par -er,

Or « aller » finit par -er,

Donc « aller » est un verbe français du premier groupe (non conflictuel : statut logique invalide vs. conclusion incroyable).

Les participants répondent à chaque syllogisme en cochant la case « *la conclusion découle logiquement des prémisses* » ou la case « *la conclusion ne découle pas logiquement des prémisses* ». Chaque participant est confronté à deux blocs de syllogismes à habillage de connaissances primaires et deux blocs de syllogismes à habillage de connaissances secondaires (un bloc sur chaque page internet). L'ordre de présentation des connaissances primaires et

secondaires est contrebalancé et la présentation des syllogismes est aléatoire dans chaque bloc. Normalement, quatre syllogismes conflictuels et quatre syllogismes non conflictuels (pour chaque type de connaissances) devaient être présentés aux participants. Cependant, une erreur dans la construction du matériel s'est produite : un syllogisme AB CB CA non conflictuel a été construit comme un syllogisme AB CA CB devenant conflictuel pour chaque type de connaissances (Annexe C, Tableau C3). De fait, chaque participant a été confronté à cinq syllogismes conflictuels et trois syllogismes non conflictuels. Comme cette erreur s'applique autant aux connaissances primaires que secondaires et comme les performances sont notées en pourcentage, les résultats ne sont pas invalidés.

Comme dans les expériences 2 et 3, en plus de leur (i) performance, pour chaque bloc de syllogismes, les participants renseignent sur une échelle visuelle analogique (de 0 à 100) (ii) à quel point répondre aux questions leur a plu (investissement émotionnel), (iii) à quel point ils ont eu envie de trouver les bonnes réponses (investissement cognitif), (iv) à quel point ils sont confiants dans leurs réponses et (v) à quel point ils sont d'accord avec les phrases « *le sujet abordé était complexe* » et « *vous vous êtes beaucoup concentré(e) pour réaliser cette tâche* » (charge cognitive perçue). La (vi) vitesse moyenne (nombre de problèmes résolus en une minute) pour répondre à une page de questions est également mesurée. Enfin, les participants renseignent quelques informations personnelles comme leur niveau estimé en mathématiques et leur enthousiasme à participer à des jeux de logique.

De même que pour l'expérience 2, la charge cognitive est manipulée inter-groupe en inversant l'ordre des mots pour chaque ligne du syllogisme (modalité charge cognitive forte). Par exemple :

*Tous les gâteaux se mangent,
Or les marbrés au chocolat se mangent,
Donc les marbrés au chocolat sont des gâteaux*

Devient :

*Mangent se gâteaux les tous,
Mangent se chocolat au marbrés les or,*

Gâteaux des sont chocolat au marbrés les donc.

Des consignes indiquent aux participants que ces syllogismes doivent être lus de droite à gauche (phase d'entraînement). Les participants dans la modalité charge cognitive faible lisent les lignes dans le sens conventionnel.

Comme dans l'expérience 3, avant de demander aux participants quelques informations personnelles, à la fin de l'expérience, une dernière page a été ajoutée, similaire aux autres pages de questions : les syllogismes présentés sont « *A est B, Or C est B, Donc C est A* ». Afin d'évaluer la charge cognitive globale sur l'ensemble de la passation, une toute dernière question est ajoutée et demande aux participants à quel point ils sont d'accord avec les propositions « *les sujets abordés étaient complexes* », « *vous vous êtes beaucoup concentré(e) pour réaliser cette étude* » et « *l'étude était très facile pour vous* ».

De façon analogue aux effets de la charge cognitive (faible vs. forte), dans le cas de problèmes non conflictuels, les deux types de connaissances ne devraient pas entraîner de différences de performance alors que dans le cas de problèmes conflictuels, les connaissances primaires, de par leur facilité de traitement et leur coût moindre en ressources cognitives, devraient favoriser la performance comparativement aux connaissances secondaires. Les mêmes types d'analyses que ceux de l'expérience 3 ont été utilisés. Les modèles linéaires complets à effets mixtes incluent le type de connaissances, le type de syllogisme, le type de charge cognitive manipulée, l'ordre de présentation des types de connaissances, le niveau estimé en mathématiques et le sexe des participants.

Concernant la répartition par modalités croisées, 73 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier (37 avec une charge cognitive forte, 36 avec une charge cognitive faible) et 73 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances secondaires en premier (39 avec une charge cognitive forte, 34 avec une charge cognitive faible). Un item permet aux participants de nous informer qu'ils ont fait une pause de plus de 30 secondes pendant leur passation : 124 participants n'en ont pas fait, nous avons donc exclu des analyses les 22 autres lorsque la variable testée est la vitesse.

5.1.5.2 Résultats et discussion

Par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires entraînent une performance et un plaisir à répondre aux questions plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible (Table 7 et Figure 7).

Tableau 7 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 4a. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		χ^2	p
	M	σ	M	σ		
Performance	73.90	33.50	63.29	32.17	31.33	<.001
Aimer répondre aux questions	63.03	27.11	59.16	26.32	10.87	.001
Envie de trouver les bonnes réponses	66.70	24.80	66.24	25.93	0.18	.67
Confiance dans les réponses données	59.90	27.51	57.43	27.81	3.50	.06
Charge cognitive perçue	35.97	21.34	40.41	21.10	20.28	<.001
Vitesse (pb/min) (n=124)	5.17	10.81	5.18	10.96	<0.001	.99

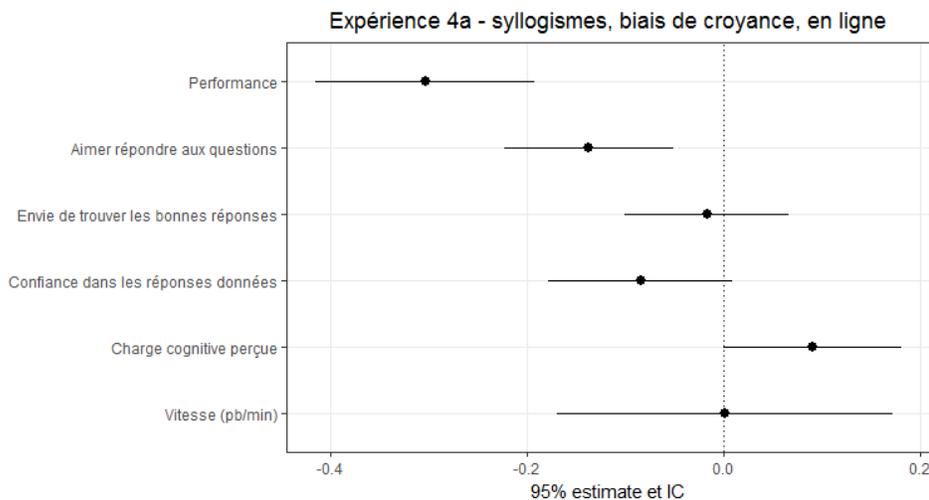


Figure 7 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 4a. Les moustaches représentent 95% de l'estimateur et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »).

Les syllogismes non conflictuels ($M=82.19\pm 22.67$) sont mieux réussis que les syllogismes conflictuels ($M=55.00\pm 36.45$) ($estimate=-0.82$, $ES=0.06$; $\chi^2=205.51$, $p<.001$). L'interaction entre le type de syllogisme et la charge cognitive manipulée n'est pas significative ($\chi^2=2.31$, $p=.12$).

L'effet d'interaction entre le type de syllogisme et le type de connaissances ($\chi^2=14.83$, $p<.001$) rend compte d'un impact significatif du type de connaissances sur la performance des syllogismes non conflictuels ($M_{K1}=91.09\pm 17.63$ vs. $M_{K2}=73.29\pm 23.69$) (*estimate*=-0.78, $ES=0.09$; $\chi^2=81.29$, $p<.001$) mais pas sur celle des syllogismes conflictuels ($M_{K1}=56.71\pm 36.69$ vs. $M_{K2}=53.29\pm 36.26$) (*estimate*=-0.09, $ES=0.06$; $\chi^2=2.74$, $p=.10$) (Annexe E, Figure E1a). Les syllogismes non conflictuels sont mieux réussis qu'il s'agisse de connaissances primaires ($M_{\text{non conflit}}=91.09\pm 17.63$ vs. $M_{\text{conflit}}=56.71\pm 36.69$) (*estimate*=-1.03, $ES=0.09$; $\chi^2=125.43$, $p<.001$) ou secondaires ($M_{\text{non conflit}}=73.29\pm 23.69$ vs. $M_{\text{conflit}}=53.29\pm 36.26$) (*estimate*=-0.62, $ES=0.09$; $\chi^2=49.51$, $p<.001$). L'interaction entre la charge cognitive manipulée et le type de problème n'est ni significative pour les connaissances primaires ($p=.40$) ni pour les connaissances secondaires ($p=.26$). Cependant, la charge cognitive manipulée influence uniquement les problèmes à habillage de connaissances secondaires (*estimate*=-0.25, $ES=0.12$; $\chi^2=3.91$, $p=.05$): les problèmes à habillage de connaissances secondaires sont mieux réussis lorsque la charge cognitive est faible ($M=68.33\pm 32.11$) que lorsqu'elle est forte ($M=58.64\pm 31.63$) (Annexe E, Figure E1b).

La rapidité de résolution des tâches de façon générale est plus importante lorsque la charge cognitive est faible (*estimate*=-0.25, $ES=0.12$; $\chi^2=5.45$, $p=.02$) ($M_{CC \text{ faible}}=6.32\pm 12.61$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=4.07\pm 8.75$). Cet effet de la charge cognitive manipulée sur la rapidité se vérifie sur les problèmes à habillage de connaissances primaires particulièrement (*estimate*=-0.33, $ES=0.13$; $\chi^2=6.14$, $p=.01$) ($M_{CC \text{ faible}}=6.79\pm 14.68$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=3.60\pm 4.13$) (Annexe E, Tableau E7, première ligne).

L'ordre de présentation des types de connaissances influence uniquement les problèmes à habillage de connaissances primaires : le plaisir à effectuer la tâche ($M_{K1\text{premier}}=68.03\pm 25.03$ vs. $M_{K2\text{premier}}=58.03\pm 28.25$) (*estimate*=-0.39, $ES=0.15$; $\chi^2=6.74$, $p=.01$) est alors plus grand lorsque ces problèmes sont présentés en premier (Annexe E, Tableau E7, deuxième ligne).

Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance ($r=0.14$; $p<.001$) est importante (*estimate*=0.006, $ESs=0.002$; $\chi^2s=11.20$, $p=.001$) (Annexe E, Figure E3).

Les résultats concernant les derniers problèmes ABC ne rendent pas compte d'une influence significative de l'ordre de présentation des types de connaissances. La charge cognitive

manipulée influence marginalement la confiance dans les réponses données ($M_{CC_{faible}}=67.54\pm 29.24$ vs. $M_{CC_{forte}}=58.76\pm 28.23$) ($F(1,140)=3.51, p=.06, \eta^2_p=0.02$). Par contre, il n'y a pas d'effet sur la charge cognitive globale. Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance aux problèmes ABC est élevée ($r=0.23, p<.001$).

Cette quatrième expérience réplique les résultats obtenus concernant l'effet positif des connaissances primaires et apporte un résultat étonnant concernant l'interaction entre le type de connaissances et le type de problème. En effet, contrairement à ce qui était attendu, le type de connaissances influence la performance pour les problèmes non conflictuels et non pour les problèmes conflictuels. La charge cognitive semble impacter la performance aux problèmes à habillage de connaissances secondaires uniquement. Les connaissances secondaires agiraient donc comme une source de conflit, taxant les ressources cognitives disponibles. Cette expérience ne renseigne que sur les différences de performance entre les types de problèmes. Les études suivantes ont pour objectif d'étendre les observations aux autres variables.

5.1.6 Expérience 4b

5.1.6.1 Participants et procédure

Les participants sont 147 étudiants (27 hommes, 120 femmes) d'âge moyen 19.55 ans (± 2.88) recrutés sur les groupes Facebook universitaires français. La passation est faite en ligne grâce au logiciel Qualtrics et dure environ 20 minutes. Tous les participants ont un niveau de français suffisant. Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 42.67/100 (± 28.74) et ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 61.86/100 (± 18.66).

La procédure devait permettre d'explorer l'influence des problèmes conflictuels et non conflictuels sur l'ensemble des variables (et non uniquement sur la performance comme précédemment) en fonction des types de connaissances. Cependant, le matériel est similaire à l'expérience 4a et contient l'erreur d'attribution de type conflictuel/non conflictuel d'un syllogisme. L'expérience 4b permet donc de répliquer les résultats de l'expérience 4a et de vérifier la robustesse des résultats observés.

Concernant la répartition par modalités croisées, 72 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier (35 avec une charge cognitive forte, 37 avec

une charge cognitive faible) et 75 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances secondaires en premier (38 avec une charge cognitive forte, 37 avec une charge cognitive faible). Un item permet aux participants de nous informer qu'ils ont fait une pause de plus de 30 secondes pendant leur passation : 123 participants n'en ont pas fait, nous avons donc exclu des analyses les 24 autres lorsque la variable testée est la vitesse

5.1.6.2 Résultats et discussion

Par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires entraînent une performance, un plaisir à répondre aux questions, une envie de trouver les bonnes réponses et une confiance dans leurs réponses plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible (Table 8 et Figure 8).

Tableau 8 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 4b. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		χ^2	<i>p</i>
	M	σ	M	σ		
Performance	67.23	36.39	55.62	30.90	31.79	<.001
Aimer répondre aux questions	58.28	25.58	52.46	25.94	19.48	<.001
Envie de trouver les bonnes réponses	65.78	23.84	61.98	25.07	9.61	.002
Confiance dans les réponses données	53.84	28.33	49.65	27.72	9.29	.002
Charge cognitive perçue	36.92	20.48	40.09	21.72	9.56	.002
Vitesse (pb/min) (n=123)	6.31	12.47	4.78	9.24	2.38	.12

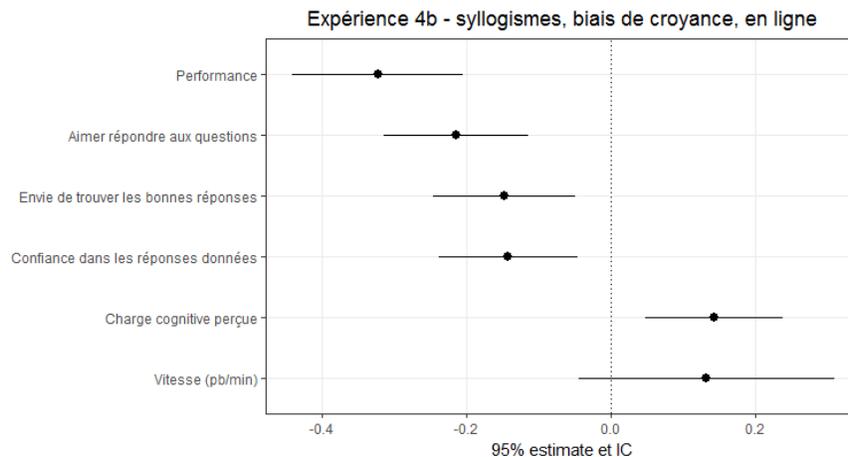


Figure 8 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 4b. Les moustaches représentent 95% de l'estimate et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »).

Les syllogismes non conflictuels ($M=78.23\pm 25.58$) sont mieux réussis que les syllogismes conflictuels ($M=44.62\pm 33.54$) ($estimate=-0.98$, $ES=0.06$; $\chi^2=266.37$, $p<.001$). L'interaction entre le type de syllogisme et la charge cognitive manipulée n'est pas significative ($\chi^2=0.18$, $p=.67$). L'effet d'interaction entre le type de syllogisme et le type de connaissances ($\chi^2=23.35$, $p<.001$) rend compte d'un impact significatif du type de connaissances sur la performance des syllogismes non conflictuels ($M_{K1}=88.89\pm 22.18$ vs. $M_{K2}=67.57\pm 24.35$) ($estimate=-0.83$, $ES=0.08$; $\chi^2=91.52$, $p<.001$) mais pas sur celle des syllogismes conflictuels ($M_{K1}=45.58\pm 34.94$ vs. $M_{K2}=43.67\pm 32.18$) ($estimate=-0.06$, $ES=0.06$; $\chi^2=0.87$, $p=.35$) (Annexe E, Figure E2a). Les syllogismes non conflictuels sont mieux réussis, qu'il s'agisse de connaissances primaires ($M_{non\ conflit}=88.89\pm 22.18$ vs. $M_{conflit}=45.58\pm 34.94$) ($estimate=-1.19$, $ES=0.09$; $\chi^2=166.92$, $p<.001$) ou secondaires ($M_{non\ conflit}=67.57\pm 24.35$ vs. $M_{conflit}=43.67\pm 32.18$) ($estimate=-0.77$, $ES=0.09$; $\chi^2=69.10$, $p<.001$). L'interaction entre la charge cognitive manipulée et le type de problème n'est ni significative pour les connaissances primaires ($p=.76$) ni pour les connaissances secondaires ($p=.34$) (Annexe E, Figure E2b).

L'ordre de présentation des types de connaissances influence les problèmes à habillage de connaissances primaires : le plaisir à effectuer la tâche ($M_{K1premier}=64.39\pm 24.33$ vs. $M_{K2premier}=52.41\pm 25.45$) ($estimate=-0.47$, $ES=0.15$; $\chi^2=9.09$, $p=.003$), l'envie de trouver les bonnes réponses ($M_{K1premier}=71.42\pm 21.22$ vs. $M_{K2premier}=60.37\pm 25.01$) ($estimate=-0.45$, $ES=0.16$;

$\chi^2=7.95$, $p=.005$) et la charge cognitive perçue ($M_{K1\text{premier}}=41.17\pm 22.26$ vs. $M_{K2\text{premier}}=32.84\pm 17.74$) ($estimate=-0.44$, $ES=0.15$; $\chi^2=8.39$, $p=.004$) sont plus importants. Concernant les problèmes à habillage de connaissances secondaires, les participants ont moins envie de trouver les bonnes réponses quand les connaissances primaires sont présentées en premier ($M_{K1\text{premier}}=57.89\pm 27.46$ vs. $M_{K2\text{premier}}=65.89\pm 21.93$) ($estimate=-0.33$, $ES=0.15$; $\chi^2=4.44$, $p=.04$) (Annexe E, Tableau E8, deuxième ligne).

La charge cognitive manipulée et le niveau estimé en mathématiques n'influencent pas les réponses des participants dans les modèles. Les analyses de corrélations montrent que plus le niveau estimé en mathématiques est important plus les participants ont confiance dans leurs réponses ($r=0.16$; $p<.001$) et moins ils ressentent la charge cognitive ($r=-0.13$; $p=.001$) (Annexe E, Figure E3).

Concernant les réponses aux derniers problèmes ABC, les participants ont davantage aimé répondre aux questions ($M_{K1\text{premier}}=52.82\pm 26.87$ vs. $M_{K2\text{premier}}=42.73\pm 27.15$) ($F(1,141)=5.01$, $p=.03$, $\eta^2_p=0.03$) et ressentent davantage de confiance ($M_{K1\text{premier}}=59.07\pm 28.70$ vs. $M_{K2\text{premier}}=45.07\pm 30.62$) ($F(1,141)=8.27$, $p=.005$, $\eta^2_p=0.05$) lorsque que les problèmes à habillages de connaissances primaires leur ont été présentés en premier. La charge cognitive manipulée influence la charge cognitive perçue lors des derniers problèmes ABC ($M_{CC\text{ faible}}=47.38\pm 20.43$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=37.29\pm 24.19$) ($F(1,141)=7.45$, $p=.007$, $\eta^2_p=0.05$) mais pas la charge cognitive globale : les participants considèrent que les problèmes ABC sont moins difficiles et demandeurs en termes de mémoire de travail que les syllogismes avec des mots inversés. Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance aux problèmes ABC est élevée ($r=0.12$, $p=.004$).

Cette étude réplique les résultats antérieurs concernant l'influence positive des connaissances primaires sur l'ensemble des variables et ceux de l'expérience 4a concernant l'interaction entre le type de connaissances et le type de syllogisme. L'étude suivante vise à enrichir les observations concernant l'implication du type de problème (non-conflit vs. conflit) au-delà de la performance.

5.1.7 Expérience 5

5.1.7.1 Participants et procédure

Les participants sont 204 étudiants (25 hommes, 179 femmes) d'âge moyen 19.06 ans (± 1.68) recrutés sur les groupes Facebook universitaires français. La passation est faite en ligne grâce au logiciel Qualtrics et dure environ 20 minutes. Tous les participants ont un niveau de français suffisant. Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 47.29/100 (± 29.43) et ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 70.22/100 (± 26.20).

Le matériel, la procédure et les analyses sont similaires à ceux de l'expérience 5 mais le matériel a été corrigé. Concernant la répartition par modalités croisées, 98 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier (49 avec une charge cognitive forte, 49 avec une charge cognitive faible) et 106 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances secondaires en premier (55 avec une charge cognitive forte, 51 avec une charge cognitive faible). Un item permet aux participants de nous informer qu'ils ont fait une pause de plus de 30 secondes pendant leur passation : 177 participants n'en ont pas fait, nous avons donc exclu des analyses les 27 autres lorsque la variable testée est la vitesse.

5.1.7.2 Résultats et discussion

Par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires entraînent une performance, un plaisir à répondre aux questions, une confiance dans les réponses données plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible (Table 9 et Figure 9).

Tableau 9 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 5. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		χ^2	p
	M	σ	M	σ		
Performance	64.46	35.86	47.49	33.41	90.87	<.001
Aimer répondre aux questions	59.67	26.39	56.40	26.38	7.55	.006
Envie de trouver les bonnes réponses	67.10	23.96	65.08	24.58	3.21	.07
Confiance dans les réponses données	55.84	27.88	52.89	28.36	6.26	.01
Charge cognitive perçue	40.43	22.00	42.99	20.48	7.66	.006
Vitesse (pb/min) (n=177)	5.77	10.95	4.83	9.97	0.21	.64

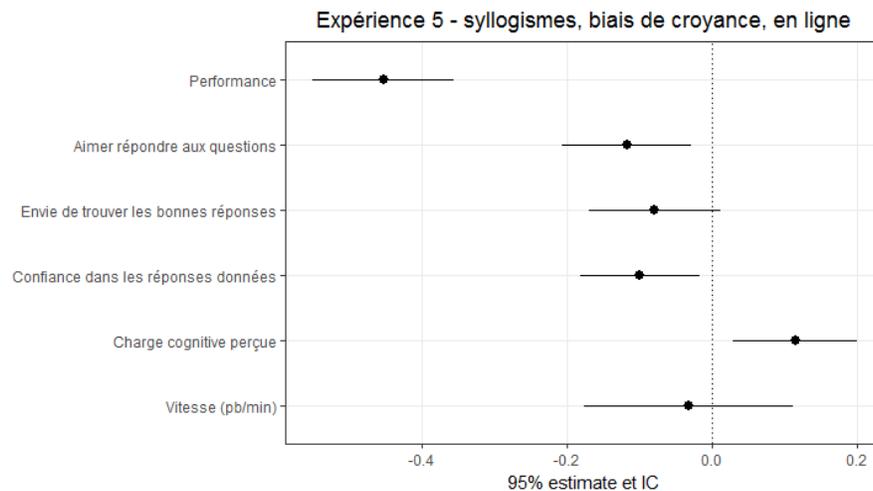
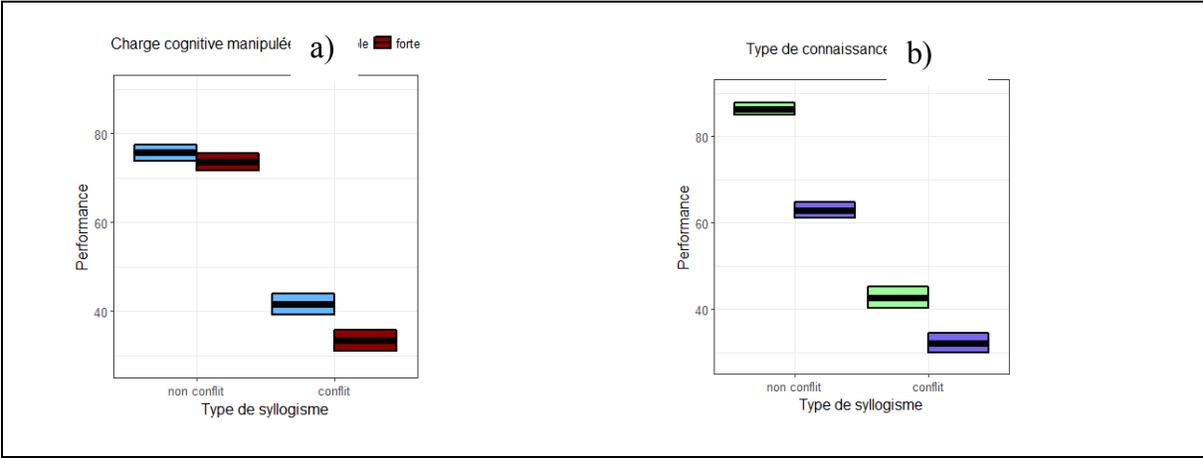
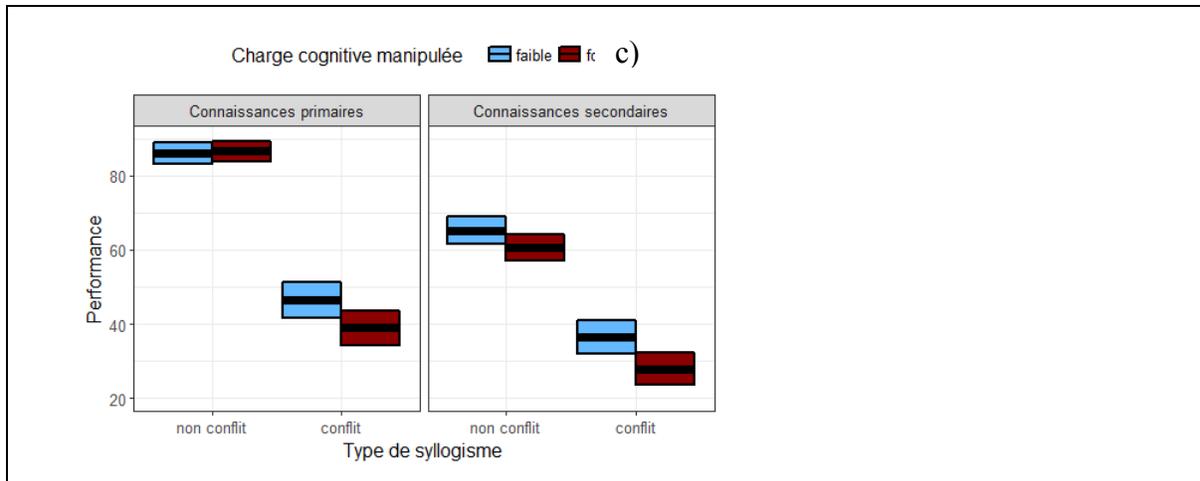


Figure 9 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 5. Les moustaches représentent 95% de l'estimate et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »).

Les syllogismes non conflictuels ($M=74.57\pm 26.25$) sont mieux réussis que les syllogismes conflictuels ($M=37.38\pm 34.12$) ($estimate=-1.14$, $ES=0.09$; $\chi^2=445.01$, $p<.001$). L'interaction entre le type de syllogisme et la charge cognitive manipulée est marginalement significative ($\chi^2=2.92$, $p=.08$) : face à des syllogismes non conflictuels, la charge cognitive n'influence pas la performance ($M_{CC\ faible}=75.62\pm 26.34$ vs. $M_{CC\ forte}=73.56\pm 26.20$) ($estimate=-0.07$, $ES=0.10$; $\chi^2=0.50$, $p=.48$) alors que face à des syllogismes conflictuels, une charge cognitive manipulée forte ($M=33.41\pm 33.44$) a tendance à diminuer les performances par rapport à une charge cognitive manipulée faible ($M=41.50\pm 34.40$) ($estimate=-0.22$, $ES=0.12$; $\chi^2=3.28$, $p=.07$) (Figure 10a). L'effet d'interaction entre le type de syllogisme et le type de connaissances ($\chi^2=13.36$, $p<.001$) rend compte d'un impact plus important du type de connaissances sur la performance des syllogismes non conflictuels ($M_{K1}=86.27\pm 20.20$ vs. $M_{K2}=62.87\pm 26.43$) ($estimate=-0.89$, $ES=0.08$; $\chi^2=133.38$, $p<.001$) que sur celle des syllogismes conflictuels ($M_{K1}=42.65\pm 34.84$ vs. $M_{K2}=32.11\pm 32.61$) ($estimate=-0.31$, $ES=0.06$; $\chi^2=27.08$, $p<.001$) (Figure 10b). Les syllogismes non conflictuels sont mieux réussis qu'il s'agisse de connaissances primaires ($M_{non\ conflit}=86.27\pm 20.20$ vs. $M_{conflit}=42.65\pm 34.84$) ($estimate=-1.22$, $ES=0.08$; $\chi^2=242.26$, $p<.001$) ou secondaires ($M_{non\ conflit}=62.87\pm 26.43$ vs. $M_{conflit}=32.11\pm 32.61$) ($estimate=-0.92$, $ES=0.07$; $\chi^2=152.84$, $p<.001$). L'interaction entre la charge cognitive manipulée et le type de problème

n'est ni significative dans le cadre d'un habillage de connaissances primaires ($p=.14$), ni dans celui d'un habillage de connaissances secondaires ($p=.43$) (Figure 10c).





Figures 10 : Expérience 5. Interactions entre le type de syllogisme et a) la charge cognitive manipulée, b) le type de connaissances et c) la charge cognitive manipulée et le type de connaissances sur la performance des participants. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

Plus particulièrement, concernant les problèmes à habillage de connaissances primaires uniquement, les syllogismes non conflictuels ($M=38.89\pm 21.46$) entraînent une charge cognitive perçue plus faible que les syllogismes conflictuels ($M=41.96\pm 22.47$) ($estimate=0.14$, $ES=0.05$; $\chi^2=6.98$, $p=.008$). Concernant les problèmes à habillage de connaissances secondaires, les syllogismes conflictuels favorisent le plaisir à répondre aux questions ($M_{non\ conflit}=54.53\pm 27.50$ vs. $M_{conflit}=58.28\pm 25.14$) ($estimate=0.14$, $ES=0.06$; $\chi^2=6.14$, $p=.01$) et l'envie de trouver les bonnes réponses ($M_{non\ conflit}=63.68\pm 24.96$ vs. $M_{conflit}=66.48\pm 24.17$) ($estimate=0.11$, $ES=0.06$; $\chi^2=4.02$, $p=.05$).

Une charge cognitive manipulée forte a tendance à diminuer les performances ($M_{CC\ faible}=58.56\pm 35.04$ vs. $M_{CC\ forte}=53.48\pm 36.11$) ($estimate=-0.13$, $ES=0.07$; $\chi^2=3.23$, $p=.07$). Cet effet est notamment observable pour les syllogismes à habillage de connaissances secondaires ($M_{CC\ faible}=50.87\pm 33.47$ vs. $M_{CC\ forte}=44.23\pm 33.10$) ($estimate=-0.18$, $ES=0.09$; $\chi^2=3.66$, $p=.05$).

Les participants ont une meilleure performance globale lorsque les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier ($M_{K1\ premier}=59.18\pm 34.88$ vs. $M_{K2\ premier}=53.01\pm 36.16$) ($estimate=-0.18$, $ES=0.07$; $\chi^2=5.95$, $p=.01$). Particulièrement, concernant les syllogismes à habillage de connaissances primaires, le plaisir à effectuer la tâche ($M_{K1\ premier}=64.74\pm 22.57$ vs. $M_{K2\ premier}=54.99\pm 28.75$) ($estimate=-0.39$, $ES=0.13$; $\chi^2=8.61$, $p=.003$) et l'envie de trouver les bonnes réponses ($M_{K1\ premier}=70.67\pm 20.42$ vs. $M_{K2\ premier}=63.79\pm 26.44$)

(*estimate*=-0.30, ES=0.13; $\chi^2=5.37$, $p=.02$) sont plus importants lorsque ces problèmes sont présentés en premier. Concernant les syllogismes à habillage de connaissances secondaires, la performance est meilleure quand les connaissances primaires sont présentées en premier ($M_{K1\text{premier}}=51.27\pm34.32$ vs. $M_{K2\text{premier}}=43.98\pm32.23$) (*estimate*=-0.23, ES=0.10; $\chi^2=5.75$, $p=.02$) (Annexe E, Tableau E9, deuxième ligne).

Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance ($r=0.12$; $p<.001$) et l'envie de trouver les bonnes réponses ($r=0.14$; $p<.001$) sont fortes ($0.004<\textit{estimates}<0.005$, $0.001<\text{ESs}<0.002$; $6.83<\chi^2s<9.82$, $.002<ps<.01$) (Annexe E, Figure E3).

Les résultats concernant les derniers problèmes ABC ne rendent pas compte d'influence significative de l'ordre de présentation des types de connaissances. La charge cognitive manipulée influence la charge cognitive perçue sur les problèmes ABC ($M_{CC\text{ faible}}=55.47\pm26.92$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=44.70\pm22.33$) ($F(1,198)=9.54$, $p=.002$, $\eta^2_p=0.04$) : les participants considèrent que les problèmes ABC sont moins difficiles et demandeurs en termes de mémoire de travail que les syllogismes avec des mots inversés. Par contre, il n'y a pas d'effet sur la charge cognitive globale. Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance aux problèmes ABC ($r=0.15$, $p<.001$), le plaisir à répondre aux questions ($r=0.13$, $p<.001$) et l'envie de trouver les bonnes réponses ($r=0.20$, $p<.001$) sont élevés.

L'expérience 5 confirme l'influence positive des connaissances primaires sur la plupart des variables d'intérêt. Encore une fois, une charge cognitive manipulée forte diminue uniquement les performances pour les problèmes de connaissances secondaires montrant que ces connaissances nécessitent plus de ressources en mémoire de travail pour être traitées. De plus, présenter des problèmes à habillage de connaissances secondaires en premier semble bien miner la motivation des participants même sur des problèmes censés être intrinsèquement motivants (connaissances primaires).

Par ailleurs, la performance est fortement diminuée pour les syllogismes non conflictuels à habillage de connaissances secondaires (comparativement aux syllogismes non conflictuels à habillage de connaissances primaires). Cela argumente en faveur d'une sensation de conflit

parasite lié aux connaissances secondaires. Cependant, cette sensation de conflit n'est pas suffisante pour déclencher ou terminer l'action du système 2 et produire la bonne réponse. De plus, l'effet du type de syllogisme sur la charge cognitive ressentie est seulement observable pour les habillages de connaissances primaires : les participants ressentent « correctement » le conflit pour les problèmes conflictuels. Ce résultat sous-tendrait que pour les habillages de connaissances secondaires, la charge cognitive ressentie est toujours la même, qu'il y ait conflit ou non : les participants ont une sensation de conflit même quand elle n'a pas lieu d'être (syllogismes non conflictuels). Les participants semblent sentir une charge cognitive liée au conflit (biais de croyance) et aux connaissances secondaires. Cependant, ces deux charges ne s'additionnent pas : dès qu'il y a une sensation conflictuelle (quelle qu'en soit la source), une charge cognitive est attribuée. Enfin, le fait de percevoir un conflit semble motiver les participants : dans le cas de cette expérience, les participants déclarent aimer les jeux de logiques et semblent intéressés par le fait d'être mis au défi.

Etonnamment, tout comme les expériences 4a et 4b, cette expérience ne réplique pas l'interaction attendue (ou marginalement) entre le type de syllogisme et la charge cognitive manipulée. Cette absence d'effet peut-être lié au contre-balancement de l'effet des connaissances primaires mais également à la tâche de charge cognitive choisie. En effet, inverser l'ordre des mots dans les syllogismes est une tâche intrinsèque au problème et pourrait ne pas générer le même type ou la même quantité de charge cognitive qui entraverait l'action du système 2. L'expérience 6 propose de mettre à l'épreuve les résultats obtenus en interrogeant des participants plus jeunes et en utilisant une *Dot Memory Task*.

5.1.8 Expérience 6

5.1.8.1 Participants et procédure

Les participants sont 102 élèves de collège/lycée de la région toulousaine (46 hommes, 56 femmes ; âge moyen 14.37 ans \pm 1.46) ; 19 participants ont été écartés des analyses car ils ont montré des signes qui ont pu faire douter de leur implication dans la tâche (perturbation des autres élèves, croix à l'extérieur des cases à répétition, *etc.*). Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 55.46/100 (\pm 25.39) et ils déclarent aimer faire des jeux de

logique à 66.09/100 (± 28.56), 76% (n=78) n'ont jamais joué à des jeux de logique ou très rarement.

Le matériel, la procédure et les analyses sont similaires à ceux de l'expérience 5 mais au lieu d'une inversion de l'ordre des mots, une *Dot Memory Task* a été utilisée comme tâche de charge cognitive (comme dans l'expérience 3). Concernant la répartition par modalités croisées, 51 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier (27 avec une charge cognitive forte, 24 avec une charge cognitive faible) et 51 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances secondaires en premier (28 avec une charge cognitive forte, 23 avec une charge cognitive faible).

5.1.8.2 Résultats et discussion

La *Dot Memory Task* est réussie à 97.87% (± 11.36) pour la modalité de charge cognitive faible et à 65.45% (± 25.05) pour la modalité de charge cognitive forte ($t(100)=17.23$, $p<.001$). Le type de connaissances n'influence pas la réussite à la *Dot Memory Task* ($p=.26$).

Par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires entraînent une performance et une confiance dans les réponses données plus importantes ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible (Table 10 et Figure 11). Elles ont également tendance à entraîner un plaisir à la tâche plus important.

Tableau 10 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 6. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		χ^2	p
	M	σ	M	σ		
Performance	59.93	32.20	44.12	26.30	41.88	<.001
Aimer répondre aux questions	57.22	38.71	54.26	29.05	3.38	.06
Envie de trouver les bonnes réponses	69.35	26.77	67.28	26.95	1.87	.17
Confiance dans les réponses données	58.51	30.26	52.96	30.02	11.44	<.001
Charge cognitive perçue	38.02	23.90	40.77	23.96	3.76	.05

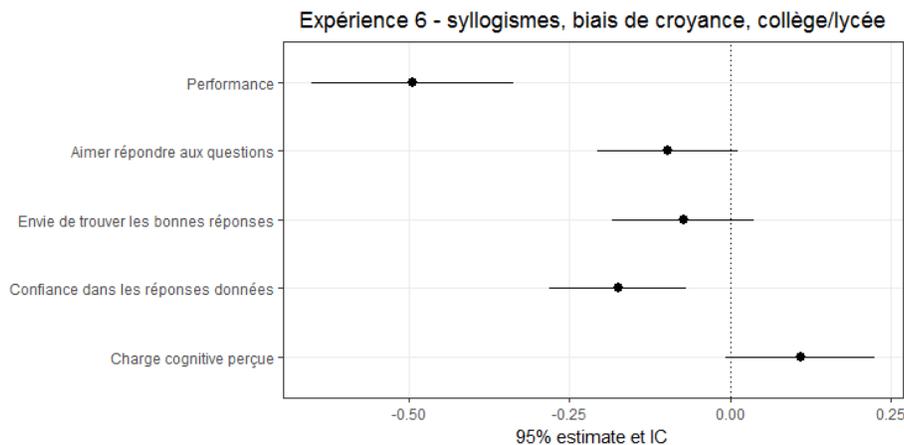
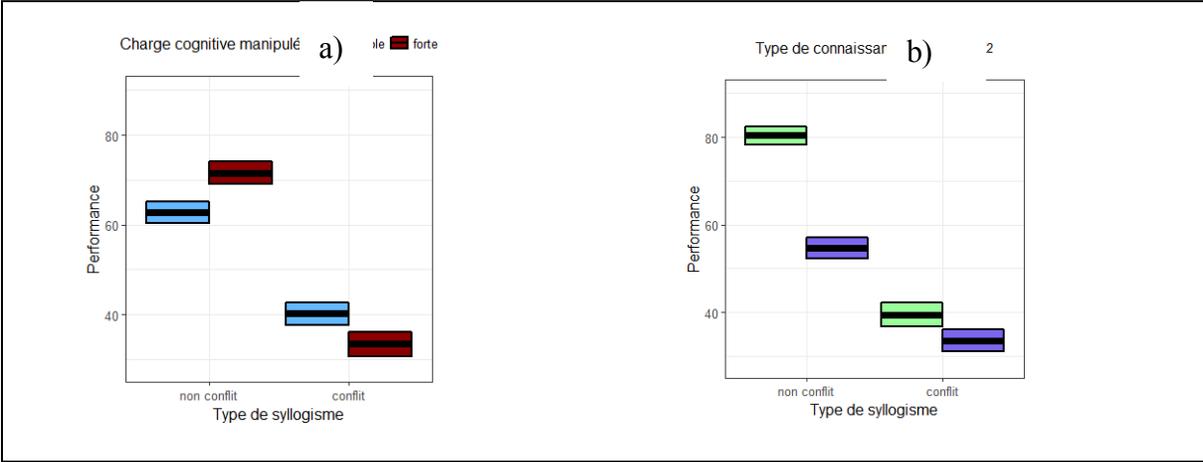
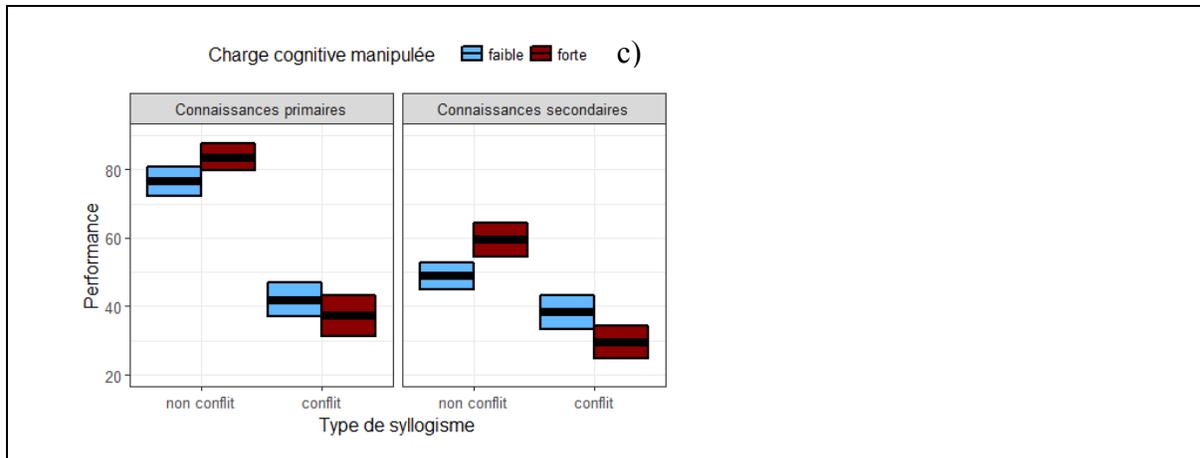


Figure 11 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 6. Les moustaches représentent 95% de l'estimate et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »).

Les syllogismes non conflictuels ($M=67.52\pm 25.71$) sont mieux réussis que les syllogismes conflictuels ($M=36.52\pm 26.65$) ($estimate=-1.02$, $ES=0.08$; $\chi^2=161.08$, $p<.001$). L'interaction entre le type de syllogisme et la charge cognitive manipulée est significative ($\chi^2=11.00$, $p=.001$) : une forte charge cognitive manipulée augmente les performances pour les syllogismes non conflictuels ($M_{CC\ faible}=62.76\pm 25.06$ vs. $M_{CC\ forte}=71.59\pm 25.67$) ($estimate=0.32$, $ES=0.13$; $\chi^2=6.26$, $p=.01$) et a tendance à diminuer les performances pour les syllogismes conflictuels ($M_{CC\ faible}=40.16\pm 24.92$ vs. $M_{CC\ forte}=33.41\pm 27.78$) ($estimate=-0.29$, $ES=0.17$; $\chi^2=2.78$, $p=.09$) (Figure 12a). L'effet d'interaction entre le type de syllogisme et le type de connaissances ($\chi^2=17.40$, $p<.001$) rend compte d'un impact plus important du type de connaissances sur la performance des syllogismes non conflictuels ($M_{K1}=80.39\pm 21.00$ vs. $M_{K2}=54.66\pm 23.53$) ($estimate=-1.00$, $ES=0.11$; $\chi^2=87.40$, $p<.001$) que sur celle des syllogismes conflictuels ($M_{K1}=39.46\pm 28.24$ vs. $M_{K2}=33.58\pm 24.75$) ($estimate=-0.22$, $ES=0.09$; $\chi^2=6.18$, $p=.01$) (Figure 12b). Les syllogismes non conflictuels sont mieux réussis qu'il s'agisse de connaissances primaires ($M_{non\ conflit}=80.39\pm 21.00$ vs. $M_{conflit}=39.46\pm 28.34$) ($estimate=-1.27$, $ES=0.11$; $\chi^2=139.04$, $p<.001$) ou secondaires ($M_{non\ conflit}=54.66\pm 23.53$ vs. $M_{conflit}=33.58\pm 24.75$) ($estimate=-0.80$, $ES=0.13$; $\chi^2=39.06$, $p<.001$). L'interaction entre la charge cognitive manipulée et le type de problème est marginalement significative dans le cadre d'un habillage de connaissances primaires ($\chi^2=2.89$, $p=.09$) et significatif dans celui d'un habillage de connaissances secondaires ($\chi^2=8.72$, $p=.004$) (Figure 12c). Pour un habillage de connaissances secondaires, une charge cognitive forte

influence positivement les performances dans les problèmes non conflictuels ($M_{CC\text{ faible}}=48.94\pm 20.16$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=59.54\pm 25.23$) ($F(1,97)=6.05$, $p=.01$, $\eta^2_p=0.06$) et marginalement négativement dans les problèmes conflictuels ($M_{CC\text{ faible}}=38.30\pm 24.92$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=29.54\pm 24.10$) ($F(1,97)=3.32$, $p=.07$, $\eta^2_p=0.03$). Le type de syllogisme n'influence significativement aucune autre variable d'intérêt.





Figures 12 : Expérience 6. Interactions entre le type de syllogisme et a) la charge cognitive manipulée, b) le type de connaissances et c) la charge cognitive manipulée et le type de connaissances sur la performance des participants. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

Une charge cognitive manipulée forte diminue la confiance dans les réponses données ($M_{CC\text{ faible}}=62.20\pm 29.68$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=50.21\pm 29.66$) ($estimate=-0.33$, $ES=0.15$; $\chi^2=4.51$, $p=.04$). Cet effet est uniquement observé pour les problèmes à habillage de connaissances secondaires ($M_{CC\text{ faible}}=60.14\pm 29.73$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=46.82\pm 29.01$) ($estimate=-0.39$, $ES=0.16$; $\chi^2=5.83$, $p=.01$) (Annexe E, Tableau E10, première ligne).

Les participants aiment davantage répondre aux questions ($M_{K1\text{premier}}=60.48\pm 28.34$ vs. $M_{K2\text{premier}}=51.00\pm 28.70$) ($estimate=-0.35$, $ES=0.17$; $\chi^2=4.16$, $p=.04$) et ont davantage confiance en leurs réponses ($M_{K1\text{premier}}=63.28\pm 28.39$ vs. $M_{K2\text{premier}}=48.19\pm 30.20$) ($estimate=-0.48$, $ES=0.15$; $\chi^2=9.65$, $p=.002$) lorsque les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier. Particulièrement, concernant les problèmes à habillage de connaissances primaires, le plaisir à effectuer la tâche ($M_{K1\text{premier}}=62.50\pm 27.92$ vs. $M_{K2\text{premier}}=51.95\pm 28.64$) ($estimate=-0.39$, $ES=0.19$; $\chi^2=4.23$, $p=.04$) et la confiance ($M_{K1\text{premier}}=66.95\pm 27.68$ vs. $M_{K2\text{premier}}=50.06\pm 30.50$) ($estimate=-0.56$, $ES=0.17$; $\chi^2=11.07$, $p=.001$) sont plus grands quand ces problèmes sont présentés en premier. La confiance dans les réponses données aux problèmes à habillage de connaissances secondaires est aussi plus importante lorsque les problèmes de connaissances primaires sont présentés en premier ($M_{K1\text{premier}}=59.60\pm 28.74$ vs. $M_{K2\text{premier}}=46.32\pm 29.93$) ($estimate=-0.41$, $ES=0.16$; $\chi^2=6.27$, $p=.01$) (Annexe E, Tableau E10, deuxième ligne).

Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la confiance dans les réponses données ($r=0.22$; $p=.001$; $estimate=0.010$, $ES=0.003$; $\chi^2=9.83$, $p=.002$) est forte (Annexe E, Figure E3).

Concernant les derniers problèmes ABC, les problèmes sont marginalement mieux réussis lorsque la charge cognitive est forte ($M_{CC\text{ faible}}=47.87\pm 23.03$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=56.36\pm 21.48$) ($F(1,96)=3.57$; $p=.06$; $\eta^2_p=0.04$) dénotant d'une implication dans la tâche plus forte lorsque la matrice de la *Dot Memory Task* est plus complexe. La charge cognitive ressentie sur l'ensemble de l'étude est plus importante lorsque la charge cognitive manipulée est forte ($M_{CC\text{ faible}}=34.68\pm 22.52$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=46.55\pm 18.28$) ($F(1,96)=10.02$; $p=.002$; $\eta^2_p=0.09$) validant la procédure *Dot Memory Task*. L'ordre de présentation ne semble pas avoir eu d'influence sur les variables des derniers problèmes. Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus le plaisir à répondre aux questions ABC ($r=0.25$, $p<.001$) est élevé et moins la charge cognitive perçue sur ces problèmes est forte ($r=-0.25$, $p<.001$) ainsi que la charge cognitive sur l'ensemble de l'étude ($r=-0.29$, $p<.001$).

L'expérience 6 réplique les résultats précédents concernant l'influence positive des connaissances primaires sur la plupart des variables et l'impact négatif de la présentation des connaissances secondaires en premier qui minent le plaisir ressenti et la confiance dans les réponses données. Elle confirme également que, par rapport aux syllogismes non conflictuels à habillage de connaissances primaires, les performances aux syllogismes non conflictuels à habillage de connaissances secondaires sont diminuées. Ce résultat est un argument en faveur de l'hypothèse que les connaissances secondaires entraînent une sensation de conflit parasite et que cette sensation (i) n'est pas suffisante pour activer la réponse du système 2 ou (ii) empêche le système 2 de finir son processus. L'expérience 6 rend aussi compte d'une interaction entre le type de syllogisme et la charge cognitive manipulée : les performances sont meilleures pour les problèmes non conflictuels lorsque la charge cognitive est forte (résultat qui a tendance à s'inverser pour les problèmes conflictuels). De manière générale, ce résultat illustre ce qui a été observé lors des passations : les participants étaient beaucoup plus concentrés lorsque la tâche de *Dot Memory Task* était complexe. Il est aussi possible que cette meilleure performance avec une charge cognitive forte soit liée à l'activation et à la complétion du processus du système 2 (système 2 activé par la sensation de conflit lié à la charge cognitive forte et complétion lors de

problèmes non conflictuels). Il est aussi intéressant de noter que l'impact de la charge cognitive manipulée est plus marqué pour les syllogismes conflictuels à habillage de connaissances secondaires que pour les syllogismes conflictuels à habillage de connaissances primaires. Les connaissances secondaires nécessiteraient donc bien plus de ressources cognitives et gêneraient la mise en place du système 2 (sensation parasite et doute).

Afin de confirmer l'influence positive d'un habillage de connaissances primaires sur les performances, mais aussi sur l'engagement émotionnel et cognitif, la confiance et la charge cognitive perçue, une dernière étude, menée avec des étudiants, utilise des syllogismes neutres. L'expérience 7 sert également de base pour le matériel des expériences de la deuxième partie.

5.1.9 Expérience 7

5.1.9.1 Participants et procédure

Les participants sont 212 étudiants (39 hommes, 173 femmes) d'âge moyen 18.96 ans (± 3.20) recrutés sur les groupes Facebook universitaires français. La passation est faite en ligne grâce au logiciel Qualtrics et dure environ 20 minutes. Tous les participants ont un niveau de français suffisant. Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 45.30/100 (± 30.93) et ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 67.85/100 (± 26.14).

La procédure est la même que celle des expériences 4a, 4b et 5, mais les syllogismes n'utilisent plus les connaissances antérieures, ils cherchent à les minimiser le plus possible. Les syllogismes utilisés contiennent des termes et des références qui n'existent pas (tout comme les expériences 1, 2 et 3). Sur chaque page internet, quatre syllogismes sont affichés à chaque fois et peuvent être de mode AAA/AII (positif pour chaque ligne) comme dans les expériences précédentes avec des syllogismes ou AEE/AOO (négation pour les deux dernières lignes) ([Annexe C, Tableau C4](#)) :

Habillages liés aux connaissances primaires (nourriture et caractéristiques faune) :

Tous les ronvacs sont sauvages et herbivores,

Or les cachuls jaunes à cornes sont des ronvacs,

Donc les cachuls jaunes à cornes sont sauvages et herbivores.

*Toutes les loutas sont sucrées et juteuses,
Or la rouli blanche n'est pas une louta,
Donc la rouli blanche n'est pas sucrée et juteuse.*

Habillages liés aux connaissances secondaires (grammaire et mathématiques) :

*Toutes les équations de Foster sont de type $x=\sqrt{(3b-2ac)}$,
Or la formule de Jyrog est une équation de Foster,
Donc la formule de Jyrog est de type $x=\sqrt{(3b-2ac)}$.*

*Tous les noms communs sendamin finissent par -li au pluriel,
Or « alda » n'est pas un nom commun sendamin,
Donc « alda » ne finit pas par un -li au pluriel.*

Le test final contient les quatre syllogismes types avec les termes ABC « *A est B, Or C est B, Donc C est A* », « *A est B, Or C n'est pas B, Donc C n'est pas A* », « *A est B, Or C est A, Donc C est B* » et « *A est B, or C n'est pas A, Donc C n'est pas B* ». La charge cognitive est manipulée inter-groupe en inversant l'ordre des mots pour chaque ligne du syllogisme (modalité charge cognitive forte). Concernant la répartition par modalités croisées, 101 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier (54 avec une charge cognitive forte, 47 avec une charge cognitive faible) et 111 participants ont été exposés à des problèmes à habillage de connaissances secondaires en premier (51 avec une charge cognitive forte, 60 avec une charge cognitive faible) ; 179 participants n'ont pas fait de pause de plus de 30 secondes, nous avons donc exclu des analyses les 33 autres lorsque la variable testée est la vitesse. Les mêmes analyses que celles des expériences précédentes ont été utilisées.

5.1.9.2 Résultats et discussion

Le mode des syllogismes n'influence pas la performance (AAA/AII $M=77.06\pm 24.91$ vs. AEE/AOO $M=77.53\pm 25.11$; $p=.70$), mais les participants sont moins rapides pour les problèmes AEE/AOO ($M=4.09\pm 7.23$) que pour les problèmes AAA/AII ($M=5.59\pm 13.24$) ($estimate=-0.17$, $ES=0.07$; $\chi^2=5.07$, $p=.02$).

Par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires entraînent une performance, un plaisir à répondre aux questions, un envie de trouver les bonnes réponses et une

confiance dans les réponses données plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible (Table 11 et Figure 13).

Tableau 11 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 7. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		χ^2	p
	M	σ	M	σ		
Performance	85.20	22.23	69.40	25.14	164.86	<.001
Aimer répondre aux questions	53.42	28.41	45.24	28.94	56.15	<.001
Envie de trouver les bonnes réponses	65.45	28.09	60.68	29.77	21.35	<.001
Confiance dans les réponses données	56.71	30.12	47.77	30.32	68.80	<.001
Charge cognitive perçue	50.26	22.41	57.04	22.50	54.24	<.001
Vitesse (pb/min) (n=179)	4.92	9.67	4.75	11.63	0.15	.70

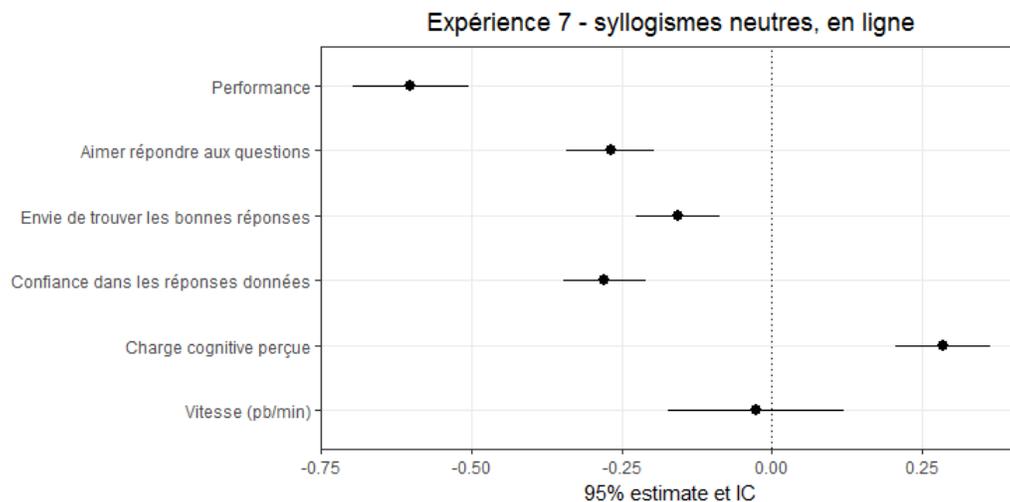


Figure 13 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes de l'expérience 7. Les moustaches représentent 95% de l'estimateur et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »).

Une charge cognitive manipulée forte diminue la performance ($M_{CC \text{ faible}}=81.02\pm 24.50$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=73.51\pm 24.95$) ($estimate=-0.34$, $ES=0.09$; $\chi^2=13.04$, $p<.001$), le fait d'aimer répondre aux questions ($M_{CC \text{ faible}}=55.09\pm 27.15$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=43.47\pm 29.57$) ($estimate=-0.46$, $ES=0.11$; $\chi^2=16.20$, $p<.001$), de vouloir trouver les bonnes réponses ($M_{CC \text{ faible}}=68.93\pm 26.47$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=57.08\pm 30.28$) ($estimate=-0.42$, $ES=0.12$; $\chi^2=12.25$, $p<.001$) et la confiance dans les réponses données ($M_{CC \text{ faible}}=57.96\pm 29.91$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=46.42\pm 30.09$) ($estimate=-0.45$, $ES=0.11$; $\chi^2=15.52$, $p<.001$). Ces effets sont observés pour les connaissances primaires (performance M_{CC}

faible=90.07±18.86 vs. $M_{CC\ forte}=80.24±24.26$ (*estimate*=-0.48, ES=0.12 ; $\chi^2=15.64$, $p<.001$), aimer répondre aux questions $M_{CC\ faible}=59.56±25.35$ vs. $M_{CC\ forte}=47.17±30.00$ (*estimate*=-0.50, ES=0.12 ; $\chi^2=16.11$, $p<.001$), envie de trouver les bonnes réponses $M_{CC\ faible}=71.45±25.29$ vs. $M_{CC\ forte}=59.32±29.50$ (*estimate*=-0.46, ES=0.13 ; $\chi^2=12.80$, $p<.001$) et confiance dans les réponses données $M_{CC\ faible}=62.51±29.19$ vs. $M_{CC\ forte}=50.80±29.98$ (*estimate*=-0.44, ES=0.12 ; $\chi^2=13.36$, $p<.001$)). Ils sont présents de la même façon pour les connaissances secondaires (performance $M_{CC\ faible}=71.96±26.14$ vs. $M_{CC\ forte}=66.78±23.86$ (*estimate*=-0.25, ES=0.11 ; $\chi^2=5.36$, $p=.02$), aimer répondre aux questions $M_{CC\ faible}=50.61±28.19$ vs. $M_{CC\ forte}=39.77±28.73$ (*estimate*=-0.44, ES=0.13 ; $\chi^2=11.73$, $p<.001$), envie de trouver les bonnes réponses $M_{CC\ faible}=66.41±27.43$ vs. $M_{CC\ forte}=54.83±30.95$ (*estimate*=-0.40, ES=0.13 ; $\chi^2=9.23$, $p=.002$) et confiance dans les réponses données $M_{CC\ faible}=53.41±30.00$ vs. $M_{CC\ forte}=42.03±29.63$ (*estimate*=-0.45, ES=0.12 ; $\chi^2=14.08$, $p<.001$)) ([Annexe E, Tableau E11](#), première ligne).

Les participants aiment davantage répondre aux questions ($M_{K1premier}=51.38±27.28$ vs. $M_{K2premier}=47.47±30.30$) (*estimate*=-0.21, ES=0.11 ; $\chi^2=3.30$, $p=.07$) et ont davantage confiance en leurs réponses ($M_{K1premier}=54.50±28.69$ vs. $M_{K2premier}=50.19±32.01$) (*estimate*=-0.25, ES=0.11 ; $\chi^2=4.75$, $p=.03$) lorsque les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier. Particulièrement, concernant les problèmes à habillage de connaissances primaires, le plaisir à effectuer la tâche ($M_{K1premier}=57.66±25.51$ vs. $M_{K2premier}=49.57±30.36$) (*estimate*=-0.35, ES=0.12 ; $\chi^2=8.13$, $p=.004$), l'envie de trouver les bonnes réponses ($M_{K1premier}=70.70±25.81$ vs. $M_{K2premier}=60.66±29.26$) (*estimate*=-0.40, ES=0.13 ; $\chi^2=9.69$, $p=.002$) et la confiance dans les réponses données ($M_{K1premier}=59.26±27.31$ vs. $M_{K2premier}=54.39±32.36$) (*estimate*=-0.26, ES=0.12 ; $\chi^2=4.66$, $p=.03$) sont plus importants lorsqu'ils sont présentés en premier. La confiance dans les réponses données est également plus importante pour les problèmes à habillage de connaissances secondaires lorsque les connaissances primaires sont présentées en premier ($M_{K1premier}=49.74±29.31$ vs. $M_{K2premier}=45.99±31.17$) (*estimate*=-0.23, ES=0.12 ; $\chi^2=3.76$, $p=.05$) ([Annexe E, Tableau E11](#), deuxième ligne).

Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance ($r=0.20$; $p<.001$), le fait d'aimer répondre aux questions ($r=0.13$; $p<.001$) et la confiance dans les réponses données ($r=0.26$; $p<.001$) sont fortes et moins la charge cognitive perçue est importante ($r=-0.14$; $p<.001$) ($-0.003<estimates<0.008$, $0.001<ESs<0.002$; $3.56<\chi^2s<19.88$, $ps<.05$) ([Annexe E, Figure E3](#)).

La charge cognitive manipulée influence la charge cognitive perçue sur les derniers problèmes ABC ($M_{CC \text{ faible}}=46.36\pm 26.78$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=39.47\pm 25.92$) ($F(1,206)=3.65$, $p=.05$, $\eta^2_p=0.02$) : les participants considèrent que les problèmes ABC sont moins difficiles et exigeants en termes de mémoire de travail que les syllogismes avec des mots inversés. La charge cognitive manipulée ($M_{CC \text{ faible}}=54.41\pm 25.54$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=61.07\pm 25.54$) ($F(1,206)=4.69$, $p=.03$, $\eta^2_p=0.02$) et l'ordre de présentation des types de connaissances ($M_{K1\text{premier}}=54.10\pm 23.81$ vs. $M_{K2\text{premier}}=60.99\pm 26.16$) ($F(1,206)=4.30$, $p=.04$, $\eta^2_p=0.02$) influencent la charge cognitive perçue sur l'ensemble de l'étude. Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la confiance dans les réponses aux questions ABC est forte ($r=0.17$, $p<.001$).

L'expérience 7 conforte l'hypothèse d'une influence positive des connaissances primaires par rapport aux connaissances secondaires avec des syllogismes neutres. Les résultats concernant l'impact de la charge cognitive manipulée semblent aller dans le sens de la théorie de la charge cognitive : une charge cognitive manipulée forte diminue les performances, l'engagement et la confiance des participants. Tout comme les expériences 4b et 5, les problèmes ABC sont perçus comme moins difficiles que les syllogismes avec mots inversés. De plus, sur l'ensemble de l'étude, le fait d'inverser l'ordre des mots entraîne une charge cognitive perçue plus forte. Ces deux résultats valident le fait que l'inversion des mots implique une charge additive en mémoire de travail. Concernant l'influence de l'ordre de présentation des connaissances, présenter des connaissances primaires en premier semblerait augmenter l'engagement émotionnel et la confiance dans les réponses alors que présenter des connaissances secondaires en premier minerait la motivation des participants. De plus, la charge cognitive perçue est plus faible lorsque les connaissances primaires sont présentées en premier. Présenter les connaissances primaires en premier (et non des connaissances secondaires) ne saperait donc pas la motivation et diminuerait la charge cognitive perçue pour un même matériel.

Afin de clarifier les influences respectives des types de connaissances et de conforter nos observations, une analyse groupée a été menée sur l'ensemble des huit études de cette première partie empirique.

5.1.10 Analyse groupée et synthèse de la première partie empirique

Cette analyse prend en compte l'ensemble des huit premières études afin de conclure sur l'influence des types de connaissances dans la résolution de problèmes logiques en termes de performance mais surtout d'engagement émotionnel et cognitif. Les analyses traitent les données compilées en reprenant les mêmes tests que précédemment.

Mots connus vs. inconnus

Les expériences utilisant des mots inconnus (*i.e.*, minimisant l'impact potentiel des connaissances antérieures) ($M=64.34\pm 25.48$) ont été mieux réussies que celles utilisant des mots connus ($M=59.51\pm 34.44$) ($t(1175)=-5.65$; $p<.001$) (résultat similaire en considérant les connaissances primaires et secondaires séparément) même si les participants ont moins aimé répondre à leurs questions (mots inconnus $M=49.04\pm 30.31$ vs. mots connus $M=57.72\pm 26.92$) ($t(1175)=10.90$; $p<.001$) et ont ressenti plus de charge cognitive (mots inconnus $M=45.97\pm 24.95$ vs. mots connus $M=39.61\pm 21.80$) ($t(1175)=-9.77$; $p<.001$).

Habillages liés aux connaissances primaires vs. connaissances secondaires

Pour l'ensemble de ces premières études, par rapport aux connaissances secondaires, les connaissances primaires entraînent une performance, un plaisir à répondre aux questions, une envie de trouver les bonnes réponses et une confiance dans les réponses données plus importants ainsi qu'une charge cognitive perçue plus faible (Table 12 et Figure 14).

Tableau 12 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes pour l'ensemble des expériences 1 à 7 (n=1176). Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		χ^2	p
	M	σ	M	σ		
Performance (n=1176)	68.06	30.41	56.13	28.51	297.29	<.001
Aimer répondre aux questions (n=1176)	56.83	28.30	49.32	29.42	252.59	<.001
Envie de trouver les bonnes réponses (n=1038)	66.09	26.94	62.10	28.37	74.31	<.001
Confiance dans les réponses données (n=1038)	57.32	29.62	51.19	30.07	140.67	<.001
Charge cognitive perçue (n=1176)	39.83	23.27	46.20	23.80	256.51	<.001
Vitesse (pb/min) (n=867)	5.68	10.85	5.13	11.67	2.22	.14

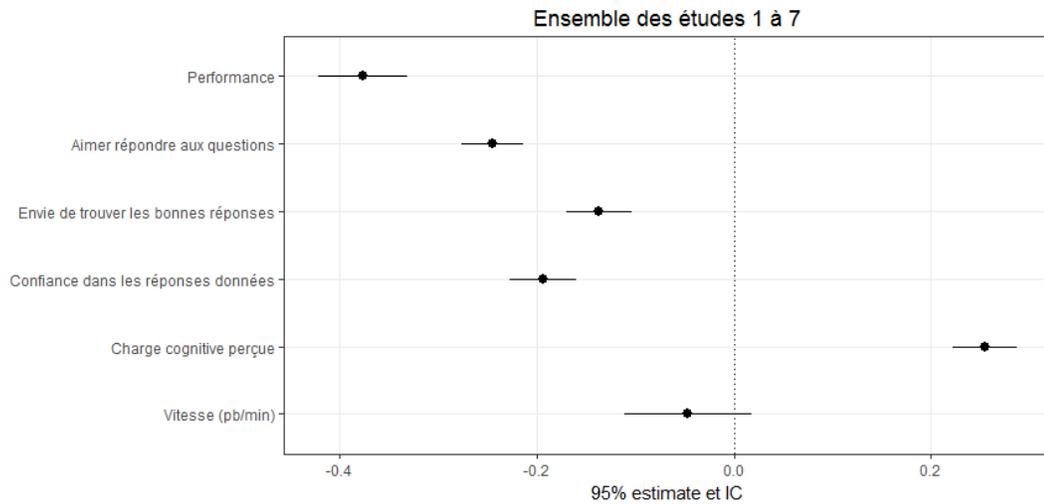


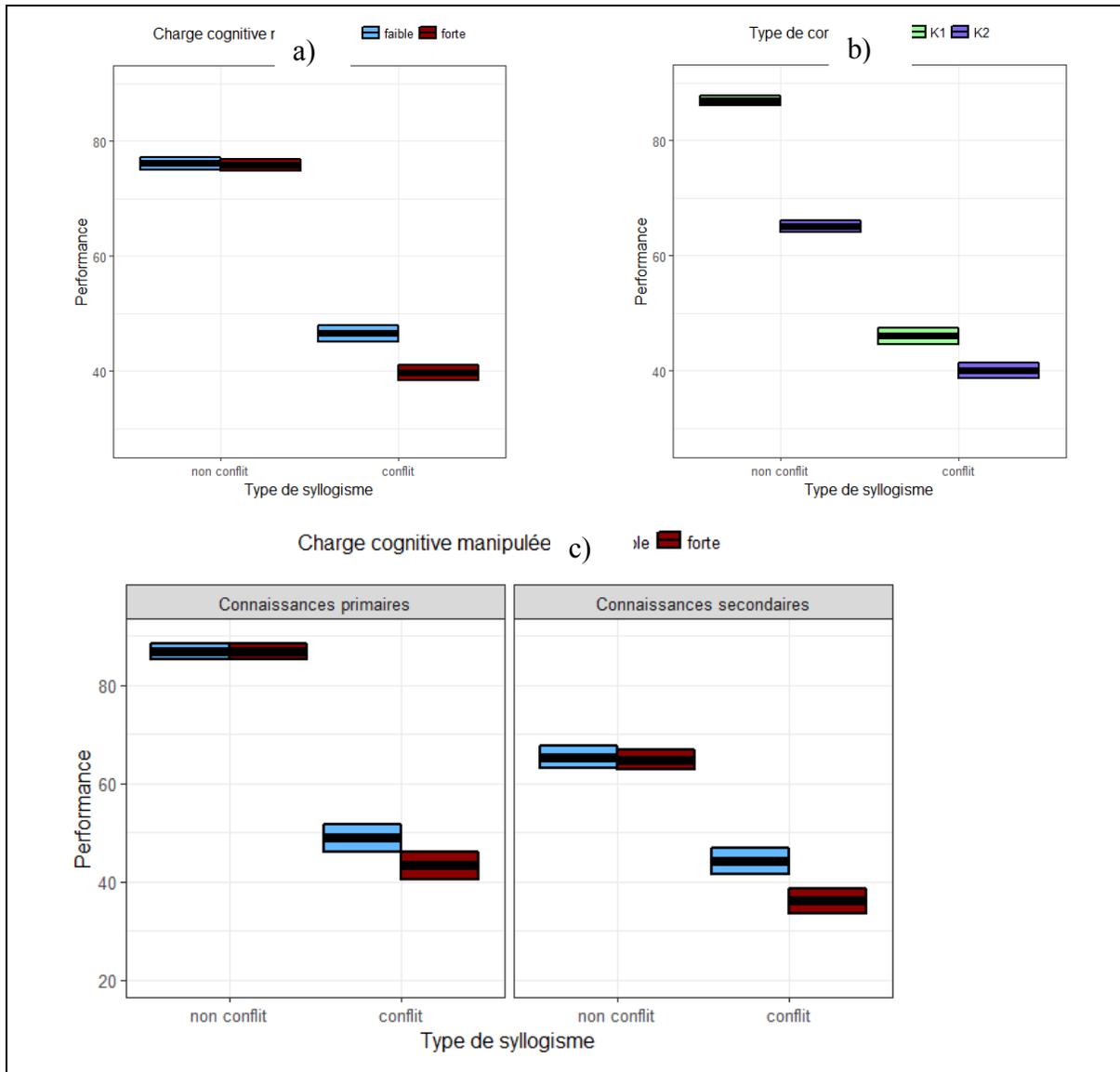
Figure 14 : Résultats des modèles linéaires complets à effets mixtes concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes pour l'ensemble des expériences 1 à 7. Les moustaches représentent 95% de l'estimate et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »).

Problèmes conflictuels vs. non conflictuels

Pour étudier l'implication du type de syllogisme (conflictuel ou non conflictuel), les données des expériences 4a, 4b, 5 et 6 ont été compilées ($n=599$). Les syllogismes non conflictuels ($M=75.96\pm 25.80$) sont mieux réussis que les syllogismes conflictuels ($M=43.05\pm 34.15$) ($estimate=-0.95$, $ES=0.03$; $\chi^2=1060.83$, $p<.001$). L'interaction entre le type de syllogisme et la charge cognitive manipulée est significative ($\chi^2=10.48$, $p=.001$) : pour les problèmes conflictuels, une charge cognitive manipulée forte diminue les performances ($M_{CC\text{ faible}}=46.57\pm 34.39$ vs. $M_{CC\text{ forte}}=39.71\pm 33.61$) ($estimate=-0.19$, $ES=0.07$; $\chi^2=6.78$, $p=.009$), alors que pour les problèmes non conflictuels la charge cognitive manipulée n'influence pas la performance ($\chi^2=0.01$, $p=.91$) (Figure 15a).

L'effet d'interaction entre le type de syllogisme et le type de connaissances ($\chi^2=63.44$, $p<.001$) rend compte d'un impact plus important du type de connaissances sur la performance des syllogismes non conflictuels ($M_{K1}=86.87\pm 20.65$ vs. $M_{K2}=65.05\pm 25.84$) ($estimate=-0.84$, $ES=0.04$; $\chi^2=381.41$, $p<.001$) que sur celle des syllogismes conflictuels ($M_{K1}=46.05\pm 34.71$ vs. $M_{K2}=40.06\pm 33.34$) ($estimate=-0.17$, $ES=0.03$; $\chi^2=30.79$, $p<.001$) (Figure 15b).

Les syllogismes non conflictuels sont mieux réussis qu'il s'agisse de connaissances primaires ($M_{\text{non conflit}}=86.87\pm 20.65$ vs. $M_{\text{conflit}}=46.05\pm 34.71$) ($estimate=-1.08$, $ES=0.07$; $\chi^2=626.41$, $p<.001$) ou secondaires ($M_{\text{non conflit}}=65.05\pm 25.84$ vs. $M_{\text{conflit}}=40.06\pm 33.34$) ($estimate=-0.77$, $ES=0.04$; $\chi^2=302.70$, $p<.001$). L'interaction entre la charge cognitive manipulée et le type de problème est marginalement significative concernant les problèmes à habillage de connaissances primaires ($\chi^2=2.95$, $p=.08$) alors qu'elle est significative concernant ceux à habillage de connaissances secondaires ($\chi^2=6.81$, $p=.009$) (Figure 15c). Ces résultats illustrent le fait que les connaissances secondaires consomment les ressources cognitives et entraînent une sensation de conflit parasite qui perdure même dans le cas de problèmes non conflictuels.



Figures 15 : Analyse groupée expériences 4a à 6. Interactions entre le type de syllogisme et a) la charge cognitive manipulée, b) le type de connaissances et c) la charge cognitive manipulée et le type de connaissances sur la performance des participants. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

Charge cognitive manipulée faible vs. forte

De manière générale, une charge cognitive manipulée forte diminue la performance (M_{CC} faible = 63.34 ± 29.23 vs. M_{CC} forte = 60.56 ± 31.01) ($estimate = -0.40$, $ES = 0.02$; $\chi^2 = 6.06$, $p = .01$), la

confiance dans les réponses données ($M_{CC \text{ faible}}=56.11\pm30.07$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=52.42\pm29.82$) ($estimate=-0.14$, $ES=0.05$; $\chi^2=7.31$, $p=.007$) et la rapidité ($M_{CC \text{ faible}}=5.85\pm11.84$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=4.78\pm10.39$) ($estimate=-0.09$, $ES=0.03$; $\chi^2=7.14$, $p=.008$).

Plus précisément, une charge cognitive manipulée forte diminue la performance des problèmes à habillage de connaissances secondaires uniquement ($M_{CC \text{ faible}}=57.98\pm28.06$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=53.85\pm28.91$) ($estimate=-0.14$, $ES=0.04$; $\chi^2=10.12$, $p=.001$) et la confiance dans ces réponses ($M_{CC \text{ faible}}=52.96\pm30.23$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=49.45\pm29.82$) ($estimate=-0.13$, $ES=0.05$; $\chi^2=5.41$, $p=.02$). Ce résultat va dans le sens de l'hypothèse selon laquelle les connaissances secondaires utiliseraient des ressources cognitives et engendreraient une sensation de conflit diffus. Concernant les problèmes à habillage de connaissances primaires, une forte charge cognitive diminue la rapidité des participants ($M_{CC \text{ faible}}=6.32\pm12.10$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=4.77\pm8.72$) ($estimate=-0.14$, $ES=0.04$; $\chi^2=8.44$, $p=.004$). La charge cognitive ressentie est par ailleurs plus importante pour une charge cognitive manipulée forte uniquement dans le cadre des problèmes à habillage de connaissances primaires ($M_{CC \text{ faible}}=38.49\pm23.95$ vs. $M_{CC \text{ forte}}=41.47\pm22.30$) ($estimate=-0.12$, $ES=0.05$; $\chi^2=5.11$, $p=.02$).

Ce dernier résultat argumenterait en faveur de l'hypothèse selon laquelle la source de conflit peut venir (i) des connaissances secondaires, (ii) des problèmes conflictuels ou (iii) de la charge cognitive manipulée forte. Si une seule de ces sources est activée, la charge cognitive ressentie plafonne et les charges ne semblent pas s'additionner. Les connaissances primaires n'entraînant pas de sensation de conflit, l'ajout de problèmes conflictuels ou d'une charge cognitive manipulée forte augmenterait la charge cognitive perçue ([Annexe E, Tableau E12](#), première ligne). Les données des expériences 2, 3, 5 et 6 ont été analysées afin d'évaluer si l'utilisation d'une *Dot Memory Task* ou d'une inversion de l'ordre des mots a un impact sur la charge cognitive ressentie. Il en ressort que l'usage d'une des deux tâches additionnelles n'influence pas la charge cognitive perçue même sur ces échantillons peu comparables (élèves au collège/lycée en présentiel et étudiants à l'université en ligne).

Ordre de présentation des types de connaissances

De manière générale, les participants aiment davantage répondre aux questions lorsque les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier ($M_{K1\text{premier}}=55.30\pm 28.15$ vs. $M_{K2\text{premier}}=50.89\pm 29.86$) ($estimate=-0.14$, $ES=0.05$; $\chi^2=8.83$, $p=.003$) et ont davantage confiance dans leurs réponses ($M_{K1\text{premier}}=56.52\pm 28.82$ vs. $M_{K2\text{premier}}=52.02\pm 30.96$) ($estimate=-0.12$, $ES=0.05$; $\chi^2=5.81$, $p=.02$). Les participants ont également davantage envie de trouver les bonnes réponses aux problèmes présentés en premier qu'ils aient un habillage de connaissances primaires ($M_{K1\text{premier}}=69.66\pm 24.41$ vs. $M_{K2\text{premier}}=62.56\pm 28.81$) ($estimate=-0.27$, $ES=0.05$; $\chi^2=22.14$, $p<.001$) ou de connaissances secondaires ($M_{K1\text{premier}}=59.74\pm 28.45$ vs. $M_{K2\text{premier}}=64.43\pm 28.12$) ($estimate=-0.17$, $ES=0.06$; $\chi^2=9.35$, $p=.002$) (interaction $\chi^2=169.35$, $p<.001$).

Concernant les problèmes à habillage de connaissances secondaires, présenter des problèmes à habillage de connaissances primaires en premier entraîne une meilleure performance ($M_{K1\text{premier}}=58.63\pm 29.32$ vs. $M_{K2\text{premier}}=53.68\pm 27.49$) ($estimate=-0.16$, $ES=0.04$; $\chi^2=12.00$, $p<.001$). Ce résultat, non observé pour les problèmes à habillage de connaissances primaires, argumente en faveur d'un effet d'entraînement favorable aux connaissances secondaires et non aux connaissances primaires. Les participants ont plus confiance dans les réponses données aux problèmes à habillage de connaissances secondaires lorsqu'ils sont présentés en deuxième ($M_{K1\text{premier}}=53.92\pm 29.23$ vs. $M_{K2\text{premier}}=48.50\pm 30.65$) ($estimate=-0.15$, $ES=0.05$; $\chi^2=6.97$, $p=.008$). De plus, la charge cognitive perçue pour les problèmes à habillage de connaissances secondaires est moins importante lorsque les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier alors que l'effet de fatigue devrait être présent ($M_{K1\text{premier}}=43.85\pm 24.33$ vs. $M_{K2\text{premier}}=48.49\pm 23.05$) ($estimate=-0.16$, $ES=0.05$; $\chi^2=9.56$, $p=.002$). L'effet de l'ordre de présentation impacte le fait d'aimer répondre aux questions principalement pour les problèmes à habillage de connaissances primaires ($M_{K1\text{premier}}=60.39\pm 26.41$ vs. $M_{K2\text{premier}}=53.34\pm 29.63$) ($estimate=-0.26$, $ES=0.05$; $\chi^2=22.83$, $p<.001$). Les connaissances secondaires, lorsqu'elles sont présentées en premier, mineraient donc bien les participants alors qu'utiliser les connaissances primaires en premier serait plutôt favorable pour les participants ([Annexe E](#), [Tableau E12](#), deuxième ligne).

Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance ($r=0.11$; $p<0.001$), le fait d'aimer répondre aux questions ($r=0.06$; $p<.001$), l'envie de trouver les bonnes réponses ($r=0.08$; $p<.001$), et la confiance dans les réponses données ($r=0.17$; $p<.001$) sont forts et moins la charge cognitive perçue est importante ($r=-0.10$; $p<.001$) ($-0.003<estimates<0.005$, $0.001<ESs=0.001$; $6.10<\chi^2s<36.07$, $ps<.01$). Le même ordre de corrélations se vérifie pour les problèmes ABC (performance $r=0.13$; $p<0.001$; aimer répondre aux questions $r=0.08$; $p<0.001$; envie de trouver les bonnes réponses $r=0.09$; $p<0.001$; confiance $r=0.16$; $p<0.001$ et charge cognitive perçue $r=-0.09$; $p<0.001$). Ces observations montreraient que les habiletés en mathématiques seraient liées aux habiletés de logique formelle comme cela a été observé dans la littérature ([Annexe E, Figure E4](#)).

Tâche de transfert

Concernant les derniers problèmes ABC, les expériences 3, 4a, 4b, 5, 6 et 7 ($n=912$) ont pu être regroupées. Lorsque les problèmes à habillage de connaissances primaires sont présentés en premier, les performances aux problèmes ABC sont plus importantes ($M_{K1premier}=55.45\pm 24.09$ vs. $M_{K2premier}=52.82\pm 24.18$) ($F(1,906)=11.63$, $p<.001$, $\eta^2_p=0.003$), les participants ont davantage aimé répondre à ces dernières questions ($M_{K1premier}=56.75\pm 28.56$ vs. $M_{K2premier}=52.07\pm 30.76$) ($F(1,906)=24.35$, $p<.001$, $\eta^2_p=0.006$) et ont davantage eu confiance dans leurs réponses ($M_{K1premier}=59.04\pm 29.30$ vs. $M_{K2premier}=53.63\pm 31.96$) ($F(1,906)=31.49$, $p<.001$, $\eta^2_p=0.008$). Présenter des habillages de connaissances primaires en premier tendrait à diminuer la charge cognitive perçue aux derniers problèmes ($M_{K1premier}=44.06\pm 25.41$ vs. $M_{K2premier}=45.53\pm 24.94$) ($F(1,906)=3.32$, $p=.07$, $\eta^2_p<0.001$). L'ordre de présentation des types de connaissances serait donc un élément intéressant à prendre en compte lors de tâches d'apprentissage, notamment parce qu'il pourrait favoriser les processus de transfert et l'engagement tout au long de ces tâches. Cet aspect sera exploré lors de la seconde partie empirique, particulièrement lors de l'expérience 10. La charge cognitive manipulée n'influence pas les réponses aux dernières questions ABC.

Comparaison des scores entre les premiers problèmes présentés et la tâche de transfert

Afin d'avoir une vue d'ensemble de l'évolution de l'engagement, de la confiance et de la charge cognitive perçue entre la phase d'implication des connaissances primaires ou secondaires et la phase de transfert, des t-tests à mesures répétées ont été utilisés. Par rapport à la première phase de connaissances primaires (*i.e.*, problèmes à habillage de connaissances primaires présentés en premier), lors de la phase de transfert, le plaisir à répondre aux questions décline (phase de connaissances primaires $M=56.91\pm 28.71$ vs. phase de transfert $M=54.38\pm 29.79$, $t(911)=3.83$, $p<.001$, $d=0.09$) et la charge cognitive perçue augmente (phase de connaissances primaires $M=41.43\pm 23.43$ vs. phase de transfert $M=44.81\pm 25.19$, $t(911)=-5.80$, $p<.001$, $d=0.14$). Par rapport à la première phase de connaissances secondaires (*i.e.*, problèmes à habillage de connaissances secondaires présentés en premier), lors de la phase de transfert, le plaisir à répondre aux questions (phase de connaissances secondaires $M=50.77\pm 29.04$ vs. phase de transfert $M=54.38\pm 29.79$, $t(911)=-5.32$, $p<.001$, $d=0.12$), l'envie de trouver les bonnes réponses (phase de connaissances secondaires $M=63.35\pm 27.88$ vs. phase de transfert $M=65.66\pm 28.21$, $t(911)=-3.93$, $p<.001$, $d=0.08$) et la confiance dans les réponses augmentent (phase de connaissances secondaires $M=51.43\pm 29.87$ vs. phase de transfert $M=56.30\pm 30.79$, $t(911)=-6.74$, $p<.001$, $d=0.16$). Ces résultats peuvent suggérer que (i) comparativement aux connaissances primaires, la phase de transfert avec les problèmes ABC engendrent une charge cognitive plus forte et que (ii) les participants aiment davantage et ont plus confiance lorsqu'ils répondent aux problèmes ABC qu'aux problèmes habillés de connaissances secondaires (l'habillage plus « court » des problèmes ABC pourrait apporter plus de lisibilité pour les participants). Cependant, les tailles d'effets associées à ces résultats restent faibles malgré le nombre de participants élevé et ne permettent pas de conclure sur l'évolution des différentes variables dépendantes au cours de l'étude. Le protocole général utilisé dans cette première partie n'a également pas été construit pour pouvoir observer ce type de changement. Dans la seconde partie empirique, l'expérience 10 mettra en avant des résultats intéressants sur l'évolution des différentes variables dépendantes en fonction du type de connaissances utilisé en phase d'amorce.

Conclusion

Conformément aux hypothèses, ces huit premières études permettent de valider l'impact positif important des connaissances primaires sur la performance mais aussi sur l'engagement émotionnel et cognitif des participants dans la tâche et ce, même lorsque les termes employés sont abstraits. De plus, elles montrent que les connaissances secondaires engendrent bien une charge cognitive supplémentaire et une sensation de conflit. A capacité égale entre les participants, les connaissances secondaires mineraient leur motivation. Cependant, présenter des contenus de connaissances primaires en premier permettrait de diminuer les effets délétères des connaissances secondaires. Par exemple, cela diminuerait la charge cognitive ressentie au cours de la tâche et favoriserait la performance, le plaisir à répondre aux questions et la confiance dans les réponses à une tâche de transfert. Si une tâche de transfert est proposée dans le matériel de cette première partie expérimentale, les expériences ci-dessus n'ont pas pour objectif d'évaluer les bénéfices des connaissances primaires sur l'apprentissage puisqu'aucune consigne n'est donnée en ce sens aux participants. Cela pourrait par ailleurs expliquer le peu de résultats observés sur les tâches de transfert lorsque les données sont traitées étude par étude. Afin de répondre aux objectifs plus appliqués de ce travail, les expériences suivantes visent à intégrer une dimension d'apprentissage tout en mettant à l'épreuve l'effet motivant des connaissances primaires. En effet, l'influence positive des connaissances primaires lorsqu'elles sont présentées en premier pourrait être un atout dans les pratiques pédagogiques.

5.2 Tâches d'apprentissage : mise à l'épreuve de l'effet motivant des connaissances primaires

Cette seconde partie empirique cherche à mettre en avant les bénéfices des connaissances primaires dans le cadre d'un apprentissage (expériences 8 à 10). Les expériences suivantes introduisent une dimension d'apprentissage plus concrète puisque les participants ont pour consigne de s'entraîner à résoudre des syllogismes (inspirés de l'expérience 7) pour pouvoir réussir un test final.

5.2.1 Expérience 8

Cette première expérience centrée sur l'apprentissage a pour objectif d'évaluer les performances, l'investissement et les capacités de transfert des participants (élèves de lycée) lorsque la phase d'entraînement est constituée de syllogismes neutres à habillage de connaissances primaires ou secondaires.

5.2.1.1 Participants et procédure

Les participants sont 105 élèves de lycée (52 hommes, 53 femmes ; âge moyen 15.00 ans ± 0.46) ; 11 participants ont été écartés des analyses car ils ont montré des signes qui ont pu faire douter de leur implication dans la tâche (perturbation des autres élèves, croix à l'extérieur des cases à répétition, retour en arrière fréquents, *etc.*). Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 55.28/100 (± 29.32), ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 61.35/100 (± 23.04) et 83% (n=87) n'ont jamais joué à des jeux de logique ou très rarement. Parmi eux, 38% (n=40) ont l'impression d'avoir appris quelque chose au cours de la passation ; les participants ayant été confrontés à des habillages de connaissances primaires ont tendance à avoir davantage cette impression (47%, n=25) que ceux ayant été confrontés à des habillages de connaissances secondaires (29%, n=15) ($\chi^2(1)=3.00$; $p=.08$).

Les participants sont convoqués pendant une heure d'étude obligatoire pour participer à cette expérience papier-crayon. Un cahier de dix-huit pages leur est donné. Il contient une première partie expérimentale (40 minutes) et une seconde partie de jeux de logique afin de les faire patienter jusqu'à la fin de l'heure d'étude et permettre à chaque participant de répondre à son

rythme. Dans la première partie, après quelques explications concernant les syllogismes identiques aux expériences précédentes, la consigne suivante est ajoutée :

Vous allez devoir remplir plusieurs feuilles d'exercices. Répondez aux énoncés dans l'ordre de leur présentation (une fois la feuille tournée, ne retournez pas en arrière). Si vous le voulez, vous pouvez vous servir des parties blanches de chaque feuille comme brouillon (attention à ne pas couvrir les énoncés et vos réponses !), mais seules les réponses cochées dans les énoncés seront comptabilisées.

Le but de ces exercices est de vous faire passer un « test final » à la fin de la partie 1. Prenez le temps qu'il vous faut pour vous exercer et essayez d'avoir un maximum de bonnes réponses pour le test final !

L'accent est également mis oralement sur l'entraînement et le test final. De façon similaire aux expériences antérieures, une page contient quatre syllogismes neutres sur le modèle de ceux de l'expérience 7. La phase d'entraînement est constituée de problèmes à habillage de connaissances primaires (nourriture et caractéristiques de la faune) (53 participants) ou secondaires (règles de grammaire ou mathématiques) (52 participants) en inter-groupe. Six pages pour un total de vingt-quatre syllogismes sont proposés comme entraînement obligatoire avant de passer à la page du test final contenant les quatre syllogismes types avec les termes ABC. En outre de leur (i) performance en phase d'entraînement et (ii) au test final, afin de confirmer les effets des types de connaissances en inter-groupe, les participants renseignent ensuite si (iii) réfléchir aux énoncés leur a plu, (iv) à quel point ils ont eu envie de trouver les bonnes réponses, (v) à quel point ils sont confiants dans leurs réponses et (vi) à quel point ils sont d'accord avec les énoncés « *les sujets abordés étaient complexes* », « *vous vous êtes beaucoup concentré(e) pour réaliser cette tâche* » et « *l'étude était très facile pour vous* ». Après quelques informations démographiques, ils doivent ensuite répondre à quelques questions permettant de donner un indice sur leurs buts d'accomplissement, éléments importants dans les apprentissages (Darnon et Butera, 2005) ([Annexe F](#)).

Conformément aux expériences précédentes, un entraînement habillé de connaissances primaires devrait engendrer une meilleure performance tout au long de la passation (pour la phase entraînement et pour le test final) et un engagement plus important ainsi qu'une charge cognitive

perçue plus faible. Concernant les buts d'accomplissement, ils devraient avoir une influence notable dans le cas d'entraînements habillés de connaissances secondaires beaucoup plus sensible à la motivation des participants. Des t-tests à mesures répétées ont été utilisées pour examiner les différences entre les thématiques des deux types de connaissances. Des ANCOVAs ont permis de mettre en avant l'influence du type de connaissances en prenant en compte le niveau estimé en mathématiques, le sexe, l'âge des participants ainsi que leurs différents scores de buts d'accomplissement. Enfin, des ANOVAs et des tests post-hoc de Tukey ont permis d'investiguer les interactions entre les types de connaissances et les pages d'exercices.

5.2.1.2 Résultats et discussion

Parmi les problèmes à habillage de connaissances primaires, les problèmes avec pour thème la nourriture ($M=77.20\pm 16.92$) n'entraînent pas de différence de performance par rapport à ceux ayant pour thème les caractéristiques de la faune ($M=78.30\pm 18.44$) ($p=.48$). Parmi les problèmes à habillage de connaissances secondaires, les problèmes avec un thème lié à la grammaire ($M=62.66\pm 19.77$) n'entraînent pas de différence de performance par rapport à ceux avec un thème lié aux mathématiques ($M=59.61\pm 15.95$) ($p=.16$).

Comme attendu, la présentation de problèmes à habillage de connaissances primaires favorise la performance tout au long de la phase d'entraînement, le fait d'aimer répondre aux questions de manière générale tout comme l'envie de trouver les bonnes réponses et la confiance dans les réponses données. Il diminue également la charge cognitive perçue mais n'a pas d'influence sur la performance au test final (Tableau 13). Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la confiance dans les réponses est grande ($r=0.26$, $p<.001$; $F(1,96)=5.86$, $p=.02$, $\eta^2_p =0.06$). De plus, plus le score de but d'accomplissement « maîtrise approche » est élevé, plus les participants ont envie de trouver les bonnes réponses ($r=0.15$, $p<.001$; $F(1,96)=6.32$, $p=.01$, $\eta^2_p =0.06$). Quel que soit le type de connaissances, les performances ne diffèrent pas entre elles en fonction des pages d'exercices ($ps>.73$). Par rapport aux connaissances à habillage de connaissances secondaires, les problèmes à habillage de connaissances primaires semblent augmenter la performance quasi-systématiquement au cours de la phase d'entraînement, mais les performances au test final ne semblent pas impactées par le type de connaissances utilisé et ne diffèrent pas d'un score lié à la chance (Figure 16).

Tableau 13 : Résultats des ANCOVAs concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes pour l'expérience 8. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		$F(1,96)$	p	η^2_p
	M	σ	M	σ			
Performance non ABC (entraînement)	77.75	16.65	61.14	16.09	27.58	<.001	0.22
Performance test final ABC	48.58	17.81	49.52	13.44	0.09	.76	<0.001
Aimer répondre aux questions	51.58	29.02	36.36	26.14	7.50	.007	0.07
Envie de trouver les bonnes réponses	71.58	25.86	60.42	29.35	4.33	.04	0.04
Confiance dans les réponses données	48.96	31.26	36.98	29.35	4.06	.04	0.04
Charge cognitive perçue	50.84	22.55	63.89	21.02	9.42	.003	0.09

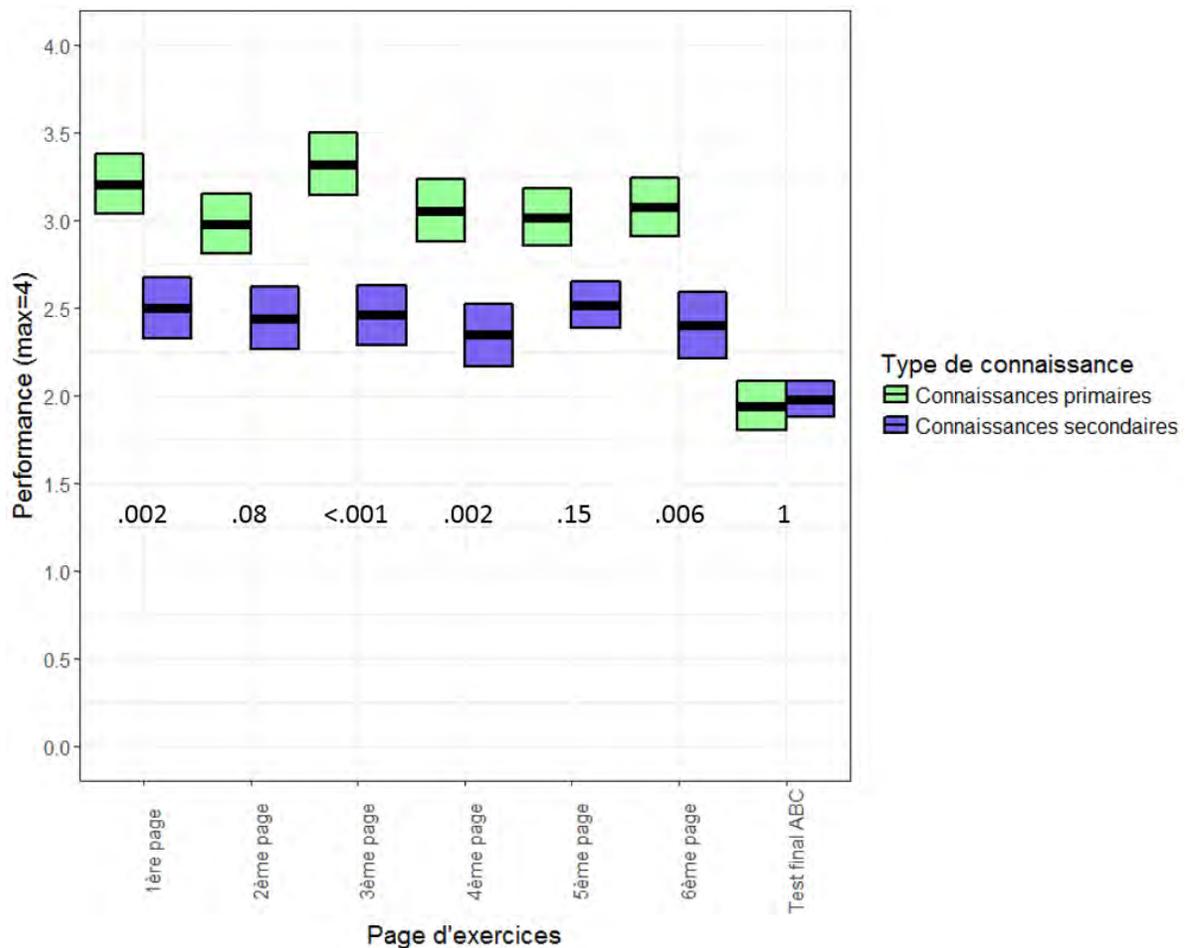


Figure 16 : Influence du type de connaissances en fonction des pages d'exercices. Les valeurs affichées sont les p ajustés de tests de Tukey. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

Comme dans les expériences précédentes, les habillages liés aux connaissances primaires favorisent la performance, l'engagement émotionnel et cognitif, la confiance dans les réponses et diminuent la charge cognitive perçue. Si les participants sont meilleurs quand ils doivent réfléchir sur des connaissances primaires, même inconnues, leurs performances ne sont pas plus élevées au test final. Imposer aux apprenants un entraînement habillé de connaissances primaires ou secondaires ne permettrait donc pas de favoriser les compétences de transfert. Cependant, dans une situation d'apprentissage écologique, les apprenants sont davantage autonomes et choisissent de continuer à s'entraîner ou non. Cette implication dans les exercices proposés par les enseignants est d'ailleurs primordiale. L'expérience suivante laisse le choix aux participants de continuer à s'exercer ou non. Elle a pour objectif d'illustrer l'impact positif des connaissances primaires sur cette dimension de continuer ou non l'entraînement. Elle devrait également permettre d'explorer l'effet des buts d'accomplissement sur la décision de continuer à s'entraîner ou non en fonction des connaissances en jeu.

5.2.2 Expérience 9

5.2.2.1 Participants et procédure

Les participants sont 105 élèves de lycée (66 hommes, 39 femmes ; âge moyen 14.99 ans ± 0.51) ; 12 participants ont été écartés des analyses car ils ont montré des signes qui ont pu faire douter de leur implication dans la tâche (perturbation des autres élèves, croix à l'extérieur des cases à répétition, *etc.*). Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 60.26/100 (± 26.35) et ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 66.90/100 (± 25.95), 87% (n=91) n'ont jamais joué à des jeux de logiques ou très rarement. Parmi eux, 40% (n=42) ont l'impression d'avoir appris quelque chose au cours de la passation ; les participants ayant été confrontés à des habillages de connaissances primaires n'ont pas tendance à avoir davantage cette impression (46%, n=24) que ceux ayant été confrontés à des habillages de connaissances secondaires (34%, n=18) ($\chi^2(1)=1.16$; $p=.28$).

Le matériel et les conditions de passation sont les mêmes que ceux de l'expérience 8. La seule différence est qu'à la fin de chacune des pages de la partie entraînement, les participants choisissent de continuer à s'exercer ou de passer directement au test final ([Annexe G](#)). Parmi les participants, 52 ont bénéficié d'un entraînement à habillage de connaissances primaires et 53 de

connaissances secondaires. Les performances tout comme le choix de continuer à s'entraîner devraient être plus importants lorsque les participants sont confrontés à des connaissances primaires plutôt que secondaires. Les buts d'accomplissement devraient influencer les performances ou les décisions de continuer des participants notamment lorsqu'ils sont confrontés à des connaissances secondaires. Les mêmes analyses que dans l'expérience 8 ont été menées ainsi que des analyses de médiation et de survie.

5.2.2.2 Résultats et discussion

Présenter un entraînement habillé de connaissances primaires augmente le nombre de pages d'exercices effectués, la performance relative totale sur la phase d'entraînement et marginalement la performance au test final (Tableau 14). Lors de ces premières analyses, le nombre de page(s) effectué est positivement influencé par les buts de maîtrise uniquement (évitement, $r=0.29$, $p<.001$; $F(1,96)=8.06$, $p=.005$, $\eta^2_p =0.08$; et approche, $r=0.23$, $p<.001$; $F(1,96)=4.38$, $p=.04$, $\eta^2_p =0.04$). Par ailleurs, plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus les performances relatives au cours de la phase d'entraînement sont élevées ($r=0.17$, $p<.001$; $F(1,96)=4.66$, $p=.03$, $\eta^2_p =0.05$). Chaque type de connaissances pris séparément, les performances ne diffèrent pas entre elles en fonction des pages d'exercices ($ps>.66$). Cependant, à la différence de l'expérience 8, quand on laisse le choix de continuer ou non aux participants, les performances ne diffèrent plus entre types de connaissances, et ce, assez rapidement (Figure 17). En différenciant les 25% de participants ayant eu de meilleures performances aux deux premières pages et les autres participants, les analyses et figures ne rendent pas compte d'un pattern intéressant concernant l'évolution des deux types de connaissances.

Tableau 14 : Résultats des ANCOVAs concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes pour l'expérience 9. Les ANCOVAs incluent le nombre de page(s) d'exercices réalisés excepté lorsque ce nombre de page(s) est la variable dépendante (première ligne, $F(1,96)$). La performance relative non ABC correspond à la performance des participants en pourcentage relativement au nombre d'exercices choisi. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		$F(1,91)$	p	η^2_p
	M	σ	M	σ			
Nombre de page(s) d'exercices	3.60	1.59	2.94	1.72	4.88	.02	0.05
Performance relative non ABC	79.17	16.16	64.24	17.50	19.66	<.001	0.18
Performance test final ABC	52.88	13.58	48.58	8.99	3.40	.06	0.04
Aimer répondre aux questions	50.26	26.39	44.49	29.67	1.14	.29	0.01
Envie de trouver les bonnes réponses	65.81	24.39	73.21	24.04	2.75	.10	0.03
Confiance dans les réponses données	56.31	27.97	48.24	30.81	1.97	.16	0.02
Charge cognitive perçue	56.92	23.27	53.78	22.48	0.56	.45	0.006

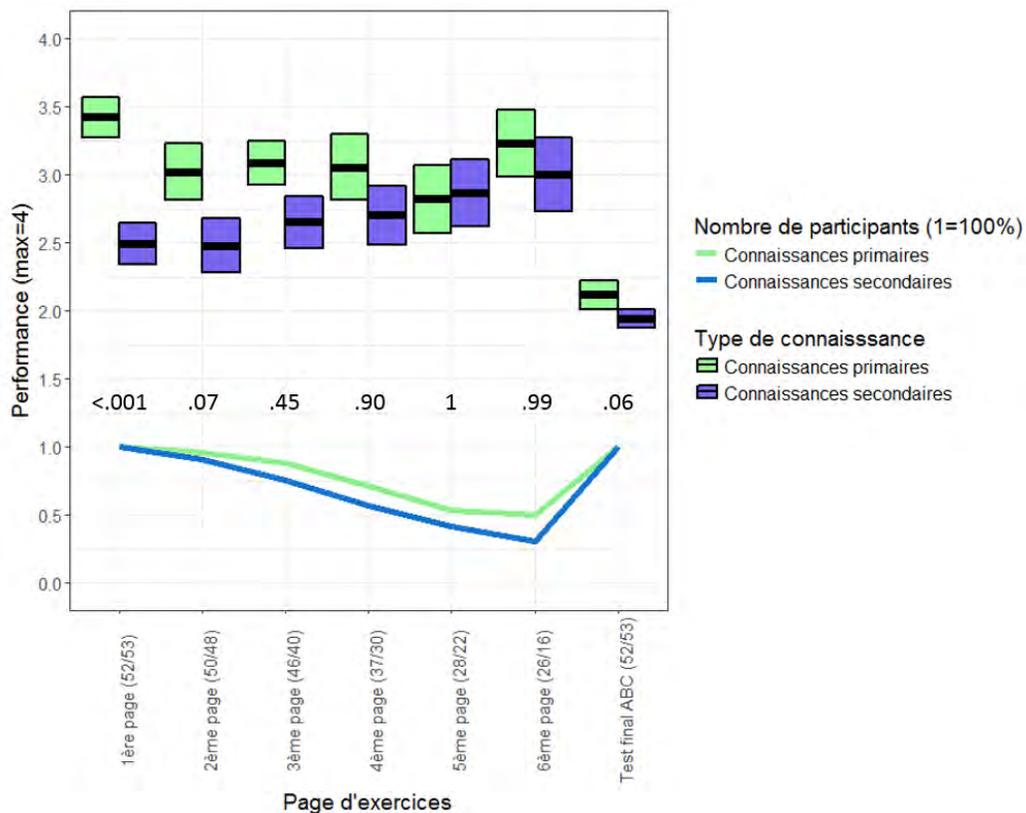
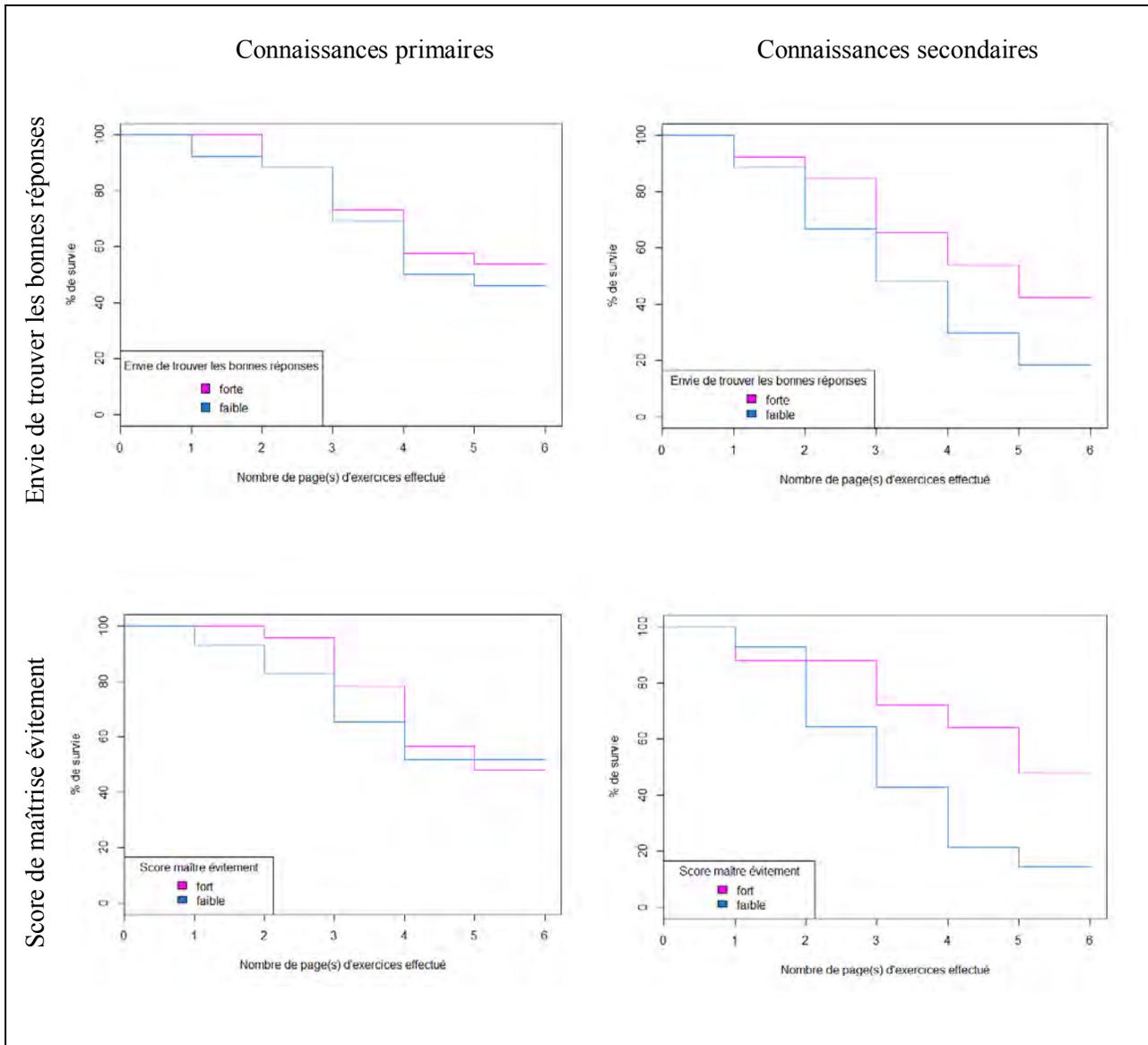


Figure 17 : Influence du type de connaissances en fonction des pages d'exercices. Les valeurs affichées sont les p ajustés de tests de Tukey. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance. Les courbes représentent le nombre de participants en pourcentages (1=100%) en fonction des types de connaissances et par page ; les n relatifs aux connaissances primaires/secondaires sont notés dans les étiquettes de l'axe des x.

Les analyses de survie montrent essentiellement une influence du type de connaissances utilisé : les connaissances primaires favorisent l'engagement des participants jusqu'au bout de l'entraînement ($\chi^2(1)=4.5, p=.03$). Les femmes ($M=3.92\pm 1.53$) persistent plus longtemps que les hommes ($M=2.88\pm 1.68$) ($\chi^2(1)=9.5, p=.002$) alors que les femmes sont moins représentées dans notre échantillon. Les variables dépendantes ainsi que d'autres variables démographiques comme le niveau estimé en mathématiques, en logique, le fait d'aimer les jeux de logique et les différents scores des buts d'accomplissement ont été recodées en niveaux faible vs. fort à partir de la médiane des observations pour les deux types de connaissances séparément. Ceci afin d'explorer si le fait de continuer jusqu'au bout de la phase d'entraînement peut être expliqué par des caractéristiques personnelles. Concernant les connaissances primaires, il n'y a pas de contexte de survie particulier : aucune caractéristique n'augmente la persistance des participants. Cependant, concernant les connaissances secondaires, la survie/persistance au cours de la phase d'entraînement est favorisée par une plus grande envie de trouver les bonnes réponses ($\chi^2(1)=3.9, p=.04$) (envie forte $M=4.38\pm 7.72$ vs. envie faible $M=3.52\pm 1.67$) et un score plus important aux items « maîtrise évitement » ($\chi^2(1)=8.3, p=.004$) (score fort $M=4.60\pm 1.75$ vs. score faible $M=3.36\pm 1.52$) (Figures 18).



Figures 18 : Influence de l’envie de trouver les bonnes réponses (première ligne) et du score de maîtrise évitement (deuxième ligne) dans la survie/persistence des participants lors de la phase d’entraînement en fonction du type de connaissances utilisé.

Des analyses de médiation par modélisation d’équation structurelle ont été utilisées pour explorer l’hypothèse selon laquelle le nombre de page(s) d’exercices effectué est un médiateur de l’effet du type de connaissances sur les différentes variables. Le type de connaissances influence significativement le nombre de page(s) effectué ($b=-0.65$, $SE= 0.12$, $p<.001$, $R^2=0.04$). Cependant, ce dernier n’influence pas la performance relative en phase d’entraînement ($b=0.01$, $SE= 0.02$, $p=.63$), ni la performance au test final ABC ($b=0.009$, $SE= 0.02$, $p=.67$) mais le plaisir à répondre aux questions ($b=0.06$, $SE= 0.02$, $p=.003$), l’envie de trouver les bonnes réponses ($b=0.13$, $SE= 0.02$, $p<.001$), la confiance dans les réponses données ($b=-0.09$, $SE= 0.02$, $p<.001$)

et la charge cognitive perçue ($b=0,21$, $SE= 0.02$, $p<.001$). Le type de connaissances utilisé est toujours un prédicteur de la performance relative en phase d'entraînement ($b=-0.80$, $SE= 0.07$, $p<.001$), de la performance au test final ($b=-0.36$, $SE= 0.07$, $p<.001$), du plaisir à répondre aux questions ($b=-0.16$, $SE= 0.07$, $p=.03$), de l'envie de trouver les bonnes réponses ($b=0.39$, $SE= 0.07$, $p<.001$) et de la confiance dans les réponses données ($b=-0.33$, $SE= 0.07$, $p<.001$), mais pas de la charge cognitive perçue ($b=0.003$, $SE= 0.07$, $p=.97$). Ainsi, il n'y a pas d'effet de médiation du nombre de page(s) effectué pour la performance relative en phase d'entraînement ($R^2=0.16$) ou celle du test final ABC ($R^2=0.03$) qui serait uniquement influencée par le type de connaissances utilisé. Une médiation partielle est observée pour le fait d'aimer répondre aux questions ($R^2=0.02$), de vouloir trouver les bonnes réponses ($R^2=0.07$) et pour la confiance ($R^2=0.04$). Les coefficients d'explication de la variance sont cependant trop faibles pour conclure sur les influences relatives des deux variables. Par ailleurs seul le nombre de page(s) d'exercices effectué influencerait la charge cognitive perçue ($R^2=0.13$).

L'expérience 8 montre que les problèmes à habillage de connaissances primaires par rapport à ceux avec un habillage de connaissances secondaires entraînent presque systématiquement des performances plus importantes tout au long de la phase d'entraînement. Cependant, quand les participants peuvent choisir ou non de continuer les exercices comme dans l'expérience 9, ceux qui persistent en phase d'entraînement ne montrent plus de différence de performance entre les problèmes à habillage de connaissances primaires ou secondaires. La tendance graphique illustrerait même une augmentation de la performance face à des connaissances secondaires pour rejoindre les performances des connaissances primaires. Par ailleurs, si les connaissances primaires favorisent la persistance en phase d'entraînement, aucune caractéristique personnelle ne semble entrer en jeu alors que la persistance face à des connaissances secondaires est favorisée par l'envie de trouver les bonnes réponses et un score de maîtrise évitement important (expérience 8). En effet, les participants qui auraient plus tendance à avoir peur de rater un élément pour le test final continueraient l'entraînement jusqu'à la fin. A l'inverse des connaissances primaires, l'engagement dans la résolution de tâches impliquant des connaissances secondaires nécessiterait une motivation et des caractéristiques personnelles particulières. L'investissement dans la tâche est donc une réelle nécessité pour favoriser le processus d'apprentissage. Un moyen de favoriser le plaisir et l'engagement des individus dans une tâche serait de présenter des contenus liés aux connaissances primaires en premier.

Néanmoins, les expériences 8 et 9 ne renseignent pas sur une capacité de transfert augmentée de façon nette, que ce soit après un entraînement habillé de connaissances primaires ou secondaires. Pourquoi ne parvient-on pas à développer ses capacités de transfert dans ces études ? Une explication pourrait être que (i) les individus sont efficaces la plupart du temps sur des contenus de connaissances primaires (même inconnus) et que ce genre d’habillage ne permet pas une extraction de la règle et que (ii) les connaissances secondaires saturent la mémoire de travail et empêchent l’apprentissage de la règle. Par ailleurs, les tâches utilisées dans ces expériences sont loin d’être écologiques. Notamment, dans toutes les situations d’apprentissage ou d’adaptation des connaissances primaires, les individus bénéficient d’un *feedback* sur leur réponse. De plus, comme la revue de littérature l’évoque, il n’est pas suffisant de se cantonner aux connaissances primaires pour apprendre. Ces dernières seraient plutôt un moyen de motiver les individus en les mettant tous au même niveau et en les rassurant sur leurs compétences. Ainsi, la dernière expérience a pour objectif d’explorer l’influence de l’enchaînement « connaissances primaires – connaissances secondaires – ABC transfert » sur les performances des participants tout en incluant du *feedback* efficace et informatif.

5.2.3 Expérience 10 : le meilleur ordre de présentation pour favoriser l’apprentissage

5.2.3.1 Participants et procédure

Les participants sont 227 étudiants (46 hommes, 181 femmes) d’âge moyen 22.03 ans (± 6.03) recrutés sur les groupes Facebook universitaires français. La passation est faite en ligne grâce au logiciel Qualtrics et dure entre 12 et 40 minutes en fonction des décisions des participants. Tous les participants ont un niveau de français suffisant. Le niveau moyen estimé en mathématiques des participants est de 48.30/100 (± 28.08) et ils déclarent aimer faire des jeux de logique à 71.84/100 (± 28.65), 73% (n=166) n’ont jamais joué à des jeux de logiques ou très rarement. Parmi eux, 46% (n=105) ont l’impression d’avoir appris quelque chose au cours de la passation ; les participants ayant été confrontés à des habillages de connaissances primaires n’ont pas tendance à avoir davantage cette impression (48%, n=54) que ceux ayant été confrontés à des habillages de connaissances secondaires (44%, n=51) ($\chi^2(1)=0.20$; $p=.65$).

Cette expérience comporte trois parties ([Annexe H](#), [Figure H5](#)). Toutes utilisent des syllogismes neutres de figure 1 (AB CA CB), de figure 2 (AB CB CA) et de figure 3 (AB AC CB) dont le mode peut être positif (AII) ou partiellement négatif (AOO), soit 6 syllogismes différents au total pour autant d'inférences valides qu'invalides ([Annexe H](#), [Tableau H13](#)). Dans la première partie dite d'amorce, après les explications usuelles concernant les syllogismes, les participants sont confrontés à deux pages de quatre syllogismes (soit 8 syllogismes au total) dont l'habillage est soit lié aux connaissances primaires (nourriture, n=112) soit lié aux connaissances secondaires (règles de grammaire, n=115). Ils renseignent ensuite les variables dépendantes utilisées dans les expériences précédentes par rapport à ces huit premiers syllogismes traités afin de vérifier l'influence positive des connaissances primaires (aimer répondre aux questions, envie de trouver les bonnes réponses, confiance dans les réponses données et charge cognitive perçue tout comme les expériences 8 et 9). La deuxième partie, dite d'entraînement, est introduite comme suit :

Maintenant, nous vous proposons d'effectuer plusieurs exercices.

Chaque page contiendra un énoncé. Comme précédemment, vous devrez juger de sa validité.

Après validation de votre réponse, un corrigé vous sera présenté. Il vous permettra d'améliorer votre compréhension des problèmes.

Le but de ces exercices est de vous préparer à passer un « test final ».

Prenez le temps et le nombre d'exercices qu'il vous faut pour vous exercer. C'est vous qui choisissez quand terminer la période d'entraînement. Le but est d'avoir un maximum de bonnes réponses au test final !

Rappel : dans les énoncés, les prémisses (deux premières lignes) doivent être considérées comme vraies et la conclusion ne doit être acceptée que si elle découle logiquement des prémisses.

Chaque page affiche alors un seul syllogisme à la fois habillé de connaissances secondaires liées aux mathématiques. Par exemple :

*Tous les volumes de Barry se calculent par $\sum(|Rx-1|/5\pi)$,
Or quelques volumes de disphénoïde se calculent par $\sum(|Rx-1|/5\pi)$,
Donc quelques volumes de disphénoïde sont des volumes de Barry.*

Le participant répond alors si la conclusion découle ou non des prémisses. Après validation de son choix, un *feedback* automatique est affiché. Ce *feedback* (i) informe le participant si sa réponse est correcte ou incorrecte, (ii) reprend le syllogisme en l'explicitant, (iii) donne la règle sous forme ABC et (iv) donne le choix au participant de continuer à s'entraîner ou de passer au test final. Par exemple :

Réponse correcte.

*Quand : tous les volumes de Barry se calculent par $\sum(|Rx-1|/5\pi)$,
Or quelques volumes de disphénoïde se calculent par $\sum(|Rx-1|/5\pi)$,
On ne peut pas conclure que quelques volumes de disphénoïde sont des volumes de Barry.*

Voici la règle générale :

Tous les A sont des B,

Or quelques C sont des B,

« Donc quelques C sont des A » ne découle pas logiquement des prémisses.

Vous souhaitez :

- Faire un autre exercice pour vous entraîner*
- Passer au test final et essayer d'avoir le maximum de bonnes réponses*

La phase d'entraînement propose un maximum de 30 syllogismes (les 6 différents types de syllogismes sont présentés par blocs répétitifs 5 fois) ([Annexe H](#), [Tableau H14](#)). La troisième partie est celle du test final. Comme les termes ABC ont été utilisés pour présenter les règles, le test final implique les lettres LWR. Le temps passé sur chaque exercice a été mesuré. Les participants renseignent ensuite les items des variables dépendantes, s'ils ont utilisé une stratégie particulière pour répondre aux questions (comme écrire les règles, utiliser des diagrammes d'Euler, *etc.*), des questions démographiques ainsi que le questionnaire des buts

d'accomplissement. Aucun participant n'a renseigné avoir copié les règles données dans les *feedback* ou être familier avec les thèmes utilisés. Un item permet aux participants de nous informer qu'ils ont fait une pause de plus de 30 secondes pendant leur passation : 200 participants n'en ont pas fait, nous avons donc exclu des analyses les 27 autres lorsque la variable testée est la vitesse.

Conformément aux expériences précédentes, une phase d'amorce avec un habillage de connaissances primaires devrait augmenter le nombre d'exercices libres effectués en phase d'entraînement. Comparativement avec un enchaînement de connaissances secondaires, présenter des connaissances primaires avant les connaissances secondaires devrait favoriser les performances au test final LWR, l'engagement et la confiance des participants ainsi que diminuer la charge cognitive perçue. Les analyses statistiques effectuées sont semblables à celles de l'expérience 9. Des t-tests mesures répétées sont utilisés pour explorer les différences de scores sur les variables d'intérêt entre la phase d'amorce et celle du test final LWR.

5.2.3.2 Résultats et discussion

Concernant la phase d'amorce, même si elle est assez courte avec seulement 8 problèmes, conformément aux précédentes études, les connaissances primaires influencent positivement l'ensemble des variables observées (exceptée la vitesse) (Tableau 15). Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus la performance aux problèmes de la phase d'amorce est importante ($r=0.15$, $p=.02$; $F(1,217)=4.13$, $p=.04$, $\eta^2_p=0.02$). Plus le score de performance approche est important, plus l'envie de trouver les bonnes réponses est importante ($r=0.18$, $p=.006$; $F(1,217)=5.17$, $p=.02$, $\eta^2_p=0.02$) et plus le score de performance évitement est important, moins les participants ont confiance en leur réponse ($r=-0.21$, $p=.002$; $F(1,217)=3.91$, $p=.05$, $\eta^2_p=0.02$).

Tableau 15 : Résultats des ANCOVAs concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes dans la première phase d'amorce de l'expérience 10. Les ANCOVAs incluent, l'âge, le sexe, le niveau estimé en mathématiques, le nombre d'exercices réalisés et les scores aux différents buts d'accomplissement. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		$F(1,217)$	p	η^2_p
	M	σ	M	σ			
Performance (amorce)	69.87	20.10	62.72	25.38	5.66	.02	0.02
Aimer répondre aux questions	53.12	29.73	33.32	28.28	26.45	<.001	0.11
Envie de trouver les bonnes réponses	73.24	23.45	61.16	29.50	11.85	<.001	0.05
Confiance dans les réponses données	46.31	28.30	31.21	26.46	18.93	<.001	0.08
Charge cognitive perçue	65.82	19.19	73.44	17.15	10.89	.001	0.05
Vitesse (pb/min) (n=200)	2.65	2.08	2.68	1.50	0.008	.93	<0.001

Concernant la phase d'entraînement, présenter une amorce faite de connaissances primaires ou secondaires n'a pas d'effet significatif sur le nombre de problèmes effectués ($F(1,218)=0.47$, $p=.49$, $\eta^2_p=0.002$). Sur les 30 problèmes proposés à l'entraînement, 3 participants ont fait 14 exercices. Cependant, la plupart des participants en ont fait 3 (n=34) ou moins de 3 (n=113). Seuls 41 participants (18%) se sont entraînés sur les 6 syllogismes possibles. Cependant, le type de connaissances utilisé en phase d'amorce influence les performances relatives en phase d'entraînement : lorsque l'amorce est liée aux connaissances primaires, les performances relatives en phase d'entraînement sont plus importantes ($M_{K1}=71.47\pm30.24$ vs. $M_{K2}=56.82\pm35.42$) ($F(1,217)=11.69$, $p<.001$, $\eta^2_p=0.05$). La rapidité de traitement des problèmes ($M_{K1}=3.53\pm2.68$ vs. $M_{K2}=3.35\pm1.41$) ($F(1,190)=0.35$, $p=.55$, $\eta^2_p=0.002$) ou la rapidité de traitement des *feedback* ($M_{K1}=5.40\pm2.93$ vs. $M_{K2}=5.42\pm3.21$) ($F(1,190)=0.004$, $p=.95$, $\eta^2_p<0.001$) ne sont pas influencées par les types de connaissances utilisés en phase d'amorce.

Concernant la phase du test final LWR, les participants qui ont bénéficié d'une phase d'amorce à habillage de connaissances primaires ont de meilleures performances, aiment davantage répondre aux dernières questions, ont davantage envie de trouver les bonnes réponses et ont davantage confiance en leurs réponses (Tableau 16). Plus le niveau estimé en mathématiques est important, plus l'envie de trouver les réponses au test final est importante

($r=0.17$, $p=.009$; $F(1,217)=5.53$, $p=.02$, $\eta^2_p=0.02$) et plus la charge cognitive perçue est faible ($r=-0.16$, $p=.01$; $F(1,217)=5.08$, $p=.02$, $\eta^2_p=0.02$).

Tableau 16 : Résultats des ANCOVAs concernant l'influence des deux types de connaissances sur les variables dépendantes dans la troisième phase du test final de l'expérience 10. Les ANCOVAs incluent, l'âge, le sexe, le niveau estimé en mathématiques, le nombre d'exercices réalisés et les scores aux différents buts d'accomplissement. Les analyses sont décrites avec les moyennes (M) et les écarts-types (σ).

	Connaissances primaires		Connaissances secondaires		F(1,217)	p	η^2_p
	M	σ	M	σ			
Performance (test final LWR)	68.60	19.73	59.13	20.97	12.60	<.001	0.05
Aimer répondre aux questions	56.78	47.76	27.28	28.55	5.86	.02	0.03
Envie de trouver les bonnes réponses	74.81	20.88	68.37	27.48	4.10	.04	0.02
Confiance dans les réponses données	51.41	27.65	42.80	27.07	5.73	.02	0.03
Charge cognitive perçue	60.38	20.85	63.86	17.71	1.96	.16	0.01
Vitesse (pb/min) (n=200)	3.51	3.49	4.23	5.75	1.16	.28	0.006

De plus, en comparant les variables au temps de la phase d'amorce et au temps de la phase d'entraînement ([Annexe I, Tableau I6](#)), une amorce de connaissances primaires permettrait de stabiliser le fait d'aimer répondre aux questions (connaissances primaires, $t(111)=-1.31$, $p=.19$, $d=0.13$ vs. connaissances secondaires, $t(114)=-5.52$, $p<.001$, $d=0.51$) et le fait d'avoir envie de trouver les bonnes réponses (connaissances primaires, $t(111)=-0.85$, $p=.39$, $d=0.07$ vs. connaissances secondaires, $t(114)=-2.93$, $p=.004$, $d=0.25$) alors qu'une amorce de connaissances secondaires semble miner les scores de ces deux variables en phase d'amorce et de test final LWR, même si les scores sont plus élevés lors du test final. Concernant la confiance dans les réponses données, elle augmente lors du passage de la phase de l'amorce au test final LWR pour les deux types de connaissances mais dans une moindre mesure pour les connaissances primaires ($t(111)=-2.55$, $p=.01$, $d=0.18$) par rapport aux connaissances secondaires ($t(114)=-4.82$, $p<.001$, $d=0.43$). De la même façon, la charge cognitive diminue de façon moindre pour les connaissances primaires ($t(111)=3.26$, $p=.001$, $d=0.27$) que secondaires ($t(114)=6.22$, $p<.001$, $d=0.55$).

Selon les analyses de survie, les femmes (M=3.80±3.08) font plus d'exercices que les hommes (M=2.46±1.68) ($\chi^2(1)=10.6$, $p=.001$) alors que les hommes sont moins représentés dans notre échantillon. Le contrebalancement de la représentation des genres des échantillons dans les expériences 9 et 10 amènent aux mêmes résultats : les femmes semblent plus persévérantes. Par

ailleurs, les participants avec un score de *feedback* positif relatif faible ($M=4.05\pm 3.03$) décident de continuer plus longtemps la phase d'entraînement que les participants avec un score de *feedback* positif relatif élevé ($M=2.86\pm 2.60$) ($\chi^2(1)=10.7$, $p=.001$). Cette différence est surtout présente dans le cadre d'une amorce de connaissances primaires (score de *feedback* positif relatif faible $M=4.52\pm 3.33$ vs. score de *feedback* positif relatif fort $M=2.92\pm 2.56$) ($\chi^2(1)=9.4$, $p=.002$) que de connaissances secondaires ($\chi^2(1)=3.4$, $p=.07$). De manière parallèle, les participants avec un score de *feedback* négatif relatif fort ($M=4.08\pm 3.19$) choisissent de faire plus d'exercices que les participants avec un score de *feedback* négatif relatif faible ($M=3.03\pm 2.53$) ($\chi^2(1)=7.9$, $p=.005$) que l'amorce soit faite de connaissances primaires ou secondaires. Les participants sont donc généralement plus persistants lorsqu'ils font face à moins de *feedback* positifs et davantage de *feedback* négatifs. Le *feedback* négatif semble avoir plus d'impact que le *feedback* positif puisqu'il influence la persistance des participants quelle que soit la phase d'amorce. Aucune autre caractéristique favorisant la persistance en phase d'entraînement n'a pu être mise en lumière, que l'amorce soit liée aux connaissances primaires ou secondaires. Les analyses de médiation ne rendent pas compte d'un effet médiateur même faible du nombre d'exercices effectués sur la performance au test final LWR.

L'expérience 10 confirme l'effet bénéfique des connaissances primaires. Lors de la phase d'amorce, les performances, l'engagement émotionnel et cognitif ainsi que la confiance dans les réponses sont plus importants et la charge cognitive ressentie plus faible. Cependant, à l'inverse de ce qui est attendu, le nombre d'exercices libres effectués n'est pas influencé par le type de connaissances utilisé dans l'amorce. Dans cette étude, réussir le test final n'a en effet aucun enjeu, les participants le font uniquement pour leur satisfaction personnelle. Ainsi, ajouter une récompense ou effectuer les passations en cours où le temps est fixé pourrait inciter les participants à davantage considérer la phase d'entraînement. L'effet bénéfique des connaissances primaires se retrouve rapidement puisque les performances relatives en phase d'entraînement sont meilleures lorsque l'amorce est liée à ce type de connaissances. Surtout, une amorce de connaissances primaires maintient le fait d'aimer répondre aux questions et l'envie de trouver les bonnes réponses tout au long de l'étude et favorise la performance, alors qu'une amorce de connaissances secondaires semble bel et bien miner la motivation des participants et leur performance finale. Finalement, même aussi courte (8 syllogismes présentés en deux temps), une

amorce faite de connaissances primaires est favorable à la performance et à l'engagement des participants.

Synthèse de la seconde partie empirique

Les trois expériences de cette seconde partie empirique confirment l'influence positive des connaissances primaires dans le cadre d'une tâche d'apprentissage. Notamment, les connaissances primaires pourraient favoriser l'implication et la persistance des apprenants en phase d'entraînement. Concernant l'implication dans des problèmes à habillage de connaissances secondaires, il semblerait que certaines caractéristiques des participants aient un effet facilitateur comme une envie particulièrement forte de trouver les bonnes réponses et une crainte de manquer un élément important pour le test final. Cependant, habiller les contenus secondaires de connaissances primaires comme nous l'avons fait avec les problèmes logiques ne semble pas suffisant pour permettre l'apprentissage. En effet, les individus seraient efficaces sur les contenus de connaissances primaires et « n'iraient pas plus loin » en extrayant la règle de logique formelle. Comme sous-tendu dans la revue de littérature, il n'est pas suffisant de rester sur des connaissances primaires pour apprendre. Ainsi, présenter des connaissances primaires en premier motive les individus et les rassure sur leurs capacités. Poursuivre avec des connaissances secondaires permet de mettre à l'épreuve les capacités d'apprentissage, mobilisant les compétences d'extraction de règles. Cet enchaînement de connaissances primaires puis secondaires semble plus efficace tant sur le plan des performances que sur celui de la motivation des individus. Par contre, il semblerait que présenter un nouveau cours directement « dans le vif du sujet » (connaissances secondaires) sans passer par une phase d'appropriation diminue les performances et mine la motivation des individus.

6 Discussion générale et perspectives

Cette partie propose une synthèse des résultats obtenus pour discuter de leur implication théorique. Ce travail poursuit d'abord un objectif fondamental. Il cherche à mettre à l'épreuve la théorie récente des deux types de connaissances (Geary & Berch, 2016) à l'aide d'un courant de recherche plus ancien sur le raisonnement humain qui utilise l'habillage des problèmes (Evans, 2002). Brièvement, nos données montrent sans ambiguïté que les habillages de connaissances primaires favorisent non seulement la performance, mais également l'engagement ainsi que la confiance des participants et diminuent la charge cognitive ressentie. Par ailleurs, il semblerait que les habillages de connaissances secondaires minent la motivation des individus mais que cet effet délétère puisse être atténué lorsque les habillages de connaissances primaires sont présentés en premier.

Ces résultats ont par ailleurs des conséquences dans le domaine de l'apprentissage de la logique formelle. En effet, si raisonner quotidiennement est chose aisée, raisonner selon les règles de logique formelle est bien plus difficile. Cette différence de facilité de raisonnement fait écho à la différence de facilité d'acquisition des connaissances primaires et secondaires. Les connaissances primaires pourraient être utilisées pour faciliter indirectement le raisonnement lié à la logique formelle (acquisition de connaissances secondaires) (Paas & Sweller, 2012). C'est ce que sous-tend la deuxième partie empirique en proposant une succession d'étapes pour (i) rassurer et motiver les apprenants (connaissances primaires), (ii) leur proposer le matériel à apprendre (connaissances secondaires) et (iii) favoriser le transfert.

6.1 Synthèse et discussion des résultats

Cette partie résume les principaux résultats apportés dans la partie empirique de ce travail et discute succinctement leurs apports.

Les connaissances primaires favorisent la performance et la motivation

Au cours de onze expériences, l'utilisation des habillages de connaissances primaires ou secondaires dans le cadre de problèmes logiques a permis de mettre en avant les influences respectives de ces deux types de connaissances. Principalement, les connaissances primaires, même lorsqu'elles habillent un problème de connaissances secondaires (problèmes logiques ici),

favorisent quasi-systématiquement la performance, l'engagement et la confiance des participants et diminuent la charge cognitive ressentie. Ces résultats sont illustrés aussi bien dans la première partie empirique (expériences 1 à 7 et analyse groupée, [Figure 19](#) pour une représentation des modèles simples) que dans la seconde partie dans laquelle les connaissances primaires favorisent la persistance (expérience 9), maintiennent les niveaux d'engagement et soutiennent les performances au test final (expérience 10). Ces résultats plaident en faveur de l'approche évolutive des connaissances (Geary & Berch, [2016](#) ; Sweller, [2016](#)) selon laquelle les connaissances primaires, à l'inverse des secondaires, sont acquises facilement et traitées sans effort de manière efficace. Les connaissances primaires agiraient de la même façon que les règles déontiques (Cosmides & Tooby, [2004](#)) qui peuvent d'ailleurs être considérées comme des connaissances primaires. Les individus seraient équipés précocement pour raisonner facilement à leurs propos. De plus, tout comme les règles déontiques, les connaissances primaires s'affranchissent de la concrétude. Les individus sont tout aussi efficaces pour réfléchir à propos d'une nourriture inconnue que connue, tout comme ils raisonnent aussi bien à propos d'une règle sociale inventée (par exemple « *si un homme mange une racine de manioc, alors il doit se tatouer le visage* ») que d'une règle familière (Gigerenzer & Hug, [1992](#)). Les connaissances primaires peuvent donc concerner des contenus non familiers ou inconnus contrairement à ce qui a pu être avancé par Tricot et Roussel ([2016](#)). Pour reprendre l'exemple sur la nourriture, nous aurions évolué pour maîtriser notre environnement même intensément fluctuant pour obtenir malgré tout la meilleure qualité nutritionnelle (Geary & Berch, [2016](#) ; Kaplan *et al.*, [2000](#)).

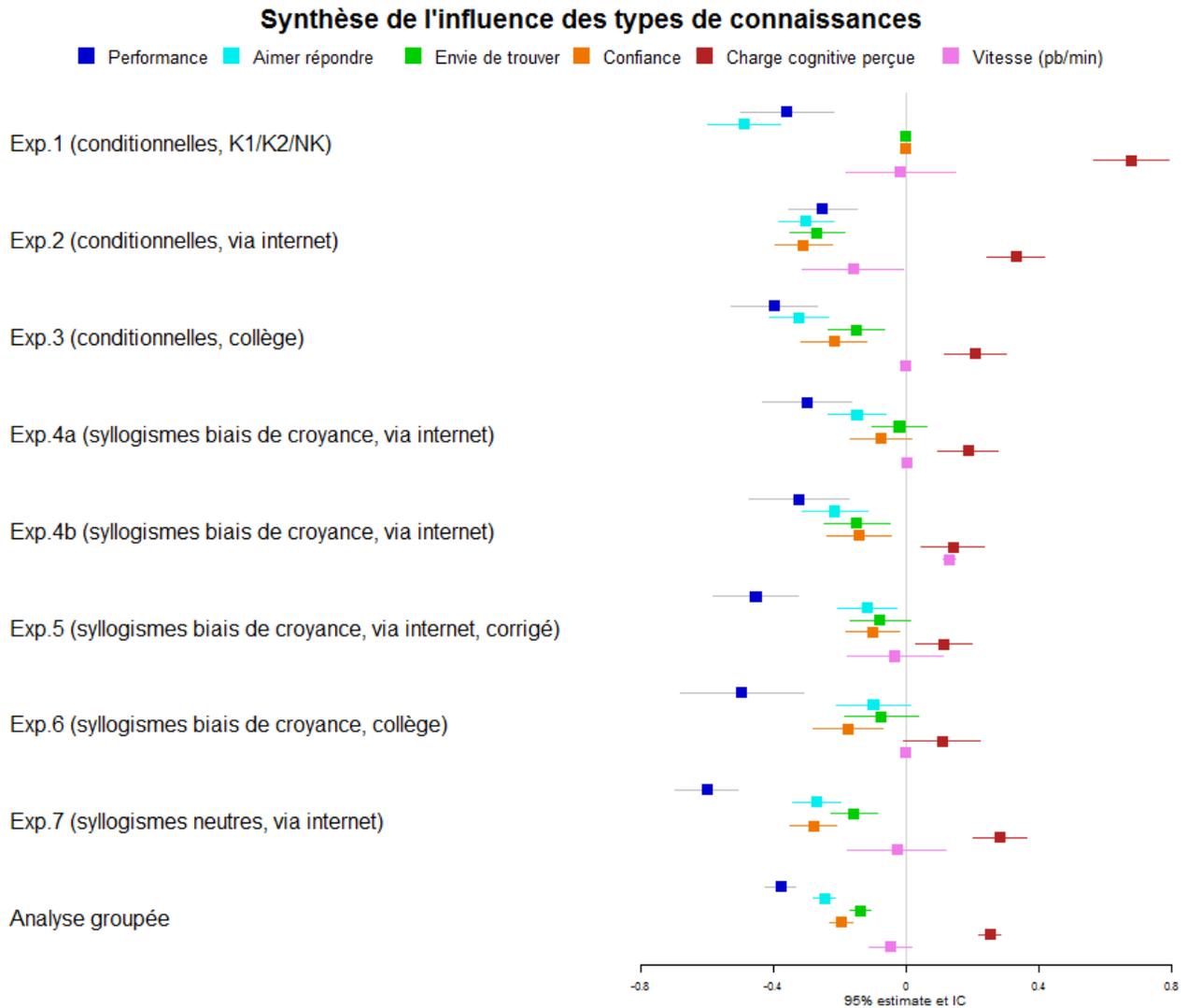


Figure 19 : Synthèse de l'influence des types de connaissances pour les expériences 1 à 7 et pour l'analyse groupée, résultats des modèles mixtes simples incluant le type de connaissances et le niveau estimé en mathématiques. Les moustaches représentent 95% de l'estimate et l'intervalle de confiance (IC) (la modalité de référence est « connaissance secondaire »). L'expérience 1 n'implique pas de mesure concernant les variables « envie de trouver » et « confiance ». Les expériences 3 et 6 n'impliquent pas de mesure de la vitesse.

Les connaissances secondaires entraînent une sensation de conflit parasite, taxant les ressources cognitives

Les expériences utilisant des syllogismes avec biais de croyances (expériences 4a, 4b, 5 et 6) et leur analyse groupée permettent d'investiguer davantage les caractéristiques des deux types de connaissances. De manière importante, la charge cognitive manipulée n'influence pas les performances des problèmes conflictuels ou non conflictuels pour les habillages de connaissances primaires (interaction marginale) alors qu'elle influence les problèmes conflictuels et pas les problèmes non conflictuels pour les habillages de connaissances secondaires (interaction significative). Cette interaction entre charge cognitive et type de problème logique illustre les relations entre les mécanismes de type 1 rapides, automatiques et non limités en capacités de mémoire de travail et les mécanismes de type 2 plus longs car activés sous réserve de détection de conflit entre les deux types de réponses et de ressources cognitives suffisantes (De Neys, 2006). Les problèmes non conflictuels pour lesquels les croyances guident les individus vers la bonne réponse n'entraînent pas de conflit puisque les croyances sont en adéquation avec le caractère de validité du problème. A l'inverse, les problèmes conflictuels peuvent engendrer une sensation de conflit car les deux types de réponse sont différents et nécessitent des ressources cognitives pour inhiber la première conclusion (guidée par les croyances) et élaborer la nouvelle réponse. Cependant, dans la modalité charge cognitive forte, les ressources cognitives sont utilisées pour compléter la tâche interférente et sont moins disponibles pour raisonner consciemment. Ainsi, lorsqu'ils sont face à des problèmes conflictuels avec une charge cognitive additionnelle forte, les participants voient leurs ressources cognitives saturées et les performances chutent. Les problèmes non conflictuels ne demandant que peu de ressources cognitives, les participants peuvent gérer la tâche interférente efficacement. Le fait que l'interaction entre la charge cognitive et le type de syllogisme soit observé dans le cas des habillages de connaissances secondaires et pas dans celui des connaissances primaires met en évidence que les connaissances secondaires consomment plus de ressources que les connaissances primaires. Quant aux connaissances primaires, elles ne demandent hypothétiquement aucune ressource cognitive. Ainsi, si des connaissances primaires habillent une structure de connaissances secondaires (comme les problèmes logiques ici, notamment conflictuels), elles laissent libres suffisamment de ressources pour permettre aux mécanismes de type 2 d'élaborer la bonne réponse. De plus, les problèmes à habillage de connaissances primaires sont systématiquement mieux réussis que ceux

à habillage de connaissances secondaires, que les problèmes soient conflictuels ou non. Ce deuxième résultat plaide en faveur du fait que les connaissances secondaires entraînent une sensation de conflit parasite qui handicape les individus.

Ces résultats sont confortés par ceux des expériences 2 à 7 utilisant une tâche de charge cognitive additionnelle (ordre des mots inversés ou *Dot Memory Task*). Imposer une charge cognitive forte diminue la performance et la confiance dans les réponses aux problèmes à habillage de connaissances secondaires uniquement (analyse groupée) alors que les habillages de connaissances primaires ne sont pas influencés par les fluctuations de la charge cognitive manipulée. De plus, les participants ressentent plus de charge cognitive quand une forte charge cognitive est imposée uniquement pour les habillages de connaissances primaires. Ces données évoquent l'hypothèse qu'une source de conflit peut venir (i) des connaissances secondaires, (ii) du caractère conflictuel des problèmes ou (iii) de la modalité charge cognitive manipulée forte. Dès qu'une source de conflit est activée, la charge cognitive ressentie atteint un certain seuil plafond et les différentes sources ne semblent pas s'additionner ou peu. Ainsi, la charge cognitive perçue n'augmente que pour les habillages de connaissances primaires lorsque les participants sont confrontés à l'une des deux sources de conflit au moins.

La théorie de la charge cognitive vs. la théorie des difficultés désirables au regard des deux types de connaissances

De manière générale, la modalité charge cognitive manipulée forte entraîne une performance, un engagement et une confiance dans les réponses moindres (analyse groupée), allant dans le sens de la théorie de la charge cognitive (Sweller *et al.*, 2011). Cependant, les expériences 3 et 6 plaident en faveur de la théorie des difficultés désirables (Bjork, 2013) puisque les performances peuvent être plus importantes dans le cas d'une charge cognitive forte notamment avec des habillages de connaissances primaires (expérience 3). Ces résultats sont observés lorsque la passation est en présentiel lors d'un horaire normalement attribué à un cours en collège/lycée et sont en totale concordance avec les observations faites sur place : les participants semblent bien plus impliqués lorsque la charge cognitive additionnelle est forte (*Dot Memory Task*) dénotant potentiellement d'un intérêt particulier de cette population pour ce genre de tâche. On retrouve un effet positif de la charge additionnelle de façon sporadique, notamment dans l'expérience 2 sur l'envie de trouver les bonnes réponses : l'envie de trouver les bonnes réponses est plus

importante lorsque la charge cognitive manipulée est forte et particulièrement pour les connaissances primaires. Le fait que cet effet positif soit essentiellement visible pour les connaissances primaires (performance ou envie de trouver les bonnes réponses) rejoindrait l'hypothèse selon laquelle les difficultés désirables le sont uniquement lorsqu'elles ne dépassent pas les ressources en mémoire de travail. Ainsi, une charge cognitive additionnelle forte pourrait favoriser la performance ou l'engagement des participants lorsque l'habillage est lié aux connaissances primaires.

Niveau estimé en mathématiques et raisonnement logique

Les résultats rendent compte du fait que plus le niveau estimé en mathématiques est important plus les participants sont performants, motivés, confiants dans leurs réponses et moins la charge cognitive perçue est forte. Si les corrélations sont faibles malgré leur significativité, elles vont dans le sens des observations de Morsanyi *et al.* (2013) : les habiletés (estimées ou réelles) en mathématiques sont liées aux capacités de logique formelle. Ces habiletés mathématiques pourraient également être liées à des capacités en mémoire de travail plus importantes et favoriser les performances logiques notamment lors de problèmes conflictuels nécessitant une réponse de type 2 (De Neys *et al.*, 2005).

Les effets délétères des connaissances secondaires contrebalancés par l'ordre de présentation

Les résultats de la première partie empirique montrent que les participants aiment davantage répondre à l'ensemble des questions et ont davantage confiance dans leurs réponses lorsque les habillages de connaissances primaires sont présentés en premier, que ce soit dans les tâches à habillage spécifique ou dans les derniers problèmes ABC. De plus, il semblerait qu'un effet d'entraînement (présentation en second) soit profitable uniquement aux problèmes à habillage de connaissances secondaires : les performances et la confiance dans les réponses sont meilleures, alors que ce n'est pas le cas pour les connaissances primaires. La charge cognitive perçue est également plus faible pour les problèmes à habillage de connaissances secondaires lorsqu'ils sont présentés en deuxième alors qu'on aurait pu s'attendre à un effet de fatigue augmentant cette charge ressentie. Enfin, les résultats rendent compte du fait que les connaissances secondaires, lorsqu'elles sont présentées en premier, minent le fait d'aimer répondre aux questions à habillage

de connaissances primaires. Les effets délétères des connaissances secondaires semblent donc être diminués lorsque des connaissances primaires sont présentées en premier. Les performances aux derniers problèmes ABC sont également plus importantes lorsque les habillages de connaissances primaires sont présentés en premier, ce qui argumenterait en faveur du fait qu'un enchaînement de connaissances primaires puis secondaires serait bénéfique pour les capacités de transfert. Ces informations sont particulièrement importantes si on cherche à favoriser l'apprentissage et l'engagement des individus en phase d'entraînement.

Caractéristiques individuelles et connaissances secondaires

La seconde partie empirique permet de mettre en avant des caractéristiques individuelles qui peuvent favoriser la persistance des personnes en phase d'entraînement lorsqu'elle est constituée de connaissances secondaires. L'expérience 9 montre que la persistance des participants est conditionnée par leur envie de trouver les bonnes réponses et leur score de maîtrise évitement. En effet, si les individus ont une forte envie de trouver les bonnes réponses et ont peur de manquer quelque chose pour le test final, ils persisteront davantage en phase d'entraînement lorsque cette dernière est liée aux connaissances secondaires uniquement. Les analyses ne rendent pas compte d'une caractéristique pouvant favoriser la persistance en phase d'entraînement lorsqu'elle est constituée de connaissances primaires. Cela conforte la théorie évolutive des connaissances (Geary & Berch, 2016) : les connaissances primaires sont intrinsèquement motivantes alors que les connaissances secondaires nécessitent souvent une motivation extrinsèque et des capacités ou inclinations particulières. Il semblerait donc particulièrement intéressant de s'appuyer sur les connaissances primaires pour favoriser la motivation des individus et les mettre tous sur un pied d'égalité, notamment dans le contexte d'une tâche d'apprentissage.

La succession « connaissances primaires - connaissances secondaires »

Les expériences 8 et 9 consolident le premier point de cette discussion : les connaissances primaires ont un effet positif sur la performance, l'engagement des participants dans une tâche d'apprentissage et favorisent leur persistance en phase d'entraînement. Cependant, ces expériences n'ont pas permis d'illustrer un quelconque avantage des connaissances primaires sur les performances lors d'une dernière tâche de transfert que les participants avaient pour consigne de réussir. Deux raisons peuvent être évoquées. La première est que les individus seraient

« simplement » efficaces face à des connaissances primaires, quelles qu'elles soient, et ne chercheraient pas à extraire une règle commune particulière. Ainsi, un entraînement composé uniquement de connaissances primaires ne suffirait pas à apprendre. La seconde est que les connaissances secondaires présentées seules démotiveraient les individus, satureraient leur mémoire de travail et empêcheraient l'apprentissage de la règle. Pour permettre aux personnes d'apprendre, il ne faudrait donc ni rester dans « la zone de confort » de connaissances primaires, ni commencer « dans le vif du sujet » par des connaissances secondaires seules. L'idée serait alors d'utiliser les caractéristiques des deux types de connaissances de manière combinée en présentant d'abord (i) un habillage du problème lié aux connaissances primaires afin de rassurer les individus dans leurs capacités, puis (ii) les mettre au défi d'un habillage de connaissances secondaires pour permettre l'apprentissage, et finir par (iii) les exercices de transfert (connaissances secondaires autres ou épurées). C'est ce que propose de faire l'expérience 10 comme un prélude méthodologique à de nouvelles expériences. Les résultats montrent bien qu'un enchaînement tel que présenté ci-dessus est favorable à la performance, à la motivation et à la confiance des apprenants lors du test final. Cette procédure permettrait également de maintenir les niveaux de motivations des individus tout au long de l'étude. Elle peut se rapprocher du concept de *concreteness fading* (Goldstone & Son, 2005 ; McNeil & Fyfe, 2012). L'apprentissage serait favorisé lorsqu'on introduit des représentations concrètes en premier pour aller progressivement vers des représentations plus abstraites et symboliques. Les items concrets sont plus faciles à manipuler mentalement et à mémoriser alors que les items abstraits seraient plus facilement transférables. Présenter initialement des éléments concrets permettrait alors d'induire des connections intuitives fortes entre les concepts mentalement simulés et leur équivalents réels. Ensuite, le fait d'idéaliser ces éléments et de les abstraire petit à petit pour qu'ils soient davantage transférables favoriserait la fin du processus d'apprentissage.

Synthèse

Ce travail proposait initialement de mettre à l'épreuve l'approche évolutive des connaissances (Geary & Berch, 2016) en utilisant l'habillage des problèmes logiques (Evans, 2002). Les résultats semblent clairs : comparativement aux connaissances secondaires qui minent la motivation des participants et engendrent une sensation de conflit parasite, les connaissances primaires favorisent la performance et l'engagement tout en diminuant la charge cognitive

perçue. Aucune caractéristique individuelle ne permettrait de favoriser la persévérance lorsque des connaissances primaires sont en jeu. Par contre, l'envie de trouver les bonnes réponses et des buts d'accomplissement particuliers semblent requis pour persévérer face à des connaissances secondaires. Néanmoins, les effets délétères des connaissances secondaires peuvent être réduits si des connaissances primaires sont présentées en premier. Enfin, il semblerait qu'une procédure incluant une présentation successive de connaissances primaires puis secondaires puisse aider les processus d'apprentissage. A minima, ces résultats montrent qu'il est possible d'établir et de maintenir un niveau de motivation basique pour tous face à l'éternel problème de l'inégalité de motivation entre les apprenants (Cosnefroy *et al.*, 2016). Ils pourraient ainsi bénéficier aux pratiques d'enseignement via la mise en œuvre d'une façon de présenter les supports d'apprentissages peu coûteuse mais efficace pour motiver les individus.

6.2 Limites et perspectives

Malgré la difficulté d'inclure la théorie de l'évolution dans les sciences sociales (Richardson, 2007), l'approche évolutive au sein de la psychologie et de l'éducation semble constituer un apport considérable pour les recherches futures en vue de répondre de façon pluridisciplinaire aux problèmes actuels. Notamment, elle permet de différencier deux types de connaissances à ne surtout pas confondre lorsqu'on parle d'éducation (Paas & Sweller, 2012). Ce travail exploratoire, dont les résultats et conclusions sont à prendre avec précaution, a permis d'éclaircir et de souligner les caractéristiques des connaissances primaires et secondaires en utilisant l'habillage des problèmes logiques. Ces caractéristiques nous ont ensuite amenés à tester un ordre de présentation des contenus pédagogiques afin de faciliter l'apprentissage notamment en termes de motivation et d'implication. Ce que savent déjà les apprenants (les connaissances primaires) ne devrait pas être négligé sous prétexte que ce sont des éléments déjà acquis. Au contraire, s'appuyer sur ces connaissances semblerait bien être un atout dans la lutte pour motiver les apprenants. Ces apports sont néanmoins bien loin de répondre à toutes les questions et le travail sur l'influence des deux types de connaissances ne fait que commencer. Cette partie s'emploie à déceler les limites ainsi que les perspectives qui en découlent au sein de différents principaux objectifs proximaux fondamentaux et plus appliqués.

6.2.1 Objectifs proximaux fondamentaux

Ces objectifs sont liés à la volonté d'enrichir et de mettre à l'épreuve le modèle de l'approche évolutive des connaissances.

Evaluer plus précisément la puissance des caractéristiques relatives aux deux types de connaissances

Les résultats obtenus argumentent en faveur de la théorie de l'approche évolutive des connaissances : les thématiques liées aux connaissances primaires comme celles de la nourriture ou des caractéristiques de la faune que nous avons utilisées semblent avoir des propriétés intéressantes autres que l'intérêt que l'on porte à ces thèmes. En effet, dès qu'un habillage évoque ce type de connaissances, les problèmes liés entraînent une meilleure performance, une plus grande motivation, confiance et une charge cognitive perçue moins importante. Cet effet perdure même lorsque les mots sont inconnus et que l'intérêt à répondre aux questions est moindre. Les connaissances primaires « éloignées » ou « proches » de notre environnement direct seraient intrinsèquement motivantes (et pas seulement intéressantes) et nous serions suffisamment efficaces pour raisonner à leur propos. Si les expériences présentées ici permettent une mesure de l'intérêt, elles n'ont pas pour objectif de traiter clairement son rôle pour chaque type de connaissances. Des analyses complémentaires ont été menées pour inclure la variable « aimer répondre aux questions » dans les modèles : aucune n'a mis en avant un effet médiateur de cet intérêt, le type de connaissances utilisé étant toujours un prédicteur bien plus important des réponses aux questions. Construire une nouvelle expérience qui manipulerait l'intérêt comme variable indépendante afin d'en clarifier l'impact, serait un défi intéressant. Il est en effet complexe d'imaginer un matériel de problèmes logiques avec des connaissances primaires et secondaires dont l'attrait serait identique, toutes choses égales par ailleurs (comme le fait que les mots utilisés soient connus ou non par exemple).

Une idée pour déterminer des thèmes d'intérêt similaire pourrait être d'utiliser un sondage plus vaste que celui proposé en [Annexe B](#). Le problème qui se poserait alors serait celui de la frontière entre les connaissances primaires et secondaires. Cette frontière est à l'heure actuelle imprécise et difficile à établir compte tenu du fait que les connaissances secondaires sont construites à partir des connaissances primaires (Tricot & Sweller, 2014, 2016). On pourrait alors

tenter de déterminer quel pourcentage de connaissances primaires et secondaires contient une connaissance. Un sondage à plus grande échelle incluant d'autres mesures que l'intérêt (items reprenant les caractéristiques des types de connaissances (Geary & Berch, 2016 ; Paas & Sweller, 2012 ; Tricot & Sweller, 2014 ; Tricot & Roussel, 2016), *e.g.*, échelles visuelles analogiques à deux étiquettes comportant les items « *pensez-vous qu'apprendre ces connaissances est :* » *extrêmement facile/extrêmement difficile*, « *pensez-vous que ces connaissances sont utiles dès que vous les apprenez ?* » *pas du tout/tout à fait*, voire items liés à l'envie d'apprendre sur la thématique) permettrait d'établir un premier continuum connaissances primaires/secondaires ainsi que les pourcentages relatifs d'implication. Si ce continuum est possible, l'impact des connaissances primaires au regard de leur pourcentage d'implication dans un thème pourrait alors être investigué.

Afin de poursuivre cette démarche, le fait d'utiliser d'autres thèmes liés aux connaissances primaires comme l'appartenance à l'endo-groupe, la famille ou les visages, la représentation élémentaire du temps, *etc.* validerait l'effet des connaissances primaires de façon générale. Dans nos expériences, les connaissances primaires, même éloignées de notre environnement (mots inconnus), sont plus facilement traitées que les connaissances secondaires. Par exemple, si une description évoque un tant soit peu de la nourriture, il est aisé de s'imaginer en train de manger (neurones miroirs) ce qui pourrait faciliter l'accès à l'analogie pour ce thème contrairement aux règles de grammaire, bien qu'il soit également facile de se voir ajouter un « w » à la fin d'un mot pour en faire un pluriel. La différence entre connaissances primaires et secondaires pourrait donc venir de la facilité d'analogie, nos résultats montrant que, comme les règles déontiques (Cosmides & Tooby, 2004), les connaissances primaires ne sont pas impactées par le caractère concret ou réel de la situation. Face à des connaissances secondaires, les individus se concentreraient davantage sur les détails de l'information donnée. Une nouvelle expérience ajoutant plus d'informations non utiles mais toujours liées aux deux types de connaissances pourraient aider à explorer cette piste. De la même façon, diversifier les types de syllogismes utilisés comme dans l'expérience 10 pour les rendre plus difficiles pourrait renforcer les arguments en faveur d'une influence positive des connaissances primaires.

Un des résultats importants de ce travail souligne que les connaissances primaires ont un fort effet motivationnel. Néanmoins, nos expériences ne permettent pas de savoir si cet effet perdure

dans le temps ou non. Or, susciter la motivation des apprenants est important, mais la maintenir est primordial. De façon similaire à l'expérience 9, les participants pourraient être confrontés à un entraînement de syllogismes habillés de connaissances primaires ou secondaires (inter-sujets) non plus sur une séance mais sur six jours à raison de quatre exercices par jour, le but étant de réussir un test final le septième jour. Les participants auraient, comme dans l'expérience 9, le choix de s'entraîner ou non chaque jour mais devraient être présents à minima le premier et le septième jour. Ce même type de procédure pourrait être appliqué à l'expérience 10 afin de juger du pouvoir motivant de l'amorce de connaissances primaires. Enfin, l'effet motivationnel et facilitateur des connaissances primaires pourrait être mis à l'épreuve chez différentes catégories d'individus comme les personnes âgées ou des personnes avec des troubles des apprentissages. Il serait également intéressant d'évaluer la différence que peut avoir cet effet entre des individus novices et experts d'un domaine : est-ce que la différence de performance ne sera visible que pour les habillages de connaissances secondaires ? Et est-ce que les experts seront autant motivés que les novices par les connaissances primaires ? Des études interculturelles permettraient aussi d'évaluer le caractère universel des connaissances primaires.

Enfin, déterminer les caractéristiques individuelles permettant une persévérance plus importante lors d'un entraînement avec des connaissances secondaires serait un atout pour mieux comprendre les mécanismes en jeu. L'échelle des buts d'accomplissement utilisée dans ce travail (Darnon & Butera, 2005), bien que validée en français et rapide à remplir pour les participants, s'expose à plusieurs critiques. Le fait que certains items renvoient à des valeurs comme « c'est important pour moi de... » et non à des objectifs/buts (Elliot & Murayama, 2008) ou le fait que le questionnaire ne soit pas centré sur la tâche des participants en sont des exemples. L'emploi d'une autre échelle d'évaluation des buts d'accomplissement ou plus généralement des stratégies métacognitives pourrait être un apport intéressant dans la poursuite de ce travail, tout comme l'observation de l'influence des capacités en mémoire de travail (Evans *et al.*, 2010) qui ferait écho aux habiletés en mathématiques. De façon analogue, les choix d'évaluation de la variable de charge cognitive perçue avec deux ou trois items gagneraient à être élargis (mesure plus fine de la charge ressentie) (Leppink *et al.*, 2015). L'utilisation d'échelles plus complètes ou de mesures physiologiques entraînerait cependant un temps de passation et une charge plus importants pour les participants.

Investiguer les mécanismes en jeu lors du traitement des deux types de connaissances

Si les expériences de ce travail semblent bien montrer un impact positif des connaissances primaires, il conviendrait d'en répliquer certaines afin de mieux explorer les mécanismes en jeu. Dans le domaine des problèmes logiques, les expériences sur les biais de croyance ont montré que les connaissances secondaires nécessitaient davantage de ressources cognitives et engendraient un état conflictuel chez les participants, si bien que leurs performances diminuaient également pour les problèmes non conflictuels. Cependant, la charge cognitive manipulée n'a pas d'influence sur les problèmes non conflictuels qu'ils soient habillés de connaissances primaires ou secondaires. Ces résultats ne permettent pas de dire de façon claire que les connaissances secondaires impliquent davantage de mécanismes de type 2. On pourrait néanmoins considérer qu'elles induiraient une telle sensation de conflit parasite qu'elles ne permettraient pas de voir une différence pour les problèmes non conflictuels quelle que soit la charge cognitive additionnelle. Cela ne se verrait que lorsqu'une charge cognitive plus importante serait appliquée (cumul de la charge des problèmes conflictuels et de la charge additionnelle). Utiliser une charge cognitive additionnelle plus importante, comme une *Dot Memory Task* 4*4 avec 5 points (Johnson *et al.*, 2016), pourrait permettre de lever quelques ambiguïtés liées à ce problème et à l'implication des mécanismes de type 1 et 2. Par ailleurs, nos résultats sous-tendent que les sources de conflit (connaissances secondaires, modalité de charge additionnelle forte et problèmes conflictuels) ne s'additionnent que peu. Les futures études utilisant une charge cognitive additionnelle plus forte pourront permettre de mieux comprendre ces données. Il y a fort à parier que les résultats mèneraient à construire une nouvelle manipulation afin de tester le niveau de seuil de détection de conflit.

Parallèlement, d'autres études pourraient investiguer plus finement les mécanismes qui sous-tendent les performances dans le cadre de connaissances primaires et secondaires. Par exemple, est-ce que les individus s'imaginent plus facilement le modèle mental exhaustif avec des connaissances primaires ou est-ce que ce sont les intuitions qui guident les réponses ? Des épreuves en temps limité pourraient permettre l'étude de cette interrogation puisque les mécanismes de type 2 sont plus lents que ceux de type 1 (De Neys & Glumicic, 2008 ; Stupple *et al.*, 2011).

6.2.2 Objectifs proximaux plus appliqués

Ces objectifs sont liés à l'impact que l'approche évolutive des connaissances pourrait avoir sur l'apprentissage et les pratiques pédagogiques ou à l'utilisation qu'il serait possible d'en faire au sein d'autres thématiques de recherche.

Préciser et développer la méthode d'enchaînement « connaissances primaires – secondaires »

L'expérience 10 apporte des résultats encourageants concernant la méthode de présentation « connaissances primaires en premier – connaissances secondaires en second » notamment au niveau du transfert. Elle mériterait d'être reproduite afin de confirmer les résultats voire d'observer une influence des connaissances primaires sur la persistance des participants en phase d'entraînement. Cette étude visait en effet à mettre à l'épreuve les résultats précédents dans une tâche d'apprentissage, le but étant de proposer une nouvelle procédure qui en faciliterait le processus. Bien que les consignes soulignent l'importance de s'entraîner suffisamment pour réussir le test final, les conditions sont loin d'être semblables à une situation d'apprentissage. Contrairement aux expériences 8 et 9, les participants de l'expérience 10 sont des étudiants à l'université prenant part à l'étude en ligne sur leur temps de loisirs. Or, une situation d'apprentissage implique un temps alloué pour étudier. Si les cours peuvent se suivre à domicile, l'école reste l'environnement standard dans lequel les individus sont « contraints » d'apprendre : les heures allouées à l'école ne sont faites que pour apprendre et diffèrent ainsi de celles de la vie quotidienne « normale ». Ainsi, répliquer l'expérience 10 dans les mêmes conditions que celles des expériences 8 et 9 (lors d'une heure consacrée à l'apprentissage au lycée) pourrait conforter les résultats et les étendre. On pourrait aussi imaginer une autre passation en ligne qui inclurait des récompenses en fonction du score obtenu au test final, mimant ainsi les effets de la motivation extrinsèque souvent nécessaire à l'apprentissage (Legault, 2016). Les résultats de l'expérience 10 montrent qu'une phase d'amorce de connaissances primaires, même courte, a un effet motivationnel suffisant pour maintenir l'engagement des participants tout au long de la tâche et favoriser leurs performances. Il serait intéressant d'investiguer entre quelles bornes de temps ou d'exercices cet effet existe et à quel niveau il est optimal.

Par ailleurs, tout comme la théorie des difficultés désirables prône une efficacité de ces difficultés sur le long terme (Roediger & Karpicke, 2006), une nouvelle expérience pourrait s'attacher à déterminer les bénéfices d'un enchaînement de connaissances primaires puis secondaires à long terme, comparativement à un entraînement de connaissances primaires ou secondaires seules. Cela permettrait également d'évaluer les modifications de la mémoire à long terme et d'établir si l'impact d'un habillage de connaissances primaires seul est semblable à celui d'un habillage « quotidien » qui favoriserait la compréhension de la structure du problème mais réduirait les capacités de transfert des apprenants (problèmes de mathématiques, De Bock *et al.*, 2011 ; Kaminski *et al.*, 2006, 2008).

Travailler les implications des deux types de connaissances dans le cadre du feed-back et des tâches de transfert

L'expérience 10 tente de mettre à l'épreuve nos résultats lors d'une tâche d'apprentissage plus écologique, notamment en utilisant le *feedback*. Le retour donné aux participants n'est cependant peut-être pas assez détaillé pour leur permettre de comprendre la règle. D'autres modalités de *feedback* comme l'utilisation des diagrammes de d'Euler, de Venn ou de Carroll plus visuels (Carroll, 1966, initialement publié en 1896) ou celle de contre-exemples qui se rapprocheraient de *feedbacks* primaires pourraient être explorées. En effet, des catégories de *feedback* plus ou moins primaires pourraient favoriser l'intégration des informations de la part des apprenants et pourraient être ajoutées aux recommandations dans ce domaine (Hattie & Timperley, 2007).

Par ailleurs, les connaissances secondaires sont souvent qualifiées de spécifiques contrairement aux connaissances primaires qui sont considérées comme plus générales. Les connaissances générales ne pouvant être enseignées, les instructions et l'apprentissage ne joueraient donc que sur les connaissances secondaires (Tricot & Sweller, 2014, 2016 ; Youssef *et al.*, 2012). Or, ce travail fait le postulat que le raisonnement lié à la logique formelle, aussi long et difficile à acquérir soit-il (connaissance secondaire), est une connaissance générale, qui plus est très convoitée. Tout comme les capacités de raisonnement scientifique et d'argumentation (*i.e.*, habiletés à découvrir, à argumenter, croyances et connaissances épistémiques ; ces capacités sont utiles pour les chercheurs mais également pour prendre des décisions éclairées dans la vie quotidienne, Engelmann *et al.*, 2016), le raisonnement lié à la logique formelle pourrait être un

exemple de connaissances *cross-domain* (Fischer *et al.*, 2017). En effet, le raisonnement scientifique ne serait pas totalement général car il n’y aurait pas une seule habileté universelle comme le raisonnement hypothético-déductif mais un panel d’habiletés qui dépendraient plus ou moins des connaissances sur le domaine visé. Mais il ne serait pas non plus complètement spécifique parce que des habiletés de raisonnement scientifique peuvent être utilisées dans d’autres contextes en fonction des similarités entre les problèmes (*i.e.*, transfert). Apprendre ces connaissances *cross-domain* soutiendrait les structures métacognitives et favoriserait les capacités d’adaptation des individus (Fischer *et al.*, 2017). L’idée serait alors de travailler sur les capacités de transfert visées par les apprentissages. Les capacités de transfert dépendent du niveau d’abstraction de la connaissance initiale. Si la connaissance disponible est concrète, pragmatique, les apprenants parviennent à s’adapter facilement dans le cas où le problème initial est proche du problème test (Kaminski, Sloutsky & Heckler, 2006). Qu’en est-il lorsque la connaissance des règles de logique formelle disponible est plus abstraite ? Il serait intéressant d’investiguer si l’introduction de problèmes abstraits de type ABC (connaissance secondaire générale) dans les phases d’entraînement peut favoriser le transfert. L’idée est de reprendre le protocole de l’expérience 10 pour vérifier l’influence positive d’une phase d’amorce à habillage de connaissances primaires, puis d’y ajouter un entraînement avec des problèmes ABC afin de comparer les modalités avec et sans ces problèmes sur la performance et le temps d’entraînement.

Utiliser la méthode « syllogisme – habillage de connaissances primaires et secondaires »

Ce travail met en exergue une méthode qui permet de varier facilement l’engagement dans une tâche (via les connaissances primaires et secondaires) et son caractère plus ou moins difficile (en ajoutant la complexité des syllogismes). Cette méthode pourra être appliquée dans de nouvelles expériences. L’une d’entre elle visera à établir une nouvelle manière de mesurer la charge cognitive. L’idée est de présenter une tâche additionnelle avant et après une tâche d’apprentissage puis d’observer la différence de performance entre la tâche pré-apprentissage et la tâche post-apprentissage. Cette différence devrait renseigner sur les ressources cognitives utilisées lors de la tâche d’apprentissage. En faisant varier l’engagement et la difficulté des types de problèmes, la méthode utilisée dans ce travail constituera une tâche d’apprentissage intéressante. Des travaux en partenariat avec des chercheurs de Toulouse et de Sydney sont actuellement en cours.

Elargir les apports des deux types de connaissances à d'autres domaines d'apprentissage

Le raisonnement lié à la logique formelle est utilisé de manière très spécifique dans ce travail (règles conditionnelles et syllogismes). Il a permis d'illustrer des caractéristiques importantes des connaissances primaires et secondaires qui pourraient être transférées à d'autres domaines plus habituels de l'apprentissage. Par exemple, on peut facilement imaginer un cours de langue qui commencerait systématiquement par quelques minutes de dialogue en langue étrangère à propos des préférences culinaires des étudiants ou de leurs animaux préférés utilisant progressivement quelques règles grammaticales abordées pendant la session. Revenir à des habillages de connaissances primaires permettrait de rassurer les individus sur leurs compétences et de les motiver à participer. Certes, certaines disciplines scolaires se prêtent plus volontiers à l'exercice que d'autres. Il faudra alors réfléchir plus longuement à la manière de présenter les problèmes de mathématiques aux apprenants sans qu'ils perçoivent cette tentative comme infantilisante. Après tout, c'est déjà ce que font bon nombre de professeurs : ils habillent leurs problèmes avec des situations de la vie de tous les jours en faisant souvent appel à des connaissances primaires même s'ils n'en ont pas conscience. Ce travail supporte leurs efforts pour rendre les exercices accessibles à tous. La suite des travaux s'attachera à mettre à l'épreuve les deux types de connaissances pour favoriser l'apprentissage dans des conditions de plus en plus écologiques et diversifiées (de l'école aux enseignements professionnels).

6.3 Conclusion

Ce travail met en relation la récente et critiquée approche évolutive des connaissances avec l'ancien cadre de l'étude du raisonnement logique qui, bien qu'en pleine révolution de paradigme, reste une référence solide. Le premier objectif est de comprendre pourquoi nous raisonnons plus facilement et plus volontiers à propos d'un repas qu'à propos d'une règle de grammaire. Cette démarche peut paraître triviale, mais, à notre connaissance, aucune recherche n'a encore utilisé des habillages de connaissances primaires vs. secondaires dans le cadre de problèmes logiques. L'enjeu scientifique initial de confirmer les caractéristiques des deux types de connaissances, notamment en termes de motivation mais aussi de performance, de confiance et de charge cognitive perçue, a conduit à interroger ces résultats de manière plus pratique.

L'association successive des connaissances primaires et secondaires semble même dépasser nos attentes : en s'appuyant sur les premières, on pourrait bien favoriser l'engagement et la compréhension des individus face aux secondes.

A l'instar de Lewis Carroll, ce travail maquille les problèmes logiques qui rebutent tant les individus pour les rendre plus plaisants et motivants. En effet, il n'y a rien de plus efficace que l'intérêt et l'engagement pour permettre aux personnes d'évoluer dans un domaine. Les connaissances primaires jouent le rôle des jeux de mots de Carroll mais de manière beaucoup plus générale et peut-être plus efficace : tout le monde semble adhérer à l'influence de ces connaissances à l'inverse de l'humour nonsensique qui ne fait pas toujours consensus. Finalement, le domaine de l'apprentissage bénéficierait à laisser sa chance à l'approche évolutive. « Faites un seul essai, c'est tout ce que je vous demande ! » (Carroll, préface, *Logique sans peine*, 1966, initialement publié en 1896).

Références

- Anzures, G., Kelly, D. J., Pascalis, O., Quinn, P. C., Slater, A. M., De Viviés, X., & Lee, K. (2014). Own-and other-race face identity recognition in children: The effects of pose and feature composition. *Developmental psychology, 50*(2), 469-481. doi: 10.1037/a0033166
- Ash, J., & Gallup, G. G. (2007). Paleoclimatic variation and brain expansion during human evolution. *Human Nature, 18*(2), 109-124. doi: 10.1007/s12110-007-9015-z
- Atkinson, R. K., Mayer, R. E., & Merrill, M. M. (2005). Fostering social agency in multimedia learning: Examining the impact of an animated agent's voice. *Contemporary Educational Psychology, 30*(1), 117-139. doi: 10.1016/j.cedpsych.2004.07.001
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *Psychology of learning and motivation, 2*, 89-195. doi: 10.1016/S0079-7421(08)60422-3
- Atran, S. (1998). Folk biology and the anthropology of science: Cognitive universals and cultural particulars. *Behavioral and brain sciences, 21*(04), 547-569.
- Aunola, K., Leskinen, E., & Nurmi, J. E. (2006). Developmental dynamics between mathematical performance, task motivation, and teachers' goals during the transition to primary school. *British Journal of Educational Psychology, 76*(1), 21-40. doi: 10.1348/000709905X51608
- Ayres, P. (2006). Using subjective measures to detect variations of intrinsic cognitive load within problems. *Learning and Instruction, 16*(5), 389-400. doi: 10.1016/j.learninstruc.2006.09.001
- Ayres, P., Marcus, N., Chan, C., & Qian, N. (2009). Learning hand manipulative tasks: When instructional animations are superior to equivalent static representations. *Computers in Human Behavior, 25*(2), 348-353. doi: 10.1016/j.chb.2008.12.013
- Azevedo, R. (2015). Defining and measuring engagement and learning in science: Conceptual, theoretical, methodological, and analytical issues. *Educational Psychologist, 50*(1), 84-94. doi: 10.1080/00461520.2015.1004069
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of learning and motivation, 8*, 47-89. doi: 10.1016/S0079-7421(08)60452-1
- Bago, B., & De Neys, W. (2017). Fast logic?: Examining the time course assumption of dual process theory. *Cognition, 158*, 90-109. doi: 10.1016/j.cognition.2016.10.014

- Bailenson, J. N., Shum, M. S., Atran, S., Medin, D. L., & Coley, J. D. (2002). A bird's eye view: Biological categorization and reasoning within and across cultures. *Cognition*, *84*(1), 1-53. doi: 10.1016/S0010-0277(02)00011-2
- Bailey, D. H., & Geary, D. C. (2009). Hominid brain evolution. *Human Nature*, *20*(1), 67-79. doi: 10.1007/s12110-008-9054-0
- Baki, A., Kosa, T., & Guven, B. (2011). A comparative study of the effects of using dynamic geometry software and physical manipulatives on the spatial visualisation skills of pre-service mathematics teachers. *British Journal of Educational Technology*, *42*(2), 291-310. doi: 10.1111/j.1467-8535.2009.01012.x
- Banks, A.P., & Hope, C. (2014). Heuristic and analytic processes in reasoning: An event-related potential study of belief bias. *Psychophysiology*, *51*, 290-297. doi: 10.1111/psyp.12169
- Bar-Haim, Y., Ziv, T., Lamy, D., & Hodes, R. M. (2006). Nature and nurture in own-race face processing. *Psychological science*, *17*(2), 159-163. doi: 10.1111/j.1467-9280.2006.01679.x
- Barrett, T. J., Stull, A. T., Hsu, T. M., & Hegarty, M. (2015). Constrained interactivity for relating multiple representations in science: When virtual is better than real. *Computers & Education*, *81*, 69-81. doi: 10.1016/j.compedu.2014.09.009
- Barsalou, L. W. (2010). Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in cognitive science*, *2*(4), 716-724. doi: 10.1111/j.1756-8765.2010.01115.x
- Beller, S. (2010). Deontic reasoning reviewed: psychological questions, empirical findings, and current theories. *Cognitive Processing*, *11*(2), 123-132. doi: 10.1007/s10339-009-0265-z
- Berlin, B., Breedlove, D. E., & Raven, P. H. (1973). General principles of classification and nomenclature in folk biology. *American anthropologist*, *75*(1), 214-242. doi: 10.1525/aa.1973.75.1.02a00140
- Bethell-Fox, C. E., & Shepard, R. N. (1988). Mental rotation: Effects of stimulus complexity and familiarity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*(1), 12-23. doi: 10.1037/0096-1523.14.1.12
- Binkley, M., Erstad, O., Herman, J., Raizen, S., Ripley, M., Miller-Ricci, M., & Rumble, M. (2012). Defining twenty-first century skills. In Griffin, P., McGaw, B., & Care, E. (Eds.), *Assessment and teaching of 21st century skills* (pp. 17-66). Dordrecht: Springer.

- Bjork, R. A. (1994). Memory and metamemory considerations in the training of human beings. In J. Metcalfe and A. Shimamura (Eds.), *Metacognition: Knowing about knowing* (pp. 185–205). Cambridge: MIT Press.
- Bjork, R. A. (2013). Desirable difficulties perspective on learning. In Pashler, H. (Ed.), *Encyclopedia of the mind*, (pp. 134-146). Thousand Oaks: Sage Publication.
- Bjork, E. L., & Bjork, R. A. (2011). Making things hard on yourself, but in a good way: Creating desirable difficulties to enhance learning. In FABBS Foundation, Gernsbache, M. A., & Pomerantz, J. R. (Eds.) *Psychology and the real world: Essays illustrating fundamental contributions to society* (pp.56-64). New York: Worth Publishers.
- Bjork, R. A., & Kroll, J. F. (2015). Desirable difficulties in vocabulary learning. *The American journal of psychology*, *128*(2), 241-252.
- Blackwell, L. S., Trzesniewski, K. H., & Dweck, C. S. (2007). Implicit theories of intelligence predict achievement across an adolescent transition: A longitudinal study and an intervention. *Child development*, *78*(1), 246-263. doi: 10.1111/j.1467-8624.2007.00995.x
- Blanchette, I., Gavigan, S., & Johnston, K. (2014). Does emotion help or hinder reasoning? The moderating role of relevance. *Journal of Experimental Psychology: General*, *143*(3), 1049-1064. doi: 10.1037/a0034996
- Bonnefon, J.-F. (2011). *Le raisonneur et ses modèles*. Grenoble : PUG.
- Bonnefon, J. F., Feeney, A., & De Neys, W. (2011). The risk of polite misunderstandings. *Current Directions in Psychological Science*, *20*(5), 321-324. doi: 10.1177/0963721411418472
- Bonnefon, J. F., Girotto, V., & Legrenzi, P. (2012). The psychology of reasoning about preferences and unsequential decisions. *Synthese*, *185*, 27-41. doi: 10.1007/s11229-011-9957-x
- Bonnefon, J. F., & Villejoubert, G. (2007). Modus Tollens, Modus Shmollens: Contrapositive reasoning and the pragmatics of negation. *Thinking & reasoning*, *13*(2), 207-222. doi: 10.1080/13546780601069488
- Braver, T. S., Krug, M. K., Chiew, K. S., Kool, W., Westbrook, J. A., Clement, N. J., Adcock, R. A., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Carver, C. S., Cools, R., Custers, R., Dickinson, A., Sweck, C. S., Fishbach, A., Gollwitzer, P. M., Hess, T. M., Isaacowitz, D. M., Mather, M., Murayama, K., Pessoa, L., Samanez-Larkin, G. R., & Somerville, L. H. (2014). Mechanisms

- of motivation–cognition interaction: challenges and opportunities. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 14(2), 443-472. doi: 10.3758/s13415-014-0300-0
- Brinch, C. N., & Galloway, T. A. (2012). Schooling in adolescence raises IQ scores. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(2), 425-430. doi: 10.1073/pnas.1106077109
- Brockmole, J. R., Davoli, C. C., Abrams, R. A., & Witt, J. K. (2013). The world within reach: Effects of hand posture and tool use on visual cognition. *Current Directions in Psychological Science*, 22(1), 38-44. doi: 10.1177/0963721412465065
- Brown, G. R., & Richerson, P. J. (2014). Applying evolutionary theory to human behaviour: Past differences and current debates. *Journal of Bioeconomics*, 16(2), 105-128. doi: 10.1007/s10818-013-9166-4
- Brunken, R., Plass, J. L., & Leutner, D. (2003). Direct measurement of cognitive load in multimedia learning. *Educational psychologist*, 38(1), 53-61. doi: 10.1207/S15326985EP3801_7
- Bucciarelli, M., & Johnson-Laird, P. N. (1999). Strategies in syllogistic reasoning. *Cognitive Science*, 23(3), 247-303. doi: 10.1016/S0364-0213(99)00008-7
- Bucciarelli, M., Mackiewicz, R., Khemlani, S. S., & Johnson-Laird, P. N. (2016). Children's creation of algorithms: simulations and gestures. *Journal of Cognitive Psychology*, 28(3), 297-318. doi: 10.1080/20445911.2015.1134541
- Bugental, D. B. (2000). Acquisition of the algorithms of social life: A domain-based approach. *Psychological bulletin*, 126(2), 187-219. doi: 10.1037/0033-2909.126.2.187
- Bushnell, I. W. R. (2001). Mother's face recognition in newborn infants: Learning and memory. *Infant and Child Development*, 10(1-2), 67-74. doi: 10.1002/icd.248
- Buss, D. M. (Ed.). (2005). *The handbook of evolutionary psychology*. USA: John Wiley & Sons.
- Butterfield, B., & Metcalfe, J. (2001). Errors committed with high confidence are hypercorrected. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27(6), 1491-1494. doi: 10.1037/0278-7393.27.6.1491
- Byrne, R. M. (2016). Counterfactual thought. *Annual review of psychology*, 67, 135-157. doi: 10.1146/annurev-psych-122414-033249
- Byrne, P., Becker, S., & Burgess, N. (2007). Remembering the past and imagining the future: a neural model of spatial memory and imagery. *Psychological review*, 114(2), 340-375. doi: 10.1037/0033-295X.114.2.340

- Carroll, L. (1966). *Logique sans peine*. Paris: Hermann.
- Carroll, L. (1974). *Une histoire embrouillée*. Paris: Béliabaste.
- Carroll, L. (1887). *The Game of Logic*. Consultation en ligne le 30/07/2017 [http://pdfbooks.co.za/library/LEWIS_CARROLL-THE_GAME_OF_LOGIC.pdf].
- Castro-Alonso, J. C., Ayres, P., & Paas, F. (2015). Animations showing Lego manipulative tasks: Three potential moderators of effectiveness. *Computers & Education*, 85, 1-13. doi: 10.1016/j.compedu.2014.12.022
- Cattell, R. B. (1971). *Abilities: their structure, growth, and action*. Oxford: Houghton Mifflin.
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive. Théorie et applications*. Paris : Armand Colin.
- Chen, Z. (2007). Learning to map: strategy discovery and strategy change in young children. *Developmental psychology*, 43(2), 386-403. doi: 10.1037/0012-1649.43.2.386
- Chen, O., Kalyuga, S., & Sweller, J. (2016). Relations between the worked example and generation effects on immediate and delayed tests. *Learning and Instruction*, 45, 20-30. doi: 10.1016/j.learninstruc.2016.06.007
- Chevalier, A., & Chevalier, N. (2009). Influence of proficiency level and constraints on viewpoint switching: A study in web design. *Applied Cognitive Psychology*, 23(1), 126-137. doi: 10.1002/acp.1448
- Chi, M. T., & Wylie, R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219-243. doi: 10.1080/00461520.2014.965823
- Chinn, C., & Duncan, R. G. (2017, August-September). What is the Value of General Knowledge of Scientific Reasoning? *17th Biennial conference of the European Association for Research on Learning and Instruction (EARLI)*, Tampere, Finland.
- Choi, H. H., Van Merriënboer, J. J., & Paas, F. (2014). Effects of the physical environment on cognitive load and learning: towards a new model of cognitive load. *Educational Psychology Review*, 26(2), 225-244. doi: 10.1007/s10648-014-9262-6
- Chu, F. W., vanMarle, K., & Geary, D. C. (2015). Early numerical foundations of young children's mathematical development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 132, 205-212. doi: 10.1016/j.jecp.2015.01.006

- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of physics*, 50(1), 66-71. doi: 10.1119/1.12989
- Cohen, L. J. (1981). Can human irrationality be experimentally demonstrated?. *Behavioral and Brain Sciences*, 4(03), 317-331. doi: 10.1017/S0140525X00009092
- Cohen, M. R., & Nagel, E. (1934). *An introduction to logic and scientific method*. Dématérialisé: Hughes Press.
- Cosmides, L., Barrett, H. C., & Tooby, J. (2010). Adaptive specializations, social exchange, and the evolution of human intelligence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 9007-9014. doi: 10.1073/pnas.0914623107
- Cosmides, L., & Tooby, J. (1992). Cognitive adaptations for social exchange. In Barkow; J. H., Cosmides, L., & Tooby, J. (Eds), *The adapted mind*, (pp.163-228). Oxford: Oxford University Press.
- Cosmides, L., & Tooby, J. (2004). Knowing thyself: The evolutionary psychology of moral reasoning and moral sentiments. *The Ruffin Series of the Society for Business Ethics*, 4, 93-128. doi: 10.5840/ruffinx200447
- Cosnefroy, O., Nurra, C., & Dessus, P. (2016). Analyse dynamique de la motivation des élèves en début de scolarité obligatoire en fonction de la nature de leurs interactions avec l'enseignant. *Éducation et formations*, 90, 29-51. doi: hal-01306393
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: a reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 87-114. doi: 10.1017/S0140525X01003922
- Cowan, N. (2010). The magical mystery four: How is working memory capacity limited, and why? *Current directions in psychological science*, 19(1), 51-57. doi: 10.1177/0963721409359277
- Cross, E. S., Hamilton, A. F. D. C., & Grafton, S. T. (2006). Building a motor simulation de novo: observation of dance by dancers. *Neuroimage*, 31(3), 1257-1267. doi: 10.1016/j.neuroimage.2006.01.033
- Csibra, G., & Gergely, G. (2011). Natural pedagogy as evolutionary adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1567), 1149-1157. doi: 10.1098/rstb.2010.0319

- Cummins, D. D. (1996). Evidence of deontic reasoning in 3-and 4-year-old children. *Memory & Cognition*, *24*(6), 823-829. doi: 10.3758/BF03201105
- Danchin, E., Giraldeau, L. A., Valone, T. J., & Wagner, R. H. (2004). Public information: from nosy neighbors to cultural evolution. *Science*, *305*(5683), 487-491. doi: 10.1126/science.1098254
- Darnon, B., & Butera, F. (2005). Buts d'accomplissement, stratégies d'étude, et motivation intrinsèque: présentation d'un domaine de recherche et validation française de l'échelle d'Elliot et McGregor (2001). *L'année psychologique*, *105*(1), 105-131.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. New York: D. Appleton and Company. Consultation en ligne le 16/05/2017 [http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1861_OriginNY_F382.pdf].
- Davis, H., & Pérusse, R. (1988). Numerical competence in animals: Definitional issues, current evidence, and a new research agenda. *Behavioral and Brain Sciences*, *11*(04), 561-579. doi: 10.1017/S0140525X00053437
- De Bock, D., Deprez, J., Van Dooren, W., Roelens, M., & Verschaffel, L. (2011). Abstract or concrete examples in learning mathematics? A replication and elaboration of Kaminski, Sloutsky, and Heckler's study. *Journal for research in Mathematics Education*, *42*(2), 109-126.
- Deci, E. L. (1971). Effects of externally mediated rewards of intrinsic motivation. *Journal of Personality and Social Psychology*, *18*(1), 105-115.
- De Haan, M., Pascalis, O., & Johnson, M. H. (2002). Specialization of neural mechanisms underlying face recognition in human infants. *Journal of cognitive neuroscience*, *14*(2), 199-209. doi: 10.1162/089892902317236849
- de Jong T. (2006). Computer simulations: Technological advances in inquiry learning. *Science*, *312*, 532-533. doi: 10.1126/science.1127750
- de Jong, T., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science*, *340*(6130), 305-308. doi: 10.1126/science.1230579
- De Neys, W. (2006). Dual processing in reasoning: Two systems but one reasoner. *Psychological science*, *17*(5), 428-433. doi: 10.1111/j.1467-9280.2006.01723.x

- De Neys, W. (2012). Bias and conflict: A case for logical intuitions. *Perspectives on Psychological Science*, 7(1), 28-38. doi: 10.1177/1745691611429354
- De Neys, W. (2014). Conflict detection, dual processes, and logical intuitions: Some clarifications. *Thinking & Reasoning*, 20(2), 169-187. doi: 10.1080/13546783.2013.854725
- De Neys, W., & Bonnefon, J. F. (2013). The ‘whys’ and ‘whens’ of individual differences in thinking biases. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(4), 172-178. doi: 10.1016/j.tics.2013.02.001
- De Neys, W., Cromheeke, S., & Osman, M. (2011). Biased but in doubt: Conflict and decision confidence. *PloS one*, 6(1). doi: 10.1371/journal.pone.0015954
- De Neys, W., & Everaerts, D. (2008). Developmental trends in everyday conditional reasoning: The retrieval and inhibition interplay. *Journal of Experimental Child Psychology*, 100(4), 252-263. doi: 10.1016/j.jecp.2008.03.003
- De Neys, W., & Feremans, V. (2013). Development of heuristic bias detection in elementary school. *Developmental Psychology*, 49(2), 258. doi: 10.1037/a0028320
- De Neys, W., & Franssens, S. (2009). Belief inhibition during thinking: Not always winning but at least taking part. *Cognition*, 113(1), 45-61. doi: 10.1016/j.cognition.2009.07.009
- De Neys, W., & Glumicic, T. (2008). Conflict monitoring in dual process theories of thinking. *Cognition*, 106(3), 1248-1299. doi: 10.1016/j.cognition.2007.06.002
- De Neys, W., Moyens, E., & Vansteenwegen, D. (2010). Feeling we’re biased: Autonomic arousal and reasoning conflict. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 10(2), 208-216. doi: 10.3758/CABN.10.2.208
- De Neys, W., Schaeken, W., & d'Ydewalle, G. (2003). Causal conditional reasoning and strength of association: The disabling condition case. *European Journal of Cognitive Psychology*, 15(2), 161-176. doi: 10.1080/09541440244000058
- De Neys, W., Schaeken, W., & d'Ydewalle, G. (2005). Working memory and everyday conditional reasoning: Retrieval and inhibition of stored counterexamples. *Thinking & Reasoning*, 11(4), 349-381. do : 10.1080/13546780442000222
- De Neys, W., & Vanderputte, K. (2011). When less is not always more: stereotype knowledge and reasoning development. *Developmental psychology*, 47(2), 432-441. doi: 10.1037/a0021313

- De Neys, W., & Van Gelder, E. (2009). Logic and belief across the lifespan: the rise and fall of belief inhibition during syllogistic reasoning. *Developmental science*, *12*(1), 123-130. doi: 10.1111/j.1467-7687.2008.00746.x
- De Neys, W., Vartanian, O., & Goel, V. (2008). Smarter than we think: When our brains detect that we are biased. *Psychological Science*, *19*(5), 483-489. doi: 10.1111/j.1467-9280.2008.02113.x
- Dessus, P., Tanguy, F., & Tricot, A. (2015). Natural cognitive foundations of teacher knowledge: An evolutionary and cognitive load account. In Grangeat, M. (Ed.), *Understanding science teacher professional knowledge growth*, (pp. 177–192). Rotterdam: Sense Publishers.
- Dickstein, L. S. (1978). The effect of figure on syllogistic reasoning. *Memory & Cognition*, *6*(1), 76-83. doi: 10.3758/BF03197431
- Dominowski, R. L. (1995). Content effects in Wason's selection task. In Newstead, S. E., & Evans, J. S. B. T. (Eds), *Perspectives on thinking and reasoning: Essays in honour of Peter Wason*, (pp.41-65). Hove/Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Duckworth, A. L., & Seligman, M. E. (2005). Self-discipline outdoes IQ in predicting academic performance of adolescents. *Psychological science*, *16*(12), 939-944. doi: 10.1111/j.1467-9280.2005.01641.x
- Dunbar, K., Fugelsang, J., & Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? In Lovett, M., & Shah, P. (Eds.), *Thinking with Data: 33rd Carnegie Symposium on Cognition* (pp. 193–205). Mahwah: Erlbaum.
- Dweck, C. S. (1999). *Self-theories: Their role in motivation, personality, and development*. Philadelphia: Psychology Press.
- Eliades, M., Mansell, W., Stewart, A. J., & Blanchette, I. (2012). An investigation of belief-bias and logicity in reasoning with emotional contents. *Thinking & Reasoning*, *18*(4), 461-479. doi: 10.1080/13546783.2012.713317
- Elliot, A. J., & McGregor, H. A. (2001). A 2× 2 achievement goal framework. *Journal of personality and social psychology*, *80*(3), 501-519. doi: 10.1037/0022-3514.80.3.501
- Elliot, A. J., & Murayama, K. (2008). On the measurement of achievement goals: Critique, illustration, and application. *Journal of Educational Psychology*, *100*(3), 613-628. doi: 10.1037/0022-0663.100.3.613

- Ellis, G. F. (2008). Commentary on “An evolutionarily informed education science” by David C. Geary. *Educational Psychologist*, 43(4), 206-213. doi: 10.1080/00461520802392216
- Engelmann, K., Neuhaus, B.J., & Fischer, F. (2016). Fostering scientific reasoning in education - meta-analytic evidence from intervention studies. *Educational Research and Evaluation*, 55 (5-6), 333-349. doi: 10.1080/13803611.2016.1240089
- Ericsson, K. A., & Charness, N. (1994). Expert performance: Its structure and acquisition. *American psychologist*, 49(8), 725-747. doi: 10.1037/0003-066X.49.8.725
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological review*, 102(2), 211-245. doi: 10.1037/0033-295X.102.2.211
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3), 363-406. doi: 10.1037/0033-295X.100.3.363
- Evans, J. S. B. T. (1989). *Bias in Human Reasoning : Causes and Consequences*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Evans, J. S. B. (2002). Logic and human reasoning: an assessment of the deduction paradigm. *Psychological bulletin*, 128(6), 978-996. doi: 10.1037/0033-2909.128.6.978
- Evans, J. S. B. (2003). In two minds: dual-process accounts of reasoning. *Trends in cognitive sciences*, 7(10), 454-459. doi: 10.1016/j.tics.2003.08.012
- Evans, J. S. B. T. (2005). Deductive reasoning. In Holyoak, K. J., & Morrison, R. G. (Eds.), *The Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning* (pp.169-184). New York: Cambridge University Press.
- Evans, J. S. B. (2007). *Hypothetical thinking: dual processes in reasoning and judgement*. Hove: Psychology Press.
- Evans, J. S. B. (2008). Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition. *Annu. Rev. Psychol.*, 59, 255-278. doi: 10.1146/annurev.psych.59.103006.093629
- Evans, J. S. B. (2011). Dual-process theories of reasoning: Contemporary issues and developmental applications. *Developmental Review*, 31(2), 86-102. doi: 10.1016/j.dr.2011.07.007
- Evans, J. S. B. (2016). Reasoning, biases and dual processes: The lasting impact of Wason (1960). *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(10), 2076-2092. doi: 10.1080/17470218.2014.914547

- Evans, J. S. B., Barston, J. L., & Pollard, P. (1983). On the conflict between logic and belief in syllogistic reasoning. *Memory & cognition*, *11*(3), 295-306. doi: 10.3758/BF03196976
- Evans, J. S. B., & Curtis-Holmes, J. (2005). Rapid responding increases belief bias: Evidence for the dual-process theory of reasoning. *Thinking & Reasoning*, *11*(4), 382-389. doi: 10.1080/13546780542000005
- Evans, J. S. B., Handley, S. J., & Bacon, A. M. (2009). Reasoning under time pressure: A study of causal conditional inference. *Experimental Psychology*, *56*(2), 77-83. doi: 10.1027/1618-3169.56.2.77
- Evans, J. S. B., Handley, S. J., Neilens, H., & Over, D. E. (2007). Thinking about conditionals: A study of individual differences. *Memory & Cognition*, *35*(7), 1772-1784. doi: 10.3758/BF03193509
- Evans, J. S. B., Handley, S. J., Neilens, H., & Over, D. (2010). The influence of cognitive ability and instructional set on causal conditional inference. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*(5), 892-909. doi: 10.1080/17470210903111821
- Evans, J. S. B., Newstead, S. E., & Byrne, R. M. (1993). *Human reasoning: The psychology of deduction*. Psychology Press.
- Evans, J. S. B., & Stanovich, K. E. (2013). Dual-process theories of higher cognition: Advancing the debate. *Perspectives on psychological science*, *8*(3), 223-241. doi: 10.1177/1745691612460685
- Fantz, R. L. (1961). The origin of form perception. *Scientific American*, *204*, 66-72. doi: 10.1038/scientificamerican0561-66
- Faucher, L. (2007). Les émotions morales à la lumière de la psychologie évolutionniste: le dégoût et l'évitement de l'inceste. *Les cahiers du LANCI*, n°2007-1. Consultation en ligne le 06/10/2012 [<http://www.er.uqam.ca/nobel/philuqam/dev/documents/cahiers/2007-01.pdf>].
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in cognitive sciences*, *8*(7), 307-314. doi: 10.1016/j.tics.2004.05.002
- Fiddick, L., Cosmides, L., & Tooby, J. (2000). No interpretation without representation: The role of domain-specific representations and inferences in the Wason selection task. *Cognition*, *77*(1), 1-79. doi: 10.1016/S0010-0277(00)00085-8

- Fischer, F., Hetmanek, A., Engelmann, K., & Opitz, A. (2017, August-September). Scientific Reasoning and Argumentation as Cross-Domain Competence. *17th Biennial conference of the European Association for Research on Learning and Instruction (EARLI)*, Tampere, Finland.
- Fisher, S. E., & Ridley, M. (2013). Culture, genes, and the human revolution. *Science*, *340*(6135), 929-930. doi: 10.1126/science.1236171
- Fiske, S. T. (2002). What we know now about bias and intergroup conflict, the problem of the century. *Current Directions in Psychological Science*, *11*(4), 123-128. doi: 10.1111/1467-8721.00183
- Flinn, M. V., Geary, D. C., & Ward, C. V. (2005). Ecological dominance, social competition, and coalitionary arms races: Why humans evolved extraordinary intelligence. *Evolution and Human Behavior*, *26*(1), 10-46. doi: 10.1016/j.evolhumbehav.2004.08.005
- Fodor, J. (2003). *L'esprit, ça ne marche pas comme ça*. Paris : Odile Jacob.
- Fogarty, L., Strimling, P., & Laland, K. N. (2011). The evolution of teaching. *Evolution*, *65*(10), 2760-2770. doi: 10.1111/j.1558-5646.2011.01370.x
- Franssens, S., & De Neys, W. (2009). The effortless nature of conflict detection during thinking. *Thinking & Reasoning*, *15*(2), 105-128. doi: 10.1080/13546780802711185
- Fyfe, E. R., & Rittle-Johnson, B. (2017) Mathematics practice without feedback: A desirable difficulty in a classroom setting. *Instructional Science*, 1-18. doi: 10.1007/s11251-016-9401-1
- Garland, T. B., & Sanchez, C. A. (2013). Rotational perspective and learning procedural tasks from dynamic media. *Computers & Education*, *69*, 31-37. doi: 10.1016/j.compedu.2013.06.014
- Geary, D. C. (1995). Reflections of evolution and culture in children's cognition: Implications for mathematical development and instruction. *American Psychologist*, *50*(1), 24-37. doi: 10.1037/0003-066X.50.1.24
- Geary, D. C. (2005). Evolution and cognitive development. In Burges, R. L., & MacDonald, K. (Eds.), *Evolutionary perspectives on human development* (pp.99-133). SAGE Publications. doi: 10.4135/9781452233574.n4
- Geary, D. C. (2007). Educating the evolved mind: Conceptual foundations for an evolutionary educational psychology. In Carlson, J. S., & Levin, J. R. (Eds.), *Educating the evolved mind: Conceptual foundations for an evolutionary educational psychology* (pp. 1–99). Greenwich: Information Age.

- Geary, D. C. (2008). An evolutionarily informed education science. *Educational Psychologist*, 43(4), 179-195. doi: 10.1080/00461520802392133
- Geary, D. C. (2013). Early foundations for mathematics learning and their relations to learning disabilities. *Current directions in psychological science*, 22(1), 23-27. doi: 10.1177/0963721412469398
- Geary, D. C., & Berch, D. (2015). Evolutionary approaches to understanding children's academic achievement. In Scott, R. A., & Kosslyn, S. M. (Eds.), *Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences* (pp.1-10). Hoboken: Wiley. doi: 10.1002/9781118900772.etrds0123
- Geary, D. C., & Berch, D. (2016). Evolution and Children's Cognitive and Academic Development. In Geary, D. C., & Berch, D. (Eds.), *Evolution and Children's Cognitive and Academic Development* (pp.217-249). Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-29986-0_9
- Geary, D. C., & Bjorklund, D. F. (2000). Evolutionary developmental psychology. *Child development*, 71(1), 57-65. doi: 10.1111/1467-8624.00118
- Gelman, R. (1990). First principles organize attention to and learning about relevant data: Number and the animate-inanimate distinction as examples. *Cognitive science*, 14(1), 79-106. doi: 10.1207/s15516709cog1401_5
- Gigerenzer, G., & Brighton, H. (2009). Homo heuristics: Why biased minds make better inferences. *Topics in Cognitive Science*, 1(1), 107-143. doi: 10.1111/j.1756-8765.2008.01006.x
- Gigerenzer, G., & Hug, K. (1992). Domain-specific reasoning: Social contracts, cheating, and perspective change. *Cognition*, 43(2), 127-171. doi: 10.1016/0010-0277(92)90060-U
- Ginns, P. (2005). Meta-analysis of the modality effect. *Learning and Instruction*, 15(4), 313-331. doi: 10.1016/j.learninstruc.2005.07.001
- Ginns, P. (2006). Integrating information: A meta-analysis of the spatial contiguity and temporal contiguity effects. *Learning and Instruction*, 16(6), 511-525. doi: 10.1016/j.learninstruc.2006.10.001
- Glenberg, A. M., Goldberg, A. B., & Zhu, X. (2011). Improving early reading comprehension using embodied CAI. *Instructional Science*, 39(1), 27-39. doi: 10.1007/s11251-009-9096-7

- Goldstone, R. L., & Son, J. Y. (2005). The transfer of scientific principles using concrete and idealized simulations. *The Journal of the Learning Sciences*, *14*(1), 69-110. doi: 10.1207/s15327809jls1401_4
- Gray, P. (2016). Children's Natural Ways of Educating Themselves Still Work: Even for the Three Rs. In Geary, D. C., & Berch, D. (Eds.), *Evolution and Children's Cognitive and Academic Development* (pp.291-306). Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-29986-0_9
- Greene, B. A. (2015). Measuring cognitive engagement with self-report scales: Reflections from over 20 years of research. *Educational Psychologist*, *50*(1), 14-30. doi: 10.1080/00461520.2014.989230
- Grice, H. P. (1989). *Studies in the way of words*. Cambridge: MIT Press.
- Griggs, R. A., & Cox, J. R. (1982). The elusive thematic-materials effect in Wason's selection task. *British Journal of Psychology*, *73*(3), 407-420. doi: 10.1111/j.2044-8295.1982.tb01823.x
- Haidt, J. (2007). The new synthesis in moral psychology. *Science*, *316*(5827), 998-1002. doi: 10.1126/science.1137651
- Haigh, M., & Bonnefon, J. F. (2015). Conditional sentences create a blind spot in theory of mind during narrative comprehension. *Acta psychologica*, *160*, 194-201. doi: 10.1016/j.actpsy.2015.05.009
- Haji, F. A., Rojas, D., Childs, R., Ribaupierre, S., & Dubrowski, A. (2015). Measuring cognitive load: performance, mental effort and simulation task complexity. *Medical education*, *49*(8), 815-827. doi: 10.1111/medu.12773
- Halpern, D. F. (2008). How Much Can Evolutionary Psychology Inform the Educational Sciences?. *Educational Psychologist*, *43*(4), 203-205. doi: 10.1080/00461520802392224
- Hamilton, W. D. (1964). The genetical evolution of social behaviour. II. *Journal of theoretical biology*, *7*(1), 17-52. doi: 10.1016/0022-5193(64)90039-6
- Handley, S. J., Capon, A., Beveridge, M., Dennis, I., & Evans, J. S. B. (2004). : Working memory, inhibitory control and the development of children's reasoning. *Thinking & Reasoning*, *10*(2), 175-195. doi: 10.1080/13546780442000051

- Handley, S. J., Newstead, S. E., & Trippas, D. (2011). Logic, beliefs, and instruction: a test of the default interventionist account of belief bias. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *37*(1), 28-43. doi: 10.1037/a0021098
- Handley, S. J., & Trippas, D. (2015). Chapter Two-Dual processes and the interplay between knowledge and structure: a new parallel processing model. In Ross, B. (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, (pp.33-58). doi: 10.1016/bs.plm.2014.09.002
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of educational research*, *77*(1), 81-112. doi: 10.3102/003465430298487
- Hertwig, R., Benz, B., & Krauss, S. (2008). The conjunction fallacy and the many meanings of and. *Cognition*, *108*(3), 740-753. doi: 10.1016/j.cognition.2008.06.008
- Hewstone, M., Rubin, M., & Willis, H. (2002). Intergroup bias. *Annual review of psychology*, *53*(1), 575-604. doi: 10.1146/annurev.psych.53.100901.135109
- Hickling, A. K., & Gelman, S. A. (1995). How does your garden grow? Early conceptualization of seeds and their place in the plant growth cycle. *Child Development*, *66*(3), 856-876. doi: 10.1111/j.1467-8624.1995.tb00910.x
- Holyoak, K. J., & Cheng, P. W. (1995). Pragmatic reasoning with a point of view. *Thinking & Reasoning*, *1*(4), 289-313. doi: 10.1080/13546789508251504
- Horowitz, D. L. (2001). *The deadly ethnic riot*. Berkeley: University of California Press.
- Huff, S. M., Stripling, C. T., Boyer, C., & Stephens, C. A. (2016). Investigating Factors that Influence Achievement Goal Orientation and Educational Practices in Undergraduate Agricultural Sciences and Natural Resource Students. *NACTA Journal*, *60*(4), 423-431.
- Hummel, J. E., & Holyoak, K. J. (2005). Relational reasoning in a neurally plausible cognitive architecture an overview of the lisa project. *Current Directions in Psychological Science*, *14*(3), 153-157. doi: 10.1111/j.0963-7214.2005.00350.x
- Ichikawa, H., & Yamaguchi, M. K. (2014). Infants' recognition of subtle anger facial expression. *Japanese Psychological Research*, *56*(1), 15-23. doi: 10.1111/jpr.12025
- Inagaki, K., & Hatano, G. (1996). Young children's recognition of commonalities between animals and plants. *Child development*, *67*(6), 2823-2840. doi: 10.1111/j.1467-8624.1996.tb01890.x
- Jeffrey, R. (1981). *Formal logic: Its scope and limits* (4e ed.). Indianapolis/Cambridge : Hackett Publishing Company.

- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Cambridge: Harvard University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (2005). Mental Models and Thought. In Holyoak, K. J., & Morrison R. G. (Eds.), *The Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning* (pp.185-208). New York: Cambridge University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (2006). *How we reason*. Oxford: Oxford University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (2013). Mental models and cognitive change. *Journal of Cognitive Psychology*, 25(2), 131-138. doi: 10.1080/20445911.2012.759935
- Johnson, E. D., Tubau, E., & De Neys, W. (2016). The Doubling System 1: Evidence for automatic substitution sensitivity. *Acta psychologica*, 164, 56-64. doi: 10.1016/j.actpsy.2015.12.008
- Kahneman, D., & Frederick, S. (2005). A model of heuristic judgment. In Holyoak, K. J. & Morrison, R. G. (Eds.), *The Cambridge handbook of thinking and reasoning* (pp.267-293). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kaiser, M. K., McCloskey, M., & Proffitt, D. R. (1986). Development of intuitive theories of motion: Curvilinear motion in the absence of external forces. *Developmental Psychology*, 22(1), 67-71. doi: 10.1037/0012-1649.22.1.67
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational psychologist*, 38(1), 23-31. doi: 10.1207/S15326985EP3801_4
- Kalyuga, S., Chandler, P., Tuovinen, J., & Sweller, J. (2001). When problem solving is superior to studying worked examples. *Journal of educational psychology*, 93(3), 579-588. doi: 10.1037/0022-0663.93.3.579
- Kaminski, J. A., Sloutsky, V. M., & Heckler, A. F. (2006). Do children need concrete instantiations to learn an abstract concept? In Sun, R., & Miyake, N. (Eds), *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 411–416). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Kaminski, J. A., Sloutsky, V. M., & Heckler, A. F. (2008). The advantage of abstract examples in learning math. *Science*, 230, 454–455.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of neuroscience*, 17(11), 4302-4311. doi: 0270-6474/97/174302-10\$05.00/0

- Kaplan, H., Hill, K., Lancaster, J., & Hurtado, A. M. (2000). A theory of human life history evolution: diet, intelligence, and longevity. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 9(4), 156-185. doi: 10.1002/1520-6505(2000)9:4<156::AID-EVAN5>3.0.CO;2-7
- Khemlani, S., & Johnson-Laird, P. N. (2012). Theories of the Syllogism: A Meta-Analysis. *Psychological Bulletin*, 138(3), 427-57. doi: 10.1037/a0026841
- Kim, C., Park, S. W., & Cozart, J. (2014). Affective and motivational factors of learning in online mathematics courses. *British Journal of Educational Technology*, 45(1), 171-185. doi: 10.1111/j.1467-8535.2012.01382.x
- Kirschner, P. A., Ayres, P., & Chandler, P. (2011). Contemporary cognitive load theory research: The good, the bad and the ugly. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 99-105. doi: 10.1016/j.chb.2010.06.025
- Kirschner, F., Paas, F., & Kirschner, P. A. (2011). Task complexity as a driver for collaborative learning efficiency: The collective working-memory effect. *Applied Cognitive Psychology*, 25(4), 615-624. doi: 10.1002/acp.1730
- Kirschner, F., Paas, F., Kirschner, P. A., & Janssen, J. (2011). Differential effects of problem-solving demands on individual and collaborative learning outcomes. *Learning and Instruction*, 21(4), 587-599. doi: 10.1016/j.learninstruc.2011.01.001
- Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational psychologist*, 41(2), 75-86. doi: 10.1207/s15326985ep4102_1
- Klaczynski, P. A. (2001). Analytic and heuristic processing influences on adolescent reasoning and decision-making. *Child development*, 72(3), 844-861. doi: 10.1111/1467-8624.00319
- Klauer, K. C., & Singmann, H. (2013). Does logic feel good? Testing for intuitive detection of logicity in syllogistic reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39(4), 1265-1273. doi: 10.1037/a0030530
- Kornell, N., & Bjork, R. A. (2008). Learning concepts and categories is spacing the “enemy of induction”?. *Psychological science*, 19(6), 585-592. doi: 10.1111/j.1467-9280.2008.02127.x
- Kurzban, R., Tooby, J., & Cosmides, L. (2001). Can race be erased? Coalitional computation and social categorization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(26), 15387-15392. doi: 10.1073/pnas.251541498

- Lancy, D. F. (2016). Teaching: Natural or Cultural? In Geary, D. C., & Berch, D. (Eds.), *Evolution and Children's Cognitive and Academic Development* (pp.33-65). Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-29986-0_2
- Leahy, W., & Sweller, J. (2011). Cognitive load theory, modality of presentation and the transient information effect. *Applied Cognitive Psychology*, 25(6), 943-951. doi: 10.1002/acp.1787
- Leahy, W., & Sweller, J. (2016). Cognitive load theory and the effects of transient information on the modality effect. *Instructional Science*, 44(1), 107-123. doi: 10.1007/s11251-015-9362-9
- Legault, L. (2016). Intrinsic and Extrinsic Motivation. *Encyclopedia of Personality and Individual Differences*, 1-4. doi: 10.1007/978-3-319-28099-8_1139-1
- Leppink, J., Paas, F., Van der Vleuten, C. P., van Gog, T., & Van Merriënboer, J. J. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior research methods*, 45(4), 1058-1072. doi: 10.3758/s13428-013-0334-1
- Leppink, J., van Gog, T., Paas, F., & Sweller, J. (2015). Cognitive load theory: Researching and planning teaching to maximize learning. In Cleland, J., & Durning, S. (Eds.), *Researching medical education* (pp.207-218). Wiley-Blackwell. doi: 10.1002/9781118838983.ch18
- Leslie, A. M., Friedman, O., & German, T. P. (2004). Core mechanisms in 'theory of mind'. *Trends in cognitive sciences*, 8(12), 528-533. doi: 10.1016/j.tics.2004.10.001
- Lockman, J. J. (2000). A perception–action perspective on tool use development. *Child development*, 71(1), 137-144. doi: 10.1111/1467-8624.00127
- Mandelbaum, E. (2013). Numerical architecture. *Topics in cognitive science*, 5(2), 367-386. doi: 10.1111/tops.12014
- Mandler, J. M. (1992). How to build a baby: II. Conceptual primitives. *Psychological review*, 99(4), 587-604. doi: 0033-295X/92/S3.00
- Manktelow, K. I., & Evans, J. S. B. T. (1979). Facilitation of reasoning by realism: Effect or non-effect? *British Journal of Psychology*, 70(4), 477-488.
- Manktelow, K. I., & Over, D. E. (1991). Social roles and utilities in reasoning with deontic conditionals. *Cognition*, 39(2), 85-105. doi: 10.1016/0010-0277(91)90039-7
- Markovits, H., & Barrouillet, P. (2002). The development of conditional reasoning: A mental model account. *Developmental Review*, 22(1), 5-36. doi: 10.1006/drev.2000.0533

- Markovits, H., & Lortie-Forgues, H. (2011). Conditional reasoning with false premises facilitates the transition between familiar and abstract reasoning. *Child Development*, 82(2), 646-660. doi: 10.1111/j.1467-8624.2010.01526.x
- Mavilidi, M. F., Okely, A. D., Chandler, P., Cliff, D. P., & Paas, F. (2015). Effects of integrated physical exercises and gestures on preschool children's foreign language vocabulary learning. *Educational Psychology Review*, 27(3), 413-426. doi: 10.1007/s10648-015-9337-z
- Mayer, R. E. (2011). *Applying the science of learning*. Boston: Pearson/Allyn & Bacon.
- Mayer, R. E., & DaPra, C. S. (2012). An embodiment effect in computer-based learning with animated pedagogical agents. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 18(3), 239-252. doi: 10.1037/a0028616
- McKinnon, M. C., & Moscovitch, M. (2007). Domain-general contributions to social reasoning: Theory of mind and deontic reasoning re-explored. *Cognition*, 102(2), 179-218. doi: 10.1016/j.cognition.2005.12.011
- McNeil, N. M., & Fyfe, E. R. (2012). "Concreteness fading" promotes transfer of mathematical knowledge. *Learning and Instruction*, 22(6), 440-448. doi: 10.1016/j.learninstruc.2012.05.001
- Medin, D. L., & Atran, S. (2004). The native mind: biological categorization and reasoning in development and across cultures. *Psychological review*, 111(4), 960-983. doi: 10.1037/0033-295X.111.4.960
- Mesoudi, A., Whiten, A., & Laland, K. N. (2004). Perspective: Is human cultural evolution Darwinian? Evidence reviewed from the perspective of The Origin of Species. *Evolution*, 58(1), 1-11. doi: 10.1554/03-212
- Metcalf, J., & Finn, B. (2012). Hypercorrection of high confidence errors in children. *Learning and Instruction*, 22(4), 253-261. doi: 10.1016/j.learninstruc.2011.10.004
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2), 81-97. doi: 10.1037/h0043158
- Miravete, S., Tricot, A., Kalyuga, S., & Amadiou, F. (2017). Configured-groups hypothesis: fast comparison of exact large quantities without counting. *Cognitive Processing*, 1-13. doi: 10.1007/s10339-017-0826-5
- Miyake, A., Friedman, N. P., Rettinger, D. A., Shah, P., & Hegarty, M. (2001). How are visuospatial working memory, executive functioning, and spatial abilities related? A latent-

- variable analysis. *Journal of experimental psychology: General*, 130(4), 621-640. doi: 10.1037/0096-3445.130.4.621
- Moreno, R., & Mayer, R. E. (2004). Personalized messages that promote science learning in virtual environments. *Journal of Educational Psychology*, 96(1), 165-173. doi: 10.1037/0022-0663.96.1.165
- Morsanyi, K., Devine, A., Nobes, A., & Szűcs, D. (2013). The link between logic, mathematics and imagination: Evidence from children with developmental dyscalculia and mathematically gifted children. *Developmental science*, 16(4), 542-553. doi: 10.1111/desc.12048
- Morsanyi, K., & Handley, S. J. (2008). How smart do you need to be to get it wrong? The role of cognitive capacity in the development of heuristic-based judgment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99(1), 18-36. doi: 10.1016/j.jecp.2007.08.003
- Morsanyi, K., & Handley, S. J. (2012). Logic feels so good—I like it! Evidence for intuitive detection of logicity in syllogistic reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 38(3), 596-616. doi: 10.1037/a0026099
- Morton, J., & Johnson, M. H. (1991). CONSPEC and CONLERN: a two-process theory of infant face recognition. *Psychological review*, 98(2), 164-181. doi: 10.1037/0033-295X.98.2.164
- Nakamura, H., & Kawaguchi, J. (2016). People Like Logical Truth: Testing the Intuitive Detection of Logical Value in Basic Propositions. *PloS one*, 11(12). doi: 10.1371/journal.pone.0169166
- Nelson, C. A., & de Haan, M. (1997). A neurobehavioral approach to the recognition of facial expressions in infancy. In J. A. Russell & J. M. Fernandez-Dols (Eds.), *The psychology of facial expression* (pp. 176–226). New York: Cambridge University Press.
- Newstead, S. E., Handley, S. J., Harley, C., Wright, H., & Farrelly, D. (2004). Individual differences in deductive reasoning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 57(1), 33-60. doi: 10.1080/02724980343000116
- Nokes-Malach, T. J., Richey, J. E., & Gadgil, S. (2015). When is it better to learn together? Insights from research on collaborative learning. *Educational Psychology Review*, 27(4), 645-656. doi: 10.1007/s10648-015-9312-8
- Novack, M. A., Congdon, E. L., Hemani-Lopez, N., & Goldin-Meadow, S. (2014). From action to abstraction: Using the hands to learn math. *Psychological Science*, 25(4), 903-910. doi: 10.1177/0956797613518351

- Noveck, I. A. (2001). When children are more logical than adults: Experimental investigations of scalar implicature. *Cognition*, 78(2), 165-188. doi: 10.1016/S0010-0277(00)00114-1
- Oakhill, J., Johnson-Laird, P. N., & Garnham, A. (1989). Believability and syllogistic reasoning. *Cognition*, 31(2), 117-140.
- Owens, P., & Sweller, J. (2008). Cognitive load theory and music instruction. *Educational Psychology*, 28(1), 29-45. doi: 10.1080/01443410701369146
- Paas, F., & Ayres, P. (2014). Cognitive load theory: A broader view on the role of memory in learning and education. *Educational Psychology Review*, 26(2), 191-195. doi: 10.1007/s10648-014-9263-5
- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. *Educational psychologist*, 38(1), 1-4. doi: 10.1207/S15326985EP3801_1
- Paas, F., & Sweller, J. (2012). An evolutionary upgrade of cognitive load theory: Using the human motor system and collaboration to support the learning of complex cognitive tasks. *Educational Psychology Review*, 24(1), 27-45. doi: 10.1007/s10648-011-9179-2
- Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & Van Gerven, P. W. (2003). Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational psychologist*, 38(1), 63-71. doi: 10.1207/S15326985EP3801_8
- Paas, F. G., & Van Merriënboer, J. J. (1994). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach. *Journal of educational psychology*, 86(1), 122-133. doi: 10.1037/0022-0663.86.1.122
- Paas, F. G., Van Merriënboer, J. J., & Adam, J. J. (1994). Measurement of cognitive load in instructional research. *Perceptual and motor skills*, 79(1), 419-430. doi: 10.2466/pms.1994.79.1.419
- Park, J. H., & Ackerman, J. M. (2010). Chapter 19: Passion and compassion: psychology of kin relations within and beyond the family. In Salmon, C., & Shackelford, T. K. (2011), *The Oxford handbook of evolutionary family* (pp.329-344). USA: Oxford University Press. Consultation en ligne le 15/11/2012 [<http://jhpark.psy.bris.ac.uk/ParkAckerman2011.pdf>].
- Pascalis, O., de Schonen, S., Morton, J., Deruelle, C., & Fabre-Grenet, M. (1995). Mother's face recognition by neonates: A replication and an extension. *Infant Behavior and Development*, 18(1), 79-85. doi: 10.1016/0163-6383(95)90009-8

- Pellegrini, A. D. (2016). Object use in childhood: Development and possible functions. In Geary, D. C., & Berch, D. (Eds.), *Evolution and Children's Cognitive and Academic Development* (pp.33-65). Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-29986-0_4
- Pennycook, G., Fugelsang, J. A., & Koehler, D. J. (2015). What makes us think? A three-stage dual-process model of analytic engagement. *Cognitive Psychology*, 80, 34-72. doi: 10.1016/j.cogpsych.2015.05.001
- Peterson, L., & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of experimental psychology*, 58(3), 193-198. doi: 10.1037/h0049234
- Ping, R., & Goldin-Meadow, S. (2010). Gesturing saves cognitive resources when talking about nonpresent objects. *Cognitive Science*, 34(4), 602-619. doi: 10.1111/j.1551-6709.2010.01102.x
- Politzer, G. (2007). The psychological reality of classical quantifier entailment properties. *Journal of Semantics*, 24(4), 331-343. doi: 10.1093/jos/ffm012
- Pollard, P., & Evans, J. S. B. (1987). Content and context effects in reasoning. *The American journal of psychology*, 100(1), 41-60.
- Potts, R., & Shanks, D. R. (2014). The benefit of generating errors during learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143(2), 644-667. doi: 10.1037/a0033194
- Press, C., Bird, G., Flach, R., & Heyes, C. (2005). Robotic movement elicits automatic imitation. *Cognitive Brain Research*, 25(3), 632-640. doi: 10.1016/j.cogbrainres.2005.08.020
- Reeves, B., & Nass, C. (1996). *The media equation*. New York: Cambridge University Press.
- Retnowati, E., Ayres, P., & Sweller, J. (2010). Worked example effects in individual and group work settings. *Educational Psychology*, 30(3), 349-367. doi: 10.1080/01443411003659960
- Revlis, R. (1975). Two models of syllogistic reasoning: Feature selection and conversion. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14(2), 180-195. doi: 10.1016/S0022-5371(75)80064-8
- Richardson, R.C., (2007). *Evolutionary psychology as maladapted psychology*. Cambridge: MIT Press.
- Richerson, P. J., & Boyd, R. (2005). *Not by genes alone: How culture transformed human evolution*. Chicago: University of Chicago Press.

- Rips, L. J. (1994). *The psychology of proof: Deductive reasoning in human thinking*. Cambridge: MIT Press
- Ritchie, S. J., Bates, T. C., & Deary, I. J. (2015). Is education associated with improvements in general cognitive ability, or in specific skills? *Developmental psychology*, *51*(5), 573-582. doi: 10.1037/a0038981
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annu. Rev. Neurosci.*, *27*, 169-192. doi: 10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230
- Roberts, M. J., Newstead, S. E., & Griggs, R. A. (2001). Quantifier interpretation and syllogistic reasoning. *Thinking & Reasoning*, *7*(2), 173-204. doi: 10.1080/13546780143000008
- Roediger III, H. L., & Karpicke, J. D. (2006). The power of testing memory: Basic research and implications for educational practice. *Perspectives on Psychological Science*, *1*(3), 181-210. doi: 10.1111/j.1745-6916.2006.00012.x
- Rohrer, D., Dedrick, R. F., & Stershic, S. (2015). Interleaved practice improves mathematics learning. *Journal of Educational Psychology*, *107*(3), 900-908. doi: 10.1037/edu0000001
- Roszkowski, M. J., & Soven, M. (2010). Did you learn something useful today? An analysis of how perceived utility relates to perceived learning and their predictiveness of satisfaction with training. *Performance Improvement Quarterly*, *23*(2), 71-91. doi: 10.1002/piq.20082
- Rueschemeyer, S. A., Lindemann, O., Van Elk, M., & Bekkering, H. (2009). Embodied cognition: the interplay between automatic resonance and selection-for-action mechanisms. *European Journal of Social Psychology*, *39*(7), 1180-1187. doi: 10.1002/ejsp.662
- Ryan, R. M. (1982). Control and information in the intrapersonal sphere: An extension of cognitive evaluation theory. *Journal of Personality and Social Psychology*, *43*, 450-461. doi: 0022-3514/82/4303-0450\$00.75
- Ryan, R., & Deci, E. (2000). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, *25*(1), 54-67.
- Schmidt, J. R., & Thompson, V. A. (2008). "At least one" problem with "some" formal reasoning paradigms. *Memory & cognition*, *36*(1), 217-229. doi: 10.3758/MC.36.1.217
- Scholl, B. J., & Leslie, A. M. (1999). Modularity, development and 'theory of mind'. *Mind & Language*, *14*(1), 131-153. doi: 10.1111/1468-0017.00106

- Schroyens, W. J., Schaeken, W., & d'Ydewalle, G. (2001). The processing of negations in conditional reasoning: A meta-analytic case study in mental model and/or mental logic theory. *Thinking & reasoning*, 7(2), 121-172. doi: 10.1080/13546780042000091
- Schweppe, J., & Rummer, R. (2016). Integrating written text and graphics as a desirable difficulty in long-term multimedia learning. *Computers in Human Behavior*, 60, 131-137. doi: 10.1016/j.chb.2016.02.035
- Schyns, P. G., Bonnar, L., & Gosselin, F. (2002). Show me the features! Understanding recognition from the use of visual information. *Psychological science*, 13(5), 402-409. doi: 10.1111/1467-9280.00472
- Shepard, R. N. (1994). Perceptual-cognitive universals as reflections of the world. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1(1), 2-28. doi: 10.3758/BF03200759
- Shimada, S., & Oki, K. (2012). Modulation of motor area activity during observation of unnatural body movements. *Brain and cognition*, 80(1), 1-6. doi: 10.1016/j.bandc.2012.04.006
- Shute, V. J. (2008). Focus on formative feedback. *Review of educational research*, 78(1), 153-189. doi: 10.3102/0034654307313795
- Shynkaruk, J. M., & Thompson, V. A. (2006). Confidence and accuracy in deductive reasoning. *Memory & Cognition*, 34(3), 619-632. doi: 10.3758/BF03193584
- Sinatra, G. M., Heddy, B. C., & Lombardi, D. (2015). The challenges of defining and measuring student engagement in science. *Educational Psychologist*, 50(1), 1-13. doi: 10.1080/00461520.2014.1002924
- Soderstrom, N. C., & Bjork, R. A. (2015). Learning versus performance: An integrative review. *Perspectives on Psychological Science*, 10(2), 176-199. doi: 10.1177/1745691615569000
- Somel, M., Liu, X., & Khaitovich, P. (2013). Human brain evolution: transcripts, metabolites and their regulators. *Nature Reviews Neuroscience*, 14(2), 112-127. doi: 10.1038/nrn3372
- Spelke, E. S., & Kinzler, K. D. (2007). Core knowledge. *Developmental science*, 10(1), 89-96. doi: 10.1111/j.1467-7687.2007.00569.x
- Stanovich, K. E. (1999). *Who is rational? Studies of individual differences in reasoning*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Stanovich, K. E., & West, R. F. (2000). Individual differences in reasoning: Implications for the rationality debate? *Behavioral and brain sciences*, 23(05), 701-717.

- Stanovich, K. E., & West, R. F. (2003). Evolutionary versus instrumental goals: How evolutionary psychology misconceives human rationality. In Over, D. E. (Ed.), *Evolution and the psychology of thinking: The debate* (pp.171-230). Hove and New York: Psychology Press.
- Stanovich, K. E., & West, R. F. (2008). On the relative independence of thinking biases and cognitive ability. *Journal of Personality and Social Psychology*, 94, 672–695. doi: 10.1037/0022-3514.94.4.672
- Stanovich, K. E., West, R. F., & Toplak, M. E. (2011). The complexity of developmental predictions from dual process models. *Developmental Review*, 31(2), 103-118. doi: 10.1016/j.dr.2011.07.003
- Steen, S., & De Neys, W. (2012). Belief inhibition in children's reasoning: Memory-based evidence. *Journal of experimental child psychology*, 112(2), 231-242. doi: 10.1016/j.jecp.2012.01.006
- Stuppel, E. J., & Ball, L. J. (2008). Belief–logic conflict resolution in syllogistic reasoning: Inspection-time evidence for a parallel-process model. *Thinking & Reasoning*, 14(2), 168-181. doi: 10.1080/13546780701739782
- Stuppel, E. J., Ball, L. J., Evans, J. S. B., & Kamal-Smith, E. (2011). When logic and belief collide: Individual differences in reasoning times support a selective processing model. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(8), 931-941. doi: 10.1080/20445911.2011.589381
- Stuppel, E. J., & Waterhouse, E. F. (2009). Negations in syllogistic reasoning: Evidence for a heuristic–analytic conflict. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(8), 1533-1541. doi: 10.1080/17470210902785674
- Suddendorf, T., & Corballis, M. C. (1997). Mental time travel and the evolution of the human mind. *Genetic, social, and general psychology monographs*, 123(2), 133-167.
- Sweller, J. (2004). Instructional design consequences of an analogy between evolution by natural selection and human cognitive architecture. *Instructional science*, 32(1), 9-31. doi: 10.1023/B:TRUC.0000021808.72598.4d
- Sweller, J. (2008). Instructional implications of David C. Geary's evolutionary educational psychology. *Educational Psychologist*, 43(4), 214-216. doi: 10.1080/00461520802392208
- Sweller, J. (2010). Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational psychology review*, 22(2), 123-138. doi: 10.1007/s10648-010-9128-5

- Sweller, J. (2015). In academe, what is learned, and how is it learned?. *Current Directions in Psychological Science*, 24(3), 190-194. doi: 10.1177/0963721415569570
- Sweller, J. (2016). Cognitive Load Theory, Evolutionary Educational Psychology, and Instructional Design. In Geary, D. C., & Berch, D. (Eds.), *Evolution and Children's Cognitive and Academic Development* (pp.291-306). Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-29986-0_9
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory (vol. 1)*. New York: Springer.
- Sweller, J., & Sweller, S. (2006). Natural information processing systems. *Evolutionary Psychology*, 4(1), 434-458. doi: 10.1177/147470490600400135
- Tanguy, F., Foulin, J.-N., & Tricot, A. (2013). Effet de l'intensité du guidage sur l'apprentissage de la catégorisation Vivant versus Non Vivant. *Enfance*, 2013-2, 159-179. doi: 10.4074/S0013754513002048
- Tardif, T., Gelman, S. A., Fu, X., & Zhu, L. (2012). Acquisition of generic noun phrases in Chinese: learning about lions without an '-s'. *Journal of Child Language*, 39(01), 130-161. doi: 10.1017/S0305000910000735
- Thompson, V. A. (2001). Reasoning from false premises: The role of soundness in making logical deductions. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 50, 315–319. doi: 10.1037/1196-1961.50.3.315
- Thornton, A., & Raihani, N. J. (2008). The evolution of teaching. *Animal Behaviour*, 75(6), 1823-1836. doi: 10.1016/j.anbehav.2007.12.014
- Tobias, S. (1994). Interest, prior knowledge, and learning. *Review of Educational Research*, 64(1), 37-54. doi: 10.3102/00346543064001037
- Tomasello, M. (2009). *Why we cooperate?* Cambridge: MIT Press.
- Toumpaniari, K., Loyens, S., Mavilidi, M. F., & Paas, F. (2015). Preschool children's foreign language vocabulary learning by embodying words through physical activity and gesturing. *Educational Psychology Review*, 27(3), 445-456. doi: 10.1007/s10648-015-9316-4
- Trémolière, B., Gagnon, M. È., & Blanchette, I. (2017). Cognitive Load Mediates the Effect of Emotion on Analytical Thinking. *Experimental Psychology*, 63, 343-350. doi: 10.1027/1618-3169/a000333
- Tricot, A. (1998). Charge cognitive et apprentissage. Une présentation des travaux de John Sweller. *Revue de Psychologie de l'Éducation*, 3, 37-64.

- Tricot, A. (2012). Utilité, apprentissages et enseignement : une approche évolutionniste. In *Du mot au concept : utilité*. Grenoble: PUG.
- Tricot, A., & Roussel, S. (2016). Quelles connaissances de la langue orale est-il nécessaire d'enseigner ? Une contribution évolutionniste. In Grandaty, M., & Lafontaine, L. (Eds.), *L'enseignement de l'oral à l'école, Les Dossiers des sciences de l'éducation* (pp.75-94). Toulouse: PUM.
- Tricot, A., & Sweller, J. (2014). Domain-specific knowledge and why teaching generic skills does not work. *Educational psychology review*, 26(2), 265-283. doi: 10.1007/s10648-013-9243-1
- Tricot, A., & Sweller, J. (2016). La cécité aux connaissances spécifiques. *Education & Didactique*, 10, 9-26.
- Trippas, D., Handley, S. J., Verde, M. F., & Morsanyi, K. (2016). Logic brightens my day: Evidence for implicit sensitivity to logical validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 42(9), 1448-1457. doi: 10.1037/xlm0000248
- Trippas, D., Verde, M. F., & Handley, S. J. (2014). Using forced choice to test belief bias in syllogistic reasoning. *Cognition*, 133(3), 586-600. doi: 10.1016/j.cognition.2014.08.009
- Tulving, E. (2002). Episodic memory: from mind to brain. *Annual review of psychology*, 53(1), 1-25. doi: 10.1146/annurev.psych.53.100901.135114
- Valiña, M. D., & Martín, M. (2016). The influence of semantic and pragmatic factors in Wason's selection task: state of the art. *Psychology*, 7, 925-940. doi: 10.4236/psych.2016.76094
- Vallender, E. J., Mekel-Bobrov, N., & Lahn, B. T. (2008). Genetic basis of human brain evolution. *Trends in neurosciences*, 31(12), 637-644. doi: 10.1016/j.tins.2008.08.010
- Van der Henst, J. B., Yang, Y., & Johnson-Laird, P. N. (2002). Strategies in sentential reasoning. *Cognitive Science*, 26(4), 425-468.
- Van Duyne, P. C. (1974). Realism and linguistic complexity in reasoning. *British Journal of Psychology*, 65(1), 59-67. doi: 10.1111/j.2044-8295.1974.tb02771.x
- Van Gog, T., Paas, F., Marcus, N., Ayres, P., & Sweller, J. (2009). The mirror neuron system and observational learning: Implications for the effectiveness of dynamic visualizations. *Educational Psychology Review*, 21(1), 21-30. doi: 10.1007/s10648-008-9094-3

- Venet, M., & Markovits, H. (2001). Understanding uncertainty with abstract conditional premises. *Merrill-Palmer Quarterly*, *47*(1), 74-99.
- Verschueren, N., Schaeken, W., & d'Ydewalle, G. (2005). Everyday conditional reasoning: A working memory—dependent tradeoff between counterexample and likelihood use. *Memory & Cognition*, *33*(1), 107-119. doi: 10.3758/BF03195301
- von Glasersfeld, E., & Steffe, L. P. (1991). Conceptual models in educational research and practice. *The Journal of Educational Thought*, *25*(2), 91-103.
- Walton, G. E., Bower, N. J. A., & Bower, T. G. R. (1992). Recognition of familiar faces by newborns. *Infant Behavior and Development*, *15*(2), 265-269. doi: 10.1016/0163-6383(92)80027-R
- Wason, P. C. (1966). Reasoning. In Foss, B. (Ed.), *New Horizons in Psychology*. Harmondsworth: Penguin Books.
- Weiner, B. (1990). History of motivational research in education. *Journal of educational Psychology*, *82*(4), 616-622. doi: 10.1037/0022-0663.82.4.616
- Wellman, H. M., & Gelman, S. A. (1992). Cognitive development: Foundational theories of core domains. *Annual review of psychology*, *43*(1), 337-375. doi: 10.1146/annurev.ps.43.020192.002005
- Wetherick, N. E., & Gilhooly, K. J. (1995). 'Atmosphere', matching, and logic in syllogistic reasoning. *Current Psychology*, *14*(3), 169-178. doi: 10.1007/BF02686906
- Wong, A., Marcus, N., Ayres, P., Smith, L., Cooper, G. A., Paas, F., & Sweller, J. (2009). Instructional animations can be superior to statics when learning human motor skills. *Computers in Human Behavior*, *25*(2), 339-347. doi: 10.1016/j.chb.2008.12.012
- Yachanin, S. A., & Tweney, R. D. (1982). The effect of thematic content on cognitive strategies in the four-card selection task. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *19*(2), 87-90. doi: 10.3758/BF03330048
- Youssef, A., Ayres, P., & Sweller, J. (2012). Using general problem-solving strategies to generate ideas in order to solve geography problems. *Applied Cognitive Psychology*, *26*(6), 872-877. doi: 10.1002/acp.2888
- Youssef-Shalala, A., Ayres, P., Schubert, C., & Sweller, J. (2014). Using a general problem-solving strategy to promote transfer. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *20*(3), 215-231. doi: 10.1037/xap0000021

Zacharia, Z. C., & Olympiou, G. (2011). Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning. *Learning and Instruction, 21*(3), 317-331. doi: 10.1016/j.learninstruc.2010.03.001

Ziv, M., & Frye, D. (2004). Children's understanding of teaching: The role of knowledge and belief. *Cognitive development, 19*(4), 457-477. doi: 10.1016/j.cogdev.2004.09.002

ANNEXES

Annexe A : Synthèse des variables utilisées pour les expériences 1 à 7.....	ii
Annexe B : Sondage d'intérêt.....	iii
Annexe C : Matériels des expériences 2 à 7.....	v
Annexe D : Exemple de présentation des variables mesurées.....	x
Annexe E : Détail des résultats des expériences 1 à 7 et de l'analyse groupée.....	xi
Annexe F : Questionnaire des buts d'accomplissement (Darnon et Butera, 2005).....	xxiii
Annexe G : Expérience 9 - Exemple de la présentation du choix de continuer la phase d'entraînement.....	xxiv
Annexe H : Matériel et procédure de l'expérience 10.....	xxiv
Annexe I : Résultats complémentaires expérience 10 - Influence du type de connaissances et de la phase de réponse.....	xxvii

Annexe A : Synthèse des variables utilisées pour les expériences 1 à 7.

Tableau A1 : Synthèse des études explorant l'influence des types de connaissances dans la résolution de problèmes logiques.

Expérience	Nombre de participants	Matériel	Connaissances antérieures	Tâche de charge cognitive	Conditions de passation	Commentaires
1	138	Conditionnelles (K1/K2/NK)	Minimisées (biais sur la règle de thermodynamique)	Aucune	Qualtrics en ligne	Exploration de l'influence des types de connaissances
2	126	Conditionnelles (K1/K2)	Minimisées	Ordre des mots inversé	Qualtrics en ligne	Investigation plus propre de l'influence des types de connaissances. Impact de la charge cognitive sur K2.
3	101	Conditionnelles (K1/K2)	Minimisées	<i>Dot Memory Task</i>	Papier-crayon, collège/lycée	Mise à l'épreuve des résultats avec une autre tâche de charge cognitive. Impact de l'ordre de présentation.
4a	146 (sans pause=124)	Syllogismes (biais de croyance) (K1/K2)	Maximisées	Ordre des mots inversé	Qualtrics en ligne	Investigation de l'influence des types de connaissances dans une nouvelle tâche de raisonnement logique. Investigation des liens systèmes 1/2 et connaissances primaires/secondaires (performance uniquement).
4b	147 (sans pause=123)	Syllogismes (biais de croyance) (K1/K2)	Maximisées	Ordre des mots inversé	Qualtrics en ligne	Investigation des liens systèmes 1/2 et connaissances primaires/secondaires (toutes les variables d'intérêt mais biais dans le matériel rendant impossible l'exploitation des données autres que la performance).
5	204 (sans pause n=177)	Syllogismes (biais de croyance) (K1/K2)	Maximisées	Ordre des mots inversé	Qualtrics en ligne	Investigation des liens systèmes 1/2 et connaissances primaires/secondaires (toutes les variables d'intérêt).
6	102	Syllogismes (biais de croyance) (K1/K2)	Maximisées	<i>Dot Memory Task</i>	Papier-crayon, collège/lycée	Mise à l'épreuve des résultats avec une autre tâche de charge cognitive.
7	212 (sans pause n=179)	Syllogismes (K1/K2)	Minimisées	Ordre des mots inversé	Qualtrics en ligne	Confirmation de l'influence K1/K2 sur des syllogismes neutres. Tester le matériel pour la phase 2.

Annexe B : Sondage d'intérêt.

Le sondage d'intérêt pose la question « est-ce que vous vous intéressez aux sujets suivants ? » et demande de répondre sur une échelle visuelle analogique allant de 0 à 100.

Tableau B2 : Résultats du sondage d'intérêt (triés par moyennes croissantes), présentant le nombre de participants ayant répondu, les moyennes et les écarts-types des différentes thématiques en fonction de leur appartenance présumée aux connaissances primaires (1) ou secondaires (2) et de leur caractère familial (F) ou non (N) (certains choix de catégorisation peuvent être discutés).

Thème	n	Connaissance	Caractère familial	M	σ
Les mathématiques non applicables car inventées	333	2	N	20,14	27,24
Le masculin et le féminin dans une langue slave	782	2	N	21,72	28,99
Comment calculer le périmètre d'un cercle	682	2	F	27,40	30,56
La géométrie en mathématiques	682	2	F	27,98	30,96
Comment mesurer un angle dans une figure géométrique (triangle par exemple)	682	2	F	28,15	30,62
La grammaire d'une langue inconnue	333	2	N	31,16	31,89
La grammaire d'une langue peu connue et peu parlée	660	2	N	32,53	33,06
Comment préparer pour la manger de la viande d'une région très éloignée qu'il vous sera difficile de trouver en supermarché	782	1	N	32,56	33,25
Les équations à deux inconnues	660	2	F	33,06	34,74
Les relations amoureuses d'un pays éloigné	681	1	N	39,73	37,36
Les règles d'accord du participe passé en français	681	2	F	40,14	34,02
Le fonctionnement du Parlement et des députés en France	660	2	F	40,63	34,47
Les relations amoureuses dans votre région	682	1	F	41,57	35,53
Les règles en musique	660	2	F	43,35	35,31
Comment préparer pour les manger des légumes d'un pays très éloigné qu'il vous sera difficile de trouver en supermarché	681	1	N	43,62	36,67
Le nom des os du corps humain	682	2	F	43,77	33,89

Comment reconnaître les plantes/champignons vénéneux	682	1	F	45,05	35,61
Les verbes irréguliers en anglais	682	2	F	45,83	34,40
La grammaire française	783	2	F	46,06	32,72
Les mécanismes de sécrétion des hormones humaines	680	2	F	47,35	36,03
Comment préparer pour la manger de la viande que vous pouvez trouver en supermarché	782	1	F	47,91	34,82
La politique d'un pays éloigné et peu connu	559	2	N	48,64	35,53
Les cours de cuisine gastronomique	534	2	F	49,57	35,71
Comment allumer un feu sans outils « modernes »	783	1	F	50,54	35,49
Les aliments inconnus	333	1	N	51,05	34,60
Comment préparer pour les manger des légumes que vous pouvez trouver en supermarché	680	1	F	56,12	33,82
Les cours de pâtisserie	537	2	F	56,27	34,57
La cuisine gastronomique	145	2	F	57,82	33,07
La vie sociale d'un pays éloigné et peu connu	783	1	N	58,42	35,32
Le mode de vie d'un animal que vous pouvez croiser près de chez vous (zoo exclu, ex : chat, cheval, poule, loup, etc.)	680	1	F	60,39	34,06
Le mode de vie d'un animal que vous ne pouvez normalement pas croiser près de chez vous (éléphant, puma, girafe, kangourou, etc.)	682	1	N	61,21	33,83
Les jeux de société	660	1	F	63,67	30,41
La vie sociale en France	782	1	F	63,96	30,00
Les animaux inconnus	333	1	N	64,00	33,01
La pâtisserie	145	2	F	64,43	31,80
Les effets de l'âge sur le corps	682	2	F	64,43	31,35
Les modifications corporelles et comportementales des femmes lors de la grossesse	559	2	F	64,45	32,10
Les relations amoureuses en général	660	1	F	66,72	30,93
La politesse	660	1	F	76,03	25,79

Annexe C : Matériels des expériences 2 à 7.

Expérience 2 (règles conditionnelles)

Habillages liés aux connaissances primaires :

- Dans une communauté de Jamaïque, si un ugli est ramassé rouge, alors il est pelé entièrement pour être mangé.
- Dans une région de l'Argentine, si un oncille a le pelage roux, alors les gens de la région consomment sa chair grillée au feu.
- Dans les régions proches de l'océan indien, si une personne mange la peau d'un blaasop à rayures argentées, alors elle aura de sérieux problèmes respiratoires qui devront rapidement être pris en charge.

Habillages liés aux connaissances secondaires :

- En quenya, si un verbe fort est conjugué au parfait, alors ce verbe fort finit par –ie.
- En quenya, si un mot porte la marque de la première personne duel exclusive, alors ce mot finit par –mme en tant que suffixe personnel.
- En sindarin, si une personne veut exprimer un complément du nom sans utiliser la préposition « na » fréquente en noldorin, alors cette personne juxtapose le déterminé et le déterminant dans la phrase.

Expérience 3 (règles conditionnelles)

Habillages liés aux connaissances primaires :

- Dans une communauté de Jamaïque, pays dont la capitale est Kingston, si un ugli est ramassé rouge, alors il est pelé entièrement pour être mangé sur le sable de Frenchman's cove.
- Dans une région montagneuse de l'Argentine, si un oncille a le pelage roux, alors les gens de la région consomment sa chair grillée au feu directement ou en sandwich lors d'un asado.
- Dans les régions proches de l'océan indien, si une personne mange la peau d'un blaasop à rayures argentées, alors elle aura de sérieux problèmes respiratoires qui devront rapidement être pris en charge.

Habillages liés aux connaissances secondaires :

- En quenya, une langue parlée par les Vanyar et les Ñoldors venant d'un continent lointain, si un verbe fort est conjugué au parfait, alors ce verbe fort finit par –ie.
- En langue quenya dans laquelle la marque du sujet s'exprime par un suffixe, si un mot porte la marque de la première personne, alors ce mot finit par –mme en tant que suffixe personnel.
- En sindarin, si une personne veut exprimer un complément du nom sans utiliser la préposition « na », alors cette personne met à côté le déterminé et le déterminant dans la phrase.

Expérience 4 (syllogismes avec biais de croyance)

La première consigne présentait les syllogismes :

« Nous allons maintenant vous proposer des énoncés. Ces énoncés se présenteront comme suit:

"Toutes les choses qui ont un moteur ont besoin d'huile,
Or les voitures ont un moteur,
Donc les voitures ont besoin d'huile."

Les prémisses (deux premières lignes) doivent être considérées comme vraies.

La conclusion (dernière ligne) ne devrait être acceptée que si elle découle logiquement des prémisses.

Pour chaque énoncé, vous allez devoir juger si les différentes conclusions que nous allons vous proposer découlent de leurs prémisses ou non.

"D'huile besoin ont moteur un ont qui choses les toutes,
Moteur un ont voitures les or,
D'huile besoin ont voitures les donc."

Les mots sont écrits dans l'ordre inverse de leur ordre conventionnel. C'est dire que vous devez les lire en commençant par la fin pour les comprendre. Pour cet exemple, vous devez arriver à lire ceci:

"Toutes les choses qui ont un moteur ont besoin d'huile,
Or les voitures ont un moteur,

Donc les voitures ont besoin d'huile." »

Tableau C3 : Matériel des expériences 4 à 6 (syllogismes et biais de croyance). Les expériences 4a et 4b contiennent une erreur dans le matériel : le premier syllogisme AB CB CA non conflictuel pour chaque type de connaissances est en fait un problème AB CA CB conflictuel (noté en italique). Une correction a été apportée pour les expériences 5 et 6 (notée en-dessous).

		Conflit (biais de croyance)	Pas de conflit
Habillages liés aux connaissances primaires (nourriture et faune)	AB CB CA (invalidé)	Tous les êtres humains ont deux mains, Or les hommes ont deux mains, Donc les hommes sont des êtres humains. Tous les gâteaux se mangent, Or les marbrés au chocolat se mangent, Donc les marbrés au chocolat sont des gâteaux.	<i>Tous les liquides en bouteille sont potables, Or l'alcool ménager est un liquide en bouteille, Donc l'alcool ménager est potable.</i> (expériences 4a et 4b) ➤ Tous les liquides potables sont des liquides en bouteille, Or l'alcool ménager est un liquide en bouteille, Donc l'alcool ménager est un liquide potable. (expériences 5 bis et 6)
	AB CA CB (valide)	Tous les produits laitiers se boivent, Or le fromage est un produit laitier, Donc le fromage se boit. Tous les félins sont sauvages, Or les chats domestiques sont des félins, Donc les chats domestiques sont sauvages.	Toutes les femmes enceintes ont le ventre rond, Or les buveurs de bière ont le ventre rond, Donc les buveurs de bières sont des femmes enceintes. Tous les mammifères peuvent marcher, Or les chats sont des mammifères, Donc les chats peuvent marcher. Toutes les pizzas sont grasses, Or la 5 fromages est une pizza, Donc la 5 fromages est grasse.
Habillages liés aux connaissances secondaires (grammaire et mathématiques)	AB CB CA (invalidé)	Tous les adjectifs féminins français finissent par un -e, Or « jolie » finit par un -e, Donc « jolie » est un adjectif féminin français. Tous les cercles sont ronds, Or la base d'un cône est ronde, Donc la base d'un cône est un cercle.	<i>Toutes les figures à quatre côtés égaux sont des carrés, Or un losange a quatre côtés égaux, Donc un losange est un carré.</i> (expériences 4a et 4b) ➤ Tous les carrés sont des figures à quatre côtés égaux, Or un losange est une figure à quatre côtés égaux, Donc un losange est un carré. (expériences 5 bis et 6)
	AB CA CB (valide)	Tous les nombres premiers sont impairs, Or 2 est un nombre premier, Donc 2 est impair. Tous les adjectifs pluriels français finissent par un -s, Or « joyeux » est un adjectif pluriel français, Donc « joyeux » finit par un -s.	Tous les verbes français du premier groupe finissent par -er, Or « aller » finit par -er, Donc « aller » est un verbe français du premier groupe. Tous les noms communs français finissent par un -s au pluriel, Or « chien » est un nom commun français, Donc « chien » finit par un -s au pluriel. Tous les triangles isocèles ont deux côtés de la même longueur, Or les triangles équilatéraux sont des triangles isocèles, Donc les triangles équilatéraux ont deux côtés de la même longueur.

Expérience 7 (syllogismes neutres)

Tableau C4 : Matériel de l'expérience 7.

	Habillages liés aux connaissances primaires (nourriture, caractéristiques faune)	Habillages liés aux connaissances secondaires (grammaire, mathématiques)
AAA/AII	<p>AB CB CA (invalide)</p> <p>Tous les alkékengés se mangent en sauce, Or les uglis rouges se mangent en sauce, Donc les uglis rouges sont des alkékengés.</p> <p>Toutes les femelles hutar dangereuses ont le ventre bleu foncé, Or Toami a le ventre bleu foncé, Donc Toami est une femelle hutar dangereuse.</p>	<p>Tous les verbes sendamin gérondifis finissent par –ni, Or « norauni » finit par –ni, Donc « norauni » est un verbe sendamin gérondif.</p> <p>Tous les volumes de Barry se calculent par $\sum(Rx-1 /5\pi)$, Or le volume d'un disphénoïde se calcule par $\sum(Rx-1 /5\pi)$, Donc le volume d'un disphénoïde est un volume de Barry.</p>
	<p>AB CA CB (valide)</p> <p>Tous les produits jonquab se boivent, Or le houmi brut est un produit jonquab, Donc le houmi brut se boit.</p> <p>Tous les ronvacs sont sauvages et herbivores, Or les cachuls jaunes à cornes sont des ronvacs, Donc les cachuls jaunes à cornes sont sauvages et herbivores.</p>	<p>Tous les adjectifs sendamin finissent par –an au pluriel, Or « lephae » est un adjectif sendamin, Donc « lephae » finit par –an au pluriel.</p> <p>Toutes les équations de Foster sont de type $x=\sqrt{(3b-2ac)}$, Or la formule de Jyrog est une équation de Foster, Donc la formule de Jyrog est de type $x=\sqrt{(3b-2ac)}$.</p>
AEE/AOO	<p>AB CB CA (valide)</p> <p>Tous les mugichas en bouteille sont potables, Or le robotom n'est pas potable, Donc le robotom n'est pas un mugicha en bouteille.</p> <p>Tous les oncilles ont trois pattes poilues, Or les grogs n'ont pas trois pattes poilues, Donc les grogs ne sont pas des oncilles.</p>	<p>Tous les adjectifs féminins quenty finissent par –mma, Or « galahm » ne finit pas par –mma, Donc « galahm » n'est pas un adjectif féminin quenty.</p> <p>Tous les polyèdres de Hat ont $7(n-1)$ demi-espaces, Or le cubocaoïde n'a pas $7(n-1)$ demi-espaces, Donc le cubocaoïde n'est pas un polyèdre de Hat.</p>
	<p>AB CA CB (invalide)</p> <p>Toutes les loutas sont sucrées et juteuses, Or la rouli blanche n'est pas une louta, Donc la rouli blanche n'est pas sucrée et juteuse.</p> <p>Tous les individus de la tribu des Knols peuvent marcher, Or les fouards ne sont pas des individus de la tribu des Knols, Donc les fouards ne peuvent pas marcher.</p>	<p>Tous les noms communs sendamin finissent par –li au pluriel, Or « alda » n'est pas un nom commun sendamin, Donc « alda » ne finit pas par un –li au pluriel.</p> <p>Toutes les aires d'une figure de Hastor se calculent par $3(x+2\pi)$, Or l'aire d'un volgoïde n'est pas une aire d'une figure de Hastor, Donc l'aire d'un volgoïde ne se calcule pas par $3(x+2\pi)$.</p>

Annexe D : Exemple de présentation des variables mesurées.

Est-ce que réfléchir sur ces phrases vous a plu/amusé ?

	Non, pas du tout	Oui, tout à fait
Est-ce que cela vous a plu ?	<input type="text"/>	

À quel point avez-vous eu envie de trouver les bonnes réponses aux questions ci-dessus ?

	Pas du tout envie	Enormément envie
Envie de trouver les bonnes réponses ?	<input type="text"/>	

À quel point êtes-vous certain d'avoir choisi les bonnes réponses des questions posées sur cette page ?

	Pas du tout certain	Tout à fait certain
Certain de donner les bonnes réponses ?	<input type="text"/>	

À propos des phrases que vous venez de traiter, à quel point êtes-vous d'accord avec les propositions ci-dessous:

	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord
Le sujet abordé était complexe.	<input type="text"/>	
Vous vous êtes beaucoup concentré(e) pour réaliser cette tâche.	<input type="text"/>	

Annexe E : Détail des résultats des expériences 1 à 7 et de l'analyse groupée.

Tableau E5 : Expérience 2 (conditionnelles, via internet, ordre des mots inversé). Représentation des interactions entre les types de connaissances et la charge cognitive manipulée (première ligne) et entre les types de connaissances et leur ordre de présentation (deuxième ligne) sur l'ensemble des variables d'intérêt. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

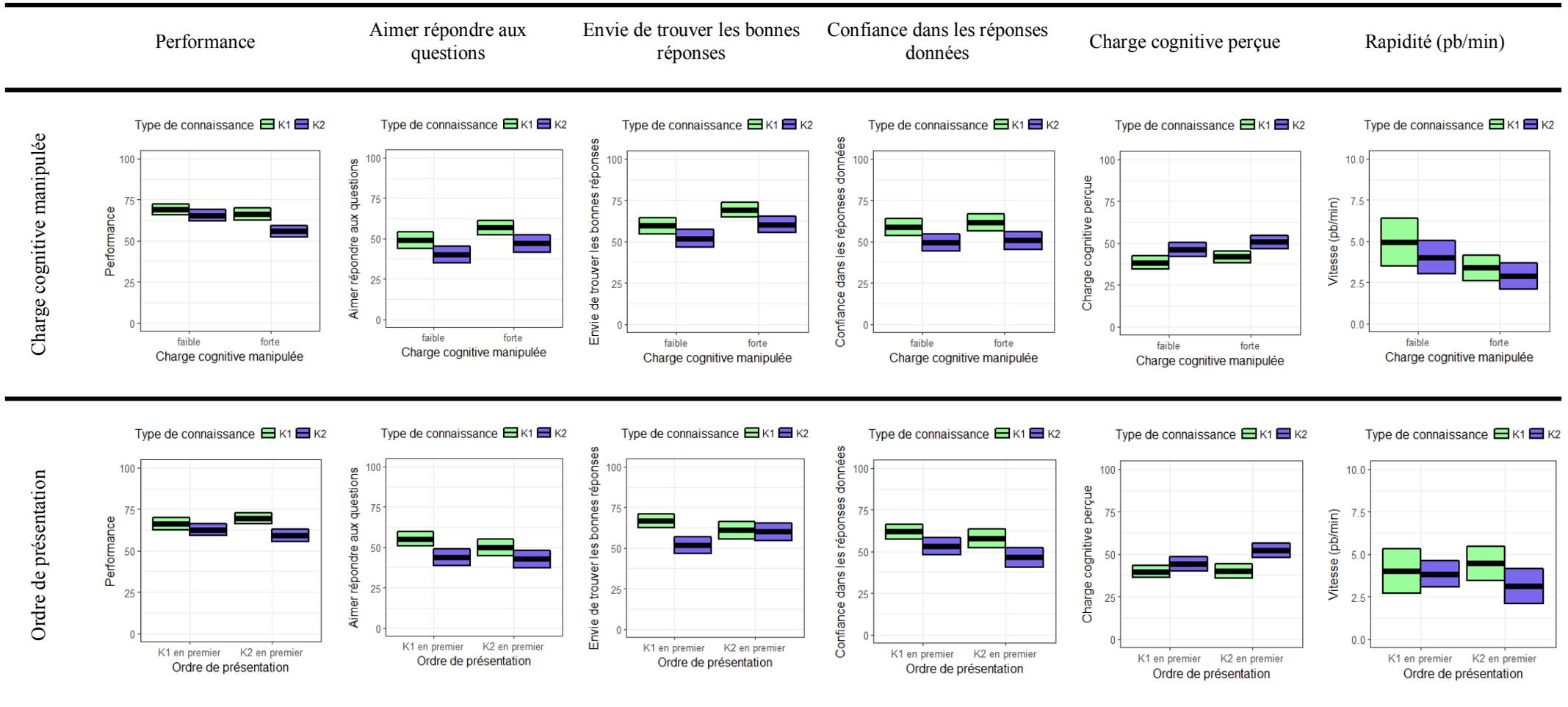


Tableau E6 : Expérience 3 (conditionnelles, collège/lycée, *Dot Memory Task*). Représentation des interactions entre les types de connaissances et la charge cognitive manipulée (première ligne) et entre les types de connaissances et leur ordre de présentation (deuxième ligne) sur l'ensemble des variables d'intérêt. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

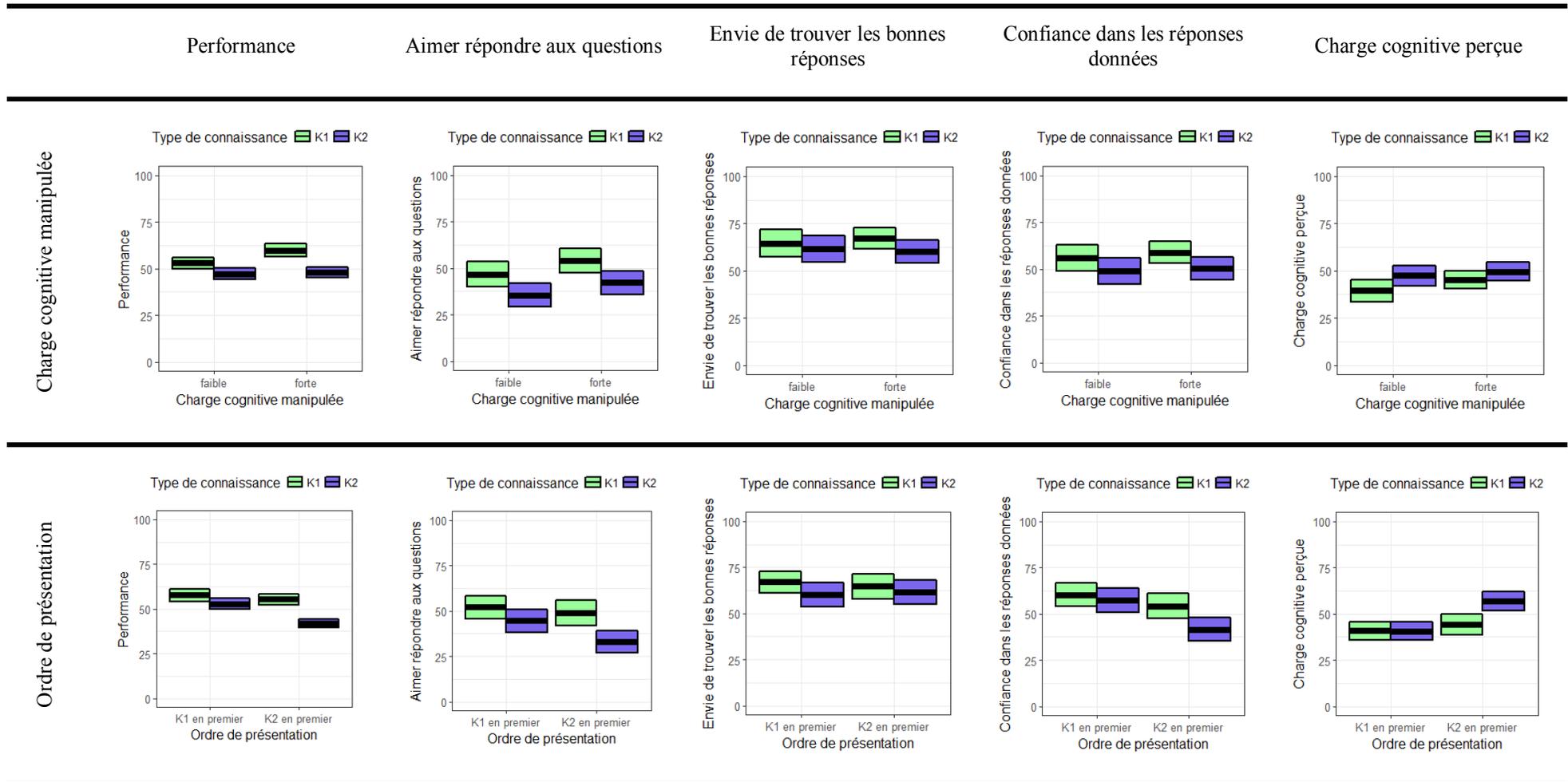
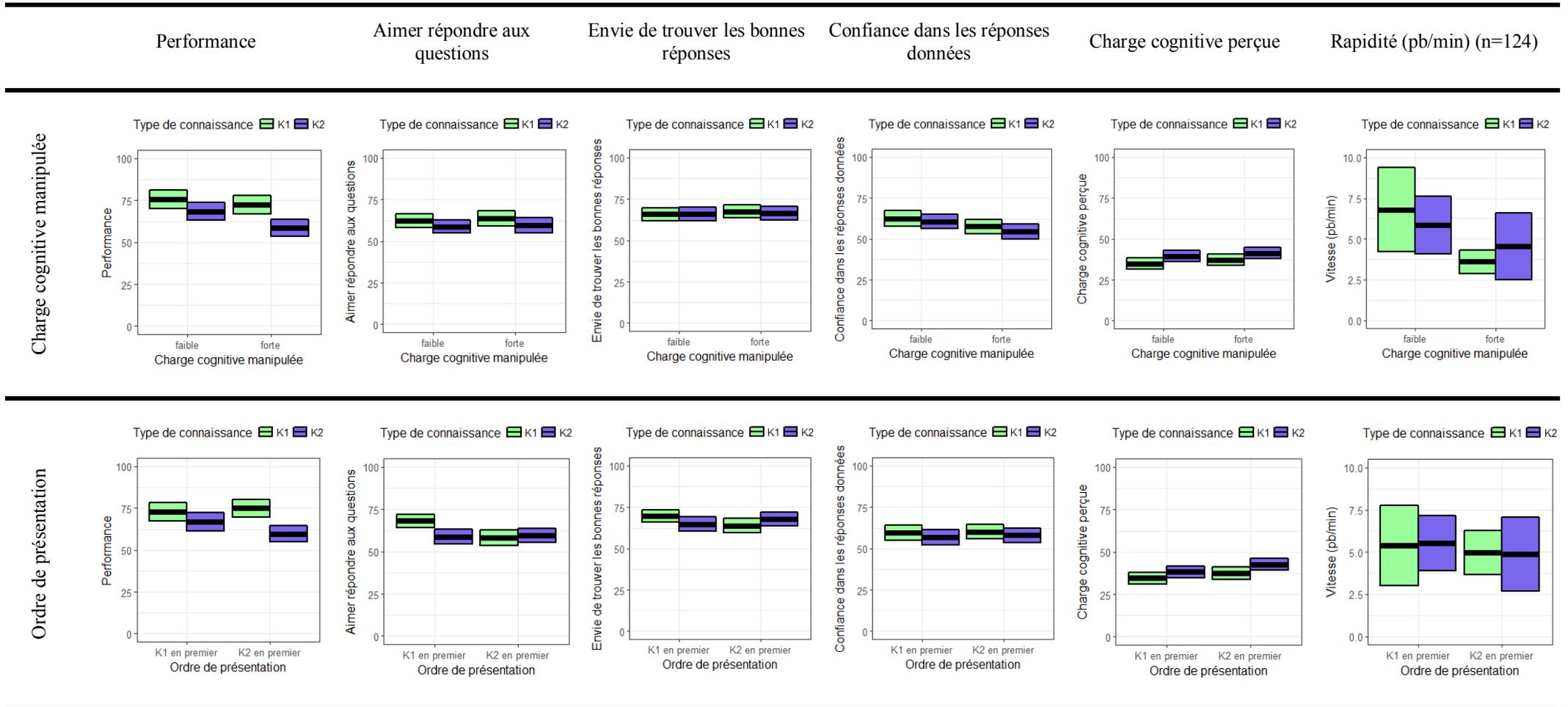


Tableau E7 : Expérience 4a (syllogismes, biais de croyance non corrigé, via internet, ordre des mots inversé). Représentation des interactions entre les types de connaissances et la charge cognitive manipulée (première ligne) et entre les types de connaissances et leur ordre de présentation (deuxième ligne) sur l'ensemble des variables d'intérêt. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.



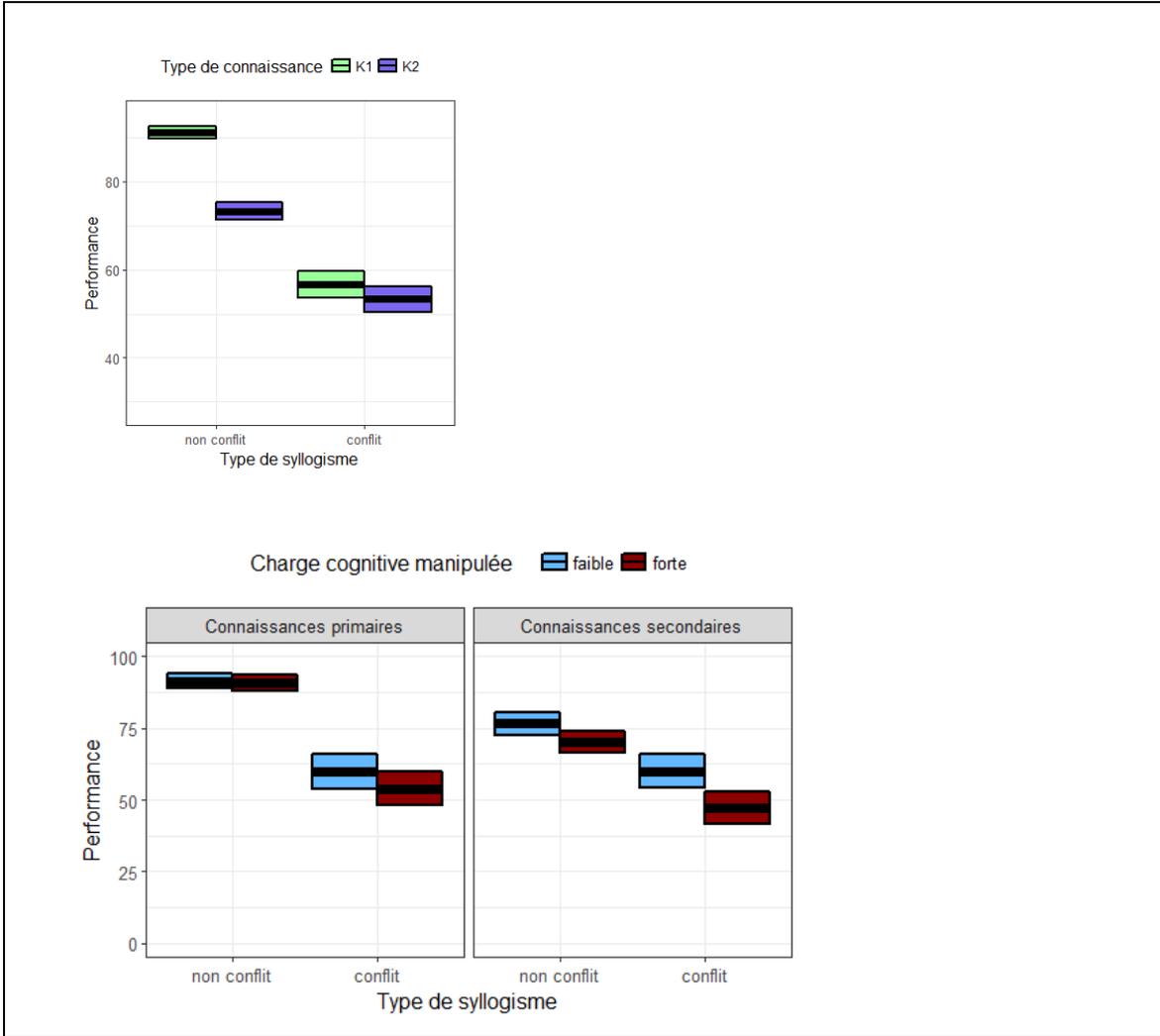
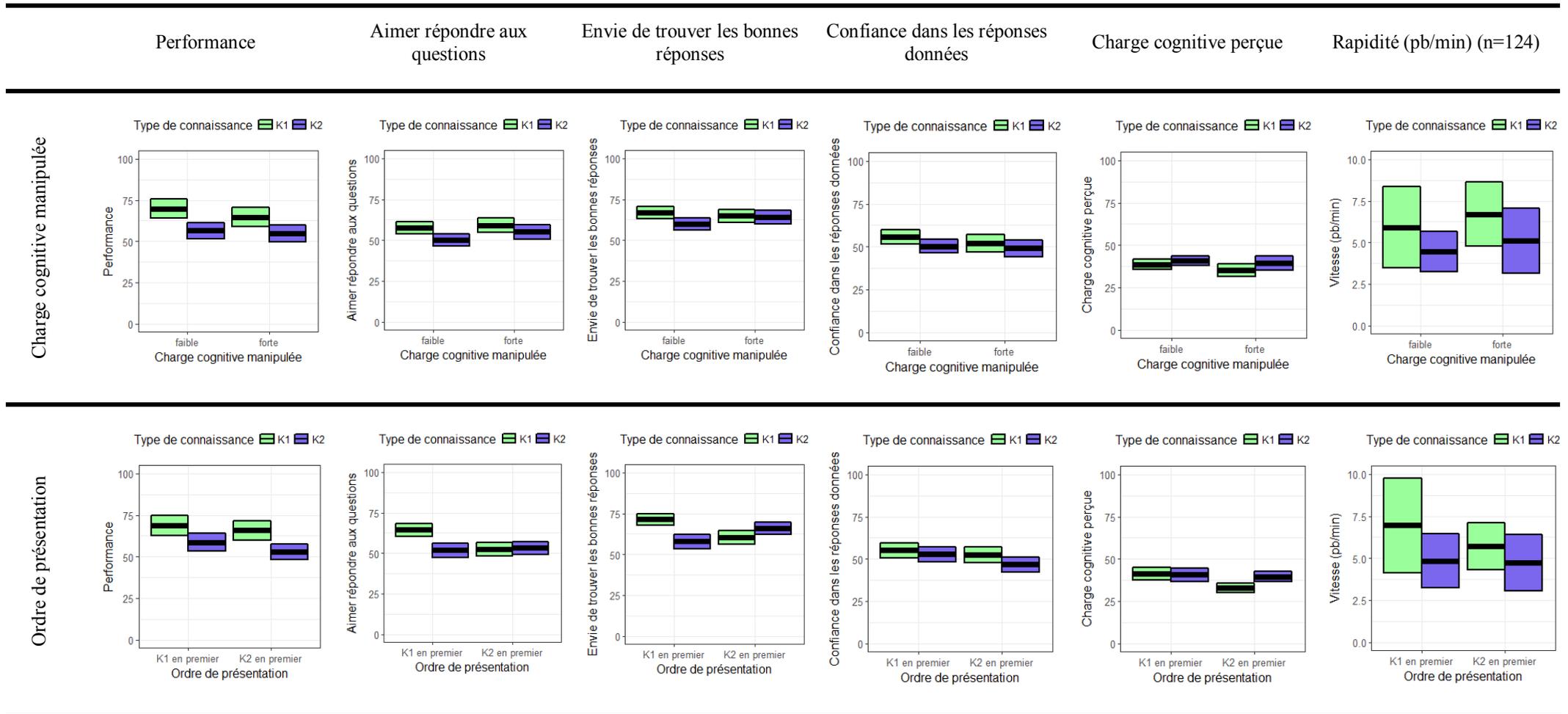


Figure E1 : Expérience 4a. Interactions entre le type de syllogisme et a) le type de connaissances et b) la charge cognitive manipulée et le type de connaissances sur la performance des participants. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

Tableau E8 : Expérience 4b (syllogismes, biais de croyance non corrigé, via internet, ordre des mots inversé). Représentation des interactions entre les types de connaissances et la charge cognitive manipulée (première ligne) et entre les types de connaissances et leur ordre de présentation (deuxième ligne) sur l'ensemble des variables d'intérêt. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.



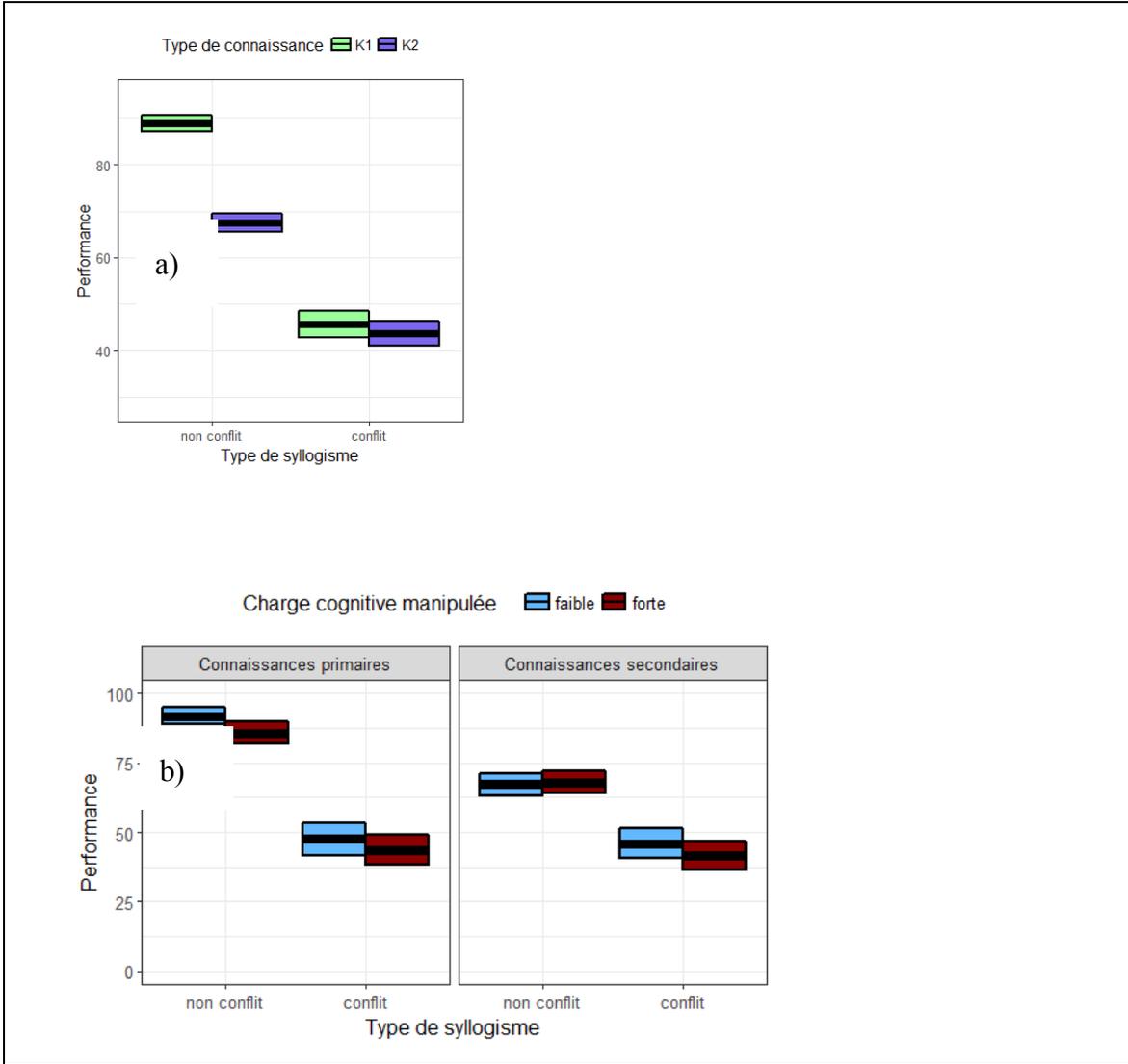


Figure E2 : Expérience 4b. Interactions entre le type de syllogisme et a) le type de connaissances et b) la charge cognitive manipulée et le type de connaissances sur la performance des participants. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

Tableau E9 : Expérience 5 (syllogismes, biais de croyance corrigé, via internet, ordre des mots inversé). Représentation des interactions entre les types de connaissances et la charge cognitive manipulée (première ligne) et entre les types de connaissances et leur ordre de présentation (deuxième ligne) sur l'ensemble des variables d'intérêt. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

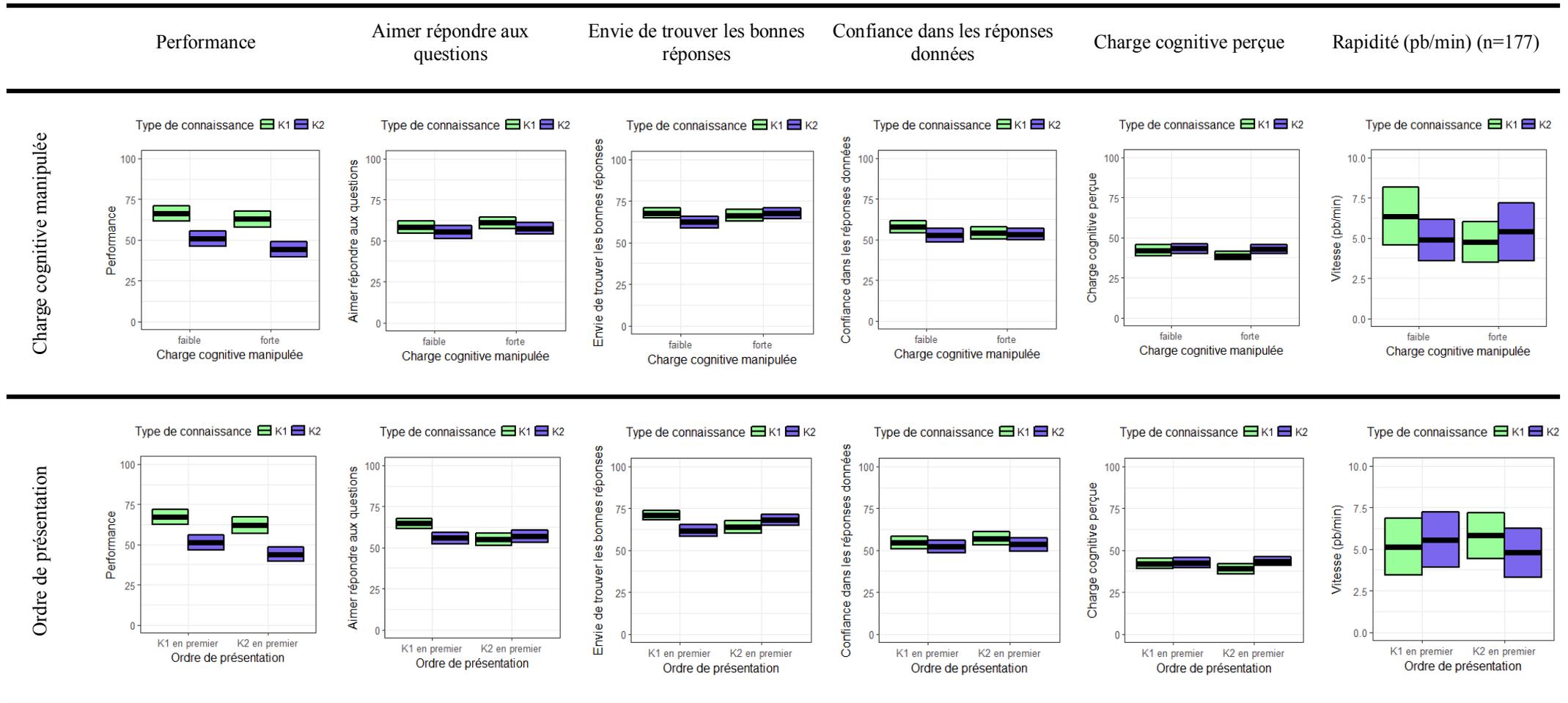


Tableau E10 : Expérience 6 (syllogisme, biais de croyance corrigé, collège/lycée, *Dot Memory Task*). Représentation des interactions entre les types de connaissances et la charge cognitive manipulée (première ligne) et entre les types de connaissances et leur ordre de présentation (deuxième ligne) sur l'ensemble des variables d'intérêt. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.

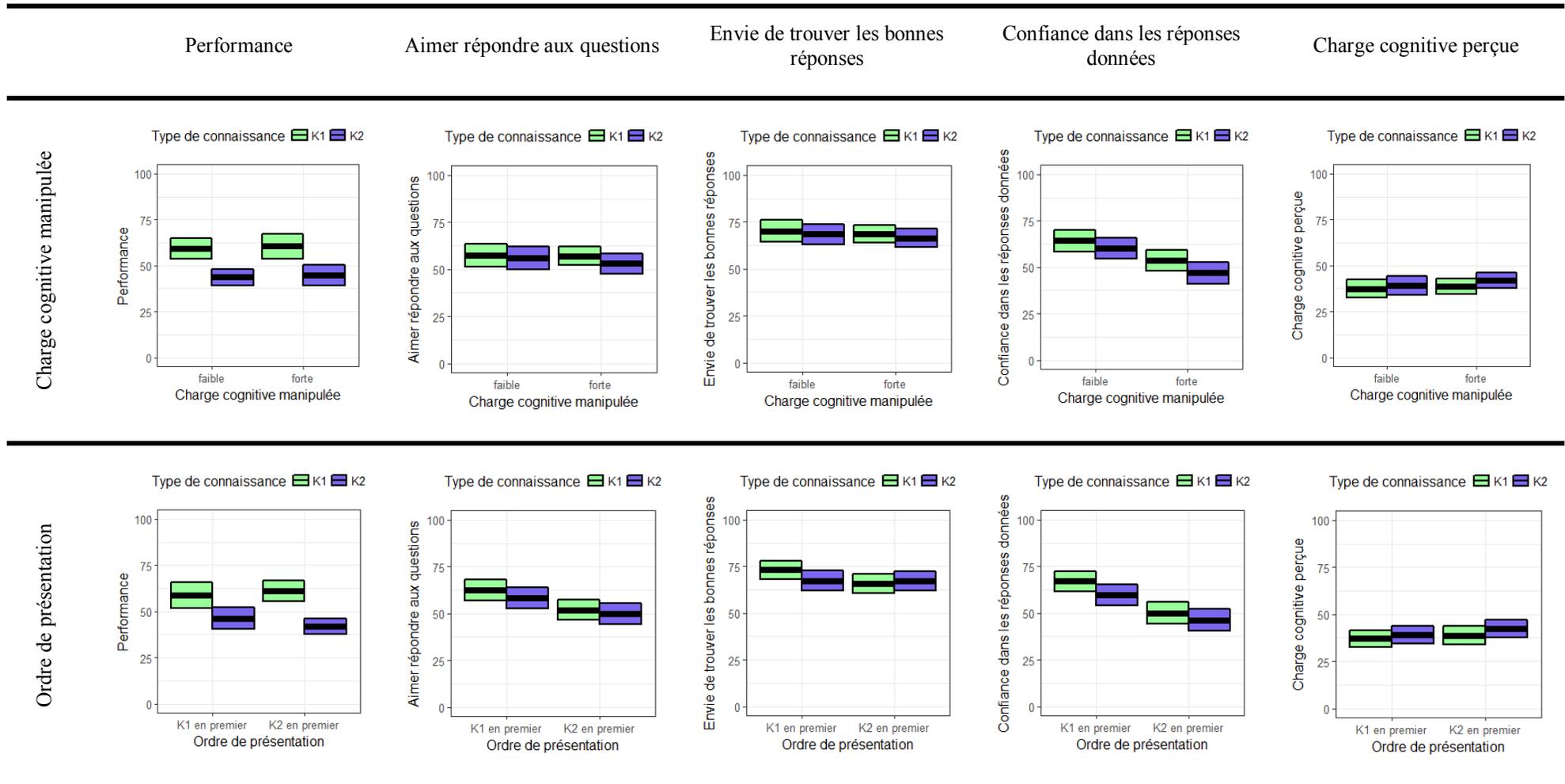
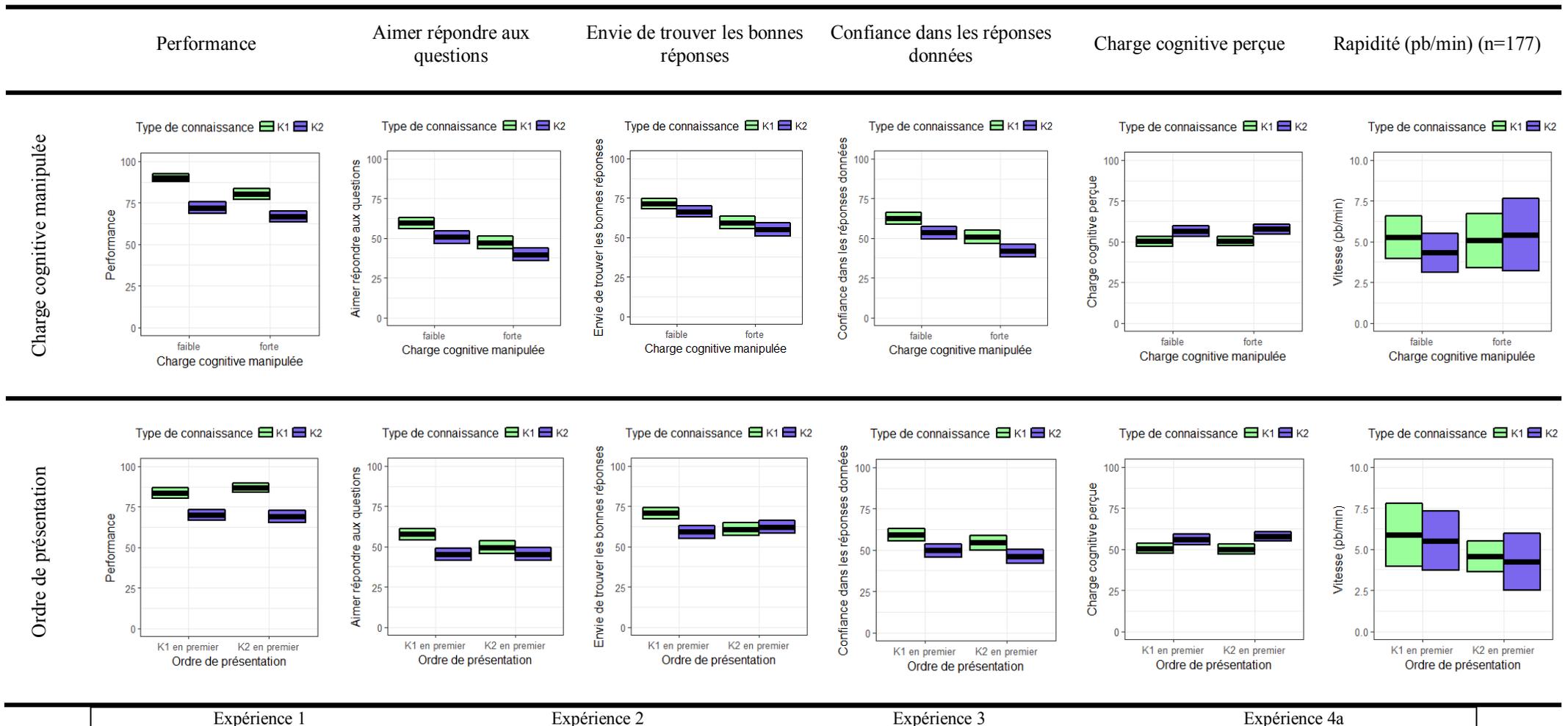


Tableau E11 : Expérience 7 (syllogismes neutre, via internet, ordre des mots inversé). Représentation des interactions entre les types de connaissances et la charge cognitive manipulée (première ligne) et entre les types de connaissances et leur ordre de présentation (deuxième ligne) sur l'ensemble des variables d'intérêt. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.



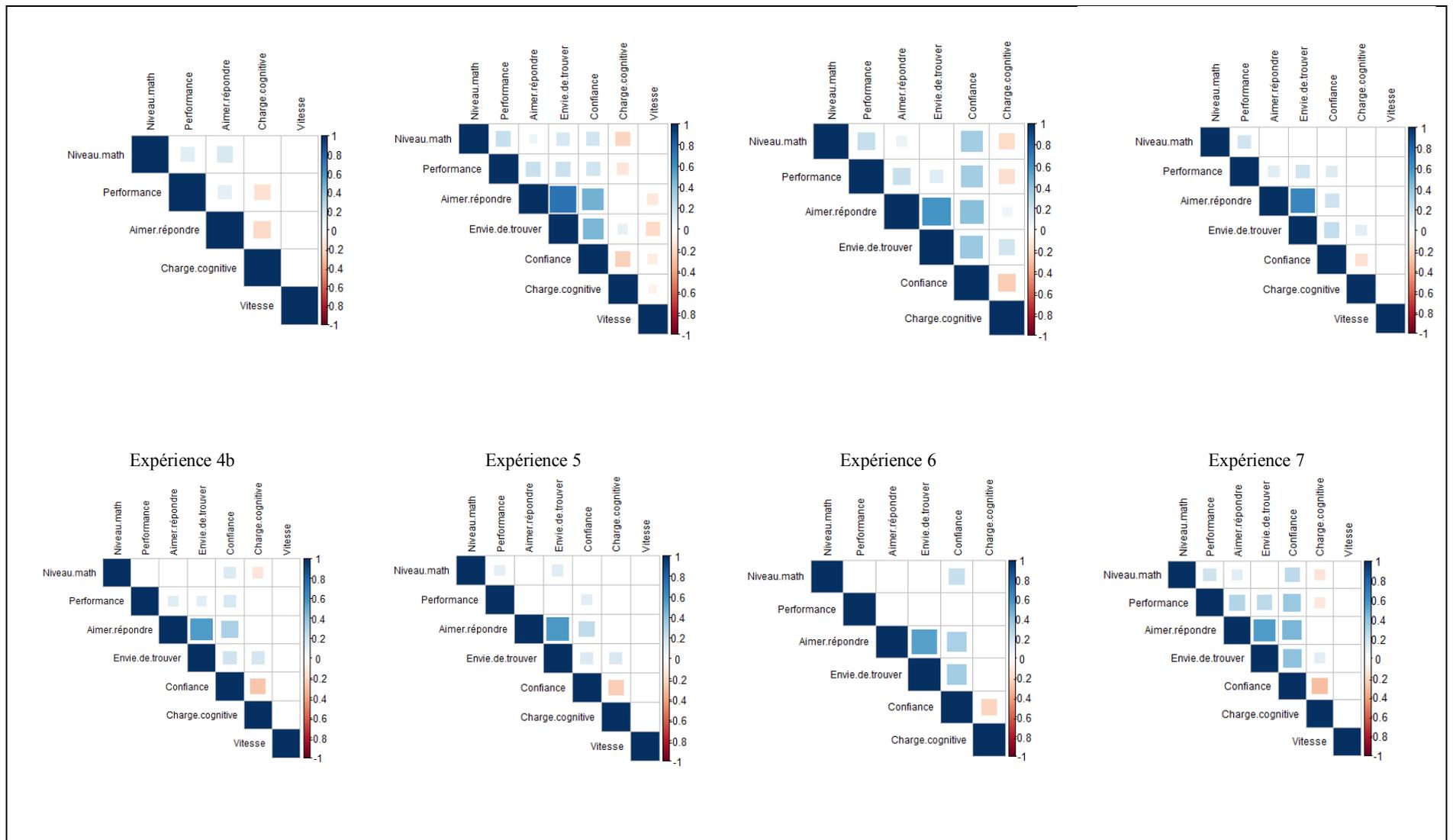
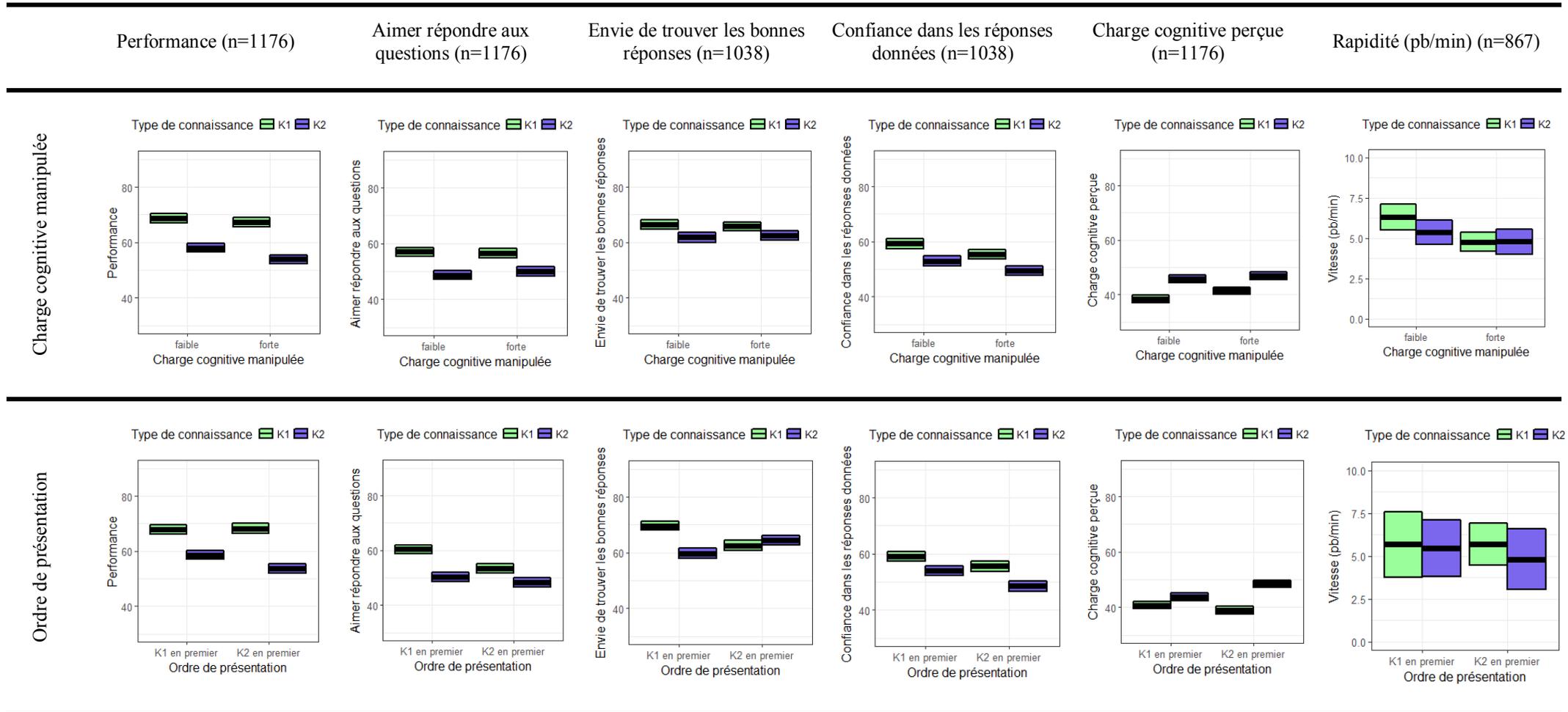


Figure E3 : Matrices de corrélations de Pearson incluant le niveau estimé en mathématiques et l'ensemble des variables mesurées pour les expériences 1 à 7. Les corrélations représentées sont celles pour lesquelles $p < .05$.

Tableau E12 : Ensemble des expériences 1 à 7. Représentation des interactions entre les types de connaissances et la charge cognitive manipulée (première ligne) et entre les types de connaissances et leur ordre de présentation (deuxième ligne) sur l'ensemble des variables d'intérêt. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l'intervalle de confiance.



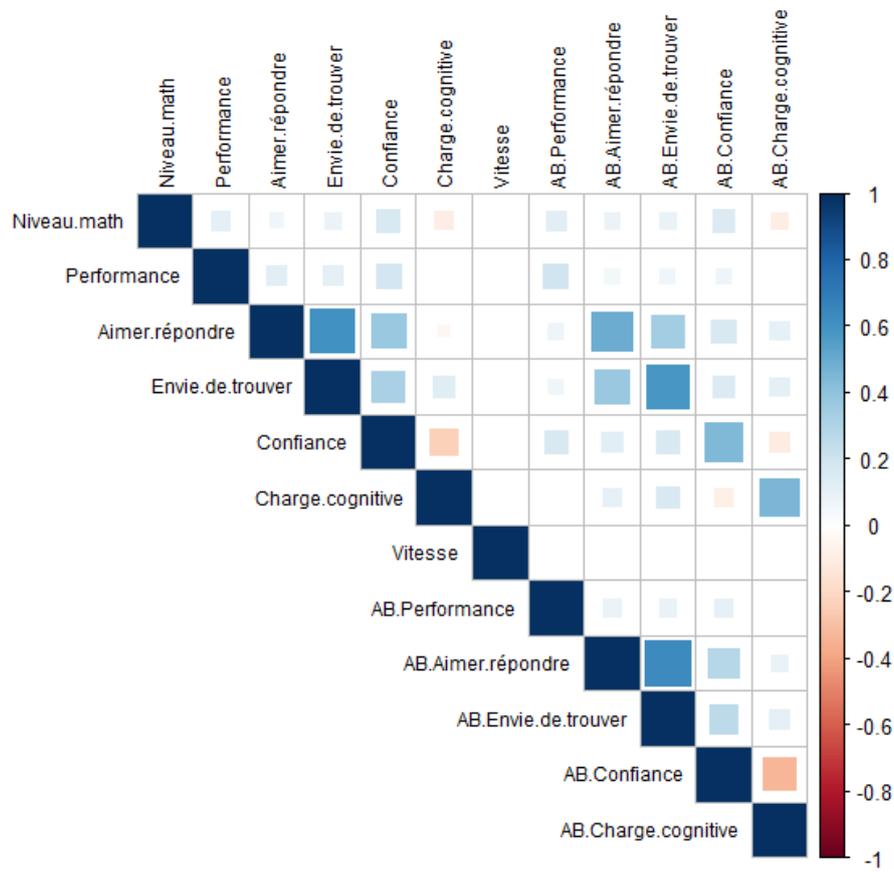


Figure E4 : Matrice de corrélation de Pearson sur les données compilées des expériences 1 à 7 incluant le niveau estimé en mathématiques, l'ensemble des variables mesurées pendant les tâches de résolution de problèmes et lors de la tâche de transfert (AB). Les corrélations représentées sont celles pour lesquelles $p < .05$.

Annexe F : Questionnaire des buts d'accomplissement (Darnon et Butera, 2005).

La question posée est : « Par rapport aux cours, à quel point les affirmations suivantes sont vraies pour vous ? »

	Pas du tout vrai pour moi							Très vrai pour moi
Parfois j'ai peur de ne pas comprendre le contenu des cours de manière aussi approfondie que je le souhaiterais	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
C'est important pour moi de comprendre le contenu des cours de façon aussi approfondie que possible	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Je veux seulement éviter d'échouer en cours	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Il est important pour moi de bien réussir comparativement aux autres en cours	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Je veux apprendre autant que possible des cours	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Ma peur d'échouer en cours est souvent ce qui me motive	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Je suis parfois soucieux(se) du fait que je pourrais ne pas apprendre tout ce qu'il y a à apprendre dans les cours	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Je désire maîtriser complètement le contenu des cours	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Mon but dans les cours est d'avoir de meilleures notes que la plupart des élèves	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Mon but dans les cours est d'éviter de mal réussir	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Je m'inquiète de ne pas apprendre autant que je le pourrais en cours	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	
Il est important pour moi de mieux réussir que les autres élèves	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	

Annexe G : Expérience 9 - Exemple de la présentation du choix de continuer la phase d'entraînement

Vous devez maintenant décider si vous souhaitez (cochez la case choisie avant de mettre en application votre choix) :

- Faire une autre feuille d'exercices pour vous entraîner : passez à la feuille suivante.
- Passer directement au test final et essayer d'avoir le maximum de bonnes réponses : ne regardez pas les pages suivantes et allez directement à la page 9.

(La page 9 étant la page du test final)

Annexe H : Matériel et procédure de l'expérience 10.

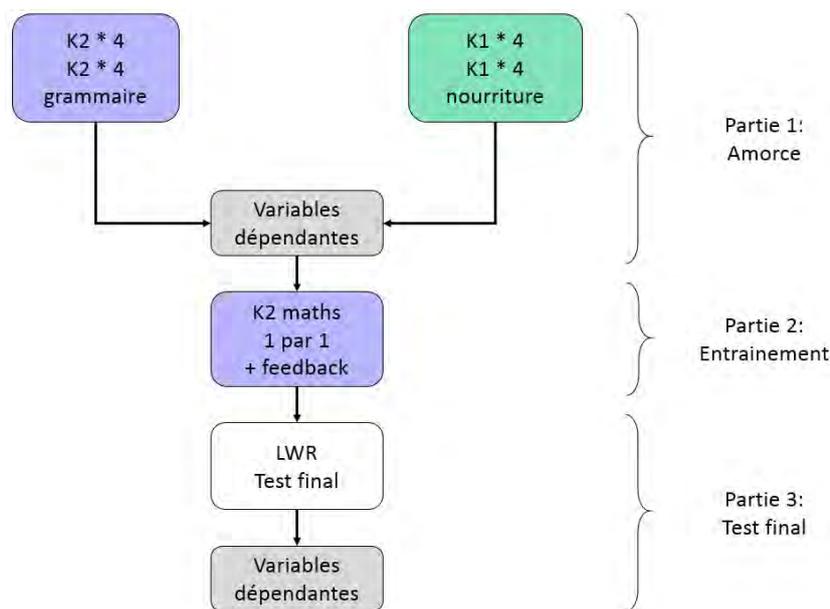


Figure H5 : Procédure de l'expérience 10.

Tableau H13 : Types de syllogismes utilisés dans l'expérience 10 en fonction de leur figure et de leur mode. Les cases vertes correspondent aux syllogismes valides et les cases rouges correspondent aux syllogismes invalides.

	Figure 1 AB CA CB	Figure 2 AB CB CA	Figure 3 AB AC CB
All	Tous les A sont des B, Or quelques C sont des A, Donc quelques C sont des B.	Tous les A sont des B, Or quelques C sont des B, Donc quelques C sont des A.	Tous les A sont des B, Or quelques A sont des C, Donc quelques C sont des B.
AOO	Tous les A sont des B, Or quelques C ne sont pas des A, Donc quelques C ne sont pas des B.	Tous les A sont des B, Or quelques C ne sont pas des B, Donc quelques C ne sont pas des A.	Tous les A sont des B, Or quelques A ne sont pas des C, Donc quelques C ne sont pas des B.

Partie 1 : amorce. Exemples de syllogismes.

Habillages liés aux connaissances primaires :

Tous les ylerds de Laun ont un goût salé très recherché,
Or quelques abraks à coquille sont des ylerds de Laun,
Donc les abraks à coquille ont un goût salé très recherché. (Figure 1, All, valide)

Tous les louards docs à cornes se cuisinent bien saignants avec des épices,
Or quelques divots bruns ne se cuisinent pas bien saignants avec des épices,
Donc quelques divots bruns ne sont pas des louards docs à cornes. (Figure 2, AOO, valide)

Habillages liés aux connaissances secondaires :

Tous les adjectifs féminins quantys finissent par –mma,
Or quelques adjectifs féminins quantys ne sont pas des termes comme « galahm »,

Donc quelques termes comme « galahm » ne finissent pas par $-mma$. (Figure 3, AOO, invalide)

Tous les noms communs pluriels quentys finissent par $-r$,

Or quelques termes comme « hentar » finissent par $-r$,

Donc quelques termes comme « hentar » sont des noms communs pluriels quentys. (Figure 2, AII, invalide)

Partie 2 : test final. Exemples de syllogismes.

Tableau H14 : Expérience 10, exemple des 12 premiers syllogismes présentés aux participants.

Ordre	Type de syllogisme	Validité	Exemples de syllogismes
1	Figure 2 AII	invalide	Tous les volumes de Barry se calculent par $\sum(Rx-1 /5\pi)$, Or quelques volumes de disphénoïde se calculent par $\sum(Rx-1 /5\pi)$, Donc quelques volumes de disphénoïde sont des volumes de Barry.
2	Figure 1 AII	valide	Toutes les équations de Foster sont de type $x=\sqrt{(5b-6y)}$, Or quelques formules de Jyrog sont des équations de Foster, Donc quelques formules de Jyrog sont de type $x=\sqrt{(5b-6y)}$.
3	Figure 3 AOO	invalide	Toutes les géométries brachéennes sont de type $f(N-1)$, Or quelques géométries brachéennes ne sont pas des géométries terramèdres, Donc quelques géométries terramèdres ne sont pas de type $f(N-1)$.
4	Figure 2 AOO	valide	Toutes les aires de Nold se calculent par $(2/\pi)\cos(\pi x)$, Or quelques aires d'octaèdres lambiques ne se calculent pas par $(2/\pi)\cos(\pi x)$, Donc quelques aires d'octaèdres lambiques ne sont pas des aires de Nold.
5	Figure 3 AII	valide	Tous les volumes de Sanger ont $3+x(x-1)$ arêtes, Or quelques volumes de Sanger sont des vibroèdres, Donc quelques vibroèdres ont $3+x(x-1)$ arêtes.
6	Figure 1 AOO	invalide	Toutes les équations hybris ont la forme $[x/(x+2)]+[2/(x-1)]$, Or quelques équations zolter ne sont pas des équations hybris, Donc quelques équations zolter n'ont pas la forme $[x/(x+2)]+[2/(x-1)]$.
7	Figure 1 AII	valide	Tous les polyèdres de Hat ont $7(n-1)$ demi-espaces, Or quelques cubocaoïdes sont des polyèdres de Hat, Donc quelques cubocaoïdes ont $7(n-1)$ demi-espaces.
8	Figure 3 AII	valide	Tous les volumes d'Arcq se calculent par $\delta/\delta x+V$, Or quelques volumes d'Arcq sont des volumes yctans, Donc quelques volumes yctans se calculent par $\delta/\delta x+V$.
9	Figure 2 AOO	valide	Tous les angles d'un hectomètre sont égaux pour $\sum\Delta(5x-1)$, Or quelques angles d'une figure ϕ ne sont pas égaux pour $\sum\Delta(5x-1)$, Donc quelques angles d'une figure ϕ ne sont pas les angles d'un hectomètre.
10	Figure 2 AII	invalide	Toutes les aires de Hastor se calculent par $3(x+2\pi)$, Or quelques aires de volgoïdes se calculent par $3(x+2\pi)$, Donc quelques aires de volgoïdes sont des aires de Hastor.
11	Figure 3 AOO	invalide	Tous les vecteurs Nondin se calculent dans un référentiel ternaire, Or quelques vecteurs Nondin ne sont pas des vecteurs Armil, Donc quelques vecteurs Armil ne se calculent pas dans un référentiel ternaire.
12	Figure 1 AOO	invalide	Toutes les équations spatiales H contiennent le terme $8\eta+x$, Or quelques termes de Joze ne sont pas des équations spatiales H, Donc quelques termes de Joze ne contiennent pas le terme $8\eta+x$.

Annexe I : Résultats complémentaires expérience 10 - Influence du type de connaissances et de la phase de réponse.

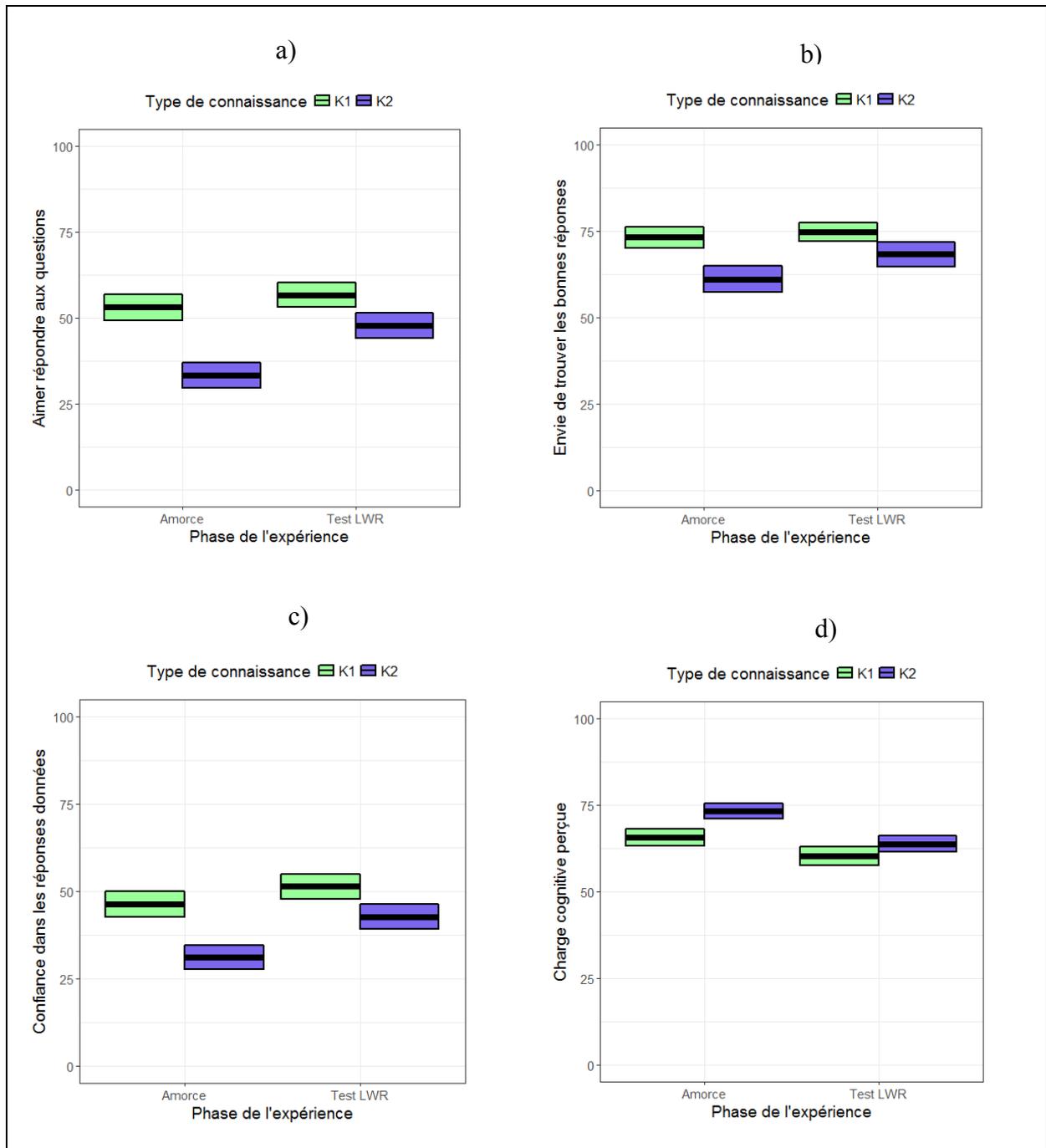


Figure I6 : Représentation des scores (a) du fait d’aimer répondre aux questions, (b) d’avoir envie de trouver les bonnes réponses, (c) de confiance dans les réponses données et (d) de charge cognitive perçue en fonction du type de connaissances utilisé en phase d’amorce et de la phase de l’expérience. Les boîtes représentent la moyenne et 95% de l’intervalle de confiance.