



HAL
open science

Optimisation des apprentissages : modèles et mesures de la charge cognitive

Sébastien Puma

► **To cite this version:**

Sébastien Puma. Optimisation des apprentissages : modèles et mesures de la charge cognitive. Psychologie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2016. Français. NNT : 2016TOU20058 . tel-01735371

HAL Id: tel-01735371

<https://theses.hal.science/tel-01735371v1>

Submitted on 15 Mar 2018

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.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse - Jean Jaurès

Présentée et soutenue par :
Sébastien Puma

le mardi 13 septembre 2016

Titre :

Optimisation des apprentissages: Modèles et mesures de la charge cognitive

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED CLESCO : Psychologie

Unité de recherche :

Laboratoire Cognition Langues Langage Ergonomie, CLLE-LTC, UMR-CNRS 5263

Directeur/trice(s) de Thèse :

André Tricot (Professeur à l'Université de Toulouse2)

Nadine Matton (Enseignante-Chercheuse à l'ENAC)

Jury :

Valérie Camos (Professeure à l'Université de Fribourg)

Eric Jamet (Professeur à l'Université de Rennes 2)

Guy Boy (Professeur au Florida Institute of Technology)

Claudette Mariné (Professeure à l'Université de Toulouse 2)

Remerciements

En premier lieu, merci à Valérie Camos et Éric Jamet d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, et merci à Guy Boy et Claudette Mariné d'avoir accepté d'être membre du jury.

Je voudrai également remercier mes directeurs de thèse, André Tricot et Nadine Matton. Merci pour tout ce que vous avez fait, votre patience, vos conseils, votre bienveillance et les nombreuses qualités humaines dont vous avez fait preuve tout au long de ces dernières années. Nous nous avons commencé notre chemin ensemble dans des circonstances particulières et c'est grâce à vous que le chemin a continué. Toutes ces choses que les mots ne suffisent pas à exprimer.

Je voudrai également remercier les personnes qui ont permis cette thèse, tant dans la gestion du laboratoire, avec un particulier merci à Emmanuelle Tena et Bruno Chenu, qu'au sein de l'UFR, de l'ED et de l'ESPE. Merci également aux directeurs du laboratoire, Jean François Bonnefon et Hélène Giraud, réaliser cette thèse au CLLE-LTC était une chance.

Merci aux collègues et amis du laboratoire, de l'UFR et de l'ESPE, qui m'ont accueilli, orienté, conseillé, toujours avec bienveillance et toujours de bons conseils. Un grand merci à Jean François Camps, qui m'a accueilli à l'ESPE, pour ta disponibilité et pour toutes ces conversations, ces conseils, ces relectures, le soutien et le sens de l'humour naturel. Travailler avec toi était un vrai plaisir.

Merci aux responsables des UE sur lesquelles j'ai pu intervenir, Rui da Silva Neves, Agnès Daurat et Patrice Terrier à l'Université et Jean François Camps et Nathalie Panissal à l'ESPE, qui m'ont fait confiance en me donnant l'opportunité de découvrir l'enseignement.

Merci aux doctorants du laboratoire, ceux qui m'y ont accueilli, Hakim, Bastien, Adeline, Marco et Stan comme ceux qui sont arrivés ensuite, Aurélie, Michel, Jordan, Yovan. Et un merci aux amies qui ont commencé leur thèse en même temps que moi, amies des bons et des mauvais moments, Julie et Pauline. Partager ces moments, bons et mauvais, ces repas toujours animés, ces interrogations et réflexions sur le sens de la vie. Merci à Julie pour ces moments partagés de doutes, de convictions, de frustration et de joies qui font les discussions entre doctorants. Et merci à Aurélie, qui a repris le flambeau des engagements.

Merci à Pierre Vincent Paubel, pour toutes ces conversations, tu as su rendre le concept de dissonance cognitive omniprésent, pour le soutien tout au long de ces dernières années,

soutien moral, technique aussi, tu as rendu toutes les folies dans lesquelles nous nous sommes engagés possible. Tu fais partie des amis qui ont rendu cette thèse possible.

Merci infiniment à Arnaud et Sarah qui ont relu cette thèse et y ont contribué de bien des manières différentes. Merci également à Mathilde et Clara qui ont relu d'autres parties et ont donné des conseils de mise en forme. Merci à Gilles Devreux, pour les macros, la mise en forme et le soutien logistique.

Merci à Radouane El-Yagoubi, qui m'a formé et m'a guidé depuis la première année de master, qui m'a aidé depuis et est resté un mentor. Merci donc à Radouane, mais aussi à Rui da Silva Neves, Gabriel Besson et Emmanuel Barbeau, qui m'ont accompagné lors de mes premiers pas dans la recherche, il y a quelques années déjà.

Merci à Inès Brulard-Carr, pour ses relectures anglophones, ses conseils et son soutien, et à Robert Ruiz pour sa patience et pour ses conseils tant sur le traitement du signal que sur le reste.

Merci à mes étudiants qui m'ont permis de réaliser à quel point l'enseignement est un bel aspect de la thèse. Si j'ai compris quelque chose en psychologie, c'est en essayant de vous l'enseigner.

Merci enfin, à ces enseignants qui m'ont fait découvrir les sciences cognitives et m'ont donné envie de continuer dans cette voie, Ophélie Carreras et Julie Lemarié en particulier, qui m'ont fait découvrir la psychologie cognitive.

Aux explorateurs de la seule certitude l'homme.

À ma famille, mes amis et Anaïs, sans vous, il n'y a toujours rien de possible.

Résumé

L'apprentissage permet d'acquérir les connaissances nécessaires à l'adaptation au monde. L'importance de cette activité est telle qu'une grande partie des sociétés actuelles ont développé des institutions dédiées aux apprentissages, comme les écoles. La théorie de la charge cognitive (CLT) permet de considérer l'investissement des ressources cognitives lors d'apprentissages scolaires : son ambition est d'identifier les techniques qui optimisent l'utilisation des ressources cognitives pour améliorer les apprentissages. Cependant, cette théorie présente deux limites majeures, l'une théorique, l'autre méthodologique. D'un point de vue théorique, la CLT utilise des modèles de la mémoire de travail et de l'attention pour décrire les ressources cognitives utilisées lors des apprentissages. Ces modèles ne permettent pas de prendre en compte les variations de l'utilisation des ressources cognitives au cours du temps. L'autre limite de la CLT est méthodologique : non seulement elle ne propose pas de mesure fiable de la charge cognitive, mais les mesures qu'elle propose ne prennent pas en compte les variations de charge au cours du temps.

Pour répondre à ces limites, nous proposons d'utiliser des mesures physiologiques et un nouveau modèle de la mémoire de travail, le modèle TBRS (*Time Based Resource Sharing*). Les mesures physiologiques permettent d'analyser les variations temporelles de la charge cognitive. Le modèle TBRS, en prenant en compte l'allocation dynamique du focus attentionnel, devrait permettre de rendre compte de différents résultats empiriques obtenus dans le cadre de la CLT, inexplicables aujourd'hui car la théorie ne prend pas en compte le temps. Cependant, le modèle TBRS n'a encore jamais été utilisé avec du matériel signifiant, pouvant être regroupé sous forme de *chunks*. L'objectif de ce travail de thèse est donc d'étudier l'apport des mesures physiologiques et du modèle TBRS à la théorie de la charge cognitive.

Pour répondre à la question de la mesure de la charge cognitive, une première expérimentation, ensuite répliquée, a utilisé une épreuve du concours de l'ENAC (École Nationale d'Aviation Civile). Les participants devaient réaliser un nombre de tâches concurrentes croissant (de 1 à 4) puis une exigence métacognitive était rajoutée (priorisation des tâches). Pendant toute la durée de l'expérimentation, l'activité cérébrale (électro-encéphalogramme, *EEG*) et l'activité oculaire (*Eye-tracking*) étaient enregistrées. Ensuite, une série de quatre expérimentations a tenté de répondre à la question théorique de la thèse, portant sur l'utilisation du modèle TBRS dans le cadre de la CLT. Ces expérimentations ont

commencé par la réplique d'une étude princeps du modèle TBRS (expérimentation 2 et 3), en remplaçant les items à mémoriser par des items pouvant être regroupés en *chunks* (les termes d'un calcul). Les deux expérimentations suivantes (4 et 5) ont testé les prédictions permises par le modèle TBRS. Enfin, une sixième expérimentation a utilisé des mesures physiologiques pour étudier les variations de charge cognitive des participants lors d'un protocole similaire à celui des quatre expérimentations précédentes.

Les résultats de ces six expérimentations montrent que le modèle TBRS et les mesures physiologiques sont non seulement compatibles avec la CLT mais qu'elles l'enrichissent.

Mots clés :

Charge cognitive ; Apprentissages ; Mémoire de travail ; Mesures physiologiques

Abstract

Learning allows you to gain the necessary knowledge to adapt to the world. This activity is so important that most societies have actually developed institutions such as schools dedicated to learning. Cognitive load theory takes into consideration cognitive resources invested during school learning. This theory is invoked in order to highlight the skills which enhance the use of cognitive resources during learning sessions. However, two main limitations can be identified: a theoretical one and a methodological one. From a theoretical perspective, CLT invoke working memory and attention models to describe the cognitive resources used during learning and these models do not take time into account. The other limit is related to methodology: CLT doesn't offers reliable measures of cognitive load in the sense that these measures don't take cognitive variations over time.

Taking into consideration these limitations, we suggest the use of physiological measurement and a new working memory model: the TBRS (Time Based Resource Sharing). Physiological measurement is a mean to analyze the temporal variations implied by the cognitive load. The TBRS model, by taking into account the temporal variation of the attentional focus allocation should serve as an explanation to several CLT empirical results, unexplained nowadays due to the lack of a proper model. However, the TBRS has not yet been used with meaningful items, which could be gathered into chunks. Thus, the aim of the present work is to study the benefits of using physiological measurement and the TBRS model with CLT.

To address the question of cognitive load measurement, a first experiment used a task included in the ENAC's (École Natioanl d'Aviation Civile) recruitment selection process. Participants had to manage an increasing number of concurrent tasks, rising from 1 to 4 and then an additional metacognitive demand was added (task prioritization). During the experiment, cerebral activity (electroencephalogram, EEG) and eye movements (Eye-tracking) were recorded. Another series of four experiments stressed the theoretical question of the use of the TBRS model in CLT research. These experiments began by replicating a previous study using the TBRS model (experiments 2 and 3), replacing items to be held in memory by meaningful items which could be chunked. The other two experiments tested two other assumptions of the TBRS model. Finally a sixth experiment used physiological measures to assess cognitive load variations while participants performed a protocol similar to the previous experiments.

Results from these six experiments show that TBRS model and physiological measurement are consistent with CLT and also complete its findings.

Keywords:

Cognitive load; Learning; Working memory; Physiological measurement

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Mots clés :	iv
Abstract	v
Keywords:	vi
Introduction	1
Chapitre 1 Définitions et problématique	3
1.1 Définitions des apprentissages	3
1.2 Apprentissages explicites et ressources cognitives	4
1.3 La charge cognitive	5
1.4 Fonctions cognitives associées aux ressources	7
1.5 Problématique.....	8
Chapitre 2 La théorie de la charge cognitive.....	11
2.1 Deux types de connaissances et de stratégies.....	12
2.2 Fondements de la théorie de la charge cognitive	14
2.3 L'utilisation des ressources cognitives dans le cadre de la CLT.....	20
2.4 Limites de la Théorie de la Charge Cognitive.....	23
Chapitre 3 Les déterminants cognitifs de la charge	27
3.1 Mémoire à court terme et Mémoire de Travail	28
3.1.1 Rapidité de l'oubli	29
3.1.2 Capacité limitée de la mémoire à court terme	30
3.1.3 Le codage de l'information en mémoire	31
3.1.4 Le modèle de Baddeley	33
3.1.5 La mémoire de travail à long terme	37
3.1.6 Mémoire de travail et études en neuro-imagerie	38
3.1.7 L'unité d'information en neurosciences : neurones ou groupes de neurones	40
Conclusion.....	42
3.2 Les ressources attentionnelles	43
3.2.1. Attention et vigilance	44
3.2.2 Attention perceptive : la sélection de l'information.....	45
3.2.3 Attention et traitement de l'information.....	49

3.2.4 Des modèles de l'attention	52
Conclusion.....	53
3.3 Intégrer attention et mémoire de travail : le modèle TBRS	55
3.3.1 Des questions.....	55
3.3.2 Des hypothèses	57
3.3.3 Un modèle de la mémoire de travail	62
3.3.4 La charge cognitive dans le modèle TBRS	64
Conclusion.....	67
Chapitre 4 Expertise et stratégies	69
4.1 L'expertise.....	69
4.1.1 Domaine d'expertise.....	71
4.1.2 Perception experte	72
4.1.3 <i>Chunks</i> experts	73
4.1.4 Mémoire de travail et mémoire à long terme	75
4.1.5 Vitesse de traitement et procéduralisation.....	77
4.1.6 Profondeur de traitement	79
4.1.7 Corrélats physiologiques de l'expertise	79
Conclusion.....	81
4.2 Les stratégies	82
4.2.1 L'analyse moyen-fin	82
Conclusion.....	85
Chapitre 5 Les différentes mesures de la charge mentale	87
5.1 La charge mentale, un problème de mesures ?.....	87
5.2 Les mesures comportementales.....	88
5.3 Les mesures subjectives	91
5.4 Les mesures physiologiques.....	92
5.4.1 L' <i>eye-tracking</i>	93
5.4.2 EEG	96
5.5 Combinaisons de mesures	101
Conclusion.....	102
Chapitre 6 Conclusion théorique.....	105
Chapitre 7 Mesures physiologiques de la charge cognitive	111
Partie 1 : mesure électro-encéphalographique de la charge cognitive	111

Introduction	111
Méthodologie	116
Résultats	119
Discussion	124
Partie 2 : Les « <i>Fixation Locked Spectral Analysis</i> », une mesure de la réalisation de la tâche dans une situation de multitâches.	129
Introduction	129
Méthodologie	132
Résultats	135
Discussion	139
Discussion générale.....	141
Chapitre 8 Utiliser le modèle TBRS dans le cadre de la CLT	143
Expérimentation 2	145
Introduction	145
Méthodologie	148
Résultats	152
Discussion	153
Expérimentation 3	154
Introduction	154
Méthodologie	155
Résultats	157
Discussion	159
Expérimentation 4	162
Introduction	162
Méthodologie	164
Résultats	166
Discussion	168
Expérimentation 5	170
Introduction	170
Méthodologie	173
Résultats	175
Discussion	177
Discussion générale.....	178
Chapitre 9 Modèle TBRS et mesures physiologiques.....	183

Introduction	183
Méthodologie	186
Participants	186
Matériel	186
Méthode.....	186
Protocole expérimental.....	187
Traitement du signal.....	188
Variables dépendantes et statistiques	189
Résultats	190
Données comportementales.....	190
Rythme thêta	192
Rythme alpha.....	196
Discussion	200
Discussion	205
Conclusion.....	209
Bibliographie.....	211
Table des illustrations.....	I
Table des tableaux	II

Partie théorique

“On se lasse de tout, excepté d'apprendre.” (Virgile)

Introduction

Les apprentissages représentent un des aspects les plus fondamentaux de la vie humaine, car ils sont le premier outil d'adaptation au monde dont nous disposons. Tous les êtres humains apprennent, souvent sans même y prêter attention, parfois plus difficilement. Parmi tous les apprentissages réalisés par les humains au cours de leur vie, une grande partie est regroupée dans la catégorie des apprentissages académiques. Ces apprentissages académiques occupent une grande place dans le début de la vie des humains, notamment dans les sociétés postindustrielles. Ils représentent un coût élevé pour les apprenants (par le temps qu'ils y consacrent), et pour les états (qui financent les écoles).

Le coût représenté par les apprentissages académiques souligne l'importance de développer des modèles et des méthodes permettant de les optimiser. Cette importance a donné lieu à un courant de recherches en psychologie des apprentissages, l'*instructional design*. Ce champ de recherches en ingénierie a pour objectif d'améliorer l'efficacité des dispositifs d'enseignement, et au-delà, de formation professionnelle.

Au sein des recherches en *instructional design*, la théorie de la charge cognitive occupe une place prépondérante. Elle présente la particularité de s'appuyer sur une architecture cognitive pour proposer des solutions pratiques permettant d'optimiser les apprentissages. Cette théorie a permis de mettre en évidence de nombreux résultats empiriques en décrivant l'utilisation des ressources cognitives, supposées limitées, de l'apprenant lors de ses apprentissages. Cependant, si l'aspect pratique de la théorie de la charge cognitive a déjà permis de nombreux travaux de recherches, elle présente deux limites clairement identifiées, une limite théorique et une limite méthodologique. La limite théorique est liée aux modèles des ressources cognitives utilisés dans le cadre de la théorie de la charge cognitive. La limite méthodologique dépend directement de la première : les mesures actuelles de la charge cognitive ne permettent pas d'évaluer celle-ci de façon fiable.

L'objectif de ce travail de thèse est de proposer une réponse à ces deux limites, en mobilisant un nouveau modèle de la mémoire de travail dans le cadre de la théorie de la charge cognitive. Le modèle du partage temporel des ressources, prenant en compte la dimension temporelle, devrait permettre de répondre à la limite théorique, mais également de proposer une mesure objective et dynamique de la charge cognitive durant un apprentissage. De plus, ce modèle n'ayant jamais été utilisé dans le cadre de la psychologie des apprentissages, il s'agira

Introduction

d'étendre son domaine de validité en le testant sur du matériel pouvant faire l'objet d'une expertise.

Chapitre 1 Définitions et problématique

1.1 Définitions des apprentissages

Dès les premières recherches psychologiques sur les apprentissages, apprendre a été défini comme une modification de son comportement pour s'adapter à son milieu. Dans sa définition la plus simple, apprendre consiste à faire acte de mémoire (Ebbinghaus, 1885, cité dans Nicolas, 1992). Ceci implique d'encoder un stimulus et après une phase de rétention, d'être capable de réactiver la trace mnésique lui correspondant (Tiberghien, 1997). Cette définition met en évidence une distinction entre les apprentissages simples, tels que mémoriser une liste de mots, et les apprentissages complexes, tels que savoir utiliser le théorème de Thalès. Apprendre peut être perçu comme dépendant de la répétition et de la réactivation des traces mnésiques (Thorpe, 2015), mais également de la manipulation de l'information (Craik & Lockhart, 1972), ce qui renvoie généralement à la distinction entre apprentissages implicites et explicites. Dans le cadre de ce document, nous considérerons l'apprentissage comme « une modification des connaissances en mémoire à long terme impliquant une accumulation d'information » (Paas & Sweller, 2005), et comme dépendant d'« une création de liens entre des éléments en mémoire à long terme » (Cowan, 2014).

Cependant, si les apprentissages sont censés permettre une adaptation au milieu, un grand nombre de connaissances enseignées et apprises par les élèves ne servent pas directement ce but. Ainsi, le théorème de Pythagore a une importance modérée en termes de stricte survie en milieu hostile. Il est donc intéressant d'accepter également dans la définition des apprentissages la notion d'acquisition d'une expertise. Apprendre consiste donc à s'adapter à son milieu ou à développer une expertise. L'expertise faisant partie des résultats de l'apprentissage, plus l'apprenant apprend et plus il devient expert. Nous considérerons donc l'expertise non pas comme la marque d'une maîtrise du domaine mais plutôt du point de vue des apprentissages. Il s'agit donc d'un continuum caractérisant les apprenants à n'importe quel stade de leur apprentissage, dès qu'ils peuvent réaliser la tâche plus efficacement que les novices (van Gog, Paas, Marcus, Ayres & Sweller, 2009). Le développement de l'expertise (voir chapitre 4) a plusieurs avantages dans le cadre des apprentissages. Premièrement l'expertise permet de réduire le coût associé à la réalisation d'une tâche. Plus l'apprenant développe son expertise et plus il va lui être facile de manipuler des informations relatives à son domaine d'étude. De la même manière, le développement de l'expertise permet de

bénéficier d'une plus grande quantité de ressources cognitives lorsque l'on traite de son domaine d'expertise (voir le chapitre 3 et plus particulièrement le point 3.1.5). Ainsi, plus l'apprenant développe de connaissances dans son domaine d'apprentissage et plus il aura de ressources disponibles en grande quantité pour réaliser des tâches moins coûteuses.

Ces deux possibilités renvoient à une autre dualité dans le cadre des apprentissages. En effet, certains apprentissages sont implicites tandis que d'autres sont explicites. Les apprentissages implicites sont des situations d'apprentissages durant lesquelles l'apprenant n'a pas conscience d'apprendre. Un grand nombre de situations peut être inclus dans cette catégorie, car de nombreux apprentissages précoces se font inconsciemment (apprendre à percevoir des visages par exemple). Généralement ces apprentissages ne requièrent pas d'enseignant au sens où un individu transmet une connaissance à un autre, puisqu'ils s'opèrent de manière non-consciente. De la même manière, ils sont généralement peu coûteux cognitivement parlant (Cleeremans, Destrebecqz & Boyer, 1998). Les apprentissages explicites sont ces situations dans lesquelles l'apprenant s'engage délibérément dans la démarche d'apprentissage. Ces situations sont généralement coûteuses en ressources cognitives et en temps, nécessitant l'intervention d'un enseignant dans le cadre d'apprentissage par instruction ou nécessitant du temps dans le cas d'apprentissage par essais-erreurs.

1.2 Apprentissages explicites et ressources cognitives

Les ressources cognitives nécessaires aux apprentissages explicites ne sont disponibles qu'en quantité limitée (*e.g.*, Broadbent, 1958). Cette notion de capacité limitée est une des notions les plus centrales en psychologie cognitive et pourtant reste difficilement appréhendée (Cowan, Rouders, Blume & Sauls, 2012). Ces ressources, nécessaires lors des apprentissages explicites impactent directement la capacité à apprendre des individus. Ainsi plus un apprenant dispose de grandes quantités de ressources cognitives, plus il apprendra rapidement (voir Corbin & Camos, 2013 pour une revue). De la même manière, plus l'utilisation que fait l'apprenant de ses ressources est optimale, et plus il apprendra facilement (Corbin, Moissenet & Camos, 2012). Ainsi, une plus grande quantité de ressources cognitives disponibles ou une utilisation plus optimale de ces ressources sont des facteurs permettant d'améliorer la qualité des apprentissages.

Si la stratégie d'utilisation des ressources cognitives a un effet sur la qualité des apprentissages, alors la présentation de l'information, en orientant le choix des stratégies, doit également avoir un effet sur l'apprentissage (voir chapitre 2). L'étude de la manière de

présenter l'information, en tenant compte des caractéristiques et des ressources des apprenants a donné lieu à un champ de recherche, l'*instructional design* (Joyce & Weil, 1972 ; cité dans Legros, Maitre de Pembroke & Talby, 2001). Ce champ de recherche a pour objectif d'étudier et de réduire l'investissement des ressources cognitives nécessaires pour réaliser un apprentissage donné. Un cadre théorique très utilisé dans le domaine de l'*instructional design*, la théorie de la charge cognitive (Sweller, van Merriënboer & Paas, 1998), décrit l'investissement des ressources cognitives selon trois types de charges distincts (voir chapitre 2). Selon ce cadre théorique, les ressources cognitives des apprenants, disponibles en quantité limitée, peuvent être sollicitées par différents aspects de la tâche d'apprentissage. Si la tâche d'apprentissage sollicite davantage de ressources que celles que l'apprenant a à sa disposition, l'apprentissage sera moins efficient. L'enseignant devra donc présenter les informations nécessaires aux apprentissages de la manière la plus efficace possible pour permettre un apprentissage le meilleur possible.

Le nom même de cette théorie renvoie à la notion de charge cognitive. Ainsi, la théorie de la charge cognitive (CLT pour Cognitive Load Theory) permet de décrire l'investissement des ressources cognitives lors de la réalisation d'une tâche d'apprentissage (Sweller, 1988). Ces ressources cognitives, selon la CLT sont réparties en trois catégories de charges cognitives (Sweller, Van Merriënboer & Paas, 1998).

1.3 La charge cognitive

La sollicitation des ressources cognitives lors de la réalisation d'une tâche a été conceptualisée par la notion de charge cognitive, dont la définition *a minima* est « le rapport entre la demande de la tâche et les ressources disponibles » (Cegarra & Chevalier, 2008). À la manière d'une charge physique, cette charge cognitive peut être tout à fait supportable, comme lorsque l'on transporte un objet léger, mais elle peut également devenir trop lourde. Dans ce cas, on parle de surcharge cognitive. Comme cet aspect de surcharge dépend des tâches réalisées pour un individu donné ou de l'individu réalisant une tâche donnée, la suite de ce document utilisera le terme de charge cognitive pour décrire la charge et la surcharge cognitive indifféremment.

En effet, l'étude des facteurs humains étant davantage focalisée sur les situations à risque que sur celles dans lesquelles tout se déroule bien, le terme de charge cognitive est généralement associé à la surcharge cognitive, bien que toute activité impose une certaine charge. Cette distinction entre charge et surcharge est particulièrement appropriée dans le domaine des

apprentissages. Dans ce domaine, la surcharge cognitive a des effets particulièrement délétères mais un minimum de charge cognitive est nécessaire (voir chapitre 2). Cependant, les ressources cognitives ne sont pas les seuls facteurs affectant l'efficacité des apprentissages.

Distinction entre charge cognitive et charge mentale

Si la charge cognitive peut être considérée comme la part des ressources d'un individu requises pour réaliser une tâche (les ergonomes rajouteront « dans un environnement donné »), d'autres facteurs peuvent influencer la réalisation de la tâche. Ces facteurs recouvrent des notions qui ne font pas directement partie des ressources cognitives, tels que la vigilance, la motivation (ou les motivations) ou encore les émotions (voir Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 pour une revue). L'ensemble de ces facteurs constitue la charge mentale, c'est-à-dire la charge composée de tous les facteurs affectant l'opérateur lors de la réalisation d'une tâche (voir Jex, 1988, pour une discussion de cette définition).

Une grande partie des recherches en psychologie ergonomique s'est attachée à définir cette charge mentale et à la mesurer (voir chapitres 5 et 6). Le point de vue de la psychologie ergonomique est que l'on ne peut pas bien considérer la charge mentale sans tenir compte de l'interaction entre l'individu, la tâche à réaliser par cet individu et le contexte de réalisation. De la même manière qu'il faut distinguer ce qui relève de la situation de ce qui relève des ressources de l'individu quand on en vient à analyser une performance donnée, il faut distinguer les ressources cognitives des capacités cognitives et de l'effort (Barrouillet, 1996). Les ressources cognitives correspondent à la quantité de ressources utilisées tandis que la capacité correspond à la quantité de ressources maximales disponibles pour l'individu. L'effort représente la quantité de ressources nécessaires à un individu pour réaliser une tâche de manière optimale.

Sans oublier ou nier l'importance des facteurs non cognitifs à l'œuvre dans le phénomène de charge mentale, la psychologie cognitive se focalise plus principalement sur les déterminants cognitifs de la charge, que l'ergonomie qualifie de ressources. Selon la psychologie cognitive, ces ressources cognitives sont composées de fonctions, éléments constitutifs de la cognition (voir chapitre 3), permettant différents processus cognitifs, tels que la lecture ou l'écriture.

1.4 Fonctions cognitives associées aux ressources

L'ergonomie cognitive fait le lien entre les conceptions des phénomènes décrits comme des ressources dans le cadre de l'ergonomie et comme des fonctions ou des processus dans le cadre de la psychologie cognitive. Ainsi, derrière le terme de ressources cognitives, terme ergonomique, les principales fonctions sollicitées dans la charge cognitive sont l'attention et la mémoire de travail (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 ; voir les chapitres 2 et 3). Aussi, tout en gardant le vocable de ressources cognitives, il faudra définir principalement les notions de mémoire de travail et de ressources attentionnelles comprises dans la notion de ressources cognitives (voir chapitre 3).

De la même manière que la charge cognitive que nous considérerons dans ce document fait l'impasse sur les déterminants non-cognitifs de la charge mentale, les ressources cognitives considérées regroupent l'attention et la mémoire de travail seulement. Il semble évident que ces deux fonctions ne déterminent pas à elles seules la charge cognitive, par exemple la perception peut affecter la charge cognitive d'une tâche (*e.g.*, Lavie, 1995). Ainsi, plus une tâche perceptive est difficile et plus le coût cognitif de la réalisation de cette tâche sera élevé. De la même manière, si une situation complexe implique des traitements perceptifs difficiles en plus de traitements de plus haut niveau (tels que du calcul mental par exemple), le coût global de la tâche sera plus élevé si chacun des traitements est difficile (voir chapitre 7).

La mémoire de travail et l'attention sont deux mécanismes largement étudiés en psychologie cognitive, même si de nombreuses questions restent posées (voir chapitre 3). Ces fonctions ont également été étudiées par les neurosciences, qui apportent des informations sur les corrélats physiologiques et notamment cérébraux de ces fonctions. En apportant des informations complémentaires à l'étude de ces fonctions, les neurosciences contraignent le cadre théorique de l'étude des fonctions cognitives. Ceci a pour effet d'apporter des réponses et des questions nouvelles aux modèles utilisés par la psychologie cognitive (voir chapitre 3).

Ainsi, ce document fait abstraction de notions connexes, telles que les déterminants non-cognitifs de la charge et donc la charge mentale, ou encore sur certaines fonctions autres que la mémoire de travail et l'attention. En revanche, il s'inscrit dans une approche pluridisciplinaire, utilisant des approches d'ergonomie, de psychologie cognitive et de neurosciences.

1.5 Problématique

La théorie de la charge cognitive permet de décrire l'investissement des ressources cognitives lors d'apprentissages, en utilisant des modèles de la mémoire de travail et de l'attention pour décrire ces ressources. Cet investissement varie en fonction de la présentation des informations à apprendre, mais également en fonction de caractéristiques propres à l'apprenant, notamment son degré d'expertise dans le domaine. La CLT a ainsi mis en évidence différents résultats empiriques contre-intuitifs permettant d'améliorer les résultats d'apprentissages. Par exemple, pour des élèves entièrement novices, l'utilisation d'apprentissage par la découverte sollicite davantage les ressources cognitives que l'apprentissage sur la base de problèmes résolus. Ceci a pour conséquence un meilleur apprentissage des élèves novices lorsqu'ils travaillent sur des exemples résolus que lorsqu'ils cherchent la solution d'un problème de découverte (Tuovinen & Sweller, 1999 ; Kirchner, Sweller & Clark, 2006 ; Sweller & Cooper, 1985). Cependant, le cadre théorique fourni par la théorie de la charge cognitive rencontre différentes limites, inhérentes aux modèles des ressources cognitives qu'il utilise (voir chapitre 3). En effet, les recherches dans le cadre de la CLT s'appuient principalement sur le modèle en composantes multiples (Baddeley, 1986) de la mémoire de travail.

Si le modèle de Baddeley a été utilisé pour rendre compte de différents phénomènes empiriques dans le cadre de la CLT (voir Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 pour une revue), ce modèle ne permet pas de prendre en compte des variations dynamiques rapides de la sollicitation de la mémoire de travail. Cette limite du modèle de Baddeley entraîne deux limites pour la CLT, une limite théorique et une limite pratique (Paas, Tuovinen, Tabbers & van Gerven, 2003).

La première, théorique, correspond à l'incapacité de prédire des variations dynamiques de la charge cognitive pendant une session d'apprentissage. En effet, si la CLT permet de décrire la charge cognitive durant une session, ce qui lui permet de mettre en évidence les différences liées à différents formats de présentation, elle ne permet pas de décrire les variations dynamiques de la charge cognitive pendant la session.

La seconde limite, méthodologique, découle de la première et correspond à un problème de mesure de la charge cognitive pendant une phase d'apprentissage. En effet, si la charge cognitive varie pendant la phase d'apprentissage, il est possible qu'une mesure agrégée de ces

variations ne puisse pas rendre compte de la charge cognitive durant la session d'apprentissage (Xie & Salvendy, 2000 ; Paas *et al.*, 2003).

Pour répondre à ces limites, nous proposons l'utilisation d'un nouveau modèle dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, le modèle de partage temporel des ressources (*e.g.*, Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004). Ce modèle, prenant en compte la dimension temporelle de l'utilisation des ressources, pourrait répondre aux limites actuelles de la théorie de la charge cognitive (Spanjers, van Gog & van Merriënboer, 2010 ; van Gog *et al.*, 2009).

L'objectif de ce travail de thèse est de tester la pertinence du modèle de partage temporel des ressources dans un cadre théorique tel que la théorie de la charge cognitive. En particulier, l'expertise entraînant des modifications tant au niveau des ressources cognitives disponibles que de leur utilisation (voir chapitre 4), la question posée par ce travail de thèse est de déterminer si le modèle proposé peut répondre aux limites de la théorie de la charge cognitive soulignées.

D'un point de vue théorique, en précisant les aspects dynamiques de l'allocation des ressources cognitives décrites par la théorie de la charge cognitive, le modèle de partage temporel des ressources peut permettre d'enrichir la définition des types de charges décrites par la CLT. Pour cela, le modèle de la mémoire de travail doit pouvoir expliquer des résultats obtenus en utilisant des éléments rencontrés lors de sessions d'apprentissages, ce qui n'est généralement pas le cas lors d'expérimentations réalisées en laboratoire. Cette question du type de matériel utilisé soulève la question de l'expertise, affectant largement la performance lors d'apprentissages.

Du point de vue méthodologique, l'étude des variations dynamiques de la sollicitation de la mémoire de travail doit permettre une mesure de la charge cognitive. Cette mesure doit toutefois tenir compte de l'expertise des participants pour pouvoir être utilisée dans le cadre des recherches en *instructional design*. De plus, cette mesure doit pouvoir être utilisée dans le contexte de manipulation d'informations pouvant être rencontré lors de phase d'apprentissages.

Chapitre 2 La théorie de la charge cognitive

La théorie de la charge cognitive (CLT, Cognitive Load Theory ; Sweller, 1988 ; 1994) est un cadre théorique permettant de concevoir des situations d'apprentissage par formation ou enseignement (*instructional design*). Il s'agit d'une ingénierie de formation fondée sur des connaissances scientifiques à propos des apprentissages humains et de l'architecture cognitive. Cette théorie s'intéresse à la fois à la présentation des informations, c'est-à-dire à la situation d'apprentissage, et aux processus cognitifs mis en œuvre par les apprenants dans ces situations. Le postulat de départ de la CLT est que les ressources cognitives étant limitées (*e.g.*, Broadbent, 1958 ; Wickens, 2002), un apprenant face une situation d'apprentissage trop exigeante, c'est-à-dire demandant plus que ses ressources ne le permettent, verra son apprentissage limité, voire nul.

Selon la théorie de la charge cognitive, certains apprentissages nécessitent des ressources cognitives, tandis que d'autres n'en nécessitent pas (Sweller, 2015 ; Paas & Sweller, 2012). Ainsi, il devient nécessaire de définir dans quelles situations les apprentissages nécessitent des ressources cognitives (Geary, 2008). De plus, la présentation des informations affecte la quantité de ressources cognitives nécessaires, lorsqu'elles sont nécessaires. Il est donc important de définir quelles sont ces ressources et comment elles sont utilisées. Cette théorie décrit donc les apprentissages sous la forme de différents types de processus concurrents qu'il faut ménager. Dans le cadre de la CLT, « apprendre est une modification des connaissances en mémoire à long terme impliquant une accumulation d'information » (Paas & Sweller, 2005). Il faut ajouter à cette définition une notion forte de la théorie de la charge cognitive : les connaissances sont stockées en mémoire à long terme sous la forme de schémas (Sweller & Chandler, 1994).

En mémoire à long terme, chaque élément de connaissance est lié à d'autres éléments sur la base du sens (on parle alors de connaissance sémantique, Tulving, 1985). Ces connaissances sont généralement verbalisables (ce sont des connaissances déclaratives, Tulving, 1985). Au fur et à mesure que de nouveaux éléments sont appris, ils sont intégrés à un réseau de connaissances, sémantiquement liées (Collins & Quillian, 1969, voir chapitre 3 à ce sujet). L'expérience permet également d'ajouter des éléments de connaissances dans ce réseau. Des épisodes de la vie peuvent former des souvenirs venant renforcer le réseau de connaissances en mémoire à long terme (les connaissances épisodiques, Tulving, 1985). Par exemple, la notion de « chat » peut être intégrée à un réseau sémantique regroupant les notions

« d'animaux » puis avec l'expérience, « d'animaux domestiques ». Si l'apprenant a un chat à la maison, des souvenirs de son chat peuvent venir étoffer le réseau de connaissances relatives aux chats en général. De la même manière, le signe « + » peut être associé au mot « addition » et peut-être à la notion de soustraction. Avec l'apprentissage, les notions de multiplication et de division seront ajoutées au réseau de connaissances. Les schémas stockés en mémoire à long terme contiennent également des règles concernant l'utilisation des éléments (les connaissances procédurales, relatives aux procédures à employer en présence des éléments de connaissances, Tulving, 1985). Les schémas sont donc des ensembles intégrant des connaissances verbalisables, organisées sur la base du sens, et des connaissances sur les actions à réaliser avec ces éléments (Bartlett, 1932). Le chapitre 3 développe davantage les notions de mémoire à long terme et de schémas.

2.1 Deux types de connaissances et de stratégies

Selon les auteurs de la théorie de la charge cognitive, il existe deux catégories de connaissances, les connaissances biologiquement primaires et les connaissances biologiquement secondaires (Paas & Sweller, 2012 ; Geary, 2008). Selon cette hypothèse, les humains auraient évolué pour acquérir de nombreuses compétences, par exemple la perception des visages ou la motricité. Ces apprentissages, parce qu'ils résultent d'un long processus d'évolution de l'espèce, ne nécessiteraient pas de ressources cognitives, plus précisément décrites sous la forme de ressources attentionnelles et de mémoire de travail (voir chapitre 3). Ils seraient implicites dans le sens où ils ne nécessiteraient pas non plus d'enseignement particulier. Ces apprentissages demeureraient néanmoins des apprentissages : si les humains apprennent spontanément à reconnaître des visages, il n'en demeure pas moins qu'il leur faut voir des visages pour apprendre à les reconnaître comme des objets visuels particuliers. La CLT regroupe ces connaissances dans la catégorie des connaissances biologiquement primaires. Parce que ces apprentissages seraient liés à l'évolution et ne nécessiteraient pas de ressources cognitives, ou d'effort particulier, durant leur acquisition, ils ne nécessiteraient pas de situations d'enseignement. Sweller, Ayres et Kalyuga (2011) soulignent qu'il serait même impossible d'enseigner à un enfant à reconnaître un visage, à marcher ou à parler de manière explicite. Par opposition à ces connaissances primaires, qui n'utiliseraient pas de ressources cognitives lors de leur acquisition, les connaissances biologiquement secondaires s'appuieraient sur la mémoire de travail et l'attention pour permettre l'élaboration de schémas et donc les apprentissages.

Il s'ensuit, entre autres, que l'acquisition de ces connaissances biologiquement secondaires représente un coût en termes de ressources cognitives. Ces apprentissages doivent faire l'objet d'un apprentissage explicite, généralement par instruction. Nous regrouperons sous ce terme les apprentissages par enseignement et ceux qui relèvent de la formation. Ces connaissances secondaires pouvant être nécessaires à la vie en société, comme apprendre à lire et écrire, les sociétés où ces connaissances sont nécessaires organisent des structures permettant l'enseignement de connaissances secondaires. À l'inverse, ces connaissances ne sont développées que dans les cultures dans lesquelles elles sont considérées comme importantes (Paas & Sweller, 2012).

La frontière entre connaissances primaires et secondaires n'est pas étanche. Les connaissances secondaires s'appuient largement sur des compétences primaires, comme l'apprentissage de la lecture ne peut se passer de l'apprentissage d'une langue orale. Cependant, on peut apprendre à parler assez spontanément, sans enseignement explicite. Il semble difficilement concevable que l'on puisse apprendre à lire ou écrire sans enseignement spécifique. Ceci plaide en faveur d'une distinction des deux catégories de connaissances. Cette distinction est fondamentale dans le domaine des apprentissages. Il en découle que certaines compétences ne peuvent être enseignées et que d'autres doivent l'être pour construire les schémas correspondants en mémoire à long terme. Cette distinction vient donc poser un éclairage nouveau sur les modalités d'apprentissage par instruction.

De plus, les connaissances primaires sont relatives à des domaines de connaissances généraux tandis que les connaissances secondaires sont relatives à des domaines spécifiques, (*i.e.* sont difficilement généralisables, Sweller, 2015 ; Tricot & Sweller, 2014).

La question de la gestion des ressources cognitives, et de leur utilisation dans le cadre des apprentissages, ne se pose donc que lors d'apprentissages secondaires. Lors de tels apprentissages, l'apprenant utilise ses ressources cognitives (*i.e.* sa mémoire de travail et ses ressources attentionnelles, voir Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 pour revue) pour manipuler les informations à apprendre. Cette conception suppose d'avoir un modèle de la mémoire de travail et de l'attention qui permette d'expliquer et de prédire des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre des apprentissages de connaissances secondaires.

Dans la suite de ce manuscrit, les apprentissages considérés seront des apprentissages secondaires, nécessitant des ressources cognitives et un enseignement explicite.

2.2 Fondements de la théorie de la charge cognitive

Selon le cadre théorique de la CLT, l'apprentissage de connaissances secondaires passe par une réorganisation des connaissances maintenues actives en mémoire de travail. Pour cela, le maintien des éléments à apprendre en mémoire de travail est une condition nécessaire à l'apprentissage. De même, la compréhension nécessite de maintenir les unités d'information actives simultanément en mémoire de travail (Marcus, Cooper & Sweller, 1996). Si les éléments à apprendre sont trop nombreux, alors l'apprentissage sera moins efficace. Cependant, il existe plusieurs aspects de la situation d'apprentissage pouvant affecter la charge en mémoire de travail.

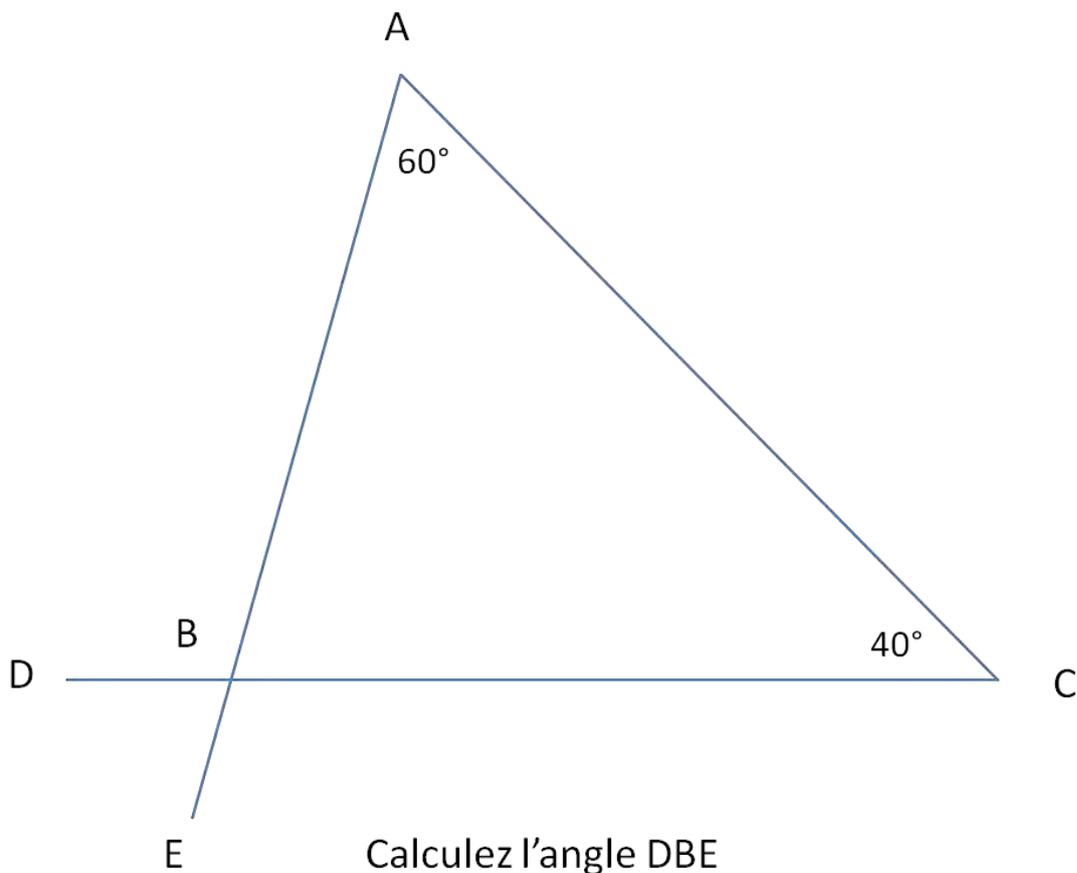
Le premier postulat de la théorie de la charge cognitive est que, lors d'un apprentissage, les ressources cognitives de l'apprenant sont partagées entre différents « postes de dépenses », au nombre de trois. Ces trois types de charges sont la charge intrinsèque, la charge extrinsèque et la charge utile. Elles renvoient à trois aspects de la relation entre l'apprenant, la connaissance à apprendre et la situation d'apprentissage. Ces différentes charges se partagent les ressources, principalement la place en mémoire de travail. Si les ressources nécessaires aux différentes charges dépassent la capacité de la MdT, alors l'efficacité de l'apprentissage sera diminuée. La CLT décrit les situations d'apprentissage en fonction de l'importance des trois « postes de dépenses ». L'apport de cette théorie n'est pas de décrire précisément quel phénomène cognitif renvoie à quel type de charge, puisque nous verrons que certains facteurs peuvent passer d'un type de charge à un autre selon les circonstances (Moreno, 2010 ; De Jong, 2010). En revanche, il s'agit de décrire les situations d'apprentissages par instruction comme composées de différents facteurs, les différentes charges, en interactions entre elles et avec les ressources de l'apprenant. Il s'agit donc pour cette théorie de la conception de situations d'apprentissages par instruction, d'identifier les « postes de dépenses » sur lesquels on peut agir lorsque l'on conçoit la séquence d'apprentissage. La CLT est bien une théorie de l'ingénierie (une science pour agir, comme l'ergonomie) fondée sur des connaissances scientifiques (une science pour expliquer, comme la psychologie).

La charge intrinsèque.

La charge intrinsèque regroupe les éléments à maintenir en mémoire de travail par l'apprenant pour pouvoir réaliser la tâche en cours. Il s'agit de la charge imposée par l'objet de l'apprentissage lui-même. Ainsi, apprendre la structure d'une phrase de type « sujet, verbe, complément » impose de maintenir au moins trois éléments en mémoire de travail. De plus, la

nature des liens entre les éléments doit être maintenue active (par exemple : le sujet est celui qui réalise l'action décrite par le verbe). Cette charge est inhérente à la tâche en cours de réalisation.

Cependant, la difficulté de la tâche en cours peut être réduite pour diminuer la charge intrinsèque et ainsi libérer des ressources pour l'apprentissage. Par exemple, l'effet du problème résolu (Sweller & Cooper, 1985 ; Tuovinen & Sweller, 1999 ; Sweller, 2015) montre que l'on apprend mieux, pour les novices, avec une tâche dans laquelle la solution est donnée que lorsque l'on doit trouver la solution sur la base des seuls éléments de l'énoncé. Travailler un problème dont on a déjà la solution permet d'éviter d'avoir plusieurs éléments à maintenir en mémoire tout en les manipulant (voir Figure 1). À l'inverse, essayer de résoudre le même problème impose d'avoir tous les éléments en mémoire et de les manipuler, ce qui est coûteux en termes de ressources cognitives. Ainsi, il est possible de diminuer la difficulté de la tâche pour permettre d'augmenter les ressources consacrées à l'apprentissage. Toutefois, ceci ne vaut pas pour les apprenants plus avancés, qualifiés d'experts (voir chapitre 4).



•Solution :

•Angle ABC = $180^\circ - \text{Angle BAC} - \text{Angle BCA}$

•La somme des angles d'un triangle est égale à 180°

• $180^\circ - 60^\circ - 40^\circ = 80^\circ$

•Angle DBE = Angle ABC

•Deux angles opposés par le sommet sont égaux.

•DBE = 80°

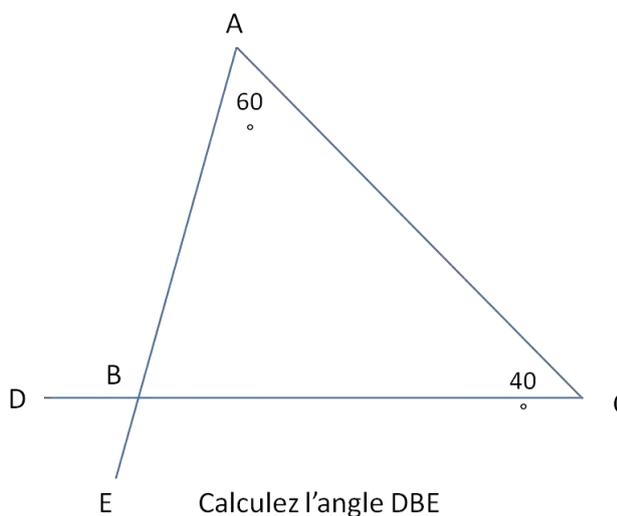


Figure 1. Illustration de l'effet du problème résolu

Les participants ont pour consigne de calculer l'angle DBE. L'effet du problème résolu montre que l'apprentissage est meilleur si la solution du problème est donnée simultanément à son énoncé. Ce résultat est obtenu auprès d'un groupe d'apprenants novices dans le domaine.

Dans l'exemple de l'effet du problème résolu, donner la solution au problème servant de base pour l'apprentissage permet d'éviter aux apprenants d'avoir à maintenir l'intégralité des informations (par exemple « il faut calculer ABC d'abord ») tout en manipulant ces informations pour trouver la solution. Ceci permet de libérer des ressources cognitives pour favoriser la construction de connaissances sous la forme de schémas. Le nombre d'éléments que les apprenants doivent manipuler pour réaliser la tâche définit la difficulté de cette tâche, la charge intrinsèque.

Ainsi, en comptant le nombre d'éléments que l'apprenant doit maintenir actifs en MdT, et les liens entre ces éléments, il est théoriquement possible de définir « l'arité » de la tâche d'apprentissage (Cowan, 2014), c'est-à-dire que l'on peut quantifier le niveau de charge éprouvé par les apprenants (Tricot & Chanquoy, 1996). Le concept d'arité est un terme issu de l'algorithmique définissant le nombre d'arguments que reçoit une fonction, ou le nombre de liens partagés par un élément dans une base de données. Si l'on prend l'exemple d'apprentissage de la construction d'une phrase, dans la phrase « Le chien poursuit le chat » il est nécessaire de maintenir actifs les trois éléments et le lien entre ces éléments (le chien poursuit et le chat est poursuivi), ce qui représente cinq éléments en mémoire de travail.

Cependant, le nombre d'éléments à maintenir actifs en mémoire de travail n'est pas complètement fixé pour une tâche. En effet, en fonction du niveau d'expertise des apprenants

pour le domaine d'étude, un élément actif en MdT peut contenir plus ou moins d'informations (e.g., Miller, 1956 ; Ericsson & Kintsch, 1995). Ainsi, pour des apprenants ayant déjà des connaissances dans le domaine à apprendre, la structure « sujet - verbe - complément » peut être contenue en entier dans un seul élément en MdT, tandis que des novices (par exemple des étrangers découvrant la langue) ne sont pas capables de regrouper ces éléments dans un seul item. Ainsi, la charge intrinsèque n'est pas fixée pour une tâche donnée, mais est plutôt fixée pour une tâche donnée pour un individu donné (voir Schnotz & Kürschner, 2007 pour une discussion).

De la même manière, lorsque l'on diminue la charge intrinsèque en diminuant la difficulté du problème, il est possible d'argumenter que l'on a changé la tâche ; ainsi, ce ne serait pas tant la difficulté de la tâche que sa nature même qui est modifiée dans le cadre de l'effet du problème résolu : dans l'exemple ci-dessus, on passerait d'une tâche de résolution de problème à une tâche de compréhension de la solution d'un problème (De Jong, 2010, pour une discussion de ce point). Au plan psychologique cela constitue un obstacle majeur (on compare des choses qui ne sont pas comparables) tandis qu'au plan de l'ingénierie pédagogique cela n'a aucune importance (la seule chose importante est qu'au bout du compte l'apprentissage soit plus efficace).

Cette relativité du nombre d'éléments composant la charge intrinsèque en fonction du niveau d'expertise de l'apprenant, ou de son niveau de connaissances antérieur, rappelle la distinction établie par Barrouillet (1996) entre ressources, capacités et effort (voir chapitre 1). Si l'on veut pouvoir établir différents niveaux de difficulté pour une tâche donnée, il faut alors accepter que l'effort à fournir par les participants soit variable en fonction de leurs caractéristiques. À l'inverse, si l'on considère la charge intrinsèque comme l'effort à fournir par les participants pour réaliser une tâche donnée, il faut considérer que l'arbité, la difficulté absolue de cette tâche puisse varier (De Jong, 2010 ; Schnotz & Kürschner, 2007).

La charge extrinsèque.

Ce deuxième type de charge désigne tous les éléments qui vont être maintenus en mémoire de travail mais qui ne sont pas directement nécessaires à l'apprentissage. Ainsi, tout élément présent dans la situation d'apprentissage ne concourant pas directement à la formation de connaissances en mémoire à long terme est défini comme appartenant à la charge extrinsèque. Le plus souvent ces éléments désignent des aspects de la présentation de l'information (i.e. du matériel à apprendre) conçus de manière non optimale. L'objectif de la théorie de la charge

cognitive est donc généralement de faire diminuer la charge extrinsèque en proposant des façons de présenter l'information de la manière la plus simple possible pour ne pas augmenter les traitements à réaliser ou le nombre d'éléments à maintenir actifs en MdT.

En effet, les informations relevant de la charge intrinsèque et celles relevant de la charge extrinsèque sont en compétition pour les ressources cognitives de l'apprenant. Si ce dernier doit maintenir actifs les éléments nécessaires à la réalisation de la tâche en cours ainsi que des éléments non pertinents pour l'apprentissage, la place en mémoire de travail disponible pour la charge intrinsèque est réduite. La réduction de la charge extrinsèque, *i.e.* de la place en mémoire de travail occupée par des éléments non nécessaires à la réalisation de la tâche, permet alors de libérer des ressources au bénéfice des éléments pertinents pour l'apprentissage (*e.g.*, Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011).

La charge extrinsèque regroupe généralement tous les éléments issus d'une présentation de l'information de mauvaise qualité. Par exemple, présenter la même information à la fois à l'écrit et à l'oral, ou encore le commentaire d'un schéma visuel à l'écrit à côté du schéma et à l'oral entraîne des traitements supplémentaires de la même information et donc constitue une source de charge extrinsèque (Chandler & Sweller, 1991 ; Kalyuga, Chandler & Sweller, 1999 ; mais voir Le Bohec & Jamet, 2001). Si l'on reprend l'exemple de l'effet du problème résolu, présenter la figure seulement et expliquer aux élèves les étapes de la résolution du problème permet un apprentissage plus efficace que de leur présenter à la fois la figure et les explications écrites (Ginns, 2005 ; Leahy & Sweller, 2011 pour revues).

La charge cognitive extrinsèque regroupe donc tous les éléments que l'apprenant doit traiter et qui ne sont pas directement utiles à la formation de schémas en mémoire à long terme. Cependant, comme décrit plus loin, certains formats de présentation peuvent être parfaitement adaptés à des apprenants novices et imposer une certaine charge extrinsèque à des apprenants plus experts (Kalyuga, Ayres, Chandler & Sweller, 2003).

De la même manière, certains formats de présentation rajoutant des informations peuvent être considérés comme relevant de la charge extrinsèque. De tels formats, comme l'ajout d'un diagramme, contraignent l'apprenant à manipuler des informations supplémentaires, mais aussi à réaliser des liens entre elles, résultant en une augmentation de la charge utile (De Jong, 2010). La charge extrinsèque est donc difficile à distinguer des deux autres types de charges, puisqu'elle dépend elle aussi à la fois de la tâche et des caractéristiques de l'apprenant (De Jong, 2010 ; Gerjets, Scheiter & Cierniak, 2009).

La charge utile.

La charge utile désigne les ressources cognitives dédiées à la construction de schémas en mémoire à long terme, c'est-à-dire à l'apprentissage lui-même. Selon la CLT, toutes les ressources utilisées lors du transfert d'informations de la mémoire de travail vers la mémoire à long terme relèvent de la charge utile. De la même manière, tous les traitements réalisés sur les informations maintenues en mémoire de travail et permettant d'améliorer l'efficacité de l'apprentissage relèvent de ce type de charge (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). Ceci rejoint d'autres travaux réalisés en psychologie cognitive, comme l'effet de la profondeur de traitement (Craik & Lockhart, 1972 ; Craik & Tulving, 1975). Cet effet met en évidence qu'une information est d'autant mieux mémorisée que les traitements effectués au moment de l'encodage sont profonds (*i.e.* des traitements plus sémantiques). Dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, ces traitements relèvent directement de la charge utile.

Comme tous les traitements réalisés en mémoire de travail (voir le chapitre 3), ces traitements nécessitent des ressources cognitives (Cowan, 2014) et donc imposent une certaine charge cognitive. Les ressources cognitives sont d'abord partagées entre charge intrinsèque et charge extrinsèque (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). S'il reste des ressources disponibles, alors celles-ci peuvent être allouées à la charge utile, responsable du passage en mémoire à long terme, et ainsi de l'apprentissage. Comme chacun de ces types de charge est en compétition avec les autres pour la capacité en mémoire de travail, ces trois charges sont dans une relation « additive » (Sweller, Paas & van Merriënboer, 1998 ; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). Par exemple, si la charge intrinsèque nécessite de maintenir trois éléments en mémoire de travail et que la charge extrinsèque impose un élément supplémentaire, alors l'apprenant doit maintenir quatre éléments en mémoire de travail pour réaliser la tâche. Si la capacité de la mémoire de travail de l'apprenant est supérieure, alors il restera des ressources pour la charge utile, sinon l'apprentissage sera largement diminué, voire empêché.

Interactivité des éléments dans la théorie de la charge cognitive

Certains éléments peuvent être manipulés séquentiellement, afin de réduire la charge imposée en mémoire de travail à chaque instant. Cependant, il arrive que deux, ou plus, éléments doivent être manipulés simultanément en raison de leurs liens logiques (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). C'est ce que la théorie de la charge cognitive décrit comme l'interactivité des éléments. Ainsi, apprendre une liste de mots ou d'items présente une interactivité faible car chaque mot ou item peut être appris isolément. À l'inverse, apprendre à résoudre une équation

demande de pouvoir maintenir et traiter simultanément tous les termes de l'équation, ce que la CLT présente comme une interactivité élevée (Chen, Kalyuga & Sweller, 2016 pour cet exemple). Ces éléments peuvent relever de la charge intrinsèque, que la tâche nécessite de manipuler simultanément afin de former de nouveaux concepts par exemple. Le fait de maintenir simultanément des éléments liés entre eux permet de transférer le schéma approprié en mémoire à long terme et de créer une représentation unique de ces éléments.

Lorsque ces éléments relèvent de la charge extrinsèque, ou mélangent des éléments de charge intrinsèque et de charge extrinsèque, la théorie de la charge cognitive implique que réduire l'interactivité des éléments appartenant à la charge extrinsèque permet d'améliorer les apprentissages. Toutefois, un minimum d'interactivité est nécessaire pour que les effets mis en évidence par la CLT soient observés (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 ; Chen, Kalyuga & Sweller, 2015).

2.3 L'utilisation des ressources cognitives dans le cadre de la CLT.

Selon la théorie de la charge cognitive, les « ressources cognitives » utilisées dans le cadre des apprentissages secondaires regroupent majoritairement la mémoire de travail (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 ; Sweller, 1988 ; Sweller, Paas & van Merriënboer, 1998) et l'attention (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 ; voir chapitre 3). Ces ressources permettent de formuler des prédictions sur l'efficacité de différents formats d'enseignement dans le cadre des apprentissages. Ainsi, réduire l'information présentée permet de réduire l'information à traiter en MdT et donc la charge intrinsèque (Kalyuga, Chandler & Sweller, 1999 ; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). De la même manière, un support présentant l'intégralité des informations à traiter, enrichies de couleurs et d'éléments de mises en formes augmentera la charge extrinsèque, en ajoutant des éléments non pertinents à traiter pour la tâche d'apprentissage en cours, dans la mesure où cette charge extrinsèque ne permet pas de réduire les traitements de recherche de l'information pertinente. Par exemple, lire un texte dont des mots ont aléatoirement été mis en gras, italique et dans différentes couleurs est plus coûteux que lire un texte sans mise en forme particulière. En revanche, si les éléments les plus pertinents du texte (idées centrales) sont mis en évidence au moyen de couleurs ou mis en gras ou en italique, alors la compréhension devrait être améliorée en permettant de réduire le coût des traitements de l'information (Lemarié, Lorch, Eyrolle & Virbel, 2008).

Cependant les différentes prédictions que la théorie de la charge cognitive permet de faire sur l'efficacité de différents formats de présentation des informations dépendent grandement du

modèle des ressources cognitives utilisées. Ces conceptions ont évolué en fonction de différents résultats empiriques résultant des travaux réalisés dans le cadre de la CLT depuis sa première formalisation (Sweller, Paas & van Merriënboer, 1998 ; voir aussi Sweller, 1988).

L'effet de modalité

« L'effet de modalité apparaît lorsque l'information à apprendre présentée à la fois de manière visuelle et auditive produit de meilleurs apprentissages qu'une présentation seulement visuelle » (Leahy & Sweller, 2011). Par exemple, présenter un schéma seul produit de moins bons résultats que de présenter le même schéma et d'expliquer à l'oral les éléments le constituant (Ginns, 2005 ; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011, pour des revues). Pour expliquer cette supériorité de la double modalité sur une modalité de présentation seule, la théorie de la charge cognitive utilise le modèle de la mémoire de travail de Baddeley (1986) selon lequel les informations de nature auditive et celles de nature visuelle font l'objet d'un traitement séparé (voir chapitre 3). Le fait que les deux modalités fassent l'objet de traitements distincts implique que si l'information contenue dans les deux registres est strictement identique (*i.e.* lorsque l'on lit un texte que les apprenants peuvent également lire) alors les apprenants vont devoir traiter deux fois la même information, ce qui résulte en une sur-utilisation des ressources cognitives, soit une diminution de l'efficacité de l'apprentissage. C'est l'effet de redondance. Cet effet de redondance correspond à une diminution de la qualité de l'apprentissage lors de la sollicitation des deux modalités. Ceci se retrouve dans une autre catégorie d'effets que nous présentons maintenant.

L'effet de renversement lié à l'expertise

La CLT postule enfin que l'expertise et l'utilisation de stratégies ont un effet non négligeable sur la charge cognitive. Un résultat empirique régulièrement retrouvé dans la CLT est le renversement de plusieurs effets en fonction du niveau d'expertise des participants, de leurs connaissances antérieures (Kalyuga *et al.*, 2003). Plus les apprenants sont experts dans leur domaine d'étude, et plus ils vont être susceptibles d'utiliser d'autres moyens d'apprentissages que les novices. Par exemple, dans le cas de l'effet de modalité, les apprenants experts ont davantage de chances de voir leur performance d'apprentissage diminuer dans le cas de l'utilisation conjointe des deux modalités, visuelle et auditive, si les informations sont hautement cohérentes, tandis que les novices verront leur performance d'apprentissage améliorée. Pour expliquer un tel résultat, la CLT utilise le modèle de la mémoire de travail à long terme (Ericsson & Kintsch, 1995). Selon ce modèle, la mémoire de travail représente la

partie activée de la mémoire à long terme. Ceci implique que les connaissances y soient organisées selon un codage sémantique. Plus l'individu a de connaissances dans le domaine, plus une unité d'information en mémoire de travail contiendra d'informations. De plus, ce modèle postule également que l'activation des traces mnésiques dure d'autant plus longtemps que l'on est expert dans le domaine. Par exemple, alors qu'un élève novice en mathématique doit constamment rafraîchir les termes d'un calcul mental, un expert n'a pas besoin de rafraîchir ces traces aussi souvent, libérant autant de ressources pour réaliser les traitements nécessaires sur ces éléments. Selon le modèle de la mémoire de travail à long terme, les experts peuvent donc regrouper plus d'informations dans un élément à maintenir actif en mémoire de travail, et maintenir ces éléments demande moins d'efforts cognitifs. La théorie de la charge cognitive décrit ce renversement lié à l'expertise comme une réduction de l'interactivité des éléments pour les experts (Chen, Kalyuga & Sweller, 2016). Pour les experts, plusieurs éléments devant être maintenus et manipulés simultanément ne représentent qu'une seule unité d'information.

Ainsi, lorsque des experts se trouvent dans une situation de double modalité, il leur faut traiter deux fois, une fois pour chaque modalité, ce qui pour eux revient au même message. Par exemple, si un apprenant est suffisamment expert dans son domaine pour que tous les éléments de l'énoncé contenus en mémoire de travail ne représentent qu'un seul élément, dans le cas d'une présentation en double modalité, cet apprenant devra maintenir deux éléments au lieu d'un seul dans le cadre d'une présentation visuelle seule. L'effet de modalité devient, avec l'expertise, un effet de redondance.

Synthèse

La théorie de la charge cognitive permet de décrire les situations d'apprentissages complexes (les apprentissages de connaissances dites biologiquement secondaires, intégrant à la fois des connaissances déclaratives et procédurales) selon trois types de charges distincts.

La charge intrinsèque reflète la difficulté de la tâche à réaliser dans le cadre de l'apprentissage. Elle représente la place en mémoire de travail nécessaire pour maintenir les éléments pertinents, mais également les ressources attentionnelles investies dans la tâche.

La charge extrinsèque représente la part des ressources cognitives monopolisées par des caractéristiques de la tâche qui ne servent pas directement à la formation de schémas en mémoire à long terme.

La charge utile désigne les ressources consacrées à la formation de schémas, c'est-à-dire de blocs de connaissances en mémoire à long terme.

Ces trois types de charge représentent différents aspects de la situation d'apprentissage mais se partagent les mêmes ressources cognitives (mémoire de travail et attention) qui sont disponibles en quantité limitée pour chaque apprenant. La théorie de la charge cognitive n'a pas de modèle propre de ces ressources cognitives, elle utilise les modèles principaux de la psychologie cognitive. Cette utilisation lui a permis de mettre en évidence différents résultats empiriques tels que l'effet du problème résolu ou l'effet de modalité, mais impose certaines limites à la théorie. Elle est tributaire du modèle utilisé et de ses limites en plus des limites inhérentes à la CLT.

2.4 Limites de la Théorie de la Charge Cognitive

Dans la section suivante, deux grandes limites du cadre théorique sont exposées. Ces limites découlent du choix du modèle de la mémoire de travail utilisé pour expliquer les phénomènes de ressources cognitives dans la CLT. Les deux grands modèles utilisés ne permettent pas de considérer précisément l'aspect dynamique des situations d'apprentissages. Cette non-consideration de l'aspect dynamique renvoie directement à un problème fréquemment souligné dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, la question de la mesure de la charge cognitive.

La question de la charge cognitive comme un phénomène dynamique

Les deux modèles de la mémoire de travail cités, le modèle des composantes multiples (Baddeley, 1986) et le modèle de la mémoire de travail à long terme (Ericsson & Kintsch, 1995, voir chapitre 3) ne permettent pas d'expliquer certains résultats obtenus dans le cadre de la théorie de la charge cognitive : par exemple, l'effet de modalité est supprimé lorsque les apprenants maîtrisent le rythme de présentation des éléments d'information (Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowalla, 2010 ; Leahy & Sweller, 2011).

L'effet de modalité consiste en une amélioration de l'apprentissage lorsque les informations sont présentées à la fois de manière auditive et visuelle. Le renversement lié à l'expertise consiste (entre autres) en la disparition de l'effet de modalité lorsque les apprenants ont atteint un certain niveau d'expertise. Mais l'effet de modalité disparaît également, quel que soit le niveau d'expertise des apprenants, si le rythme de présentation n'est pas contrôlé par le système. Plus précisément, si le rythme de présentation des informations est contrôlé par

l'apprenant, alors présenter les informations sous deux modalités, visuelles et auditives, ne permet pas d'améliorer l'apprentissage. En revanche quand le rythme de présentation est imposé par le système, quel que soit ce rythme (lent, medium ou rapide) l'effet de modalité produit les résultats connus (De Jong, 2010 pour une revue ; Moreno & Valdez, 2005, leur expérience 2 ; Ginns, 2005 ; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 ; Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowalla, 2010).

Leahy et Sweller (2011) discutent de quelques exemples, notamment de l'étude Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowalla (2010) à la suite de laquelle ils concluent que le rythme de présentation n'a aucun effet. Pourtant l'étude en question montre que l'effet de modalité disparaît quand le rythme de défilement des informations est contrôlé par l'apprenant. En revanche, cette étude montre que l'effet de modalité fonctionne dans le cas d'un rythme de présentation non contrôlé par l'utilisateur, quel que soit ce rythme. En effet dans cette étude, si le rythme de présentation des informations est contrôlé par le système, qu'il soit rapide, moyen ou lent, les participants apprennent mieux en condition de double modalité. En revanche quand ce rythme est contrôlé par les participants, l'effet de modalité disparaît.

Cette disparition de l'effet de modalité est expliquée dans le cadre de la CLT par l'effet de l'information transitoire (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). Cet effet de l'information transitoire apparaît lorsque la source d'information n'est pas disponible tout le temps pour les apprenants. Ainsi, au lieu de pouvoir retrouver l'information, les apprenants doivent la maintenir en mémoire de travail pour pouvoir la lier avec les autres. Cet effet apparaît généralement lors de l'utilisation des supports vidéo pour remplacer des textes. Dans ce cas, les apprenants ne peuvent plus retourner quelques paragraphes ou quelques pages en arrière pour retrouver une information manquante, ils doivent mémoriser toutes les informations au fur et à mesure qu'elles sont présentées, ce qui impose une charge en mémoire de travail plus élevée et donc une charge cognitive plus élevée.

Cet effet de l'information transitoire et la disparition de l'effet de modalité sont à mettre en parallèle avec une autre limite de la CLT soulignée par Paas et ses collègues (2003). Selon eux, la CLT ne permet pas d'envisager la charge cognitive comme un élément dynamique, variant au cours de l'apprentissage en fonction du nombre d'éléments à maintenir en MdT à chaque instant par exemple. Paas et ses collègues proposent d'utiliser le modèle de Xie et Salvendy (2000) selon lequel les différentes mesures permettent d'approcher différents aspects de la charge. En particulier, les questionnaires tentent d'évaluer la charge cognitive

après la réalisation de la tâche ne permettraient d'accéder qu'à une évaluation « moyenne » de la charge, ne rendant pas compte de « pics de charge » pouvant survenir pendant la réalisation de la tâche (Xie & Salvendy, 2000). Cette limite de l'évaluation de la charge cognitive découle directement du modèle de la mémoire de travail utilisé pour décrire les ressources disponibles lors des apprentissages. Les modèles de Baddeley (1986) et d'Ericsson et Kintsch (1995) ne permettent pas de décrire les mécanismes sous-jacents à l'utilisation de la mémoire de travail au cours du temps.

Cette limite souligne donc la nécessité pour la CLT de recourir à une autre modélisation des capacités en mémoire de travail permettant d'expliquer le décours temporel de l'utilisation de la MdT (Schweppe & Rummer, 2014). Paas et ses collègues (2003) ont proposé d'utiliser le modèle de Xie et Salvendy (2000) pour modéliser les variations dynamiques de la charge cognitive. Cependant, ce modèle décrit des variations dynamiques de la charge cognitive mais pas de l'utilisation des ressources cognitives décrites par la CLT. Pour répondre à cette question, Spanjers, van Gog et van Merriënboer (2010) et van Gog et ses collègues (2009) proposent d'utiliser le modèle du partage temporel des ressources (*e.g.*, Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004) qui permet de modéliser les variations dynamiques de l'utilisation de la mémoire de travail.

La question de la mesure de la charge cognitive

Les modèles de la mémoire de travail utilisés jusqu'à présent dans les recherches de la théorie de la charge cognitive ne permettent pas de considérer les variations de charge cognitive au cours du temps. Ceci implique que l'on puisse alors mesurer la charge cognitive à la fin de la phase d'apprentissage, celle-ci étant relativement constante au cours de l'apprentissage. Ainsi, Paas (1992) propose d'utiliser un questionnaire comportant un item en fin de session pour interroger les participants sur la charge cognitive qu'ils ont expérimenté pendant l'apprentissage. Une telle approche est tout à fait cohérente dans le cadre d'une conception de la mémoire de travail comme un *pool* de ressources stable au cours du temps dont l'utilisation serait relativement homogène au cours de la situation d'apprentissage. Cependant, plusieurs résultats expérimentaux viennent contredire cette dernière hypothèse, ce qui rend nécessaire l'étude des variations de la charge durant la période d'apprentissage (Paas *et al.*, 2003 ; Martin, 2014). De plus, une critique généralement adressée à l'encontre des questionnaires est qu'ils ne mesurent pas la charge proprement dite, mais plutôt le sentiment ressenti par les

apprenants, sentiment qui peut varier en fonction du moment auquel ils remplissent le questionnaire (Schmeck, Opfermann, van Gog, Paas & Leutner, 2014).

L'autre grande catégorie de mesures utilisées par la CLT consiste à mesurer la performance d'apprenants après une phase d'étude, comparant deux modalités d'instructions, un format « classique » et un format utilisant les recommandations formulées sur la base de la théorie de la charge cognitive. Si ce dernier format permet de réduire la charge cognitive durant la phase d'apprentissage, alors la charge utile devrait bénéficier de plus de ressources disponibles pour permettre la construction de schémas en mémoire à long terme et donc les résultats à un test ultérieur devraient être meilleurs (Sweller, Paas & van Merriënboer, 1998). Cependant, si cette approche permet d'éviter les effets de rationalisation *a posteriori*, elle ne permet pas non plus de distinguer les variations de la charge au cours de l'apprentissage et ne permet pas de prendre en compte l'utilisation des ressources cognitives (*e.g.*, Wickens, 2002 pour une critique des mesures indirectes).

Il semble donc nécessaire pour la théorie de la charge cognitive de considérer de nouveaux modèles théoriques permettant d'expliquer des résultats empiriques contradictoires et de considérer la charge cognitive comme un élément dynamique. Ce changement de modèle devra répondre à ces questions, mais également permettre de quantifier la charge en mémoire de travail et de dériver des mesures de cette charge (De Jong, 2010). Le chapitre suivant décrit les fonctions cognitives désignées sous le terme de ressources, *i.e.* la mémoire de travail et l'attention, et présente un modèle unifiant ces deux fonctions, le modèle du partage temporel des ressources (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004). Ce nouveau modèle permet de rendre compte de l'utilisation de la mémoire de travail en prenant comme ressource principale le temps et devrait donc permettre de répondre aux limites rencontrées par la théorie de la charge cognitive.

Chapitre 3 Les déterminants cognitifs de la charge

Selon la théorie de la charge cognitive, les trois types de charge distingués se partagent les ressources cognitives de l'apprenant (Sweller, van Merriënboer & Paas, 1998). Ces ressources sont utilisées pour maintenir actives les informations pertinentes pour l'apprentissage (la charge intrinsèque), les informations non pertinentes (la charge extrinsèque) et le transfert des connaissances en mémoire à long terme (la charge utile).

Ces informations devant être maintenues en mémoire de travail, la théorie de la charge cognitive décrit naturellement la mémoire de travail comme un élément central des ressources. À cette ressource doit être rajoutée l'attention (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007) car elle est indispensable pour décrire la mémoire de travail (MdT) en psychologie cognitive.

Cependant, ces deux notions recouvrent un certain nombre de résultats empiriques et de modèles différents. Ainsi, définir l'empan en mémoire de travail et les liens entre mémoire de travail et attention ont d'importantes conséquences lors de l'estimation de la charge cognitive dans les apprentissages.

L'attention et la mémoire de travail sont vues par la théorie de la charge cognitive comme des ressources permettant de réaliser des tâches, essentiellement des tâches d'apprentissage. Dans ce chapitre, elles seront considérées selon l'approche de la psychologie cognitive, c'est-à-dire comme des mécanismes ou des processus. Ce changement de point de vue implique qu'il ne s'agit plus de moyens mais de concepts réalisant des traitements de l'information. Ceci n'est pas nécessairement le cas dans la théorie de la charge cognitive, les traitements étant réalisés par l'apprenant, grâce à ses ressources.

Ces deux mécanismes, attention et MdT, sont souvent inclus dans les fonctions exécutives (Awh, Vogel & Oh, 2006). Les fonctions exécutives n'étant pas directement nécessaires à la construction de schémas, et donc à l'apprentissage au sens de la théorie de la charge cognitive, ne seront pas développées ici, même si d'autres approches les considèrent comme nécessaires aux apprentissages. Néanmoins, il faut souligner qu'il s'agit de mécanismes attentionnels permettant de préparer les actions de l'individu. Ces processus regroupent en général les notions d'actualisation, d'inhibition et de changement de tâche (Miyake *et al.*, 2000).

Ce chapitre présentera les deux mécanismes de mémoire de travail et d'attention séparément, car ils recouvrent différentes notions. Le modèle de partage temporel des ressources (*e.g.*, Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004) associant les deux notions sera présenté ensuite. En utilisant les deux notions, ce modèle permet de porter un nouveau regard sur les ressources cognitives décrites par la CLT. La première partie présentera les modèles de mémoire classiquement utilisés dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, le modèle de Baddeley (1986) et le modèle d'Ericsson et Kintsch (1995), ainsi que certains éléments d'organisation des connaissances en mémoire à long terme (MLT).

Ce chapitre présentera également des études utilisant les techniques de neuro-imagerie, principalement l'électro-encéphalographie, car elles orientent les conceptions en psychologie et nous contraignent à un autre regard sur notre objet d'étude tout en permettant d'autres moyens d'évaluation de nos modèles. Comme l'a souligné Thereau (2002), « ces études permettent d'aller des phénomènes aux processus ».

3.1 Mémoire à court terme et Mémoire de Travail

Une observation empirique très courante est que l'on peut chercher à retenir une idée ou un fait et l'oublier en quelques secondes. C'est ce qui se passe par exemple lorsque l'on cherche à garder en tête un numéro de téléphone et qu'on l'oublie. À l'inverse, il est possible de se rappeler de certains souvenirs pendant des années, alors que l'on n'a fait aucun effort pour les mémoriser. Cette simple dissociation a rendu nécessaire la distinction entre une mémoire à court terme et une mémoire à long terme.

Les premiers modèles de cette dissociation entre mémoire à court terme et mémoire à long terme ont postulé un mécanisme sériel, l'information passant d'abord par la mémoire à court terme puis éventuellement en mémoire à long terme (*e.g.*, Atkinson & Shiffrin, 1968). Dans cette optique, le passage d'une information entre la perception sensorielle et la mémoire à long terme ne peut s'effectuer que via la mémoire à court terme qui doit donc permettre de la manipuler. La théorie de la charge cognitive postule de la même manière que, lors d'un apprentissage, les informations devant être stockées en mémoire à long terme passent d'abord par la mémoire à court terme. Cette mémoire à court terme est donc le passage obligé de toutes les informations nécessaires à l'apprentissage, voire à tous les traitements conscients. Dès lors, un grand nombre de recherches se sont intéressées aux différentes caractéristiques de la mémoire à court terme. Deux caractéristiques définissent principalement la mémoire à court terme : sa durée (courte) et sa capacité (limitée).

Ce chapitre va donc présenter des travaux de recherche autour de ces deux caractéristiques ainsi que du codage de l'information en mémoire de travail, car il s'agit d'éléments importants dans le cadre de la théorie de la charge cognitive. Ensuite, les deux modèles les plus utilisés dans le cadre de la CLT, le modèle de Baddeley (1986) et celui d'Ericsson et Kintsch (1995) seront présentés. Cette partie présentera enfin des travaux en neuro-imagerie car ces recherches contraignent les modèles et donc permettent de les préciser mais également permettent d'envisager une mesure objective des processus cognitifs (voir le chapitre 5).

3.1.1 Rapidité de l'oubli

Une des principales raisons de la séparation entre mémoire à court terme et mémoire à long terme est la rapidité avec laquelle on peut oublier certaines informations tandis que d'autres peuvent être rappelées plusieurs heures à plusieurs années après les avoir mémorisées, certaines connaissances seraient même stockées pour toute la durée de la vie.

Dans le cadre de la mémoire à court terme, les informations peuvent donc être oubliées très rapidement. En effet, en condition de distraction c'est-à-dire lorsque l'on contraint les participants à réaliser d'autres traitements que la mémorisation, les éléments contenus en mémoire à court terme disparaissent au bout de quelques secondes seulement (*e.g.*, 1,5 à 2 secondes, Baddeley, 1986 ; 2010 ; voire 15 à 20 secondes, Peterson & Peterson, 1959).

Cette disparition peut être expliquée par un déclin de l'activation des traces mnésiques codant les éléments contenus en mémoire de travail. Lors de l'encodage, les informations encodées sont stockées sous la forme de traces mnésiques. Ces traces correspondent, dans la plupart des modèles, à une partie de la mémoire à long terme qui est activée par l'encodage des informations perçues (James, 1890 ; Shiffrin, 1975 ; 1976 ; cités dans Raaijmakers & Shiffrin, 2003 ; Baddeley, 1986 ; Ericsson & Kintsch, 1995 ; Cowan, 2000). Ainsi, lorsque l'on perçoit un élément dans l'environnement, les caractéristiques physiques de l'élément sont interprétées et activent la représentation stockée en mémoire à long terme, *i.e.* les connaissances que l'on a au sujet de cet élément.

La baisse d'activation, rapide, de ces traces mnésique peut être due au temps écoulé entre l'encodage de l'information et sa récupération (Baddeley, 1986 ; Barrouillet & Camos, 2015), l'activation des traces mnésiques diminuant spontanément au cours du temps. À l'inverse, l'oubli pourrait être dû à un phénomène d'interférence, les nouveaux éléments perçus venant « écraser » les anciens éléments stockés en mémoire à court terme. Baddeley (2012) avance que les deux explications ne sont pas incompatibles, l'interférence liée à l'entrée de nouveaux

éléments en mémoire de travail pouvant résulter en une diminution de l'activation des traces mnésiques. Il conclut par le fait que dans les deux cas, le résultat ne change rien à la rapidité de l'oubli présent en mémoire de travail.

Pour pallier cet oubli rapide de l'information, une stratégie très simple consiste à répéter l'information. Cette répétition permet de maintenir active, en la rappelant, la trace mnésique correspondant à l'information stockée. La répétition d'une information va permettre également de consolider cette trace et donc de la transférer en mémoire à long terme (*e.g.*, Baddeley, 1986).

La courte durée de la mémoire à court terme a des implications dans le cadre de la théorie de la charge cognitive. Si les informations pertinentes pour l'apprentissage ne sont pas maintenues actives pendant la réalisation de la tâche, elles sont oubliées et l'apprentissage est diminué.

3.1.2 Capacité limitée de la mémoire à court terme

Si la mémoire à long terme est réputée avoir une capacité quasiment illimitée, la mémoire à court terme est une mémoire dont la capacité est limitée (Miller, 1956). Les premières expériences sur la capacité de la mémoire ont montré que lors d'un test de rappel de mots, la performance décroît rapidement dès que le nombre d'items dépasse sept (plus ou moins deux). De plus, Miller (1956) décrit cette capacité limitée comme s'appliquant non seulement au nombre d'items que l'on peut maintenir en mémoire, mais également au nombre d'éléments que l'on peut percevoir simultanément. Il décrit un sac de billes dont le contenu serait renversé sur le sol. À chaque instant, sa perception ne lui permet de visualiser que sept billes au maximum. Cependant, lorsqu'il regroupe les billes en sept groupes, il est capable de distinguer ces sept groupes sans difficulté, alors que le nombre de billes est bien plus grand (Miller, 1956). Ce regroupement de différents éléments dans un ensemble pour pouvoir les utiliser sans dépasser la limite du nombre magique de sept (plus ou moins deux) est appelé un *chunk*.

Cowan (2000) définit un *chunk* par rapport aux connaissances en mémoire à long terme, comme « une collection d'éléments fortement associés entre eux et possédant de moins fortes associations avec les autres éléments formant les autres *chunks* actifs ». Cette définition, en mettant l'accent sur les connaissances antérieures en lien avec la tâche à réaliser, souligne la nature variable des *chunks* et permet de mettre en évidence la difficulté qu'il y a à mesurer la capacité de la mémoire en nombre de *chunks*.

Cowan avance que des *chunks* peuvent être créés spontanément si les items présentés sont proches sur le plan sémantique. Ainsi, il souligne le fait que lorsque l'on empêche un tel recodage de l'information, par exemple en utilisant des items clairement distincts lors de tâches de mémoire, l'empan descend à seulement 4 *chunks*, plus ou moins un (Cowan, 2000). Cette constatation soulève selon lui une interrogation : est-ce que la mémoire à court terme a une capacité limitée à un nombre de *chunks* que l'on peut stocker simultanément, ou cette limite est-elle un épiphénomène lié à la rapidité de l'oubli, au temps pendant lequel ces *chunks* peuvent être maintenus actifs (Baddeley, 1986) ou encore à un mécanisme d'interférence (Crowder, 1993) ?

Dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, cette limite de la capacité de la MCT a des conséquences importantes. En effet, si les informations nécessaires à l'élaboration de schémas ne peuvent pas faire l'objet de traitements successifs, alors il est impératif de les maintenir actifs simultanément. La limite de capacité est donc une limite du nombre d'éléments formant un schéma que l'on peut transférer en mémoire à long terme. Ceci implique qu'une notion complexe, imposant de manipuler beaucoup d'éléments simultanément, sera moins bien transférée en mémoire à long terme que plusieurs notions plus simples.

3.1.3 Le codage de l'information en mémoire

Pour prévenir l'oubli, il est possible de répéter une information, sans nécessairement la vocaliser (Baddeley, 1986). Cependant, lorsque l'on bloque cette répétition, par exemple en demandant aux participants de répéter une suite de sons sans signification, la capacité de stockage de la mémoire à court terme diminue drastiquement, c'est l'effet de suppression articulatoire (Baddeley, 2002 ; Mora, 2011 ; Baddeley, 1986). Cet effet de suppression articulatoire vient renforcer les résultats d'expérimentations précédentes sur l'effet de similarité phonologique. Cet effet consiste à demander à des participants d'apprendre une liste de mots proches sur le plan acoustique. Plus les mots sont proches phonologiquement, moins bon est le rappel (Conrad & Hull, 1964 ; Baddeley, 1966 ; voir Nairne & Kelley, 1999). Ainsi, l'information en mémoire à court terme est supposée être codée phonologiquement, c'est-à-dire que l'on encode les informations selon un format acoustique, et que lire ou écouter d'autres informations vient interférer avec les éléments encodés. À l'inverse, le codage de l'information en mémoire à long terme serait de nature sémantique (Baddeley, 1966 ; 2002) bien que la limite entre les deux soit floue et que certains auteurs aient argumenté en faveur d'un double codage en mémoire de travail, acoustique et sémantique (Paivio, 1986). Un autre argument en faveur du codage acoustique dans la boucle phonologique est fourni par l'effet

de longueur des mots. Cet effet correspond au constat selon lequel des listes de mots de deux syllabes sont mieux rappelées (avec moins d'erreur) que des listes de mots de trois ou quatre syllabes (Baddeley, Thomson, & Buchanan, 1975 cité dans Baddeley, 2002). Les travaux sur la nature des *chunks* avaient pourtant mis en évidence qu'un *chunk*, un élément en mémoire de travail, ne dépendait pas de la longueur du mot correspondant. Ceci s'explique par le fait que la durée de rétention en mémoire de travail est très courte, et que le maintien en MdT ne peut être réalisé que si l'information est répétée à l'aide de la boucle de répétition. Toutefois, cet effet de longueur des mots disparaît quand on empêche la répétition, par exemple en demandant aux participants de répéter une syllabe n'ayant aucun sens (Baddeley, Thomson, & Buchanan, 1975 cité dans Baddeley, 2002). Les informations maintenues en mémoire de travail semblent donc être stockées dans un code phonologique.

En revanche, l'information en mémoire à long terme est codée selon un format sémantique et les informations phonologiques encodées en mémoire à court terme n'interfèrent pas avec son contenu (Baddeley, 1966). Ainsi, lors d'une tâche de mémoire à court terme dans laquelle les participants doivent rappeler une liste de mots rapidement après sa présentation, les listes de mots phonologiquement proches sont moins bien rappelées que les listes de mots sémantiquement proches (Baddeley, 1966b). En revanche, lorsque l'apprentissage des listes de mots impose un délai de rétention plus long, et donc que la mémoire à long terme est davantage sollicitée, l'apprentissage des listes de mots sémantiquement reliées est moins bon que celui des listes phonologiquement proches (Baddeley, 1966). Cette nature sémantique du codage de l'information en mémoire à long terme est issue des travaux sur la notion de schéma (*e.g.*, Bartlett, 1932 ; Piaget, 1928). Dans le cadre de la mémoire sémantique, les éléments sont organisés en mémoire à long terme sous la forme de réseaux sémantiques (Collins & Quillian, 1969). Ils partagent des liens basés sur leurs sens respectifs, et plus les éléments de connaissances sont proches sémantiquement, plus leurs liens sont forts. De plus, ces connaissances sont fortement décontextualisées, c'est-à-dire qu'elles ne nécessitent pas de pouvoir rappeler des indices de l'encodage pour pouvoir être rappelées (*e.g.*, Tulving, 1985). Par exemple, les enfants n'ont pas besoin de voyager pour pouvoir apprendre que Paris est la capitale de la France. Les schémas sont organisés de la même manière, en réseaux sémantiques, mais intègrent une dimension « procédurale ». Ils regroupent différents éléments de connaissances permettant de catégoriser les informations perçues en fonction des connaissances préalables. Plus un schéma est automatisé (voir la partie Attention) et plus il est facile de l'activer dans des conditions similaires. Ainsi, résoudre l'équation $a/b=c$ (trouver a)

pour un élève d'école primaire est quasiment impossible, tandis qu'un lycéen devrait facilement activer le schéma correspondant et multiplier les deux côtés par b (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011, leur exemple). Avec l'apprentissage, tous les problèmes présentant la même structure finissent par activer le même schéma (voir le chapitre 4 sur l'expertise). Ainsi, la mémoire à long terme présente une capacité de stockage virtuellement illimitée, les connaissances étant stockées en parallèle sur la base de leurs sens communs.

Le fait que les *chunks* maintenus en mémoire de travail puissent être maintenus actifs en les répétant un à un souligne une autre caractéristique de la mémoire de travail : les éléments sont encodés, stockés et rappelés de manière sérielle, ils ne sont pas stockés simultanément (Sternberg, 1966). Dans ses travaux, Sternberg (1966) présente une série de symboles et demande à ses participants d'indiquer si un symbole (présenté ensuite) était présent ou non dans la liste. Les résultats montrent que le temps de réponse des participants augmente linéairement avec le nombre d'items de la liste. Ainsi, ces recherches montrent que l'on peut maintenir des éléments en mémoire de travail et les comparer à un item cible. À la suite de ces études, d'autres recherches montrent que l'on peut non seulement maintenir des informations en mémoire de travail, et les comparer à un item de référence, mais que l'on peut également les manipuler dans des tâches de plus haut niveaux, par exemple de la vérification de phrases (*e.g.*, Baddeley & Hitch, 1974). Cependant, si le nombre de *chunks* à maintenir en mémoire de travail est trop grand (*i.e.* supérieur à quatre), la performance lors de tâches concurrentes diminue. En revanche, si l'information à maintenir en mémoire et celle utilisée dans la tâche concurrente utilisent des modalités différentes, visuelles et auditives, alors cette limite disparaît (Baddeley, 2010 pour revue). Les *chunks* maintenus en mémoire de travail sont donc maintenus de manière sérielle, dans un registre dépendant de la modalité sensorielle utilisée.

3.1.4 Le modèle de Baddeley

La mémoire de travail (Baddeley & Hitch, 1974 ; Baddeley, 1986) est la partie de la mémoire dans lesquelles sont stockées des informations pour une brève période, de quelques secondes à quelques minutes (voir Figure 2). Elle répond à une limite de la mémoire à court terme d'Atkinson et Shiffrin (1968), qui ne permettait pas d'expliquer que l'on puisse manipuler des éléments directement (Baddeley & Hitch, 1974 ; Baddeley, 1986). Pour expliquer que la quantité d'information que l'on peut maintenir et manipuler en même temps varie en fonction de la modalité sensorielle utilisée lors de la présentation des informations, ce modèle propose que les deux modalités, auditives et visuelles, fassent l'objet de traitements distincts. Ces

traitements ont donc lieu dans des modules séparés : le calepin visuo-spatial et la boucle phonologique. Ces deux systèmes sont placés sous le contrôle de l'administrateur central.

Le premier système, le calepin visuo-spatial, traite les informations de nature visuelle, mais aussi toutes les informations contenant une notion spatiale, même si elles sont de nature acoustique. Le deuxième système, la boucle phonologique, stocke les informations sémantiques et acoustiques. C'est ce dernier système qui est responsable du traitement des informations langagières et de leur acquisition. Enfin, l'administrateur central gère l'attribution des ressources attentionnelles entre les deux modules et l'entrée des informations contenues en MdT dans la mémoire à long terme. Les éléments stockés en MdT et répétés suffisamment sont transférés en mémoire à long terme.

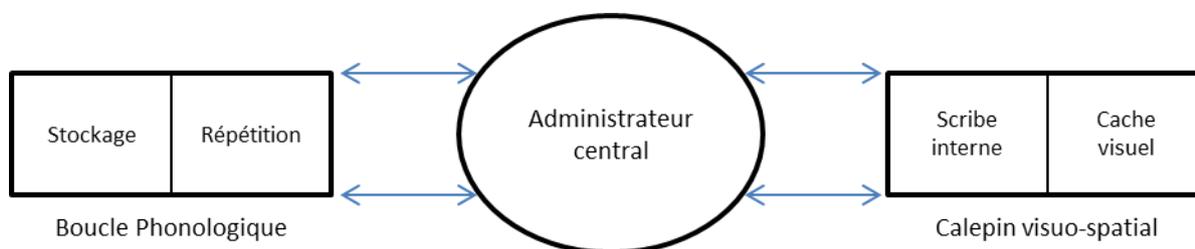


Figure 2. Représentation du modèle en composantes multiples de la mémoire de travail. Inspiré de Baddeley (2010)

3.1.4.1 La boucle phonologique

La boucle phonologique est composée de deux sous-systèmes, une « réserve phonologique » et une « boucle de répétition ». Elle s'occupe de tous les stimuli ayant une nature verbale ou acoustique. La réserve phonologique est un espace stockant l'information pendant une très brève période avant qu'elle ne disparaisse, à moins d'être répétée à l'aide du second module de la boucle phonologique, la boucle de répétition. Initialement, les caractéristiques de la boucle phonologique ont été dictées par des résultats empiriques que le concept de mémoire à court terme seul ne pouvait expliquer, tels que l'effet de similarité phonologique, l'effet de longueur des mots et l'effet de suppression articulatoire, évoqués plus haut. Toute information verbale, mot ou chiffre, est maintenue dans ce registre pour être traitée par des processus de plus haut niveau.

Cependant, cette métaphore spatiale d'un espace de stockage dédié aux informations auditives et acoustiques est remise en cause par d'autres modèles (e.g., Cowan, 1988) selon lesquels on pourrait maintenir des informations grâce au focus attentionnel. Ce mécanisme de maintien permettrait de garder actives des informations sans utiliser la répétition phonologique, qui n'est plus qu'un moyen parmi d'autres de maintenir active l'information. Baddeley (2010)

développe l'idée selon laquelle les deux théories ne sont pas incompatibles, mais qu'il s'agirait simplement d'un changement de point de vue : l'administrateur central serait similaire au focus attentionnel de Cowan, permettant de rafraîchir de l'information. Ainsi, le focus attentionnel pourrait également être utilisé pour rafraîchir des traces mnésiques contenant des informations de nature acoustique (Baddeley, 2010).

3.1.4.2 Le calepin visuo-spatial

Le calepin visuo-spatial est responsable des aspects spatiaux de la mémoire, qu'il s'agisse de comparer des formes, de se rappeler de lieux ou même, dans le cadre du langage, des formes imagées, telles que « au-dessus » ou « à côté » (Phillips, Jarrold, Baddeley, Grant, & Karmiloff-Smith, 2004, cité dans Baddeley, 2002). Comme la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial est composé de plusieurs sous-systèmes. Parmi eux, un « cache visuel » permettant de retenir l'information pour une courte période, et un module de répétition, le « scribe interne ». Les travaux tentant de mesurer l'empan du calepin visuo-spatial ont mis en évidence un empan d'environ 5 éléments, soit deux de moins que pour la boucle phonologique (Baddeley, 2012). Ce calepin a également un rôle d'intégration des informations, les informations visuelles et spatiales ne provenant pas forcément des mêmes stimuli.

Lors de la lecture par exemple, les informations de nature phonologique sont perçues par la modalité visuelle. Le calepin visuo-spatial n'étant pas capable de manipuler de l'information phonologique, cette information est recodée et transférée dans la boucle phonologique (Baddeley, 1986). C'est une fois recodée et transférée dans la boucle phonologique que l'information lue peut être maintenue et manipulée, par exemple pour permettre la compréhension (*e.g.*, Daneman & Carpenter, 1980).

3.1.4.3 Le buffer épisodique

Dans les dernières études sur le modèle de Baddeley, un nouveau module esclave est ajouté en plus du calepin visuo-spatial et de la boucle phonologique pour pouvoir expliquer les phénomènes de mémoire amodale. Il s'agit du buffer épisodique (Baddeley, 2000). Ce module a fait l'objet de moins de recherches que les autres. Dans certains cas, l'information encodée n'a pas de modalité spécifique. C'est le cas de certains souvenirs, récupérés en mémoire à long terme. Le buffer épisodique permet d'expliquer ces souvenirs et leur récupération depuis la mémoire à long terme. Les informations stockées dans le buffer épisodique ne font pas

l'objet du même oubli que celles stockées dans les deux autres modules esclaves, car elles peuvent être rafraîchies à l'aide du focus attentionnel (Baddeley, 2000).

3.1.4.4 L'administrateur central

L'administrateur central est le quatrième et plus important module de la mémoire de travail (Baddeley, 2012) dans le sens où il est responsable de l'attribution des ressources attentionnelles entre les trois modules « esclaves » que sont la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial (Baddeley, 1986) et le buffer épisodique (Baddeley, 2000). Il fait également le lien entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme, permettant aux éléments contenus en MdT d'accéder à la mémoire à long terme après suffisamment de répétitions. Dans l'autre sens, il permet à la mémoire de travail d'utiliser des éléments de la mémoire à long terme. En tant que responsable des ressources attentionnelles, le modèle original de Baddeley (1986) prenait pour référence le modèle de Norman et Shallice (1980) pour définir l'administrateur central. Selon le modèle de Norman et Shallice (1980), un système attentionnel superviseur (SAS) est responsable de la gestion des priorités, de l'inhibition des actions et informations non pertinentes et de la sélection des stratégies à appliquer (voir Bukiatmé & Chausson, 2004 pour revue).

Ces attributions en font une des limites majeures du modèle de la mémoire de travail, car l'administrateur central ressemble beaucoup à un « homoncule », prenant des décisions comme le ferait une personne (Baddeley & Logie, 1999). En effet, lorsque l'on veut expliquer les mécanismes d'une prise de décision, il devient difficile d'utiliser un système capable de prendre des décisions sans expliquer les mécanismes lui permettant de prendre ces décisions (Verbruggen, McLaren & Chambers, 2014).

3.1.4.5 Liens avec la théorie de la charge cognitive

Le modèle de Baddeley est utilisé dans plusieurs études sur la théorie de la charge cognitive. Le fait qu'il décrive la mémoire de travail comme étant composée d'un calepin visuo-spatial et d'une boucle phonologique s'applique particulièrement bien dans le cas de l'effet de modalité (Leahy & Sweller, 2011 pour une revue). En effet dans ce cadre, les apprentissages sont meilleurs (pour des apprenants novices) lorsque l'information à apprendre est présentée à la fois dans des modalités visuelles et auditives. Les informations de chaque modalité sont traitées dans le module correspondant, ce qui augmente la quantité de traitement des informations traitées et donc les chances que ces informations soient transférées en mémoire à long terme. En revanche, le modèle de Baddeley ne permet pas de rendre compte du

renversement lié à l'expertise (Kalyuga *et al.*, 2003) selon lequel, l'effet de modalité (et d'autres effets mis en évidence par la théorie de la charge cognitive) ne s'appliquent pas à des apprenants experts (voir chapitre 4). Pour expliquer les résultats du renversement lié à l'expertise, les chercheurs de la CLT ont recours à un autre modèle de la MdT : la mémoire de travail à long terme.

3.1.5 La mémoire de travail à long terme

Une des limites majeures du modèle de Baddeley s'observe lors d'expérimentations menées avec des experts. Ces derniers font preuve systématiquement d'une mémoire de travail largement supérieure à la normale quand ils utilisent des éléments de leur domaine d'expertise. Ceci remet en question la notion de mémoire de travail ayant une capacité limitée. Dans leur modèle, Ericsson et Kintsch (1995) proposent que la mémoire de travail ne soit que la partie activée de la mémoire à long terme, abandonnant la métaphore spatiale de la mémoire de travail (*e.g.*, voir James, 1890 ; Cowan, 1988 ; 2014 ; Cowan *et al.*, 2005). Les connaissances de l'expert sont organisées en schémas dont les différents éléments constitutifs sont fortement liés (voir chapitre 4). Ainsi, lorsqu'un expert active des représentations en MdT, il active une partie de sa mémoire à long terme qui comprend d'autant plus d'éléments qu'il est expert dans le domaine. En outre, cette activation dure plus longtemps chez les experts que chez les novices d'un domaine, ce qui implique que l'oubli dû au délai soit moins important chez les experts lorsqu'ils sollicitent des connaissances de leur domaine d'expertise. Le modèle de la mémoire de travail à long terme ne définit donc pas de capacité fixe de la mémoire de travail puisque cette dernière dépend à la fois du niveau d'expertise de l'individu pour la tâche à réaliser et des contraintes de la tâche à réaliser.

Si ce modèle permet d'expliquer plusieurs résultats expérimentaux liés à l'expertise, en revanche en abandonnant les différents modules du modèle de Baddeley, il ne permet pas d'expliquer seul les résultats liés à l'absence d'interférence entre les modalités visuelles et auditives. Ainsi, le modèle d'Ericsson et Kintsch (1995) ne permet pas d'expliquer l'effet de modalité mis en évidence dans le cadre de la CLT, mais en revanche il s'applique bien au renversement lié à l'expertise. Dans ce cas, les informations présentées aux experts dans deux modalités sont largement redondantes, puisqu'elles activent les mêmes *chunks*. Pour des apprenants experts, la présentation des informations selon deux modalités produit une sollicitation excessive des ressources cognitives pour un résultat similaire. Il s'agit alors d'une charge extrinsèque, les apprenants ayant plus d'information à manipuler qu'il ne leur en faut pour arriver au même résultat.

3.1.6 Mémoire de travail et études en neuro-imagerie

Un grand nombre d'études utilisant les techniques des neurosciences ont étudié les corrélats cérébraux de la mémoire de travail, et notamment la distinction entre les différents modules du modèle de Baddeley. Une revue de littérature (D'Esposito *et al.*, 1998) portant sur plus de 40 expérimentations utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ou la tomographie par émission de positons (P.E.T. scan) met en évidence une différenciation entre les hémisphères gauches et droits. L'hémisphère droit serait davantage impliqué dans les traitements visuo-spatiaux en mémoire de travail et l'hémisphère gauche davantage sollicité dans les traitements de la boucle phonologique (D'Esposito *et al.*, 1998 ; mais voir LaBar, Gitelman, Parrish & Mesulam, 1999 pour le point de vue inverse). En revanche, selon ces deux études, aucune différence n'est observée en fonction du type de traitement effectué en mémoire de travail, maintien ou traitement cognitif. Selon Baddeley (2012), les résultats de ces études sont confus et peu d'entre elles donnent lieu à des répliques. Elles n'apportent donc que peu d'informations à l'étude d'un phénomène aussi complexe que la mémoire de travail. L'utilisation de la MdT est reliée à l'activation des régions préfrontales et des lobes pariétaux (D'Esposito *et al.*, 1998).

Plusieurs études se sont intéressées aux corrélats physiologiques de l'utilisation de la boucle phonologique et ont mis en évidence l'utilisation de régions localisées dans l'hémisphère cérébral gauche (voir Ravizza, Behrman & Fiez, 2005 pour une revue de 42 études utilisant différentes techniques d'imagerie cérébrale et des études de patients cérébrolésés). Les régions majoritairement impliquées dans les processus de MdT phonologiques sont le lobe frontal, principalement la région préfrontale, et le lobe pariétal gauche. Ces deux régions montrent une augmentation de la puissance du rythme thêta et une diminution de la puissance du rythme alpha avec l'augmentation de la charge en mémoire de travail.

Le fait que le calepin visuo-spatial traite à la fois les informations visuelles et spatiales est cohérent avec le fait que son utilisation soit liée à l'activation des lobes pariétaux et occipitaux. L'utilisation de la mémoire de travail spatiale entraîne une activation du lobe pariétal droit principalement (Sauseng, Klimesch, Schabus & Doppelmayr, 2005), tandis que le lobe occipital est principalement impliqué dans les traitements visuels. En parallèle de l'activation de ces deux régions, la sollicitation de la MdT visuo-spatiale entraîne également l'activation des régions préfrontales.

L'information visuelle, après un relais dans le thalamus, puis dans le lobe occipital, se divise en deux voies (Ungerleider & Mishkin, 1982 ; 1983, voir Figure 3). L'une est appelée voie ventrale et serait préférentiellement impliquée dans l'identification des objets, l'autre, impliquée dans leur localisation, est appelée voie dorsale. La voie ventrale, aussi appelée voie du « quoi », est composée de régions du cortex occipital et du cortex inféro-temporal.

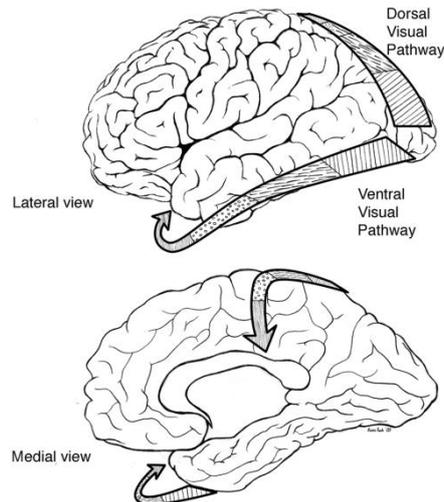


Figure 3. Schéma des voies ventrales et dorsales selon Ungerleider et Mishkin (1982)

Au niveau électro-encéphalographique (EEG), on observe une augmentation des rythmes gamma et thêta dans les régions frontales et pariétales lors de la sollicitation de la mémoire de travail visuo-spatiale. L'augmentation du rythme thêta localisé dans le lobe pariétal est plus importante au niveau de l'hémisphère droit. L'activation du lobe pariétal pourrait être liée aux traitements de la voie perceptive du « où » (Ungerleider & Mishkin, 1982). Cette voie est chargée de mettre en cohérence les différents éléments de la scène visuelle identifiés par la voie du « quoi », et dont les traitements sont majoritairement réalisés dans le lobe temporal. Ces deux types de traitement seraient ensuite intégrés au niveau du cortex préfrontal (Rao, Rainer & Miller, 1997). L'activation du lobe occipital, préférentiellement impliqué dans les traitements des informations visuelles, est liée à une augmentation de la puissance associée au rythme gamma. Cette augmentation est d'autant plus grande que le stimulus est peu prévisible (Bauer, Stenner, Friston & Dolan, 2014).

L'administrateur central, en tant que responsable du rafraîchissement de la mémoire de travail, semble relié aux régions pariétales, et plus précisément à la jonction pariéto-temporale, principale région impliquée dans la génération d'une composante électro-encéphalographique impliquée dans le renouvellement des informations contenues en mémoire de travail (voir Polich & Kok, 1995 ; Hruby & Marsalek, 2003, pour des revues sur

le sujet). Il serait également soutenu par les structures des aires préfrontales (Sauseng, Klimesch, Schabus & Doppelmayr, 2005). En effet, l'attribution faite à l'administrateur central de superviser l'allocation des ressources attentionnelles entre les modules de la mémoire de travail le relie aux aires préfrontales, ces dernières étant responsables du changement de tâche et de l'adaptation aux modalités de réponses des nouvelles tâches (Mühle-Karbe, Andres & Brass, 2014).

3.1.7 L'unité d'information en neurosciences : neurones ou groupes de neurones

La mesure de la capacité de la mémoire de travail, l'empan mnésique, a donné lieu à un certain nombre d'études en neurosciences. La première question se posant était de savoir à quoi correspond une unité d'information. Est-ce qu'un élément en mémoire de travail, un objet isolé et non pas un *chunk*, est codé par un neurone unitaire ou bien par un petit groupe de neurones qui coderait également pour d'autres objets (Thorpe, 2011). La différence entre les objets codés par ce réseau ne serait due qu'à la différence du pattern d'activation des neurones constitutifs de ce micro-réseau ? Cette question est importante car elle porte directement sur l'objet de la mesure des études en neuro-imagerie portant sur la mémoire de travail.

À un autre niveau, cette question permet d'apporter un autre éclairage sur la nature même des *chunks* (voir Miller & Buschman, 2015 pour revue). En effet, à un niveau plus macroscopique, l'étude des rythmes cérébraux apporte également un autre éclairage sur la nature de la mémoire de travail et du maintien de l'information. Ainsi, des études utilisant les apports de la neuro-imagerie ont proposé que l'empan mnésique soit reflété par le ratio entre les fréquences de rythmes thêta (4 à 8 Hertz) et gamma (>30 Hz). À chaque oscillation du rythme thêta, l'intégralité des éléments contenus en mémoire de travail serait rafraîchie, et chacun des *chunks* correspondrait à une oscillation du rythme gamma (Lisman, 2010, voir Figures 4 et 5 pour une version simplifiée). Le rythme thêta correspond à une oscillation lente représentant la synchronisation de grands groupes de neurones à travers le cerveau, tandis que le rythme gamma représente des activités plus rapides, rendant compte de la synchronisation de groupes de neurones dans des circuits plus localisés (Klimesch, 1996 pour revue). Cette théorie accepte implicitement l'idée que les éléments contenus en mémoire de travail soient codés par des réseaux de neurones dont l'activation synchronisée produit une activité électrique : le rythme gamma.

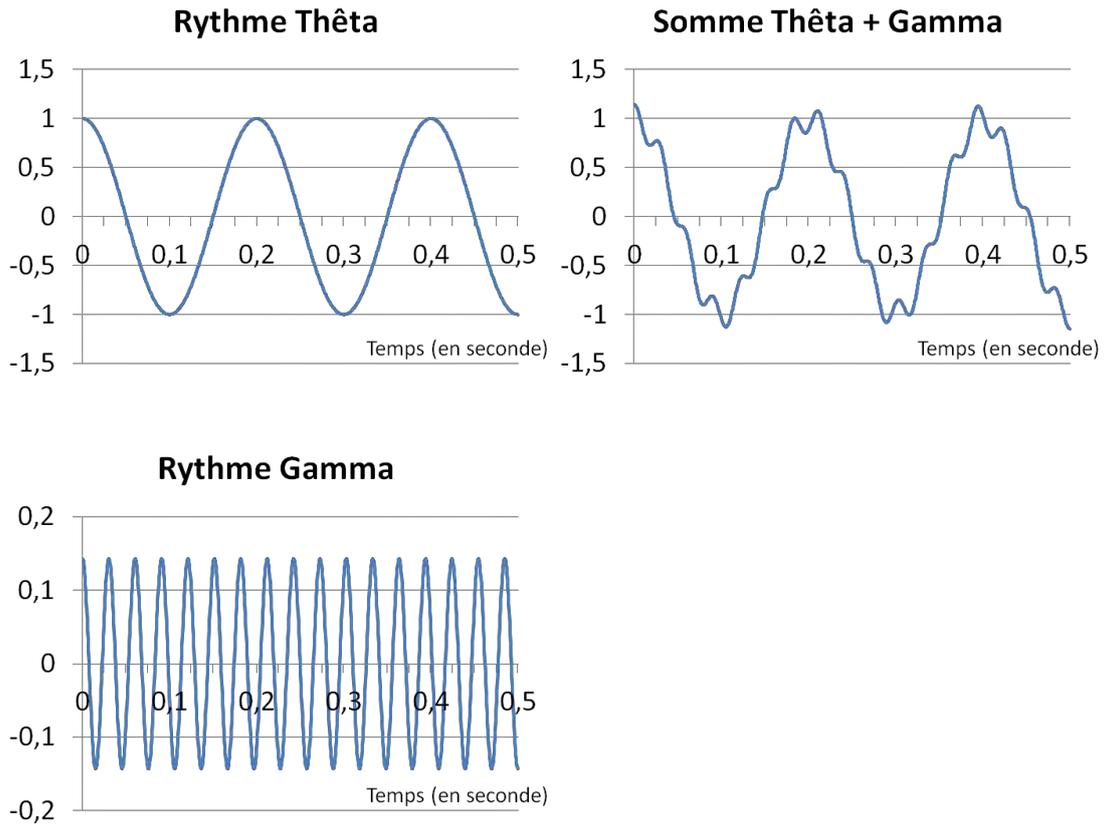


Figure 4. Représentation d'un rythme thêta, d'un rythme gamma et de la somme des deux

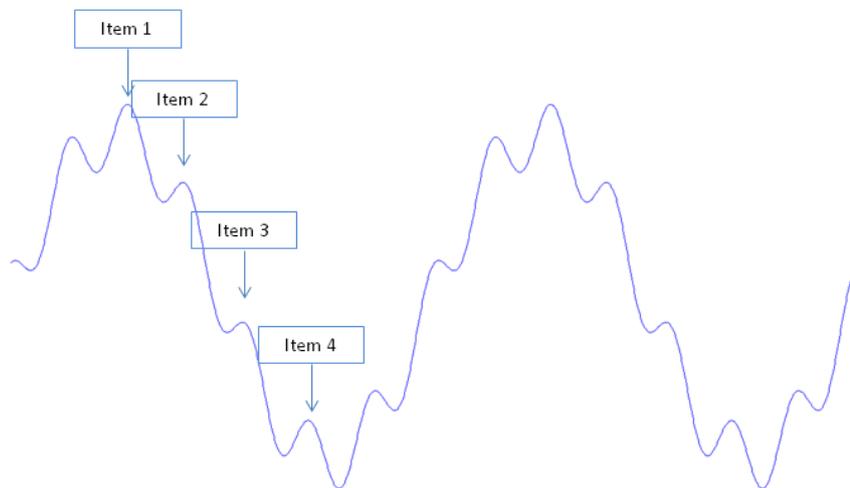


Figure 5. Représentation du modèle de Lisman (2010) de rafraîchissement des éléments en mémoire de travail

Dans la théorie de Lisman (2010) les grandes oscillations (rythme thêta) représentent un cycle, au cours duquel l'intégralité des éléments contenus en MdT est rafraîchie. Les oscillations du rythme gamma codent chacune un des éléments contenus en MdT.

Ainsi, le rafraîchissement de chaque *chunk* correspondrait à une oscillation du rythme gamma contenu dans une phase du rythme thêta. De manière similaire, chaque oscillation du rythme

thêta correspondrait au rafraîchissement de l'ensemble des *chunks* maintenus en mémoire de travail. Ce modèle permettrait d'expliquer que chaque élément puisse être associé à un ordre d'encodage sans que le fait d'apprendre cet ordre ne rajoute d'élément à mémoriser, un problème que la mémoire de travail ne pouvait pas expliquer (Baddeley, 2002 ; 2012).

Conclusion

La théorie de la charge cognitive utilise des modèles de la mémoire de travail dans le cadre de son architecture cognitive. Ces modèles ont permis la mise en évidence de différents effets empiriques. Par exemple, le modèle de Baddeley a permis de mettre en évidence l'effet de modalité et le modèle d'Ericsson et Kintsch explique le renversement lié à l'expertise observé sur de nombreux résultats dans le cadre de la CLT.

La mémoire de travail permet de maintenir actifs des *chunks* pour permettre leurs traitements par des processus cognitifs de haut niveau. Il existe plusieurs manières de maintenir les éléments actifs en MdT : l'utilisation des ressources attentionnelles et la répétition. La MdT est directement sous le contrôle de l'attention. Elle peut être considérée comme la partie activée de la mémoire à long terme dans plusieurs modèles.

La MdT comprend deux modules dédiés au maintien et au traitement de l'information, un module phonologique et un module visuo-spatial. Ces deux modules traitent différentes informations en fonction de la modalité sensorielle sollicitée. La quantité d'information contenue dans chacun de ces deux modules est indépendante de celle stockée dans l'autre module. Cette quantité d'information peut être comptée en *chunks*, et la quantité objective d'information regroupée dans un *chunk* dépend de l'expertise.

Les connaissances en mémoire à long terme sont organisées en schémas, ou réseaux, basés sur le sens. La présence en mémoire de travail d'éléments constitutifs de ces schémas est responsable de leur activation.

3.2 Les ressources attentionnelles

Comme nous l'avons évoqué plus haut, l'attention joue un rôle très important dans les apprentissages, notamment de connaissances secondaires. Son interaction avec le fonctionnement de la MdT est cruciale. Nous allons donc maintenant décrire l'attention et son fonctionnement.

“Everyone knows what attention is. It is the taking possession of the mind, in a clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought. Focalization, concentration of consciousness is of its essence. It implies withdrawal from some things in order to deal effectively with the others...” (James, 1890).

« Tout le monde sait ce qu'est l'attention. C'est la prise de possession par l'esprit, dans une forme claire et vive, d'un élément parmi ce qui semble être un enchaînement d'objets ou de pensées. La focalisation, la concentration de la conscience, en est son essence. Cela implique de piocher un élément parmi d'autres dans le but d'interagir efficacement avec eux... »

Selon cette définition, l'attention est le mécanisme par lequel les différents éléments, stimuli externes ou pensées, sont sélectionnés pour entrer en mémoire de travail, dans laquelle ils sont manipulés. L'attention a donc longtemps été considérée comme un filtre triant les informations pouvant accéder en mémoire de travail et les autres, qui ne sont pas traitées. Ce filtre pouvait s'appliquer de manière non consciente, si le stimulus est suffisamment saillant, ou de manière consciente, lorsque l'on choisit délibérément de focaliser son attention sur quelque chose, de faire attention, pendant une durée plus ou moins longue.

Cependant, ces dernières années ont vu émerger tant de distinctions entre les différentes formes d'attention que personne ne peut définir précisément l'attention (Frey, Ruhnau & Weisz, 2015). En effet, l'attention renvoie non seulement à la sélection de l'information (*e.g.*, Broadbent, 1958 ; Treisman, 1964), mais également à son maintien et sa manipulation (*e.g.*, Cowan, 1988). D'autres conceptions distinguent une attention « interne » d'une attention « externe » en fonction de l'objet de l'attention (Kuhl & Chun, 2014). Ces évolutions de points de vue ont amené une autre question : est-ce que l'attention reflète un phénomène unique ou y a-t-il plusieurs attentions ? La suite de cette partie sera organisée en fonction de la distinction entre l'attention dans les phénomènes perceptifs et l'attention à l'œuvre dans la manipulation de l'information (Hopfinger, Luck & Hillyard, 2004). Avant cela, une première distinction s'impose, entre la notion d'attention et la notion de vigilance.

En effet les deux termes sont souvent employés de manière équivalente dans la littérature, cependant, ils ne sont pas complètement synonymes.

3.2.1. Attention et vigilance

La distinction entre attention et vigilance renvoie à la notion d'attention soutenue, la capacité à focaliser son attention pendant une durée relativement longue. Cette durée ne peut toutefois pas être trop longue, en effet, passé un certain temps, la concentration diminue. Ainsi, Macworth (1958, cité dans Lieury, 2004) met en évidence que la performance diminue fortement après trente minutes, pour se stabiliser au bout d'une heure et demie lors d'une tâche de détection de stimulus rare parmi des stimuli fréquents (*i.e. oddball*). Dans cette expérience, les participants devaient fixer une horloge qui sautait une seconde une fois sur six et détecter les sauts. Cette diminution de la performance au cours du temps lors d'une tâche par ailleurs très facile a de nombreuses implications, notamment dans le cadre de la sécurité routière (Thiffault & Bergeron, 2003 ; Larue, Rakotonirainy & Pettitt, 2010 ; 2011). Cette diminution s'explique par le phénomène d'habituation. En présence d'un stimulus répété, les régions cérébrales traitant ce stimulus sont de moins en moins excitable au cours du temps (Lal & Craig, 2001 pour revue). Au plan psychologique, cela se traduit par une diminution de la performance lors d'une tâche répétitive. À l'inverse, la vigilance est liée en grande partie aux variations cycliques du niveau d'éveil au cours de la journée en plus de la monotonie et de la durée de la tâche (voir Sagberg, Jackson, Krüger, Muzet & Williams, 2004 ; Picot, 2009, pour revues). Il faut donc distinguer deux concepts : d'une part la baisse d'attention au cours du temps liée à une habituation aux stimuli, et d'autre part une baisse de la vigilance liée à une diminution de l'état de veille. Cette baisse de vigilance apparaît par exemple dans les cas d'inertie du sommeil le matin au réveil, alors qu'aucun effort d'attention soutenue n'est demandé par exemple.

La vigilance renvoie essentiellement au niveau de fatigue mentale ressentie, tandis que l'attention renvoie à d'autres phénomènes décrits dans la suite de ce paragraphe. Même si le niveau de vigilance a une grande influence sur les phénomènes attentionnels décrits ensuite, la vigilance n'est pas en soi un facteur cognitif et ne sera donc pas considérée dans la suite de ce travail. Il est néanmoins important de souligner que les études portant sur la notion de charge mentale doivent tenir compte de la vigilance. De la même manière, une étude exhaustive des apprentissages devra tenir compte de cette notion.

3.2.2 Attention perceptive : la sélection de l'information

Les premiers travaux sur l'attention ont consisté à distinguer l'attention de la perception. Suivant la définition de James (1890), l'attention était considérée comme le mécanisme de sélection permettant de traiter certaines informations parmi le grand nombre d'informations présentes dans l'environnement.

3.2.2.1 Attention sélective et attention partagée

Attention sélective et attention partagée forment les extrémités d'un grand continuum (Treisman, 1969). Ce qui les distingue, c'est le nombre d'informations que l'on va sélectionner pour les traiter en même temps (Treisman, 1969). Les premières études sur l'attention partagée (Cherry, 1953) amènent l'idée que l'on ne peut traiter qu'une quantité limitée d'information en même temps. En d'autres termes, les ressources cognitives sont limitées (*e.g.*, Broadbent, 1958).

3.2.2.2 L'effet de *shadowing*

Les ressources attentionnelles étant limitées, les éléments pertinents à traiter doivent donc être sélectionnés parmi les autres éléments présents dans l'environnement. Ainsi, l'attention peut être vue comme la capacité à se concentrer sur « un élément parmi ce qui semble être un enchaînement d'informations » (James, 1890). Cependant, le fait de se concentrer sur un élément entraîne, dans certains cas, l'impossibilité de se concentrer sur d'autres éléments. C'est ce que l'on appelle l'effet de *shadowing* (Cherry, 1953 ; voir aussi Wood & Cowan, 1995 cité dans Cowan, 2000). Dans ses expériences, Cherry (1953) met un casque stéréo à ses participants. Ces derniers entendent deux messages différents, un dans chaque oreille. Quand on leur demande de se concentrer sur l'un des deux pour en traiter le sens, ils ne sont plus capables de traiter le second message. Cependant, Solomon et Stein (1896 ; voir aussi Hirst, Spelke, Reaves, Caharak & Neisser, 1980, cités dans Cowan, 2000) montrent qu'avec une certaine expertise, les participants sont capables de lire un texte et d'en écouter un autre simultanément. Cet effet de *shadowing* ne se manifeste que lorsque l'on sollicite simultanément le même module de la mémoire de travail avec les deux stimuli, la boucle phonologique dans l'exemple de l'étude de Cherry (1953).

Il en découle que l'on ne peut traiter qu'une information à la fois et que les informations traitées sont « filtrées » à une étape plus ou moins précoce du traitement de l'information. Ainsi, les stimuli perçus sont en compétition pour franchir le goulet d'étranglement qu'est l'attention (Awh, Vogel & Oh, 2006 pour une revue). Pour autant, si les ressources cognitives

sont limitées, il est tout à fait possible de réaliser plusieurs choses en même temps (Schumacher *et al.*, 2001 ; Salvucci & Taatgen, 2010). Par exemple, il n'est pas rare de parler en marchant ou encore d'écouter de la musique en travaillant.

Pouvoir réaliser différentes tâches simultanément, lorsque l'on est suffisamment expert dans leur réalisation (voir chapitre 4) et lorsqu'elles ne nécessitent pas les mêmes ressources a de grandes implications dans les apprentissages. Par exemple, lors de l'étude d'un problème compliqué, présenter un schéma comportant un grand nombre d'éléments ajoute de la charge extrinsèque (voir chapitre 2) pour les novices, qui doivent sélectionner des éléments d'information dans ce schéma. En revanche, les apprenants plus experts seront moins désavantagés dans ce contexte. De la même manière, présenter une grande quantité d'informations et demander aux apprenants de les traiter en même temps ne produira qu'un apprentissage limité (Sweller, 2015). La notion d'attention partagée à laquelle ces phénomènes font référence est développée plus loin dans le chapitre.

3.2.2.3 Quel niveau de sélection (précoce vs tardive) ?

La première caractéristique de ce filtre attentionnel est sa position dans la chaîne de traitement de l'information. Est-ce qu'il intervient tôt en orientant l'information perçue, les informations non pertinentes ne faisant pas l'objet de traitements perceptifs (Broadbent, 1958), ou est-ce qu'il agit plus tard, l'intégralité de la scène perceptive étant perçue, et une partie seulement étant traitée (Treisman, 1964), l'attention jouant alors le rôle d'un filtre atténuateur ? Les résultats expérimentaux ont apporté suffisamment d'éléments pour étayer les deux hypothèses, cette dernière pouvant donc intervenir à la fois très tôt dans le processus de perception, ou plus tard. Pour concilier les deux approches, il est envisagé que cette sélection arrive à un stade dépendant de la quantité d'informations perçues. Plus l'environnement perceptif est riche et plus le niveau de sélection de l'information sera précoce (Lavie, 1995 ; Lavie, Beck & Konstantinou, 2014).

Une exception notable se produit lorsque, dans un environnement bruyant, on entend un stimulus particulièrement important, comme par exemple son propre nom. Dans ces circonstances, le stimulus saillant est perçu sans difficulté (Moray, 1959 ; mais voir Conway, Cowan & Bunting, 2001). Cet effet n'est obtenu qu'avec du matériel perceptif très pertinent pour le sujet. Ainsi, lorsque l'on demande aux participants de noter tous les nombres entendus, et que l'on les place dans une situation d'écoute dichotique (Cherry, 1953), les

participants rejettent l'intégralité du message secondaire, même s'il s'agit de nombres. En revanche, s'il s'agit de leur nom, ce message est perçu (Moray, 1959).

À l'inverse, il arrive que l'on « alloue l'attention à une modalité particulière, à une hypothèse diagnostique ou à un objectif donné, pour une durée excessive au vu du coût inhérent à négliger d'autres éléments ou d'autres modalités, à ne pas considérer d'hypothèse alternative ou à échouer à des tâches concurrentes » (Wickens & Alexander, 2009). Cette fixation sur des éléments particuliers est appelée « effet tunnel » ou « tunnelisation attentionnelle ». Il est ainsi possible, lorsque l'on focalise son attention sur un traitement cognitif particulier, de ne pas voir des changements physiques survenant dans l'environnement immédiat (*e.g.*, Simon & Chabris, 1999).

Le filtre attentionnel semble donc varier en fonction de la densité de la scène perceptive, mais également en fonction de la saillance des stimuli et d'autres facteurs endogènes, comme l'allocation de l'attention ou la pertinence du stimulus pour l'individu. Cette variation du niveau du filtre en fonction de la densité de la scène perceptive permet de considérer la notion de charge extrinsèque sous un autre aspect. Plus la scène visuelle est dense, plus les ressources attentionnelles seront monopolisées par la sélection d'informations. De la même manière, plus la scène visuelle est dense et moins d'éléments seront traités car le filtre sera d'autant plus précoce. Conformément à la théorie de la charge cognitive, réduire la saillance des éléments non directement pertinents pour la formation de schémas (quand on ne peut pas les retirer simplement) permet de réduire le coût en ressource attentionnelles lors de la sélection des informations, au moins dans le cas d'un filtre attentionnel inhibiteur.

3.2.2.4 Quelle nature du filtre (inhibition vs pré-activation) ?

Un des premiers arguments dans le débat sur la nature du filtre attentionnel fut l'effet Stroop. L'effet Stroop (Stroop, 1935) porte à penser que ce filtre est inhibiteur, les difficultés rencontrées dans la version non congruente étant liées à la difficulté qu'il y a à inhiber un traitement aussi automatisé que la lecture. Ainsi, le filtre attentionnel consisterait à inhiber les informations non pertinentes pour laisser entrer en mémoire de travail les informations pertinentes seulement.

À l'inverse, des arguments issus des neurosciences conduisent également à penser que ce filtre pourrait être lié à une activation. Par exemple, la prédictibilité d'un stimulus entraîne une augmentation du rythme alpha avant l'apparition du stimulus. De plus, si le stimulus présenté n'était pas le stimulus prévu, apparaît alors une augmentation de la puissance

spectrale dans la bande de fréquence gamma, et à l'inverse une diminution du rythme gamma si le stimulus était le stimulus prévisible (Bauer *et al.*, 2014). En définitive, le filtre attentionnel résulterait à la fois de processus inhibiteur et excitateur, principalement localisés au niveau du lobe occipital (Hillyard, Vogel & Luck, 1999 ; Awh, Vogel & Oh, 2006). De la même manière, l'activation d'une représentation en mémoire de travail permet de réduire les temps de réaction lors d'une tâche de reconnaissance d'un visage connu parmi des visages inconnus (Besson, Barragan-Jason, Puma, Ceccaldi, Didic-Hamel-Cook & Barbeau, in press). Ces résultats sont cohérents avec le modèle de Bruner (1957) selon lequel l'être humain est toujours préparé à percevoir quelque chose. Selon ce modèle, les humains forment sans cesse des hypothèses perceptives et ensuite piochent des éléments dans la scène perceptive pour confirmer ou infirmer les hypothèses.

Il est important de déterminer la nature du filtre attentionnel. En effet, si le filtre est inhibiteur, alors peu importe la saillance des éléments non pertinents, ils seront inhibés et donc ne seront pas traités. En revanche, dans l'hypothèse d'un filtre inhibiteur, un plus grand nombre de stimuli concurrents implique un plus grand coût en ressources attentionnelles pour inhiber un nombre plus grand d'informations non pertinentes. À l'inverse, dans l'hypothèse d'un filtre basé sur une activation supérieure des informations pertinentes, le nombre de stimuli concurrents n'impose pas de coût supplémentaire. Le nombre d'éléments d'information à maintenir actifs reste le même que ces éléments soient entourés de plus ou moins de distracteurs. En revanche, dans cette hypothèse, la saillance des stimuli impose un coût plus élevé que dans l'hypothèse d'un filtre inhibiteur. Plus les éléments non pertinents sont saillants et plus il est coûteux de focaliser l'attention sur les éléments pertinents et de ne maintenir que ceux-là. La quantité d'éléments que l'on peut maintenir étant limitée, le traitement d'un élément non pertinent mais saillant risque de se faire au détriment du traitement d'un autre élément, pertinent. Ainsi, la question de la nature du filtre attentionnel a une grande portée lorsque l'on considère les apprentissages. Elle détermine si les informations non pertinentes peuvent être plus ou moins nombreuses ou plus ou moins saillantes. À cette question, la théorie de la charge cognitive répond qu'il vaut mieux réduire au maximum le nombre d'éléments non pertinents et les rendre le moins saillant possible (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 pour une revue).

3.2.2.5 Attention endogène vs exogène

La notion de filtrage ne permet pas pleinement d'expliquer la différence entre l'attention endogène et l'attention exogène. La distinction entre attention endogène, ou *top-down* et

attention exogène, ou *bottom-up*, renvoie par exemple à la différence qu'il y a entre se concentrer sur quelque chose et être captivé par quelque chose. Dans les deux cas, il s'agit d'une orientation des ressources attentionnelles, mais dans le premier cas, attention endogène, cette allocation est orientée par la cognition de la personne, tandis que dans le second cas, elle est guidée par l'environnement. Le premier cas renvoie à une recherche (consciente ou non) d'informations dans la scène perceptive et cette recherche peut être guidée par les connaissances, c'est pour cela que l'on peut voir ce que l'on a envie de voir, ou ce que l'on s'attend à voir.

L'allocation des ressources attentionnelles fait intervenir les régions préfrontales et pariétales. Les processus *bottom-up* de cette orientation attentionnelle font intervenir le lobe pariétal en premier lieu, puis les régions préfrontales (Shomstein, Kravitz & Behrmann, 2012). À l'inverse, l'attention endogène ferait intervenir les aires préfrontales, puis le lobe pariétal (Shomstein, Kravitz & Behrmann, 2012).

L'attention a donc d'abord été considérée comme un processus permettant de sélectionner les informations pertinentes dans l'environnement afin de respecter la limite du système cognitif. Cette sélection permet de traiter un élément à chaque instant, au moins pour les novices, tout en permettant d'interagir efficacement avec ces informations. La sélection peut être effectuée soit par inhibition des informations non pertinentes, soit par activation des informations pertinentes, probablement en fonction du mode opératoire choisi par la personne. Enfin, la quantité de traitements perceptifs effectués avant que seules les informations pertinentes ne soient sélectionnées dépend de la quantité d'informations présentes dans la scène perceptive. Cependant, les ressources attentionnelles sont également nécessaires lors d'autres processus, tels que la manipulation des informations sélectionnées en mémoire de travail. Cette distinction pose une question supplémentaire : y-a-t'il une seule attention ou plusieurs processus représentant différentes attentions ?

3.2.3 Attention et traitement de l'information

3.2.3.1 L'attention partagée

L'effet de *shadowing* (Cherry, 1953) implique qu'essayer de réaliser deux tâches simultanément ait un coût cognitif pour la personne, ce coût cognitif pouvant se traduire par la diminution de la performance à l'une ou l'autre des deux tâches, ou aux deux. Ces résultats ont conduit à l'idée qu'il existe une Période Réfractaire Psychologique (PRP) pendant laquelle un humain ne peut réaliser deux choses à la fois (Pashler, 2000). Après l'apparition

d'un stimulus, il y a une période pendant laquelle les traitements d'un second stimulus sont impossibles. Cependant, à la suite des travaux sur l'effet de *shadowing* et sur la PRP, il a été mis en évidence que si l'on décale l'apparition du second stimulus d'une certaine durée, il est possible de réaliser les deux tâches simultanément (Salvucci & Taatgen, 2008 ; 2010 pour revues). La diminution de la performance à la seconde tâche est alors fonction du délai entre l'apparition du premier stimulus et celle du second. Plus le délai (SOA pour *Stimulus Onset Asynchrony*) est bref, et plus la performance (en termes de temps de réaction) à la seconde tâche diminue. Cependant, il est possible que les participants arrivent, avec les deux stimuli présentés simultanément, à une performance optimale aux deux tâches (Schumacher *et al.*, 2001). Pour arriver à un tel *perfect time sharing*, les participants de l'étude de Schumacher et collègues (2001) ont besoin d'un certain entraînement. La performance à cette tâche secondaire lors de la première session est diminuée pour tous les participants. Dans cette tâche, les participants devaient réaliser deux tâches simultanément. Il s'agissait de deux tâches de détection de cible, l'une visuelle et l'autre auditive. Les modalités de réponse étaient différentes également, orale pour l'une et motrice pour l'autre (Schumacher *et al.*, 2001 ; Salvucci & Taatgen, 2008). Après plusieurs séances d'entraînement, les participants étaient capables de réaliser les deux tâches sans interférence sur l'une ou l'autre. En revanche, si l'on induit un délai entre la présentation du premier stimulus et celle du deuxième, alors la deuxième tâche subit un effet d'interférence. De même, lorsque l'on demande aux participants de traiter d'abord la première tâche puis la seconde, alors une période réfractaire psychologique apparaît (Schumacher *et al.*, 2001 ; voir Salvucci & Taatgen, 2010 pour revue).

Dans le débat entre théories postulant que les ressources cognitives, limitées, sont mélangées dans un réservoir unique et théories postulant que les ressources cognitives sont séparées dans différents réservoirs ou modules, l'effet de SOA est un argument dans le débat en faveur de ces dernières théories (voir à ce sujet Wickens, 2002 ; 2008 ; Salvucci & Taatgen, 2010). Selon ces derniers modèles, on ne peut faire qu'une chose à la fois, mais néanmoins, il est possible de réaliser deux tâches simultanément si elles ne sollicitent pas les mêmes ressources.

Ainsi, la réalisation simultanée de deux tâches est possible, si l'une d'elles au moins est automatisée (Shiffrin & Schneider, 1977 ; Schneider & Shiffrin, 1977). En effet, lorsque l'on réalise une tâche pour la première fois, cette tâche demande des ressources attentionnelles, des efforts et un contrôle conscient. On parle alors de processus contrôlé. Ces processus sont très sensibles à l'interférence et peuvent être interrompus à tout moment. En revanche, avec la

pratique, il devient possible de faire de moins en moins attention à l'exécution de ces tâches, en les automatisant. À terme, les processus automatisés deviennent plus rapides à exécuter, ne nécessitent plus de ressources attentionnelles et sont moins sensibles à l'interférence. De même, une fois déclenchés, ils sont très difficiles à arrêter (Shiffrin & Schneider, 1977). L'apprentissage de la conduite offre un très bon exemple de ces processus. Les premières heures de conduites sont souvent très éprouvantes en termes d'attention et il est souvent difficile de parler en même temps que l'on conduit. En revanche, un conducteur expérimenté n'a aucune difficulté à manœuvrer sa voiture tout en estimant un itinéraire le plus optimal possible et à tenir une discussion en même temps (voir Wickens, 2008 pour un exemple similaire dans le cadre du modèle des ressources multiples). Quand les circonstances changent de manière extrême par rapport aux conditions normales de l'exécution d'une conduite automatisée, en cas de situation d'urgence par exemple, les processus contrôlés reprennent le dessus.

D'un point de vue cérébral, les différents modèles existants postulent que les mêmes régions sont utilisées pour réaliser différentes tâches simultanément et isolément les unes des autres (Wickens, 2002 ; Salvucci & Taatgen, 2010). La différence porte sur les régions cérébrales impliquées dans le changement de tâche et dans la sélection de la réponse appropriée à la tâche réalisée, ces régions étant également situées dans les aires préfrontales et le lobe pariétal (Corbetta *et al.*, 2008 ; Mühle-Karbe, Andres & Brass, 2014 ; Won Han & Marois, 2014).

3.2.3.2 Attention sélective

Les travaux sur l'attention partagée et les situations de multitâches font ressortir que réaliser plusieurs tâches simultanément fait appel aux mêmes traitements que réaliser une tâche seulement (Wickens, 2002 ; Salvucci & Taatgen, 2008 ; 2010). Les différences comportementales, en termes de temps de réaction ou de réponses correctes s'expliquent par le fait que l'on doit entremêler les exigences de chaque tâche et les traiter avec des ressources limitées. On peut donc étudier de la même manière les phénomènes d'attention partagée et d'attention sélective, dans lesquels il s'agit de traiter une tâche à l'exclusion d'autres informations non pertinentes.

Les structures cérébrales supportant l'allocation des ressources attentionnelles semblent être les mêmes que celles supportant la mémoire de travail, principalement les aires préfrontales et les lobes pariétaux (Awh & Jonides, 1998 ; Awh, Vogel & Oh, 2006 ; Corbetta *et al.*, 2008). De la même manière que dans le cadre de la mémoire de travail, l'allocation de ressources

attentionnelles se traduit par une diminution de la puissance spectrale dans la bande de fréquence alpha et dans une moindre mesure par une augmentation de la puissance associée au rythme thêta (Shomstein, Kravitz & Behrmann, 2012).

Synthèse

La notion de ressources limitées impose de sélectionner les informations pertinentes à traiter en mémoire de travail. C'est un premier rôle de l'attention, celui de filtre permettant de discriminer les informations pertinentes des autres. Un autre rôle de l'attention est de permettre de maintenir et de manipuler l'information en mémoire de travail (Cowan, 2014 pour revue). Enfin, l'attention est également vue comme la ressource nécessaire dans les traitements de hauts niveaux tels que l'inhibition, la planification ou encore le changement de tâche ou la supervision des informations en MdT et leur rafraîchissement (Miyake *et al.*, 2000), certains auteurs classant même la mémoire de travail parmi les fonctions exécutives (Diamond, 2013).

3.2.4 Des modèles de l'attention

Les premiers modèles de l'attention l'ont considérée comme un phénomène prenant place entre la perception des informations et leurs traitements, permettant de réduire le nombre d'informations à traiter. Ainsi, le modèle de Broadbent (1958) considère l'attention comme un filtre atténuateur, permettant de réduire le nombre d'informations perçues directement. Treisman (1964) propose que l'attention soit liée à un phénomène de recherche des traits perceptifs (éléments d'un objet visuel) pertinents dans l'environnement. Selon son modèle, plus le nombre de traits à combiner pour pouvoir identifier un objet est grand, plus la perception est coûteuse en ressources attentionnelles. Selon ces deux modèles, l'attention s'applique à la scène perceptive. Dans un cas (Broadbent, 1958), l'intégralité des éléments étant perçue, il s'agit de réduire ce nombre, ce qui correspond à une approche guidée par l'environnement (*i.e.* bottom-up). Dans l'autre (Treisman, 1964), il s'agit de chercher des éléments dans l'environnement permettant l'identification de l'objet visuel, ce qui correspond à une conception plutôt guidée par le système cognitif (*i.e.* top-down). Dans ces deux modèles, l'attention est vue comme un phénomène unitaire, il n'y a qu'un réservoir unique d'attention, sollicité dans toutes les tâches non automatisées.

D'autres modèles postulent que l'attention ne sert pas uniquement lors de la perception, mais également lors de processus cognitifs de plus haut niveau. Wickens (2002 ; 2008) propose un modèle des ressources multiples (voir Figure 6) selon lequel le système cognitif humain

dispose de différents réservoirs en fonction des modalités sensorielles sollicitées, de la nature de la tâche, du traitement à réaliser et de la modalité de la réponse à fournir. Ce modèle met en avant la notion de réservoirs multiples, mais aussi que la sélection de la réponse (motrice ou verbale dans le modèle) et son exécution nécessitent des ressources attentionnelles.

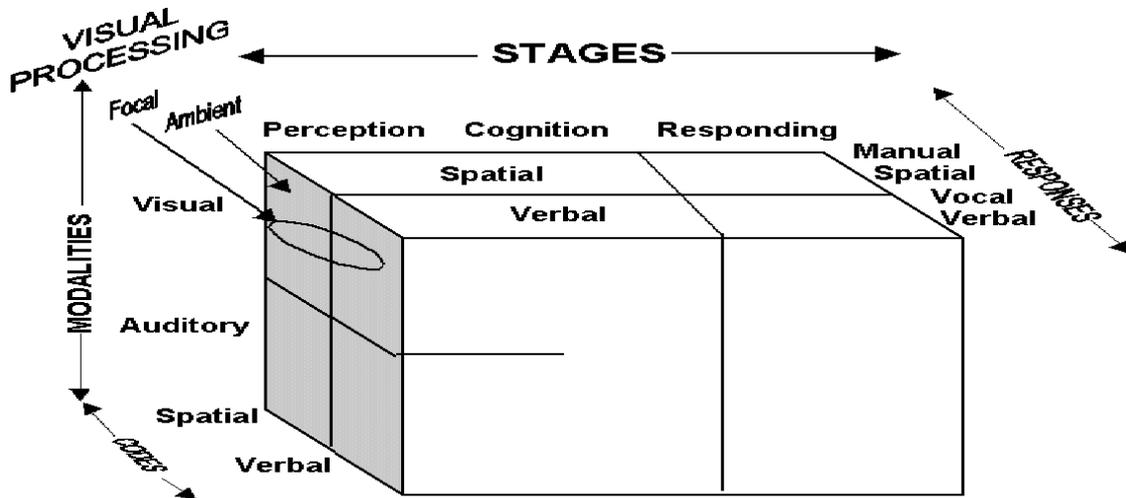


Figure 6. Le modèle de Wickens

Les modalités sensorielles et de réponses ainsi que le traitement définissent différents chemins de traitement. Si deux tâches concurrentes utilisent des modalités différentes à chaque étape, elles peuvent être réalisées conjointement sans interférence.

Conclusion

Du point de vue de la théorie de la charge cognitive, l'attention est une des ressources cognitives utilisées par les apprenants. Ainsi, ses caractéristiques doivent être prises en compte pour améliorer la présentation de l'information, comme par exemple dans le cas de l'effet d'attention partagée (voir chapitre 2).

Au final, l'attention peut être vue sous deux aspects différents. D'une part, elle possède un premier rôle de filtre. Elle est alors chargée de sélectionner les informations perceptives qui seront traitées. La nature de ce filtre (inhibiteur ou excitateur) est encore sujette à débat et, le moment auquel intervient ce filtre dans la chaîne de traitement de l'information dépend de la quantité d'information à traiter. Cependant, une grande partie de l'information sensorielle est traitée, et le second rôle de l'attention est alors de discriminer les éléments pertinents qui entreront dans la mémoire de travail des éléments non pertinents (ou moins pertinents) qui ne seront pas traités en mémoire de travail. Ces derniers ne feront donc pas l'objet du focus attentionnel et ne seront pas accessibles à la conscience.

Chapitre 3 Les déterminants cognitifs de la charge

Si l'attention est responsable de la sélection des informations qui entrent en mémoire de travail, elle est à son tour orientée par la mémoire de travail, les éléments présents en mémoire de travail orientant la sélection des informations présentes dans la scène perceptive.

Enfin, l'attention est également nécessaire dans la plupart des activités cognitives de haut niveau (mémoire de travail, fonctions exécutives ou encore sélection de la réponse). Elle peut être vue comme un réservoir unique ou comme plusieurs fonctions indépendantes selon les auteurs.

3.3 Intégrer attention et mémoire de travail : le modèle TBRS

L'attention et la mémoire de travail sont souvent reconnues comme largement associées mais peu de modèles décrivent cette association (Baddeley, 1986 ; Ericsson & Kintsch, 1995, mais voir Cowan, 1988). De la même manière, plusieurs modèles de la MdT considèrent le temps comme un facteur d'oubli (*e.g.*, Baddeley, 1986) mais sans décrire précisément ce facteur. Cette partie présente un modèle de la mémoire de travail tenant compte du temps et associant attention et mémoire de travail, le modèle TBRS (*e.g.*, Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004). Du point de vue de la CLT, tenir compte à la fois de l'attention et de la mémoire de travail est important puisqu'il s'agit des deux ressources cognitives principales affectant l'apprentissage. Enfin, un modèle considérant les variations temporelles de l'utilisation de ces ressources pourrait être une réponse aux limites de la CLT identifiées dans la littérature (Paas *et al.*, 2003). Cette partie présentera les questions auxquelles le modèle TBRS doit répondre pour tenir compte des contraintes de la MdT et de l'attention, puis les hypothèses centrales de ce modèle avant de présenter le modèle proprement dit et les prédictions qu'il permet de faire concernant la charge cognitive.

3.3.1 Des questions

Faut-il tirer des travaux contradictoires sur les filtres attentionnels l'idée que toutes les informations sont stockées en mémoire de travail et qu'une partie seulement fait l'objet du focus attentionnel et peut donc être traitée (Cowan, 1988 ; 1995, cité dans Cowan, 2000 ; voir aussi Shipstead, Lindsey, Marshall & Engle, 2014) ?

Faut-il plutôt y voir une dissociation entre deux types d'attention, une attention précoce (Posner 1980) permettant d'orienter la sélection d'information et une attention contrôlée, plus tardive, dont le rôle serait d'orienter le focus attentionnel sur les éléments à traiter en mémoire de travail ?

Les théories les plus récentes sur l'attention et la mémoire de travail lient les deux concepts. L'attention est considérée comme « le gardien du temple » de la mémoire de travail (Awh, Vogel & Oh, 2006) et les deux concepts sont considérés comme « inextricablement inter-reliés » (LaBar *et al.*, 1999). On ne pourrait donc pas correctement étudier l'un sans étudier l'autre (Cowan, 2000 pour une discussion).

Coupler les deux processus a des implications théoriques non négligeables. Par exemple, est-ce que la mémoire de travail peut toujours contenir un certain nombre de *chunks* actifs, sur lesquels s'appliquent le focus attentionnel (Cowan, 2000 ; 2001) ? Ou à l'inverse, est-ce que

le focus attentionnel ne peut être focalisé que sur un seul élément, et l'application alternée de ce focus sur les différents éléments permet-elle de maintenir leurs traces mnésiques actives (McElree, 2001 ; Oberauer, 2002) ?

Un argument en faveur de la première théorie est qu'il est possible de garder en mémoire des éléments (matériel auditif) après une tâche, alors que l'on a saturé les ressources attentionnelles par une autre tâche (Balota & Duchek, 1986, cités dans Cowan 2000). À l'inverse, comme l'attention ne peut être focalisée que sur un élément à chaque instant, elle ne permet pas de réaliser des opérations différentes simultanément (Pashler, 1998 ; Garavan, 1998 ; Oberauer, 2002 ; 2005).

Ceci pose une question : est-ce que la performance dépend de la capacité à changer rapidement de tâche ou de l'empan en mémoire de travail ? Dans la première hypothèse, selon laquelle il est impossible de réaliser plusieurs tâches concurrentes simultanément, la capacité à changer de tâche, la flexibilité cognitive, permet de réaliser le plus rapidement possible deux tâches concurrentes. Dans la seconde hypothèse, l'empan en mémoire de travail et la capacité attentionnelle peuvent permettre de réaliser deux tâches concurrentes sans avoir à alterner entre les deux. Pour étayer ce dernier point, Kane, Bleckley, Conway et Engle (2001) mettent en évidence un lien entre l'empan en mémoire de travail et les ressources attentionnelles. En effet les participants obtenant les meilleurs scores d'empan en mémoire de travail obtiennent les meilleures performances lors d'une tâche d'anti-saccades. Dans une tâche d'anti-saccades, une indication de direction est donnée (généralement par une flèche) et la cible apparaît dans la direction inverse. Les participants doivent alors détecter ou identifier la cible. Ces tâches sont généralement entrecoupées de tâches de pro-saccades dans lesquelles la cible apparaît dans la direction désignée par l'indication.

Cependant, ce lien entre capacité attentionnelle et empan de mémoire de travail ne permet pas de répondre à la question. En effet, il est possible que ce lien puisse provenir du fait que les tâches interférentes soient résolues plus rapidement avec de plus grandes ressources attentionnelles, évitant ainsi davantage d'interférence en mémoire de travail et permettant de maintenir plus de *chunks* actifs sans erreur. À l'inverse, il est tout à fait possible que les *chunks* en mémoire de travail soient maintenus actifs grâce à un rafraîchissement sériel réalisé par l'attention (Cowan, 1988). Ainsi, les ressources attentionnelles seraient utilisées à la fois pour réaliser des traitements sur les éléments maintenus actifs en mémoire de travail et pour les rafraîchir (Hulme, Thomson, Nuir & Lawrence, 1984 ; Case, Kurland & Goldberg, 1982).

Dans cette hypothèse, l'attention ne pouvant s'appliquer que sur un élément à la fois (*e.g.*, Kahneman, 1973), ce serait l'efficacité de son utilisation qui permettrait de maintenir davantage d'éléments actifs en mémoire de travail (Vergauwe, Dewaele, Langerock & Barrouillet, 2012 ; voir Barrouillet & Camos, 2015 pour une revue du sujet).

Ainsi, la capacité limitée de la mémoire à court terme s'expliquerait par le fait que le focus attentionnel ne peut être appliqué qu'à un élément à un instant donné. Si le nombre de *chunks* à maintenir actifs dépasse la quantité d'informations que l'attention peut maintenir active avant qu'une information soit oubliée, alors cette information sera oubliée. Cet oubli réduit le nombre de *chunks* restant à maintenir actifs. En d'autres termes, la question de savoir ce qu'il se passe lorsque la capacité est dépassée ne se pose pas, puisque les *chunks* surnuméraires sont simplement oubliés (Barrouillet & Camos, 2014). De la même manière, les traitements des informations maintenues en mémoire de travail nécessitent les ressources attentionnelles. Pendant ces traitements, les *chunks* maintenus actifs ne peuvent être rafraîchis. C'est par exemple ce qu'il se passe lorsque l'on essaye de retenir un numéro de téléphone et que quelqu'un nous parle. Les ressources attentionnelles nécessaires pour traiter la conversation ne peuvent plus être utilisées pour rafraîchir le numéro de téléphone. Si ces ressources sont monopolisées pendant plus de temps qu'il n'en faut pour que les *chunks* composant le numéro de téléphone soient tous perdus, alors le numéro est oublié.

Cette conception liant attention et mémoire de travail implique donc que l'oubli soit principalement lié au temps et non à l'interférence. Les *chunks* maintenus actifs en MdT sont des éléments activés à l'aide des ressources attentionnelles. Cependant, contrairement aux conceptions « spatiales » de la mémoire de travail (Barrouillet, 1996), ces éléments ne demeurent pas en MdT jusqu'à leur remplacement. Ils ne restent en mémoire de travail que tant qu'ils sont actifs. L'activation de chaque *chunk* diminue au cours du temps, nécessitant un mécanisme attentionnel pour permettre le maintien des *chunks* dans un état d'activation suffisant. Plus l'état d'activation d'un *chunk* diminue et plus sa récupération est difficile. L'interférence n'est donc pas responsable de l'oubli en mémoire de travail, l'oubli est un phénomène lié au temps écoulé depuis le dernier rafraîchissement de chaque *chunk*.

3.3.2 Des hypothèses

Un modèle de plus en plus influant permettant de lier les deux processus, attention et mémoire de travail, est le modèle TBRS (Time-Based Resource Sharing, ou partage temporel des ressources, Barrouillet, Bernardin & Camos 2004). Ce modèle se base sur les conclusions

précédentes pour lier les deux processus et sur l'architecture cognitive ACT-R (*e.g.*, Anderson, 1993 ; voir chapitre 4 sur l'expertise). Il s'appuie sur quatre postulats issus des conclusions précédentes (Camos & Barrouillet, 2014) : l'attention est la ressource cognitive principale (1), tous les traitements réalisés sont séquentiels (2), le maintien de l'information en mémoire est lié au rafraîchissement des *chunks* activés (3) et les situations de multitâches sont une alternance rapide entre les différentes tâches (4). Ces quatre postulats seront développés ci-dessous.

La ressource cognitive principale est l'attention. Ce premier postulat s'appuie sur les travaux de Cowan (*e.g.*, Cowan, 1988). Dans ces travaux, le maintien de l'information est lié à l'attention. Elle sert à la fois au maintien des informations en mémoire de travail et à leur traitement à l'aide de processus cognitifs de plus haut niveau. Dans le modèle TBRS, ces informations peuvent être des *chunks* mais également des buts concernant la tâche à réaliser. Les traitements peuvent être le maintien en mémoire ou la récupération de ces informations, ces deux types de traitements nécessitant des ressources attentionnelles. Les traitements peuvent également être liés au traitement de l'information.

Pour maintenir des *chunks* en mémoire de travail, l'attention active des traces mnésiques pour les éléments sur lesquels elle est focalisée. Lorsque le focus attentionnel est dirigé sur un *chunk* son niveau d'activation augmente. En dehors du focus attentionnel, le niveau d'activation de ce *chunk* diminue (*e.g.*, Cowan, 1998 ; Barrouillet & Camos, 2015). Pour garder des *chunks* actifs en mémoire de travail, il faut donc réactiver régulièrement les traces mnésiques correspondantes. En parallèle, le temps consacré aux traitements permet leur réalisation. Plus un traitement est coûteux ou difficile, plus il nécessite de temps pour être réalisé. Selon le modèle TBRS, la question ne se pose pas en termes de performances, mais en termes de temps disponible pour réaliser le traitement (Barrouillet & Camos, 2015 pour revue). Pendant la durée de ces traitements, les *chunks* maintenus en mémoire de travail ne font pas l'objet de rafraîchissements et leur activation diminue. Si le temps requis pour réaliser un traitement est trop long, l'activation des *chunks* diminue trop pour permettre leur réactivation future et les *chunks* sont oubliés. Chaque *chunk* doit faire l'objet d'un rafraîchissement individuel. Si le temps disponible lors de l'encodage d'un nouveau *chunk* est important alors son activation sera supérieure à ce qu'elle aurait été avec un temps plus court et ce *chunk* sera moins sensible à l'oubli lors d'une tâche de rappel rapide (Ricker & Cowan, 2014, cité dans Barrouillet & Camos, 2015).

Tous les traitements réalisés sont séquentiels. Un seul élément, *chunk* ou traitement, peut faire l'objet du focus attentionnel à un moment donné, car les ressources sont limitées. Ainsi, le temps consacré à réaliser un traitement sur une information ne sera pas alloué à maintenir une trace mnésique active ou à réaliser un autre traitement. Cette limite du système cognitif explique la notion de ressources cognitives limitées. Dans le modèle TBRS, la ressource limitée est le temps, l'attention ne pouvant être focalisée que sur un seul élément à chaque instant. Ainsi, les *chunks* maintenus en MdT doivent être rafraîchis régulièrement, ce qui implique de stopper la réalisation de traitements trop longs régulièrement pour permettre le rafraîchissement. Il s'ensuit logiquement que plus de *chunks* sont maintenus actifs en mémoire de travail, plus les traitements à réaliser sont lents, car interrompus par des périodes de rafraîchissement importantes (McCabe, 2008 ; Vergauwe, Camos & Barrouillet, 2014 ; cités dans Barrouillet & Camos, 2015).

Les situations de multitâches sont une alternance de processus mono-tâches. Conséquence de l'hypothèse précédente, selon laquelle tous les traitements réalisés sont séquentiels, les situations de multitâches sont considérées dans le modèle TBRS comme relevant d'une alternance rapide du focus attentionnel vers les différentes tâches à réaliser (Camos & Barrouillet, 2014 pour une revue). De la même manière que la charge en mémoire ralentit la vitesse de traitement des informations, la sollicitation des ressources pour l'un ou l'autre des processus entraîne une charge pour les mécanismes responsables du changement de tâche, localisés au niveau du sillon frontal inférieur (Vergauwe, Hartstra, Barrouillet & Brass, 2015, cité dans Barrouillet & Camos, 2015). Cette dernière hypothèse implique que, contrairement au modèle de Baddeley (1986) dans lequel maintien et traitement étaient deux processus distincts, ces deux mécanismes utilisent la même ressource, c'est-à-dire l'attention. Il y a donc un compromis réalisé entre l'allocation de ressources à l'un ou à l'autre des processus.

Ainsi selon le modèle de partage temporel des ressources, attention partagée et attention sélectives sont deux modes d'utilisation de la ressource attentionnelle. Lorsque l'attention est utilisée pour une seule tâche, il s'agit d'attention sélective. Lorsque l'on tente de réaliser deux tâches (ou plus), ces tâches doivent se partager le focus attentionnel, il s'agit d'attention partagée.

Le fait que la ressource qu'est l'attention soit une ressource unique implique que lorsque l'attention est sollicitée par des tâches perceptives plus difficiles, cette ressource est moins disponible pour réaliser des tâches de plus haut niveau telles que le traitement des

informations (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009 ; voir cependant Oberauer & Lewandowsky, 2014 pour le point de vue contraire). Dans le modèle TBRS, le filtre attentionnel est vu comme permettant de maintenir les *chunks* actifs plutôt que comme luttant contre l'interférence des informations concurrentes. La rapidité de l'oubli est donc expliquée par une incapacité à réactiver les traces mnésiques des *chunks* dans la durée impartie avant leur désactivation due au temps. De la même manière, cette conception explique la capacité limitée de la mémoire de travail par le temps nécessaire pour rafraîchir l'intégralité des informations. Si la mémoire de travail maintient un trop grand nombre de *chunks*, le temps de rafraîchir les premiers *chunks* encodés, les derniers auront un niveau d'activation trop faible pour être réactivés. Enfin, ces *chunks* étant tous rafraîchis et traités par le focus attentionnel, leur modalité n'est pas importante. Les représentations maintenues en mémoire de travail sont des représentations amodales, à la manière des représentations maintenues dans le buffer épisodique du modèle de Baddeley (2000).

Pour tester l'hypothèse selon laquelle le maintien des *chunks* actifs en mémoire de travail est un mécanisme nécessitant de l'attention, Barrouillet, Bernardin et Camos (2004) ont utilisé une tâche d'empan complexe. Dans ce protocole, les items à mémoriser sont présentés séquentiellement. Entre chaque item, une série de tâches interférentes est présentée. Si le maintien des items nécessite le focus attentionnel, alors imposer une tâche interférente nécessitant aussi des ressources attentionnelles devrait avoir un effet délétère sur le maintien des éléments en mémoire de travail. Le temps consacré au traitement de la tâche ne sera pas consacré au rafraîchissement des items maintenus en mémoire de travail si ces deux processus nécessitent le focus attentionnel. Ainsi, en gardant un rythme de présentation des tâches interférentes constant, des tâches plus coûteuses en ressources attentionnelles monopoliseront le focus attentionnel le plus longtemps, laissant moins de temps pour rafraîchir les traces mnésiques. Par exemple, Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe et Camos (2007) ont utilisé des items composés de consonnes et des tâches interférentes nécessitant un jugement spatial. La tâche de jugement spatial, représentée dans la Figure 7 imposait au participant de décider si un carré présenté à l'écran était situé dans la partie supérieure ou dans la partie inférieure de l'écran. Dans une modalité « distante », les carrés étaient éloignés du centre, rendant la tâche moins coûteuse. Dans la modalité « proche », les carrés étaient proches du centre, rendant la tâche plus coûteuse, et donc plus longue.

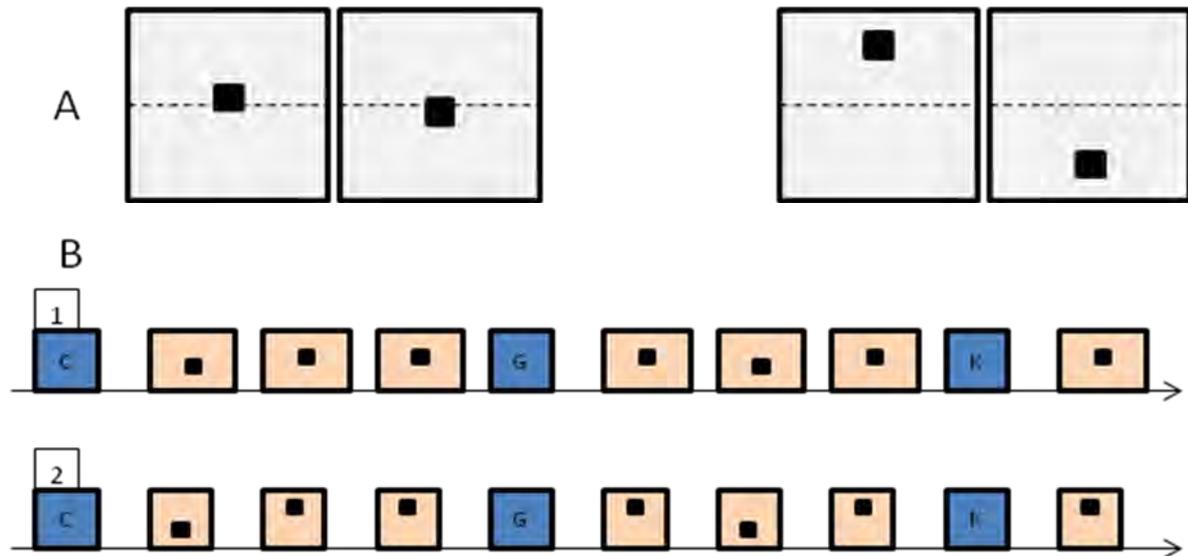


Figure 7. Illustration d'une tâche de distraction (Barrouillet et al., 2007) et les variations du ratio temporel induites

En haut (A) les deux modalités de tâches interférentes dans l'expérience de Barrouillet et collègues (2007, expérience 2). Les lignes en pointillés ont été ajoutées pour repérer le centre de l'écran. Les participants devaient décider si les carrés étaient présentés dans la moitié supérieure ou inférieure de l'écran. La modalité « carrés proches » est plus coûteuse en ressources attentionnelles, impliquant la sollicitation du focus attentionnel pendant une durée plus longue. En dessous (B), le déroulement temporel des essais dans les deux modalités, « carrés proches » (1) et « carrés éloignés » (2). Dans la première modalité, le temps consacré au traitement de la tâche interférente est plus long, représenté par des rectangles plus larges. Chaque item à mémoriser (bleu) est présenté séquentiellement et une série de tâches interférentes est présentée entre chaque item. Le temps de traitement plus long pour la tâche interférente implique un temps consacré au rafraîchissement des traces mnésiques plus court, donc une performance moindre lors du rappel des items à mémoriser.

Quelle que soit la nature de la tâche interférente, qu'il s'agisse de lecture de chiffres ou de calcul mental simple (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004) ou de jugement spatial (Barrouillet *et al.*, 2007), tant que cette tâche sollicite le focus attentionnel, le même effet est retrouvé. La durée du traitement de la tâche interférente affecte directement la capacité à récupérer des items en mémoire de travail, l'empan mnésique. Plus cette durée est longue, moins la performance de rappel est bonne, en gardant le temps entre deux items constant et le nombre de tâches interférentes égal entre les deux conditions.

Ces résultats impliquent que contrairement à ce que prévoit le modèle à composantes multiples (*e.g.*, Baddeley, 1986), la mémoire de travail ne soit pas composée de modules

esclaves au sein desquels les *chunks* peuvent être maintenus et manipulés indépendamment. Au contraire, ils seraient plutôt stockés dans une « boucle exécutive » responsable de l'utilisation du focus attentionnel à la fois pour leur maintien et pour leur traitement.

3.3.3 Un modèle de la mémoire de travail

Pour rendre compte du fait que l'on peut maintenir des éléments en mémoire de travail alors que l'on sature les ressources attentionnelles par une tâche concurrente (Balota & Duchek, 1986, cités dans Cowan 2000), le modèle est enrichi des deux modules esclaves (voir Figure 8), la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial (Camos & Barrouillet, 2014) déjà présents dans le modèle de la mémoire de travail (Baddeley, 1986 ; Baddeley & Logie, 1999). Dans la dernière version du modèle, le calepin visuo-spatial est retiré (Barrouillet & Camos, 2015). En revanche, un buffer phonologique et un buffer visuel sont toujours présents. Ils reflètent les registres de mémoires sensorielles décrits dans différents modèles de la mémoire (*e.g.*, Atkinson & Shiffrin, 1968).

Le cœur du modèle, la « boucle exécutive » permet de maintenir des représentations actives grâce aux ressources attentionnelles dans un buffer épisodique similaire à celui proposé par Baddeley (2000). La boucle exécutive est composée d'un système de production, contenant des règles de production, et du buffer épisodique contenant les représentations actives en mémoire de travail (Barrouillet & Camos, 2015). Ces informations sont stockées sous la forme de représentations amodales, c'est-à-dire ne dépendant pas d'une modalité sensorielle. Dans les dernières versions du modèle TBRS, la mémoire de travail est indépendante de la mémoire à long terme (Barrouillet & Camos, 2015). Son contenu est composé de représentations utilisant à la fois des connaissances stockées en mémoire à long terme et d'informations tirées de l'environnement. Les représentations maintenues actives dans la « boucle exécutive » nécessitent des rafraîchissements attentionnels réguliers. Comme ces représentations sont amodales, elles ne sont pas sensibles à certains effets mis en évidence dans le cadre de l'étude de la mémoire de travail, comme par exemple l'effet de longueur des mots. À l'inverse, le matériel stocké dans la boucle phonologique est maintenu sans coût en termes de ressources attentionnelles mais est sensible aux effets de similarité et de longueur des mots. L'absence de calepin visuo-spatial implique que les informations visuelles doivent être maintenues sous la forme de représentation amodales dans la boucle exécutive et ne peuvent faire l'objet d'un maintien indépendant qui ne coûterait pas de ressources attentionnelles. Ceci implique également que la capacité en mémoire de travail soit plus importante pour les informations verbales que pour les informations visuelles. Les premières

peuvent être stockées dans la boucle phonologique et dans le buffer épisodique de la boucle exécutive, tandis que les secondes dépendent de la boucle exécutive uniquement (Camos & Barrouillet, 2014).

La boucle exécutive comprend également un système de production, contenant des règles, similaire à celui proposé dans le cadre de l'architecture ACT-R (Anderson, 1993). Ce système de production permet d'activer des règles sur la base de l'activation liée aux buts et aux *chunks* contenus dans le buffer épisodique. L'utilisation de ces règles de production va permettre les traitements en mémoire de travail et nécessite donc des ressources attentionnelles lors de son utilisation.

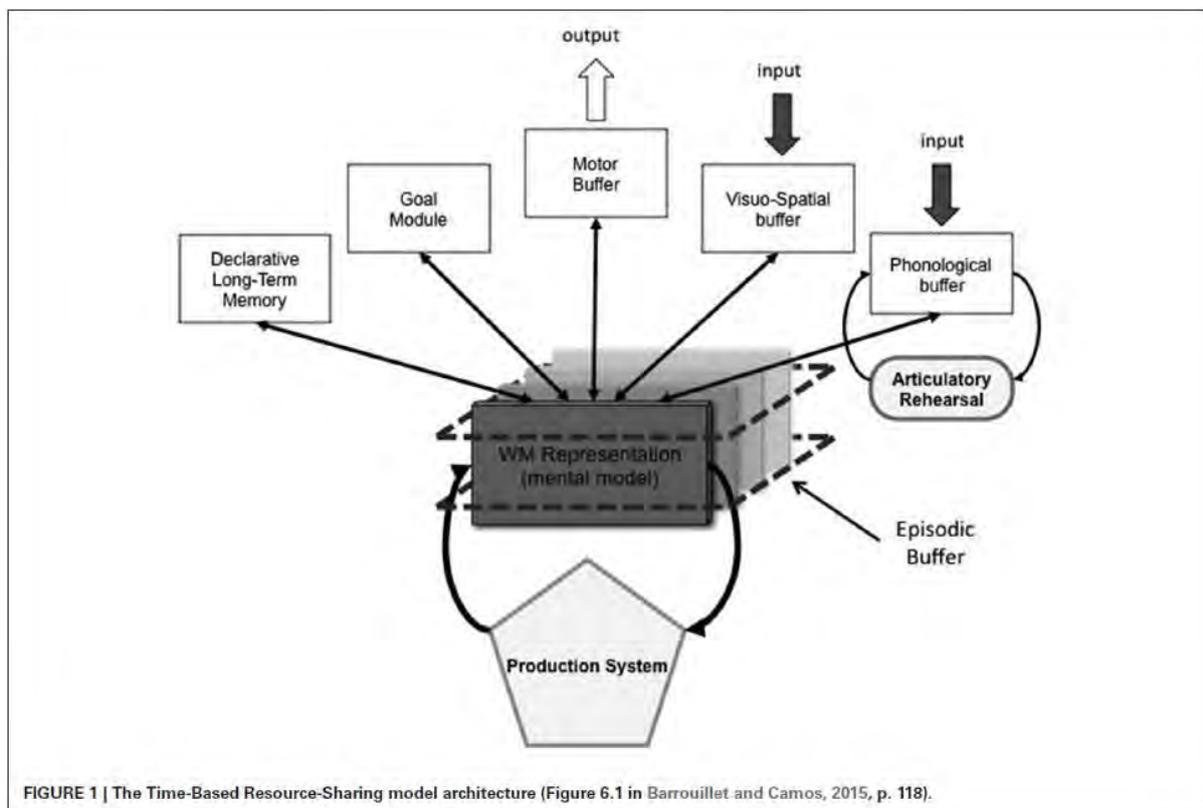


Figure 8. Représentation du modèle TBRS (tirée de Barrouillet & Camos, 2014)

Le modèle présente une boucle exécutive dans laquelle des représentations sont maintenues actives à l'aide de l'attention. Ces représentations ne sont pas sensibles aux effets de similarité et de longueur des mots. Les représentations contenues dans la boucle phonologique sont, elles, sensibles à ces effets mais leur maintien ne nécessite pas de ressources attentionnelles.

En parallèle de la boucle exécutive, le modèle TBRS fait l'hypothèse de buffers sensoriels, d'un buffer phonologique et d'un buffer visuel, permettant de stocker pour une très brève période l'information sensorielle. C'est sur la base du contenu de ces buffers que les

représentations sont construites dans le buffer épisodique. Le buffer phonologique est également lié à la boucle phonologique dans laquelle l'information verbale peut être maintenue sans nécessiter d'attention à l'aide d'un mécanisme de répétition similaire à celui proposé par Baddeley (1986).

La boucle exécutive n'étant pas, contrairement à d'autres modèles récents de la MdT (*e.g.*, Cowan, 1988 ; Ericsson & Kintsch, 1995), une partie de la mémoire à long terme, l'architecture cognitive TBRS fait l'hypothèse d'une mémoire à long terme distincte de la mémoire de travail, ayant néanmoins des liens avec la boucle exécutive. Les informations stockées dans le buffer épisodique sont susceptibles d'être transférées en mémoire à long terme sur la base du nombre de rafraîchissement possibles pendant leur maintien en MdT. En revanche, les informations stockées dans la boucle phonologique ne font pas l'objet d'un tel transfert (Camos & Portrat, 2014).

3.3.4 La charge cognitive dans le modèle TBRS

L'hypothèse du traitement séquentiel des informations permet d'avancer qu'il est possible d'alterner traitement de l'information et rafraîchissement des traces mnésiques de manière rapide. Cette alternance permet de maintenir des informations en mémoire de travail tout en réalisant des traitements sans baisse de la performance, sauf dans le cas de phénomènes de « capture attentionnelle ». Dans ce cas, l'attention est accaparée par un traitement. Selon les auteurs (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004), davantage qu'une accapuration, il s'agit d'un ratio de temps pendant lequel les ressources ne sont pas disponibles :

$$ratio = \frac{\text{temps nécessaire pour réaliser le traitement}}{\text{temps disponible avant la disparition des traces mnésiques}}$$

Ainsi, garder une liste d'items en MdT pendant la réalisation d'une autre tâche, telle que du calcul mental, nécessite de porter le focus attentionnel sur le calcul mental, puis dans le temps restant d'utiliser ce focus attentionnel pour réactiver la liste d'items contenue en mémoire de travail (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004 ; Barrouillet & Camos, 2007 ; Camos & Barrouillet, 2014). Les informations contenues en mémoire de travail étant caractérisées par un degré d'activation et ce degré décroissant au cours du temps, la performance lors du rappel de la liste d'items est affectée par le temps nécessaire au traitement à réaliser (ici le calcul mental).

Ainsi, Barrouillet et ses collègues (Barrouillet *et al.*, 2007 ; Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004) définissent la charge cognitive liée à une tâche comme le rapport entre le temps

disponible pour rafraîchir chaque élément à maintenir en mémoire de travail et le temps total disponible pour réaliser la tâche, soit : $Charge\ cognitive = \frac{aN}{T}$

Avec « a » le temps nécessaire pour réactiver un élément et « N » le nombre d'éléments d'une part et « T » la durée totale de la tâche d'autre part. Cela signifie que différentes modalités de présentation, bien que comportant le même nombre d'items à rafraîchir, peuvent ne pas imposer la même charge cognitive (voir Figure 9). Plus le temps nécessaire pour traiter la tâche interférente est proche du temps disponible, et plus le temps disponible pour rafraîchir les traces mnésiques est court.

Dans le cadre d'une tâche d'empan complexe, le temps disponible pour traiter la tâche interférente est gardé constant tout au long de la passation. La tâche étant constante, le ratio entre le temps nécessaire et le temps disponible est gardé constant tout au long de la passation. L'équation $CL = \frac{aN}{T}$ est donc applicable indifféremment à la passation entière, à chaque item suivi d'une série de tâches interférentes ou encore au ratio entre le temps disponible pour traiter une tâche interférente (durée entre la présentation de la tâche interférente et la présentation de la suivante) et le temps nécessaire pour traiter cette tâche. La différence de temps restant entre le temps disponible et le temps restant pouvant être utilisée pour rafraîchir les traces mnésiques.

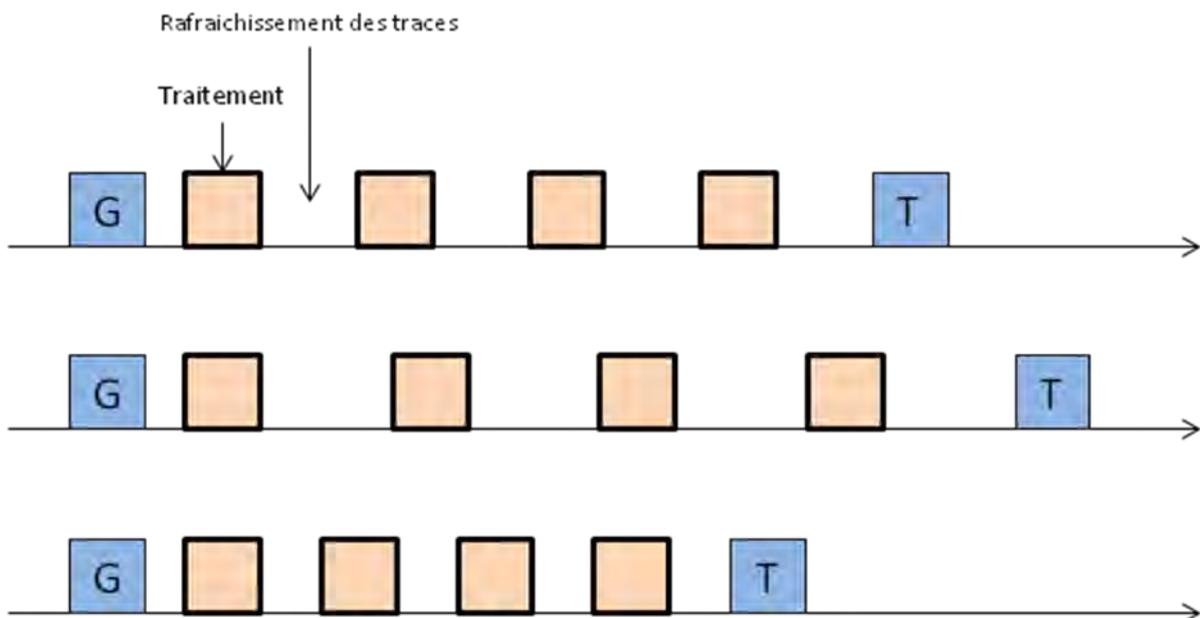


Figure 9. Variations du ratio temporel lors d'une tâche d'empan complexe

Lors d'une tâche d'empan complexe, chaque item à mémoriser (ici, « G » et « T ») est suivi d'une série de tâches interférentes (les carrés couleur saumon). Le temps nécessaire pour

traiter la tâche interférente est représenté par la largeur du carré. Le temps disponible pour réaliser la tâche interférente est la durée séparant la présentation d'une tâche interférente de la présentation de la suivante. À durée de traitement de la tâche interférente égale, augmenter le temps disponible permet d'augmenter le temps disponible pour rafraîchir les traces mnésiques des items maintenus en MdT. Ainsi, les trois exemples proposés imposent différentes charges cognitives, en fonction du temps total disponible pour traiter les tâches interférentes. Figure inspirée de Barrouillet et Camos (2004).

Une implication de cette conception de la charge cognitive est que le nombre de tâches interférentes présentées entre chaque item ne change pas la charge cognitive (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004). Cette implication va à l'encontre de ce que le modèle de Baddeley permet de prédire, dans lequel chaque élément de la tâche interférente utilise un *chunk* en MdT. Si la quantité de *chunk* utilisés par les tâches interférentes dépasse la capacité de la MdT, alors les items sont perdus. Dans le modèle TBRS, ce nombre importe peu, tant que le ratio de temps disponible est suffisant pour rafraîchir les items.

À l'inverse, si le temps disponible pour rafraîchir les traces est plus court (temps disponible avant la présentation de la tâche interférente suivante plus court), le ratio augmente et la charge cognitive augmente également. Le nombre de tâches interférentes n'ayant aucun effet sur la charge cognitive, il est possible d'avoir une charge plus élevée avec un nombre de distracteurs plus faible. De la même manière, si le temps disponible pour rafraîchir les traces mnésiques est plus long, alors il est possible de réduire la charge cognitive tout en augmentant le nombre de tâches interférentes (voir Figure 10).

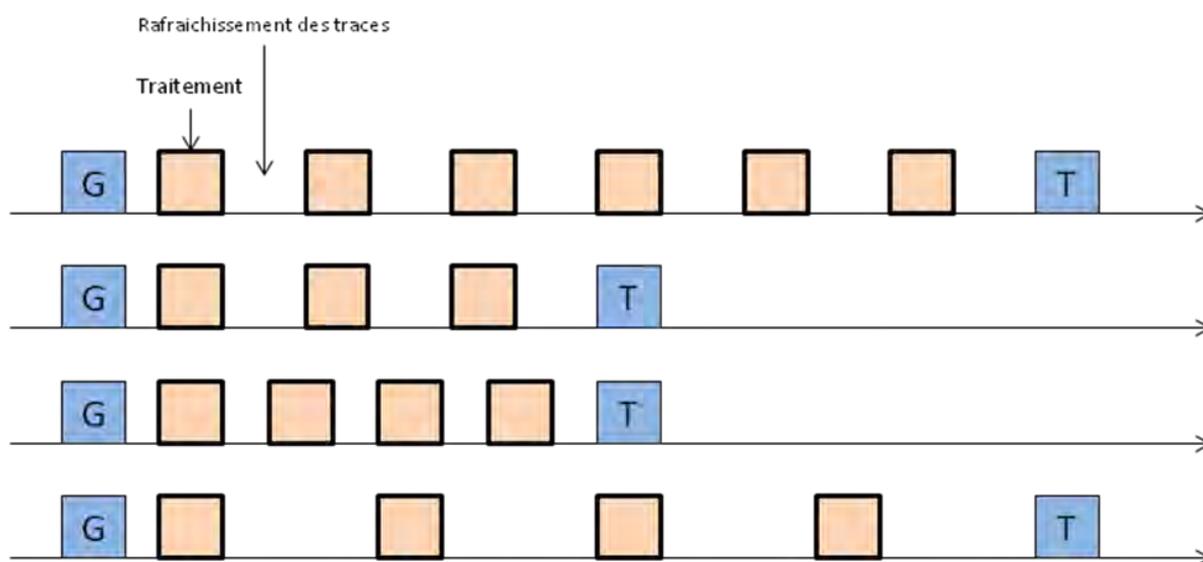


Figure 10. Illustration des variations du ratio temporel

Selon le modèle TBRS, le nombre de tâches interférentes entre deux items ne modifie pas la charge cognitive (lignes 1 et 2). Si l'on compare les lignes 1 et 3, le temps disponible pour rafraîchir les items est plus court dans l'exemple de la ligne 3. Ceci implique que 4 tâches interférentes imposent une charge cognitive plus importante que les six du premier exemple. À l'inverse, si l'on regarde les lignes 2 et 4, alors 4 tâches interférentes imposent une charge cognitive moindre que trois, car le temps disponible pour rafraîchir les items est plus long.

Contrairement à d'autres modèles de la mémoire de travail (*e.g.*, Baddeley, 1986), le modèle TBRS permet de faire l'hypothèse que si le ratio entre le temps nécessaire et le temps disponible pour réaliser la tâche sont gardés constants, alors le nombre de tâches interférentes n'impactera pas la charge cognitive. Ainsi, peu importe le nombre de traitements interférents à réaliser, tant que le ratio du temps nécessaire pour réaliser ce traitement et du temps disponible pour le réaliser est constant, la performance de rappel est constante, c'est-à-dire l'empan en mémoire de travail demeure constant.

Conclusion

Pour la suite de ce manuscrit, nous admettons l'hypothèse d'un unique réservoir de ressources attentionnelles tel que décrit dans le modèle TBRS (Camos & Barrouillet, 2014). Ainsi, l'attention comme filtre attentionnel et l'attention désignant la cible du focus attentionnel, c'est-à-dire les éléments traités ou rafraîchis en mémoire de travail font appel à une même « ressource cognitive » (Cowan, 2001). Cette ressource cognitive est disponible en quantité limitée pour un individu et une tâche donnée et elle doit être partagée entre les traitements à réaliser sur les éléments contenus en mémoire de travail et leur maintien. Cette ressource cognitive est utilisée pour réaliser les opérations de maintien et traitement en MdT, mais également dans le cadre des autres fonctions exécutives, telles que l'inhibition ou la sélection d'une réponse appropriée à la tâche.

L'empan mesurable en mémoire de travail, c'est-à-dire le nombre d'éléments pouvant être maintenus actifs dépend donc de l'utilisation des ressources attentionnelles au cours de la tâche en cours de réalisation par le sujet. Les informations contenues dans l'environnement ou présentes en mémoire à long terme ne peuvent être traitées que si elles sont maintenues en mémoire de travail. De la même manière, une information ne peut être stockée en mémoire à long terme qu'après avoir été maintenue en mémoire de travail (Baddeley & Hitch, 1974 ; Baddeley, 1986). On peut donc faire l'hypothèse que si une tâche à réaliser exige beaucoup de ressources attentionnelles, le maintien des représentations actives en mémoire de travail sera

amoindri. Ainsi plus une tâche est difficile, plus le maintien des informations en MdT est affecté et donc plus son apprentissage est difficile. Cependant, certains éléments en mémoire de travail sont stockés dans la boucle phonologique et sont donc moins coûteux en ressources cognitives, même s'ils sont plus sensibles aux effets d'interférences.

Dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, chaque élément d'information présenté dans le cadre de l'apprentissage requiert une place en mémoire de travail, de la même manière que chaque lien entre deux informations présentées. Ainsi, plus une tâche est complexe, c'est-à-dire présentant un grand nombre d'éléments, plus elle nécessitera de ressources attentionnelles pour maintenir actives les représentations de ces éléments. Ainsi, selon le modèle TBRS, plus que le nombre d'éléments à maintenir en mémoire de travail, c'est le rythme de présentation des informations qui déterminerait la part des ressources que nécessite chaque type de charge, intrinsèque et extrinsèque.

Une limite du modèle TBRS est qu'il ne permet pas encore de faire d'hypothèse sur les variations d'empan en mémoire de travail avec l'expertise. Ainsi, selon le modèle de la mémoire de travail à long terme, plus on est expert d'un domaine, et plus les *chunks* contiennent d'informations. L'étude du modèle TBRS n'ayant jusqu'à présent utilisé que des listes de lettres, de chiffres ou de mots comme matériel à retenir, la variation de l'empan avec l'expertise est généralement neutralisée car ces items ne peuvent pas être regroupés en *chunks* (Cowan, 2001). Pour pouvoir utiliser ce modèle dans le cadre des apprentissages complexe, cette question est néanmoins centrale. De la même manière, le modèle TBRS n'aborde la question des items maintenus en mémoire que comme des items isolés, les tâches classiques d'empan complexes ne permettant pas de regrouper les éléments en mémoire de travail afin de définir une mesure claire. Toutefois, dans le cadre de situations d'apprentissages, les items utilisés peuvent généralement être regroupés en *chunks* et sont donc sensibles à l'expertise des participants. Cette expertise des participants doit donc être prise en compte.

Chapitre 4 Expertise et stratégies

La pratique répétée d'une activité permet de l'automatiser (voir chapitre 3.2) et ainsi de réduire l'exigence attentionnelle de cette activité. Cette automatisation par la pratique est une des caractéristiques de l'expertise, qui permet de réaliser plus efficacement et plus rapidement des tâches autrement coûteuses en ressources cognitives. Les ressources cognitives libérées peuvent être utilisées pour d'autres aspects de la tâche, comme la charge utile par exemple. Il est donc important de contrôler le niveau d'expertise d'un apprenant, ce niveau pouvant avoir des implications importantes lors de la conception de la situation d'apprentissage (Kalyuga *et al.*, 2003 pour une revue). Si tous les apprentissages ne font pas des experts, ils entraînent une modification des connaissances en mémoire à long terme caractéristique d'une acquisition de l'expertise. Si l'on distingue l'expertise, vue comme un continuum, de l'expert, vu comme un maître de son domaine, tous les apprenants développent une certaine expertise. Les modifications liées à l'expertise ont à leur tour un effet sur les apprentissages en modifiant les ressources cognitives dont dispose l'apprenant.

4.1 L'expertise

Deux courants théoriques s'opposent sur la définition de l'expert. D'une part, une approche « absolue » définit l'expert comme l'individu ayant atteint le plus haut niveau de compétence possible. Dans ce cas, définir l'expert revient à le repérer parmi ses pairs, ce qui peut s'avérer difficile. D'autre part, une approche « relative » définit l'expert comme un individu ayant passé du temps à s'entraîner et ayant acquis des connaissances et des compétences particulières dans son domaine d'expertise (Chi, 2006). De ce point de vue, l'expertise entretient un rapport étroit avec l'apprentissage, puisque c'est par l'apprentissage que l'expertise se développe. Ce point de vue n'implique pas nécessairement que l'expertise soit l'objectif de tous les apprentissages, mais que toute personne ayant acquis des connaissances dans un domaine peut être considérée comme plus experte que les novices de ce domaine.

Selon Ericsson (2006) l'expert a des connaissances sur ou des compétences dans son domaine d'expertise. Ces atouts lui permettent généralement d'obtenir de meilleures performances plus rapidement qu'un novice (Anderson, 2010). D'après cette conception, 10000 heures ou 10 ans de pratique du domaine sont nécessaires pour développer l'expertise (voir aussi Chase & Simon, 1973). Tous les changements caractéristiques de l'expert, qu'ils soient physiologiques ou cognitifs, sont liés à cet apprentissage par la pratique, nécessaire pour développer l'expertise, plutôt qu'à un talent inné qui servirait de préalable à l'acquisition de l'expertise

(Ericsson, 2006 ; 2007). Cependant, il est possible de développer une efficacité supérieure à celle des novices sans être un expert accompli du domaine. Dans ce sens, tout apprentissage développe une certaine expertise et tout apprenant ayant davantage de connaissances du domaine peut être qualifié d'expert par rapport aux novices (Chi, 2006). Il faut donc considérer l'expertise comme un continuum sur lequel tout apprenant se déplace au fur et à mesure des apprentissages, et donc de l'acquisition de l'expertise. Si tous les apprentissages n'ont pas pour finalité de conférer le statut d'expert, les apprenants ont néanmoins développé une part d'expertise, avec les modifications cognitives que cela implique.

Il est intéressant de noter que selon Anderson (2010), l'absence d'expertise n'empêche pas complètement d'obtenir des résultats satisfaisants. Dans son exemple, un joueur d'échec novice peut tout à fait s'en sortir honorablement face à un expert mondial dans une partie « amicale ». En revanche, lorsque la partie va imposer des exigences plus fortes, comme une contrainte temporelle de cinq secondes pour jouer un coup, alors le novice aura plus de difficultés à atteindre une performance du même niveau. Cet exemple souligne que les bénéfices de l'expertise permettent de dépasser des contraintes qui s'imposent normalement aux novices.

Les performances des experts sont meilleures que celles des novices sur plusieurs niveaux. À un premier niveau, l'expert bénéficie d'une meilleure perception lorsqu'il s'agit de son domaine. À un plus haut niveau dans la chaîne de traitements de l'information, Chi Glaser et Farr (1988) posent sept éléments caractéristiques de l'expertise. D'abord, les experts ne peuvent réaliser de performances exceptionnelles que dans leur domaine d'expertise (1). Dans ce domaine, ils perçoivent de grands schémas d'informations faisant sens pour eux (2) et ils sont rapides lorsqu'il s'agit de les utiliser, bien plus rapides que les novices, et font peu d'erreurs lors de résolutions de problèmes (3). Ensuite, les experts ont des mémoires à court-terme et à long terme supérieures (dans leur domaine d'expertise) (4), et ils travaillent sur des représentations plus profondes que les novices qui travaillent à un niveau plus superficiel (5). Enfin, les experts consacrent une grande partie du temps à analyser le problème de manière qualitative (6), et ils font preuve de plus de compétences d'autorégulation que les novices (7).

Ces points seront développés dans la suite de ce chapitre bien que dans un autre ordre par souci de cohérence avec le chapitre précédent. Ils sont importants pour toute théorie des apprentissages. Non seulement l'expertise (ou au moins une certaine expertise) est la finalité de tout apprentissage, mais tout au long de l'apprentissage, l'apprenant développe cette

expertise et devient plus efficace pour manipuler des informations relevant du domaine. Tout au long de l'apprentissage, l'apprenant change, ce qui modifie sa manière d'apprendre.

4.1.1 Domaine d'expertise

Dans la liste des éléments caractéristiques de l'expert (Chi, Glaser & Farr, 1988), le premier point concerne le champ d'expertise. Les experts d'un domaine excellent uniquement dans ce domaine et ne présentent pas nécessairement de caractéristiques supérieures à la moyenne dans d'autres domaines. La question de la définition du domaine de connaissance reste posée cependant, ce domaine étant « généralement plus large que la simple perception d'une croix parmi des triangles mais plus limité que la culture générale » (Cooke, 1992).

Dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, le domaine d'expertise est défini, par rapport aux connaissances secondaires, comme les connaissances en mémoire permettant la réalisation d'une tâche dans une période indéfinie (Tricot & Sweller, 2014). Cette définition met l'accent sur le fait que le domaine d'expertise regroupe non seulement les connaissances relatives à une tâche donnée, mais également les connaissances permettant de reconnaître ce problème et de le résoudre. Un domaine d'expertise tel que les échecs, le diagnostic médical ou encore le pilotage aérien regroupe donc des connaissances déclaratives et procédurales, sollicitées dans le cadre de ce domaine (Anderson, 2010).

Toutefois, les experts ne semblent pas manifester d'habiletés supérieures en dehors de ce domaine. Par exemple, des joueurs d'échec de niveau mondial n'obtiennent pas de meilleures performances lors d'une tâche d'expertise juridique (voir Anderson, 2010 pour une revue). Ainsi les experts obtiennent des performances supérieures à la moyenne dans un domaine défini, mais en dehors de ce domaine, ils obtiennent des performances similaires à celles des novices.

Ce point rejoint la notion de connaissances secondaires de la théorie de la charge cognitive. En effet, dans le cadre des compétences secondaires, la théorie de la charge cognitive fait l'hypothèse que ces compétences doivent être acquises indépendamment les unes des autres, avec très peu, voire pas du tout, de transfert de compétence possible entre les domaines (Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011). Chaque domaine de connaissance doit faire l'objet d'un apprentissage spécifique, contrairement aux connaissances dites biologiquement primaires.

4.1.2 Perception experte

Hopfinger, Luck et Hillyard (2004) soulignent la distinction entre l'attention à l'œuvre dans les phénomènes perceptifs et l'attention permettant de manipuler des informations (voir chapitre 3.2). L'expertise affecte les performances dans ces deux domaines (Chi, 2006).

Au niveau visuel, l'expertise permet d'améliorer la vitesse des traitements de bas niveau et la sélection des informations pertinentes. Ainsi, avec l'entraînement il devient possible de pré-activer les régions perceptives pertinentes pour la tâche à réaliser. Par exemple, dans le cadre d'une tâche de détection de cible, cinq jours d'entraînement permettent à des participants novices de pré-activer les aires visuelles primaires et de raccourcir les traitements perceptifs nécessaires pour détecter la cible dans la scène visuelle (Clark, Appelbaum, van den Berg, Mitroff and Woldorff, 2015). Dans cette étude, les auteurs montrent que l'entraînement ne permet pas de réduire le nombre de traitements dans les aires visuelles primaires, mais d'augmenter l'amplitude de la composante électro-encéphalographique associée. L'idée communément retenue est que le focus attentionnel, dans le cas d'une perception experte, permet de pré-activer les aires cérébrales responsables des traitements perceptifs précoces. Ainsi, l'exposition au stimulus cible nécessite moins de temps pour atteindre le même niveau d'activation (Luck & Hylliard, 1994). La sélection des informations pertinentes, réalisée après le « pré-traitement » dans les aires visuelles primaires est plus rapide. Les auteurs concluent que l'expertise permet de faciliter les « pré-traitements » et donc de réduire la durée nécessaire à la sélection des informations pertinentes dans la scène visuelle.

Certains « objets visuels » comme les visages ou les mots sont très fréquents dans la vie quotidienne. Leur étude permet d'étudier les corrélats d'une expertise perceptive plus écologique que celle présente dans l'expérience de Clark et collègues (2015). Nous sommes habitués à lire depuis très jeune, à tel point qu'inhiber les traitements liés à lecture est très difficile (Stroop, 1935). De la même manière, les visages constituent une des catégories de stimuli auxquels nous sommes le plus exposés chaque jour (Haxby, Hoffman & Gobbini, 2000). Pour traiter ces objets perceptifs particuliers, le cerveau recrute des régions spécialisées, localisées dans le gyrus fusiforme médian (*e.g.*, Kanwisher, McDermott & Chun, 1997 ; Baker *et al.*, 2007 ; voir Saygin *et al.*, 2015 pour une étude comparée des deux).

Il est à noter que conformément à l'hypothèse des connaissances primaires et secondaires (Geary, 2008) lorsque des personnes nées sans la vue peuvent la récupérer, elles sont incapables de repérer des visages dans la scène visuelle dans les premiers moments suivant

l'opération. Cependant, la perception des visages est développée très rapidement et de manière inconsciente, cet apprentissage ne nécessitant pas d'effort particulier. En effet, les études en imagerie fonctionnelle indiquent un recrutement rapide des aires du gyrus fusiforme (Chatterjee, 2015 pour une revue). En revanche, contrairement à la théorie des connaissances primaires et secondaires, le même apprentissage se produit lorsque l'on met des participants en présence d'objets n'existant pas dans la nature : des « *greebles* ». Après une phase de familiarisation, leur perception entraîne l'activation du gyrus fusiforme (Gauthier, Tarr, Anderson, Skudlarski, & Gore, 1999).

Les experts perçoivent des ensembles plus grands que les novices (voir 4.1.3), mais surtout ils les perçoivent plus rapidement. Ceci s'explique par deux phénomènes. D'une part, l'expertise permet d'augmenter le niveau d'activation des régions cérébrales dédiées à la perception de l'objet pour lequel on est expert, lorsqu'on le cherche. D'autre part, des régions cérébrales spécialisées sont recrutées lors de l'acquisition de l'expertise pour faciliter certains traitements perceptifs. Accélérer les traitements perceptifs (ou certains d'entre eux au moins) permet de réduire la demande attentionnelle lors de la perception. Libérer ces ressources permet de libérer du temps pour réaliser d'autres traitements et rafraîchir les informations maintenues en mémoire de travail. Le fait que l'expertise permette de réduire la sollicitation du focus attentionnel signifie qu'elle permet de réduire l'utilisation des ressources cognitives qui peuvent être mobilisées pour d'autres types de charge.

4.1.3 *Chunks experts*

Les experts perçoivent des patterns plus grands sur la base de représentations sémantiques. Ce point est illustré par les expériences de Chase et Simon (1973) et De Groot (1965) dans lesquelles les auteurs demandent aux participants de reproduire le contenu d'un échiquier vu pendant cinq secondes. Les joueurs experts peuvent rappeler beaucoup plus de pièces correctement placées (*i.e.*, environ 20 pièces dans l'expérience de Chase & Simon, 1973) que les joueurs novices (*i.e.*, 4 à 5 pièces dans la même étude), si l'échiquier présenté correspond à une configuration réaliste. En revanche, si l'échiquier présenté ne comporte que des pièces posées aléatoirement, la performance des joueurs experts atteint le niveau de celle des joueurs novices, qui ont eux-mêmes une performance moindre qu'avec un échiquier « réaliste ». Pour autant, les joueurs experts n'ont pas un empan en mémoire de travail supérieur aux joueurs novices sur des tâches d'empan classiques (Ericsson, 2006). Les deux groupes de joueurs ont besoin du même nombre d'aller-retour pour rappeler un nombre différent de pièces, mais à chaque présentation, les experts rappellent plus de pièces. Lorsque l'on leur demande de

verbaliser leurs stratégies, les experts regroupent de grands ensembles de pièces dans un même *chunk*, regroupant ces pièces dans des configurations d'attaques ou de défense. Ainsi, pour les experts, les *chunks* sont composés de davantage d'éléments isolés que pour les novices (Miller, 1956).

Selon certains auteurs, ces *chunks* « cognitifs » seraient distincts des *chunks* « perceptifs » (Cooke, 1992). L'expertise permet également d'augmenter la taille d'un *chunk* « perceptif » donné pour une situation « naturelle », c'est-à-dire pouvant être rencontrée dans le domaine d'expertise. Cette augmentation proviendrait ainsi d'une augmentation des connaissances contenues en mémoire à long terme utilisées pour créer des attentes perceptives (Cooke, 1992). Ainsi les experts perçoivent des ensembles contenant plusieurs éléments liés là où les novices ne perçoivent que des éléments individuels et doivent donc les traiter indépendamment (Miller, 1956 ; Gobet *et al.*, 2001 pour une revue). Cependant, cette expertise visuelle, semblant relever de l'augmentation des connaissances en mémoire à long terme, n'est pas corrélée avec la capacité des joueurs d'échec à estimer la qualité d'un mouvement ou d'une situation lors d'une partie d'échec (Holding & Reynolds, 1982 ; Holding & Pfau, 1985). Il semblerait donc que l'augmentation de l'empan perceptif et celle de la capacité à percevoir la meilleure solution possible dans une situation donnée soient deux caractéristiques de l'expertise indépendantes l'une de l'autre (Cooke, 1992 pour revue).

Les experts perçoivent plus d'éléments que les novices en les regroupant dans des ensembles basés sur le sens et sur leurs connaissances du domaine. De la même manière, ils maintiennent davantage d'information en mémoire de travail en regroupant des éléments isolés pour les novices en un seul *chunk*, ce qui libère des ressources pour le traitement de ces informations.

Selon Cowan (2001), cette stratégie de regroupement est à l'origine des difficultés qu'il y a à estimer l'empan de la MdT car de nombreuses études ont d'abord utilisé du matériel porteur de sens pouvant faire l'objet de ces regroupements. Pour cette raison, le modèle TBRS a toujours été utilisé avec du matériel dénué de sens, difficile voire impossible à regrouper en *chunk*. Néanmoins dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, regrouper des informations en un seul élément à maintenir en MdT permet de libérer des ressources cognitives qui peuvent être consacrées à la charge utile. Il est donc pertinent de faciliter les regroupements en *chunks* pour des novices, afin de libérer des ressources. Le fait que les experts puissent percevoir et maintenir la même quantité d'information dans un nombre réduit de *chunks* leur permet notamment de consacrer plus de ressources à des traitements cognitifs.

Surtout, l'expertise permet de réduire le nombre de *chunks* nécessaires pour maintenir les éléments pertinents pour réaliser une activité. Dans ce sens, l'expertise permet de réduire la charge intrinsèque d'un problème.

4.1.4 Mémoire de travail et mémoire à long terme

Comme précisé dans la section précédente (*chunks* experts), les experts perçoivent de grands ensembles d'informations faisant sens pour eux regroupés dans des *chunks*. Cette différence de contenance d'information dans chaque *chunk* en fonction de l'expertise explique le 4^e point, selon lequel les experts ont une meilleure mémoire à court terme et à long terme dans leur domaine d'expertise. En effet, en regroupant davantage d'information dans un *chunk*, les experts peuvent agrandir la capacité de leur mémoire de travail. Cependant, en plus de bénéficier d'une mémoire de travail de plus grande capacité, les experts sont également moins sensibles au déclin des traces mnésiques au cours du temps (Ericsson & Kintsch, 1995). Ainsi, à ressources attentionnelles égales, les experts peuvent maintenir plus d'informations activées pendant plus longtemps que les novices (voir Cowan, 2014 pour une discussion). Cette meilleure robustesse des traces en MdT face au déclin temporel permet aux experts de commencer à traiter une tâche, s'interrompre et la reprendre avec moins de difficulté que les novices. Par exemple, lorsque l'on tente de garder un numéro de téléphone en tête, la moindre interruption est généralement suffisante pour faire perdre au moins une partie du numéro. Pour des experts (dans leurs domaines respectifs) une telle interruption serait beaucoup moins délétère pour le rafraîchissement (Ericsson & Kintsch, 1995 pour une discussion de cet exemple). Ainsi, ayant une capacité en MdT supérieure, des joueurs d'échecs experts peuvent maintenir de grandes quantités d'informations en MdT et jouer plusieurs parties simultanément, le coût cognitif associé à ces interruptions étant moindre pour eux.

L'expertise provenant d'une réorganisation des connaissances en mémoire à long terme (Cooke, 1992 ; Chi, Glaser & Rees, 1981), cette dernière présente aussi des différences entre experts et novices. Non seulement les connaissances des experts ne sont pas organisées de la même manière que celles des novices, mais les experts ont davantage de connaissances, déclaratives et procédurales, que les novices (Chi, Glaser & Rees, 1981). Ainsi, les experts ont stocké davantage de représentations et de schémas relatifs à leur domaine d'expertise. Simon et Gilmarin (1973) estiment que les experts stockent en moyenne 50 000 représentations relatives à leur domaine d'expertise.

Comme évoqué plus tôt, le modèle de la mémoire de travail à long terme (Ericsson & Kintsch, 1995, voir chapitre 3) postule que la mémoire de travail est la partie activée de la mémoire à long terme. Les informations à maintenir actives et à traiter sont ainsi directement placées en mémoire à long terme et maintenues actives de manière similaire au focus attentionnel proposé dans le modèle de Cowan (1988). Selon ce modèle, les connaissances des experts en mémoire à long terme étant plus nombreuses et les réseaux plus denses, les *chunks* activés contiennent des informations plus complexes. Les *chunks* des experts étant plus importants ils permettent aux experts d'avoir besoin de moins de ressources pour percevoir de grands ensembles ou pour les maintenir actifs que les novices. De cette manière, les experts ont davantage de ressources disponibles pour traiter l'information (Ericsson & Kintsch, 1995). Surtout, il semble important de rappeler que c'est l'augmentation de connaissances en MLT qui permet les *chunks* experts (Miller, 1956).

Selon le modèle TBRS, les représentations stockées en MdT ne sont pas une partie active de la MLT mais bien des représentations créées sur la base des percepts et des connaissances en MLT (Barrouillet & Camos, 2015). L'organisation différente de la mémoire à long terme des experts devrait donc avoir un effet sur la création des représentations. Le fait que les connaissances stockées en MLT des experts soient plus denses que celles des novices est cohérent avec plusieurs résultats issus de la théorie de la charge cognitive. Par exemple, les apprenants les plus avancés ne présentent plus d'effet de modalité (voir chapitre 2). Cet effet de modalité est remplacé par un effet de redondance pour les apprenants experts (Kalyuga *et al.*, 2003). Les informations présentées selon deux modalités imposent deux traitements distincts pour élaborer une même représentation que leurs connaissances initiales leur permettent déjà d'élaborer sur la base des informations issues d'une seule modalité.

Les experts bénéficient d'une plus grande capacité en MdT, notamment liée au fait qu'ils peuvent regrouper les informations en *chunks* plus larges. Ces regroupements sont possibles car les experts présentent également une plus grande base de connaissances en MLT (ce qui fait partie de la définition de l'expertise, Ericsson, 2006). Ces connaissances sont organisées de manière différente en MLT, dans des réseaux plus denses et plus complexes que ceux des novices. Les représentations des experts, stockées en MdT, sont moins sensibles au déclin temporel et plus profondes (voir 4.1.5 et 4.1.6). Les experts ont donc davantage de facilités à apprendre, dues à de plus grandes ressources cognitives disponibles pour réaliser la même tâche.

Cependant, les *chunks* des experts, créés sur la base des connaissances contenues en mémoire à long terme, contiennent plus d'informations que les *chunks* des novices. Cette augmentation de la capacité des *chunks* implique qu'il faut adapter la présentation de l'information pour un public expert. Par exemple, lorsque la même information est présentée à des novices à l'aide des modalités visuelles et auditives, le bénéfice de l'effet de modalité s'efface devant la redondance des informations (Chandler & Sweller, 1991 ; Kalyuga, Chandler & Sweller, 1999). L'augmentation de l'information contenue dans les *chunks* des experts implique que lorsque l'on leur présente des informations congruentes selon les deux modalités simultanément, les experts ne bénéficient pas de l'effet de modalité. Tout se passe comme si une présentation de l'information efficace pour les novices se transformait en effet de redondance pour des apprenants experts (Kalyuga *et al.*, 2003 ; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). La présentation des informations doit donc être adaptée au niveau d'expertise des apprenants pour tenir compte des modifications cognitives liées à cette expertise.

4.1.5 Vitesse de traitement et procéduralisation

Le troisième point de la liste de Chi (2006) porte sur la vitesse de traitement des experts. Les experts sont plus rapides que les novices dans leur domaine et font moins d'erreurs que les novices. Ce point est à mettre en parallèle avec le point 6 selon lequel les experts consacrent une plus grande partie du temps que les novices à analyser un problème avant de commencer à le résoudre. Il arrive même que les experts mettent plus de temps que les novices à catégoriser le problème à résoudre (Simon & Simon, 1978 ; Voss, Greene, Post, & Penner, 1983). Les experts consacrent plus de temps à l'analyse du problème mais sont plus rapides lors de l'exécution de la solution.

Les experts n'élaborent pas les mêmes représentations que les novices, mais une fois qu'ils ont élaboré leurs représentations du problème, ils consacrent très peu de temps à la sélection et à l'exécution de la solution. Ceci s'explique par le grand nombre de connaissances stockées en mémoire à long terme, correspondant à des situations faisant sens pour les experts. Les experts n'ont pas besoin de chercher la solution à un problème, ils la connaissent déjà, ils ont plutôt besoin de s'en rappeler (Anderson, 2010). Ainsi, après avoir passé plus de temps à décider du problème qu'ils doivent réaliser, ils arrivent généralement à retrouver la solution de manière plus rapide et plus efficace que les novices (Klein, 1993). De même, les experts, puisqu'ils connaissent déjà la bonne réponse au problème font généralement moins d'erreurs que les novices lors de résolutions de problèmes (De Groot, 1965 ; Neves & Anderson, 1981).

Ceci implique que la majorité des traitements réalisés par les experts leur demandent moins de ressources qu'à des novices, puisqu'ils connaissent déjà la bonne réponse. De manière similaire, travailler à partir de problèmes déjà résolus permet de réduire la charge cognitive et donc de faciliter la construction de schéma pour les novices (voir chapitre 2). Une partie de cette réduction de l'effort nécessaire vient du fait que les experts ont automatisé un grand nombre de réactions à avoir en présence d'une situation particulière (Schneider, 1985). Avec l'automatisation des processus, les experts dépendent de moins en moins de leurs connaissances déclaratives et davantage de leurs connaissances procédurales (Anderson, 2010 pour une revue).

Lors du développement de l'expertise, les experts acquièrent un réseau sémantique plus développé que celui des novices dans leur domaine (voir 4.1.4). Ce réseau se traduit par l'augmentation du nombre de liens entre un concept et les autres concepts sémantiquement proches. Selon Anderson (1981), quand un *chunk* est activé, il produit un niveau d'activation réparti entre tous les autres *chunks* avec lesquels il est lié. Conséquemment, la multiplication des liens entre éléments devrait avoir un effet délétère sur la récupération d'information. En effet, si un *chunk* est relié à deux autres, l'activation produite par le premier *chunk* sera séparée entre les deux *chunks* suivants. En revanche, si le même premier *chunk* est relié à dix autres, alors l'activation du premier *chunk* sera divisée par dix, pour chacun des dix *chunks* suivants. Ainsi, plus on sait de choses sur un sujet donné, plus il devrait être difficile de rappeler une information particulière lorsque l'on parle du sujet en question. Le cas extrême de cette hypothèse est que l'on devrait moins bien se rappeler de sa date d'anniversaire que de celle d'une personne relativement célèbre (Hayes-Roth, 1977 ; Reder & Anderson, 1980). En donnant des informations sur des personnes fictives à des participants, ces derniers rappellent plus rapidement et plus facilement la date d'anniversaire de la personnalité fictive s'ils ont eu peu d'information à son sujet que s'ils en ont reçu beaucoup (Anderson, 1981). Ce résultat s'appelle le *fan effect*. En revanche, conformément à l'intuition, lorsque l'on mesure la capacité des participants à se rappeler de leur date d'anniversaire, ils sont en général meilleurs que lorsqu'ils doivent rappeler celle d'une personne, fictive ou célèbre (Hayes-Roth, 1977 ; Reder & Anderson, 1980). Ce résultat s'explique par le fait que l'utilisation répétée d'un lien entre deux *chunks* continue à renforcer ce lien entre les deux *chunks* (Hayes-Roth, 1977 ; Hebb, 1949). Ainsi, quand deux *chunks* sont sollicités conjointement de manière répétée, leur lien continue à se renforcer et l'activation de l'un suffit à déclencher l'activation de l'autre.

Ces résultats permettent d'expliquer pourquoi la pratique, même si elle ne produit pas toujours une expertise absolue (Schneider, 1985), permet d'améliorer largement les performances. De plus, les liens entre éléments en mémoire des experts sont suffisamment renforcés pour produire des connaissances automatisées (voir chapitre 3.2). Ceci explique que les experts puissent obtenir de meilleures performances plus rapidement et avec moins d'efforts. Les experts ayant, par définition, passé beaucoup de temps à s'entraîner ont automatisé des connaissances, rendant leur exécution très peu coûteuse en ressources attentionnelles. À problème égal, les experts ont davantage de ressources cognitives pour le résoudre que les novices. Cependant, toujours à problème égal, ils ont besoin de moins de ressources pour le résoudre.

4.1.6 Profondeur de traitement

Selon le 5^e point, les experts ont une représentation plus profonde du problème (Chi, 2006). Ils passent plus de temps à l'élaborer et ne l'élaborent pas sur les mêmes bases que les novices. Chi, Feltovitch et Glaser (1981) mettent ce point en évidence en demandant à leurs participants de trier des problèmes en catégories. Il s'agit de problèmes de physique présentant des situations différentes (*i.e.* vitesse de chute d'un solide ou rotation par exemple) dont la résolution nécessite d'utiliser différentes lois de physique (*i.e.* 2^e loi de Newton ou encore conservation de l'énergie). Les novices rangent les problèmes en fonction de traits de surfaces relatifs à l'énoncé (chute ou rotation) tandis que les experts les classent en fonction des principes physiques impliqués dans leurs résolutions. Ainsi, les experts ne perçoivent pas les problèmes rencontrés de la même manière que les novices. Ils catégorisent les problèmes en fonction de leurs connaissances relatives à la résolution des problèmes.

L'élaboration de cette représentation plus profonde pour les experts leur demande de consacrer une plus grande partie du temps passé sur le problème. Comme elle est construite à l'aide des connaissances stockées en MLT, supérieures chez les experts, cette représentation ne présente pas les mêmes caractéristiques que celle des novices. Ceci implique qu'ils ne perçoivent pas le problème de la même manière, et qu'ils n'utilisent pas les mêmes modes opératoires (ou stratégies) pour résoudre le problème.

4.1.7 Corrélats physiologiques de l'expertise

Un certain nombre d'études ont tenté de mettre en évidence des corrélats physiologiques des différences de performances entre les individus, l'hypothèse étant que les différences de performances à une même tâche reflètent des différences d'expertise. Les corrélats électro-

physiologiques de ces différences de performances sont essentiellement reflétées par des différences au niveau des rythmes thêta et alpha.

Le rythme thêta semble être le principal corrélat électro-encéphalographique de l'expertise, les personnes obtenant les meilleurs résultats lors de tâches de calculs présentant une plus faible puissance spectrale dans cette gamme de fréquence (4 à 8Hz) que les personnes obtenant de moins bonnes performances. De la même manière, la performance lors d'une tâche d'empan de mémoire de travail (voir le chapitre 3 à ce sujet) semble négativement corrélée à la puissance du rythme thêta au repos comme pendant la tâche (Klimesch, Vogt & Doppelmayr, 1999 ; Beatty, 1977 ; Beatty & O'Hanlon, 1979). Le rythme alpha est également supposé varier en fonction de la performance, avec une puissance du rythme spontanément supérieure chez des personnes ayant de meilleures performances cognitives ou de meilleures performances lors de tâches de mémoires (Klimesch, 1999). Ces variations sont sensibles à de grandes différences interindividuelles, certaines personnes générant un rythme alpha beaucoup plus grand que d'autres personnes, c'est pourquoi les résultats utilisent généralement une comparaison entre un score au repos et un score obtenu lors d'une tâche (Klimesch, 1996). Enfin, la diminution relative de puissance associée au rythme alpha avec la difficulté de la tâche est plus forte pour les participants présentant de meilleures performances cognitives (Neubauer, Freudenthaler & Pfurtscheller, 1995 ; Klimesch, 1999).

Les deux rythmes électro-encéphalographiques présentent donc un pattern inverse. Tandis que le rythme thêta est plus faible pour les participants présentant les meilleures performances (et donc, supposément, le plus haut niveau d'expertise), le rythme alpha est plus élevé que chez les novices.

Des études utilisant l'imagerie fonctionnelle (IRMf) ont également tenté de mettre en évidence des différences entre experts et novices. Le postulat est que les différences comportementales entre les deux groupes doivent être soutenues par des modifications du système nerveux. Au niveau fonctionnel, plusieurs différences sont observables. La substance grise, regroupant les corps cellulaires des neurones sollicités dans l'exécution de la tâche, s'épaissit avec l'expertise, ce qui semble impliquer que davantage de neurones soient recrutés pour réaliser la tâche avec l'expertise. Cette observation est cohérente avec une augmentation de l'activation des régions cérébrales impliquées dans le domaine de l'expertise, à la fois lors de réalisation de la tâche et lors de visualisation de la tâche (Chang, 2014 pour revue). Ces régions impliquent essentiellement les aires préfrontales et le cortex moteur dans les études

portant sur l'expertise dans différents sports ou en musique. Cependant, les régions précises modifiées par l'expertise dépendent du sport ou de l'instrument de musique sur lequel porte l'expertise. Ces résultats doivent toutefois être contrastés. En effet, si la substance grise est plus dense dans les régions sollicitées par l'expertise, d'autres études soulignent que ces régions sont plus petites avec le développement de l'expertise (Qin *et al.*, 2003 ; Anderson, 2010 pour revue). Ainsi, au niveau purement anatomique, l'expertise entraîne le recrutement de davantage de neurones dans les aires sollicitées pour réaliser la tâche entraînant une plus grande activation, mais la taille de ces aires diminue. La trajectoire développementale de ces modifications semble relative au domaine d'expertise. Dans tous les domaines, l'épaississement de la substance grise se résorbe après l'arrêt de la pratique. Cependant, pour les musiciens experts, il se résorbe d'autant moins que la pratique a commencé tôt dans le développement, les musiciens ayant commencé jeunes perdant moins les modifications liées à l'expertise que ceux ayant commencé plus tard. Dans le domaine du sport en revanche, cet effet de l'âge de début d'acquisition de l'expertise ne se retrouve pas, quel que soit l'âge auquel les experts ont commencé, les modifications disparaissent progressivement avec l'arrêt de la pratique.

Au niveau de la substance blanche, regroupant essentiellement les axones des neurones, l'acquisition de l'expertise entraîne une diminution de l'activation dans les régions impliquées par la réalisation de la tâche. Cette diminution de l'activation semble refléter une diminution des ramifications des axones, interprétées comme une spécialisation des connections entre neurones. Les modifications de la substance blanche liées à l'expertise ont lieu préférentiellement dans les mêmes régions que les modifications des corps cellulaires. La trajectoire développementale de ces modifications semble similaire à celle de la substance grise, avec une diminution des différences entre experts et novices après l'arrêt de la pratique dépendant du domaine d'expertise et dans le cas de la musique, liée à l'âge du début d'acquisition de l'expertise.

Conclusion

Le développement d'une expertise entraîne plusieurs modifications cérébrales associées à des modifications comportementales dans un domaine particulier. Ainsi, les experts perçoivent et manipulent de plus grands ensembles d'informations sous la forme de *chunks* dans leur domaine d'expertise. Ces plus grands ensembles d'informations sont traités plus rapidement, plus efficacement et à un niveau plus profond au fur et à mesure que l'expertise se développe. Le fait que l'expertise permette de regrouper davantage d'informations dans un *chunk*

implique une réduction de la charge intrinsèque et de la charge extrinsèque au sens de la théorie de la charge cognitive. Selon la CLT, cette réduction de la charge intrinsèque et de la charge extrinsèque implique une réduction de l'interactivité des éléments (Chen, Kalyuga & Sweller, 2016), cette réduction de l'interactivité étant responsable de la disparition ou du renversement de nombreux effets empiriques mis en évidence par la CLT. Le niveau d'expertise des participants est donc un facteur important à contrôler dans les recherches en psychologie des apprentissages.

4.2 Les stratégies

La notion de stratégie, désignant la manière de réaliser une tâche, et celle d'expertise, sont relativement liées dans la littérature. En effet, les stratégies employées dans le cadre d'une activité changent en fonction du degré d'expertise dans cette activité. Les stratégies employées par les novices (en général, l'analyse moyen-fin et le *chunking*) sont généralement employées dans toutes les situations sous une forme similaire. En revanche, les stratégies expertes sont souvent spécifiques à un domaine d'expertise particulier et peu transférables à d'autres domaines (Anderson, 2010 pour revue). La théorie de la charge cognitive postule que les stratégies novices relèvent des connaissances primaires, tandis que les stratégies expertes, étant spécifiques au domaine, relèvent de connaissances secondaires (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 pour revue).

4.2.1 L'analyse moyen-fin

Comme nous l'avons vu précédemment, confrontés à un même problème de physique, les novices vont avoir tendance à partir d'une représentation de la solution puis remonter vers les données fournies dans l'énoncé (Larkin, 1981). Ce mode opératoire est appelé analyse moyen-fin et est utilisé par les novices de très nombreux domaines. Cependant cette stratégie impose de maintenir actifs plusieurs éléments, notamment la représentation du problème final, les différentes étapes et à chaque étape les moyens possibles pour trouver les données manquantes (Anderson, 2010). À l'inverse, des stratégies plus directes n'imposent pas une telle charge en mémoire de travail.

Comme nous l'avons vu précédemment dans le cadre de l'expertise, le choix des stratégies d'un expert est plus pertinent que celui d'un novice (Chi, 2006 pour revue). Par exemple, lorsque l'on demande à des experts et des novices joueurs d'échecs de choisir un mouvement approprié dans une configuration donnée issue d'une partie d'échec réelle, les experts sont non seulement beaucoup plus rapides, mais sélectionnent également plus souvent les

meilleurs mouvements possibles que les novices (De Groot, 1965 ; Chase & Simon, 1973). Cela s'explique par le grand nombre de représentations stockées en mémoire par les experts (Simon & Gilmarin, 1973). Ainsi, « contrairement aux novices, les experts n'ont pas besoin de chercher une bonne réponse à un problème, puisqu'ils connaissent déjà la meilleure réponse possible » (Anderson, 2010).

La connaissance de la réponse permet aux experts d'utiliser d'autres stratégies que l'analyse moyen-fin. Par exemple, les experts en physique construisent leur raisonnement à partir des données fournies dans l'énoncé en allant directement vers la solution (Larkin, 1981). De telles stratégies « directes » (*feed forward*) sont retrouvées dans de nombreux domaines d'expertises, tels que le diagnostic médical (Patel & Kaufman, 1995) ou encore la programmation informatique (Soloway, Adelson & Ehrlich, 1988). Cependant, dans le domaine de la programmation informatique, d'autres études montrent que les novices n'utilisent pas nécessairement une stratégie d'analyse moyen-fin. Les deux groupes utilisent une stratégie *feed-forward*, mais il existe des différences. Les novices vont ainsi réaliser les éléments du code partie par partie, finissant la première partie avant de commencer la seconde, tandis que les experts vont commencer par baliser toutes les parties du code avant de réaliser la première en entier (Rist, 1989 ; Anderson, Farrell & Sauer, 1984). Il ressort de ces études que l'analyse moyen-fin n'est pas l'unique stratégie à la disposition des novices, de la même manière que les experts peuvent utiliser cette stratégie (Chi, 2006). Cependant, les experts sont généralement meilleurs pour choisir la stratégie la plus adaptée et ayant donné le plus souvent les meilleurs résultats (Lemaire & Siegler, 1995). Si les novices n'utilisent pas, ou très peu, les stratégies expertes, c'est surtout parce qu'elles nécessitent des connaissances antérieures qu'ils ne possèdent pas. Les experts sont capables de plus d'adaptabilité dans le choix des stratégies utilisées (Chi, 2006) et sont capables de choisir des stratégies plus adaptées à la situation. Ainsi, Sperandio (1971) montre que des contrôleurs aériens adaptent leur stratégie au nombre d'avions qu'ils doivent diriger. Quand ce nombre est faible, ils utilisent des stratégies très coûteuses, tenant compte de tous les paramètres disponibles. En revanche, plus le nombre d'avions à contrôler augmente et plus ils se focalisent sur un faible nombre de paramètres, pour finir par ne plus s'occuper que de la sécurité des avions (Sperandio, 1971 ; voir aussi Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 ; Tricot, Sweller, Amadiou, Chanquoy & Mariné, 2008).

Si l'analyse moyen-fin permet de parvenir à un résultat dans la majorité des contextes d'utilisation, elle demeure très coûteuse en ressources cognitives. Lorsque l'on empêche des

novices d'utiliser ce mode opératoire, ils gagnent en ressources cognitives disponibles, ce qui permet par exemple d'améliorer l'effet d'un apprentissage (e.g., Sweller, 1988). En effet, si les apprenants novices n'ont pas de représentation du but, ils sont contraints d'utiliser d'autres stratégies que l'analyse moyen-fin. Ce changement de stratégie a pour effet de libérer des ressources cognitives et donc d'améliorer l'apprentissage (Sweller & Chandler, 1991 ; Sweller, van Merriënboer & Paas, 1998). C'est l'effet de non-spécification du but. L'analyse moyen-fin impose de maintenir en MdT l'ensemble des étapes nécessaires pour parvenir à la solution en raisonnant à l'envers. Les novices partent de la solution et ajoutent autant d'étapes que nécessaire pour parvenir à une étape ne contenant aucune variable inconnue. Par exemple, « Une voiture initialement à l'arrêt accélère de manière uniforme pendant une minute. Sa vitesse finale est de 2 kilomètres par minute. Quelle distance a-t-elle parcourue ? ». Cet énoncé va imposer aux novices de partir de l'état final du problème, la recherche de la distance. Il faut également activer la connaissance selon laquelle la distance est fonction du temps et de la vitesse. Le temps étant connu mais pas la vitesse, il va falloir que les novices activent une connaissance supplémentaire selon laquelle la vitesse peut être calculée à partir des données du problème ($\text{vitesse moyenne} = \text{moyenne des deux vitesses extrêmes}$ puisque l'accélération est uniforme). Pendant toute la résolution du problème, ces trois étapes doivent être maintenues en MdT en plus de la résolution des calculs, ce qui rajoute une charge non souhaitable sur les ressources cognitives. À l'inverse, il est possible de proposer aux novices le même énoncé sans spécifier le but : « Une voiture initialement à l'arrêt accélère de manière uniforme pendant une minute. Sa vitesse finale est de 2 kilomètres par minutes. Calculez autant de variables que possible ». Cette formulation permet aux apprenants de se focaliser sur les règles de productions sans avoir à maintenir les étapes de résolution de calcul en MdT, ce qui réduit la charge sur les ressources cognitives (Sweller, 1988 ; Paas & Kirschner, 2012).

Le mode opératoire, la manière de résoudre un problème est donc contraint par l'expertise de la personne résolvant ce problème. En retour, le mode opératoire a un effet sur les ressources cognitives disponibles pour l'apprenant. Pour les novices, prévenir l'utilisation d'un mode opératoire aussi coûteux que l'analyse moyen-fin permet de libérer des ressources cognitives. Les stratégies expertes s'appuyant notamment sur les connaissances des experts sont difficiles à mettre en œuvre pour des novices, alors qu'elles représenteraient une diminution de la difficulté de la tâche et donc de la charge intrinsèque. La question de savoir si l'on peut enseigner des stratégies expertes à des novices avant de leur présenter d'autres problèmes, de manière à réduire la charge intrinsèque lors de la résolution de ces problèmes reste posée.

Conclusion

L'apprentissage a généralement pour résultat le développement d'une expertise. Ce développement implique plusieurs modifications de la cognition. En particulier, l'unité élémentaire de l'information, le *chunk*, change avec l'expertise. Les *chunks* experts contiennent davantage d'information, ce qui permet aux experts de percevoir de plus grands ensembles et plus rapidement que les novices. De la même manière, leur expertise leur confère des mémoires, de travail et à long terme, plus performantes dans leur domaine. Les *chunks* maintenus en MdT contiennent plus d'informations et sont moins sensibles au déclin lié au temps que ceux des novices, nécessitant moins de rafraîchissements. L'organisation des schémas des experts est différente, leur permettant de catégoriser les problèmes en fonction d'autres éléments que les simples traits de surface.

De plus, avec l'expertise, les traitements se procéduralisent, ce qui rend l'information plus rapide à traiter, les traitements nécessitant moins d'efforts et produisant moins d'erreurs. Enfin, les experts font preuve de meilleurs choix de stratégies et sont plus flexibles dans leurs utilisations, ce qui leur permet de parvenir au même résultat avec moins d'efforts. Les experts ont besoin de moins de ressources cognitives lors de la sélection des informations, le maintien de ces informations et leurs traitements. Ils sont plus rapides et plus efficaces à tous les niveaux du traitement de l'information, mais ces bénéfices restent limités à un domaine d'expertise et sont difficilement transférables (quand ils le sont) à d'autres domaines.

Cependant, l'expertise présente également certains inconvénients (Chi, 2006 pour une revue) et impose une adaptation de la présentation de l'information pour tenir compte des changements qu'elle provoque chez l'apprenant. Par exemple, l'effet de modalité, bénéfique pour l'apprentissage des novices se transforme en effet de redondance pour des apprenants experts. Dans le cadre d'un modèle portant sur les apprentissages complexes, confronté à des connaissances pouvant faire l'objet de regroupements en *chunks*, tout modèle de MdT utilisé devra pouvoir tenir compte des différences liées à l'expertise et des résultats obtenus dans de telles situations complexes.

Chapitre 5 Les différentes mesures de la charge mentale

Comme vu précédemment, une des principales limites de la théorie de la charge cognitive est qu'elle ne permet pas de prédire une mesure objective et fiable de la charge mentale (voir chapitre 2) ni une mesure pouvant varier au cours de la réalisation de la tâche d'apprentissage. Si d'autres modèles sont considérés comme des modèles de la charge mentale (*e.g.* le modèle des ressources multiples présenté au chapitre 3 par exemple), aucun de ces modèles ne permet de dériver une mesure de la charge mentale. À l'opposé, la littérature du domaine met en avant différentes catégories de mesures de la charge mentale, chacune présentant des avantages et des inconvénients. Cependant, ces mesures sont rarement bien corrélées entre elles (Funke *et al.*, 2013) ce qui laisse supposer qu'elles mesurent différents aspects de la charge (Matthews, Reinerman-Jones, Barber & Abich, 2015 ; Cain, 2007). L'objectif de ce chapitre sera donc de proposer un rapide tour d'horizon des différentes mesures de la charge mentale, en précisant les avantages et inconvénients de ces mesures. Pour chacune de ces mesures, il s'agira ensuite de tenter de définir l'objet de leur mesure, puis la contribution qu'elles peuvent apporter à la théorie de la charge cognitive, notamment en tenant compte des différences liées aux variations des ressources cognitives et à celles liées au niveau d'expertise des personnes.

Nous utiliserons dans ce chapitre le terme de charge mentale, plutôt que celui de charge cognitive. En effet, une grande partie des recherches réalisées dans ce domaine portent sur des situations complexes. Dans ces situations, il est difficile d'isoler les facteurs liés aux ressources purement cognitives de l'individu d'autres facteurs, liés aux états émotionnels et affectifs, à la motivation ou encore au niveau de vigilance (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 pour une discussion). Ainsi, le terme de charge mentale sera utilisé pour décrire des études qui ne portent pas exclusivement sur les aspects cognitifs de la charge. Ce point sera repris à la fin du chapitre.

5.1 La charge mentale, un problème de mesures ?

Une des questions les plus fondamentales dans le domaine de la charge mentale est de savoir comment la mesurer (Gevins & Smith, 2003). Classiquement, la charge mentale se mesure au moyen de trois types de mesure différents, les mesures subjectives, comportementales et physiologiques (Vidulich & Tsang, 2012; Cegarra & Chevalier, 2008 ; Kramer, 1990 ; Cain, 2007).

Le problème est que, comme décrit dans les chapitres 2 et 3, la charge renvoie à l'interaction entre un individu et une situation. Les ressources et stratégies mobilisées par l'individu vont influencer certaines caractéristiques de la tâche, notamment la difficulté. À l'inverse, certaines caractéristiques de la tâche vont influencer les stratégies et ressources mobilisées par l'individu (voir Johannsen, 1979 à ce sujet). Le résultat de cette interaction est la charge mentale. Cependant, les différentes mesures utilisées n'évaluent pas directement la charge, mais plutôt différents aspects résultant du phénomène de charge (voir l'exemple de Wickens, 2002 à ce sujet).

Une des principales limites de la théorie de la charge cognitive est une limite méthodologique : cette théorie ne propose pas de mesure ou une mesure extrêmement sommaire, non validée, peu fiable, peu sensible, porteuse de biais subjectifs et ne rendant pas compte des variations de charge au cours de l'activité (Paas *et al.*, 2003 ; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 ; Martin, 2014 ; Schnotz & Kurschner, 2007 ; De Jong, 2010). En effet, non seulement la théorie de la charge cognitive ne permet pas de mesurer les différents types de charge cognitive à l'œuvre dans les apprentissages, mais elle utilise généralement des mesures comportementales et subjectives, à de rares exceptions près (Paas *et al.*, 2003 ; Martin, 2014 pour revues du sujet). Ce problème de mesure rejoint un problème théorique qui est que la CLT ne tient pas compte des variations temporelles de la charge. En effet, durant la réalisation de la tâche, le niveau de charge mentale expérimenté peut varier dans de grandes proportions et ces variations ne sont pas mesurées par des moyens classiques de mesures comportementales ou subjectives (Paas *et al.*, 2003 ; Xie & Salvendy, 2000).

5.2 Les mesures comportementales

Une définition de la charge mentale affirme que « *la charge cognitive présuppose que les processus cognitifs ont un coût tiré d'une réserve limitée de ressources cognitives. En conséquence, la charge cognitive est souvent définie comme le rapport entre la demande de la tâche et les ressources humaines disponibles* » (Cegarra & Chevalier, 2008). Ainsi, cette notion de rapport entre l'exigence de la tâche et les ressources disponibles implique que si la tâche est trop coûteuse en termes de ressources cognitives, la personne réalisant cette tâche ne sera plus à même de fournir l'ensemble des ressources nécessaires et en conséquence, la performance à cette tâche diminuera.

À partir de cette idée, de nombreuses études ont utilisé la mesure de la performance pour évaluer la charge mentale. Cette performance peut être le nombre d'erreurs, le temps de

réaction ou encore un taux de réussite qui peuvent être enregistrés sur la tâche principale ou sur une tâche secondaire réalisée en parallèle de la tâche principale (voir Vidulich & Tsang, 2012 pour une revue). Ces mesures peuvent permettre, avec une tâche expérimentale adéquate, de mesurer les variations de la charge mentale au cours du temps.

Une des limites principales à l'utilisation de ces mesures est que si la charge varie en dessous d'un certain seuil, la performance peut rester optimale et donc ne pas refléter les variations de charge au cours de la tâche tant que celle-ci ne dépasse pas les ressources disponibles de l'individu. De plus, il est tout à fait possible que deux personnes présentent un même niveau de performance mais expérimentent deux niveaux différents de charge mentale (Yeh & Wickens, 1988 ; Borghini, Astolfi, Vecchiato, Mattia & Babiloni, 2014). En effet, Wickens (2002) propose l'exemple de deux personnes réalisant une même tâche. Le premier participant, en raison d'un niveau d'expertise ou de ressources cognitives supérieur réalise un score parfait sans difficulté. La deuxième personne en revanche expérimentera un niveau de charge largement supérieur pour atteindre un score parfait. Du point de vue de la mesure comportementale, les deux participants auront expérimenté le même niveau de charge, puisqu'ils auront réussi à atteindre un score parfait. En revanche, l'un aura eu beaucoup plus de difficultés, et aura probablement davantage mobilisé ses ressources cognitives pour réaliser la même tâche avec le même niveau de performance.

Sur la base de ce constat, de nombreuses études ont utilisé la performance lors de tâches secondaires. Ainsi, on demande au participant de réaliser une tâche principale, qu'il doit traiter en priorité, et une tâche secondaire. La tâche secondaire est généralement simple et relativement continue pour permettre une évaluation la plus suivie au cours du temps possible. Normalement, le participant privilégiant la tâche principale, les premiers effets de la charge mentale se traduiront par une diminution de la performance obtenue sur la tâche secondaire (voir le chapitre 2 sur le PRP). Cependant, une limite majeure de l'utilisation de tâche secondaire est qu'elle ajoute déjà un niveau de charge cognitive supplémentaire. En effet, même si la tâche secondaire est la première à être délaissée, traiter cette tâche ou son inhibition est déjà une activité coûteuse en soi. Le traitement de cette activité a un coût en termes de performance qui induit un biais dans la mesure.

À l'inverse, il est possible que la performance diminue en condition de très faible charge, par exemple dans le cas de tâches très monotones (Brookhuis & De Waard, 2010), la relation entre la difficulté de la tâche à réaliser et la performance suivant une loi de Yerkes-Dodson

(De Waard, 1996). Cette détérioration de la performance lors de tâches très monotones et peu coûteuses en ressources cognitive est souvent désignée par le terme de fatigue mentale (Zhao *et al.*, 2012). Par exemple, lors d'un vol moyen ou long courrier, les étapes les plus coûteuses en termes de ressources cognitives sont les phases de décollage et d'approches et atterrissages (soit les 30 premières et les 30 dernières minutes). En dehors de ces périodes, l'automatisation des appareils fait que la sollicitation des pilotes est minimale. Cette baisse de charge entraîne une certaine fatigue pouvant avoir des répercussions sur la vigilance et donc sur la performance des pilotes.

Par définition, la mesure de la performance est très sensible aux effets de l'expertise, puisqu'une des définitions de l'expertise est de permettre des performances supérieures à celles obtenues par des novices (Chase & Simon, 1973 ; Chi, 2006 ; voir chapitre 4). Par conséquent, définir l'expert comme ayant de meilleures performances que le novice puis comparer les performances des experts et des novices se rapproche d'un raisonnement tautologique. Cependant, d'un point de vue qualitatif, les experts n'ont pas la même approche des problèmes posés que les novices (voir chapitre 4). Ceci implique que non seulement les performances seront différentes, mais également les modes opératoires, les experts pouvant utiliser de manière plus flexible des stratégies moins coûteuses. Ainsi, à situation similaire, la charge mentale expérimentée est moins élevée pour les experts, même si l'analyse des performances *a posteriori* est une mauvaise mesure. Ces différences ont un impact certain sur le niveau de charge cognitive et sur l'utilisation des ressources cognitives (Kalyuga *et al.*, 2003).

Ainsi, les mesures comportementales semblent une bonne manière de mesurer le résultat de la rencontre entre un individu particulier et une tâche donnée. En mesurant les performances d'élèves après une formation sur un dispositif particulier et en les comparant à la performance d'autres élèves ayant reçu une formation sur un autre dispositif, il est possible d'obtenir une estimation de l'efficacité du dispositif de formation. Cependant, les performances peuvent varier en l'absence de charge cognitive. De la même manière, elles peuvent ne pas varier alors que la difficulté de la tâche varie et donc ne pas mesurer des variations de charge expérimentée par les personnes. Pour résoudre ce problème de sensibilité à la charge expérimentée, une autre approche consiste à demander aux participants d'évaluer la charge mentale qu'ils ont vécue. On regroupe dans cette approche toutes les mesures dites « subjectives ».

5.3 Les mesures subjectives

Les mesures subjectives regroupent les différents questionnaires utilisés pour évaluer la charge mentale. Ces questionnaires ont l'avantage de refléter le niveau d'effort que le participant pense avoir expérimenté. Un autre avantage de ces mesures est qu'elles sont généralement simples d'utilisation et peu invasives (Cain, 2007 ; Kramer, 1990 ; Vidulich & Tsang, 2012). Parmi les questionnaires employés, le Nasa-TLX (Nasa Task Load indeX, Hart & Staveland, 1988), le SWAT (Subjective Workload Assessment Technique, Reid & Nygren, 1988) et le Workload Profile (WP, Tsang & Velazquez, 1996) sont les plus utilisés (Mouzé-Amady, Raufaste, Prade & Meyer, 2013). Ces questionnaires comportent un nombre variable d'items, en fonction des dimensions jugées pertinentes pour l'évaluation de la charge. Ce nombre varie en général de un (*e.g.*, Paas, 1992) à six (Hart & Staveland, 1988). Ainsi, il existe des questionnaires proposant une évaluation de la charge mentale en soi, à l'aide d'un seul item. À l'inverse, d'autres (*i.e.* le Nasa-Tlx, le SWAT et le Workload Profile) considèrent que la charge mentale étant un phénomène multifactoriel (Meshkati, 1988, Wickens, 2002), une évaluation correcte de la charge mentale doit évaluer les différentes dimensions individuellement. Ces dimensions sont relatives à chaque questionnaire. Ainsi, le SWAT (Reid & Nygren, 1988) et le WP (Tsang & Velazquez, 1996) évaluent la charge subie par les participants, tandis que le Nasa-TLX évalue les caractéristiques de la tâche réputées responsables de la charge (*i.e.* pression temporelle, demande mentale, etc.).

Une des principales limites des mesures subjectives est leur manque de fiabilité. En effet, en demandant aux participants d'évaluer leur niveau de charge mentale, la mesure s'expose à différents biais, parmi lesquels la rationalisation *a posteriori* ou les biais de cadrages (Nisbett & Wilson, 1977 ; Xie & Salvendy, 2000). Si les participants évaluent leur charge mentale après la réalisation de la tâche, cette évaluation sera affectée par les facteurs précédents. Cependant, administrer les questionnaires pendant la réalisation de la tâche ne permet pas d'améliorer la sensibilité de la mesure. En effet, si cela peut permettre de limiter les biais de rationalisation *a posteriori*, cette administration nécessite l'attention des participants pendant la réalisation de la tâche. Le résultat est que l'on ajoute une tâche supplémentaire à la tâche en cours de réalisation, ce qui augmente artificiellement le niveau de charge expérimentée par les participants. De plus, en étudiant les réponses de participants réalisant une même tâche mais remplissant un questionnaire en cours de réalisation ou après la réalisation, les résultats sont différents (Schmeck *et al.*, 2014).

Ces différences soulignent l'absence de définition de ce que mesurent les questionnaires d'évaluation subjective de la charge mentale. De la même manière, en utilisant le même questionnaire sur différentes tâches d'apprentissage, les résultats peuvent être totalement différents. Par exemple, différentes études, utilisant le même questionnaire d'une échelle en sept points trouvent qu'un score de 2,5 sur l'échelle peut refléter un mauvais score tandis que d'autres études vont considérer un score de 3 comme optimal, le niveau de charge moins optimal étant plus élevé (voir De Jong, 2010 pour une critique complète).

La variabilité des résultats en fonction des circonstances de l'évaluation et l'impossibilité d'obtenir une mesure « absolue » et stable mettent en évidence une limite assez intuitive des questionnaires : les participants ne sont pas forcément capables de décrire leurs mécanismes cognitifs (Schnotz & Kurschner, 2007 pour une discussion). Il en découle que les questionnaires ne mesurent pas exactement les processus cognitifs mis en jeu dans une tâche donnée. Ils mesurent davantage la perception qu'ont les participants de la difficulté de la tâche qu'ils ont réalisée et sont donc davantage sensibles à certains aspects de la tâche (nombre de sous-tâches ou pression temporelle) qu'à d'autres (les contraintes métacognitives par exemple, voir expérimentation 1).

Ainsi, les mesures subjectives permettent de mieux décrire la charge expérimentée par les participants que les mesures comportementales. Toutefois, elles ne permettent pas d'obtenir une mesure continue de la charge mentale. De plus elles ne permettent pas de mesurer la charge mentale, mais l'idée que s'en fait le participant. Cependant, les mesures subjectives peuvent être, dans certaines circonstances, plus sensibles que les autres mesures (Funke *et al.*, 2013). Elles peuvent même permettre de détecter des situations de surcharge cognitive en l'absence de marqueurs physiologiques de surcharge (Moray, 1979). En revanche, elles peuvent également indiquer des variations de charge en l'absence de modification de la tâche (Kretschmar *et al.*, 2013).

5.4 Les mesures physiologiques

La dernière catégorie de mesures regroupe les mesures de paramètres physiologiques. L'hypothèse sous-jacente à ces mesures est que la réalisation d'une tâche a un impact sur les paramètres physiologiques. Ainsi, en situation d'effort, les comportements d'exploration visuelle se modifient. De la même manière, la réalisation d'une tâche cognitive impose des traitements cérébraux dont il doit être possible de mesurer les corrélats. Pour la suite, nous nous focaliserons sur deux techniques différentes : l'*eye-tracking* et l'électro-

encéphalographie. Ces deux techniques présentent l'intérêt d'avoir une excellente résolution temporelle, c'est-à-dire de pouvoir enregistrer des variations survenant très rapidement (de l'ordre de la milliseconde).

5.4.1 L'eye-tracking

L'œil est « une fenêtre ouverte sur l'âme » (Du Bartas, 1544-1590, in Ellis *et al.*, 1998). L'*eye-tracking* est une technique consistant à enregistrer les mouvements des yeux. Pour cela, on utilise une lampe et une caméra infrarouges. La lampe infrarouge génère deux reflets sur l'œil du participant et la caméra enregistre ces reflets. Le premier reflet, le reflet pupillaire, renseigne sur la taille de la pupille. Le second reflet, cornéen, permet avec le premier de reconstruire la direction précise du regard. Ainsi, l'*eye-tracking* permet de mesurer deux phénomènes, le diamètre pupillaire et la direction précise du regard (Ellis *et al.*, 1998).

5.4.1.1 Le diamètre pupillaire

Les variations du diamètre pupillaire reflètent directement l'activité du Système Nerveux Autonome (S.N.A.). Cette activité reflète l'activation générale de l'organisme et est influencée notamment par la charge en mémoire. Ainsi, le diamètre pupillaire augmente de manière linéaire en fonction du nombre mots ou de nombres à maintenir actifs en mémoire de travail (Kahneman & Beatty, 1966). De la même manière, le diamètre pupillaire augmente avec la difficulté des traitements cognitifs à opérer en mémoire de travail (Beatty, 1982 ; Ahern & Beatty, 1979). Le diamètre pupillaire est également réputé varier en fonction de la demande attentionnelle d'une tâche (Lisi, Bonato & Zorzi, 2015). Il augmente en fonction de la charge mentale et peut être mesuré à la fois à l'aide du diamètre pupillaire brut (Paubel, Averty & Raufaste, 2010, mais voir Wierville & Connor, 1983) ou à l'aide d'indices construits sur la base du diamètre pupillaire (Marshall, 2002), voire de ses variations au cours de la tâche (PCPS, Hess & Polt, 1964; Beatty, 1982).

L'inconvénient de la mesure du diamètre pupillaire est sa sensibilité à d'autres facteurs, tels que la luminosité ambiante (Pomplun & Sunkara, 2003) ou encore les émotions (Hess & Polt, 1964). Ainsi, cette mesure semble très sensible aux facteurs cognitifs sous-jacents à la charge cognitive, mais également à d'autres facteurs non cognitifs (voir Beatty & Lucero-Wagoner, 2000 pour une revue).

5.4.1.2 Les clignements des yeux

Il arrive que la mesure du diamètre pupillaire disparaisse complètement, c'est le cas lors des clignements des yeux. La littérature reste peu claire sur le degré d'obstruction de la pupille

nécessaire pour considérer qu'un clignement d'œil en est un. En effet, tous les clignements ne sont pas constitués d'une fermeture totale de l'œil. Classiquement, l'étude des clignements des yeux était réputée être une mesure fiable et simple du niveau de charge mentale, le nombre de clignements diminuant avec l'augmentation de la charge (Eggemeier, Wilson, Kramer & Damos, 1990 ; Kramer, 1990 ; Stein, 1992 ; Borghini *et al.*, 2014 ; Brookings, Wilson, & Swain, 1996 ; Cain, 2007). Cependant, d'autres résultats semblent indiquer au contraire une augmentation du rythme de clignement avec l'augmentation de la charge mentale (Recarte, Perez, Conchillo & Nunez, 2008, cité dans Savage *et al.*, 2013). De plus, les clignements des yeux semblent également refléter d'autres facteurs non cognitifs, en particulier la baisse de vigilance liée à la fatigue (Picot, 2009).

Ensemble, le diamètre pupillaire et les clignements des yeux représentent un indicateur fiable de la charge mentale. Cependant, ils sont relativement peu utilisés en dehors de contextes très contrôlés car ils sont très sensibles à différents effets, tels que la luminosité ou encore le niveau de vigilance. De plus, dans certaines circonstances expérimentales, il semblerait que les indicateurs liés à la direction du regard puissent être plus précis que le diamètre pupillaire (Meghanathan, van Leeuwen & Nikolaev, 2015).

5.4.1.3 La direction du regard

L'enregistrement de la direction du regard au cours du temps permet de savoir quelle information le participant regarde. L'hypothèse sous-jacente à cette technique est que l'on traite l'information que l'on regarde (Buswell, 1935 ; cité dans Tatler, Wade, Kwan, Findlay, & Velichkovsky, 2010 ; Graupner, Pannasch & Velichkovski, 2011 ; mais voir Posner, 1980 pour un point de vue contraire). Le comportement d'exploration visuelle est divisé en deux phases : les fixations et les saccades. Les fixations sont les moments pendant lesquels on encode l'information. Pour cela, l'œil reste fixe pendant la durée d'exposition (généralement quelques centaines de millisecondes), de la même manière qu'un appareil photographique. Entre chaque saccade, une fixation permet de modifier l'information que l'on va encoder à la fixation suivante. Durant ces saccades, l'œil est virtuellement aveugle, incapable d'acquérir de nouvelles informations. L'*eye-tracking* utilise donc également des paramètres particuliers basés sur l'étude du comportement d'exploration visuelle, tels que la durée des saccades (et leur amplitude) ou celle des fixations.

Partant de l'hypothèse selon laquelle les humains traitent les informations qu'ils regardent, la durée des fixations est réputée augmenter avec la charge mentale. En effet, plus on passe de

temps à regarder une information et plus on passe de temps à la traiter (Just & Carpenter, 1993 ; Stein, 1992). De la même manière, plus la charge mentale augmente et plus la durée des saccades diminue, en même temps que leur longueur (Stein, 1992 ; Serman & Mann, 1995). En revanche, la rapidité des saccades visuelles augmente avec la charge mentale (Di Stasi, Marchitto, Antoli, Baccino & Cañas, 2010). Les comportements d'exploration visuelle varient également en fonction de la demande de la tâche. Plus la charge mentale augmente, plus les fixations sont focalisées sur une région de la scène visuelle (Tole, Stephens, Harris & Ephrath, 1982, cités dans Paubel, 2011). Ainsi, différents indices mesurant la focalisation des comportements d'exploration visuelle ont été mis au point pour déterminer le niveau de charge mentale (Paubel, Averty & Raufaste, 2011 ; Velichkovski, Rothert, Kopf, Dornhoeffler & Joos, 2002 ; Velichkovski, Joos, Helmert & Pannasch, 2005 ; Hale, Fuchs, Axelsson, Berka & Cowell, 2008).

L'*eye-tracking* permet de tester l'effet de différents designs expérimentaux. En particulier, dans le cadre des situations d'apprentissage, cette technique permet de mesurer plus précisément les différents processus cognitifs mis en jeu (van Gog & Scheiter, 2010). Par exemple, dans le cas d'une présentation de l'information sollicitant deux modalités (généralement visuelle et auditive), la théorie de la charge cognitive fait l'hypothèse que si toutes les informations doivent être maintenues actives simultanément pour permettre la compréhension, alors présenter les deux sources de manière séparées produira un effet de partage attentionnel négatif pour l'apprentissage (Chandler & Sweller, 1991 ; Mayer & Moreno, 1998). En étudiant les différentes stratégies d'exploration visuelle, il est possible d'observer des différences en fonction des modalités de présentations. Par exemple, dans le cadre de situations d'apprentissages, lorsque l'on donne à des apprenants des informations sous la forme de deux modalités, l'étude de la direction du regard permet de mettre en évidence qu'ils regardent d'abord le texte (Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowala, 2010). Les participants passent même plus de temps à regarder le texte que l'image dans ces situations d'apprentissage, quel que soit le temps de présentation et même s'ils contrôlent eux-mêmes le rythme de présentation (Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowala, 2010 ; Johnson & Mayer, 2012 ; mais voir Underwood, Jebbert & Roberts, 2004 ; Chuang & Liu, 2012 pour des résultats contraires).

L'augmentation du diamètre pupillaire est toutefois modérée par l'expertise. Ainsi, si le diamètre de la pupille augmente avec la difficulté de la tâche, cette augmentation est moindre

pour les experts que pour les novices (Szulewski, Roth & Howes, 2015 ; voir Beatty & Lucero-Wagoner, 2000 pour une revue).

Concernant les comportements d'exploration visuelle, les experts présentent des comportements différents de ceux des novices. En particulier, lorsque la charge cognitive est élevée, les experts présentent des fixations plus brèves et des saccades plus longues, regardant les différentes zones de la scène visuelle successivement. À l'inverse les novices ont davantage tendance à se focaliser et traiter une tâche après l'autre, ayant plus de difficulté à adapter leurs comportements d'exploration visuelle aux contraintes de la situation (Bellenkes, Wickens & Kramer, 1997 ; Crundall & Underwood, 1998).

5.4.2 EEG

« Measurements of the changes in brain waves rhythms reflects what is happening in the subject's information processing situation, even if the subjects is unaware of the changes or is unable to verbalize what is happening during the processing » (Basar, 1999, cité dans Antonenko, 2007).

L'électro-encéphalographie consiste à enregistrer l'activité électrique produite par le cerveau à l'aide d'électrodes posée sur le scalp. Chaque électrode enregistre un signal électrique reflétant l'activité des neurones situés dans son voisinage direct, dont l'intensité varie au cours du temps. Les rythmes cérébraux sont étudiés en transformant une fenêtre temporelle du signal capté par les électrodes au moyen d'une transformation mathématique, le plus souvent la transformée de Fourier rapide (ou *Fast Fourier Transform*, FFT). Cette transformation permet d'extraire d'un signal continu (une puissance variant au cours du temps) une mesure de la puissance associée à différentes bandes de fréquences (Harris, 1978 ; Gross, 2014 ; Picot, 2009). L'hypothèse sous-jacente est que si les processus cognitifs sont liés à l'activité coordonnée de plusieurs régions cérébrales (Fuster, 2006 ; Ward, 2003), l'activité synchrone de nombreux neurones interconnectés (Varela, Lachaux, Rodriguez & Martinerie, 2001) peut s'observer sous la forme de cycles, caractérisés par leurs fréquences et leurs amplitudes. Ces rythmes sont parmi les premières observations réalisées en utilisant l'EEG (*e.g.*, Berger, 1929 ; Drohocki, 1946).

Différentes bandes de fréquences ont été « isolées » en fonction de leur interprétation psychologique (Perez-Martin, Schuster & Dauzat, 2006 ; Gross, 2014). La littérature s'accorde généralement sur deux rythmes cérébraux principalement étudiés dans le cadre de la charge mentale, le rythme thêta et le rythme alpha (Gevins & Smith, 2003 ; Holm, Lukander,

Korpela, Sallinen & Müller, 2009 ; Fournier, Wilson & Swain, 1999 ; Antonenko, 2007 ; Ryu & Myung, 2005 ; voir Holm, 2010 ; Vidulich & Tsang, 2012 et Borghini *et al.*, 2014 pour des revues).

5.4.2.1 Le rythme alpha

Le rythme alpha a une fréquence comprise entre 8 et 12 Hz et une amplitude de 20 à 50 μ V (Perez-Martin, Schuster & Dauzat, 2006). Le rythme alpha est le premier rythme à avoir été mis en évidence (*e.g.*, Berger, 1929). Il apparaît, dans les régions occipitales et pariéto-occipitales, lors de la fermeture des yeux et disparaît rapidement dès que les yeux sont rouverts. Il est donc associé à l'arrêt des stimulations visuelles, mais il a également été montré comme négativement corrélé avec la demande mentale de la tâche (Klimesch, 1999). Il est également supposé être impliqué dans la mémoire de travail, en association avec le rythme gamma (Roux & Uhlhaas, 2014 ; voir chapitre 3) et dans l'attention visuelle (Shomstein, Kravitz & Behrmann, 2012).

Plus précisément, le rythme alpha est sensible à la demande attentionnelle d'une tâche, son amplitude diminuant avec l'augmentation de la demande attentionnelle (Klimesch, 1996 ; Klimesch, Doppelmayr, Russeger, Pachinger & Schwaiger, 1998 ; Klimesch, 1999). De plus son amplitude diminue également avec l'augmentation de la charge en mémoire de travail (Klimesch, Vogt & Doppelmayr, 1999 ; Doppelmayr, Klimesch, Pachinger & Ripper, 1998 ; Fukuda, Mance & Vogel, 2015 ; Fairclough et Venables, 2006 ; Ryu et Myung 2005 ; Serman et Mann, 1995 ; Fairclough, Venables & Tattersall, 2005 ; Fournier, Wilson & Swain, 1999, Gevins *et al.*, 1998 ; Smith, Gevins, Brown, Karnik & Du, 2001). Son amplitude diminue également avec la pression temporelle imposée par une tâche (Slobounov, Fukada, Simon, Rearick & Ray, 2000). Cependant, son amplitude augmente avec l'augmentation du nombre de distracteurs présents lors d'une tâche de mémoire de travail visuelle (Sauseng *et al.*, 2009). Toutefois, ces résultats sont sensibles à de très grandes variations interindividuelles, certaines personnes générant beaucoup d'alpha et d'autre très peu (Klimesch, 1999, Kramer, 1990).

Les variations du rythme alpha en fonction de la sollicitation des ressources cognitives (en général, une diminution de la puissance spectrale du rythme avec l'augmentation de la sollicitation) en font un marqueur souvent utilisé dans l'étude de la charge mentale. Ainsi, le rythme alpha a été montré comme diminuant avec la difficulté de la tâche (Serman, Mann, Kaiser & Suyenobu, 1994 ; Serman et Mann, 1995 ; Klimesch, 1999). Cependant, selon

d'autres études, il pourrait y avoir une relation en « U inversé » (courbe de Yerkes-Dodson) entre la difficulté de la tâche et la suppression du rythme alpha (Ota, Toyoshima & Yamauchi, 1996). Cette diminution du rythme alpha liée à la difficulté de la tâche pourrait refléter l'empan utilisé en mémoire de travail (Klimesch, 1997 ; Ryu & Myung, 2005 ; Fairclough & Venables, 2006). Selon les études, cette diminution de la puissance du rythme alpha peut être suffisante pour discriminer différentes tâches de différents niveaux de difficulté (Ryu & Myung, 2005). À l'inverse, un certain nombre d'études montrent que la puissance du rythme alpha augmente avec la difficulté de la tâche (Pope *et al.*, 1995 ; Borghini *et al.*, 2014 ; Kamzanova *et al.*, 2014 ; Zhao *et al.*, 2012).

Les variations du rythme alpha semblent sensibles à l'entraînement, cependant, les résultats semblent peu cohérents entre eux. En effet, en entraînant des participants pendant 64 minutes à réaliser le MATB (pour Multi-Attribute Task Battery), une situation de multitâches proposant 4 tâches simultanées, Fairclough, Venables et Tattersall (2005) trouvent que la puissance associée au rythme alpha diminue dans la première moitié de l'expérimentation. En revanche, après 32 minutes à réaliser la tâche, la puissance associée au rythme alpha augmente, jusqu'à revenir au niveau initial en fin d'expérimentation. En revanche, en utilisant la même tâche expérimentale, Fournier, Wilson et Swain (1999) ne trouvent pas de variation du rythme alpha en fonction de l'entraînement. D'autres études, moins centrées sur l'entraînement, mettent en évidence que les participants obtenant les meilleurs résultats lors d'une tâche de mémoire présentent les rythmes alpha les plus élevés lors de la phase de repos initiale (Klimesch, Vogt & Doppelmayr, 1999 ; Doppelmayr *et al.*, 1998). De plus, les participants ayant les niveaux d'alpha les plus élevés lors de la phase de repos initiale sont ceux pour lesquels le rythme alpha diminue le plus lors d'une tâche de mémoire (Klimesch, Vogt & Doppelmayr, 1999).

Le rythme alpha semble donc une bonne mesure de la charge mentale, dont les variations reflètent la sollicitation des ressources cognitives. De plus, cette mesure peut être utilisée pour détecter des variations en fonction du niveau d'expertise. En revanche, elle est très sensible aux variations interindividuelles, et il demeure difficile de mettre en évidence une interprétation fonctionnelle de ses différentes variations.

5.4.2.2 Le rythme thêta

Le rythme thêta est un rythme d'une fréquence comprise entre 4 et 8 Hz et d'une amplitude d'environ 50 μ V (Perez-Martin, Schuster & Dauzat, 2006). Il est associé au sommeil lent

léger (Rechtschaffen & Kales, 1968 ; voir Picot, 2009 pour une revue des classifications des stades du sommeil). Le rythme thêta est également associé aux performances mnésiques et à l'encodage en mémoire (Klimesch, 1999 ; Basar, Basar-Eroglu, Karakas, & Schurmann, 2000 ; Paré, Collins & Pelletier, 2002) ou à la récupération en mémoire (Kahana, Seelig & Madsen, 2001), notamment associé au rythme gamma (Ward, 2003 ; voir chapitre 3).

Classiquement, l'utilisation de la mémoire de travail est associée à une augmentation de la puissance spectrale du rythme thêta (Klimesch, 1996 ; 1999 ; Klimesch, Vogt & Doppelmayr, 1999 ; Doppelmayr *et al.*, 1998). De fait, plus la tâche impose de charge en mémoire, et plus le rythme thêta augmente, principalement au niveau des régions frontales et pariétales (Gevins & Smith, 2003 ; Fournier, Wilson & Swain, 1999 ; Gevins *et al.*, 1998 ; Schacter, 1977). Un autre argument pour relier l'augmentation du rythme thêta à l'augmentation de la demande en mémoire de travail de la tâche est que cette augmentation du rythme thêta semble peu sensible à l'entraînement (Fairclough, Venables & Tattersall, 2005 ; Fournier, Wilson & Swain, 1999). La puissance associée au rythme thêta augmente également avec la demande attentionnelle de la tâche (Yamada, 1998 ; Gevins & Smith, 2000 ; voir Vidulich & Tsang, 2012 pour une revue). Contrairement au rythme alpha, la puissance du rythme thêta augmente dans des situations de pression temporelle (Slobounov *et al.*, 2000).

De manière similaire au rythme alpha, les variations observées lors de tâches sollicitant les ressources attentionnelles et la mémoire de travail vont dans le même sens que celles observées lors de l'étude de la charge mentale. Classiquement, la puissance du rythme thêta augmente avec la demande de la tâche, notamment lors de situations de multitâches comparées à des situations de simple tâche (Fairclough & Venables, 2006 ; Fairclough, Venables & Tattersall, 2005 ; Fournier, Wilson & Swain, 1999 ; voir Borghini *et al.*, 2014 pour une revue). Cette augmentation du rythme thêta n'apparaît pas dans toutes les circonstances. Ainsi, en utilisant le MATB, le rythme thêta ne permet pas de discriminer différents niveaux de difficulté (Fournier, Wilson & Swain, 1999). D'autres études, utilisant différents protocoles, n'ont pas mis en évidence de différence du rythme thêta en fonction de la difficulté de la tâche (Käthner, Wriessnegger, Müller-Putz, Kübler & Halder, 2014 ; Baldwin & Penaranda, 2012 ; Funke *et al.*, 2013 ; voir Gevins *et al.*, 1995 pour une revue de trois de leurs expérimentations donnant le même résultat). De la même manière, certaines études utilisant un protocole similaire au MATB ne mettent pas en évidence de différence significative en fonction du nombre de tâches simultanées (Holm *et al.*, 2009). Enfin, un certain nombre d'études ont montré une diminution de la puissance spectrale associée à la

difficulté de la tâche (Natani & Gomer, 1981) comme en fonction du nombre de tâches à réaliser simultanément (Sirevaag, Kramer, de Jong & Mecklinger, 1988, cités dans Kramer, 1990 ; Antonenko, 2007).

Ainsi, le rythme thêta est une des mesures les plus utilisées dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale. Cependant, certains résultats semblent contradictoires. De plus, le niveau de difficulté des tâches dans une expérience de multitâches est difficile à discriminer. Certaines études trouvent des différences en fonction de la difficulté de la tâche (Fairclough, Venables & Tattersall, 2005) tandis que d'autres études ne trouvent pas de différences (Fournier, Wilson & Swain, 1999 ; Holm *et al.*, 2009).

Certaines études trouvent que le niveau de thêta lors d'une phase de repos initial, est corrélé au niveau de performance lors d'une tâche de mémoire (Klimesch, 1999 ; Klimesch, Vogt & Doppelmayr, 1998 ; Doppelmayr *et al.*, 1998). De manière similaire, des participants auxquels on demande de diminuer leur niveau de thêta lors de la réalisation d'une tâche obtiennent de meilleures performances que les autres (Beatty, 1977 ; Beatty & O'Hanlon, 1979 ; voir Kramer, 1990 pour revue).

Observer les variations des deux rythmes simultanément s'est également avéré intéressant, même si les résultats semblent parfois difficiles à interpréter (Gevins *et al.*, 1995). Par exemple, il a été montré qu'une large diminution des rythmes alpha au niveau des régions fronto-centrales et pariétales, assortie d'une augmentation plus localisée des rythmes thêta au niveau des régions frontales est associée aux réponses correctes (Slobounov *et al.*, 2000). Cependant, ces travaux de localisation doivent être nuancés, l'âge des participants semblant avoir un rôle. Par exemple, l'activité du rythme thêta augmente avec la difficulté de la tâche en fronto-central pour des participants jeunes adultes, davantage que pour les adultes et presque pas du tout chez les participants les plus âgées (McEvoy, Pellouchoud, Smith & Gevins, 2001). À l'inverse, l'activité alpha diminue avec l'augmentation de la difficulté de la tâche, sur une surface relativement étendue chez les participants les plus âgés, tandis que chez les participants les plus jeunes, elle ne diminue qu'en pariétal. Ceci rejoint d'autres travaux selon lesquels l'augmentation de la difficulté entraîne une augmentation des rythmes thêta chez les plus jeunes et une diminution des rythmes alpha chez les plus âgés (Smulders, Kenemans, Jonkman & Kok, 1997).

5.5 Combinaisons de mesures

La recherche de la meilleure mesure de la charge mentale a donné lieu à de nombreuses études tentant de déterminer quelle méthode permettait d'obtenir la mesure la plus précise. Ces études utilisaient généralement plusieurs des techniques décrites précédemment et comparaient ensuite leurs capacités respectives à discriminer les différents niveaux de charge cognitive (ou de charge mentale) induits. Ces différents niveaux de charges ont généralement été induits soit en augmentant la difficulté de la tâche, soit en augmentant le nombre de tâches concurrentes que les participants devaient mesurer. Cependant, il semble difficile d'établir un classement de l'efficacité des mesures sur la base de ces études. Chaque catégorie de mesure est tour à tour citée parmi les meilleures ou les moins bonnes pour repérer les variations de charge induites.

La charge cognitive est un phénomène multifactoriel (Jex, 1988), plusieurs paramètres permettant de la définir (Gopher & Donchin, 1986). Ces différents facteurs se combinent pour former le phénomène qu'est la charge cognitive. Si différents facteurs interagissent pour former la charge, il est possible que les différentes mesures utilisées pour la mesurer réagissent différemment à chacun de ces facteurs. Cette différence qualitative expliquerait pourquoi, en fonction des tâches utilisées pour induire de la charge cognitive, les différentes mesures se comportent différemment. Ces mesures seraient toutes « sensibles mais divergentes » (Matthews *et al.*, 2015 ; voir aussi Galy, Cariou & Mélan, 2012 pour une étude appliquée à la théorie de la charge cognitive). Ces mesures auraient toutes une certaine capacité à mesurer des facteurs composant la charge cognitive mais de manière différente. Selon la méthode utilisée pour induire la charge cognitive, certaines mesures seraient donc plus pertinentes que d'autres. Par exemple, les différents indicateurs EEG (*e.g.*, thêta et alpha) reflètent l'utilisation de la mémoire de travail et de l'attention. Leurs variations pourraient refléter différentes exigences de la tâche, en fonction du niveau d'expertise des participants, mesurant l'investissement des ressources cognitives pour réaliser la tâche. De la même manière, l'*eye-tracking* mesure l'arousal général, le niveau d'activation général de l'organisme (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000), ce qui permet de mesurer des phénomènes non cognitifs à l'œuvre dans la charge mentale.

C'est dans cette optique que certaines études ont tenté d'agréger les mesures issues de différentes techniques pour définir une « méta-mesure » plus optimale (*e.g.*, Ryu & Myung, 2005 ; Cegarra & Chevalier, 2008). Dans leur étude, Ryu et Myung induisent différents niveaux de charge cognitive en faisant varier la difficulté de chaque tâche dans un protocole

de double tâche, tout en enregistrant différentes mesures physiologiques, une mesure de performance et une mesure subjective. Les auteurs utilisent ensuite une analyse de régression multiple pour déterminer une équation combinant les apports des différentes mesures et permettant de mieux déterminer le niveau de charge cognitive que chacune des mesures prise individuellement. D'autres auteurs ont également essayé d'agrèger les différentes mesures à l'aide de réseaux de neurones artificiels, cette technique permettant de détecter des différences non linéaires (Wilson & Russell, 2003 ; 2007 ; Baldwin & Penaranda, 2012). Cependant, aucune des deux techniques ne permet de dépasser 90% de performance, à notre connaissance.

Sans essayer d'agrèger les différentes mesures, Cegarra et Chevalier (2008) ont proposé un outil, THOLOS, permettant de fusionner des mesures comportementales (*i.e.* la performance à une tâche secondaire), physiologiques (*i.e.* le diamètre pupillaire) et subjectives (*i.e.* les scores du Nasa-TLX) sur une dimension temporelle. La précision de ces mesures dépend de la fréquence d'acquisition des données, mais la mise en regard des différentes techniques permet d'expliquer les variations de chacune à l'aide des variations des autres. Ainsi, le manque de sélectivité des mesures pupillométriques peut être compensé par les mesures subjectives, la faible fréquence d'échantillonnage de ces dernières étant compensée par celle des mesures comportementales et physiologiques.

Plutôt que de tenter de combiner différentes mesures, soit en tentant de dégager la meilleure, soit en tentant de les agréger, d'autres études se sont focalisées sur l'idée d'améliorer l'information fournie par une mesure en couplant les informations fournies par une autre. Par exemple, Baccino et Manunta (2005) utilisent l'*eye-tracking* pour décrire précisément le déroulement temporel d'un comportement de lecture et utilisent cette information pour améliorer les mesures électro-encéphalographiques. Ainsi, il devient possible d'utiliser la technique des potentiels évoqués dans le cadre d'une activité de lecture naturelle. Ce genre de technique est également utilisé pour étudier les rythmes cérébraux durant une activité de lecture (Metzner, von der Malsburg, Vasishth & Rösler, 2015 ; Vignali, Himmelstoss, Hawelka, Richlan & Hutzler ; 2016) mais encore jamais pour étudier la charge cognitive (voir expérience 1).

Conclusion

Les différents outils utilisés dans le cadre de l'évaluation de la charge mentale fournissent des mesures différentes. Ces mesures peuvent être subjectives ou objectives et dans ce second cas, elles peuvent être comportementales ou physiologiques. Ces mesures sont différentes car elles

mesurent des aspects différents du phénomène « charge mentale ». Parmi elles, les mesures comportementales et physiologiques peuvent être utilisées pour obtenir une évaluation dynamique de la charge, tandis qu'utiliser des mesures subjectives pendant la réalisation de la tâche ajoute une tâche concurrente.

La théorie de la charge cognitive a essentiellement utilisé des mesures subjectives et comportementales, mais seulement très rarement des mesures physiologiques. De telles mesures, permettant de détecter au cours du temps des variations de la charge seraient pertinentes dans ce cadre théorique (Paas *et al.*, 2003). L'expertise et les différentes stratégies utilisées ont une grande influence sur les différentes mesures de la charge. Elles affectent la charge expérimentée par les personnes, mais elles affectent également la puissance associée à chaque rythme lors des phases de repos.

Les mesures subjectives fournissent une évaluation du ressenti des participants, qui peut être plus ou moins précis en fonction des caractéristiques de la tâche. Les mesures comportementales ne fournissent pas une évaluation directe du phénomène de charge, mais plutôt du résultat de la charge sur la capacité des personnes à réaliser la tâche. Elles peuvent permettre une évaluation dynamique mais ne reflètent pas nécessairement les ressources cognitives utilisées.

Les mesures physiologiques permettent d'étudier les ressources cognitives utilisées lors de la réalisation d'une tâche. Cependant, elles sont aussi sensibles à plusieurs autres facteurs. Le diamètre pupillaire augmente avec la charge mentale. Cette augmentation est modérée par le niveau d'expertise des individus. Le comportement d'exploration visuelle peut être plus sensible à la charge cognitive. En effet, les saccades se raccourcissent et sont plus rapides lorsque la charge mentale est élevée. Par ailleurs, les experts sont plus enclins à superviser l'ensemble de la scène visuelle que les novices en situation de charge mentale élevée.

Le rythme EEG thêta augmente avec la sollicitation des ressources cognitives. Cette augmentation peut s'arrêter à un pallier reflétant la saturation des ressources cognitives. Les experts présentent un niveau de base du rythme thêta plus faible que les novices. L'augmentation du rythme thêta avec la charge est supérieure pour les experts que pour les novices. Le rythme alpha diminue avec la charge cognitive. De plus, cette diminution est plus importante pour les experts que pour les novices et les experts ont un niveau de base plus faible que les novices.

Chapitre 6 Conclusion théorique

La sollicitation des ressources cognitives lors de la réalisation d'une tâche a été conceptualisée par la notion de charge cognitive. Cette charge cognitive affecte largement les apprentissages. La théorie de la charge cognitive (CLT) la décrit comme le regroupement de trois charges parmi lesquelles l'apprenant doit répartir ses ressources cognitives, principalement celles qui relèvent de la mémoire de travail (Sweller, van Merriënboer & Paas, 1998).

La charge intrinsèque désigne les ressources dédiées à la réalisation de la tâche en cours, par exemple, résoudre un problème de mathématiques. La charge extrinsèque désigne les ressources utilisées par l'apprenant lors de la réalisation de la tâche, mais qui ne sont pas directement pertinentes pour sa réalisation ou l'apprentissage. La charge utile désigne les ressources consacrées à la formation de schémas en mémoire à long terme, *i.e.* à l'apprentissage lui-même. L'objectif principal de la CLT est de trouver différents moyens de réduire les charges extrinsèque et intrinsèque pour libérer des ressources pour la charge utile (Paas, Renkl & Sweller, 2003 ; Sweller, 1988).

Lorsque les éléments d'un problème doivent être manipulés simultanément pour résoudre un problème, la CLT parle d'une interactivité des éléments élevée, à l'inverse d'une interactivité faible qui désigne un problème dont les éléments peuvent être manipulés isolément.

Ainsi, l'objectif de la CLT est de proposer un cadre théorique permettant de manipuler les différents types de charge afin qu'elles ne dépassent pas les ressources disponibles de l'apprenant. S'il est possible de manipuler les caractéristiques de la tâche, les caractéristiques de l'apprenant affectent également l'efficacité des dispositifs d'apprentissages, en particulier son expertise (*e.g.*, Kalyuga *et al.*, 2003 ; Schnotz & Kürschner, 2007) et les modes opératoires (*i.e.* les stratégies) qu'il peut mettre en œuvre, ainsi que la capacité de sa mémoire de travail. Il en découle que l'on ne peut pas nécessairement définir l'arité d'une tâche, car celle-ci varie en fonction de l'expertise de l'apprenant et des modalités de présentation de l'information. De la même manière, les ressources cognitives disponibles de l'apprenant affectent l'efficacité des apprentissages.

La mémoire de travail des apprenants est, par nature, limitée à la fois en termes de quantité d'éléments que l'on peut y stocker et en termes de durée pendant laquelle on peut y maintenir ces éléments. Il s'agit d'un registre temporaire permettant de stocker et manipuler de faibles quantités d'informations (*e.g.*, Baddeley, 1986), ce registre dépendant de l'attention. Cependant, l'expertise permet d'augmenter la quantité d'informations maintenues en mémoire de travail, limitée, en regroupant plusieurs unités d'informations en un *chunk*, tant que les informations peuvent être regroupées sur la base du sens (*e.g.*, Miller, 1956).

Si les recherches effectuées dans le cadre de la théorie de la charge cognitive ont mis en évidence plusieurs effets empiriques permettant d'améliorer l'efficacité des dispositifs d'apprentissages, d'autres résultats empiriques soulignent deux limites majeures (*e.g.*, Paas *et al.*, 2003).

Ces deux limites, portent sur l'aspect dynamique des variations de la charge cognitive lors d'un apprentissage. La première est théorique car elle dépend largement du modèle de MdT utilisé par la CLT. Le modèle de Baddeley (1986) ne permet pas d'expliquer des variations dynamiques de la sollicitation de la MdT. L'autre limite, méthodologique, découle directement de la première. La théorie de la charge cognitive ne permet pas de proposer une mesure objective et dynamique de la charge cognitive lors d'apprentissages.

Le modèle de partage temporel des ressources (TBRS pour *Time Based Resources Sharing*, *e.g.*, Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004) a déjà été suggéré comme alternative au modèle de Baddeley afin de prendre le temps en considération dans les recherches portant sur la CLT (van Gog *et al.*, 2009 ; Spanjers, van Gog & van Merriënboer, 2010).

Ici, nous proposons de vérifier la pertinence du modèle TBRS comme réponse aux deux limites de la théorie de la charge cognitive soulignées. L'hypothèse de cette thèse est que le modèle TBRS doit permettre de répondre à la nécessité théorique de prendre le temps en considération et permettre une meilleure compréhension du phénomène de charge. Cette compréhension doit à son tour permettre une mesure physiologique de la charge.

L'objectif de ce travail de thèse n'est pas d'étudier les apprentissages directement, mais plutôt d'apporter des réponses, théoriques et pratiques à un modèle portant sur les apprentissages. L'objet de la partie empirique n'est donc pas de se focaliser sur la mesure dans laquelle une nouvelle conception des ressources cognitives peut affecter les apprentissages mais davantage de considérer la faisabilité de celle-ci. Cette partie empirique ne s'attachera donc pas à reproduire des résultats issus de la CLT en utilisant un cadre théorique différent mais plutôt à l'étape préalable consistant à vérifier que l'on peut utiliser ce cadre théorique lors de recherches portant sur la CLT. Il s'agira ensuite de vérifier si un nouveau modèle de la MdT permet de proposer d'une part une meilleure compréhension de l'effet du temps sur la charge et d'autre part de proposer une mesure dynamique et objective de la charge cognitive.

Pour cela, la partie empirique va commencer par s'intéresser à l'électro-encéphalographie et à l'*eye-tracking* comme outils de mesure de la charge cognitive, permettant de mettre en évidence certaines des différences interindividuelles affectant la réalisation d'une tâche complexe.

Après cette question de la mesure de la charge dans une conception « classique », le deuxième chapitre empirique vérifiera la pertinence du modèle TBRS pour répondre à la question théorique. En particulier, le modèle TBRS n'a jamais été utilisé pour décrire le maintien et la manipulation d'information pouvant être regroupées en *chunks*, sensibles à l'expertise. Cette deuxième partie s'attachera à vérifier l'influence de ce type d'information et de l'expertise sur les prédictions permises par le modèle.

Enfin, le troisième chapitre empirique vérifiera que l'utilisation du modèle TBRS pour répondre à la limite théorique de la CLT permet de proposer une mesure dynamique de la charge cognitive lors de la manipulation d'information pouvant être regroupées en *chunks*.

Partie empirique

“Tous les modèles sont faux. Certains sont utiles.” (George Box)

Chapitre 7 Mesures physiologiques de la charge cognitive

La première limite de la théorie de la charge cognitive est liée à sa mesure (voir chapitre 5). En effet, la CLT a principalement utilisé des mesures subjectives, sujettes aux biais de rationalisation *a posteriori*. De plus, ces mesures ont été mises en évidence comme sensibles au moment de la mesure. Une même tâche d'apprentissage est évaluée différemment si le questionnaire est administré pendant la phase d'apprentissage ou après (Schmeck *et al.*, 2014). Une autre catégorie de mesures utilisées dans le cadre de la CLT regroupe les mesures comportementales. Généralement, dans le cadre de la CLT, un premier test permet d'évaluer les connaissances antérieures des participants, puis à l'issue d'une phase d'apprentissage, un second test permet d'évaluer l'effet de l'apprentissage : on infère d'un faible apprentissage que la charge devait être élevée. Cependant, ces résultats ne permettent pas de mesurer directement la charge cognitive liée à l'apprentissage (Paas *et al.*, 2003).

Ce problème de mesure n'est pas spécifique à la théorie de la charge cognitive, d'autres courants théoriques se heurtant au même problème, à tel point que « le problème le plus élémentaire dans le cadre de la charge mentale est de savoir comment la mesurer » (Gevins & Smith, 2003). Les mesures subjectives et comportementales utilisées par la CLT ne permettent pas de mesurer efficacement la charge cognitive lors des phases d'apprentissages, et encore moins de tenir compte de ses variations au cours du temps. Pour résoudre ce problème, il a été suggéré d'utiliser des mesures physiologiques (Paas *et al.*, 2003 ; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 ; Martin, 2014). L'une des mesures physiologiques les plus utilisées pour mesurer la charge cognitive est certainement l'électroencéphalographie (Ke *et al.*, 2014 ; Gevins *et al.*, 1998).

Partie 1 : mesure électro-encéphalographique de la charge cognitive

Les données et les traitements décrits dans cette première partie ont fait l'objet d'une préparation d'article en cours de soumission.

Introduction

Dans le cadre de la CLT, la charge cognitive est définie comme sollicitant principalement les ressources attentionnelles et la mémoire de travail (voir le chapitre 3). Ces deux fonctions exécutives pourraient être soutenues par le même réseau de neurones ou par deux réseaux très proches anatomiquement (LaBar *et al.*, 1999). Elles sont soutenues par des réseaux largement distribués dans le cerveau, essentiellement au niveau du lobe frontal et du lobe pariétal, dans

les deux hémisphères (Sauseng *et al.*, 2005 ; D'Esposito *et al.*, 1998 ; Labar *et al.*, 1999). Chaque hémisphère serait spécialisé dans un type de traitement, l'hémisphère gauche traiterait principalement les informations relevant de la boucle phonologique. L'hémisphère droit traiterait plus particulièrement les informations relevant du calepin visuo-spatial (Ravizza, Behrmann, & Fiez, 2005 ; D'Esposito *et al.*, 1998).

L'étude de l'activité EEG lors de la sollicitation de l'attention et de la MdT montre que deux rythmes sont principalement impliqués dans leurs variations : le rythme thêta (4-8 hertz) et le rythme alpha (8-12 hertz). L'utilisation de la mémoire de travail est associée à une augmentation de la puissance spectrale dans la bande de fréquence thêta et à une diminution de la puissance spectrale dans la bande de fréquence alpha (Schacter, 1977 ; Basar, Basar-Eroglu, Karakas & Schürmann, 2001 ; Kahana, Seelig, & Madsen, 2001 ; Klimesch, 1999 pour des revues de la littérature). Les mêmes variations s'observent lors de tâches attentionnelles, caractérisées par une diminution de la puissance du rythme alpha (Klimesch, 1996 ; Klimesch, Doppelmayr, Russeger, Pachinger & Schwaiger, 1998) et une augmentation du rythme thêta (Gevins & Smith, 2000). Toutefois, la puissance du rythme alpha peut aussi augmenter avec le nombre d'items interférents à inhiber (Rihs, Michel & Thut, 2007).

L'électroencéphalographie a également permis de mettre en évidence des différences en termes de capacité de mémoire de travail entre les participants. Ainsi, dans des conditions de faible sollicitation de la MdT, plus les participants présentaient un faible empan mnésique, plus l'activité du rythme thêta était élevée (Klimesch, Vogt & Doppelmayr, 1999 ; Klimesch, 1999 ; Beatty & O'Hanlon, 1979 ; Beatty, 1977 ; Valentino, Arruda & Gold, 1993). L'EEG permettrait donc d'obtenir une mesure des ressources cognitives des individus et de leur sollicitation lors de la réalisation d'une tâche.

Des résultats comparables sont obtenus lors d'études plus écologiques, une augmentation de la charge cognitive entraînant une augmentation de la puissance du rythme thêta (Smith, McEvoy, & Gevins, 1999 ; Holm, Lukander, Korpela, Sallinen, & Müller, 2009 ; Fournier, Wilson, & Swain, 1999 ; Antonenko, 2007 ; Ryu & Myung, 2005). De la même manière, l'augmentation de la charge cognitive est réputée entraîner une diminution de la puissance associée au rythme alpha (Serman & Mann, 1995 ; Klimesch, 1999 ; Ota, Toyoshima, & Yamauchi, 1996 ; Slobounov *et al.*, 2000).

Cependant, un certain nombre d'études ne mettent pas en évidence de différences significatives au niveau des rythmes EEG en fonction de la charge cognitive, voire mettent en

évidence des variations inverses à celles attendues. Pour générer différents niveaux de charge cognitive, la plupart des études utilisent deux méthodes différentes. La première consiste à manipuler les paramètres de la tâche pour les rendre plus difficiles, en diminuant le temps disponible par exemple (Johannsen, 1979). La seconde consiste à augmenter le nombre de tâches à réaliser simultanément (*i.e.* le nombre de tâches concurrentes), ce qui constitue un des premiers déterminants de la charge cognitive (Schvaneveldt, 1969 ; Yeh & Wickens, 1988 ; Rogers & Monsell, 1995).

Les études utilisant la première méthode, manipuler la difficulté de la tâche, ont souvent mis en évidence peu de différences au niveau des mesures EEG. Par exemple, Gevins et ses collègues (1995) ont fait une revue de trois expériences de leur équipe utilisant des tâches de difficultés croissantes (Gevins & Schaffer, 1980 ; Gevins *et al.*, 1979 ; Gevins, Zeitlin, Doyle, Schaffer & Callaway, 1979). Aucune de ces trois études ne montre de différence significative en fonction de la difficulté de la tâche. De la même manière, en utilisant le *Multi Attribute Task Battery* (MATB, Comstock & Arnegard, 1992) un environnement de multitâches comportant quatre sous-tâches, Fournier, Wilson et Swain (1999) n'ont trouvé aucune différence entre les trois niveaux de difficulté utilisés. Plus récemment, Baldwin et Penaranda (2012) ont utilisé trois tâches de mémoire de travail différentes, en fixant deux niveaux de difficulté par tâche. Ils n'ont trouvé des différences tendanciennes que pour deux des tâches et aucune différence pour la troisième tâche en fonction du niveau de difficulté. De la même manière, Funke et ses collègues (2013) ont augmenté le nombre d'éléments à traiter pour augmenter la difficulté de la tâche sans observer de différence au niveau du rythme thêta. Parallèlement, augmenter la difficulté d'une tâche secondaire pendant la réalisation d'une tâche principale n'a pas non plus permis de mettre en évidence de variations du rythme thêta (Käthner *et al.*, 2014).

Enfin, utilisant une tâche de simulation de contrôle aérien, Brookings, Wilson et Swain (1996) ont fait varier le nombre d'avions et la difficulté des phases. Leurs résultats montrent un niveau maximal du rythme thêta pour la condition de difficulté moyenne, supérieur aux conditions de difficulté faibles et élevées, un résultat similaire à celui de Pigeau, Hoffman, Purcell et Moffitt (1988 ; rapporté dans Kramer, 1990). Selon Kramer (1990) la puissance associée au rythme thêta devrait diminuer avec l'augmentation de la charge cognitive, un résultat qu'il retrouve dans différentes études (Sirevaag *et al.*, 1988 ; Natani & Gomer, 1981 ; citées dans Kramer, 1990). Kramer (1990) explique les résultats de Pigeau et ses collègues (1988) par le fait qu'ils ont commencé leur expérimentation avec une charge cognitive trop

faible dans la condition « faible charge ». Selon Kramer, cela explique l'augmentation du rythme thêta entre la condition de faible charge et la condition moyenne. Ensuite, lorsque la charge cognitive est suffisamment élevée, le rythme thêta diminue avec l'augmentation de la charge.

En utilisant le MATB, Fournier, Wilson et Swain (1999) ont comparé une version à une seule tâche et une version comportant 4 tâches concurrentes selon trois niveaux de difficulté. Les trois niveaux de difficulté étaient liés au rythme de rafraîchissement des tâches. Leurs résultats montrent une augmentation du rythme thêta entre la version à une tâche et la version à quatre tâches dans la modalité difficile. Les autres conditions ne différaient pas entre elles. Plus récemment, Holm et ses collègues (2009) ont utilisé une tâche comparable au MATB pour étudier les variations induites par un nombre de tâches concurrentes croissant (une, deux et quatre tâches concurrentes). Leurs résultats ont montré une diminution du rythme alpha associé aux trois modalités mais aucune différence significative au niveau du rythme thêta.

Cette inconsistance des variations électro-encéphalographiques pourrait provenir de deux considérations méthodologiques différentes. Il est possible que ces études aient utilisé une condition de faible charge sollicitant trop les ressources cognitives pour permettre une variation significative au cours des conditions suivantes. Il est également possible que les différences interindividuelles aient été trop importantes comparées aux variations induites par la manipulation du niveau de charge cognitive. La première hypothèse est utilisée par Kramer (1990) pour expliquer les divergences de résultats de trois études (Sirevaag *et al.*, 1988 ; Natani & Gomer, 1981 ; Pigeau *et al.*, 1988). Selon lui, les résultats sont divergents car les niveaux initiaux de charge cognitive sont différents. La seconde hypothèse est une question statistique, lorsque trop peu de participants présentant de grandes différences réalisent une même tâche. Les différences entre les participants induisent de grandes variations de mesure comparées à celles induites par la tâche qui deviendront négligeables en termes statistiques. Aucune des études mentionnées n'a regroupé les participants en groupes, basés sur les performances, pour comparer les variations des rythmes EEG mesurés. Pourtant une analyse en cluster pourrait permettre de réduire les variations interindividuelles, puisque ces variations sont associées à des différences d'activité EEG en fonction de la sollicitation des ressources cognitives (Beatty & O'Hanlon, 1979 ; Beatty, 1977 ; Valentino, Arruda & Gold, 1993).

Une autre mesure physiologique utilisée pour évaluer la charge cognitive est la pupillométrie (Cain, 2007). En effet, le diamètre de la pupille est réputé refléter le degré d'activation

général de l'organisme, et a été mis en évidence comme reflétant les variations de la charge cognitive (voir Beatty & Lucero-Wagoner, 2000 pour une revue). Le diamètre pupillaire augmente avec l'augmentation de la charge dans différents environnements, à la fois dans des tâches de laboratoire (Kahneman & Beatty, 1966 ; Peavler, 1974) et durant des tâches plus écologiques (Just & Carpenter, 1993 ; Ahlstrom & Friedman-Berg, 2006 ; Stein, 1992). Il reflète donc les variations de l'exigence de la tâche en ressources cognitives. Il a également été mis en évidence comme augmentant avec l'effort cognitif (Kahneman, Tursk, Shapiro, & Crider, 1969 ; Iqbal, Adamczyk, Zheng & Bailey, 2005) et avec l'inhibition de la réponse, qui sollicite les ressources attentionnelles (Laeng, Ørbo, Holmlund, & Miozzo, 2011 ; Chiew & Braver's, 2013). Ainsi, le diamètre pupillaire augmente avec l'exigence attentionnelle de la tâche (Lisi, Bonato & Zorzi, 2015). Cependant, il varie également avec la luminosité (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000 pour une revue) et avec d'autres facteurs non cognitifs tels que l'effort physique (Richer & Beatty, 1985) ce qui rend cet indicateur difficile à utiliser dans des situations naturelles. Malgré ces limites, le diamètre pupillaire demeure un bon indicateur de la charge cognitive dans des tâches de laboratoire (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000).

Dans cette expérimentation, nous avons utilisé un protocole de multitâches habituellement mis en œuvre dans le cadre du recrutement des élèves pilotes de ligne de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC). Dans ce protocole, le nombre de tâches concurrentes à réaliser augmente de une à quatre pour augmenter la charge cognitive. Nous avons fait l'hypothèse que cette augmentation entraînerait une augmentation progressive commençant avec un niveau de charge faible. Les données comportementales, subjectives et pupillométriques ont été utilisées afin de contrôler cette augmentation de la charge cognitive au cours de la tâche. Nous avons considéré que ces trois indicateurs fourniraient une mesure fiable de la charge, indépendante des mesures électro-encéphalographiques (voir Cegarra & Chevalier, 2008).

De plus, nous avons utilisé un nombre de participants suffisamment important pour permettre une analyse en *clusters* sur la base de leurs performances. Ceci nous a permis de réaliser des analyses sur les données EEG de groupes homogènes au regard de leurs performance. Nous avons fait l'hypothèse que l'augmentation du nombre de tâches concurrentes induirait une augmentation de la puissance spectrale associée à la bande de fréquence thêta. De plus, nous nous attendions à ce que les variations de puissances dans la bande de fréquence thêta permettent de discriminer nos différents groupes de participants. Notre dispositif expérimental imposant une nécessité croissante d'inhiber les tâches concurrentes, nous avons également formulé l'hypothèse selon laquelle la puissance associée au rythme alpha augmenterait avec le

nombre de tâches concurrentes. Cependant, la nature de la tâche utilisée ne nous a pas permis de faire d'hypothèse sur la sources des différences interindividuelles, qu'elles soient liées aux capacités des participants ou aux différentes stratégies utilisées.

Méthodologie

Participants

Vingt participants ont pris part à cette étude (14 femmes et 6 hommes), âgés de 19 à 38 ans (moyenne d'âge = 27.25, écart-type = 3.88). Seize d'entre eux étaient droitiers. La moyenne du nombre d'années d'études après le bac était de 4.1 (écart-type = 1.57). Tous étaient volontaires pour participer à cette expérience, pour laquelle ils n'étaient pas rémunérés. Tous ont donné un consentement éclairé.

Matériel

Les mouvements oculaires ont été enregistrés avec un EyeLink 1000 (SR Research Ltd., Mississauga, Ontario, Canada) connecté à un Pentium IV 3.0 GHz. Ce modèle a une précision spatiale supérieure à 0.5° et une résolution supérieure à 0.01. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 1000 Hz. La caméra était placée à 20 cm de l'écran et la distance entre l'écran et l'œil enregistré était de 60 cm. Pour maintenir ces distances constantes et éviter les mouvements de tête, une mentonnière et une barre frontale ont été utilisées. Pour afficher l'expérimentation, nous avons utilisé un écran DELL de 19'' avec un rythme de rafraîchissement de 75 Hz et une résolution de 1024x768 pixels. Toutes les données oculométriques ont été extraites en utilisant l'algorithme standard de l'appareil. La luminosité de la pièce expérimentale était maintenue constante.

Les données EEG ont été enregistrées à l'aide d'un système BioSemi ActiveTwo de 32 électrodes (BioSemi, Amsterdam, Netherlands) et d'un ordinateur d'acquisition Intel I5 3.0 GHz. Les électrodes étaient positionnées sur un casque élastique et placées sur des positions standards suivant la nomenclature internationale 10/20 (Fp1, AF3, F7, F3, FC1, FC5, T7, C3, CP1, CP5, P7, P3, Pz, PO3, O1, Oz, O2, PO4, P4, P8, CP6, CP2, C4, T8, FC6, FC2, F4, F8, AF4, Fp2, Fz, Cz). Du fait de la localisation frontale des électrodes Fp1 et Fp2, ces électrodes ont été retirées des analyses car les données étaient contaminées par des contacts avec la barre frontale de l'*eye-tracker*, produisant des valeurs extrêmes. L'impédance des électrodes a été gardée en dessous de 3 k Ω . Les données ont été acquises à une fréquence d'échantillonnage de 512 Hz et elles ont été filtrées lors de l'acquisition à l'aide d'un filtre passe bande de Butterworth entre 0.01 et 40 Hz. De plus, pour enregistrer un électro-

oculogramme horizontal (HEOG), deux électrodes libres ont été placées à 1 cm des canthi externes gauches et droit. De la même manière, un électro-oculogramme vertical (VEOG) a été enregistré à l'aide d'électrodes placées au-dessus et au-dessous de l'œil gauche pour détecter les clignements des yeux et les mouvements oculaires verticaux. Deux électrodes de référence ont également été positionnées derrière les os mastoïdes gauches et droits. La moyenne du signal enregistré par ces deux électrodes a servi de nouvelle référence au signal après l'enregistrement. Le signal EEG a été analysé avec le logiciel BrainVision Analyzer (v2.4) et corrigé selon les mouvements oculaires sur la base d'analyses en composantes indépendantes basées sur les références HEOG et VEOG.

Les mesures subjectives de la charge cognitive ont été enregistrées après chaque phase expérimentale en utilisant une version informatisée du questionnaire Nasa-TLX (Hart & Staveland, 1988). Les participants évaluaient chaque dimension en déplaçant un curseur sur une échelle variant de 0 à 100. Les données comportementales ont été enregistrées pendant toute l'expérimentation sur la base des performances instantanées à chaque sous-tâche.

Protocole

La « Tâche de Gestion de Priorité » (TGP) a été utilisée pour cette expérience : il s'agit d'une épreuve de multitâches utilisée à l'ENAC dans le cadre du recrutement des élèves pilotes. Comme représentée sur la Figure 11, cette épreuve comporte quatre phases de difficulté progressive durant lesquelles les participants doivent réaliser d'une à quatre tâches concurrentes. Ces quatre tâches comprennent une tâche de supervision de jauges, une tâche de poursuite de cible, une tâche de barrage de lettres et une tâche de calcul mental.

Durant la première phase, les participants devaient réaliser une tâche de supervision de jauges. Quatre jauges étaient présentées à l'écran et régulièrement (*i.e.* toutes les 15 s) une des jauges dérivait. Les participants devaient ramener la jauge au centre à l'aide du joystick gauche. Avant de commencer cette première phase, les participants étaient entraînés pendant une minute sur la tâche. La première phase durait trois mn. Durant la seconde phase, les participants devaient réaliser simultanément la tâche de supervision de jauges et une tâche de poursuite. Dans cette deuxième sous-tâche, ils devaient garder une croix blanche à l'intérieur d'un cercle qui dérivait régulièrement (*i.e.* toutes les 15 s) de sa position à l'aide du joystick droit. Avant cette deuxième phase, les participants étaient entraînés pendant une mn et la phase proprement dite durait quatre mn. Durant la troisième phase, les participants devaient réaliser les deux premières sous-tâches et réaliser une tâche de barrage de lettres. Ce barrage

de lettres consistait en une série de neuf lettres dans lesquelles les participants devaient désigner trois lettres cibles en utilisant les touches du clavier F1 à F9. Toutes les quinze secondes, la série de neuf lettres était renouvelée. Cette troisième phase était également précédée par une phase d'entraînement d'une mn et durait quatre mn. Durant la quatrième phase, les participants devaient réaliser les trois premières sous-tâches et une tâche de calcul mental au moyen du clavier numérique. Les calculs mentaux proposés étaient des problèmes simples (par exemple : « Combien font 11% de 500 »), renouvelés toutes les 15 s. Cette quatrième phase était également précédée d'une minute d'entraînement et durait quatre mn. Ces quatre phases étaient suivies de deux phases supplémentaires décrites dans la méthodologie de la partie suivante de ce chapitre.

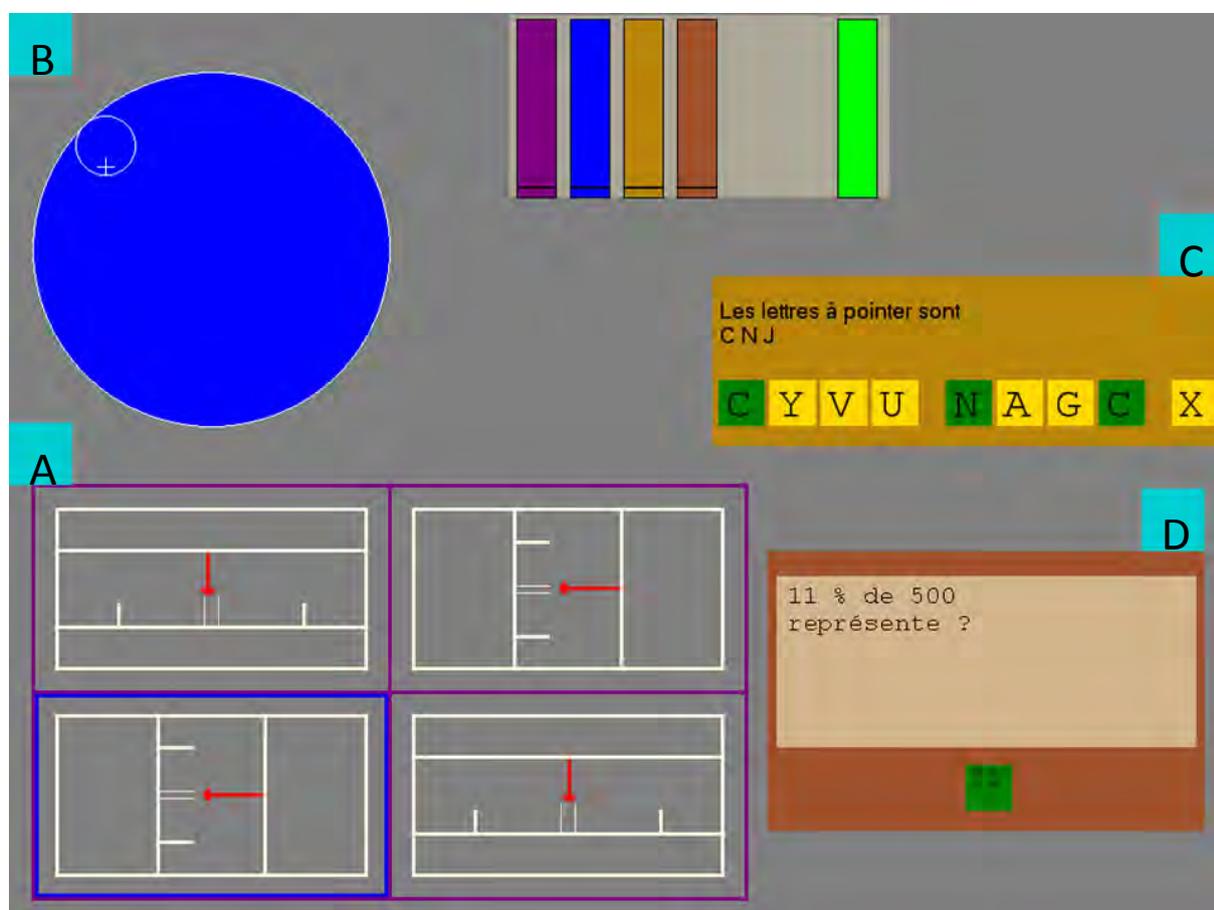


Figure 11. La Tâche de Gestion de Priorité (TGP) utilisée durant l'expérimentation 1

Durant la phase 1, les participants devaient réaliser la tâche A, la supervision des jauges. Durant la phase 2, les participants devaient réaliser la tâche A et la tâche B, la tâche de poursuite. Durant la phase 3, ils devaient réaliser les deux premières sous-tâches et la tâche C, le barrage de lettres. Enfin, dans la phase 4, ils devaient réaliser les quatre sous-tâches A, B, C et D, le calcul mental.

Traitement du signal

Le signal EEG a été segmenté en fonction des différentes phases à réaliser. Une seconde segmentation fut ensuite réalisée pour découper chaque phase en segment de 10 s avec un chevauchement de 5 s. Ensuite, une Transformée de Fourier Rapide a été appliquée en utilisant des fenêtres de Hamming. La puissance moyenne associée à chacune des deux bandes de fréquences thêta (4 à 8 Hz) et alpha (8 à 12 Hz) a été calculée. Les données ont été log-transformées, pour corriger la normalité des distributions.

Les données pupillométriques ont été transformées en utilisant un z-score tenant compte des phases d'entraînement.

Variables dépendantes et analyses statistiques

La moyenne des scores bruts de chaque dimension du questionnaire Nasa-TLX a été calculée pour définir un score global.

Les performances étaient enregistrées toutes les 100 ms pour chaque sous-tâche et pour chaque phase. La performance globale correspondait à la moyenne des performances à chaque sous-tâche. De plus, la performance globale était ramenée à zéro lorsque la performance à l'une des sous-tâches descendait en dessous d'un seuil de 10% de la performance maximale. Un score global variant de 0 à 150 a été obtenu en calculant la moyenne des performances sur l'ensemble des phases.

Résultats

Nasa-TLX : Le score global du Nasa-TLX augmente significativement avec le nombre de tâches à réaliser simultanément, $F_{(3,57)}=74.556$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partiel}}=.797$, (voir Figure 12, à gauche). Les comparaisons par paires utilisant un test LSD mettent en évidence une différence significative entre chaque phase (toutes les valeurs de $p <.001$).

Diamètre pupillaire : Le z-score calculé augmente significativement avec le nombre de tâches à réaliser simultanément, $F_{(3, 57)}=21.572$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partiel}}=.532$. Les analyses post-hoc révèlent une augmentation significative entre les trois premières phases (toutes les valeurs de $p<.02$), mais une augmentation seulement tendancielle entre les phases 3 et 4 ($p=.10$).

Performances : Les scores de performances globales varient significativement avec le nombre de tâches à réaliser simultanément, $F_{(3,57)}=22.243$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partiel}}=.539$. Lorsque l'on compare les phases deux à deux, la performance globale ne diminue pas significativement entre les phases 1 et 2 ($M_1=126.07$ et $M_2=118.57$ respectivement, $p=.161$), mais la

performance globale lors de la phase 1 est significativement supérieure à celles obtenues lors de la phase 3 ($M_3=112.65$, $p=.003$) et lors de la phase 4 ($M_4=92.68$, $p<.001$). La phase 2 n'est que tendanciellement supérieure à la phase 3 ($p=.063$), mais significativement supérieure à la phase 4 ($p<.001$). La performance globale diminue significativement entre la phase 3 et la phase 4 ($p<.001$). L'absence de diminution significative de la performance entre les phases 1 et 2 pourrait être expliquée par un manque de sensibilité des mesures liées à la performance (Wickens, 2002 ; 2008) : l'augmentation de la charge cognitive pourrait être liée à une augmentation de la sollicitation des ressources cognitives. Les ressources supplémentaires mobilisées feraient augmenter le sentiment d'effort tout en permettant de maintenir la performance à un niveau acceptable.

Nous avons ensuite utilisé les performances obtenues lors de la phase la plus coûteuse (la phase 4) pour diviser les participants en différents groupes. Une classification hiérarchique utilisant la méthode de Ward (voir Figure 12, à droite) met en évidence trois clusters de participants. Le premier cluster (« *Good* ») regroupe les participants ayant obtenu les meilleurs scores, avec des scores moyens lors de la phase 4 variant de 105.6 à 118.9. Le second cluster (« *Medium* ») regroupe les participants ayant obtenu des performances moyennes, leurs scores lors de la phase 4 variant de 67 à 97.3. Le dernier cluster (« *Low* ») ne regroupe que deux participants, présentant des performances faibles lors de cette de dernière phase (21.7 et 35.9), il n'a donc pas fait l'objet de traitements statistiques.

En scindant les données comportementales selon les performances, une ANOVA à mesures répétées révèle des différences en fonction de la phase pour le groupe des participants obtenant les meilleurs scores ($F_{(3,27)}=42.108$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partiel}}=.82$) et pour le groupe obtenant des performances moyennes ($F_{(3,21)}=36.965$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partiel}}=.84$). Pour le premier cluster (meilleures performances), les comparaisons par paires ne révèlent pas de différences entre la phase 1 et la phase 2 ($p=.29$) mais une diminution significative entre la phase 2 et la phase 3 ($p=.009$) et entre la phase 3 et la phase 4 ($p=.001$). La même analyse répétée pour le second cluster (performances moyennes) révèle un pattern similaire, ne présentant pas de diminution significative entre la phase 1 et la phase 2 ($p=.57$) ni entre la phase 2 et la phase 3 bien qu'il y ait une diminution tendancielle ($p=.051$) et une diminution significative entre la phase 3 et la phase 4 ($p<.001$).

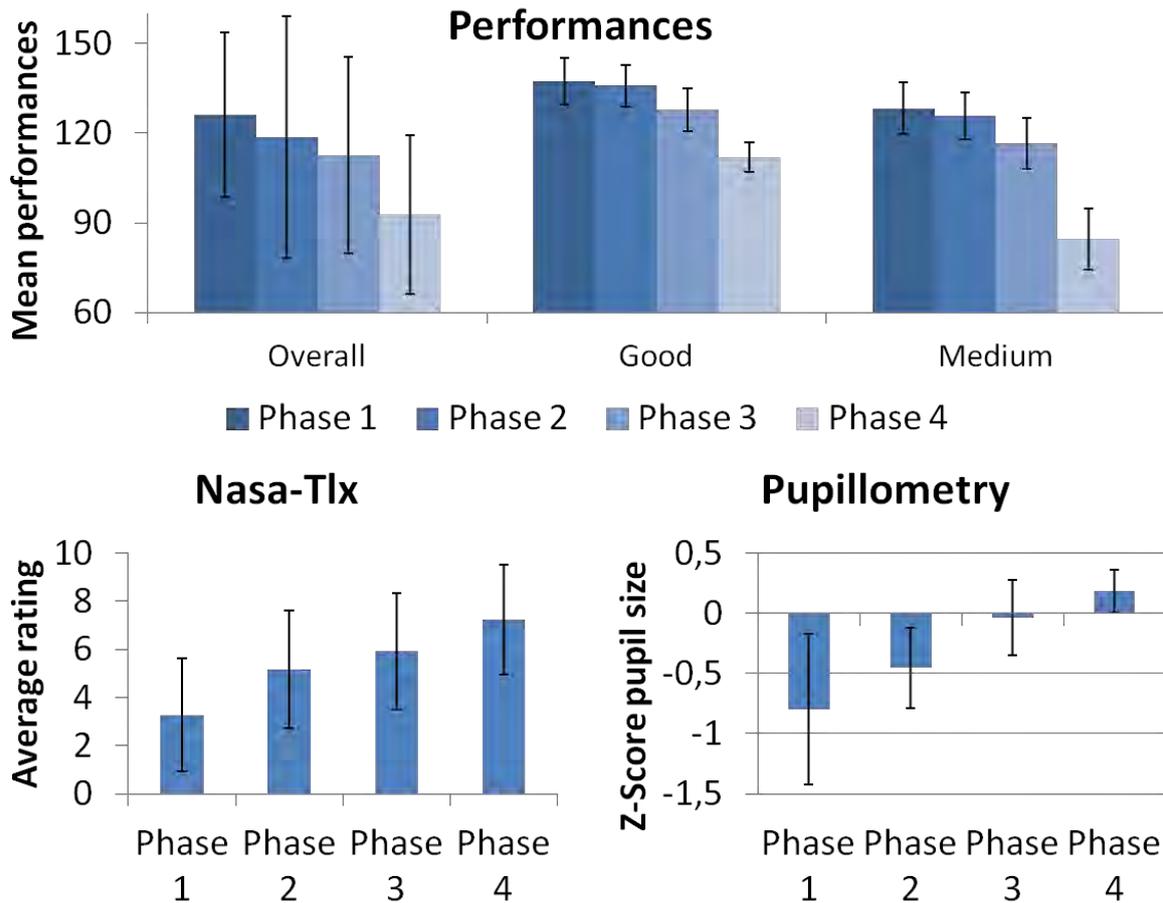


Figure 12. Moyennes et écart-types pour les données subjectives, pupillométriques et comportementales lors de l'expérimentation 1

Deux groupes de participants se distinguent, les deux participants aux performances les plus faibles formant un troisième groupe. L'évaluation subjective de la charge augmente significativement entre chaque phase tandis que la performance ne diminue significativement qu'entre la phase 3 et la phase 4.

Électro-encéphalographie : Pour chaque rythme, nous avons réalisé une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs selon le plan Électrodes (28) x Phases (4). Le rythme thêta étant réputé varier principalement autour des électrodes frontales et le rythme alpha principalement autour des électrodes pariétales, la même analyse fut reproduite autour de ces électrodes. Le troisième cluster ne regroupant que deux participants, ces données n'ont pas été analysées avec une ANOVA. Cependant, une description de ces données est présentée ci-dessous, pour pouvoir les comparer aux données des deux autres groupes. Les analyses ont été focalisées sur les différences entre les deux groupes de participants (1) et sur les différences entre les phases pour chaque bande de fréquence (2). Pour comparer les phases et les groupes, nous avons utilisé des comparaisons planifiées avec l'hypothèse que la puissance associée au

rythme thêta augmenterait entre les phases. Nous avons également fait l'hypothèse que le groupe *medium* présenterait une puissance dans cette bande de fréquence supérieure à celle du groupe ayant obtenu de meilleures performances. Ayant fait l'hypothèse que le rythme alpha présenterait des variations similaires à celles du rythme thêta, nous avons reproduit les mêmes comparaisons planifiées sur les données de cette bande de fréquence.

Rythme thêta : Les analyses du rythme thêta sont illustrées par la Figure 13. Nous avons fait l'hypothèse que la puissance associée à la bande de fréquence thêta augmenterait avec le nombre de tâches concurrentes. Nous avons également fait l'hypothèse que le rythme thêta permettrait de discriminer les différents groupes établis sur la base des performances.

Si l'on considère la comparaison entre les groupes, le groupe *Medium*, obtenant des performances moyennes, présente une puissance associée au rythme thêta supérieure durant la phase 1, $F_{(1,16)}=7.230$, $p=.02$, durant la phase 2, $F_{(1,16)}=6.929$, $p=.02$, et durant la phase 3, $F_{(1,16)}=4.803$, $p=.04$, mais pas durant la phase 4, $F_{(1,16)}=2.912$, $p=0.11$. Ainsi, à l'exception de la phase présentant le niveau de charge le plus élevé, le groupe obtenant les meilleures performances présente un niveau du rythme thêta inférieur au groupe obtenant les performances moyennes. De plus, d'un point de vue descriptif, le groupe obtenant les moins bonnes performances présente une activité dans la bande de fréquence thêta plus élevée que chacun des deux autres groupes lors de chaque phase.

Si l'on considère la comparaison entre les phases, le premier groupe, *Good*, obtenant les meilleures performances, présente une augmentation de la puissance associée au rythme thêta entre les phases 1 et 2, $F_{(1,16)}=13.364$, $p=.002$, entre les phases 2 et 3, $F_{(1,16)}=21.521$, $p<.001$, mais pas entre les phases 3 et 4, $F_{(1,16)}=0.0848$, $p=.77$. Pour le groupe *Medium*, le même pattern est observé, avec une augmentation entre les phases 1 et 2, $F_{(1,16)}=6.115$, $p=.02$, entre les phases 2 et phase 3, $F_{(1,16)}=10.685$, $p=.005$, mais pas entre les phases 3 et 4, $F_{(1,16)}=0.958$, $p=.34$. Pour résumer, pour les deux groupes de participants, le rythme thêta augmente entre une et trois tâches concurrentes avant d'atteindre un plateau, l'ajout d'une quatrième tâche concurrente ne provoquant pas d'augmentation. De façon qualitative, le troisième groupe, réunissant les deux participants obtenant les moins bonnes performances, présente une plus faible augmentation entre les phases 1 et 4 que les deux autres groupes.

La même analyse, réalisée avec les cinq électrodes frontales (Fz, F3, F4, F7 et F8) ne permet pas de mettre en évidence de différence entre les phases 1 et 2 ni pour le groupe *good*, $F_{(1,16)}=2.674$, $p=.121$, ni pour le groupe *medium*, $F_{(1,16)}=0.0034$, $p=.954$.

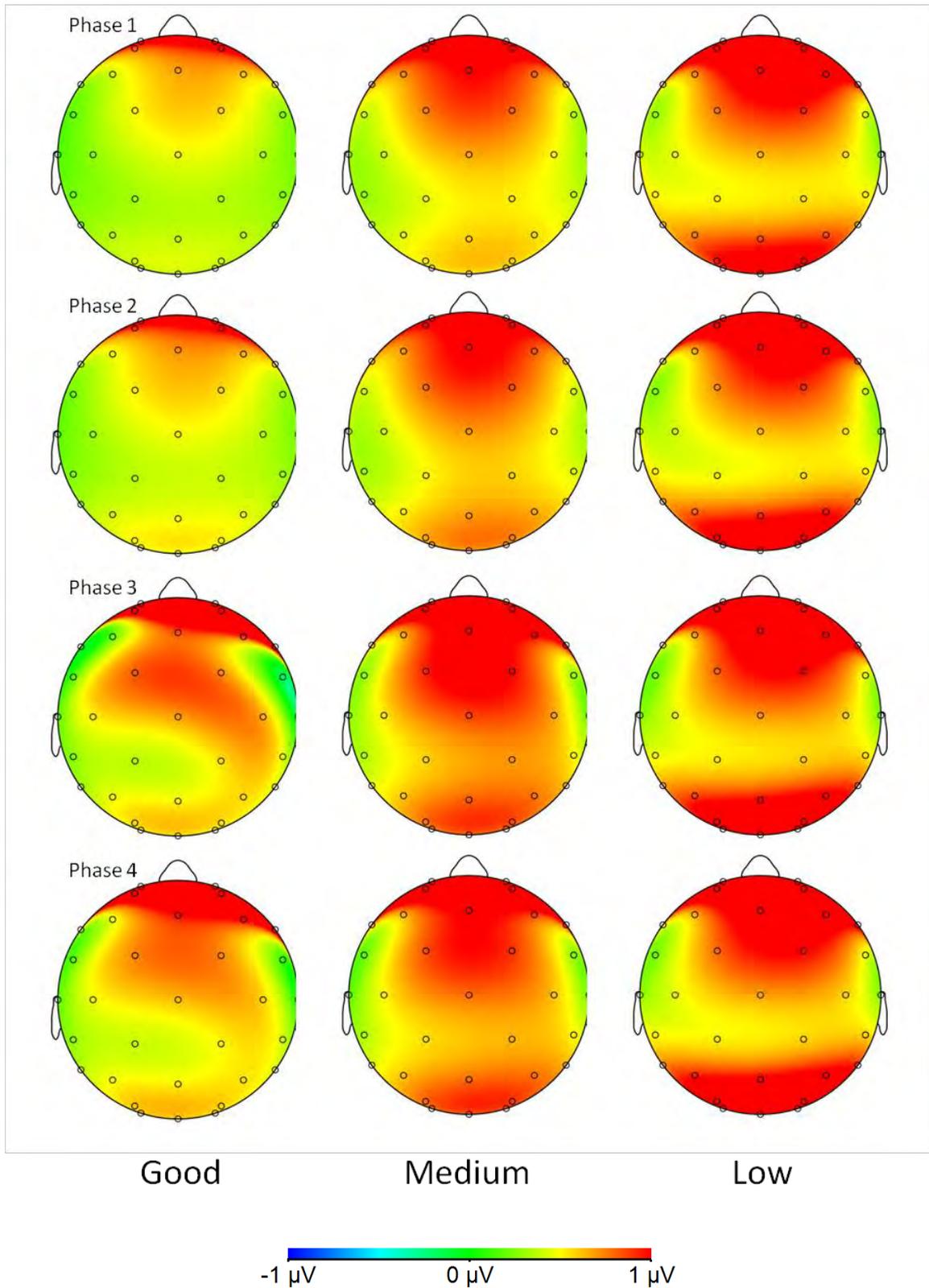


Figure 13. Rythme θ durant les phases 1 à 4 de l'expérimentation 1 pour chaque cluster

Le rythme θ pour le groupe obtenant les meilleures performances (à gauche), celui obtenant les performances moyennes (au centre) et celui obtenant les moins bonnes performances (à droite).

Rythme alpha : Nous avons fait l'hypothèse que la puissance du rythme alpha augmenterait avec le nombre de tâches concurrentes. Nous avons également fait l'hypothèse que l'activité dans cette bande de fréquence permettrait de distinguer les différents groupes formés sur la base des performances obtenues lors de la tâche.

Si l'on considère la comparaison entre les groupes, le groupe *medium* présente une puissance associée à la bande spectrale alpha plus élevée que le groupe *good* durant les trois premières phases, bien que ces différences ne soient que tendanciennes (phase 1 : $F_{(1,16)}=3.896$, $p=.07$; phase 2 : $F_{(1,16)}=3.698$, $p=.07$ et phase 3 : $F_{(1,16)}=3.658$, $p=.07$). Aucune différence significative entre les deux groupes n'est observée durant la phase 4, $F_{(1,16)}=2.924$, $p=.11$. De plus, d'un point de vue purement descriptif, le groupe *low*, regroupant les participants obtenant les moins bonnes performances, présente des niveaux de puissances associés au rythme alpha supérieurs à ceux des deux autres groupes lors de chaque phase.

Si l'on considère la comparaison entre les phases, pour le groupe *good*, le rythme alpha augmente significativement entre les phases 1 et 2, $F_{(1,16)}=10.202$, $p=.0056$, entre les phases 2 et 3, $F_{(1,16)}=14.730$, $p=.001$ mais pas entre les phases 3 et 4, $F_{(1,16)}=0.195$, $p=.66$. Le groupe *medium* présente un pattern similaire, le rythme alpha présentant une augmentation tendancielle entre les phases 1 et 2, $F_{(1,16)}=3.971$, $p=.06$, une augmentation significative entre les phases 2 et 3, $F_{(1,16)}=5.891$, $p=.03$ et pas de différences entre les phases 3 et 4, $F_{(1,16)}=0.536$, $p=.47$. Ainsi, le rythme alpha augmente pour chaque groupe entre une et trois tâches concurrentes avant d'atteindre un plateau, l'ajout de la quatrième tâche concurrente ne provoquant pas de variations supplémentaires.

La même analyse reproduite sur les cinq électrodes pariétales (Pz, P3, P4, P7 et P8) montre une augmentation du rythme alpha entre les phases 1 et 2 pour les deux groupes, *good*, $F_{(1,16)}=9.843$, $p=.006$ et *medium*, $F_{(1,16)}=6.108$, $p=.02$. Le rythme alpha augmente significativement entre les phases 2 et 3 pour les deux groupes, *good*, $F_{(1,16)}=6.711$, $p=.02$ et *medium*, $F_{(1,16)}=6.586$, $p=.02$, mais pas entre les phases 3 et 4, $F_{(1,16)}=0.0009$, $p=.97$ et $F_{(1,16)}=0.994$, $p=.33$, pour les groupes *good* et *medium* respectivement.

Discussion

Nous avons fait l'hypothèse que les deux rythmes considérés, thêta et alpha, augmenteraient avec le nombre de tâches concurrentes, et qu'ils permettraient tous les deux de discriminer les différents groupes formés sur la base des performances obtenues lors de la réalisation de la tâche.

La majorité des auteurs considère que pour des tâches écologiques, l'augmentation de la charge cognitive est associée à une augmentation du rythme thêta et à une diminution du rythme alpha (Vidulich & Tsang, 2012 ; Borghini *et al.*, 2014 pour des revues). Cependant, lorsque l'on regarde plus en détails les études empiriques, ces résultats ne se retrouvent pas systématiquement (Kramer, 1990; Sirevaag *et al.*, 1988; Natani & Gomer, 1981; Fournier, Wilson & Swain, 1999; Holm *et al.*, 2009; Funke *et al.*, 2013). En revanche, lors de tâches de laboratoire, ces variations dans les bandes de fréquences thêta et alpha s'observent plus systématiquement (Gevins *et al.*, 1998 ; Klimesch, 1999 pour une revue).

À partir de la littérature, nous avons fait l'hypothèse que, d'une part, certaines manipulations de la charge cognitive pouvaient avoir été inefficaces ou avoir atteint un plateau. D'autre part, nous avons fait l'hypothèse que des différences individuelles dans l'activité EEG générée par le choix de différentes stratégies, liées à différentes performances ou à différentes mobilisations de l'attention et de la MdT pouvaient induire du bruit dans les données, masquant les différences induites par la tâche. Dans cette expérience, (1) nous avons utilisé des mesures subjectives, comportementales et pupillométriques pour contrôler la manipulation de la charge cognitive. (2) Nous avons analysé les puissances spectrales des différents rythmes après avoir classé les participants en fonction de leurs performances. Nos participants devaient réaliser un nombre croissant de tâches concurrentes dans un environnement complexe utilisé pour la sélection de pilotes de ligne. Les données subjectives et relatives au diamètre pupillaire ont augmenté avec le nombre de tâches à réaliser simultanément. Ainsi, des éléments convergents confirment que la charge cognitive augmentait à chaque phase. De plus, les données comportementales nous ont permis de distinguer trois différents groupes de participants, sur la base des performances obtenues lors de la quatrième phase.

Les données électro-encéphalographiques ont mis en évidence une augmentation de la puissance associée à la bande de fréquence thêta en lien avec le nombre de tâches concurrentes. Cette augmentation a atteint un plateau pour trois tâches concurrentes, l'ajout d'une quatrième ne provoquant pas d'augmentation supplémentaire. Ce pattern se retrouve pour les deux groupes de participants obtenant les meilleures performances, mais pas pour les participants ayant obtenus les performances les plus faibles. Ce dernier groupe semble avoir atteint un plateau dès le début de l'expérience. L'augmentation observée est cohérente avec les résultats précédents retrouvés dans la littérature, suggérant un lien entre la puissance spectrale dans la bande de fréquence thêta et la demande de la tâche (*e.g.*, Klimesch, 1999

pour une revue) ou le nombre de tâches concurrentes à réaliser (Fournier, Wilson & Swain, 1999 ; Gevins & Smith, 2003 ; Holm *et al.*, 2009 ; voir aussi Borghini *et al.*, 2014 pour une revue).

Nos résultats montrent une augmentation de la puissance du rythme thêta en fonction du nombre de tâches concurrentes, ce qui n'est pas le cas de toutes les études. Par exemple, certaines études n'ont pas mis en évidence de différence entre une et deux tâches simultanées (Holm *et al.*, 2009) tandis que d'autres ont mis en évidence des différences entre une et deux ou quatre tâches concurrentes mais pas en fonction de différents niveaux de difficulté (Matthews *et al.*, 2015 ; Käthner *et al.*, 2014 ; Fournier, Wilson & Swain, 1999). En revanche, l'utilisation des seules électrodes frontales n'a pas permis de mettre en évidence de différences entre une et deux tâches concurrentes. Cette absence de résultat pourrait être expliquée par la différence de nature des quatre tâches utilisées. Elle peut aussi être expliquée par l'hypothèse selon laquelle la mémoire de travail est supportée par de grands réseaux de neurones largement distribués entre les régions frontales et pariéto-occipitales au niveau des deux hémisphères (Kahana, Seelig & Madsen, 2001 ; D'Esposito *et al.*, 1998). De plus, les résultats des deux participants du troisième groupe semblent indiquer que si des participants sont en difficulté devant la tâche, alors il est possible qu'aucune différence n'apparaisse dans la bande de fréquence thêta.

L'effet plateau observé pourrait refléter un épuisement des ressources cognitives. Aucune différence n'apparaîtrait en raison d'une absence de différence dans la mobilisation des ressources. Bien que spéculative, cette hypothèse pourrait être soutenue par les données comportementales, montrant une diminution significative des performances entre la troisième phase et la quatrième. Si l'intégralité des ressources cognitives disponibles est déjà sollicitée lors de la troisième phase, alors l'ajout d'une quatrième tâche concurrente ne devrait pas solliciter davantage de ressources cognitives et résulter en une diminution de la performance. Les participants ne seraient plus en mesure de compenser l'augmentation de la charge cognitive pour maintenir la performance à un niveau acceptable, entraînant la diminution observée (Wickens, 2002 ; 2008). Si l'on compare les différents groupes de participants, des différences apparaissent, les niveaux les plus élevés de thêta étant associés aux plus faibles performances. Le groupe réunissant les participants ayant eu des performances moyennes présentait des niveaux de thêta supérieurs à ceux du groupe présentant les meilleures performances jusqu'à la troisième phase. En revanche, aucune différence n'est apparue entre ces deux groupes durant la quatrième phase. D'un point de vue descriptif, le groupe de

participants ayant eu les moins bonnes performances présentait le niveau de thêta le plus élevé pendant toute la durée de l'expérimentation. Ce résultat est cohérent avec les résultats précédents selon lesquels la puissance du rythme thêta serait négativement corrélée avec la performance, les niveaux de thêta les plus élevés étant associés aux moins bonnes performances (Beatty & O'Hanlon, 1979 ; Beatty, 1977, voir aussi Kramer, 1990 et Klimesch, 1999 pour des revues de la littérature).

Concernant le rythme alpha, les résultats ont montré un pattern proche, bien que légèrement différent de ceux obtenus avec le rythme thêta. Ainsi, les différences entre la phase 1 et la phase 2 ne sont apparues significatives qu'en considérant les électrodes pariétales, les analyses portant sur l'intégralité du scalp ne montrant pas de différence. Cependant, l'augmentation du rythme alpha est contraire aux résultats précédents de la littérature, suggérant que l'augmentation de la charge cognitive entraîne une diminution du rythme alpha (Klimesch, 1996 ; voir Borghini *et al.*, 2014 ; Cain, 2007 et Vidulich & Tsang, 2012 pour des revues sur le sujet). L'hypothèse généralement retenue est que lorsque l'exigence attentionnelle augmente, la puissance spectrale du rythme alpha diminue, principalement au niveau des régions pariétales et centrales. Dans cette expérimentation, le nombre de tâches augmentant, la demande attentionnelle augmentait et la puissance associée au rythme alpha augmentait de même.

Bien que d'autres études aient mis en évidence une augmentation du rythme alpha avec l'augmentation de la difficulté de la tâche (Pope *et al.*, 1995 ; Kamzanova, Kustubayeva & Matthews, 2014), une autre hypothèse pourrait être formulée sur la base des travaux de Sauseng et de ses collègues (2009). Dans leur étude, le rythme alpha augmentait avec l'augmentation du nombre d'items non pertinents à inhiber. Ce résultat est cohérent avec d'autres études montrant que le rythme alpha a un effet délétère sur les traitements cognitifs (voir Foxe & Snyder, 2011 pour une revue de littérature à ce sujet). En effet, une augmentation du rythme alpha dans les régions occipito-pariétales est supposée refléter l'inhibition des traitements non pertinents. Ainsi, certaines études ont mis en évidence une diminution du rythme alpha avec l'augmentation de la demande de la tâche (Klimesch, 1997 ; Fairclough & Venables, 2006 ; Klimesch, 1999 pour une revue) ou du nombre d'items à maintenir en MdT (Fukuda, Mance & Vogel, 2015). D'autres au contraire ont mis en évidence une augmentation du rythme alpha associée à l'inhibition de traitements non pertinents (Rihs, Michel & Thut, 2007). Ces deux variations pourraient refléter deux mécanismes distincts impliqués dans la mémoire de travail. Une diminution du rythme alpha permettrait de

maintenir des éléments en MdT et les traiter en évitant leur inhibition, tandis qu'une augmentation du rythme alpha permettrait d'inhiber le traitement des items interférents (Capilla, Schoffelen, Paterson, Thut & Gross, 2014). Ainsi, en fonction de la nature de la tâche et du choix des stratégies utilisées, le rythme alpha pourrait soit augmenter, soit diminuer avec l'augmentation de la charge cognitive.

Dans l'ensemble, nos résultats indiquent que l'électro-encéphalographie permet de discriminer l'allocation des ressources cognitives, avec une augmentation largement répandue sur le scalp du rythme thêta et une augmentation plus localisée du rythme alpha. Les deux rythmes ont augmenté avec le nombre de tâches concurrentes à réaliser, jusqu'à atteindre un plateau pour trois et quatre tâches concurrentes. Ces résultats nécessitent un cadre théorique élaboré pour être expliqués et intégrés aux résultats précédents, ce qui souligne la nécessité de lier plus étroitement les études de laboratoire et les études écologiques. Ils soulignent également la nécessité de contrôler le niveau de charge manipulée et les différences interindividuelles pour établir une mesure efficace. Ces précautions prises, notre étude montre que l'électro-encéphalographie permet de caractériser différents niveaux de charge cognitive.

Partie 2 : Les « *Fixation Locked Spectral Analysis* », une mesure de la réalisation de la tâche dans une situation de multitâches.

L'expérimentation décrite dans cette partie a fait l'objet d'une communication orale lors de la conférence avec actes *HCI aero 2014*.

Introduction

Les situations d'apprentissages telles qu'elles sont envisagées par la théorie de la charge cognitive sont des situations complexes, impliquant de réaliser un grand nombre de traitements. L'effet d'attention partagée se produit lorsque l'apprenant doit diviser son focus attentionnel entre différentes sources d'informations (voir chapitre 2 ci-dessus ; voir aussi Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 pour une revue de la littérature). Les apprenants doivent alors focaliser leur attention sur une source d'information, la traiter, puis reporter leur attention sur une autre source d'information. Le partage attentionnel est donc une source de charge extrinsèque, ayant un effet délétère sur les apprentissages, particulièrement pour les apprenants novices (Kalyuga *et al.*, 2003).

L'*eye-tracking* est une technique utilisée pour déterminer l'orientation du regard dans la scène visuelle. L'hypothèse sous-jacente est que l'information perçue est l'information traitée par le système cognitif (*e.g.*, Yarbus, 1967 ; mais voir Posner, 1980). L'*eye-tracking* permet d'extraire deux catégories d'informations (voir chapitre 5) : l'analyse du parcours visuel et la mesure du diamètre pupillaire.

La première catégorie d'informations regroupe l'analyse des saccades visuelles et des fixations. Elle renseigne sur les informations perçues et donc traitées ainsi que sur les stratégies d'exploration visuelle employées. Plus précisément, ces stratégies d'exploration sont décrites en termes de durées de fixations et de leurs répartitions dans la scène visuelle, d'amplitude des saccades et de leur vitesse. Ces paramètres varient avec les types de traitements réalisés. Plus la fixation dure longtemps et plus les traitements engagés sont profonds. À l'inverse, des fixations plus brèves indiquent des traitements superficiels (Velichkovsky *et al.*, 2002 ; 2005 ; Hale *et al.*, 2008).

La seconde catégorie d'informations regroupe les mesures du diamètre pupillaire et de ses variations. Ces mesures sont réputées refléter l'arousal général de l'organisme ainsi que d'autres facteurs non cognitifs, tels que l'intensité lumineuse (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000). La mesure du diamètre pupillaire peut être utilisée soit à l'aide d'indices directs, le diamètre pupillaire moyen (Paubel, Averty & Raufaste, 2010), soit à l'aide d'indices plus

complexes, tels que l'indice d'activité cognitive (Marshall, 2002). La principale limite de l'*eye-tracking* s'il permet de savoir quelle information est perçue (et donc traitée) il ne permet pas de décrire l'activité cérébrale associée aux traitements cognitifs de cette tâche. Cette information est fournie par l'électro-encéphalographie.

L'électro-encéphalographie permet d'utiliser deux types de mesures également, les potentiels évoqués et l'analyse des rythmes. Les potentiels évoqués (PE) sont une technique consistant à répéter une même stimulation tout en enregistrant l'activité cérébrale. En calculant la moyenne du signal enregistré immédiatement après la stimulation entre tous les essais, il devient possible d'étudier l'activité électrique correspondant au traitement de cette stimulation. Le bruit électrique généré par toutes les activités cérébrales co-occurentes rend toutefois nécessaire l'utilisation d'un grand nombre de répétitions de la même stimulation (*e.g.*, entre 30 et 50 répétitions au minimum), ce qui constitue une des limites majeures des PE. La moyenne des signaux permet de réduire le bruit mesuré (ce dernier pouvant être considéré comme aléatoire), il faut donc que le nombre de répétitions soit suffisamment grand pour rendre ce bruit négligeable, ce qui limite la portée écologique des études en potentiels évoqués. Un grand nombre d'études les utilise néanmoins, notamment dans le cadre de l'étude de la charge cognitive, la composante la plus utilisée étant la composante P300 (voir Cain, 2007 ; Borghini *et al.*, 2014 pour des revues de la littérature).

L'étude des rythmes générés par l'activité cérébrale a fourni des informations sur l'utilisation des ressources cognitives (voir la partie 1 de ce chapitre). Cette partie s'est focalisée sur les rythmes thêta (4-8 Hz), alpha (8-12 Hz) et beta (13-30 Hz), réputés caractéristiques de l'utilisation des ressources cognitives (Klimesch, 1999). Le rythme thêta est réputé augmenter lors d'une tâche cognitive et le rythme alpha diminuer (voir chapitre 5 et partie 1 du présent chapitre) dans un certain nombre de tâches (voir Holm, 2010 pour une revue) telles que la localisation de cibles (Yamada, 1998), la sollicitation de la mémoire de travail (Gevins *et al.*, 1998), les situations de multitâches (Fournier, Wilson & Swain, 1999 ; Holm *et al.*, 2009) ou encore lors de simulations de vol (Smith *et al.*, 2001). Le rythme beta est décrit comme variant avec la demande de la tâche, mais selon un pattern spécifique à chaque tâche (Harmony *et al.*, 1996).

L'électro-encéphalographie fournit des informations précises sur le déroulement temporel des traitements cérébraux (de l'ordre de la milliseconde) et, bien que moins précisément, sur la localisation cérébrale de ces traitements (avec une précision de l'ordre du centimètre).

Cependant, l'EEG ne permet pas de connaître la nature de l'information qui est traitée à un instant donné. Au contraire, l'*eye-tracker* permet de déterminer quelle information est traitée et quelle stratégie d'exploration visuelle est utilisée. Les deux techniques bénéficient de la même résolution temporelle (de l'ordre de la milliseconde). Elles sont donc régulièrement utilisées pour étudier la dynamique temporelle des processus cognitifs. « Au cours des dernières années, il a été montré que la combinaison de l'*eye-tracking* et de l'EEG était méthodologiquement faisable » (Kretzschmar *et al.*, 2013). Une telle combinaison de mesures a donc été largement utilisée dans différents champs de la psychologie, comme la lecture (Kretzschmar *et al.*, 2013) ou l'étude de la charge cognitive (Fournier, Wilson & Swain, 1999 ; Ryu & Myung, 2005). La majorité des études utilise différentes mesures et cherche le meilleur indicateur du niveau de charge cognitive (Fournier, Wilson & Swain, 1999 ; Holm *et al.*, 2009 ; Matthews *et al.*, 2015) tandis que d'autres tentent d'agréger ces mesures en un score composite (*e.g.*, Ryu & Myung, 2005).

Une autre approche serait de coupler les différentes mesures, c'est-à-dire d'utiliser l'information fournie par une mesure pour enrichir l'information fournie par une autre (Baccino & Manunta, 2005 ; Sereno & Rayner, 2003). Par exemple, il s'agit d'utiliser l'information fournie par l'*eye-tracking* pour segmenter le signal EEG. C'est le cas des « *Fixation Locked Event Related Potentials* » (FLERP, Hale *et al.*, 2008) aussi appelés « *Eye Fixation Related Potentials* » (EFRP, Graupner, Pannasch & Velichkovsky, 2011). Dans cette technique, l'*eye-tracking* sert à détecter le début des fixations et à créer une condition d'analyse du signal EEG. Ainsi, la moyenne des enregistrements des signaux EEG autour du début des fixations peut être calculée pour étudier les traitements liés à la lecture. Cette technique permet d'utiliser des potentiels évoqués dans des situations plus écologiques que lors d'études « classiques », en évitant les répétitions statiques de stimuli similaires. Les stimuli peuvent être présentés dans des scènes dynamiques, évitant par exemple les situations non-naturelles de lecture mot par mot (Diaz, Sajda, Dmochowski & Parra, 2013 ; Dimigen, Kliegl & Sommer, 2012).

En revanche, ce genre de technique n'avait encore jamais été utilisé pour étudier les variations des rythmes EEG en fonction de l'exploration de la scène visuelle (mais voir Metzner *et al.*, 2015). Par analogie, cette technique sera désignée sous le terme de « *Fixation Locked Spectral Analysis* » (FLSA) par la suite. De la même manière que les FLERP, cette technique consiste à utiliser les informations fournies par l'*eye-tracking* pour permettre une analyse plus fine des informations fournies par l'EEG. Ainsi, les FLSA permettent d'isoler les périodes temporelles

les plus pertinentes du signal EEG et étudier ces périodes séparément, réduisant le bruit produit par les traitements parallèles.

L'EEG permet d'étudier l'activité cérébrale dans un environnement de multitâches. Cependant, cette technique seule ne permet pas de distinguer les traitements propres aux différentes sous-tâches. L'activité cérébrale liée à chacune des différentes tâches concurrentes est mélangée. L'utilisation de l'*eye-tracking* pour renseigner le signal EEG pourrait permettre de distinguer les traitements propres à chaque sous-tâche dans une situation de multitâche. L'objectif de cette étude était donc de tester la faisabilité des FLSA, en utilisant les informations fournies par l'*eye-tracking* pour segmenter le signal EEG et ainsi extraire des informations sur les traitements de chaque sous-tâche lors d'une situation de multitâches. Cette technique pourrait permettre d'étudier plus précisément les situations d'attention partagée et les traitements cognitifs à l'œuvre lors du traitement de ces situations. Nous avons donc fait l'hypothèse que l'information fournie par l'*eye-tracking* pourrait améliorer l'information fournie par l'EEG seulement en permettant de distinguer l'activité cérébrale associée au traitement de chaque sous-tâche isolément.

Méthodologie

Participants et matériel

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont issues du protocole expérimental présenté dans la partie 1 de ce chapitre. Les participants et le matériel sont décrits dans la section méthodologie de l'expérimentation précédente. Les traitements réalisés dans cette études ont porté sur 16 électrodes (F3 / Af3 F4 / Af4 / Fc1 / C3 Fc2 / C4 / Cp1 / P3 Cp2 / P4 / Po3 / O1 Po4 / O2) pour définir quatre régions (frontale, centrale, pariétale et occipitale) et deux hémisphères (droit et gauche).

Protocole

Les participants réalisaient d'abord les trois premières phases décrites dans la partie 1, comportant d'une à trois tâches concurrentes. Ensuite ils réalisaient trois phases de 4 mn comportant les quatre tâches décrites et dont les données ont été analysées dans cette partie : une tâche de supervision de jauges (A), une tâche de poursuite (B), une tâche de barrage de lettres (C) et une tâche de calcul mental (D).

La 5^{ème} phase comportait les mêmes sous-tâches, auxquelles était ajoutée une exigence métacognitive supplémentaire, des priorités à accorder aux différentes sous-tâches. Enfin, la

6^{ème} phase était similaire à la 4^{ème}, sans contrainte métacognitive. Durant la 5^{ème} phase, les participants devaient réaliser les tâches C (barrage de lettre) et D (calcul mental) prioritairement. Pour renforcer cette contrainte, les tâches étaient assorties d'un coefficient de pondération utilisé pour le calcul du score global. Les tâches A (supervision de jauges) et B (poursuite) avaient un coefficient de 10 % tandis que les tâches prioritaires avaient un coefficient de 40 %. Durant les phases 4 et 6, les sous-tâches avaient le même coefficient de pondération (25%). Seule la phase 4 était précédée d'une période d'entraînement (1 mn).

Traitement du signal

La première étape du traitement du signal était de définir quatre aires d'intérêt (AOI) en fonction des parties de l'écran utilisées par les quatre sous-tâches. Ensuite, l'enregistrement de l'activité visuelle nous a permis de définir à quel moment le participant commençait à traiter une tâche (*i.e.* quand son regard se posait sur l'AOI définie). De la même manière, nous avons pu définir à quel moment le participant arrêta de traiter la tâche, c'est-à-dire quand son regard sortait de l'AOI. Nous avons utilisé un critère arbitraire de 2 secondes pour définir des phases d'engagement sur la base des travaux de Velichkovski et collègues (2005). Lorsque le participant passait plus de 2 secondes sans changer de tâche, cette période était considérée comme une période d'intérêt, les périodes de moins de deux secondes étant supposées ne pas refléter de traitements profonds. Nous avons ainsi pu créer des marqueurs de début et de fin de traitement pour chaque tâche.

Nous avons ensuite utilisé les marqueurs de l'étape précédente pour segmenter le signal électro-encéphalographique, comme représenté dans la Figure 14. Le signal EEG qui en résultait représentait donc l'activité cérébrale enregistrée pendant la réalisation de chaque sous-tâche individuellement.

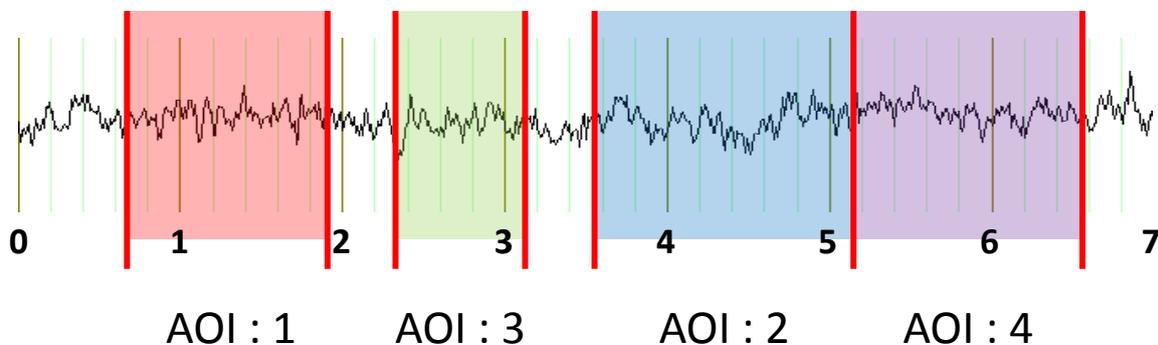


Figure 14. Illustration de la segmentation du signal lors des "Fixation Locked Spectral Analysis"

Le signal EEG a été segmenté selon les marqueurs renseignant la sous-tâche. Les périodes d'une durée inférieure à 2s et les fixations hors AOI n'ont pas été considérées.

Les segments de données EEG ont ensuite fait l'objet d'une transformée de Fourier rapide (F.F.T.) et ont été moyennés pour chaque tâche et pour chaque phase. Le résultat de cette opération a consisté en une valeur d'activité pour chaque tâche lors des différentes phases expérimentales. Nous avons ensuite sélectionné 16 électrodes permettant de définir deux latéralités (gauche et droite) et quatre régions cérébrales (frontale, centrale, pariétale et occipitale) comme illustré par le tableau 1.

Région cérébrale	Latéralité	
	Hémisphère gauche	Hémisphère droit
1. Frontale	F3 / Af3	F4 / Af4
2. Centrale	Fc1 / C3	Fc2 / C4
3. Pariétale	Cp1 / P3	Cp2 / P4
4. Occipitale	Po3 / O1	Po4 / O2

Tableau 1. Répartition des 16 électrodes sélectionnées. Ces électrodes ont permis d'analyser les données en fonction de 4 régions cérébrales pour les deux hémisphères

Ces valeurs ont ensuite été transformées en logarithme (\log_{10}) pour respecter la normalité des distributions. Nous avons considéré comme des valeurs extrêmes les valeurs distantes de la moyenne de plus de 3 écart-types et les avons remplacées par la moyenne plus (ou moins) trois écart-types.

Variables dépendantes et analyses statistiques

Les variables dépendantes de cette étude sont les données relatives à l'activité cérébrale pour chaque sous-tâche, exprimées en microvolts carrés, transformées pour respecter la normalité des distributions. Nous avons ensuite réalisé une ANOVA à mesures répétées selon le plan suivant : Rythme₍₃₎ x Phase₍₃₎ x Région₍₄₎ x Tâche₍₂₎ x Latéralité₍₂₎, en utilisant une correction de Bonferroni pour les tests post-hoc. L'hypothèse de cette étude étant que le couplage des données de l'*eye-tracking* et de celles de l'EEG pouvant augmenter l'information fournie par l'EEG, la variable indépendante d'intérêt principale de cette étude est donc le facteur « Tâche ».

Résultats

Différences liées au facteur « tâche »

Des différences apparaissent en fonction des tâches réalisées, $F_{(3,57)}=17.1$, $p<.001$. Plus précisément, le test post-hoc montre que la tâche de poursuite (B) génère une activité supérieure à celle générée par les autres tâches (toutes les valeurs de $p<.02$). Toutefois, la tâche de poursuite n'explique pas la totalité des variations observées, puisque la tâche de barrage (C) génère également une activité supérieure à celle générée par la tâche de supervision des jauges (A), $p=.005$.

Le facteur « Tâche » interagit avec le facteur « rythme », $F_{(6,114)}=14.191$, $p<.001$. Comme représenté sur la Figure 15, cette interaction est essentiellement due au rythme thêta qui ne suit pas le même pattern que les autres rythmes pour les tâches de barrage de lettres (sous-tâche C) et de calcul mental (sous-tâche D).

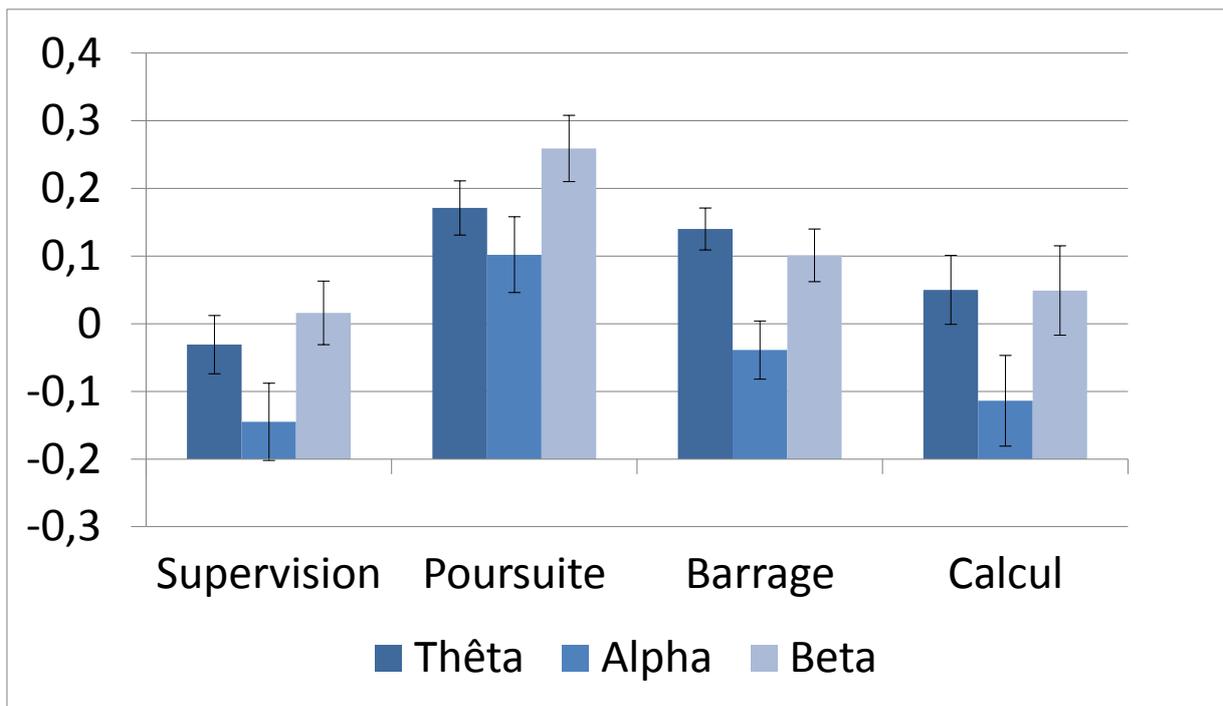


Figure 15. Interaction entre les facteurs "rythme" et "tâche" lors de l'expérimentation 1

Le rythme thêta semble principalement responsable de cette interaction, ne suivant pas les mêmes variations que les autres rythmes pour les tâches de barrage de lettres et de calcul mental. Les niveaux représentés dans ce graphique correspondent aux logarithmes des valeurs mesurées en microvolts carrés.

L'interaction entre les facteurs « Région » et « Tâche » s'est également révélée significative, $F_{(9, 171)}=12.5$, $p<.001$. Cette interaction est représentée dans la Figure 16. Elle semble essentiellement due à la tâche de supervision des jauges (A), pour laquelle la région frontale ne semble pas générer la même activité électrique que les autres. Par exemple, lors de la supervision, la région frontale ne génère pas une activité significativement supérieure à celle de la région occipitale ($p>.99$), ce qui est le cas des trois autres sous-tâches (toutes les valeurs de $p<.001$). De plus, lorsque l'on compare les tâches de supervision (A) et de calcul mental (D) sur une région cérébrale donnée, il apparaît que les deux sous-tâches ne peuvent pas être différenciées (valeurs de $p>.05$) sauf au niveau de la région frontale. La tâche de supervision génère alors une activité plus faible que la tâche de calcul mental ($p<.001$).

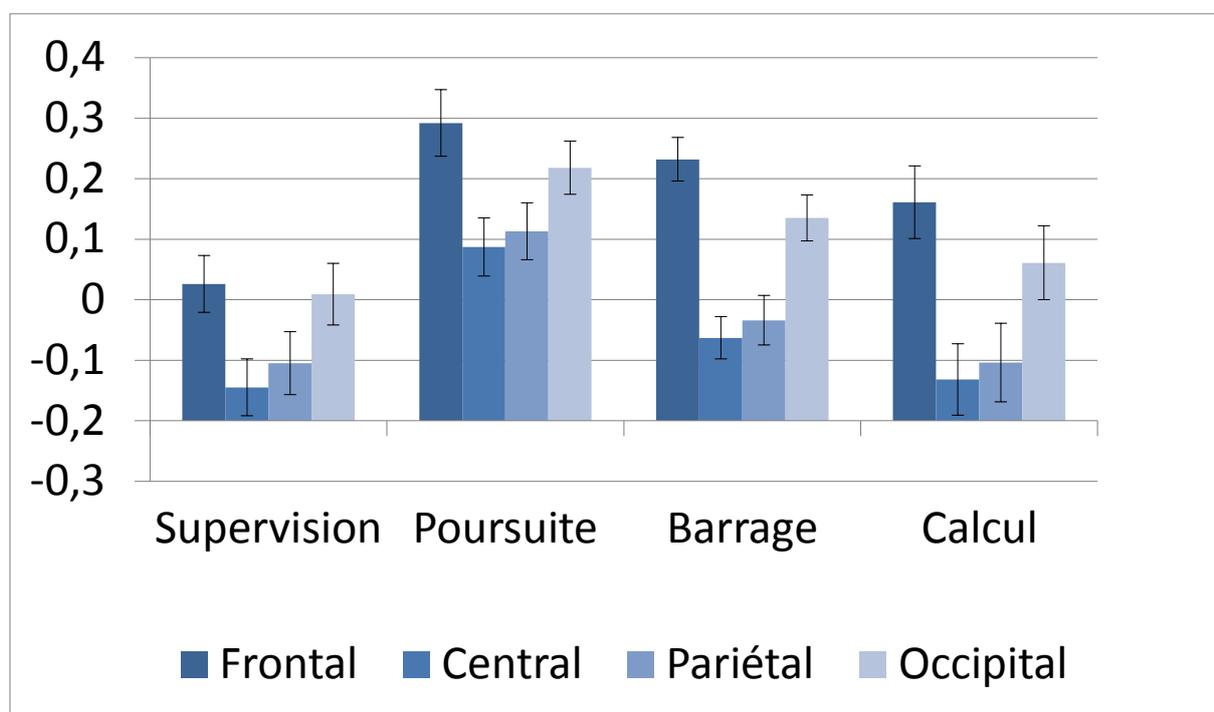


Figure 16. Interaction entre les facteurs "région" et "tâche" lors de l'expérimentation 1

Les valeurs représentées sur ce graphique et le précédent correspondent aux logarithmes des valeurs mesurées.

L'interaction entre les facteurs « tâche » et « latéralité » est également significative, comme le montre la Figure 17. Toutefois, cette interaction est relativement faible, $F_{(3,57)}=3.2$, $p=.03$. L'hémisphère droit génère plus d'activité que le gauche, mais cette différence est supérieure lorsque l'on considère les tâches de barrage de lettres (C) et de calcul mental (D) que lorsque l'on considère les tâches de supervision de jauges (A) et de poursuite (B).

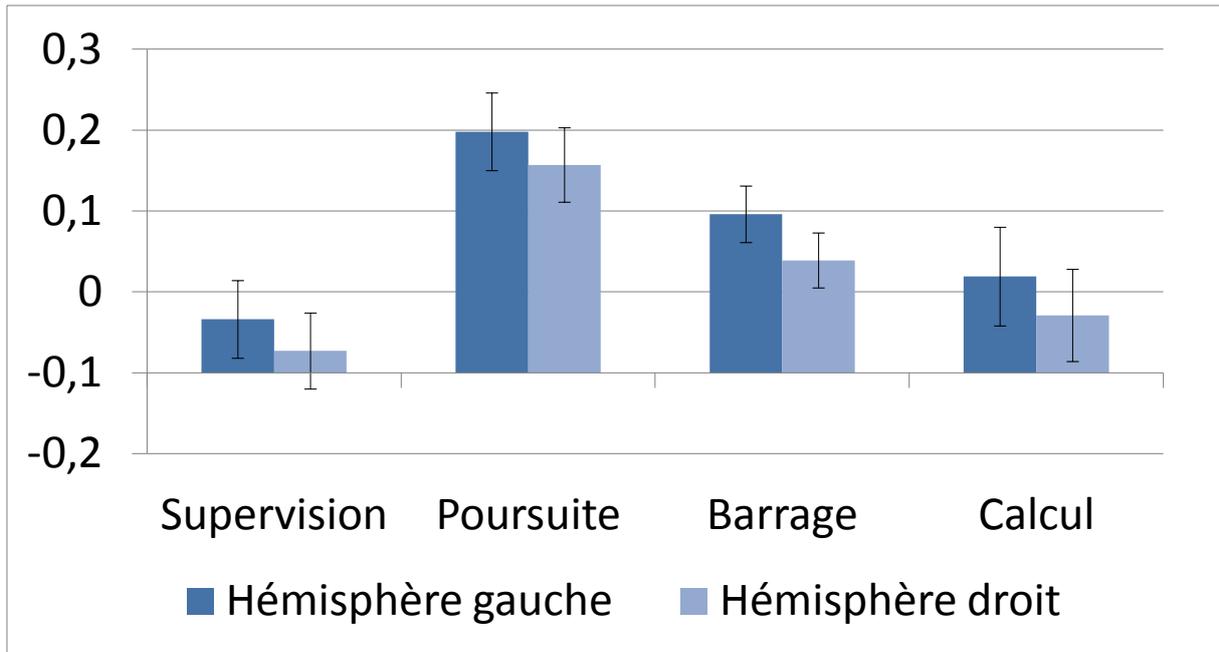


Figure 17. Interaction entre les facteurs "latéralité" et "tâche" lors de l'expérimentation 1

Dans cette illustration de l'interaction entre les facteurs « latéralité » (hémisphère gauche et droit) et « tâche », les valeurs représentées correspondent aux logarithmes des valeurs mesurées.

Enfin, l'interaction triple entre les facteurs « tâche », « rythme » et « région » est également apparue significative, $F_{(18,342)}=12.115$, $p<.001$. Cette interaction, représentée par la Figure 18, semble essentiellement liée aux variations du rythme thêta et dans une moindre mesure à celles du rythme alpha.

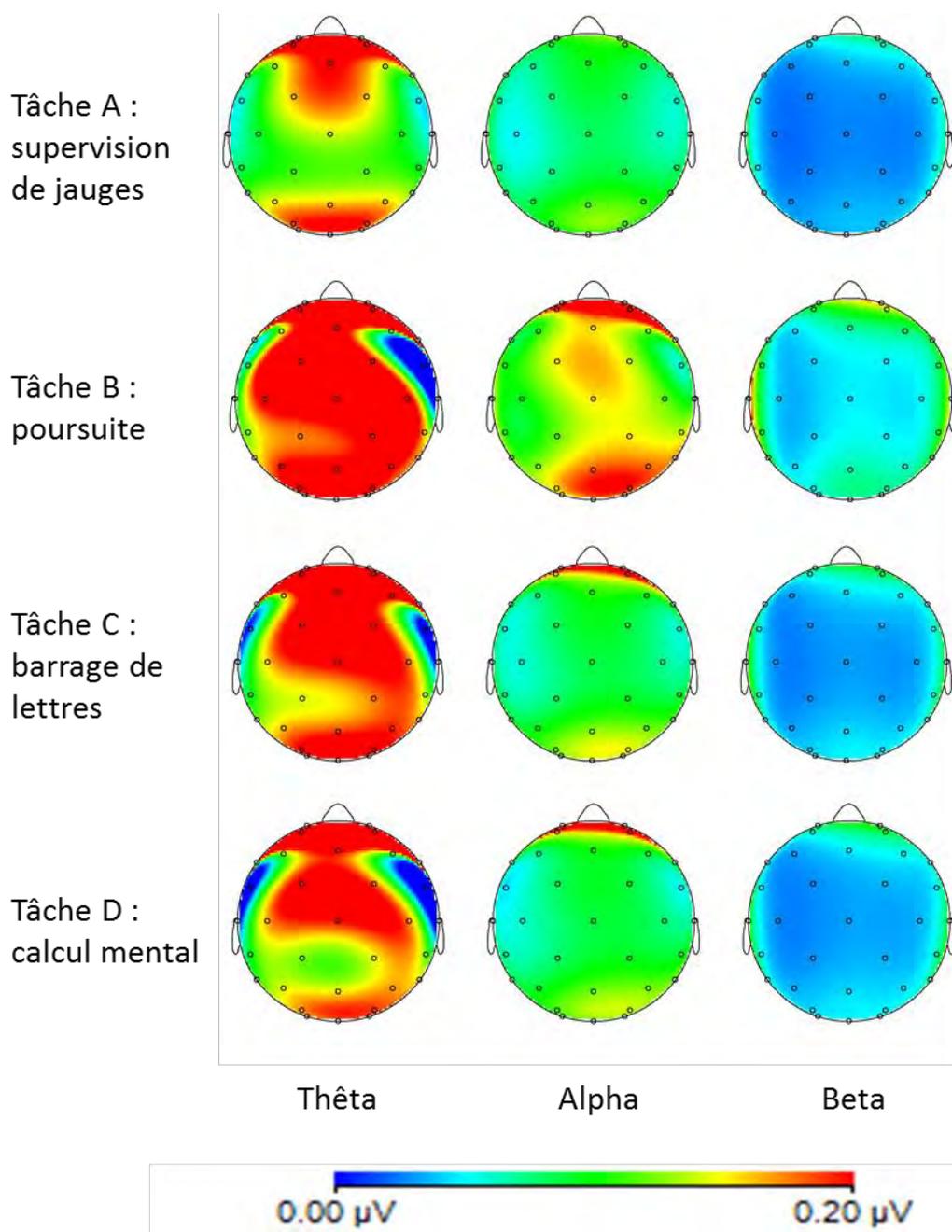


Figure 18. Activité électro-encéphalographique en fonction de la tâche réalisée dans l'expérimentation 1

Autres effets

Rythme. Les trois différents rythmes génèrent une activité différente, $F_{(2,38)}=20.6$, $p<.001$. Cet effet semble essentiellement dû à la bande de fréquence alpha, dont l'activité est significativement plus faible que celle des deux autres (les deux valeurs de $p<.001$) tandis que l'activité générée dans les bandes de fréquences thêta et beta ne peut pas être distinguée.

Région. Il y a un effet significatif de la région cérébrale considérée, $F_{(3,57)}=50.6$, $p<.001$. L'activité la plus élevée correspond à la région frontale (comparaison post-hoc avec les régions centrales et pariétales, $p<.001$ et $p=.012$ lors de la comparaison avec la région

occipitale). La région occipitale présente également une activité plus élevée que les régions centrales et pariétales ($p < .001$ dans les deux cas). Enfin, les régions pariétales et centrales ne se distinguent pas l'une de l'autre.

Phase. Aucun effet de la phase n'est significatif. Les puissances spectrales associées aux différents rythmes pour chacune des tâches sont similaires quelle que soit la phase.

Discussion

Le but principal de cette expérimentation était d'étudier une méthodologie pour segmenter le signal EEG en fonction de la tâche réalisée dans un environnement de multitâches. Dans l'ensemble, nos résultats confirment la faisabilité de cette technique, que nous proposons d'appeler « *Fixation Locked Spectral Analysis* ». Les trois bandes de fréquences étudiées ont présenté des variations sur l'ensemble du scalp dépendant de la tâche en cours de réalisation.

Une des limites principales de cette méthodologie demeure la difficulté d'interprétation des variations observées, spécialement lorsqu'elles sont inattendues. Dans cette étude, nous avons essentiellement tenté de déterminer la faisabilité de cette méthodologie. Par exemple, dans cette étude, le rythme alpha augmente lors de la réalisation de la tâche de poursuite par rapport aux autres sous-tâches. Selon la littérature, cela pourrait refléter le fait que la tâche de poursuite est moins coûteuse en ressources cognitives que les autres tâches (Klimesch, 1999), puisqu'une diminution du rythme alpha est classiquement associée à une augmentation de la difficulté. Cependant, dans le même temps, la puissance associée au rythme beta a également augmenté. Le rythme beta est classiquement associé aux états d'éveil et d'activité (Zhao *et al.*, 2012). Ainsi, l'augmentation des deux rythmes alpha et beta lors de la réalisation de la tâche de poursuite semble contradictoire. Il est possible de considérer l'hypothèse d'un artefact de mesure augmentant l'activité globale mesurée dans toutes les bandes de fréquences. Cependant, il est plus difficile d'envisager un artefact venant affecter la réalisation d'une seule des sous-tâches sans affecter les autres. Par exemple, si l'utilisation du joystick devait affecter la tâche de poursuite, elle aurait également affecté la tâche de supervision. De plus, même si les variations observées lors de la tâche de poursuite s'expliquaient par un artefact, cela n'expliquerait pas les autres variations observées. Par exemple un artefact n'expliquerait pas le fait que le rythme thêta augmente lors de la réalisation des tâches de barrage de lettres et de calcul ou la diminution de l'activité enregistrée dans les régions frontales lors de la réalisation de la tâche de supervision.

Une autre limite majeure de cette étude peut provenir de la taille des fenêtres utilisées pour la transformée de Fourier rapide. Selon la taille temporelle de la fenêtre utilisée, il est possible que la FFT présente des résultats variant dans un sens ou dans un autre. Lorsque les segments sont très courts (*i.e.* moins de 2 secondes) il est même possible que les variations observées présentent un pattern inverse à celui obtenu sur les mêmes données avec des fenêtres plus longues. Ici, nous n'avons pas contrôlé la taille des fenêtres, même si nous avons rejeté tous les segments d'une durée inférieure à deux secondes. Actuellement, la littérature sur les rythmes EEG ne suit aucune convention sur la taille de ces fenêtres, certaines études utilisant des fenêtres de deux secondes (Gevins *et al.*, 1997 ; Gevins & Smith, 2000 ; Wascher *et al.*, 2014) tandis que d'autres études utilisent des segments de plusieurs minutes (Brookings, Wilson & Swain, 1996 ; Natani & Gomer, 1981).

Nonobstant, la possibilité de segmenter les données EEG en fonction de la tâche réalisée dans une situation multitâche peut renseigner les chercheurs lors d'études portant sur des tâches complexes. Il semble évident que l'utilisation des FLSA est limitée aux situations dans lesquelles l'information fournie sollicite la modalité visuelle, ce qui n'est pas le cas de toutes les situations de multitâches, comme par exemple lors de l'effet de modalité (voir chapitre 2). Dans ce cas, l'apprenant doit traiter des informations présentées simultanément selon les modalités visuelles et auditives. Le fait de devoir réaliser des traitements sur deux sources d'informations concurrentes constitue une situation de multitâche. Dans ce cas, le traitement des informations auditives ne peut pas être distingué des autres traitements sur la base des mouvements oculaires. Cependant, la limite majeure rencontrée dans les situations de multitâches était de pouvoir distinguer les différentes activités réalisées par les participants. Les FLSA constituent un outil et un premier pas dans cette direction.

Dans cette expérimentation, nous avons montré qu'il est possible de segmenter le signal EEG sur la base des données de l'*eye-tracking*, de manière à améliorer le rapport signal sur bruit. Sans les informations fournies par l'*eye-tracking*, il serait impossible de distinguer les différents processus cognitifs mis en jeu lors de la réalisation d'activités multitâches. Ces processus permettant la réalisation de chaque sous-tâche isolément sont spécifiques à chaque sous-tâche et ne devraient pas être confondus avec la réalisation des autres sous-tâches (*e.g.*, Salvucci & Taatgen, 2010). Ainsi, coupler les outils de mesures que sont l'*eye-tracking* et l'électro-encéphalographie offre de nouvelles perspectives pour l'étude de situations de multitâches telles que l'on peut en rencontrer dans les situations d'apprentissages.

Discussion générale

L'objectif de cette étude était de déterminer si l'EEG pouvait permettre de mesurer la sollicitation de la mémoire de travail et de l'attention lors de la réalisation d'une tâche. La théorie de la charge cognitive s'appuie notamment sur le modèle de Baddeley (1986) pour décrire les ressources cognitives utilisées lors d'apprentissages. Cependant, elle ne permet pas une mesure dynamique de ces ressources lors des phases d'apprentissages.

En cela, l'électro-encéphalographie est un bon moyen d'obtenir des informations sur la sollicitation des ressources cognitives lors de la réalisation d'une tâche. L'expérimentation 1 montre que l'EEG permet de dériver une mesure sensible de la sollicitation des ressources cognitives au cours d'une tâche. Les deux rythmes considérés, thêta et alpha, se sont avérés sensibles au nombre de tâches à réaliser simultanément et ont permis de discriminer différents groupes de participants sur la base de leur performance lors de la réalisation de la tâche expérimentale.

Dans cette étude, l'EEG nous a permis d'obtenir une mesure de la charge cognitive sur des périodes de quelques minutes pendant lesquelles nous avons manipulé le nombre de tâches concurrentes. Pour obtenir une mesure dynamique plus précise de la charge, il serait intéressant d'analyser les variations EEG lors de la réalisation des phases de cette tâche. Pour cela, nous pourrions envisager de découper le signal en périodes de quelques secondes. La tâche expérimentale présentant un caractère cyclique, les différentes tâches concurrentes étant renouvelées toutes les 15 secondes, il serait possible de segmenter chacune de ces phases en périodes, moyennées sur toute la durée de la. Ainsi, il serait possible de statuer sur la possibilité de dériver une mesure dynamique de la charge cognitive lors de la réalisation d'une telle tâche complexe. Néanmoins, l'électro-encéphalographie nous a permis de distinguer les différents niveaux de charges induits lors de phases de quelques minutes différant par le nombre de tâches concurrentes.

Cet outil permet également de tenir compte de variations en fonction de la tâche réalisée dans une situation de multitâches. Le développement de la technique des « *Fixation Locked Spectral Analysis* » nous a permis de discriminer l'utilisation des ressources cognitives lors de la réalisation des différentes sous-tâches dans une situation complexe de multitâches. Cette technique nous a également permis de distinguer des variations de l'activité cérébrale en fonction des différentes priorités accordées à chaque sous-tâche. L'hétérogénéité des mesures, en fonction de la tâche réalisée dans une situation de multitâches, est un argument permettant

d'expliquer, au moins en partie, la grande diversité des résultats obtenus dans le cadre de la mesure électro-encéphalographique de la charge cognitive.

Cette première étude s'est focalisée sur une situation écologique, complexe et dynamique. Dans ce protocole, il est impossible de quantifier la part des ressources attentionnelles et de l'empan en mémoire de travail des participants nécessaire pour réaliser la tâche. De la même manière, il est difficile de caractériser la demande de chaque tâche isolément. Néanmoins, dans une situation bruitée par toutes ces contraintes, l'électro-encéphalographie semble un bon moyen de mesurer des variations dans la charge cognitive en fonction du nombre de tâches concurrentes et en fonction de la tâche réalisée dans un environnement de multitâches. Les apprentissages complexes présentent des caractéristiques en termes de complexité et de caractère dynamique, souvent observées dans les situations de multitâches, nécessitant différentes ressources cognitives de la part des apprenants.

Cette technique, déjà suggérée par plusieurs auteurs de la théorie de la charge cognitive (*e.g.*, Paas *et al.*, 2003), semble un outil de choix pour prendre en compte les variations dynamiques de la charge cognitive lors de situations d'apprentissages.

Chapitre 8 Utiliser le modèle TBRS dans le cadre de la CLT

La première partie expérimentale a montré qu'il est possible de mesurer des variations dynamiques de la charge cognitive durant la réalisation d'une tâche. La seconde partie s'intéresse à la seconde limite de la théorie de la charge cognitive soulignée : sa limite théorique. Pour expliquer certains résultats empiriques, tels que l'effet *de l'information transitoire*, la CLT doit prendre en considération les variations de l'utilisation des ressources cognitives au cours du temps. Pour cela, nous proposons d'utiliser un nouveau modèle de la mémoire de travail, le modèle TBRS (Time Based Resource Sharing).

Cependant, en tant que modèle de la MdT, le modèle TBRS n'a jamais été utilisé, à notre connaissance, pour décrire le maintien d'informations porteuses de sens. En effet, une des principales limites des études mesurant l'empan mnésique réside dans l'utilisation d'items pouvant être regroupés sous forme de *chunks*, augmentant artificiellement l'empan (Cowan, 2001). Ainsi, pour établir une mesure plus précise de l'empan mnésique, Cowan (2001) conseille d'utiliser des items dont l'association ne porte pas de sens (des items « non chunkables » si ce mot existait). Cette précaution méthodologique a conduit à ramener l'estimation de l'empan mnésique de 7 plus ou moins 2 éléments (Miller, 1956) à 4 plus ou moins 1 éléments (Cowan, 2001).

Cette précaution méthodologique, nécessaire pour estimer la quantité d'information qu'un participant peut maintenir en mémoire de travail, constitue une limite lorsque l'on s'intéresse aux apprentissages. En effet, dans le cadre de la CLT, toutes les informations maintenues en MdT sont susceptibles de faire sens et peuvent être regroupées sous la forme de *chunks*. De ce point de vue, même si le modèle TBRS a déjà utilisé des items signifiants dans le cadre de tâches interférentes (*e.g.*, Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004), il n'a pas utilisé de tels items en tant qu'éléments à maintenir.

Le regroupement d'informations en *chunks* de plus haut niveau est supposé exiger de l'attention (voir Cowan, 2014 pour une discussion). Cette dépense attentionnelle pourrait avoir un effet considérable sur le maintien et le traitement des informations tels qu'ils sont prédits par le modèle TBRS. D'un autre côté, en réduisant la quantité d'éléments à maintenir actifs en MdT, regrouper des informations sous la forme de *chunks* permet d'augmenter la quantité objective d'informations maintenues en MdT (Miller, 1956). Par ailleurs, ce regroupement des informations en *chunks* est affecté par l'expertise (voir le chapitre 4).

Ainsi, le niveau d'expertise devrait avoir un effet sur l'utilisation de l'attention telle qu'elle est prédite par le modèle TBRS. L'expertise permet de réaliser des *chunks* porteurs de davantage d'informations et plus rapidement (Ericsson, 2006 ; Chi Glaser & Farr, 1988 pour des revues). De plus, avec l'expertise, les traitements couramment réalisés dans le cadre du domaine d'expertise sont plus automatisés, demandant moins d'attention et sont exécutés plus rapidement, tout en produisant moins d'erreurs (voir chapitre 4). Cependant, suivant les recommandations de Cowan (2001), le modèle TBRS ne prend pas en compte l'expertise.

Selon la théorie de la charge cognitive, l'expertise est liée au renversement de nombreux effets empiriques (Kalyuga *et al.*, 2003 ; Kalyuga, 2007 pour revues). Ces effets permettent d'améliorer l'apprentissage pour des participants novices et n'ont pas d'effet ou ont des effets contraires pour des participants experts. Ce renversement lié à l'expertise peut se comprendre dans le cadre plus général de l'interactivité des éléments (Chen, Kalyuga & Sweller, 2016). Une interactivité élevée est un préalable nécessaire à la majorité des effets de la CLT (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 pour une revue). L'expertise, en permettant des *chunks* porteurs de plus d'informations et une automatisation des procédures, permettrait de réduire l'interactivité des éléments d'un problème. En effet, si tous les éléments d'un problème sont réunis dans un seul *chunk*, il semble improbable que le fait de maintenir les différents éléments du problème, et leurs liens, sature la mémoire de travail. L'interactivité des éléments étant liée à la charge intrinsèque et à la charge extrinsèque, l'expertise permet de réduire la charge intrinsèque du problème et la charge extrinsèque.

Dans une série de quatre expérimentations, cette partie va vérifier que les prédictions permises par le modèle TBRS fonctionnent également avec du matériel signifiant, c'est-à-dire des items que l'on peut regrouper sous la forme de *chunks*. Ces études ont consisté à reproduire un protocole expérimental classique du modèle TBRS en remplaçant des items dont le regroupement n'est pas porteur de sens, donc ne pouvant pas être regroupés en *chunks*, par des items pouvant être regroupés en *chunks*. En manipulant le ratio entre le temps disponible pour réaliser la tâche et le temps nécessaire pour traiter les tâches de distraction, nous avons testé différentes hypothèses du modèle TBRS. L'expertise pouvant affecter la quantité d'information à maintenir en MdT, le niveau d'expertise des participants a également été contrôlé.

Expérimentation 2

Introduction

La première de ces quatre expérimentations a consisté en une réplique de l'expérience de Portrat, Camos et Barrouillet (2009, leur expérimentation 1). Dans cette expérimentation, les auteurs ont testé l'utilisation du modèle TBRS auprès d'enfants âgés de dix ans. En effet, certains travaux ont mis en évidence un fonctionnement différent de la mémoire de travail entre les enfants et les adultes. Selon les études du modèle TBRS, la MdT chez les enfants âgés de 7 ans et les adultes fonctionne selon un principe similaire. Les principales différences observées seraient liées à la différence d'efficacité des processus de rafraîchissement et à la vitesse de traitement (Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard & Camos, 2009).

Selon le modèle TBRS, ces différences d'efficacité du processus de rafraîchissement et de la vitesse de traitement ont un effet direct sur l'empan mnésique. En effet, selon le modèle, la ressource cognitive unique servant à tous les traitements cognitifs est l'attention. Rafraîchir des éléments maintenus en mémoire de travail ou réaliser une tâche interférente nécessite de l'attention. Or le focus attentionnel ne peut s'appliquer que sur un seul élément à la fois, chaque traitement devant être réalisé indépendamment des autres. Les traitements sont donc réalisés de manière séquentielle, les uns après les autres. Ce qui permet de réaliser différentes choses simultanément est une alternance rapide du focus attentionnel. L'impression de traiter des informations en parallèle ne serait donc qu'une illusion, ces traitements étant en réalité strictement sériels.

Ainsi, puisque le focus attentionnel ne peut être déployé que sur un seul traitement à la fois, le temps consacré à réaliser une tâche interférente ne peut pas être consacré à rafraîchir un élément maintenu en MdT. Ces éléments sont considérés comme des traces mnésiques, des représentations créées en mémoire de travail et caractérisées par un niveau d'activation. Ce niveau d'activation décroît rapidement au cours du temps, à moins de rafraîchir les traces grâce au focus attentionnel. Plus le focus attentionnel est sollicité par une tâche interférente pendant une longue durée, plus l'activation des traces mnésiques diminue. Lorsque l'activation des traces mnésiques diminue trop, l'élément maintenu est oublié.

Il en découle que plus la vitesse de traitement est élevée, et plus le focus attentionnel est rapidement libéré pour d'autres tâches, telles que le rafraîchissement des éléments maintenus en mémoire de travail. De la même manière, plus les mécanismes de rafraîchissement sont efficaces, moins les éléments maintenus en mémoire de travail seront sensibles à l'oubli. C'est

par exemple le cas du calcul mental. Plus les traitements sont courts et plus le focus attentionnel peut être rapidement libéré pour rafraîchir les éléments stockés en mémoire de travail (Barrouillet & Camos, 2012), alors même que le niveau d'activation de ces éléments aura moins diminué.

Pour tester ce modèle TBRS, Barrouillet et ses collègues (2007) ont utilisé des tâches d'empan complexe. Dans ce paradigme expérimental, les éléments à maintenir en mémoire de travail sont présentés séquentiellement et entre chaque item, une série de tâches interférentes doit être réalisée. Si l'on considère le délai entre l'apparition de deux tâches interférentes successives, ce délai sert à la fois à réaliser la tâche interférente et à rafraîchir les éléments maintenus en MdT. Ainsi, plus la tâche à réaliser prend de temps, moins il reste de temps disponible pour rafraîchir les items. Par exemple, si l'on dispose d'une seconde pour réaliser une tâche interférente qui demande une demi-seconde, il reste une demi-seconde pour rafraîchir les traces mnésiques. À délai égal, si la durée nécessaire pour réaliser la tâche interférente augmente, le temps disponible pour rafraîchir les éléments en MdT diminue, et donc le nombre d'éléments que l'on peut maintenir en mémoire diminue. Si la tâche pour laquelle on dispose d'une seconde nécessite trois quarts de secondes pour être réalisée, il ne restera plus qu'un quart de seconde pour rafraîchir les traces mnésiques (voir Figure 19).

Ainsi, une même tâche, brève, proposée selon différents niveaux de difficulté sollicitera le focus attentionnel pendant différentes durées. Plus la tâche à réaliser est difficile, plus le focus attentionnel sera utilisé longtemps, alors même que la tâche utilise le même nombre d'étapes du point de vue des traitements cognitifs (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009 ; Barrouillet *et al.*, 2007). Plus la tâche interférente est difficile, plus le temps passé à la traiter est long.

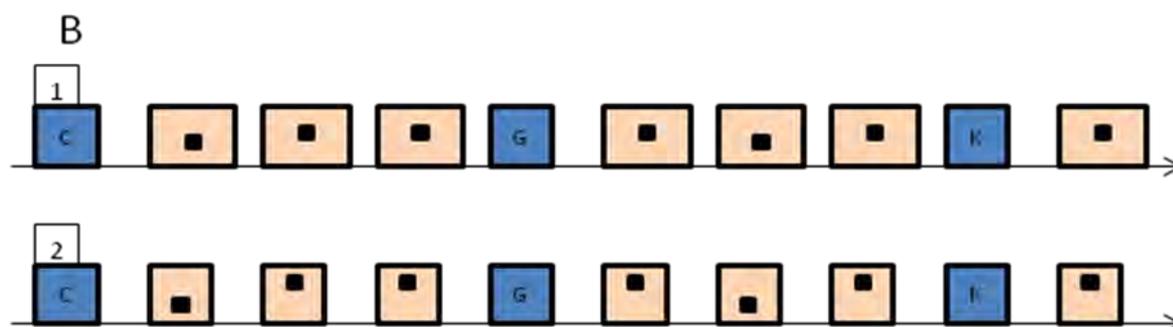


Figure 19. Illustration des ratios temporels des deux modalités de l'expérimentation 2

Le modèle TBRS postule que la charge cognitive est directement dépendante du temps disponible pour rafraîchir des éléments en mémoire de travail et du temps nécessaire pour

traiter une tâche interférente. Ainsi, à durée de temps égale entre les présentations de deux éléments à maintenir en MdT, une tâche interférente demandant davantage de temps pour être réalisée laissera moins de temps disponible pour rafraîchir les éléments maintenus en MdT. Ainsi, dans l'exemple ci-dessus, la tâche de distraction 2 est plus simple à réaliser, donc nécessite moins de temps que la tâche 1, ce qui laisse davantage de temps pour rafraîchir les items maintenus en MdT. La performance en MdT sera donc meilleure dans le second cas.

Cependant, pour l'instant le modèle TBRS n'a été utilisé que dans le cadre de tâches d'empan complexe nécessitant de maintenir des éléments dénués de sens. En effet, selon Cowan (2001) le fait que le matériel à maintenir lors de tâches d'empan mnésique présente un sens facilite le regroupement des items en *chunks*, faussant la mesure de l'empan. Suivant cette critique, la majorité des expérimentations portant sur des tâches d'empan mnésique a utilisé des items dont l'association est dénuée de signification (*e.g.*, des suites aléatoires de lettres ou de chiffres).

Cependant, dans le cadre des apprentissages, les items à maintenir et à manipuler sont toujours porteurs de sens. Dans ce cas, l'expertise permet d'accélérer les traitements à réaliser et d'augmenter l'empan en mémoire de travail (voir chapitre 4). C'est par exemple le cas du calcul mental. Dans un exemple célèbre, Binet (1894) a comparé les performances en calcul mental de « prodiges » du calcul et de caissiers (à une époque où les calculatrices n'existaient pas). À sa grande surprise, les caissiers concernés étaient aussi rapides, sinon plus que les prodiges pour réaliser des opérations qu'ils étaient susceptibles de rencontrer dans leur cadre professionnel (voir Tricot & Sweller, 2014 pour une discussion de cet exemple). Les opérations mathématiques étant porteuses de sens, elles peuvent faire l'objet d'une expertise.

Pourtant, la performance obtenue lors d'une tâche de calcul mental dépend largement de l'empan de la mémoire de travail des participants (Adams & Hitch, 1997 ; Ayres, 2001). Plus les individus ont une grande capacité en mémoire de travail et plus leur performance est élevée. L'hypothèse généralement admise est que la tâche de calcul impose une charge sur la MdT, imposant de maintenir les termes et les résultats intermédiaires tout en manipulant une partie de l'information, ce qui suppose une interactivité élevée entre les éléments (voir chapitre 2).

Nous avons fait l'hypothèse que le temps disponible pour rafraîchir les traces mnésiques serait également utilisé pour manipuler l'information présentée sous forme de calcul mental. Ainsi, en variant le temps disponible pour rafraîchir les termes d'un calcul mental, la performance

obtenue lors de la réalisation devrait varier de la même manière. Nous avons également fait l'hypothèse que cette variation serait affectée par le niveau d'expertise des participants, les participants les plus experts, ayant davantage automatisé les traitements en question, étaient supposés pouvoir réaliser les calculs plus simplement que les participants novices.

Méthodologie

Participants

Cinquante-sept élèves des classes de 5^e et de 4^e du collège saint Thomas d'Aquin de Toulouse ont participé à cette étude. Tous les parents de ces élèves ont donné un consentement écrit libre et éclairé pour que leurs enfants participent à cette étude.

Matériel et méthode

L'expérimentation a utilisé un protocole similaire à celui de Portrat, Camos et Barrouillet (2009, leur expérimentation 1). Suite à un problème technique lors de la réalisation du protocole, les participants devaient manipuler des séries de trois ou quatre items au lieu des séries de trois à huit items utilisées dans l'expérimentation originale (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009, expérimentation 1) dans une des deux modalités expérimentales. La tâche interférente était la même que dans l'étude princeps, une tâche de jugement spatial. Les participants devaient déterminer si un carré présenté à l'écran était situé dans la partie supérieure ou inférieure de l'écran. Cette tâche interférente était présentée selon deux modalités, dans un plan intra-participant.

Tâche interférente

Après la présentation de chaque terme une série de 8 tâches interférentes était proposée aux participants. Ils devaient déterminer si un carré présenté à l'écran était situé dans la partie supérieure ou inférieure de l'écran dans deux modalités de difficulté, comme représentées dans la Figure 20. Les items étaient composés de carrés noirs de 18 mm de côté, présentés sur fond blanc. Pour chaque item, le carré était présenté pendant 667 ms, suivi d'un écran blanc pendant une durée de 333 ms. La durée totale d'une tâche interférente était donc de 1 seconde. Durant cette seconde, les participants devaient répondre en utilisant une touche du clavier (« F ») si le carré était situé dans la partie supérieure ou une autre (« J ») si le carré était situé dans la partie inférieure de l'écran. Dans la condition « carrés éloignés », les carrés étaient largement séparés, l'écart entre deux carrés dans les parties supérieures et inférieures étant de

18 cm. Dans la condition « carrés proches », cet écart était réduit à 0,5 cm, impliquant un recouvrement partiel.



Figure 20. Tâche interférente de l'expérimentation 2

La tâche interférente consistait en une tâche de jugement spatial. Les participants devaient décider si un carré présenté à l'écran était situé dans la partie supérieure ou inférieure de l'écran. Les pointillés ont été rajoutés ici pour faciliter la compréhension de la Figure.

Items à manipuler

Les items à manipuler étaient composés de termes d'un calcul à réaliser. Leur présentation suivait les règles de la tâche interférente de Barrouillet, Bernardin et Camos (2004, voir leur expérience 2). Le premier terme, appelé terme racine, était un nombre d'un chiffre présenté seul (par exemple, le chiffre « 7 »). Les termes suivants étaient composés d'un opérateur et d'un nombre à un chiffre, par exemple, le terme « - 5 ». Chaque terme était suivi d'une série de tâches interférentes. À l'issue d'une série les participants devaient saisir le résultat du calcul, qui était toujours un nombre entier compris entre 0 et 9. Les calculs devaient être réalisés dans l'ordre de présentation, sans tenir compte des règles de priorité de calcul. Par exemple la série « 7 », « -5 », « x3 » se décomposait en « $7 - 5 = 2$ » et « $2 \times 3 = 6$ ». Le résultat à saisir était donc 6. Aucune étape de calcul ne comportait de décimale ni de nombre négatif.

Protocole expérimental

Les passations de cette expérimentation étaient collectives, réalisées dans la salle informatique du collège. Elles commençaient par une familiarisation avec les calculs à réaliser portant sur trois de ces calculs. Ensuite, les participants réalisaient le pré-test sur les calculs mentaux, consistant à résoudre autant de calculs corrects que possible en 60 s. Après ce pré-test, un entraînement pour réaliser la tâche interférente leur était proposé. Les carrés de la tâche interférente étaient présentés par séries de 10, en alternant les deux modalités. La performance lors de l'entraînement était enregistrée et comparée à un critère de 80% de performance similaire à celui de l'expérience princeps (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009). Les participants n'ayant pas atteint un critère minimum de 80% de bonnes réponses

recommençaient l'entraînement une deuxième fois et une troisième fois si nécessaire. Les données des participants n'ayant pas atteint le critère de performance lors de l'entraînement n'ont pas été incluses dans les traitements des résultats.

À l'issue de ces entraînements, les élèves étaient entraînés sur le protocole expérimental avec deux séries comportant deux termes et une série de trois termes présentées comme exemples. L'expérimentation comportait deux phases, correspondant aux deux modalités des tâches interférentes. Ces deux modalités étaient réparties aléatoirement, de sorte que la moitié des participants commençait avec la modalité « carrés proches » et l'autre moitié avec la modalité « carrés éloignés ».

Pour chaque modalité, les participants devaient résoudre des calculs d'un nombre croissant de termes. Les séries étaient initialement prévues pour comporter de trois à huit termes, mais un problème technique a fait que les participants ne pouvaient pas saisir le résultat des séries de cinq termes pour la condition « carrés proches ». Pour chaque longueur de calcul, trois séries étaient proposées. Ainsi, les participants devaient résoudre trois calculs comportant trois termes, puis trois calculs comportant quatre termes et ainsi de suite. La modalité était achevée soit lorsque les participants réalisaient le troisième calcul comportant huit termes, soit lorsque les participants donnaient la mauvaise réponse aux trois calculs d'une longueur donnée. Entre les deux modalités, une pause d'au moins 30 s était imposée (les participants pouvaient faire durer la pause plus longtemps).

Chaque calcul commençait par un écran présentant le nombre de termes de la série et la modalité de la tâche interférente (par exemple « carrés proches / 3 termes »). Cet écran était affiché pendant 1,5 s et était suivi d'un écran blanc pendant 0,5 s. Ensuite, un astérisque (*ready signal*) était présenté pendant 750 ms et après un délai de 500 ms, le premier terme du calcul était présenté pendant 1500 ms suivi d'un délai « post terme » de 500 ms (voir Figure 21). Après la présentation de chaque item, les participants devaient réaliser successivement 8 tâches de décision spatiale. Chaque stimulus était présenté pendant 667 ms et suivi d'un délai de 333 ms pour un temps total par tâche de 1000 ms. Après les 8 décisions spatiales, le second terme était présenté pendant 1500 ms et suivi d'un délai de 500 ms. À la fin de la série, le mot « résultat » était affiché et les participants devaient saisir le résultat du calcul à l'aide du clavier numérique. Les participants n'avaient pas de délai maximum pour saisir le résultat du calcul.

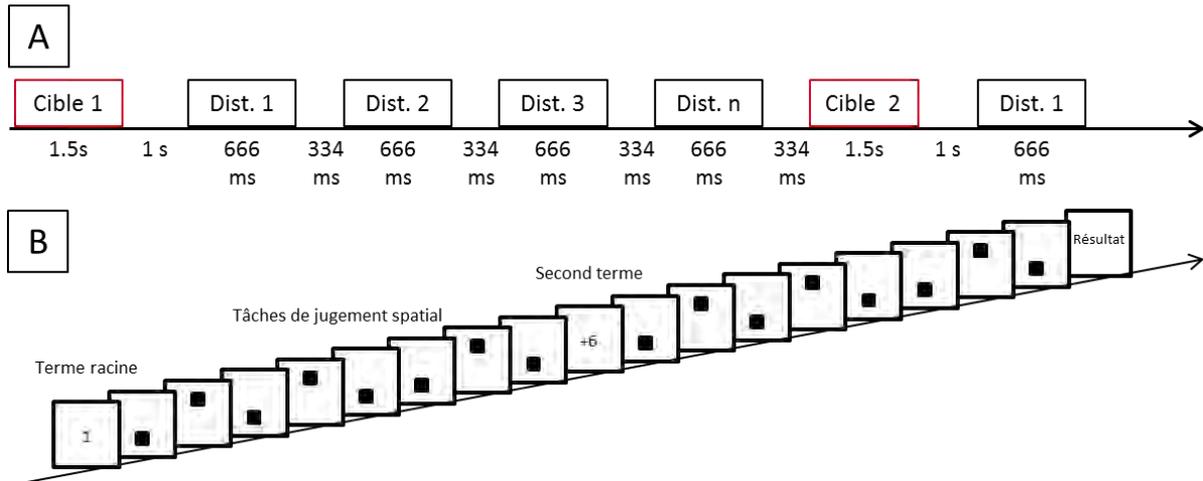


Figure 21. Protocole de l'expérimentation 2

Chaque série de l'expérimentation était composée de termes d'un calcul. Ce terme (A) était présenté pendant une durée de 1500 ms et suivi d'un écran blanc pendant une durée de 1000 ms. La première tâche interférente était ensuite présentée pendant 667 ms et suivie d'un écran blanc pendant 333 ms, résultant en une tâche interférente de 1000 ms pendant laquelle les participants pouvaient répondre. La seconde tâche interférente était présentée immédiatement après ces 1000 ms, suivie de la troisième et ainsi de suite jusqu'au second terme du calcul. Une série (B) était composée des différents termes, immédiatement suivis par huit tâches interférentes. À la fin de la série, les participants devaient saisir le résultat du calcul présenté.

Lorsque les participants avaient réalisé les deux modalités, une vidéo d'une durée de 2 mn leur était proposée afin de « vider » leur mémoire de travail. À la fin de cette vidéo, un post-test permettait de contrôler si un effet d'apprentissage avait lieu durant la phase expérimentale. Ce post-test, similaire au pré-test, consistait à réaliser autant de calculs que possible en 1 mn.

Variables dépendantes et hypothèses

En raison du problème technique ayant affecté les données de cette expérimentation, cette étude a été considérée comme une étude préliminaire. Le nombre de bonnes réponses et le nombre d'erreurs lors du pré-test et du post-test ont été comparés pour contrôler un éventuel effet d'apprentissage qui aurait pu expliquer une partie des résultats observés. Les temps de réaction lors des tâches de distraction ont été comparés afin de vérifier que la modalité « carrés éloignés » (*i.e.* la modalité la plus facile) nécessitait moins de temps que la modalité « carrés proches » (*i.e.* la modalité la plus difficile).

Enfin, nous avons fait l'hypothèse que la modalité de la tâche interférente affecterait la performance à la tâche de calcul. Plus précisément, la modalité « carrés éloignés » étant considérée comme la modalité la plus facile, nous avons fait l'hypothèse que le nombre de séries correctement réalisées serait plus élevé dans cette modalité que dans la modalité « carrés proches ».

Les participants ont ensuite été répartis dans deux groupes, un groupe dit « novice » regroupant les 20 participants ayant obtenus les moins bonnes réponses lors du pré-test et un groupe dit « expert » regroupant les 20 participants ayant obtenus les performances les plus élevées lors du pré-test. Nous nous attendions à ce que les participants du groupe « expert », ayant plus automatisé le calcul, soient moins affectés par la modalité de la tâche de distraction que les participants du groupe « novice ».

Toutes les hypothèses ont été testées avec des tests t de Student. La distribution du nombre de calculs correctement réalisés dans la modalité « carrés éloignés » ne suivant pas une loi normale, les tests réalisés sur cette variable ont été réalisés à l'aide de tests « U » de Mann-Whitney pour les comparaisons inter-participants et de tests « W » de Wilcoxon pour les comparaisons intra-groupes.

Résultats

S'agissant d'un pré-test, tous les participants ont été inclus, à l'exception d'un participant n'ayant pas donné de réponse ni traité une seule tâche de jugement spatial lors de la modalité « carrés proches ». Deux groupes de 20 participants ont été formés sur la base des scores de bonnes réponses au pré-test. Le premier groupe a réuni les 20 participants ayant donné le moins de bonnes réponses lors du pré-test (maximum 8) et le second groupe a réuni les 20 participants ayant donné le plus de bonnes réponses lors du pré-test (minimum 10).

Effet d'apprentissage

Les participants ont donné davantage de bonnes réponses lors du post-test que lors du pré-test ($t_{(39)}=-4.491$, $p<.001$) et fait autant d'erreurs lors des deux sessions ($t_{(39)}=-1.709$, $p=.095$). Lorsque l'on regarde ces données par groupe, les participants du groupe « novice » ont donné davantage de bonnes réponses lors du post-test que lors du pré-test ($t_{(19)}=-6.926$, $p<.001$) mais pas les participants du groupe « expert » ($t_{(19)}=-0.890$, $p=.385$). À l'inverse, les participants du groupe « novice » ont fait autant d'erreurs lors du post-test que lors du pré-test ($t_{(19)}=-0.936$,

$p=.361$) tandis que les participants du groupe « expert » ont fait davantage d'erreurs lors du post-test ($t_{(19)}=-2.538, p=.020$).

Traitement de la tâche interférente

Les temps de réponses de la modalité « carrés proches » ($M = 416$ ms) ont été plus longs que ceux de la modalité « carrés éloignés » ($M = 379$ ms) pour l'ensemble des participants de cette étude ($t_{(39)}=-5.237, p<.001$). Les participants du groupe « expert » ont été plus rapides que ceux du groupe « novice » lors de la modalité « carrés éloignés » ($t_{(38)}=2.238, p=.031$, moyennes : 360 ms et 397 ms respectivement) mais pas lors de la modalité « carrés proches » ($t_{(38)}=1.112, p=.273$). Les deux groupes ont été plus rapides lors de la modalité « carrés éloignés » que lors de la modalité « carrés proches », le groupe « novice » ($t_{(19)}=-3.560, p=.002$) comme le groupe « expert » ($t_{(19)}=-3.797, p=.001$).

Performances lors de la tâche principale

Sans considérer les groupes, les participants ont réalisé davantage de calculs corrects dans la modalité « carrés éloignés » que dans la modalité « carrés proches » ($t_{(39)}=2.917, p=.006$). Lorsque l'on considère les groupes, les participants du groupe « expert » ont réalisé plus de calculs corrects dans la condition « carrés éloignés » que dans la condition « carrés proches » ($t_{(19)}=2.629, p=.017$). Les participants du groupe « novice » ont eux réalisés autant de calculs corrects dans les deux modalités de la tâche de jugement spatial ($t_{(19)}=1.421, p=.172$).

Les participants du groupe « expert » ont réalisé davantage de calculs corrects que les participants du groupe « novice » dans la modalité « carrés éloignés » ($U=284.00, p=.019$) mais pas dans la modalité « carrés proches » ($t_{(37.5)}=-1.370, p=.179$).

Discussion

Dans cette étude préliminaire, nous avons manipulé le ratio entre le temps nécessaire pour traiter la tâche de distraction et le temps disponible pour le faire ainsi que rafraîchir et manipuler les informations en mémoire de travail. Pour cela nous avons utilisé deux modalités d'une tâche de jugement spatial, une modalité difficile, nécessitant davantage de temps, et une modalité facile, nécessitant moins de temps.

Même si un potentiel effet d'apprentissage pourrait expliquer une partie de ces résultats, la manipulation du ratio temporel a eu un effet sur la performance des participants lors de la tâche de calcul. Les expérimentations suivantes devront en effet contrôler l'effet de

présentation afin de vérifier que les différences observées entre le pré-test et le post-test sont davantage liées à un effet de familiarisation avec la tâche qu'à un effet d'apprentissage du calcul.

Les résultats montrent que la tâche interférente nécessite plus de temps dans sa modalité difficile que dans sa modalité facile. Cette différence est probablement liée à la différence observée sur la performance à la tâche de calcul mental. Toutefois, une réplique contrôlant les éventuels effets d'apprentissages sera nécessaire pour étayer cette affirmation. Néanmoins, il faut souligner que le groupe « expert » réalise la tâche de distraction plus vite que le groupe « novice » lors de la modalité facile. Lors de cette modalité, le groupe « expert » obtient de meilleurs résultats que le groupe « novice » à la tâche de calcul, ce qui n'est pas le cas dans la modalité « carrés proches », les deux groupes de participants obtenant des résultats comparables sur la tâche de calcul comme sur les temps de réponse de la tâche de distraction. Il est toutefois possible que l'absence de différence observée lors de la modalité « carrés proches » soit liée à la difficulté technique ayant limité les séries à un faible nombre de termes.

Cette limite peut également expliquer les différences liées à l'expertise, sensiblement contraires à nos hypothèses. En effet, nous avons fait l'hypothèse que la manipulation du ratio temporel affecterait plus les participants ayant un moindre niveau de connaissances antérieures, car ayant moins automatisé les traitements de calculs, ils auraient besoin de plus de temps pour les réaliser. Ainsi, la condition « carrés proches » demandant plus de temps, il restait moins de temps pour traiter les calculs et rafraîchir les termes en mémoire de travail. Cette diminution du temps disponible aurait dû affecter les participants ayant le plus besoin de temps, *i.e.* ceux du groupe « novice ». Les résultats contraires à nos hypothèses sont peut être liés au faible nombre de calculs à réaliser, un plus grand nombre d'essais aurait probablement permis à des tendances plus nettes d'émerger.

Expérimentation 3

Introduction

L'expérimentation précédente a montré que manipuler le ratio entre le temps nécessaire pour traiter une tâche de distraction et le temps disponible pour le faire et rafraîchir et manipuler les éléments maintenus en MdT avait un effet sur la performance lors d'une tâche de calcul. Cependant, la limite imposée par le faible nombre d'essais n'a pas permis à des différences claires d'apparaître entre les deux modalités de la tâche interférente.

Dans cette expérimentation, nous avons reproduit le protocole expérimental de l'étude précédente en veillant à proposer des séries d'éléments de tailles croissantes. Nous avons utilisé la même manipulation de la tâche de distraction pour manipuler le ratio temporel que lors de l'étude précédente. Nous avons fait l'hypothèse qu'un temps moindre pour rafraîchir et manipuler les informations en mémoire de travail induirait une performance moindre lors de la tâche de calcul. L'expérimentation précédente n'ayant pas permis de tirer de conclusion sur l'effet de l'expertise, nous avons formulé les mêmes hypothèses que précédemment à ce sujet, *i.e.* que la manipulation du ratio temporel affecterait principalement les participants ayant le moins automatisé les traitements liés au calcul.

Méthodologie

Participants

Soixante-neuf élèves de 5^e du collège Léon Blum à Colomiers ont participé à cette étude. Les parents de ces élèves ont donné un consentement écrit libre et éclairé pour que leurs enfants participent à cette étude.

Matériel et méthode

Cette expérimentation a utilisé le même protocole que l'expérimentation précédente et que l'expérimentation originale (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009) en l'ajustant pour que les séries comportent de trois à huit termes. Après chaque terme, une série de huit tâches de jugement spatial était proposée. Cette tâche de distraction était présentée selon les deux mêmes modalités que lors de l'expérimentation précédente, dans un plan intra-participant.

Tâche interférente

La tâche interférente était la même que lors de l'expérimentation 2, une tâche de jugement spatial dans laquelle les participants devaient décider si un carré présenté à l'écran était situé dans la partie supérieure ou inférieure de l'écran. Elle présentait les deux modalités de difficulté de l'expérimentation 2, « carrés proches » et « carrés éloignés ».

Items à manipuler

Les items à manipuler étaient composés de la même manière que ceux de l'expérimentation précédente. Les séries croissaient de trois à huit termes.

Protocole expérimental

Le protocole expérimental de cette étude était le même que celui de l'expérimentation précédente. Il comportait donc un pré-test suivi des deux phases expérimentales correspondant aux deux modalités de la tâche interférente. Le nombre de termes des séries augmentait de trois à huit termes dans chaque modalité et la même règle d'arrêt a été utilisée. À la fin des deux phases expérimentales, les participants voyaient la vidéo utilisée dans l'expérimentation 2 et réalisaient le post-test.

Variables dépendantes et hypothèses

Dans cette expérimentation comportementale, les temps de réponses et les scores de bonnes et de mauvaises réponses étaient enregistrés. Lors du pré-test, le nombre de bonnes réponses et de réponses fausses était enregistré. De plus, pour comparer les performances du pré-test et celles du post-test, un score composite similaire au K-Score (Cowan, 2001) a été calculé pour tenir compte à la fois des bonnes et des mauvaises réponses selon la formule :

$$\text{K-score} = (\text{Nb bonnes réponses} - \text{Nb réponses fausses}) \times (\text{Nb réponses}).$$

Les données de l'entraînement à la tâche interférente n'ont été considérées que pour conserver les participants ayant un score de performance supérieur ou égal à 80% de bonnes réponses. Les temps de réponses lors de cet entraînement n'ont pas fait l'objet de traitements particuliers. Lors de la phase expérimentale, le nombre de résultats corrects et le temps de réponse ont été enregistrés, de la même manière que le temps de réaction moyen pour traiter la tâche interférente.

L'hypothèse était que la modalité « carrés proches » impliquant des traitements plus difficiles que la modalité « carrés éloignés », les temps de réactions devraient être plus longs. Le nombre de calculs correctement réalisés devrait donc être moindre dans la condition « carrés proches » que dans la condition « carrés éloignés ».

Pour contrôler l'expertise des participants, nous les avons séparés dans deux groupes, un groupe « expert » comprenant les vingt participants ayant obtenu les scores les plus élevés lors du pré-test et un groupe « novice » comprenant les vingt participants ayant obtenu les moins bons scores.

Toutes les hypothèses ont été testées à l'aide du test *t* de Student à l'exception de la comparaison entre les temps de réponses moyens lors du pré-test et du post-test car la

distribution de ces deux variables ne suivait pas une loi normale. Ces deux variables ont été comparées à l'aide d'un test non paramétrique, le test de somme des rangs de Wilcoxon (W).

Résultats

Lors de la phase d'entraînement sur la tâche interférente, 53 participants ont atteint le critère de 80% de réponses correctes fixé. Les données des autres participants n'ont pas été analysées. Deux participants ont été retirés des analyses car leur performance à la tâche interférente était inférieure à 50% (score de chance) et que leur temps de réponse moyen pour cette tâche interférente était inférieur à la moyenne moins deux écart-types. Ces deux critères réunis ont été considérés comme indiquant une stratégie consistant à sacrifier la tâche interférente pour se focaliser sur la tâche de calcul.

Deux groupes de 20 participants ont été formés sur la base des performances lors du pré-test de calcul mental. Les 20 participants ayant obtenu le moins de bonnes réponses lors du pré-test (maximum 8 bonnes réponses) ont été réunis dans le groupe « novice » tandis que les 20 participants ayant obtenu le plus de bonnes réponses (minimum 10 bonnes réponses) ont été inclus dans le groupe « expert ». Le nombre de réponses fausses a été utilisé pour départager les égalités. Dix-neuf de ces participants ont passé la condition « carrés proches » en premier. L'ordre de présentation n'a eu aucun effet sur les variables dépendantes, sauf sur le temps de réaction moyen pour la tâche interférente dans la modalité « carrés proches » ($t_{(38)}=3.601$, $p=.001$). Les participants ayant commencé l'expérimentation par la modalité « carrés éloignés » ont eu un temps de réaction moyen inférieur aux participants ayant commencé l'expérimentation par la modalité « carrés proches ».

Pour vérifier que certaines différences que nous pourrions observer n'étaient pas dues à un effet d'apprentissage, nous avons comparé les scores obtenus lors du pré-test à ceux obtenus lors du post-test. À l'exception des temps de réponse moyens, aucune différence entre le pré-test et le post-test n'est apparue, ni pour le score composite ($t_{(39)}=0.599$, $p=.553$), ni pour le nombre de bonnes réponses ($t_{(39)}=1.136$, $p=.263$), ni pour le nombre d'erreurs ($t_{(39)}=-1.863$, $p=.070$), bien que la différence ait été tendancielle. Le temps de réponse moyen des participants a diminué entre le pré-test et le post-test ($W=-2.218$, $p=.027$). Néanmoins, les différences observées lors de la réalisation de la tâche de calcul n'étaient pas dues à un effet d'apprentissage, cette différence indiquant que les participants ont donné significativement plus de réponses lors du post-test que lors du pré-test.

Traitement de la tâche interférente

Conformément à notre hypothèse, la tâche de jugement spatial était plus longue à réaliser dans la modalité « carrés proches » (402.58 ms en moyenne) que dans la modalité « carrés éloignés » (371.73 ms en moyenne, $t_{(39)}=-4.837$, $p<.001$). De la même manière, le pourcentage de bonnes réponses était significativement plus élevé dans la condition « carrés éloignés » que dans la condition « carrés proches » ($t_{(39)}=8.743$, $p<.001$).

Les temps de réaction lors de la modalité « carrés éloignés » ont été plus courts que ceux observés pour la condition « carrés proches » pour les deux groupes, « expert » ($t_{(19)}=-3.285$, $p=.004$) et « novice » ($t_{(19)}=-3.470$, $p=.003$). Les temps de réaction des participants du groupe « expert » étaient de 363 ms en moyenne dans la modalité « carrés éloignés » contre 394 ms dans la modalité « carrés proches ». De manière similaire, les temps de réaction des participants du groupe « novice » étaient de 380 ms en moyenne pour réaliser la tâche de jugement spatial dans la modalité « carrés éloignés » contre 412 ms dans la condition « carrés proches ». La comparaison des deux groupes n'a pas révélé de différences significatives au niveau des temps de réaction, ni pour la modalité « carrés éloignés » ($t_{(38)}=1.505$, $p=.141$), ni pour la modalité « carrés proches » ($t_{(38)}=1.166$, $p=.251$). Les différences observées entre ces groupes ne sont donc pas dues à la différence de temps nécessaire pour réaliser la tâche interférente.

Performances lors de la tâche principale

Comme le montre la Figure 22, le groupe « novice » a réalisé plus de calculs corrects dans la condition « carrés éloignés » que dans la modalité « carrés proches » ($t_{(19)}=2.171$, $p=.043$). La manipulation de la tâche interférente a bien eu un effet sur la performance à la tâche de calcul. En revanche, le groupe « expert » a réalisé autant de calculs corrects selon les deux modalités de la tâche interférente ($t_{(19)}=.196$, $p=.847$). Tout se passe comme si la manipulation de la difficulté de la tâche interférente n'avait eu aucun effet sur leur capacité à réaliser la tâche de calcul.

Les participants du groupe « expert » ont réalisé davantage de calculs corrects que les participants du groupe « novice » à la fois dans la modalité « carrés proches » ($t_{(26,4)}=-4.964$, $p<.001$) et dans la modalité « carré éloignés » ($t_{(38)}=-3.026$, $p=.004$).

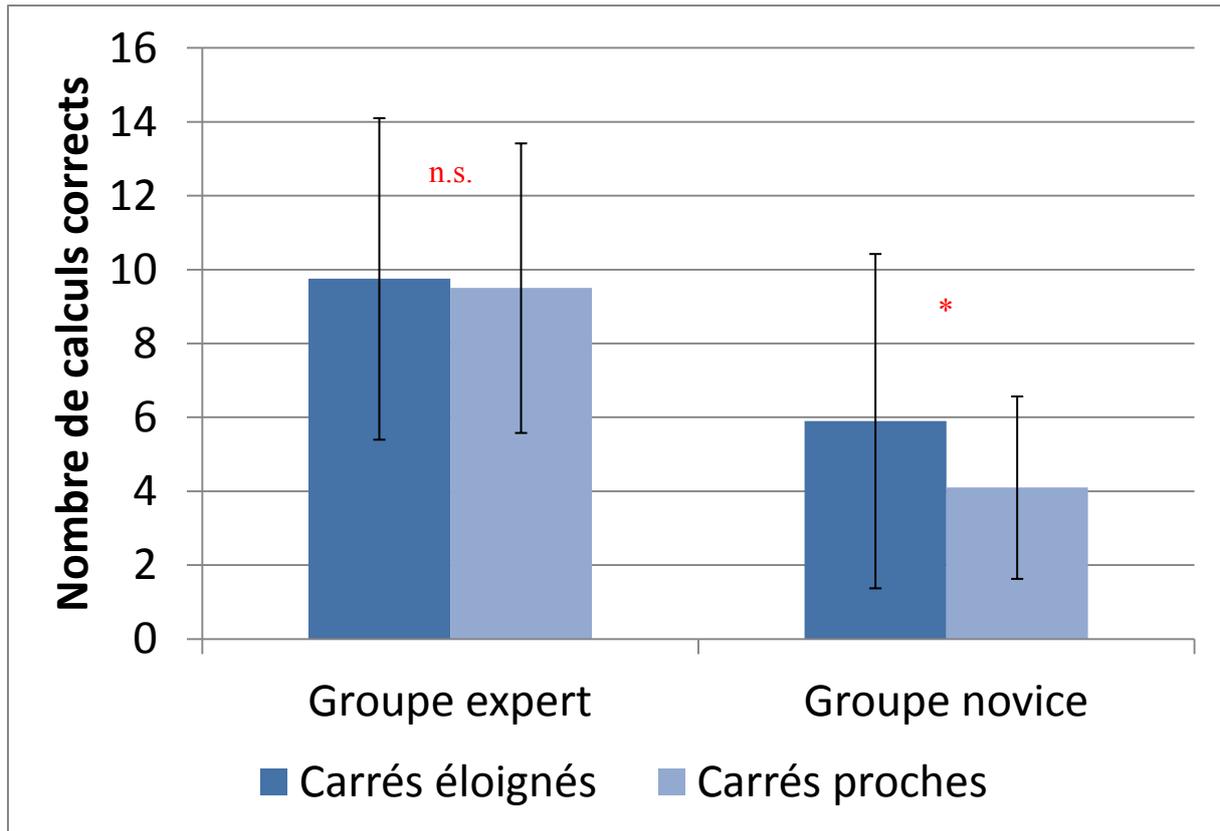


Figure 22. Nombre de séries correctes réalisées lors de l'expérimentation 3

Les participants du groupe « expert » ont obtenu le même nombre de bonnes réponses dans les deux modalités. Les participants du groupe « novice » ont réalisé plus de calculs corrects dans la modalité « carrés éloignés ». Les participants du groupe « expert » ont réalisé plus de calculs corrects que les participants du groupe « novice » dans les deux modalités.

Discussion

Conformément à nos hypothèses, la performance à la tâche de calcul a été affectée par le ratio temporel entre le temps nécessaire pour traiter la tâche concurrente et le temps disponible pour le faire, mais uniquement pour le groupe « novice ». Lorsque le temps nécessaire pour traiter la tâche interférente a été augmenté, le temps disponible pour maintenir et manipuler l'information en MdT a été diminué d'autant, résultant en une diminution de la performance au calcul mental. Les novices ayant moins automatisé les traitements du calcul mental, ce dernier présentait un coût cognitif plus élevé pour eux et donc sollicitait le focus attentionnel plus longtemps pour le même calcul. Cette augmentation du temps de calcul a rendu sa réalisation impossible dans le temps restant après le traitement de la tâche interférente. Ce résultat souligne le lien déjà mis en évidence entre calcul mental et capacité de mémoire de travail (Adams & Hitch, 1997). Ainsi, plus le temps nécessaire pour traiter la tâche

interférente est long, moins il reste de temps pour maintenir et traiter les éléments en MdT et moins la performance est élevée.

À l'inverse, les experts ayant largement automatisé le calcul mental, ils avaient probablement le temps de réaliser les calculs dans le temps disponible après le traitement de la tâche interférente. Cette automatisation a eu pour résultat une plus faible charge en mémoire de travail, charge restant faible pendant toute la durée de l'expérimentation. Cette hypothèse expliquerait l'absence de différence entre les deux conditions expérimentales pour les participants du groupe des experts, les deux modalités de la tâche interférente ayant le même effet sur leur performance au calcul mental. En effet, si le nombre d'éléments à maintenir en MdT reste faible, alors le temps nécessaire pour rafraîchir l'intégralité des traces mnésiques reste faible même lors de la condition de charge élevée.

Les deux groupes ont obtenu une performance similaire lors de la réalisation des tâches interférentes, les différentes performances obtenues au calcul mental ne sont donc pas dues à des choix différents pour réaliser les deux tâches concurrentes de calcul mental et de jugement spatial. La condition « carrés proches » ayant nécessité davantage de temps indique que le focus attentionnel a été capturé plus longtemps, ayant pour effet une diminution de la performance en mémoire de travail et donc un moindre nombre de calculs correctement réalisés pour le groupe « novice ».

Pour le groupe « novice », le pattern de résultats est similaire à celui obtenu lors de précédentes expérimentations du modèle TBRS (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009), comme si les participants n'avaient pas réalisé les calculs pendant la tâche. Cependant, le nombre moyen de séries correctement rappelées dans l'expérience de Portrat, Camos et Barrouillet (2009, leur expérience 1) est largement inférieur au nombre moyen de calculs correctement réalisés dans cette expérimentation dans les deux conditions. Ceci suggère que les participants du groupe « novice » avaient des connaissances antérieures suffisantes pour obtenir de meilleures performances avec les termes d'un calcul mental (*i.e.* qu'ils pouvaient associer) qu'avec des items dont l'association est dénuée de sens.

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que le modèle TBRS peut être utile aux recherches de la théorie de la charge cognitive, tant que le niveau d'expertise des apprenants est contrôlé. Ce modèle permet de prédire que le nombre d'éléments distracteurs lors d'une phase d'apprentissage (*i.e.* ce que Sweller et ses collègues appellent « charge extrinsèque ») importe moins que le ratio temporel utilisé. Plus le temps disponible pour maintenir et manipuler les

informations en mémoire de travail est important devant le temps nécessaire pour réaliser les tâches interférentes et mieux ces informations seront traitées.

Le modèle TBRS permettrait donc de proposer une définition plus juste de la charge extrinsèque, qui, plus que le nombre d'informations interférentes, considèrerait le ratio temporel dévolu à leur traitement comme responsable de cette charge inutile. En outre, cette charge extrinsèque serait sensible à l'expertise dans un sens différent de celui de la théorie de la charge cognitive. Alors que celle-ci souligne qu'une information utile pour un novice peut devenir interférente pour un expert, le modèle TBRS permet d'envisager que l'expertise permet de diminuer l'effet de la tâche interférente, quand celle-ci est aussi interférente pour les experts que pour les novices.

Cependant, notre manipulation du ratio temporel a nécessité de faire varier la difficulté de la tâche interférente, même si les deux tâches interférentes ont nécessité le même nombre d'étapes cognitives pour leur réalisation. Une interprétation alternative de nos résultats serait que deux tâches différentes peuvent avoir des effets différents sur les participants en fonction de la capacité de leur mémoire de travail. En effet, les stratégies utilisées pour maintenir des éléments en MdT peuvent varier, ce qui a un impact direct sur l'empan en MdT (*e.g.*, Corbetta & Shulman, 2002). Les participants ayant un empan en MdT plus faible auraient principalement recours au maintien attentionnel des éléments tandis que les participants ayant un plus grand empan en MdT utiliseraient davantage de mécanismes pour réduire l'interférence (Gulbinaite *et al.*, 2014). Ainsi, deux tâches interférentes différentes pourraient avoir des effets différents sur les participants en fonction de leur capacité en mémoire de travail. Cet empan étant largement associé à la performance lors d'une tâche de calcul mental, il serait donc normal, dans cette hypothèse, que le groupe expert de cette étude corresponde à un groupe présentant un empan en MdT supérieur et donc soit moins sensible à l'interférence causée par la tâche de distraction dans sa modalité « carrés proches ». À l'inverse, toujours selon cette hypothèse, le groupe « novice », correspondant au groupe de participants ayant l'empan en MdT plus faible serait plus sensible à l'interférence causée par la tâche de jugement spatial. Bien que le modèle TBRS ait déjà reproduit le même résultat en utilisant des tâches interférentes identiques (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004), nous avons donc reproduit cette expérimentation en utilisant la même tâche interférente pour les deux modalités expérimentales.

Expérimentation 4

Introduction

La première expérimentation a montré que le modèle TBRS fonctionne avec des éléments porteurs de sens, tant que l'on tient compte de l'expertise des participants. Ce résultat était attendu, puisque l'acquisition d'expertise est une caractéristique du matériel porteur de sens. Cependant, en reproduisant une expérimentation du modèle TBRS (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009, leur expérimentation 1), nous avons utilisé deux types de tâches interférentes (des carrés proches et distants comme stimuli de la tâche de jugement spatial). Ces deux types de tâches ont été utilisés pour induire différentes durées de traitements, induisant différents ratio temporels entre le temps nécessaire pour traiter la tâche interférente et le temps disponible avant la présentation de la tâche de jugement spatial suivante. Cette manipulation a donc affecté le temps disponible pour rafraîchir et traiter les éléments maintenus en MdT.

Toutefois, étant donné que les participants présentant différents empan de mémoire de travail pourraient utiliser différentes stratégies pour maintenir les informations actives en MdT, l'utilisation de deux tâches de jugement spatial différentes pourrait avoir eu un effet différent sur chacun des groupes de participants. En particulier, si l'on accepte l'hypothèse selon laquelle le groupe « novice » est considéré comme ayant probablement un empan en MdT plus faible, il est possible que la tâche interférente ait davantage affecté ce groupe, réputé plus sensible à l'interférence (Gulbinaite *et al.*, 2014). Ainsi, une partie au moins des résultats de l'expérimentation 3 pourrait s'expliquer par une sensibilité différente aux modalités de la tâche de jugement spatial. Nous avons donc reproduit la même expérimentation en utilisant une autre hypothèse du modèle TBRS pour tester notre hypothèse.

Selon le modèle TBRS, seul le temps est responsable du déclin de l'activation des traces mnésiques et seul le ratio temporel affecte la capacité de la mémoire de travail. Ce ratio est affecté par le temps nécessaire pour traiter la tâche interférente si le temps total de la tâche est gardé constant. À l'inverse, si le temps nécessaire pour traiter la tâche interférente est gardé constant, alors manipuler le temps disponible avant la présentation de la tâche interférente suivante devrait affecter la charge cognitive de la même manière (voir Figure 23). Ainsi, utiliser une tâche plus rapide à réaliser, c'est-à-dire sollicitant le focus attentionnel moins longtemps, ou rallonger le temps disponible pour rafraîchir et manipuler les informations présentes en MdT devrait avoir le même effet.

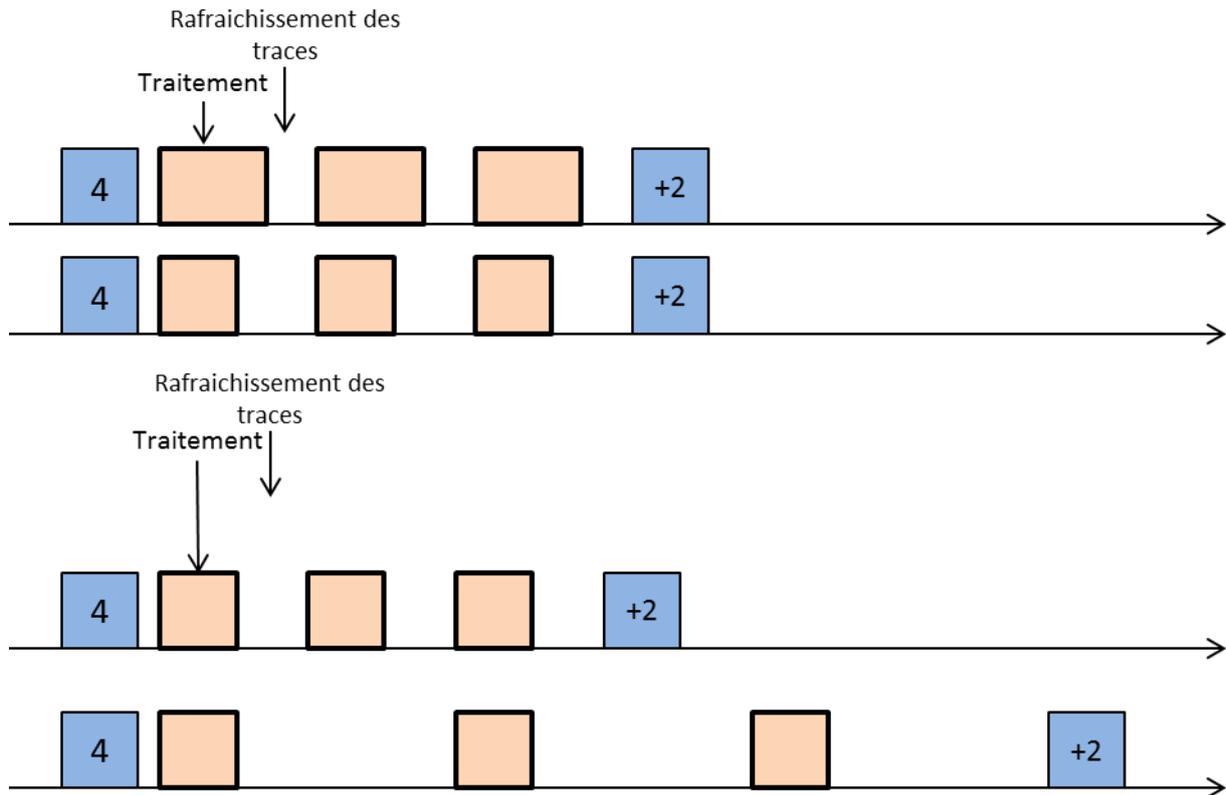


Figure 23. Illustration des ratios temporels des expérimentations 3 et 4

Dans la première expérimentation, le temps disponible pour rafraîchir les traces mnésiques était contraint par le temps nécessaire pour traiter la tâche interférente, la durée entre deux présentations restant fixe (en haut). Dans la seconde expérimentation, pour s'assurer que la différence de difficulté entre les deux modalités de tâche interférente ne joue aucun rôle, la même tâche interférente est proposée avec deux durées différentes (en bas).

Dans cette expérience, nous avons donc reproduit l'expérimentation 1 en utilisant seulement la condition « carrés proches » mais en faisant varier le temps total disponible entre chaque tâche interférente. Cette manipulation avait pour objectif de créer une condition rapide et condition lente de la même tâche interférente. Notre hypothèse était que la condition lente de l'expérimentation, offrant davantage de temps pour rafraîchir et traiter les items maintenus en MdT induirait une charge cognitive plus faible. Cette manipulation devrait avoir pour résultat une meilleure performance en calcul mental, au moins pour le groupe « novice ». Cette hypothèse est contraire aux prédictions permises par le modèle en composantes multiples (Baddeley, 1986) dans le sens où le même nombre de tâches interférentes identiques devrait imposer la même charge en MdT selon ce modèle. Ainsi, notre hypothèse, fondée sur le modèle TBRS, est que le même nombre d'éléments distracteurs devrait induire une charge différente en fonction du rythme de présentation de ces tâches. Selon notre hypothèse, plus le rythme de présentation est lent, meilleure devrait être la performance.

Méthodologie

Participants

Cinquante-neuf élèves de classe de 4^e au collège Léon Blum de Colomiers ont participé à cette étude. Les passations de cette étude étaient des passations collectives. Tous les parents ont donné un consentement écrit pour que leurs enfants participent à cette étude

Matériel et méthode

Cette expérimentation a utilisé le même protocole que l'expérimentation précédente. Les participants devaient manipuler des séries de termes de calculs de tailles croissantes de 3 à 8 termes. Après chaque terme, une série de tâches de jugement spatial était présentée.

Tâche interférente

Après la présentation de chaque terme une série de 8 tâches de jugement spatial était proposée aux participants. Ils devaient déterminer si un carré présenté à l'écran était situé dans la partie supérieure ou inférieure de l'écran. Lors de cette expérimentation, deux modalités de charge cognitive étaient proposées, une condition « rapide » et une condition « lente ». Dans la condition « rapide », comme lors de l'expérimentation 2, pour chaque item, le carré était présenté pendant 667 ms, suivi d'un écran blanc pendant une durée de 333 ms. La durée totale d'une tâche interférente était donc de 1 seconde dans la condition « carrés rapides ». Durant cette seconde, les participants devaient répondre en utilisant une touche du clavier (« F ») si le carré était situé dans la partie supérieure ou une autre (« J ») si le carré était situé dans la partie inférieure de l'écran. Dans la condition « carrés lents », les carrés étaient présentés pendant 667 ms et suivis d'un écran blanc pendant une durée de 1333 ms. La durée totale de la tâche interférente était donc de 2 secondes dans la condition « carrés lents ».

Les stimuli de la tâche interférente étaient ceux de la condition « carrés proches » de l'expérimentation précédente.

Items à manipuler

Les items à manipuler étaient les mêmes que ceux utilisés dans l'expérimentation 3.

Protocole expérimental

Comme lors de l'expérimentation précédente, les passations étaient collectives et réalisées dans la salle informatique du collège. Le protocole expérimental était le même que celui

utilisé dans les deux expérimentations précédentes, commençant par un pré-test, suivi d'une phase de familiarisation avec la tâche de distraction.

À l'issue de ces entraînements, les élèves étaient entraînés sur le protocole expérimental, avec deux séries comportant deux termes et une série de trois termes, présentées comme exemples. Puis les participants réalisaient les deux phases expérimentales correspondant aux deux modalités de la tâche de distraction. La même règle d'arrêt que celle utilisée lors des expérimentations précédentes a été utilisée. À la fin de la phase expérimentale, un post-test permettait de contrôler un éventuel effet d'apprentissage durant la phase expérimentale.

En raison des contraintes temporelles, l'expérimentation durait une heure, la vidéo permettant de « vider » la mémoire de travail a été retirée du protocole car elle n'apportait pas d'élément supplémentaire à l'expérimentation.

Variables dépendantes et hypothèses

Comme lors de l'expérimentation précédente, les données du pré-test et du post-test ont été utilisées avec les différents ordres de présentation des modalités pour contrôler d'éventuels effets d'apprentissages. Les données de l'entraînement à la tâche de jugement spatial ont été utilisées pour conserver les participants ayant fourni au moins 80% de bonnes réponses lors de cette phase d'entraînement.

Lors de la phase expérimentale, le nombre de résultats corrects et le temps de réponse ont été enregistrés, de la même manière que le temps de réaction pour traiter la tâche interférente. L'hypothèse était que la modalité « carrés rapides » impliquant une charge cognitive plus élevée que la modalité « carrés lents », le nombre de calculs correctement réalisés devrait donc être plus faible.

Pour contrôler l'expertise des participants, nous les avons séparés dans deux groupes, un groupe « expert » et un groupe « novice » sur la base des données du pré-test, en utilisant les mêmes seuils de bonnes réponses que ceux issus de l'expérimentation précédente. À partir des résultats de cette expérimentation, nous avons formulé l'hypothèse que la manipulation du ratio temporel affecterait la performance du groupe « novice », mais pas celle du groupe « expert ».

Toutes les hypothèses de l'étude ont été testées en utilisant des tests t de Student. Pour tenir compte du faible effectif de l'un des deux groupes, toutes les hypothèses ont également été vérifiées à l'aide de tests du « U » de Mann-Whitney pour les tests intergroupes et de test de

somme des rangs de Wilcoxon (« W ») pour les tests intra-participants. Pour plus de facilité de lecture, tous les résultats reproduits ici sont ceux issus des tests de Student tant que les résultats des tests non-paramétriques sont en accord.

Résultats

Échantillon

Le même seuil de 80% de performance lors de l'entraînement sur la tâche interférente a été conservé. Les participants ayant atteint ce score ont ensuite été divisés en deux groupes, « expert » et « novice », sur la base des mêmes seuils (bonnes réponses et erreurs lors du pré-test) que ceux utilisés lors de l'expérimentation 3, résultant en un groupe « novice » comportant 12 participants et un groupe « expert » comportant 34 participants.

Effet d'ordre

Sur les 46 participants répartis dans les deux groupes, 26 ont passé la modalité « carrés rapides » en premier et 20 ont passé la modalité « carrés lents » en premier. L'ordre de présentation des deux modalités n'a eu aucun effet sur les variables dépendantes de l'étude. En particulier, l'ordre de présentation n'a pas eu d'effet sur le temps de réaction pour traiter la tâche interférente dans ses deux modalités, « rapide » ($t_{(44)}=0.447$, $p=.657$) et « lent » ($t_{(44)}=0.844$, $p=.403$). En particulier, l'ordre de présentation n'a pas eu d'effet sur le nombre de calculs correctement réalisés pour le groupe « novice » ($t_{(10)}=0.195$, $p=.850$ et $t_{(10)}=0.049$, $p=.962$ pour les modalités « carrés lents » et « carrés rapides » respectivement) ni pour le groupe « expert » ($t_{(21,6)}=1.200$, $p=.243$ et $t_{(32)}=-0.513$, $p=.612$ pour les modalités « carrés lents » et « carrés rapides » respectivement).

Effet d'apprentissage

Le nombre de bonnes réponses a augmenté entre le pré-test et le post-test ($t_{(45)}=-3.448$, $p=.001$), le nombre d'erreurs a également augmenté ($t_{(45)}=-3.418$, $p=.001$), tandis que le temps de réaction a diminué entre le début et la fin de l'expérience ($t_{(45)}=3.527$, $p=.001$). Le score composite a aussi augmenté entre le pré-test et le post-test ($t_{(45)}=-2.713$, $p=.009$). En séparant les résultats par groupe, le score composite a augmenté pour le groupe « novice » ($t_{(11)}=-4.031$, $p=.002$) mais pas pour le groupe « expert » ($t_{(33)}=-1.571$, $p=.126$). Le nombre de bonnes réponses augmente pour le groupe « novice » ($t_{(11)}=-7.933$, $p<.001$) mais pas le nombre de réponses fausses ($t_{(11)}=-.764$, $p=.461$) et leur temps de réponse moyen diminue ($t_{(11)}=3.652$, $p=.004$). Concernant le groupe « expert », le nombre de bonnes réponses est

constant ($t_{(33)}=-1.472, p=.151$), tandis que le nombre d'erreurs augmente ($t_{(33)}=-3.847, p=.001$) et le temps de réponse moyen diminue ($t_{(33)}=2.353, p=.025$).

Tâche interférente

Les temps de réaction moyens pour traiter la tâche interférente ont été plus courts dans la condition « rapide » que dans la condition « lente » ($t_{(45)}=13.004, p<.001$) reflétant l'exigence temporelle de la tâche. Les pourcentages de bonnes réponses lors du traitement de la tâche interférente sont restés similaires dans les deux conditions ($t_{(45)}=1.158, p=.253$), de la même manière que le pourcentage minimum de réussite à la tâche interférente ($t_{(45)}=.929, p=.358$).

Ce pattern s'est retrouvé dans les deux groupes, le temps de réaction moyen lors de la tâche interférente ayant été plus court pour le groupe « novice » ($t_{(11)}=6.554, p<.001$) comme pour le groupe « expert » ($t_{(33)}=11.188, p<.001$). En revanche, le pourcentage de réussite moyen est resté similaire pour le groupe « novice » ($t_{(11)}=-0.128, p=.900$) comme pour le groupe « expert » ($t_{(33)}=1.619, p=.115$), de la même manière que le pourcentage minimum de réussite ($t_{(11)}=0.182, p=.859$ et $t_{(33)}=0.926, p=.361$ pour le groupe « novice » et le groupe « expert » respectivement).

Performances lors de la tâche principale

Comme lors de la première expérimentation, les participants du groupe « novice » ont réalisé davantage de calculs corrects lorsque le temps disponible était plus long ($t_{(11)}=2.776, p=.018$), comme représenté sur la Figure 24. Les participants du groupe « expert » ont réalisé un nombre similaire de calculs corrects dans les deux conditions ($t_{(33)}=1.457, p=.154$).

Les participants du groupe « novice » ont calculé moins de séries correctement que les participants du groupe « expert » dans la condition « rapide » ($t_{(44)}=-2.257, p=.029$). En revanche, les deux groupes ont réalisé autant de calculs corrects dans la condition « lent » ($t_{(44)}=-.729, p=.470$).

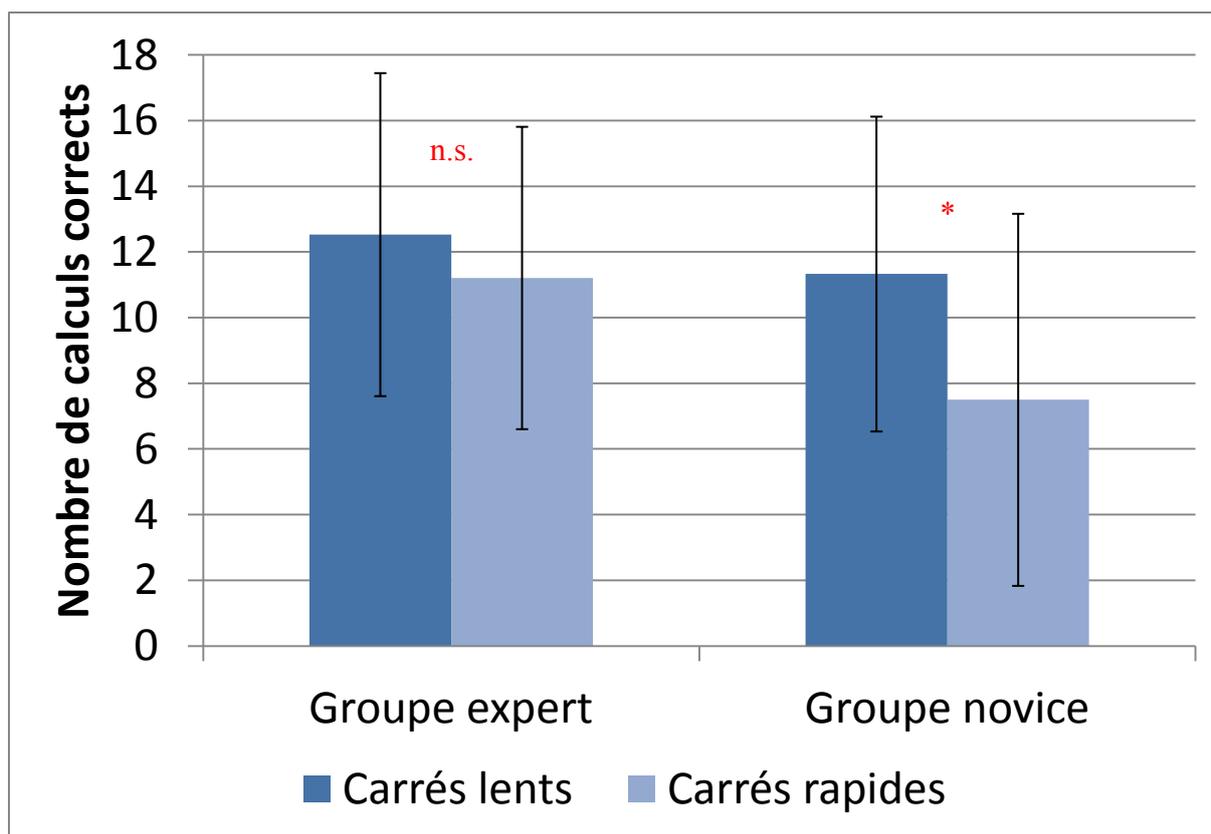


Figure 24. Nombre de séries correctes réalisées lors de l'expérimentation 4

Les participants du groupe « novice » ont réalisé davantage de calculs corrects dans la condition « carrés lents » que dans la modalité « carrés rapides ». Les participants du groupe « expert » ont réalisé autant de calculs corrects dans les deux modalités. Les participants du groupe « expert » ont obtenu des performances supérieures à celles des participants du groupe « novice » dans la modalité « carrés rapides », mais en revanche, les deux groupes ont obtenu des performances similaires dans la modalité « carrés lents ».

Discussion

Dans cette étude, nous avons manipulé le temps disponible pour réaliser la tâche interférente, et cette manipulation a eu un effet direct sur la performance obtenue lors de la tâche de calcul mental. Contrairement à l'expérimentation précédente, dans cette étude, la tâche interférente était exactement la même dans les deux modalités expérimentales, la seule différence entre les deux conditions étant le temps disponible pour réaliser la tâche interférente.

Conformément à nos hypothèses, de la même manière que pour l'expérimentation précédente, les participants du groupe « novice » ont obtenu une meilleure performance dans la condition de ratio temporel plus faible que dans la condition de ratio temporel plus élevé. En revanche, les participants du groupe « expert » ont obtenu des performances similaires dans les deux

conditions. Les performances des participants du groupe « novice » ont augmenté dans la condition de faible ratio temporel à tel point que la différence avec les performances des participants du groupe « expert » n'était plus significative.

Le temps mis par les participants pour traiter la tâche interférente augmente de la même manière entre les deux groupes lorsque le temps disponible pour traiter cette tâche interférente augmente. Ceci semble indiquer que la pression temporelle imposée par la condition de charge élevée augmente, bien que la performance obtenue sur la tâche interférente soit similaire entre les conditions. Toutefois, même si le temps mis pour réaliser la tâche interférente augmente, le ratio temporel est toujours plus faible dans le cas de la condition « lente » que dans celui de la condition « rapide ». Le temps mis pour réaliser la tâche interférente n'a pas doublé (400ms et 476ms dans les conditions « rapides » et « lentes » respectivement), tandis que le temps disponible pour la réaliser a doublé (1s et 2s respectivement). Ainsi, la charge cognitive telle que calculée dans le cadre du modèle TBRS est de 0.4 lors de la condition de charge élevée et de 0.24 lors de la condition de charge faible.

Les différences de performances obtenues entre le pré-test et le post-test semblent suggérer un effet d'apprentissage pouvant expliquer une partie des différences obtenues. Notamment, les participants du groupe « novice » obtiennent davantage de bonnes réponses lors du post-test que lors du pré-test. Pour contrôler cet effet d'apprentissage, nous avons comparé les performances obtenues en fonction de l'ordre de présentation des modalités. Aucune différence n'apparaît pour aucun des deux groupes en fonction de l'ordre de présentation des modalités. Ainsi, les participants ayant réalisé la condition de ratio temporel élevé en dernier n'obtiennent pas de meilleures performances que les participants l'ayant réalisée en premier. De la même manière, les participants ayant terminé par la condition ratio temporel faible n'ont pas obtenu de meilleures performances dans cette condition que les participants ayant commencé par cette condition, ce qui exclut un effet d'apprentissage. En effet, s'il y a eu un effet d'apprentissage, il a affecté les deux modalités indifféremment. L'absence d'effet d'ordre de présentation pour les deux groupes suggère que la différence principale entre le pré-test et le post-test tient essentiellement au nombre de réponses fournies, les participants des deux groupes fournissant davantage de réponses, bonnes et mauvaises, lors du post-test. Le score composite étant sensible au nombre de réponses fournies, un plus grand nombre de réponses entraîne une grande augmentation des scores. La différence observée semble donc davantage relever d'un effet de familiarisation avec la tâche que d'un réel effet d'apprentissage du calcul mental. Cet effet de familiarisation n'a toutefois pas influencé les

performances obtenues lors de la tâche principale comme l'indique l'absence d'effet de l'ordre de présentation.

Les résultats obtenus lors de la tâche principale sont cohérents avec les hypothèses du modèle TBRS. En effet, accorder davantage de temps aux élèves du groupe « novice » pour rafraîchir et manipuler les informations maintenues en MdT leur permet de réaliser davantage de calculs corrects. Cette augmentation, similaire à celle de la précédente expérimentation, a lieu alors que les tâches interférentes sont rigoureusement identiques, seul le temps disponible pour les réaliser ayant varié. Ce résultat écarte l'hypothèse d'un effet interférent de la tâche concurrente sur la mémoire de travail ayant affecté différemment les groupes en fonction de leur niveau d'expertise.

Ce résultat est également contraire aux hypothèses que l'on pourrait faire sur la base du modèle de Baddeley (1986) classiquement utilisé. En effet, selon ce modèle, même si la principale source de l'oubli des éléments en MdT est le temps, cette MdT est surtout définie par le nombre d'éléments que l'on y stocke. Plus le nombre d'éléments transitant par la MdT est élevé, plus il est difficile de maintenir les items pertinents et de les traiter. À l'inverse, un nombre égal d'éléments devrait induire la même difficulté à maintenir les items pertinents. Les résultats de cette étude montrent qu'un même nombre de tâches interférentes, donc d'éléments transitant par la MdT peuvent induire une charge différente pour la mémoire de travail en fonction du rythme de présentation de ces éléments.

Comme lors de l'expérimentation précédente, le modèle TBRS permet de proposer une autre définition de la charge extrinsèque. Plus que le nombre d'éléments à traiter dans le cadre de cette charge inutile, ce serait le temps nécessaire pour les traiter qui affecterait la performance. À nombre d'éléments interférents égal, le temps qu'ils laissent disponible pour rafraîchir des informations maintenues en MdT et les manipuler affecterait la capacité de la mémoire de travail. Ainsi, plus que leur nombre, le temps nécessaire pour traiter les éléments interférents et le temps disponible pour manipuler les informations relevant de la charge intrinsèque détermineraient les ressources cognitives disponibles.

Expérimentation 5

Introduction

Les trois premières expérimentations de ce chapitre ont montré que le modèle TBRS permet de décrire l'utilisation de la mémoire de travail lors d'une tâche utilisant des items porteurs de

sens, dans la mesure où l'on tient compte des connaissances antérieures des participants. D'après les deux premières expérimentations, un même nombre d'éléments interférents peut induire différents effets sur la performance en MdT en fonction du rythme de présentation de ces éléments. Ces résultats sont contraires aux prédictions permises par un modèle « spatial » de la MdT mais cohérents avec le modèle TBRS. Surtout, ces résultats sont cohérents avec d'autres résultats empiriques obtenus dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, tels que l'effet de l'information transitoire (chapitre 2, voir Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 pour une revue sur le sujet). En particulier, dans le cadre de l'effet de modalité, le rythme de présentation affecte la performance d'apprentissage (Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowalla, 2010).

Dans cette expérimentation, nous avons voulu tester une autre hypothèse du modèle TBRS, selon laquelle le ratio temporel impose la seule charge cognitive et le nombre de tâches interférentes n'a pas d'effet.

Ainsi, le rythme de présentation des informations affecte la performance en mémoire de travail davantage que la quantité d'informations présentées. Une autre hypothèse découlant du modèle TBRS est que le nombre de tâches interférentes ne modifie pas la performance obtenue lors d'une tâche de mémoire de travail, tant que le ratio temporel est maintenu constant (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004 ; voir Barrouillet & Camos, 2015 pour une revue ; mais voir Oberauer & Lewandowsky, 2013 ; 2014). Selon le modèle TBRS, seul le temps est responsable du déclin de l'activation des traces mnésiques et donc de l'oubli en mémoire de travail. Ainsi, tant que le temps disponible pour rafraîchir les traces en MdT est suffisant, peu importe la durée de l'expérimentation, la performance sera constante (voir Figure 25). De la même manière qu'un même nombre de tâches interférentes induit différentes charges en MdT en fonction du rythme de présentation de ces tâches interférentes, si le rythme de présentation est constant, alors le nombre de tâches interférentes n'aura pas d'effet sur la performance en MdT.

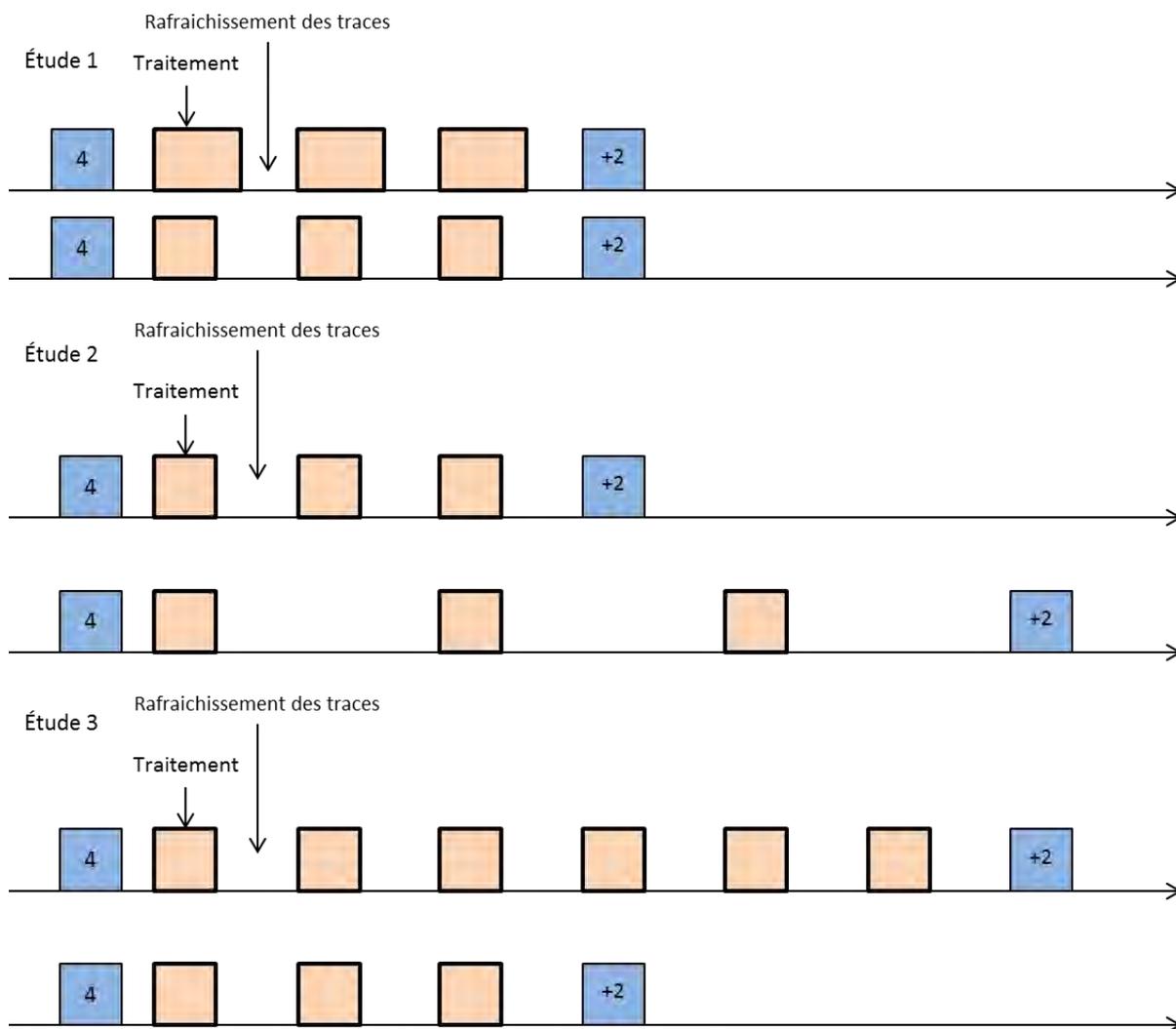


Figure 25. Illustration des ratios temporels des expérimentations 3, 4 et 5.

Un même nombre de tâches interférentes peut induire différentes charges cognitives si le ratio temporel n'est pas conservé constant. Plus le temps nécessaire pour réaliser la tâche interférente est long pour une durée totale fixe et plus la charge cognitive est élevée. À l'inverse, tant que le ratio temporel est gardé constant, alors la charge cognitive est constante quel que soit le nombre de tâches interférentes, car l'oubli en mémoire de travail est lié au temps seulement.

Cette hypothèse est non seulement contraire aux hypothèses permises par le modèle de Baddeley (1986), mais également contraire aux modèles basés sur l'interférence entre éléments pour expliquer l'oubli en mémoire de travail (voir Oberauer & Lewandowsky, 2008 pour une revue). En effet, si l'interférence causée par l'entrée d'un nouvel item en MdT cause l'oubli d'un des items maintenu précédemment en MdT, alors le nombre de tâches interférentes devrait avoir un effet linéaire sur la performance en MdT. Plus le nombre de tâches interférentes à traiter augmente et plus l'oubli en mémoire de travail augmente. À

l'inverse, le modèle TBRS fait l'hypothèse que l'interférence n'a pas, ou très peu, d'effet sur la performance en mémoire de travail (Barrouillet, Portrat, Vergauwe, Diepentale & Camos, 2011 ; Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004 ; Barrouillet *et al.*, 2007 ; Barrouillet & Camos, 2015).

Pour tester cette hypothèse, nous avons utilisé une tâche d'empan complexe similaire à celles utilisées dans les deux premières expérimentations. Deux modalités, proposant un nombre différent de la même tâche interférente ont permis de tester l'hypothèse selon laquelle conserver le ratio temporel constant n'affecterait pas la performance de calcul mental, quel que soit le nombre de tâches interférentes à traiter.

Méthodologie

Participants

Soixante et un participants des classes de 5^e et de 4^e du collège André Abbal de Carbonne ont participé à cette étude. Les passations ont été réalisées en groupe dans la salle informatique du collège. Les parents de tous les participants ont donné un consentement écrit, libre et éclairé, autorisant la participation de leur enfant à cette étude.

Matériel et méthode

Cette expérimentation a utilisé le même protocole que l'expérimentation précédente. Les participants devaient manipuler des séries de termes de calculs de tailles croissantes de 3 à 8 termes. Après chaque terme, une série de tâches de jugement spatial était présentée. Cette série comportait 8 tâches de jugement spatial dans la modalité « 8 carrés » et 4 tâches de jugement spatial dans la modalité « 4 carrés ».

Tâche interférente

La tâche interférente utilisée dans cette expérimentation était la même tâche de jugement spatial que celle utilisée pour les expérimentations 2 et 3, dans la modalité « carrés proches ».

Items à manipuler

Les items à manipuler étaient les mêmes que ceux utilisés dans les deux expérimentations précédentes.

Protocole expérimental

Comme lors de l'expérimentation précédente, les passations étaient collectives et réalisées dans la salle informatique du collège. Les participants réalisaient d'abord une phase de familiarisation, puis un pré-test suivi de l'entraînement sur la tâche de jugement spatial.

À l'issue de ces entraînements, les élèves étaient entraînés sur le protocole expérimental avec deux séries comportant deux termes et une série de trois termes présentées comme exemples. Puis ils réalisaient les deux phases expérimentales, correspondant aux deux modalités de la tâche de distraction. Entre les deux modalités, une pause d'au moins 30 secondes était imposée.

À la fin de la phase expérimentale, un post-test permettait de contrôler un éventuel effet d'apprentissage durant la phase expérimentale. Ce post-test, similaire au pré-test, consistait à réaliser autant de calculs que possible en 1 mn.

Variables dépendantes et hypothèses

Comme lors de l'expérimentation précédente, les données du pré-test et du post-test ont été utilisées avec les différents ordres de présentation des modalités pour contrôler d'éventuels effets d'apprentissage. Les données de l'entraînement à la tâche de jugement spatial ont été utilisées pour conserver les participants ayant fourni au moins 80% de bonnes réponses lors de cette phase d'entraînement.

Lors de la phase expérimentale, le nombre de résultats corrects et le temps de réponse ont été enregistrés, de la même manière que le temps de réaction moyen pour traiter la tâche interférente. Notre hypothèse était que le ratio temporel étant gardé constant tout au long de l'expérimentation, aucune différence en termes de performance au calcul mental ne devrait apparaître en fonction du nombre de tâches interférentes. Le nombre de calculs correctement réalisés devrait donc être similaire entre les deux conditions.

Comme lors de l'expérimentation 4, pour contrôler l'expertise des participants, nous les avons séparés dans deux groupes, un groupe « expert » et un groupe « novice » sur la base des données du pré-test, en utilisant les mêmes seuils de bonnes réponses que ceux issus de l'expérimentation 3. Sur la base des résultats de ces deux expérimentations, nous avons formulé l'hypothèse selon laquelle les participants du groupe « expert » obtiendraient de meilleures performances que ceux du groupe « novice ». Notre hypothèse étant que le nombre

de tâches interférentes n'ayant pas d'influence sur la mémoire de travail, nous n'attendions pas de différences entre les deux modalités de la tâche interférente.

De la même manière que lors de l'expérimentation 4, toutes les hypothèses de l'étude ont été mises à l'épreuve en utilisant des tests t de Student. Pour tenir compte de la faible taille de l'un des deux groupes et du fait que la distribution de certaines variables ne suivait pas une loi normale, les hypothèses les concernant ont également été vérifiées à l'aide de tests non paramétriques. De même que pour l'expérimentation 4, pour faciliter la lecture, tous les résultats reproduits ici sont ceux des tests de Student tant que les résultats des tests non-paramétriques sont en accord.

Résultats

Échantillon

Dans cette étude, comme lors des précédentes, nous avons exclu les participants ayant obtenu moins de 80% de bonnes réponses lors de la phase d'entraînement sur la tâche de jugement spatial. Nous avons ensuite réparti les participants en deux groupes, « novice » et « expert », sur la base de leur nombre de bonnes réponses lors de la phase du pré-test, en utilisant les seuils de bonnes réponses de la première expérimentation. Ceci a résulté en un groupe « novice » de 10 participants et un groupe « expert » de 28 participants.

Effet d'ordre

Des 38 participants de cette étude, répartis dans les deux groupes, 14 ont réalisé la modalité « 8 carrés » en premier et 24 ont réalisé la modalité « 4 carrés » au début. Aucune différence n'est apparue significative en fonction de l'ordre de présentation des modalités expérimentales, à l'exception d'une différence tendancielle sur le nombre d'erreurs réalisées lors du pré-test ($t_{(35.5)}=-1.912$, $p=.064$), les participants ayant commencé par la modalité « 4 carrés » en ayant fait sensiblement plus que les participants ayant commencé par la modalité « 8 carrés ».

Effet d'apprentissage

Le score composite calculé pour le pré-test et pour le post-test est resté similaire ($t_{(37)}=0.923$, $p=.362$), toutefois, le nombre de bonnes réponses a augmenté entre le pré-test et le post-test ($t_{(37)}=-2.227$, $p=.032$). De la même manière, le nombre d'erreurs a augmenté entre le pré-test

et le post-test ($W=2.143$, $p=.032$) tandis que le temps de réponse a diminué ($t_{(37)}=3.315$, $p=.002$).

En considérant les résultats par groupes, le score composite n'a pas changé entre le pré-test et le post-test ni pour le groupe « novice » ($t_{(9)}=0.933$, $p=.375$) ni pour le groupe « expert » ($t_{(27)}=-0.302$, $p=.765$). Comme lors de l'expérimentation 2, le nombre de bonnes réponses n'a augmenté que pour le groupe « novice » ($t_{(9)}=-2.644$, $p=.027$) tandis que le nombre d'erreurs n'a augmenté que pour le groupe « expert » ($t_{(27)}=-2.478$, $p=.020$). Le temps de réponse moyen a diminué entre le pré-test et le post-test pour les deux groupes, « novice » ($t_{(7)}=2.528$, $p=.032$) et « expert » ($t_{(27)}=2.680$, $p=.012$).

Tâche interférente

Le temps de réponse moyen pour traiter les tâches de jugement spatial est resté similaire entre les deux conditions « 4 carrés » et « 8 carrés » ($t_{(37)}=1.217$, $p=.231$). De la même manière, les performances sont restées similaires entre les deux conditions en termes de performance moyenne ($t_{(37)}=1.065$, $p=.294$) comme en termes de performance minimale ($t_{(37)}=-.351$, $p=.727$), indiquant que la tâche interférente a été traitée de la même manière entre les deux conditions.

Ce pattern s'est retrouvé pour les deux groupes, le temps de réaction n'ayant pas changé entre les deux conditions ni pour le groupe « novice » ($t_{(9)}=0.169$, $p=.870$) ni pour le groupe « expert » ($t_{(27)}=1.241$, $p=.225$). De la même manière, le pourcentage moyen de bonnes réponses obtenues pour la tâche interférente est resté similaire entre les conditions pour le groupe « novice » ($t_{(9)}=-0.267$, $p=.796$) comme pour le groupe « expert » ($t_{(27)}=1.850$, $p=.075$) bien qu'il y ait eu une tendance. Le pourcentage de bonnes réponses minimum n'a pas non plus changé entre les conditions pour le groupe « novice » ($t_{(9)}=-0.982$, $p=.352$) ni pour le groupe « expert » ($t_{(27)}=0.289$, $p=.775$).

Performances lors de la tâche principale

Conformément à notre hypothèse, le groupe « novice » a réalisé autant de calculs corrects dans la modalité « 4 carrés » que dans la modalité « 8 carrés » ($t_{(9)}=1.555$, $p=.154$), comme représenté sur la Figure 26. De la même manière, le groupe « expert » a réalisé autant de calculs corrects dans les deux conditions ($t_{(27)}=1.865$, $p=.073$) bien que la différence soit marginale ($M=10.07$ séries correctement réalisées dans la condition « 4 carrés » et $M=8.57$ dans la condition « 8 carrés »).

Les participants du groupe « expert » ont calculé plus de séries sans erreur que les participants du groupe « novice » dans la condition « 4 carrés » ($t_{(36)}=-2.516, p=.016$) et dans la condition « 8 carrés » ($t_{(36)}=-2.866, p=.007$).

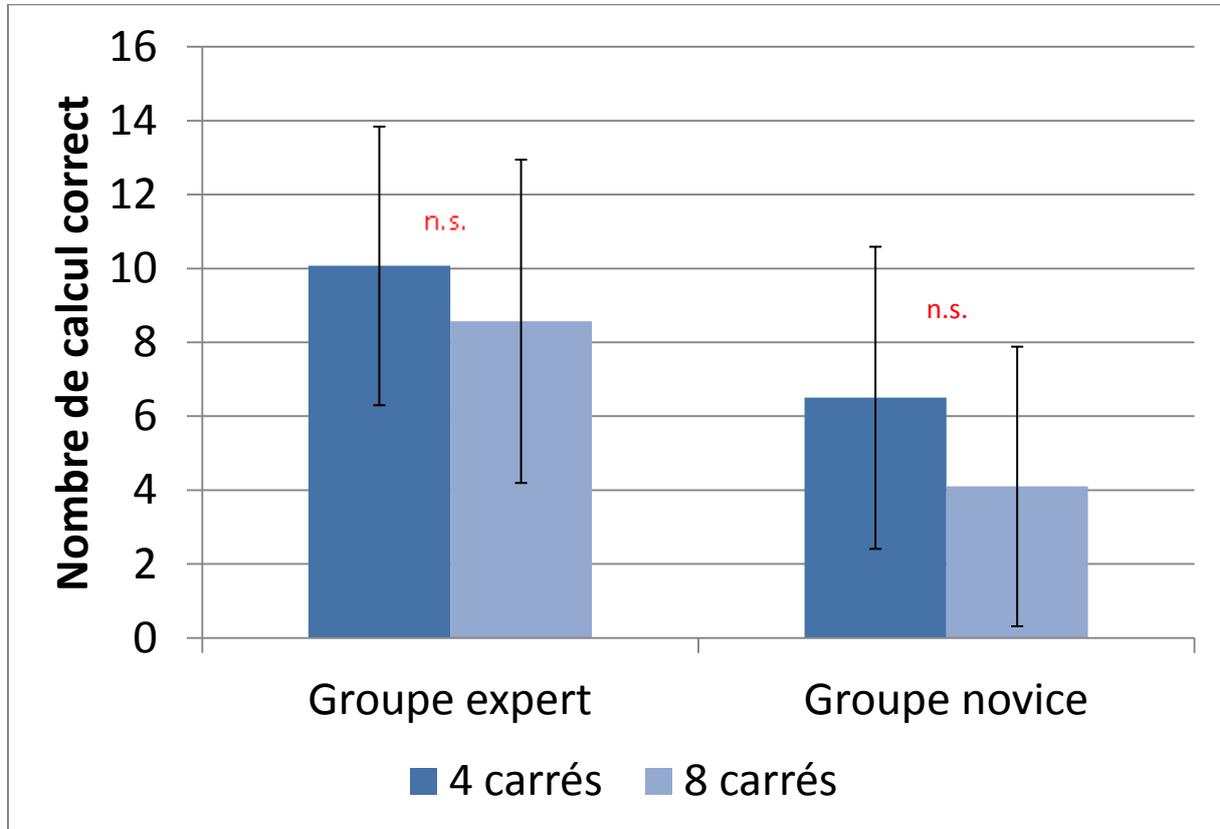


Figure 26. Nombre de séries correctes réalisées lors de l'expérimentation 5

Les participants des deux groupes, « novice » et « expert », ont réalisé autant de calculs corrects dans les deux conditions de la tâche interférente. Les participants du groupe « expert » ont réalisé davantage de calculs corrects que les participants du groupe « novice ».

Discussion

Dans cette expérimentation, nous avons fait varier le nombre de tâches interférentes à traiter tout en maintenant constant le temps disponible pour les traiter. Cette manipulation a permis de faire varier le nombre de tâches interférentes sans modifier le ratio temporel. Les résultats de l'étude montrent que conformément aux prédictions du modèle TBRS, le nombre de tâches interférentes n'a pas d'effet sur la performance en calcul mental des participants, quel que soit leur niveau de connaissances antérieures.

Les participants du groupe « novice » comme ceux du groupe « expert » ont réalisé autant de calculs corrects qu'il y ait quatre ou huit tâches interférentes entre chaque terme, bien qu'il y

ait eu une différence tendancielle entre les performances obtenues par les participants du groupe « expert ». Ainsi, conformément aux prédictions du modèle TBRS, le ratio temporel est le principal déterminant de la performance obtenue lors d'une tâche de mémoire de travail. La tâche interférente a été traitée de manière similaire par les deux groupes et dans les deux conditions, ce qui suggère que les résultats obtenus soient dus au ratio temporel et non à une différence de stratégie utilisée, ce qui était encore une possibilité dans l'expérimentation 3.

Ces résultats sont similaires à de précédentes expériences du modèle TBRS (*e.g.*, Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004 ; Barrouillet *et al.*, 2007 ; 2011) mais ils les étendent à des éléments dont les associations portent du sens, *i.e.* des items pouvant être regroupés en *chunks*, utilisés dans le cadre des apprentissages. Le modèle TBRS permet de nouvelles hypothèses sur l'utilisation des ressources cognitives (*i.e.* de la mémoire de travail) pouvant expliquer des résultats empiriques que les modèles actuellement utilisés ne peuvent expliquer.

En particulier, le modèle TBRS suggère une nouvelle conception de la charge intrinsèque et de la charge extrinsèque. Ces deux charges ne sont pas uniquement déterminées par le nombre d'éléments à traiter mais surtout par le temps disponible et le temps nécessaire pour les traiter. Par exemple, dans le cas d'une tâche durant une minute, avoir dix éléments interférents imposait une charge supérieure à la même tâche d'une minute avec cinq éléments interférents. Cependant, si l'on compare une tâche d'une durée de deux minutes présentant dix éléments interférents et une tâche d'une minute en présentant cinq, elles imposent la même charge cognitive. De la même manière, la charge intrinsèque ne relève pas seulement du nombre d'éléments à maintenir et traiter en MdT, mais également du temps disponible pour le faire.

Discussion générale

Dans ces quatre expérimentations, nous avons montré que les résultats obtenus dans le cadre du modèle TBRS sont transférables à du matériel dont les associations sont porteuses de sens, utilisé dans le cadre des apprentissages, si l'on tient compte de l'expertise des participants. En particulier, nos résultats montrent que la charge en mémoire de travail ne dépend pas seulement du nombre d'éléments interférents mais du rythme de présentation de ces éléments interférents, pour les participants novices. L'expérimentation 3, reproduisant l'expérience du modèle TBRS (Portrat, Camos & Barrouillet, 2009) a mis en évidence que pour une durée totale constante, plus le traitement de la tâche interférente est long et moins la performance au calcul mental est bonne, alors que le nombre de tâches interférentes reste constant. L'expérimentation 4 a prolongé ces résultats en montrant qu'un nombre d'éléments

interférents constant et identique pouvait induire différents niveaux de charge en MdT en fonction du rythme de présentation de ces éléments. À l'inverse, l'expérimentation 5 a montré que si le rythme de présentation des éléments interférents restait constant, alors leur nombre n'avait aucun effet sur la charge en MdT et donc sur la performance obtenue lors d'une tâche de calcul mental.

Ces résultats proposent une nouvelle lecture des résultats empiriques obtenus en utilisant un modèle tel que le modèle en composantes multiples (Baddeley, 1986 ; 2003) pour lequel le nombre d'éléments en MdT est le déterminant de la charge de la MdT. Si la durée de la phase d'apprentissage est gardée constante, alors en effet, le nombre d'éléments est le premier déterminant de la charge cognitive telle qu'exprimée par le modèle TBRS. Cependant, si la durée de la phase d'apprentissage n'est pas contrôlée ou varie, alors le nombre d'éléments n'est plus le premier déterminant de la charge. Par exemple, dans une revue sur l'effet de modalité (Leahy & Sweller, 2011), les auteurs concluent que le rythme de présentation n'a pas d'effet sur la supériorité d'une présentation utilisant les deux modalités, visuelle et verbale, par rapport à la présentation des informations n'utilisant qu'une seule modalité. Ils ne considèrent pas l'amélioration de l'apprentissage lorsque le rythme de présentation est lent par rapport au même matériel d'apprentissage lorsque le rythme de présentation est rapide (Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowalla, 2010). Cet effet de modalité est soumis, comme d'autres effets de la théorie de la charge cognitive, à un renversement lié à l'expertise (Kalyuga *et al.*, 2003).

L'expertise affecte largement nos résultats, le groupe « expert » ayant montré non seulement des performances supérieures à celles des participants du groupe « novice », mais surtout que les différentes modalités expérimentales n'affectaient pas leurs performances. Pour le groupe « expert », tout se passe comme si la charge en MdT restait faible tout au long des différentes modalités expérimentales. Une capacité à regrouper les éléments en *chunks* très rapidement leur permettrait de réduire le nombre d'éléments à maintenir et à rafraîchir en MdT et donc de maintenir une performance acceptable malgré une charge cognitive élevée. L'effet de l'expertise dans le cadre de la CLT est connu pour modifier voire renverser différents effets empiriques (Kalyuga *et al.*, 2003 ; Kalyuga, 2007). Cet effet de l'expertise sur la performance en MdT va au-delà de la CLT et affecte la performance lors de tâches de mémoire de travail dans tous les domaines (voir le chapitre 3.1 et le chapitre 4 à ce sujet, voir aussi Ericsson & Kintsch, 1995 ; Ericsson, 2006 ; Chi, 2006).

Des auteurs ont déjà proposé une équation de la charge cognitive en tant que somme des éléments à manipuler pour chaque type de charge et leurs liens (intra-type de charge et inter-type de charge), ainsi, plus il y a d'éléments à manipuler, et plus la charge augmente (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007). De la même manière, plus les éléments à manipuler entretiennent de liens entre eux et plus la charge augmente. Cette équation est à mettre en lien avec la notion d'arité de la tâche (Cowan, 2014) selon laquelle il serait possible de compter le nombre d'éléments nécessaires à la réalisation de la tâche.

Le modèle TBRS permet une autre approche de ces relations : la charge extrinsèque peut être vue, selon ce modèle, comme le temps nécessaire pour traiter les informations interférentes, plutôt que comme leur nombre. En effet, les expérimentations présentées dans ce chapitre montrent que le nombre de tâches de distraction n'a pas d'effet sur la performance en MdT, contrairement au ratio temporel. À l'inverse, la charge intrinsèque relèverait du temps disponible pour rafraîchir et manipuler les éléments maintenus en mémoire de travail. Plus ce temps est important et plus il sera aisé de maintenir et manipuler un grand nombre d'informations. L'expertise permettrait de rafraîchir et de manipuler plus rapidement les informations maintenues en MdT, diminuant la charge imposée par le traitement des tâches interférentes. Le temps nécessaire pour maintenir et manipuler les informations en MdT diminuant, les participants experts ont besoin de moins de temps disponible pour réaliser ces activités et sont donc moins sensibles à la manipulation du ratio temporel.

Dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, l'expertise est vue comme une réduction de l'interactivité des éléments (Chen, Kalyuga & Sweller, 2015 ; 2016). En réduisant l'interactivité des éléments, l'expertise réduit l'efficacité des effets de la théorie de la charge cognitive. Surtout, l'expertise permet de réduire à la fois la charge intrinsèque et la charge extrinsèque (Chen, Kalyuga & Sweller, 2016). Nos résultats étendent cette conception en considérant l'expertise comme permettant de traiter les éléments maintenus en MdT plus rapidement et donc en réduisant la sensibilité à la manipulation des tâches interférentes.

Ainsi, si l'on tient compte des connaissances antérieures des apprenants, le modèle TBRS permet de formuler des hypothèses nouvelles en psychologie des apprentissages. Non seulement, contrairement aux modèles utilisés jusqu'à présent, le nombre d'éléments interférents importe moins que leur rythme de présentation, mais de plus, le temps nécessaire pour traiter ces éléments importe davantage que leur nombre. Il est ainsi possible qu'un plus faible nombre d'éléments distracteurs puisse induire une charge en MdT supérieure à celle

imposée par un nombre supérieur d'éléments distracteurs présentant un ratio temporel plus faible.

D'autres recherches semblent nécessaires, notamment pour préciser le coût attentionnel lié au regroupement d'informations en *chunks* (Cowan, 2014). Il est possible d'envisager que ce coût évolue avec l'expertise (voir chapitre 4). Surtout, les travaux réalisés dans le cadre de la théorie de la charge cognitive semblent suggérer que cette intégration en *chunks* soit un processus ne comportant qu'une seule étape. En effet, les différentes études portant sur l'effet de modalité (Leahy & Sweller, 2011 ; Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowalla, 2010) montrent que l'effet de modalité n'intervient que lorsque le rythme de présentation est indépendant de l'apprenant. À l'inverse, lorsque le rythme de présentation est contrôlé par l'apprenant, l'effet de modalité disparaît, comme si l'apprenant était expert et avait réduit l'interactivité des éléments. Il est possible que cette disparition traduise une plus grande facilité d'intégration en *chunks* de plus haut niveau lorsque les participants contrôlent le rythme de présentation. Ainsi, lorsque les participants ne contrôlent pas le rythme de présentation, le processus d'intégration en *chunks* pourrait être interrompu par l'arrivée d'une nouvelle information, par nature transitoire et donc requérant le focus attentionnel. À l'inverse, le participant contrôlant le rythme de présentation pourrait former des *chunks* puis passer à l'information suivante sans que le processus de formation ne soit interrompu. Cette hypothèse, bien que purement spéculative pourrait rendre compte de la disparition de l'effet de modalité lorsque les participants contrôlent le rythme de présentation.

Le modèle TBRS semble prometteur pour modéliser la charge cognitive lors d'apprentissages. En prenant en compte les variations dynamiques de l'allocation du focus attentionnel, il permet de prédire des phénomènes contraires aux hypothèses découlant d'autres modèles de la mémoire de travail. Le modèle TBRS pourrait donc théoriquement permettre de décrire plus précisément les variations de charge cognitive lors de phases d'apprentissages et donc permettre une mesure plus précise de ces variations.

Chapitre 9 Modèle TBRS et mesures physiologiques

Introduction

Dans les deux chapitres empiriques précédents, nous avons d'abord étudié la possibilité de mesurer des variations de la charge cognitive à l'aide de mesures physiologiques (Paas *et al.*, 2003). L'électro-encéphalographie s'est révélée être un outil permettant non seulement de mesurer différents niveaux de charge cognitive mais aussi de distinguer l'activité cérébrale liée à la réalisation des différentes tâches d'une situation de multitâches. Dans un second temps, nous avons vérifié qu'un nouveau modèle de la mémoire de travail, le modèle de partage temporel des ressources (TBRS, *e.g.*, Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004), pouvait être utilisé dans le cadre de recherches portant sur la théorie de la charge cognitive. Le chapitre précédent a montré non seulement que ce modèle peut être utilisé dans le cadre de recherches portant sur la CLT, mais également qu'il permet d'étendre le cadre théorique de la CLT en précisant l'influence d'une charge extrinsèque sur la performance d'experts et de novices. De plus, ce nouveau modèle de la mémoire de travail permet de préciser la définition des charges extrinsèques et intrinsèques dans le cadre de la théorie de la charge cognitive.

Ce dernier chapitre empirique consiste en une étude préliminaire. Il s'agit d'une étude de faisabilité pour vérifier si ce nouveau modèle permet de dériver une mesure dynamique de la charge cognitive lors de la manipulation d'informations dont l'association est porteuse de sens.

La théorie de la charge cognitive fait l'hypothèse que la charge intrinsèque et la charge extrinsèque utilisent toutes deux la mémoire de travail. La CLT utilise généralement le modèle de Baddeley (1986) pour décrire la MdT (voir chapitre 2). Le chapitre précédent montre que davantage que le nombre d'éléments maintenus en MdT, le ratio entre le temps nécessaire pour traiter une tâche de distraction et le temps disponible influence la capacité de la mémoire de travail. L'utilisation de la mémoire de travail semble solliciter principalement le lobe frontal et le lobe pariétal, avec un effet de latéralisation dépendant de la nature de l'information manipulée. La boucle phonologique est principalement associée à l'hémisphère gauche et le calepin visuo-spatial à l'hémisphère droit (D'Esposito *et al.*, 1998 ; D'Esposito & Postle, 2015).

L'utilisation de la mémoire de travail est généralement associée à différentes variations électro-encéphalographiques (voir chapitre 3). La sollicitation de la mémoire de travail est ainsi classiquement associée à une synchronisation (*i.e.* une augmentation de la puissance spectrale dans une bande de fréquence) de la bande de fréquence thêta dans les régions frontales et pariétales (*e.g.*, Kahana, Seelig & Madsen, 2001 ; Klimesch, 1999). De la même manière, une désynchronisation du rythme alpha est généralement associée à l'augmentation de la charge en MdT (Klimesch, 1996). Cependant, des études récentes montrent qu'une diminution de la puissance du rythme alpha est souvent associée à une augmentation du nombre d'éléments à maintenir en MdT (Klimesch, 1997 ; Fairclough & Venables, 2006 ; Klimesch, 1999 ; Fukuda, Mance & Vogel, 2015) si l'on contrôle le nombre de distracteurs tandis qu'une augmentation de ce rythme est associée à une augmentation du nombre de distracteurs à inhiber (Foxye & Snyder, 2011 ; Rihs, Michel & Thut, 2007).

Selon la théorie de la charge cognitive, une augmentation de l'interactivité des éléments est associée à une augmentation de la sollicitation de la mémoire de travail (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 pour une revue). Ainsi, selon la CLT, augmenter l'une ou l'autre des charges cognitives ou l'interactivité des éléments devrait avoir le même résultat, une augmentation de la charge en MdT, induisant des variations électro-encéphalographiques.

Le modèle TBRS nous a permis dans le chapitre précédent de préciser la définition des charges, intrinsèque et extrinsèque, comme dépendant du ratio temporel. Ainsi, la modification de ce ratio temporel doit affecter la sollicitation de la mémoire de travail. Selon une autre hypothèse du modèle TBRS, plus une tâche est difficile à réaliser et plus la réalisation de cette tâche sera longue. À l'inverse, plus la mémoire de travail contient d'éléments à maintenir et à rafraîchir et plus les traitements concurrents sont lents (Vergauwe, Camos & Barrouillet, 2014). Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a exploré les corrélats physiologiques de la sollicitation de la mémoire de travail selon les prédictions permises par le modèle TBRS. Néanmoins, l'utilisation d'une ressource centrale, nécessaire à la fois au maintien et au traitement des informations dans le cadre du modèle TBRS a été mise en évidence à l'aide d'un IRM fonctionnel (Vergauwe *et al.*, 2015).

Ainsi, des calculs nécessitant de respecter les priorités de calculs devraient imposer de maintenir davantage d'éléments en mémoire de travail que les calculs sans priorités des expérimentations des chapitres précédents. Selon la théorie de la charge cognitive, de tels calculs impliquent une interactivité plus élevée, puisque les participants doivent maintenir

chacun des différents termes simultanément. De la même manière, en imposant de manipuler davantage de termes simultanément, de tels calculs devraient être plus difficiles à réaliser et donc solliciter le focus attentionnel plus longtemps.

Dans cette étude préliminaire, nous avons utilisé l'électro-encéphalographie pour mesurer le niveau de charge cognitive induite dans deux conditions, une première condition utilisant des éléments impossibles à regrouper en *chunks* présentant une interactivité faible et des éléments à regrouper en *chunks* présentant une interactivité élevée. Pour manipuler le niveau de charge cognitive induite dans chaque condition, la difficulté de la tâche de distraction présentait deux modalités. Contrairement aux expérimentations du chapitre précédent, les éléments à manipuler et regrouper en *chunks* nécessitaient de respecter les priorités de calculs.

Nous avons fait les hypothèses suivantes concernant les deux bandes de fréquences thêta et alpha : concernant le rythme thêta, la puissance de ce dernier étant réputée augmenter avec le nombre d'éléments à maintenir en MdT, nous avons fait l'hypothèse que plus les séries comporteraient de termes, plus la puissance de ce rythme serait élevée. Ce rythme étant également réputé augmenter avec la pression temporelle, nous avons également fait l'hypothèse que la modalité de la tâche de distraction offrant le moins de temps pour rafraîchir et manipuler les éléments en MdT serait associée à des niveaux de thêta plus élevés que l'autre modalité. Nous nous attendions donc à ce que le rythme thêta augmente avec le nombre de termes des séries et avec la difficulté de la tâche de distraction.

Concernant le rythme alpha, cette bande de fréquence étant réputée augmenter avec la nécessité d'inhiber des éléments interférents, nous avons fait l'hypothèse que plus les séries comporteraient d'éléments interférents (*i.e.* plus elles comporteraient de termes) plus la puissance associée au rythme alpha augmenterait. À l'inverse, le rythme alpha diminuant pour faciliter le maintien et la manipulation des éléments en MdT, nous avons fait l'hypothèse que plus la modalité de la tâche de distraction imposerait une grande charge en mémoire de travail (*i.e.* la modalité la plus difficile) et plus l'activité du rythme alpha serait faible. Nous nous attendions donc à ce que le rythme alpha augmente avec le nombre de termes des séries et diminue avec la difficulté de la tâche de distraction.

Méthodologie

Participants

6 participants (3 femmes et 3 hommes) âgés de 29 à 32 ans (moyenne : 29.83, écart-type : 1.17) ont participé à cette étude préliminaire. 4 étaient droitiers et 2 étaient gauchers. Leur plus haut diplôme validé était de 5 à 8 années après le baccalauréat (moyenne : 6, écart-type : 1.55).

Matériel

Le matériel d'enregistrement utilisé lors de cette expérimentation était le même que celui utilisé lors de la première expérimentation (voir chapitre 7). Les données de l'*eye-tracking* n'ayant pas été traitées, seule l'électro-encéphalographie est présentée ici. Néanmoins, ces données ont été enregistrées et les participants ont réalisé l'expérimentation avec une mentonnière permettant de réduire les mouvements de tête.

Électro-encéphalographie : Les données EEG ont été enregistrées à l'aide du même système que celui utilisé lors de l'expérimentation 1 (voir chapitre 7). La seule différence est que les données ont été acquises à une fréquence d'échantillonnage de 2048 Hz.

Méthode

Cette étude a consisté en une réplication de l'expérimentation 3 et de l'expérimentation de Portrat, Barrouillet et Camos (2008). Cette étude comportait donc deux conditions expérimentales, une comportant des items porteurs de sens et une comportant des séries de consonnes dénuées de sens, comportant chacune deux modalités. Cette étude physiologique s'est focalisée sur l'enregistrement des signaux électro-encéphalographiques et oculaires.

Pour plus de simplicité, les deux phases expérimentales correspondant aux deux types d'éléments à maintenir en mémoire seront désignées par le terme de conditions expérimentales et les deux modalités de la tâche de distraction seront désignées par le terme de modalité.

Tâche interférente

La tâche de distraction, et son décours temporel, était identique à celle utilisée lors des expérimentations 2 et 3 (voir chapitre précédent). Les deux modalités de cette tâche interférente étaient la modalité « carrés proches » et la modalité « carrés éloignés ».

Items à manipuler

Items porteurs de sens. Les items à manipuler étaient composés de termes de calculs. Ces termes, similaires à ceux utilisés dans les expérimentations précédentes, étaient générés aléatoirement pour imposer une charge en mémoire de travail supérieure à celle imposée lors des expérimentations du chapitre précédent. En effet un pré-test a montré que les adultes réussissaient mieux que les enfants sur le matériel utilisé précédemment. Par conséquent, les calculs demandés imposaient de respecter les priorités de calcul.

Comme lors des expérimentations précédentes, ils étaient composés d'un terme racine, comportant un chiffre compris entre 1 et 9. Ensuite, ce terme racine était suivi d'une série de termes comportant un opérande et un chiffre compris entre 1 et 9. Le premier des termes suivants était soit une addition soit une soustraction et le second soit une multiplication soit une division pour imposer de maintenir tous les termes en mémoire de travail. Dans les séries plus longues, les termes alternaient addition (ou soustraction) et multiplication (ou division). La forme générale des calculs était donc la suivante : $a + b \times c + d \times e$, avec a , b , c , d et e les termes des calculs utilisés. Contrairement aux expérimentations du chapitre précédent, les participants devaient respecter les priorités de calculs. Comme lors des expérimentations précédentes, les résultats intermédiaires étaient toujours des nombres entiers, positifs et non nuls. Le résultat final du calcul était toujours un entier positif compris entre 0 et 9.

Items dénués de sens. Dans cette condition, les items à manipuler étaient composés de séries de consonnes, présentées une par une comme pour les termes des calculs. Ces séries de lettres étaient similaires à celles utilisées dans l'expérimentation de Portrat, Camos et Barrouillet (2009). Elles ont été générées aléatoirement et vérifiées pour éviter les acronymes porteurs de sens.

Protocole expérimental

À cause de la faible taille de l'échantillon, l'ordre de présentation des modalités n'a pas été balancé entre les participants. Tous ont commencé par la condition « matériel signifiant » avant de réaliser la condition « matériel non signifiant ». La moitié des participants a commencé par la modalité « carrés proches » et l'autre moitié par la modalité « carrés éloignés ». Lorsque les participants commençaient le protocole par la condition « matériel signifiant et carrés proches », ils continuaient par la condition « matériel signifiant et carrés éloignés », suivie de la condition « matériel non signifiant et carrés proches » avant de terminer par la condition « matériel non signifiant et carrés éloignés ». À l'inverse, les

participants ayant commencé par la condition « matériel signifiant et carrés éloignés » ont continués par les conditions « matériel signifiant et carrés proches », « matériel non signifiant et carrés éloignés » et « matériel non signifiant et carrés proches » respectivement.

Quel que soit l'ordre des modalités, tous les participants ont commencé par un entraînement et le pré-test sur le calcul mental. Ce pré-test utilisait le même matériel que lors des expérimentations du chapitre précédent, utilisant des parenthèses pour neutraliser les priorités de calculs. À l'issue de ce pré-test, les participants étaient entraînés à la tâche de jugement spatial, dans ses deux modalités. Quatre séries de dix carrés de chaque modalité étaient présentées, résultant en un entraînement de 80 stimuli.

À l'issue de ces phases d'entraînement, les participants commençaient les séries de calculs, en devant tenir compte des priorités, après une phase d'entraînement sur trois séries, deux de deux termes (donc sans priorités) et une de trois termes (avec priorités). Après la série de trois termes et avant de commencer le bloc expérimental, il leur était demandé de verbaliser la règle des priorités de calculs. La même règle d'arrêt que celle utilisée lors des expérimentations précédentes était utilisée. Chaque série était répétée trois fois, utilisant des termes différents. Lorsqu'un participant donnait trois réponses fausses aux trois répétitions d'une même série, la modalité s'arrêtait et le participant passait à la modalité suivante.

À la fin de l'expérimentation, après les deux modalités de chaque condition, les participants réalisaient un post-test sur le calcul mental, similaire à celui présenté dans les expérimentations du chapitre précédent.

Traitement du signal

Le signal EEG enregistré a ensuite été traité hors ligne à l'aide du logiciel BrainVision Analyzer 2. Il a été re-référencé sur la base du signal enregistré par les électrodes des os mastoïdes puis filtré à l'aide d'un filtre de Butterworth entre 0.1 et 70 Hz, avec un « notch » à 50Hz. Les mouvements oculaires ont été corrigés à l'aide d'une analyse en composantes indépendantes utilisant l'algorithme « Fast ICA » proposé par le logiciel.

Le signal EEG enregistré a été segmenté pour chaque série, en segments d'une durée de 10 secondes. Ces segments ont ensuite été transformés à l'aide d'une Transformée de Fourier Rapide (FFT) pour extraire la puissance associée à chaque bande de fréquence en utilisant une fenêtre de Hamming. Les puissances moyennes associées à chacune des deux bandes de fréquences thêta (4 à 8 Hz) et alpha (8 à 12 Hz) ont été calculées à l'aide du logiciel

BrainVision Analyzer 2.0. Les données ont ensuite été moyennées sur l'ensemble des 32 électrodes pour fournir une mesure globale de l'activité associée au rythme thêta pendant chaque série. Les données des trois répétitions de chaque série ont été moyennées pour chaque participant, puis entre les participants. Deux autres régions d'intérêts, la région frontale et la région pariétale, ont été définies. La région frontale a été définie comme regroupant les 5 électrodes centrées autour de l'électrode Fz (Fz, F3, F7, F4 et F8) et la région pariétale a été définie comme regroupant les 5 électrodes centrées autour de l'électrode Pz (Pz, P3, P4, P7 et P8). L'activité EEG enregistrée dans la région pariétale étant similaire à l'activité moyenne sur l'ensemble du scalp, ces données ne sont pas rapportées dans la partie résultat.

Variables dépendantes et statistiques

Lors de la phase expérimentale, le nombre de résultats corrects et le temps de réponse ont été enregistrés, de la même manière que le temps de réaction pour traiter la tâche interférente.

L'activité EEG moyenne pour chaque série a été calculée pour les deux modalités de la tâche de jugement spatial et dans les deux bandes de fréquences considérées, alpha et thêta.

Sur la base des expérimentations du chapitre précédent, nous nous attendions à ce que la modalité « carrés proches » de la tâche de distraction soit associée à des temps de réaction plus longs que la modalité « carrés éloignés ». Nous avons fait l'hypothèse que cette augmentation des temps de réaction serait associée à une moins bonne performance en termes de nombre de séries réussies.

Concernant le rythme thêta, nous avons fait l'hypothèse que le nombre de terme des séries augmentant, la puissance associée à ce rythme augmenterait. De la même manière, nous nous attendions à ce que la modalité « carrés proches » soit associée à une puissance spectrale supérieure dans cette bande de fréquence.

Concernant le rythme alpha, nous avons fait l'hypothèse que le nombre de distracteurs augmentant, l'activité dans cette bande de fréquence augmenterait également. En revanche, nous nous attendions à observer une activité plus faible dans cette bande de fréquence lors de la modalité « carrés proches » que lors de la modalité « carrés éloignés ».

La taille de l'échantillon étant de seulement 6 participants, les variations interindividuelles étant grandes et les participants n'ayant pas tous réalisé le même nombre de séries, la partie résultats présente des statistiques descriptives uniquement. Les commentaires de ces résultats ne sont donc pas basés sur des statistiques inférentielles.

Résultats

Les six participants de l'étude ont atteint le seuil de 80% de bonnes réponses lors de la phase d'entraînement sur la tâche de distraction. Devant le grand nombre de bonnes réponses et le faible nombre d'erreurs lors du pré-test (moyennes : 19 et 1.33 respectivement) et du post-test (moyennes : 21.3 et 1.83 respectivement), le K-Score utilisé dans les expérimentations précédentes n'a pas été calculé.

Données comportementales

La moitié des participants a commencé l'expérimentation par la modalité « carrés proches » et l'autre moitié par la modalité « carrés éloignés ». Le nombre de séries correctement réalisées dans chaque condition et dans chaque modalité est présenté dans le tableau 2. Un effet d'ordre de présentation semble apparaître pour la condition « calculs » mais pas pour la condition « lettres ».

	Modalité « carrés proches » en premier		Modalité « carrés éloignés » en premier	
	Carrés proches	Carrés éloignés	Carrés proches	Carrés éloignés
Calculs	3,66 (1,53)	8,33 (4,04)	7,66 (4,93)	5,33 (4,16)
Lettres	12 (2,64)	15 (2,65)	13,33 (4,51)	15 (4,36)

Tableau 2. Moyennes et écart-types du nombre de séries réalisés sans erreur en fonction de l'ordre de présentation des modalités.

Les modalités étaient présentées dans le même ordre dans les deux conditions expérimentales.

La tâche interférente semble bien avoir nécessité davantage de temps, environ 30 ms dans la modalité « carrés proches » que dans la modalité « carrés éloignés » pour les deux conditions (voir le tableau 3). Les performances obtenues dans les deux conditions sont restées relativement proches l'une de l'autre. D'un point de vue strictement descriptif, les temps de réaction lors de la condition « lettres » sont plus courts d'environ 20 ms que ceux de la condition « calculs ».

	Performance		Temps de réaction	
	Carrés proches	Carrés éloignés	Carrés proches	Carrés éloignés
Calculs	87,48% (5,79)	96,50% (1,68)	407,41 (29,79)	374,84 (33,74)
Lettres	90,31% (4,41)	97,02 (1,33)	384,50 (24,54)	352,52 (25,92)

Tableau 3. Moyennes et écart-type des performances et temps de réaction obtenus dans l'expérimentation 6

Les performances sont similaires entre conditions pour chaque modalité de la tâche de distraction. Dans les deux conditions, « calculs » et « lettres » les temps de réaction ont été supérieurs pour la modalité « carrés proches » de la tâche interférente.

Nous avons fait l’hypothèse que dans chaque condition, la modalité « carrés proches » de la tâche de distraction serait associée à de moins bonnes performances que la modalité « carrés éloignés ». Comme le montre le tableau 4, les participants ont réalisé sensiblement autant de calculs corrects dans les deux modalités, 5.66 et 6.82 en moyenne pour les modalités « carrés proches » et « carrés éloignés » respectivement.

Si l’on compare les deux conditions expérimentales, il semble que les participants aient réalisé davantage de séries correctes dans la condition « lettres » que dans la condition « calculs ».

	Carrés proches	Carrés éloignés
Calculs	5.66 (3.93)	6.83 (4.02)
Lettres	12.66 (3.39)	13.5 (3.62)

Tableau 4. Moyennes et écart-types du nombre de séries correctement réalisées pour chaque modalité de chaque condition expérimentale

Les participants semblent avoir réussi davantage de séries dans les deux modalités de la condition « lettre » que dans la condition « calculs ».

Toutefois, comme le montre le tableau 5, des performances pour chaque série, il semble qu’un effet de décrochage apparaisse à partir de 5 termes pour les deux modalités de la condition « calculs ». En effet, une grande partie des participants n’a pas réussi à dépasser le nombre de 5 termes par calculs. À partir de ce décrochage, les performances semblent suivre une trajectoire différente en fonction de la modalité de la tâche de distraction.

		3 termes	4 termes	5 termes	6 termes	7 termes	8 termes
Calculs	Carrés proches	11 (6)	12 (6)	5 (6)	5 (3)	1 (2)	0 (1)
	Carrés éloignés	12 (6)	12 (6)	6 (5)	5 (3)	3 (3)	3 (2)
Lettres	Carrés proches	18 (6)	15 (6)	15 (6)	12 (6)	9 (6)	7 (5)
	Carrés éloignés	17 (6)	17 (6)	16 (6)	13 (6)	9 (6)	9 (4)

Tableau 5. Nombre de séries correctement réalisées et taille de l’échantillon par série

Dans la condition « lettres », la majorité des participants atteint 8 items dans les deux modalités. Dans la condition « calculs » le nombre de participants diminue à partir de 6 termes.

Rythme thêta

Les variations de la puissance spectrale dans la bande de fréquence thêta (voir Figures 29 et 30) présentent un pattern similaire à celles des performances comportementales. Nous avons fait l'hypothèse que la puissance associée au rythme thêta serait supérieure dans la modalité « carrés proches » par rapport à la modalité « carrés éloignés », pour les deux conditions. Nous avons également fait l'hypothèse que cette puissance augmenterait avec le nombre d'items.

D'un point de vue purement descriptif, les résultats semblent confirmer une partie de nos hypothèses. Ainsi, la puissance spectrale augmente en fonction du nombre d'éléments en MdT pour la condition « lettres ». Les résultats, présentés dans le tableau 6 ne sont pas aussi clairs pour la condition « calculs ». Dans ce dernier cas, la puissance associée au rythme thêta semble augmenter jusqu'à 5 termes puis diminuer, ce qui correspond au nombre de termes à partir duquel une partie des participants s'est arrêtée.

		3 termes	4 termes	5 termes	6 termes	7 termes	8 termes
Calculs	Carrés	1,134	1,133	1,129	1,105	1,124	1,028
	éloignés	(0.17)	(0.17)	(0.18)	(0.12)	(0.15)	(0.07)
	Carrés	1,153	1,166	1,170	1,038	1,106	1,106 (/)
	proches	(0.16)	(0.20)	(0.19)	(0.10)	(0.02)	
Lettres	Carrés	1,131	1,173	1,174	1,213	1,208	1,237
	éloignés	(0.18)	(0.18)	(0.17)	(0.19)	(0.22)	(0.24)
	Carrés	1,168	1,163	1,175	1,220	1,208	1,265
	proches	(0.15)	(0.16)	(0.18)	(0.21)	(0.20)	(0.22)

Tableau 6. Moyennes et écart-types de la puissance associée au rythme thêta sur l'ensemble du scalp

Dans la condition « lettres », le rythme thêta augmente avec les séries. Dans la condition « calculs », le rythme thêta augmente avant de diminuer pour les séries comportant 6 termes.

Lorsque l'on considère la région frontale, la puissance associée au rythme thêta augmente avec le nombre de termes des séries pour la condition « lettres » mais pas pour la condition « calculs », comme le montrent le tableau 7 et la Figure 28. Dans cette condition, le même pattern que sur l'ensemble du scalp est observé avec, pour la modalité « carrés proches », une augmentation jusqu'aux séries comportant 6 termes, puis une diminution.

		3 termes	4 termes	5 termes	6 termes	7 termes	8 termes
Calculs	Carrés éloignés	1,190 (0.23)	1,189 (0.20)	1,180 (0.22)	1,162 (0.23)	1,224 (0.29)	1,027 (0.09)
	Carrés proches	1,199 (0.21)	1,256 (0.29)	1,284 (0.28)	1,093 (0.16)	1,201 (0.10)	1,152 (/)
	Carrés éloignés	1,190 (0.19)	1,263 (0.22)	1,251 (0.16)	1,321 (0.24)	1,319 (0.29)	1,375 (0.35)
	Carrés proches	1,270 (0.22)	1,273 (0.23)	1,273 (0.24)	1,339 (0.26)	1,338 (0.29)	1,403 (0.30)

Tableau 7. Moyennes et écart-types de la puissance associée au rythme thêta dans la région frontale

La condition « calculs » présente le même pattern que celui observé pour l'ensemble du scalp, la puissance du rythme thêta augmentant jusqu'à 6 termes pour la modalité « carrés proches ». Pour la condition « lettres », la puissance du rythme thêta augmente avec le nombre d'items des séries.

Si l'on considère la condition « lettres », condition imposant le maintien des items seulement, conformément à nos hypothèses, la modalité « carrés proches » est associée à une puissance du rythme thêta supérieure. Dans la condition « calculs », ce pattern n'est observé que pour les séries comportant 3 à 5 items. La diminution observée lors des séries comportant 6 termes est associée à un renversement, la modalité « carrés éloignés » étant alors associée à une puissance du rythme thêta supérieure, jusqu'aux séries comportant 8 termes.

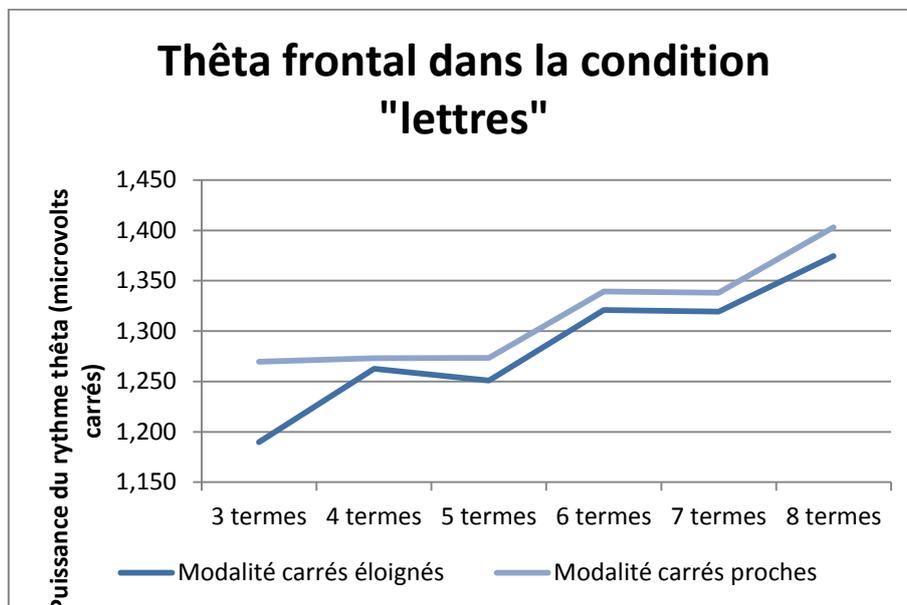


Figure 27. Puissance du rythme thêta dans région frontale lors de la condition "lettres"

La puissance observée sur les cinq électrodes frontales (Fz, F3, F4, F7 et F8) augmente avec le nombre d'items à maintenir et est supérieure pour la modalité « carrés proches » de la tâche de distraction.

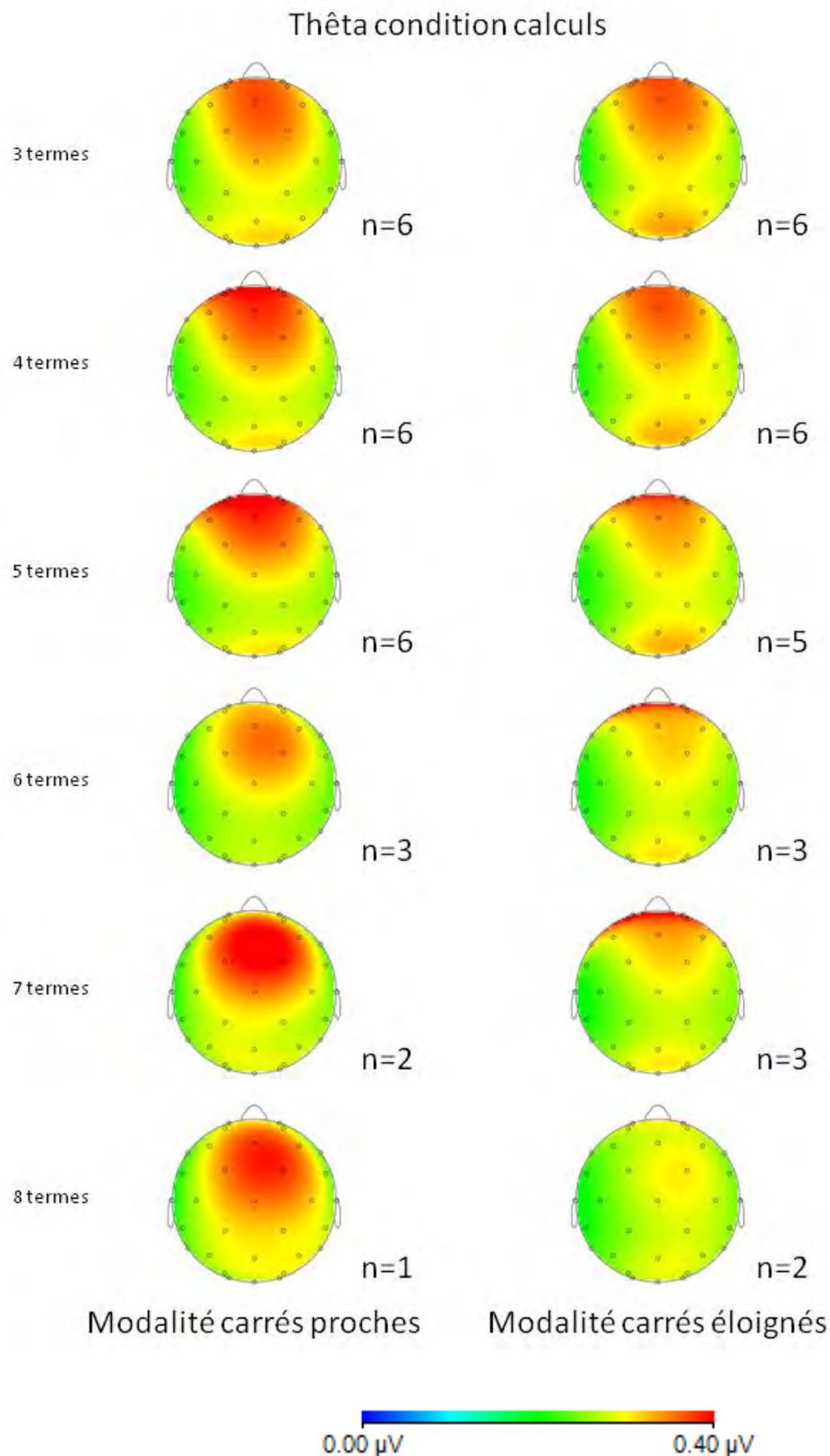


Figure 28. Puissance du rythme thêta dans la condition "calculs"

La puissance du rythme thêta augmente entre les séries comportant 3 à 5 termes, puis diminue. La puissance du rythme thêta semble supérieure dans la modalité « carrés proches ».

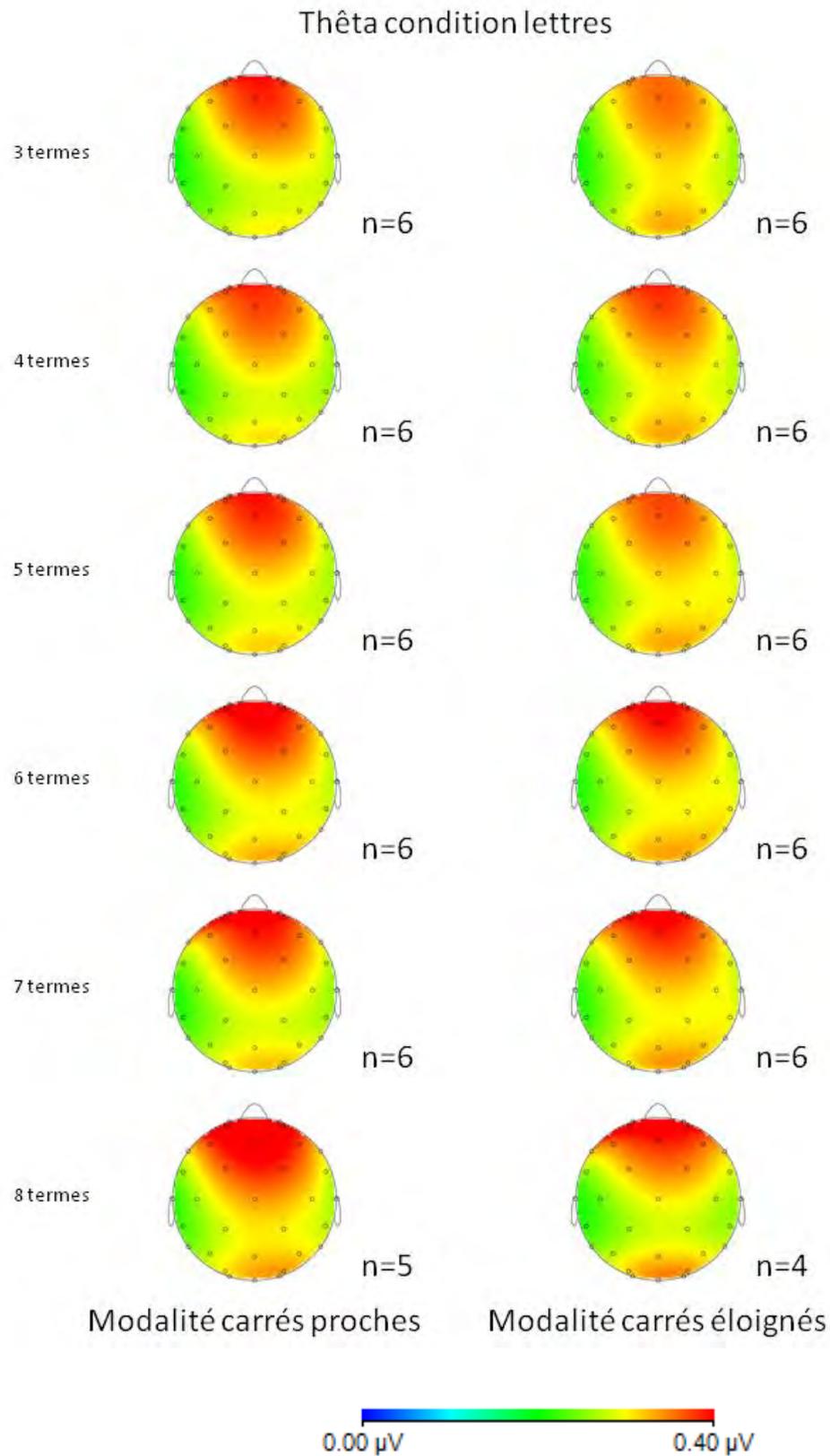


Figure 29. Puissance du rythme thêta dans la condition "lettres"

L'activité du rythme thêta augmente en fonction du nombre de termes de la série dans la région frontale. Elle est supérieure dans la modalité « carrés proches ».

Rythme alpha

Lorsque l'on considère le rythme alpha (voir Figures 32 et 33) sur l'ensemble du scalp et sur la région frontale, un pattern similaire est observé, comme l'indiquent les tableaux 8 et 9. Dans la condition « calculs », la puissance associée au rythme alpha est supérieure pour la modalité « carrés éloignés » lors des séries comportant 4 termes jusqu'aux séries comportant 7 termes, les séries comportant 3 et 8 termes présentant une puissance supérieure dans la modalité « carrés proches ».

Dans les deux modalités de cette condition, une diminution de la puissance spectrale associée à la bande de fréquence alpha est observée entre les séries présentant 5 termes et celles comportant 6 termes. Cette diminution correspond à la diminution de la taille de l'échantillon, de 6 à 3 participants dans la modalité « carrés proches » et de 5 à 3 dans la modalité « carrés éloignés ». Dans la modalité « carrés éloignés », une diminution similaire est observée entre les séries comportant 7 et 8 termes.

		3 termes	4 termes	5 termes	6 termes	7 termes	8 termes
Calculs	Carrés éloignés	1,614 (0.74)	1,758 (0.85)	1,901 (0.93)	1,739 (1.13)	1,803 (1.19)	1,111 (0.25)
	Carrés proches	1,723 (0.84)	1,753 (0.91)	1,773 (0.90)	1,074 (0.23)	1,181 (0.16)	1,271 (/)
	Carrés éloignés	1,836 (0.97)	1,904 (1.01)	1,969 (1.06)	1,915 (0.96)	1,897 (1.00)	2,093 (1.28)
	Carrés proches	1,812 (0.89)	1,869 (0.99)	1,851 (0.98)	1,836 (0.93)	1,822 (0.94)	2,024 (0.98)

Tableau 8. Moyennes et écarts-types des puissances associées au rythme alpha sur l'ensemble du scalp

Dans la condition « calculs », une diminution est observée lors des deux modalités entre les séries comportant 5 et 6 termes, correspondant à la diminution de la taille de l'échantillon. Une autre diminution est observée dans la modalité « carrés éloignés » entre les séries de 7 et 8 termes.

Dans la condition « lettres », la puissance associée au rythme alpha semble augmenter entre les séries comportant 3 et 5 termes lors de la modalité « carrés éloignés » avant de diminuer entre les séries comportant 5 à 7 termes puis d'augmenter de nouveau. Dans la modalité « carrés proches », la puissance du rythme alpha semble rester stable entre les séries comportant 3 termes et celles comportant 7 termes, avant d'augmenter lorsque les séries comportent 8 termes. Comme l'illustre la Figure 31 pour la région frontale, dans la condition

« lettres », la puissance associée au rythme alpha est plus élevée dans la modalité « carrés éloignés » que dans la modalité « carrés proches ».

		3 termes	4 termes	5 termes	6 termes	7 termes	8 termes
Calculs	Carrés éloignés	1,308 (0.52)	1,427 (0.57)	1,571 (0.69)	1,506 (0.85)	1,575 (0.88)	1,043 (0.20)
	Carrés proches	1,404 (0.53)	1,420 (0.56)	1,417 (0.55)	1,009 (0.24)	1,121 (0.12)	1,178 (/)
	Carrés éloignés	1,555 (0.70)	1,608 (0.71)	1,687 (0.77)	1,632 (0.66)	1,619 (0.69)	1,727 (0.97)
	Carrés proches	1,517 (0.58)	1,528 (0.64)	1,523 (0.64)	1,526 (0.61)	1,514 (0.62)	1,647 (0.65)

Tableau 9. Moyennes et écarts-types de la puissance spectrale associée au rythme alpha dans la région frontale

La puissance du rythme alpha dans la modalité « carrés éloignés » augmente entre les séries comportant 3 et 5 lettres, puis diminue jusqu'aux séries comportant 7 lettres avant d'augmenter à nouveau. Dans la modalité « carrés proches », la puissance du rythme alpha reste relativement stable jusqu'aux séries comportant 7 lettres avant d'augmenter également.

Comme l'indique la Figure 31, la puissance associée au rythme alpha était supérieure dans la modalité « carrés éloignés » par rapport à la modalité « carrés proches ».

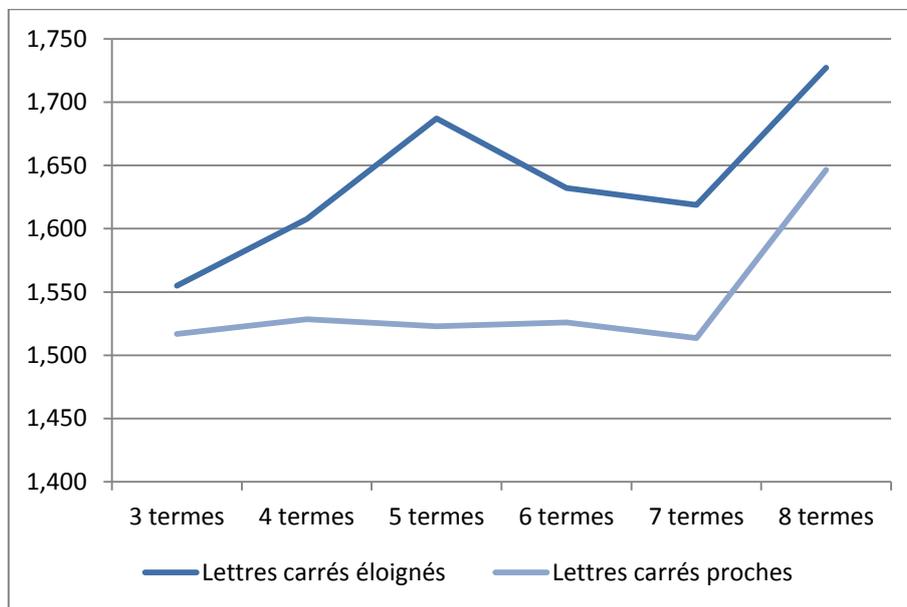


Figure 30. Puissance du rythme alpha dans région frontale lors de la condition "lettres"

Cette puissance est restée relativement stable dans la modalité « carrés proches » jusqu'aux séries comportant 7 lettres. Dans la modalité « carrés éloignés », elle augmente jusqu'à 5 lettres puis diminue jusqu'à 7 lettres et augmente lors des séries comportant 8 items.

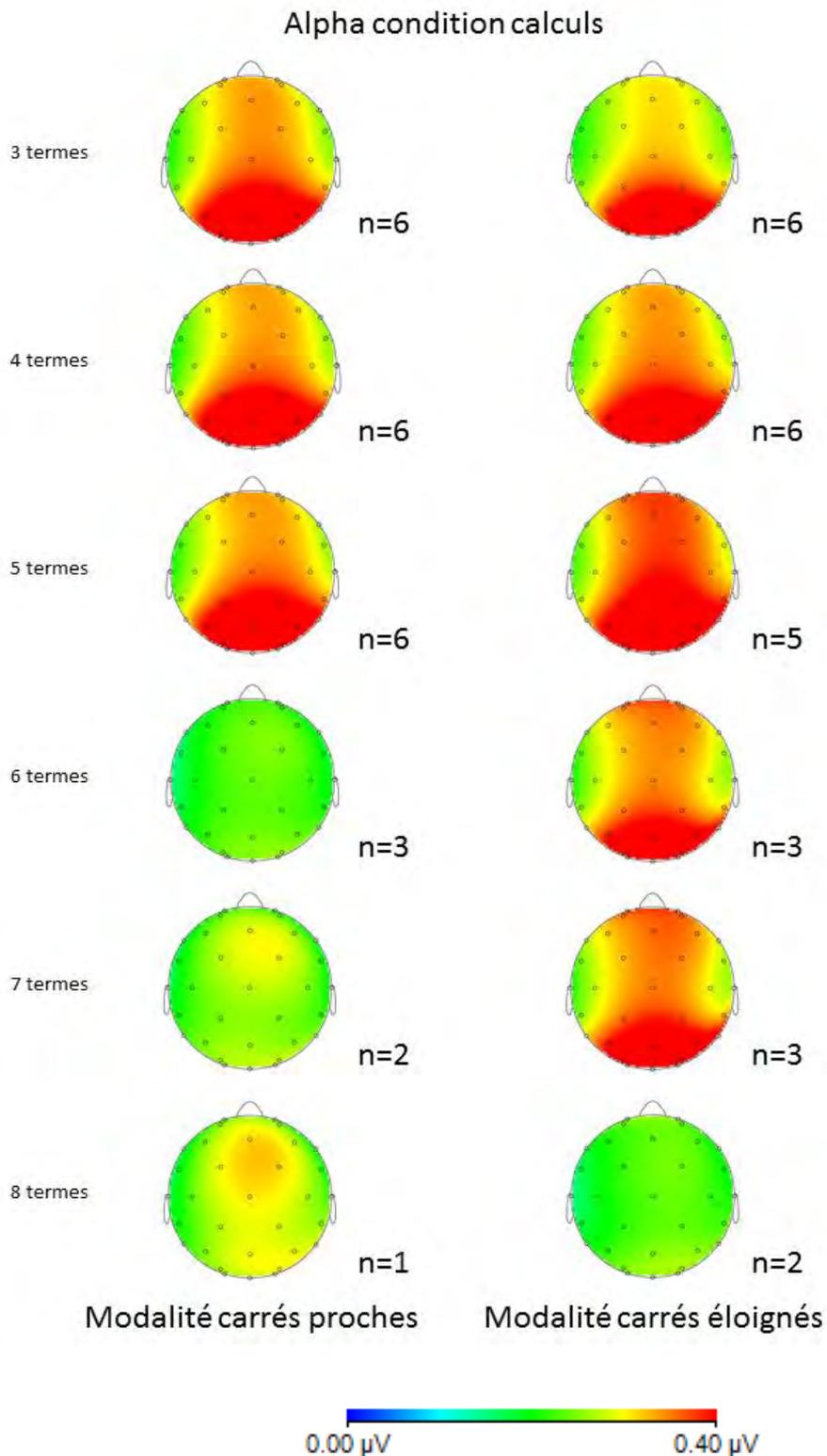


Figure 31. Puissance du rythme alpha dans la condition "calculs"

La puissance du rythme alpha diminue entre les séries comportant 5 et 6 termes dans les deux modalités de la tâche de distraction. Pour les séries comportant de 4 à 7 termes, la puissance du rythme alpha est supérieure dans la modalité « carrés éloigné ».

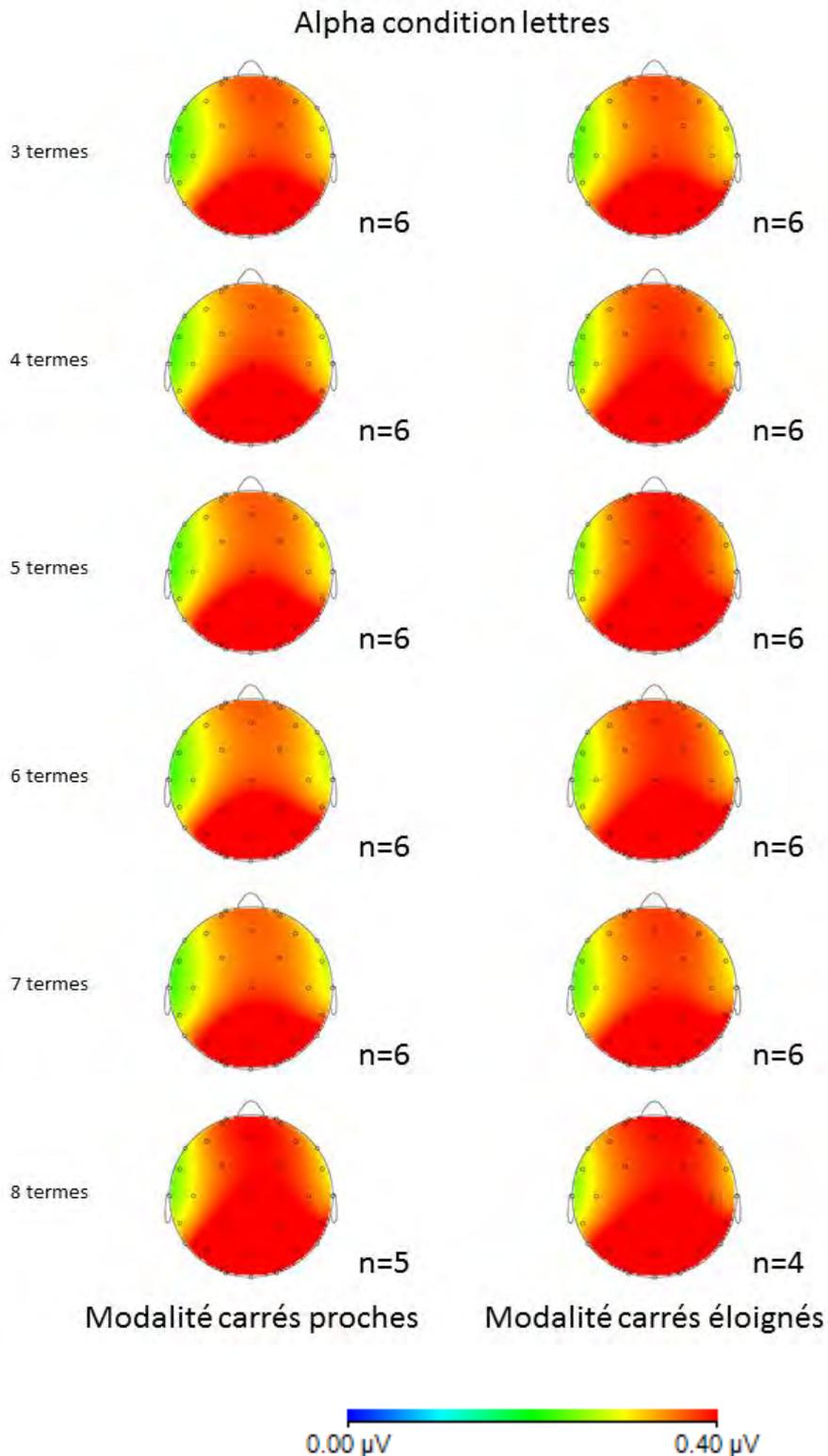


Figure 32. Puissance du rythme alpha dans la condition "lettres"

La puissance spectrale dans la bande de fréquence alpha augmente avec le nombre de lettres à maintenir en MdT jusqu'à 5 et 4 lettres dans les modalités « carrés éloignés » et « carrés proches » respectivement. Elle diminue ensuite jusqu'aux séries comportant 7 lettres puis augmente avec 8 lettres. Elle est supérieure dans la modalité « carrés éloignés ».

Discussion

L'objectif de cette étude préliminaire était de tester la faisabilité de dériver une mesure objective de la charge cognitive dans le cadre du modèle TBRS. Pour cela, nous avons manipulé deux variables, le type d'éléments à maintenir en MdT et la difficulté de la tâche de distraction. Dans une première condition, la tâche imposait de maintenir des éléments en mémoire de travail et de les manipuler. Dans la seconde condition, la tâche imposait seulement de maintenir des éléments en mémoire de travail. La tâche de distraction utilisée, une tâche de jugement spatial, sollicitait le focus attentionnel pendant une durée variable selon la modalité de cette tâche.

Une partie de nos résultats, concernant la condition expérimentale nécessitant de maintenir et manipuler des informations simultanément peut être expliquée par un effet d'apprentissage, les participants réussissant mieux la tâche dans la seconde modalité de la tâche interférente. Cependant, dans les deux conditions expérimentales, le temps mis pour réaliser la tâche de distraction était plus important dans sa modalité « carrés proches » (*i.e.* la modalité la plus difficile) que dans sa modalité « carrés éloignés » (*i.e.* sa modalité la plus facile). Ceci indique qu'au moins une partie des différences entre les deux modalités est due aux différences de ratio temporel entre le temps nécessaire pour réaliser la tâche de distraction et le temps disponible pour le faire et traiter la tâche principale. Toutefois, les temps de réaction pour traiter la tâche de distraction sont plus élevés dans la condition « calculs » que dans la condition « lettres ». Il est difficile d'écarter complètement l'hypothèse d'un biais dû à la faible taille de l'échantillon, cependant, il est également possible d'envisager l'hypothèse selon laquelle la tâche principale aurait affecté ces temps de réaction. En effet, des études du modèles TBRS ont déjà montré que la sollicitation de la MdT a un effet sur une autre tâche concurrente, augmentant le temps de réaction de la tâche concurrente d'environ 50 ms par éléments à maintenir en MdT (Vergauwe, Camos & Barrouillet, 2014)

Si le nombre de séries correctement réalisées dans la condition imposant de manipuler les informations maintenues en MdT semble similaire entre les deux modalités de la tâche interférente, il est possible qu'il s'agisse d'un effet de la faible taille de l'échantillon. En effet, les résultats pour les séries comportant le plus grand nombre de termes semblent indiquer une différence entre les deux modalités de la tâche de distraction. Ce résultat est semblable à celui de l'expérimentation 2, dans laquelle un faible nombre de séries réalisées n'avait pas permis de déterminer de différences claires entre les deux modalités de la tâche de distraction. Comme l'expérimentation 3 avait permis de mettre ces différences en évidence en augmentant

le nombre de séries à réaliser, une réplication de cette étude préliminaire sur davantage de participants pourrait permettre de mettre en évidence les différences attendues.

Les variations du rythme thêta lors de la condition imposant de manipuler les informations maintenues en mémoire de travail semblent soumises à un problème de taille d'échantillon similaire. En effet, en raison de la diminution de la taille de l'échantillon à la moitié de la condition, il est difficile d'interpréter les résultats et notamment la diminution de la puissance spectrale dans la bande de fréquence du rythme thêta au milieu de l'expérimentation. Le protocole expérimental ne permet pas de déterminer si les différences observées reflètent des différences interindividuelles, chaque personne présentant des différences en termes d'activité EEG, ou des différences au niveau des stratégies utilisées. Cette diminution après une augmentation, suivie d'une nouvelle augmentation est similaire à la variation des temps de réponses aux calculs des participants du groupe novice de l'expérimentation 3 (données non présentées). Les temps nécessaires pour saisir les calculs augmentaient linéairement avec le nombre de termes pour le groupe novice, jusqu'à ce qu'une partie conséquente du groupe s'arrête. À partir de cette série, les temps de réaction diminuaient largement avant d'augmenter plus lentement. La répétition de ce pattern est un argument pour expliquer les variations du rythme thêta par la variation du nombre de participants dans le groupe considéré.

Toutefois, en dehors de la diminution en milieu d'expérimentation, la puissance du rythme thêta augmente lors de la première moitié de la condition, puis, après cette diminution, augmente de nouveau pendant la seconde moitié de la condition, conformément à nos hypothèses. De plus, nous avons fait l'hypothèse que la puissance du rythme thêta serait supérieure dans la modalité la plus coûteuse de la tâche de distraction, ce qui semble être le cas pour toutes les séries à l'exception d'une. Ainsi, selon la théorie de la charge cognitive, le rythme thêta serait sensible à la manipulation de la charge extrinsèque, telle qu'elle peut être décrite en utilisant le modèle TBRS. De la même manière, l'augmentation du rythme thêta avec le nombre d'éléments à maintenir et manipuler en MdT en fait un indicateur de la charge intrinsèque, même si cette affirmation reste à confirmer.

La puissance associée au rythme thêta semble un indicateur de la sollicitation de la mémoire de travail dans une tâche d'empan complexe, même si une réplication de cette étude sur plus de participants permettrait d'interpréter le pattern obtenu entre cinq et six éléments en mémoire de travail.

Dans la condition de calculs, le rythme alpha a présenté un pattern similaire à celui du rythme thêta, augmentant jusqu'à un décrochage en milieu de condition, coïncidant avec l'arrêt de la condition pour une partie des participants. Cette variation est donc difficile à interpréter, pour les mêmes raisons que pour le rythme thêta. En dehors de cette diminution, la puissance du rythme alpha semble augmenter au cours de la condition dans les deux modalités, à l'exception d'une série dans la modalité la plus facile des deux (*i.e.* séries de 8 termes dans la modalité « carrés éloignés »). Conformément à nos hypothèses, la puissance du rythme alpha semble inférieure dans la modalité la plus difficile de la tâche de distraction comparée à la modalité la plus difficile.

Les résultats concernant la condition imposant uniquement le maintien d'éléments en mémoire de travail, la condition « lettres », indiquent une augmentation de la puissance du rythme thêta en fonction du nombre d'éléments à maintenir en MdT, plus principalement au niveau de la région frontale. Ces résultats sont similaires à ceux classiquement trouvés dans la littérature (voir Kahana, Seelig, & Madsen, 2001 pour une revue). Conformément à nos hypothèses, cette puissance est supérieure dans la modalité la plus difficile de la tâche de distraction, ce qui est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle le rythme thêta reflète un mécanisme de maintien des éléments en MdT. Plus ce maintien est difficile et plus l'activité du rythme thêta augmente. Selon le modèle TBRS, plus la tâche de distraction nécessite de temps, et moins il en reste pour rafraîchir les items maintenus en mémoire de travail. Des études précédentes ayant montré que la pression temporelle induisait une augmentation de la puissance du rythme thêta (Slobounov *et al.*, 2000), il est cohérent que le rythme thêta soit supérieur dans la modalité laissant le moins de temps pour traiter la tâche principale.

Ainsi, indépendamment des résultats de la condition imposant maintien et manipulation, ceux de la condition « lettres » semblent indiquer que l'électroencéphalographie, et plus particulièrement le rythme thêta, peut être un indicateur de la sollicitation de la MdT. Dans le cadre de la théorie de la charge cognitive, l'EEG peut permettre une mesure dynamique de la charge intrinsèque.

Conformément à nos hypothèses, le rythme alpha a augmenté avec le nombre d'éléments à maintenir en MdT, présentant une relative diminution entre les séries de 5 items et celles de 7 items dans la condition « lettres ». De plus la puissance du rythme alpha était supérieure dans la modalité la plus facile de la tâche interférente.

Le fait que la puissance associée au rythme alpha se soit révélée supérieure dans la modalité la plus facile de la tâche de distraction, dans les deux conditions expérimentales est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle deux processus généreraient des variations différentes du rythme alpha (Capilla, Schoffelen, Paterson, Thut & Gross, 2014). Le rythme alpha étant associé à l'inhibition de stimuli interférents, l'augmentation de la demande d'inhibition génèrerait une augmentation de la puissance du rythme alpha (Sauseng *et al.*, 2009). À l'inverse, une augmentation de la charge en mémoire de travail, imposant de maintenir davantage d'éléments sans les inhiber serait associée à une diminution de la puissance du rythme alpha (Fukuda, Mance & Vogel, 2015). Selon le modèle TBRS, le facteur principal de l'oubli est le déclin temporel, l'inhibition de l'interférence n'ayant que peu d'effet. Ainsi, notre modalité la plus difficile serait associée à une plus grande nécessité de ne pas inhiber les items maintenus en MdT et donc à une diminution de la puissance spectrale du rythme alpha.

Le rythme alpha pourrait donc permettre une mesure de la charge intrinsèque, la puissance de ce rythme diminuant avec la sollicitation de la mémoire de travail telle qu'elle est définie par le modèle TBRS. De plus, il pourrait permettre une mesure de la charge extrinsèque dans la définition que permet le modèle TBRS, une augmentation de la difficulté des traitements de la tâche interférente étant associée à une diminution de la puissance du rythme alpha.

Étant donné que le rythme alpha diminue lors de la sollicitation de la MdT pour éviter d'inhiber des éléments pertinents, le fait que le niveau d'activité moyen dans cette bande de fréquence soit supérieur lors de la condition « lettres » par rapport à la condition « calculs » indiquerait que la condition présentant l'interactivité la plus élevée impose la diminution du rythme alpha la plus grande. Ainsi, la différence d'interactivité en fonction des éléments à traiter serait reflétée davantage par le rythme alpha, tandis que les deux rythmes se sont montrés sensibles à la manipulation de la tâche de distraction, ce qui correspond à la charge extrinsèque dans le cadre de la CLT. Le modèle TBRS permettrait donc de dériver une mesure objective et dynamique de la charge cognitive, sensible aux différents facteurs affectant cette charge cognitive tels que les décrits par la théorie de la charge cognitive.

Discussion

La première expérimentation a montré que l'électro-encéphalographie pouvait permettre de mesurer des variations de charge cognitive dans un environnement de multitâches tant que la limite de la sollicitation des ressources n'est pas atteinte. Ainsi les participants aux performances les plus faibles atteignent cette limite plus rapidement que les participants aux meilleures performances. Ces résultats apportent un nouvel éclairage sur les nombreux résultats incohérents observés dans la littérature sur le lien entre puissance spectrale et variation de charge. Sur la base des performances obtenues lors de la réalisation de la tâche, l'EEG permet de distinguer différents groupes de participants et de proposer une mesure de l'investissement de leurs ressources cognitives. Toutefois, le protocole utilisé ne nous a pas permis de décrire les différences interindividuelles observées en termes de différences de ressources cognitives disponibles ou de stratégies utilisées. Lorsque nous avons utilisé les informations fournies par l'*eye-tracking* pour renseigner le signal EEG, des différences intra-individuelles ont émergé en fonction de la tâche réalisée. Ces différences mettent en évidence l'importance de la nature de la tâche pour l'observation de tel ou tel rythme et peuvent être en partie responsables des différences de résultats observées dans la littérature. Ainsi, cette première expérimentation a mis en évidence que l'électro-encéphalographie, éventuellement couplée à l'*eye-tracking* pouvait être un outil de mesure de la charge cognitive objectif et dynamique.

Les expérimentations suivantes, utilisant des mesures comportementales, ont montré que le modèle TBRS pouvait être utilisé dans le cadre de recherches en *instructional design*, utilisant des informations pouvant être regroupées en *chunks* sur la base du sens. Différentes hypothèses permises par le modèle en utilisant des items ne pouvant être regroupés en *chunks* s'appliquent également lorsque l'on utilise des items pouvant être regroupés en *chunks*. Toutefois, ces résultats s'appliquent seulement dans le cas de participants novices, pas dans le cas de participants experts.

Ainsi, faire varier la tâche interférente pour modifier le ratio temporel affecte la performance des novices mais pas celle des experts. Lorsque le temps disponible pour rafraîchir et manipuler des éléments d'information diminue, la performance obtenue diminue également. Ce résultat se retrouve lorsque l'on utilise exactement la même tâche expérimentale, en ne faisant varier que le temps disponible pour traiter la tâche interférente, ce qui d'après le modèle TBRS revient à faire varier le temps disponible pour rafraîchir et manipuler les

Discussion

informations maintenues en MdT. Ainsi, davantage que le nombre de tâches interférentes, le ratio entre le temps nécessaire pour traiter ces tâches interférentes et le temps disponible pour le faire affecte la performance des participants. Ce dernier point est mis en évidence par la dernière expérimentation de ce chapitre, dans laquelle le ratio temporel est maintenu constant mais le nombre de tâches interférentes est manipulé sans affecter la performance des participants, experts ou novices.

Ce nouveau modèle permet de préciser la définition des différents types de charges cognitives (intrinsèque et extrinsèque) décrites par la théorie de la charge cognitive. En effet, davantage que la quantité d'informations traitées par les participants, le temps nécessaire pour les traiter explique la sollicitation des ressources cognitives des participants. La charge extrinsèque dépendrait donc davantage du temps pendant lequel elle sollicite le focus attentionnel que du nombre d'éléments qu'elle impose de traiter. À nombres d'éléments interférents égaux, deux conditions peuvent induire différents niveaux de charge, la condition dans laquelle les éléments interférents nécessitent davantage de temps ou laissant moins de temps disponible induisant davantage de charge cognitive. Ainsi, une condition présentant un nombre faible nombre d'éléments interférents pourrait théoriquement induire une charge cognitive supérieure à celle induite par une condition présentant un plus grand nombre d'éléments interférents nécessitant moins de temps, une hypothèse contraire aux prédictions du modèle de Baddeley.

Toutefois, ces résultats ne fonctionnent que sur les groupes de participants novices, les participants experts obtenant des performances similaires dans les deux modalités de la tâche de distraction lors de toutes les expérimentations. Selon la CLT, l'expertise, permet de réduire l'interactivité du problème, ce qui est la cause de la disparition des différents effets empiriques. Ainsi, avec l'expertise, les apprenants sont moins sensibles à la charge extrinsèque, ce qui se retrouve dans les expérimentations du chapitre 8. La manipulation de la tâche de jugement spatial, donc de la charge extrinsèque n'a pas eu d'effet sur les participants experts, ces derniers étant moins sensibles à cette charge que les participants novices. L'expertise permet donc, du point de vue du modèle TBRS, de s'affranchir du ratio temporel.

L'utilisation de ce modèle dans le cadre de la théorie de la charge cognitive permet donc de répondre à la limite théorique posée, la prise en compte des variations temporelles de l'utilisation de la MdT, mais également de proposer une nouvelle définition de la charge extrinsèque, comme ratio temporel et non plus comme nombre d'éléments et leurs liens.

La dernière expérimentation de la thèse a mis en évidence que le modèle TBRS pouvait permettre de proposer une mesure objective et dynamique de la charge cognitive. En effet, reproduisant une tâche d'empan complexe telle que celles utilisées précédemment mais augmentant l'interactivité des éléments, les deux bandes de fréquences électro-encéphalographiques étudiées ont montré des variations en fonction du nombre d'éléments à maintenir et en fonction de la tâche interférente.

Plus précisément, la puissance associée à la bande de fréquence thêta a augmenté avec la sollicitation de la mémoire de travail. Plus les séries comportaient d'éléments et plus le rythme thêta augmentait. De la même manière, lorsque la tâche interférente laissait peu de temps pour rafraîchir et manipuler les informations maintenues, la puissance du rythme thêta était supérieure à celle observée lorsque la tâche interférente était plus rapide à traiter.

La puissance associée au rythme alpha, réputée réagir au nombre d'éléments interférents et à la sollicitation de la MdT augmentait avec le nombre de termes à traiter dans la série, et donc avec le nombre d'éléments interférents à traiter. Plus les séries comportaient de tâches de distractions et plus la puissance associée au rythme alpha augmentait. En revanche, à nombre d'éléments interférents égal, la puissance du rythme alpha était moindre lorsque la modalité de la tâche interférente laissait peu de temps disponible pour rafraîchir et manipuler les éléments maintenus en mémoire de travail.

Ainsi, le modèle TBRS permet de répondre à la question théorique posée, dépassant cet objectif en permettant de préciser la définition des charges cognitives, intrinsèque et extrinsèque, décrites par la CLT, mais il permet également d'envisager une mesure dynamique fiable de la charge cognitive.

Limites

Une des hypothèses centrales du modèle TBRS est que le déclin temporel explique l'oubli en mémoire de travail, l'interférence n'étant pas liée à cet oubli. Cependant, dans le cadre de nos expérimentations, nous n'avons pas étudié l'effet de l'interférence, nous l'avons même paralysé lorsqu'il aurait pu expliquer une partie de nos résultats (expérimentation 4). En effet, nous avons étudié l'effet du déclin temporel sur la performance en MdT en utilisant des tâches de distraction similaires ou identiques. Si un effet d'interférence avait dû se produire, il se serait donc produit de la même manière, ou de manière similaire, entre nos conditions expérimentales. Il serait donc impossible d'observer une différence liée à l'interférence entre

Discussion

nos conditions expérimentales. Si l'interférence fonctionne aussi sur la proximité sémantique, alors faire l'impasse sur ce phénomène tout en utilisant du matériel porteur de sens est plus susceptible de masquer certains résultats. Néanmoins, l'objectif de ce travail de thèse n'était pas de remettre en question le modèle TBRS mais de proposer et tester une réponse à deux limites de la CLT identifiées. De ce point de vue, le modèle TBRS permet de répondre aux deux limites identifiées de la théorie de la charge cognitive, même si des travaux supplémentaires devront explorer le rôle de l'interférence dans le modèle TBRS.

De plus, ce travail ne s'est pas attaché à décrire l'utilisation de la mémoire de travail lors de séances d'apprentissages réelles. De la même manière, ce travail ne s'est pas non plus intéressé à répliquer des effets classiques de la théorie de la charge cognitive, par exemple l'effet de modalité ou l'effet de l'information transitoire, en utilisant le modèle TBRS comme cadre explicatif. L'objectif n'était pas de proposer une nouvelle manière d'optimiser les apprentissages *per se*, mais plutôt d'apporter une contribution théorique et méthodologique à un modèle permettant déjà d'optimiser les apprentissages.

Les deux effets que sont l'effet de modalité et l'effet de l'information transitoire ouvrent sur une autre limite de ce travail de thèse, à savoir la question de la création de *chunks*. Ce regroupement d'informations en unités nécessite de l'attention et est sensible à la manipulation du ratio temporel. Préciser la nature de cette opération, notamment en définissant le temps nécessaire semble être une prochaine étape pour l'utilisation du modèle TBRS dans le champ de l'*instructional design*. Cela pourrait par exemple permettre de préciser pour quelle raison, lorsque le rythme de présentation n'est pas contrôlé par les participants, la performance diminue. Il pourrait s'agir d'un effet d'interférence entre l'entrée en MdT de nouvelles informations tandis que les précédentes ne sont pas encore regroupées en *chunks*. Une autre hypothèse pourrait être un effet purement disrupteur de la présentation de nouvelles informations sur la formation d'un chunk, les informations devant alors toutes être maintenues simultanément, induisant une saturation de la MdT.

Perspectives expérimentales

Plusieurs questions restent donc posées, en particulier, la question de la nature du processus de regroupement d'informations en chunks et celle du rôle de l'interférence dans la MdT pour pouvoir reproduire les effets empiriques de la CLT et expliquer les résultats obtenus lors de certaines expérimentations.

La première question, préciser le processus de regroupement d'informations en chunks permettrait de définir pour quelle raison l'effet de modalité disparaît lorsque le rythme de présentation de l'information est contrôlé par l'apprenant. Cela permettrait également de clarifier l'effet de l'information transitoire, notamment en précisant dans quelle mesure il est possible d'utiliser de telles informations transitoires sans affecter la compréhension.

L'autre question, portant sur le rôle de l'interférence dans la mémoire de travail, est plus fondamentale et intéresse particulièrement le modèle TBRS. En effet, d'après ce modèle, l'interférence n'a pas d'effet sur le maintien des informations en MdT. Cependant, en s'intéressant à des informations pouvant être regroupées en chunks, la sensibilité à l'interférence devrait augmenter. Il sera nécessaire de préciser quel impact cette interférence peut avoir sur le maintien et la manipulation d'informations en mémoire de travail. Pourrait-on la considérer comme la distance entre les carrés utilisés dans les tâches de jugement spatial, un facteur de difficulté et donc nécessitant davantage de temps ? Ou faut-il considérer l'interférence comme facteur d'augmentation du nombre d'erreurs n'ayant pas d'influence sur le déclin temporel de l'activation des traces mnésiques ?

Enfin, le modèle n'a que rarement été utilisé dans le cadre de la sollicitation du calepin visuo-spatial. Pourtant, la perception visuelle faisant l'objet de plusieurs expertises (en particulier, la perception des visages), cet aspect de la mémoire de travail pourrait faire l'objet d'investigation systématique permettant de comparer les deux modules du modèle de Baddeley, la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial, dans le cadre théorique du modèle TBRS. En effet, le modèle TBRS fait l'hypothèse d'une boucle phonologique mais pas d'un calepin visuo-spatial, les informations supportées par ce calepin étant traitées par la boucle exécutive dans le cadre du modèle TBRS.

Conclusion

L'objectif de ce travail de thèse était de proposer le modèle TBRS comme réponse aux deux limites de la théorie de la charge cognitive identifiées, une limite théorique et une limite méthodologique. La première limite, théorique, découle des modèles de la MdT utilisés pour décrire les ressources cognitives dans le cadre de la CLT. La seconde, méthodologique, dépend de la première et concerne les mesures de la charge cognitive utilisées.

L'utilisation du modèle TBRS semble permettre une mesure physiologique sensible aux variations du ratio temporel, *i.e.* aux variations de la charge extrinsèque de la tâche. L'électro-

Conclusion

encéphalographie semble une technique permettant une mesure objective et dynamique de la charge cognitive lors des phases d'apprentissages. Toutefois, l'étude présentée ne portant que sur six participants et les variations interindividuelles étant grande, cette affirmation nécessite une confirmation sur un plus grand nombre de participants.

Le modèle TBRS semble répondre à la limite théorique de la théorie de la charge cognitive, nécessitant de prendre la dimension temporelle en considération. Ainsi, ce modèle a non seulement permis de décrire la dynamique de l'utilisation des ressources cognitives lors de tâches utilisant des éléments d'information pouvant être regroupés en *chunks*, mais il a également permis de préciser la définition des catégories de charges, non plus comme nombre d'éléments constitutifs, mais bien comme ratio temporel. La charge extrinsèque n'est donc pas seulement définie par le nombre de distracteurs, mais par le temps nécessaire pour traiter ces éléments interférents.

En investiguant le rôle et la nature des processus de regroupement en *chunk* et de l'interférence en mémoire de travail, le modèle TBRS pourrait s'enrichir de considérations nécessaires à son utilisation dans différents domaines de la psychologie des apprentissages.

Bibliographie

- Adams, J. W., & Hitch, G. J. (1997). Working memory and children's mental addition. *Journal of Experimental Child Psychology*, *67*, 21-38.
- Ahern, S. K., & Beatty, J. (1979). Pupillary responses during information processing vary with scholastic aptitude test scores. *Science*, *205*, 1289-1292.
- Ahlstrom, U., & Friedman-Berg, F. J. (2006). Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *36*, 623-636.
- Anderson, J. R. (1981). Effects of Prior Knowledge on Memory for New Information. *Memory and Cognition*, *9*, 237-246.
- Anderson, J. R. (1993). *Rules of the Mind*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum associates.
- Anderson, J. R. (2010). *Cognitive Psychology and Its Implications*. New York: Worth Publishers.
- Anderson, J. R., Farrell, R., & Sauer, R. (1984). Learning to Program in LISP. *Cognitive Science*, *8*, 87-129.
- Antonenko, P. D. (2007). The effect of leads on cognitive load and learning in a conceptually rich hypertext environment. Ph.D. thesis, Iowa State University.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K.W. Spence & J.T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation (Volume 2)*, (pp. 89-195). New York: Academic Press.
- Awh, E., & Jonides, J. (1998). Spatial selective attention and spatial working memory. In R. Parasuraman (Ed), *The attentive brain*, (pp. 353-380). Cambridge, MA: MIT Press.
- Awh, E., Vogel, E. K., & Oh, S. H. (2006). Interactions between attention and working memory. *Neuroscience*, *139*, 201-208.
- Ayres, P. L. (2001). Systematic mathematical errors and cognitive load. *Contemporary Educational Psychology*, *26*, 227-248.
- Baccino, T., & Manunta, Y. (2005). Eye-Fixation-Related Potentials: Insight into Parafoveal Processing. *Journal of Psychophysiology*, *19*, 204-215.
- Baddeley, A. D. (1966). The influence of acoustic and semantic similarity on long-term memory for word sequences. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *18*, 302-309.
- Baddeley, A. D. (1966b). Short-term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic and formal similarity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *18*, 362-365.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford: Oxford University Press.

Bibliographie

- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.
- Baddeley, A. D. (2002). Is working memory still working? *European Psychologist*, 7, 85-97.
- Baddeley, A. D. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 829-839.
- Baddeley, A. D. (2010). Working Memory. *Current Biology*, 20, 136-140.
- Baddeley, A. D. (2012). Working Memory: Theories, Models, and Controversies. *The Annual Review of Psychology*, 63, 1-29.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *The psychology of learning and motivation*, 8, 47-89.
- Baddeley, A. D., Thomson, N., & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14, 375-589.
- Baddeley, A., D., & Logie, R. H. (1999). Working memory: the multiple-component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*, (pp. 28-61). New York: Cambridge University Press.
- Baker, C. I., Liu, J., Wald, L. L., Kwong, K. K., Benner, T., & Kanwisher, N. (2007). Visual word processing and experiential origins of functional selectivity in human extrastriate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 9087-9092.
- Baldwin, C. L., & Penaranda, B. N. (2012). Adaptive training using an artificial neural network and EEG metrics for within- and cross-task workload classification. *NeuroImage*, 59, 48-56.
- Balota, D. A., & Duchek, J. M. (1986). Voice-specific information and the 20-second delayed suffix effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 12, 509-516.
- Barrouillet, P. (1996). Ressources, capacité cognitive et mémoire de travail : postulats, métaphores et modèles. *Psychologie Française*, 41, 319-338.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time Constraints and Resource Sharing in Adults' Working Memory Spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 83-100.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2007). The time-based resource-sharing model of working memory. *The cognitive neuroscience of working memory*, 59-80.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., Portrat, S., Vergauwe, E., & Camos, V. (2007). Time and Cognitive Load in Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33, 570-585.

- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V., & Camos, V. (2009). Working Memory Span Development: A Time-Based Resource-Sharing Model Account. *Developmental Psychology, 45*, 477-490.
- Barrouillet, P., Portrat, S., Vergauwe, E., Diepentale, K., & Camos, V. (2011). Further Evidence for Temporal Decay in Working Memory: Reply to Lewandowsky and Oberauer (2009). *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 37*, 1302-1317.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2012). As Time Goes By: Temporal Constraints in Working Memory. *Current Directions in Psychological Science, 21*, 413-419.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2014). On the proper reading of the TBRS model: reply to Oberauer and Lewandowsky. *Frontiers in Psychology, 5*, 1-3.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2015). *Working memory: loss and reconstruction*. Psychology Press: New York and London.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A study in Experimental and Social Psychology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Basar, E., (1999). *Brain function and oscillations: II. integrative brain function. Neurophysiology and Cognitive Processes*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Basar, E., Basar-Eroglu, C., Karakas, S., & Schürmann, M. (2001). Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology, 39*, 241-248.
- Bauer, M., Stenner, M. P., Friston, K. J., & Dolan, R. J. (2014). Attentional Modulation of Alpha/Beta and Gamma Oscillations Reflect Functionally Distinct Processes. *Journal of Neuroscience, 34*, 16117-16125.
- Beatty, J. (1977). Learned regulation of alpha and theta frequency activity in the human electroencephalogram. In G. Schwartz & J. Beatty (Eds.). *Biofeedback: Systems, processes, and research*. New York: Academic Press.
- Beatty, J. (1982). Task-Evoked Pupillary Responses, Processing Load, and the Structure of Processing Resources. *Psychological Bulletin, 91*, 276-292.
- Beatty, J., & O'Hanlon, J. (1979). Operant control of posterior theta rhythms and vigilance performance: Repeated treatments and transfer of training. In N. Birbaumer & K. Kimmel (Eds.), *Biofeedback and self-regulation*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. In J.T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. Berntson, (Eds), *Handbook of psycho-physiology* (pp. 142-162). Cambridge, MA: Cambridge University Press.

Bibliographie

- Bellenkes, A. H., Wickens, C. D., & Kramer, A. F. (1997). Visual scanning and pilot expertise: the role of attentional flexibility and mental model development. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 68, 569-579.
- Besson, G., Barragan-Jason, G., Thorpe, S. J., Puma, S., Ceccaldi, M., & Barbeau, E. J. (accepté). From face processing to face recognition: Comparing three different processing levels. *Cognition*.
- Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 87, 527-570.
- Binet, A. (1894). *Psychologie des grands calculateurs et joueurs d'échecs*. Paris: Hachette.
- Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 44, 58-75.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and Communication*. New York: Pergamon Press. Retrived from: <http://www.archive.org/details/perceptioncommunOObroa>.
- Brookhuis, K. A., & de Waard, D. (2010). Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 898-903.
- Brookings, J. B., Wilson, G. F., & Swain, C. R. (1996). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological Psychology*, 42, 361-377.
- Bruner, J. (1957). On Perceptual Readiness. *Psychological Review*, 64, 123-152.
- Bukiatmé, L., & Chausson, E. (2004). Les modèles attentionnels. *Rééducation Orthophonique*, 218, 25-47.
- Buswell, G. T. (1935). *How People Look at Pictures: A Study of the Psychology of Perception in Art*. Chicago: University of Chicago Press.
- Cain, B. (2007). *A review of the mental workload literature*. Defense Research and Development Toronto (Canada).
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2014). Attentional and non-attentional systems in the maintenance of verbal information in working memory: the executive and phonological loops. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 1-11.
- Camos, V., & Portrat, S. (2014). The impact of cognitive load on delayed recall. *Psychological Bulletin Review*, 22, 1029-1034.
- Capilla, A., Schoffelen, J. M., Paterson, G., Thut, G., & Gross, J. (2014). Dissociated alpha-band modulations in the dorsal and ventral visual pathways in visuospatial attention and perception. *Cerebral Cortex*, 24, 550-561.

- Case, R., Kurland, M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 386-404.
- Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: Toward theoretical and methodological improvements. *Behaviour Research Methods*, 40, 988-1000.
- Chandler, S., & Sweller, J. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. *Cognition and Instruction*, 8, 293-332.
- Chang, Y. (2014). Reorganization and plastic changes of the human brain associated with skill learning and expertise. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 1-7.
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive: Théorie et applications*. Armand Colin.
- Chase, W.G., & Simon, H. A. (1973). The mind's eye in chess. In W.G. Chase, (Ed.). *Visual information processing* (pp 215-281). New York: Academic Press.
- Chatterjee, R. (2015). Out of the Darkness. *Science*, 350, 372-375.
- Chen, O., Kalyuga, S., & Sweller, J. (2015). The Worked Example Effect, the Generation Effect, and Element Interactivity. *Journal of Educational Psychology*, 107, 689-704.
- Chen, O., Kalyuga, S., & Sweller, J. (2016). The Expertise Reversal Effect is a Variant of the More General Element Interactivity Effect. *Educational Psychology Review*, 1-13.
- Cherry, E. C. (1953). Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears. *Journal of Acoustic Society of America*, 25, 975-979.
- Chi, M. T. H. (2006). Two Approaches to the Study of Experts' Characteristics. In K. A. Ericsson, N. Charness, P. J. Feltovitch, & R. R. Hoffman, (Eds). *The Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Chi, M. T. H., Glaser, R., & Rees, E. (1981). *Expertise in Problem Solving*. (No. TR-5). Pittsburgh University, Learning Research and Development Center.
- Chi, M. T. H., Glaser, R. & Farr, M. J. (1988). *The nature of expertise*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Chiew, K. S., & Braver, T. S. (2013). Temporal dynamics of motivation cognitive control interactions revealed by high-resolution pupillometry. *Frontiers in Psychology*, 4, 1-15.
- Chuang, H. H., & Liu, H.-C. (2012). Effects of Different Multimedia Presentations on Viewers' Information-Processing Activities Measured by Eye-Tracking Technology. *Journal of Science Education and Technology*, 21, 276-286.

Bibliographie

- Clark, K., Appelbaum, L.G., van den Berg, B., Mitroff, S. R., & Woldorff, M. G. (2015). Improvement in Visual Search with Practice: Mapping Learning-Related Changes in Neurocognitive Stages of Processing. *Journal of Neuroscience*, *35*, 5351-5359.
- Cleeremans, A., Destrebecqz, A., & Boyer, M. (1998). Implicit learning: news from the front. *Trends in Cognitive Science*, *2*, 406-416.
- Collins, A. M., & Quillian, M. R. (1969). Retrieval Time from Semantic Memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *8*, 240-247.
- Comstock, J. R., & Arnegard, R. J. (1992). *The Multi-Attribute Task Battery for Human Operator Workload and Strategic Behavior Research*. NASA Technical Memorandum, 104174.
- Conrad, R., & Hull, A. J. (1964). Information, acoustic confusion, and memory span. *British Journal of Psychology*, *55*, 428-432.
- Conway, A. R. A., Cowan, N., & Bunting, M.F. (2001). The cocktail party phenomenon revisited: The importance of working memory capacity. *Psychonomic Bulletin and Review*, *8*, 331-335.
- Cooke, N. (1992). Modeling Human Expertise in Expert Systems. In R.R. Hoffman, (Ed.), *The Psychology of Expertise* (pp. 29-60). New York: Springer-Verlag.
- Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The Reorienting System of the Human Brain: From Environment to Theory of Mind. *Neuron*, *58*, 306-324.
- Corbin, L., & Camos, V. (2013). L'entraînement de la mémoire de travail et les apprentissages scolaires. *A.N.A.E. Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, *25*, 113-119.
- Corbin, L., Moissenet, A., & Camos, V. (2012). Fonctionnement de la mémoire de travail chez des enfants présentant des difficultés scolaires. *Développements*, *11*, 5-12.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information processing system. *Psychological Bulletin*, *104*, 163-191.
- Cowan, N. (1995). *Attention and memory: An integrated framework*. Oxford Psychology Series, No. 26. New York: Oxford University Press. (Paperback edition: 1997)
- Cowan, N. (2000). Processing limits of selective attention. Potential implications for interpreting. *Interpreting*, *5*, 117-146.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 87-185
- Cowan, N. (2014). Working Memory Underpins Cognitive Development, Learning, and Education. *Educational Psychology Review*, *26*, 197-223.

- Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. A. (2005). On the Capacity of Attention: Its Estimation and Its Role in Working Memory and Cognitive Aptitudes. *Cognitive Psychology*, *51*, 42-100.
- Cowan, N., Rouder, J. N., Blume, C. L. & Saults, J. S. (2012). Models of Verbal Working Memory Capacity: What Does It Take to Make Them Work? *Psychological Review*, *119*, 480-499.
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *11*, 671-684.
- Craik, F. I. M., & Tulving, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *104*, 268-294.
- Crowder, R. G. (1993). Short-term memory: Where do we stand? *Memory and Cognition*, *21*, 142-45.
- Crundall, D.E., & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, *41*, 448-458.
- D'Esposito, M., Aguirre, G., Zarahn, E., Ballard, D., Shin, R., & Lease, J. (1998). Functional MRI studies of spatial and nonspatial working memory. *Cognitive Brain Research*, *7*, 1-13.
- D'Esposito, M., & Postle, B. R. (2015). The Cognitive Neuroscience Of Working Memory. *Annual Review of Psychology*, *66*, 115-142.
- Daneman, M., & Carpenter, P.A. (1980). Individual Difference in Working Memory and Reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *19*, 450-466.
- De Groot, A. D. (1965). *Thought and choices in chess*. The Hague: Mouton.
- De Jong, T. (2010). Cognitive load theory, educational research, and instructional design: some food for thought. *Instructional Science*, *38*, 105-134.
- De Waard, D. (1996). *The measurement of driver's mental workload*. The Traffic Research Centre VSC, University of Groningen, Haren, The Netherlands.
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, *64*, 135-168.
- Diaz, J. C., Sajda, P., Dmochowski, J. P. & Parra, L.C. (2013). EEG precursors of detected and missed targets during free-viewing search. *Journal of Vision*, *13*, 1-19.
- Dimigen, O., Kliegl, R. & Sommer, W. (2012). Transsaccadic parafoveal preview benefits in fluent reading: A study with fixation-related brain potentials. *Neuroimage*, *62*, 381-393.
- Di Stasi, L. L., Marchitto, M., Antoli, A., Baccino, T., & Cañas, J. J. (2010). Approximation of on-line mental workload index in ATC simulated multitasks. *Journal of Air Transport Management*, *16*, 330-333.

Bibliographie

Doppelmayr, M., Klimesch, W., Pachinger, T., & Ripper, B. (1995). Individual differences in brain dynamics: important implications for the calculation of event-related band power. *Biological Cybernetics*, *79*, 49-57.

Doppelmayr, M., Klimesch, W., Pachinger, T., & Ripper, B. (1998). Individual differences in brain dynamics: important implications for the calculation of event-related band power. *Biological cybernetics*, *79*, 49-57.

Drohocki, Z. (1946). II. Revue critique des essais d'électroencéphalographie quantitative. *L'année Psychologique*, *47-48*, 230-243.

Ebbinghaus, H. (1885). Untersuchungen zur experimentellen psychologie. Sur la mémoire, recherches de psychologie expérimentale.

Eggemeier, F. T., Wilson, G. F., Kramer, A. F., & Damos, D. L. (1991). Workload assessment. In *multi-task environments. Multiple task performance*. D. L. Damos. London, G. B, Taylor & Francis, Ltd.: 207-216.

Ellis, S., Candrea, R., Misner, J., Craig, C. S., Lankford, C. P., & Hutchinson, T. E. (1998). Windows to the Soul? What Eye Movements Tell Us About Software Usability. In *Proceedings of the Usability Professionals' Association Conference* (pp. 151-178).

Ericsson, K. A. (2006). An introduction to *Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance: Its Development, Organization and Content*. In K. A. Ericsson, N. Charness, P. Feltovich, & R. R. Hoffman (Eds.), *Cambridge handbook of expertise and expert performance* (pp. 3-19). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Ericsson, K. A. (2007). Deliberate practice and the modifiability of body and mind: Toward a science of the structure and acquisition of expert and elite performance. *International Journal of Sport Psychology*, *38*, 4-34.

Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, *102*, 211-245.

Fairclough, S. H., & Venables, L. (2006). Prediction of subjective states from psychophysiology: a multivariate approach. *Biological Psychology*, *71*, 100-110.

Fairclough, S.H., Venables, L., & Tattersall, A. (2005). The influence of task demand and learning on the psychophysiological response. *International Journal of Psychophysiology*, *56*, 171-184.

Fournier, L. R., Wilson, G. F., & Swain, C. R. (1999). Electrophysiological, behavioral, and subjective indexes of workload when performing multiple tasks: manipulations of task difficulty and training. *International Journal of Psychophysiology*, *31*, 129-145.

Foxe, J. J., & Snyder, A. C. (2011). The Role of Alpha-Band Brain Oscillations as a Sensory Suppression Mechanism during Selective Attention. *Frontiers in Psychology*, *2*, 1-13.

- Frey, J. N., Ruhнау, P., & Weisz, N. (2015). Not so different after all: The same oscillatory processes support different types of attention. *Brain Research, 1626*, 183-197.
- Fukuda, K., Mance, I., & Vogel, E. K. (2015). A Power Modulation and Event-Related Slow Wave Provide Dissociable Correlates of Visual Working Memory. *Journal of Neuroscience, 35*, 14009-14016.
- Funke, G., Knott, B., Mancuso, V. F., Strang, A., Estep, J., Menke, L., Brown, R., Dukes, A., & Miller, B. (2013). Evaluation of Subjective and EEG-Based Measures of Mental Workload. *International Conference, HCI International 2013*, Las Vegas, NV, USA, July 21-26, 2013, Proceedings, Part I, 373, 412-416.
- Fuster, J. M. (2006). The cognit: A network model of cortical representation. *International Journal of Psychophysiology, 60*, 125-132.
- Galy, E., Cariou, M., & Mélan, C. (2012). What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types? *International Journal of Psychophysiology, 83*, 269-275.
- Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory and Cognition, 26*, 263-273.
- Gauthier, I., Tarr, M. J., Anderson, A. W., Skudlarski, P., & Gore, J. C. (1999). Activation of the middle Fusiform “face area” increases with expertise in recognizing novel objects. *Nature neuroscience, 2*, 568-573.
- Geary, D. (2008). An evolutionarily informed education science. *Educational Psychologist, 43*, 179-195.
- Gerjets, P., Scheiter, K., & Cierniak, G. (2009). The Scientific Value of Cognitive Load Theory: A Research Agenda Based on the Structuralist View of Theories. *Educational Psychology Review, 21*, 43-54.
- Gevins, A. S., & Schaffer, R. E. (1980). A critical review of electroencephalographic (EEG) correlates of higher cortical functions. *Critical reviews in bioengineering, 4*, 113-164.
- Gevins, A. S., Zeitlin, G. M., Doyle, J. C., Schaffer, R. E., & Callaway, E. (1979). EEG patterns during “cognitive” tasks. II. Analysis of controlled tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 47*, 704-710.
- Gevins, A. S., Zeitlin, G. M., Yingling, C. D., Doyle, J. C., Dedon, M. F., Schaffer, R. E., & Yeager, C. L. (1979). EEG patterns during cognitive tasks. I. Methodology and analysis of complex behaviors. *Electroencephalography and clinical neurophysiology, 47*, 693-703.
- Gevins, A., Leong, H., Du, R., Smith, M. E., Le, J., DuRousseau, D., Zhang, J., & Libove, J. (1995). Towards measurement of brain function in operational environments. *Biological Psychology, 40*, 169-186.

Bibliographie

- Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L., & Yu, D. (1997). High-resolution EEG Mapping of Cortical Activation Related to Working Memory: Effects of Task Difficulty, Type of Processing, and Practice. *Cerebral Cortex*, 7, 374-385.
- Gevins, A., Smith, M. E., Leong, H., McEvoy, L., Whitfield, S., Du, R., & Rush, G. (1998). Monitoring Working Memory Load during Computer-Based Task with EEG Pattern Recognition Method. *Human Factors*, 40, 79-91.
- Gevins, A., & Smith, M. E. (2000). Neurophysiological Measures of Working Memory and Individual Differences in Cognitive Ability and Cognitive Style. *Cerebral Cortex*, 10, 829-839.
- Gevins, A. S., & Smith, M. E. (2003). Neurophysiological measures of cognitive workload during human-computer interaction. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 4, 113-131.
- Ginns, P. (2005). Meta-Analysis of the Modality Effect. *Learning and Instruction*, 15, 313-331.
- Gobet, F., Lane, P. C. R., Croker, S., Cheng, P. C. H., Jones, G., Oliver, I., & Pine, J. M. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *TRENDS in Cognitive Science*, 5, 236-243.
- Gopher, D., & Donchin, E. (1986). Workload - An examination of the concept. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance, Vol II, Cognitive Processes and Performance*. New York: Wiley & Sons.
- Graupner, S. T., Pannasch, S. & Velichkovsky, B. M. (2011). Saccadic context indicates information processing within visual fixations: Evidence from event-related potentials and eye-movements analysis of the distractor effect. *International Journal of Psychophysiology*, 80, 54-62.
- Gross, J. (2014). Analytical methods and experimental approaches for electrophysiological studies of brain oscillations. *Journal of Neuroscience Methods*, 228, 57-66.
- Gulbinaite, R., Johnson, A., de Jong, R., Morey, C. C., & van Rijn, H. (2014). Dissociable mechanisms underlying individual differences in visual working memory capacity. *NeuroImage*, 99, 197-206.
- Hale, K. S., Fuchs, S., Axelsson, P., Berka, C., & Cowell, A. J. (2008). Using physiological measures to discriminate signal detection outcome during imagery analysis. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 52nd Annual Meeting*, 52, 182-186.
- Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 66, 51-83.
- Harmony, T., Fernández, T., Silva, J., Bernal, J., Diaz-Comas, L., Reyes, A., Marosi, E., & Rodriguez, M. (1996). EEG delta activity: an indicator of attention to internal processing during performance of mental tasks. *International Journal of Psychophysiology*, 24, 161-171.

- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of Nasa-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human Mental Workload* (pp. 139-184). Elsevier Science Publishers: North-Holland.
- Haxby, J. V., Hoffman, E.A., & Gobbini, M.I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in cognitive sciences*, 4, 223-233.
- Hayes-Roth, B. (1977). Evolution of Cognitive Structures and Processes. *Psychological Review*, 84, 260-278.
- Hebb, D. (1949). *The Organization of Behavior*. New York: Willey & Sons.
- Hess, E. H., & Polt, J.M. (1964). Pupil Size in Relation to Mental Activity during Simple Problem-Solving. *Science*, 143, 1190-1192.
- Hillyard, S. A., Vogel, E. K., & Luck, S. J. (1998). Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 353, 1257-1270.
- Hirst, W., Spelke, E. S., Reaves, C. C., Caharack, G., & Neisser, U. (1980). Dividing attention without alternation or automaticity. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 98-117.
- Holding, D. H., & Pfau, H. D. (1985). Thinking ahead in chess. *American Journal of Psychology*, 98, 271-282.
- Holding, D. H. & Reynolds, R.I. (1982). Recall or evaluation of chess positions as determinants of chess skill. *Memory and Cognition*, 10, 237-242.
- Holm, A., Lukander, K., Korpela, J., Sallinen, M., & Müller, K. M. (2009). Estimating brain load from the EEG. *The Scientific World Journal*, 9, 639-651.
- Holm, A. (2010). Developing Neurophysiological Metrics for the Assessment of Mental Workload and the Functional State of the Brain. (Doctoral dissertation). Retrieved from "aaltodoc".
- Hopfinger, J., Luck, S., & Hillyard, S. (2004). Selective attention: electrophysiological and neuromagnetic studies. In M. Gazzaniga (Ed.), *The Cognitive Neurosciences III*, (pp. 561-574). MIT Press.
- Hruby, T., & Marsalek, P. (2003). Event-related potentials - the P3 wave. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 63, 55-63.
- Hulme, C., Thomson, N., Nuir, C., & Lawrence, A. (1984). Speech rate and the development of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, 241-253.
- Iqbal, S. T., Adamczyk, P. D., Zheng, S. X., & Bailey, B. P. (2005). Towards an index of opportunity: Understanding changes in mental workload during task execution. In G.v.d. Veer & C. Gale (Eds.). *CHI 2005 Proceedings* (311-320). New York, NY: ACM Press.

Bibliographie

- James, W. (1890). *Principles of Psychology*. Volume 1(Chap 11). Global Grey (204). Retrieved from: www.globalgrey.co.uk.
- Jex, H. R. (1988). Measuring Mental Workload: Problem, Progress and Promises. *Advances in Psychology*, 52, 5-39.
- Johannsen, G. (1979). Workload and workload measurement. In *Mental workload* (pp. 3–11). Springer.
- Johnson, C. I., & Mayer, R. E. (2012). An Eye Movement Analysis of the Spatial Contiguity Effect in Multimedia Learning. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 18, 178-191.
- Joyce, B., & Weil, M. (1972). *Models of Teaching*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1993). The intensity dimension of thought: Pupillometric indices of sentence processing. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 47, 310-339.
- Kahana, M. J., Seelig, D., & Madsen, J. R. (2001). Theta returns. *Current opinion in neurobiology*, 11, 739-744.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
- Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, 154, 1583-1585.
- Kahneman, D., Tursk, B., Shapiro, D., & Crider, A. (1969). Pupillary, heart rate and skin resistance changes during a mental task. *Journal of Experimental Psychology*, 79, 164-167.
- Kalyuga, S. (2007). Expertise Reversal Effect and Its Implications for Learner-Tailored Instruction. *Educational Psychology Review*, 19, 509-539.
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1999). Managing Split-attention and Redundancy in Multimedia Instruction. *Applied Cognitive Psychology*, 13, 351-371.
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). The Expertise Reversal Effect. *Educational Psychologist*, 38, 23-31.
- Kamzanova, A.T., Kustubayeva, A.M., & Matthews, G. (2014). Use of EEG workload indices for diagnostic monitoring of vigilance decrement. *Human Factors*, 56, 1136-1149.
- Kane, M. J., Bleckley, M. K., Conway, A. R. A., Engle, & R. W. (2001). A controlled-attention view of working memory capacity: Individual differences in memory span and the control of visual orienting. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 169-183.
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M.M. (1997). The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *The Journal of Neuroscience*, 17, 4302-4311.

- Käthner, I., Wriessnegger, S. C., Müller-Putz, G. R., Kübler, A., & Halder, S. (2014). Effects of mental workload and fatigue on the P300, alpha and theta band power during operation of an ERP (P300) brain–computer interface. *Biological Psychology*, *102*, 118-129.
- Ke, Y., Qi, H., He, F., Liu, S., Zhao, X., Zhou, P., & Ming, D. (2014). An EEG-based mental workload estimator trained on working memory task can work well under simulated multi-attribute task. *Frontiers in human neuroscience*, *8*, 1-10.
- 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*, 75-86.
- Klein, G. A. (1993). A recognition primed decision (RPD) model of rapid decision making. In G.A. Klein, J. Orasanu, R. Calderwood & C.E. Zsombok (Eds.), *Decision-making in action: Models and methods* (pp. 138-147). Norwood, NJ: Ablex.
- Klimesch, W. (1996). Memory processes, brain oscillations and EEG synchronization. *International Journal of Psychophysiology*, *24*, 61-100.
- Klimesch, W. (1997). EEG-alpha rhythms and memory processes. *International Journal of Psychophysiology*, *26*, 319-340.
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, *29*, 269-295.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Russeger, H., Pachinger, T., & Schwaiger, J. (1998). Induced alpha band power changes in the human EEG and attention. *Neuroscience Letters*, *244*, 73-76.
- Klimesch, W., Vogt, F., & Doppelmayr, M. (1999). Interindividual Differences in Alpha and Theta Power Reflect Memory Performance. *Intelligence*, *24*, 347-362.
- Kramer, A. F. (1990). *Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress* (Tech. Rep.). DTIC Document.
- Kretschmar, F., Pleimling, D., Hosemann, J., Füssel, S., Bornkessel-Schlesewsky, I., & Schlewsky, M. (2013). Subjective Impressions Do Not Mirror Online Reading Effort: Concurrent EEG-Eyetracking Evidence from the Reading of Books and Digital Media. *PloS one*, *8*, e56178.
- Kuhl, B. A., & Chun, M. (2014). Memory and Attention. In A. C. Nobre & S. Kastner, (Eds). *The Oxford Handbook of Attention* (pp. 806-834). Oxford: Oxford University Press.
- LaBar, K. S., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M.-M. (1999). Neuroanatomic Overlap of Working Memory and Spatial Attention Networks: A Functional MRI Comparison within Subjects. *NeuroImage*, *10*, 695-704.
- Laeng, B., Ørbo, M., Holmlund, T., & Miozzo, M. (2011). Pupillary Stroop Effects. *Cognitive Processing*, *12*, 13-21.

Bibliographie

Lal, S. K. L., & Craig, A. (2001). A critical review of the psychophysiology of driver fatigue. *Biological Psychology*, *55*, 173-194.

Larkin, J. H. (1981). Enriching formal knowledge: A model for learning to solve textbook physics problems. In J. R. Anderson, (Ed.). *Cognitive Skills and their Acquisition* (pp. 311-335). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Larue, G. S., Rakotonirainy, A., & Pettitt, A.N. (2010). Real-time performance modelling of a sustained attention to response task. *Ergonomics*, *53*, 1205-1216.

Larue, G. S., Rakotonirainy, A., & Pettitt, A.N. (2011). Driving performance impairments due to hypovigilance on monotonous roads. *Accident Analysis and Prevention*, *43*, 2037-2046.

Lavie, N. (1995). Perceptual Load as a Necessary Condition for Selective Attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 451-468.

Lavie, N., Beck, D. M., & Konstantinou, N. (2014). Blinded by the load: attention, awareness and the role of perceptual load. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *369*, 1-10.

Le Bohec O., & Jamet E. (2001). Effet de redondance et effet de modalité réunis. *Journées d'études en Psychologie ergonomiques, EPIQUE*. Nantes, octobre 2001.

Leahy, W., & Sweller, J. (2011). Cognitive Load Theory, Modality of Presentation and the Transient Information Effect. *Applied Cognitive Psychology*, *25*, 943-951.

Legros, D., Maître de Pembroke, E., & Talbi, A. (2002). Les théories de l'apprentissage et les systèmes multimédias. *Psychologie des apprentissages et multimédia*. Paris. Armand Colin, 23-39.

Lemaire, P., & Siegler, R.S. (1995). Four aspects of strategic change: Contributions to children's learning of multiplication. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*, 83-97.

Lemarié, J., Lorch, R. F., Eyrolle, H., & Virbel, J. (2008). SARA: A Text-Based and Reader-Based Theory of Signaling. *Educational Psychologist*, *43*, 27-48.

Lieury, A. (2004). *Psychologie Cognitive. Cours et exercices*. Paris : Dunod.

Lisi, M., Bonato, M. & Zorzi, M. (2015). Pupil dilation reveals top-down attentional load during spatial monitoring. *Biological Psychology*, *112*, 39-45.

Lisman, J. (2010). Working Memory: The Importance of Theta and Gamma Oscillations. *Science*, *20*, 490-492.

Luck, S. J., & Hylliard, S.A. (1994). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*, *31*, 291-308.

Marcus, N., Cooper, M., & Sweller, J. (1996). Understanding instructions. *Journal of Educational Psychology*, *88*, 49-63.

- Marshall, S. P. (2002). The index of cognitive activity: Measuring cognitive workload. In Human factors and power plants, 2002. *Proceedings of the 2002 IEEE 7th conference* (pp. 7-5). IEEE.
- Martin, S. (2014). Measuring cognitive load and cognition: metrics for technology enhanced learning. *Educational Research and Evaluation, 20*, 592-621.
- Matthews, G., Reinerman-Jones, L. E., Barber, D. J. & Abich IV, J. (2015). The Psychometrics of Mental Workload: Multiple Measures Are Sensitive but Divergent. *Human Factors, 57*, 125-143.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (1998). A Split-attention effect in multimedia learning: evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology, 90*, 312-320.
- McCabe, D. P. (2008). The role of covert retrieval in working memory span tasks: evidence from delayed recall tests. *Journal of Memory and Language, 58*, 480-494.
- McElree, B. (2001). Working Memory and Focal Attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 27*, 817-835.
- McEvoy, L. K., Pellouchoud, E., Smith, M. E., & Gevins, A. (2001). Neurophysiological signals of working memory in normal aging. *Cognitive Brain Research, 11*, 363-376.
- Meghanathan, R. N., van Leeuwen, C., & Nikolaev, A. R. (2015). Fixation duration surpasses pupil size as a measure of memory load in free viewing. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*, 1-9.
- Meshkati, N. (1988). Toward development of a cohesive model of workload. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human Mental Workload* (pp. 305-314). Amsterdam: Elsevier Science Publisher.
- Metzner, P., von der Malsburg, T., Vasishth, S., & Rösler, F. (2015). Brain responses to world knowledge violations: a comparison of stimulus- and fixation-triggered event-related potentials and neural oscillations. *Journal of Cognitive Neuroscience, 27*, 1017-1028.
- Miller, G. A. (1956). The Magical Number of Seven, Plus or Minus Two. Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychological Review, 101*, 343-352.
- Miller, E. K., & Buschman, T. J. (2015). Working Memory Capacity: Limits on the Bandwidth of Cognition. *Daedalus, 144*, 112-122.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology, 41*, 49-100.
- Mora, G. (2011). *Les mécanismes de maintien de l'information verbale en mémoire de travail*. Thèse soutenue sous la direction de Camos, V., Université de Bourgogne.

Bibliographie

Moray, N. (1959). Attention in dichotic listening: Affective cues and the influence of Instruction. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 11, 56-60.

Moray, N. (1979). *Mental workload: Its theory and measurement* (Vol. 8). Plenum Publishing Corporation.

Moreno, R. (2010). Cognitive load theory: more food for thought. *Instructional Science*, 38, 135-141.

Moreno, R., & Valdez, A. (2005). Cognitive Load and Learning Effects of Having Students Organize Pictures and Words in Multimedia Environments: The Role of Student Interactivity and Feedback. *Educational Technology Research & Development*, 53, 35-45.

Mouzé-Amady, M., Raufaste, E., Prade, H. , & Meyer, J. P. (2013). Fuzzy-TLX: using fuzzy integrals for evaluating human mental workload with NASA-Task Load indeX in laboratory and field studies. *Ergonomics*, 56, 752-763.

Mühle-Karbe, P. S., Andres, M., & Brass, M. (2014). Transcranial Magnetic Stimulation Dissociates Prefrontal and Parietal Contributions to Task Preparation. *The Journal of Neuroscience*, 34, 12481-12489.

Nairne, J. S., & Kelley, M.R. (1999). Reversing the phonological similarity effect. *Memory & Cognition*, 27, 45-53.

Natani, K., & Gomer, F. E. (1981). Electrocortical Activity and Operator Workload: A comparison of changes in the electroencephalogram and in event-related potentials. *McDonnell Douglas Report MDC E2427*.

Neubauer, A., Freudenthaler, H. H., & Pfurtscheller, G. (1995). Intelligence and spatiotemporal patterns of event-related desynchronization (ERD). *Intelligence*, 20, 249-266.

Neves, D. M., & Anderson, J. R. (1981). Knowledge compilation: Mechanisms for the automatization of cognitive skills. In Anderson J.R. (Ed.). *Cognitive Skills and their acquisition* (pp. 57-84). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Nicolas, S. (1992). Hermann Ebbinghaus et l'étude expérimentale de la mémoire humaine. *L'année Psychologique*, 92, 527-544.

Nisbett, R. E. & Wilson, T. D. (1977). Telling more than we can know: Verbal reports on mental processes. *Psychological Review*, 8, 231-259.

Norman, D. A., & Shallice, T. (1980). *Attention to Action: Willed and Automatic Control of Behavior*. University of California San Diego, CHIP Report 99.

Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 28, 411-421.

- Oberauer, K. (2005). Control of the content of working memory: a comparison of two paradigms and two age groups. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *31*, 714-728.
- Oberauer, K., & Lewandowsky, S. (2008). Forgetting in Immediate Serial Recall: Decay, Temporal Distinctiveness, or Interference? *Psychological Review*, *115*, 544-576.
- Oberauer, K., & Lewandowsky, S. (2013). Evidence Against Decay in Verbal Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*, 380-411.
- Oberauer, K., & Lewandowsky, S. (2014). Further Evidence Against Decay in Working Memory. *Journal of Memory and Language*, *73*, 15-30.
- Ota, T., Toyoshima, R., & Yamauchi, T. (1996). Measurements by biphasic changes of the alpha band amplitude as indicators of arousal level. *International journal of psychophysiology*, *24*, 25-37.
- Paas, F. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive load approach. *Journal of Educational Psychology*, *84*, 429-434.
- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments. *Educational Psychologist*, *38*, 1-4.
- Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & van Gerven, P. W. M. (2003). Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational Psychologist*, *38*, 63-72.
- Paas, F., & Sweller, J. (2005). Implications of cognitive load theory for multimedia learning. *The Cambridge handbook of multimedia learning*, Cambridge University Press, Cambridge, 19-30.
- 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*, 27-45.
- Paas, F. & Kirschner, F. (2012). The goal-free effect. In N.M. Seel (Ed.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* vol. 2 (pp. 1375-1377). Netherlands: Springer.
- Paivio, A. (1986). *Mental Representation: A Dual Coding Approach*. Oxford: Oxford University Press.
- Paré, D., Collins, D. R., & Pelletier, J. G. (2002). Amygdala oscillations and the consolidation of emotional memories. *Trends in cognitive sciences*, *6*, 306-314.
- Pashler, H. (1998). *The Psychology of Attention*. Cambridge: MIT Press.
- Pashler, H. (2000). Task Switching and Multitask Performance. In S. Monsell, & J. Driver, (Eds). *Control of Cognitive Processes*. Attention and Performance XVIII. (pp. 277-307).

Bibliographie

- Patel, V. L., & Kaufman, D. R. (1995). Clinical reasoning and biomedical knowledge: implications for teaching. In J. Higgs & M. Jones (Eds.), *Clinical reasoning in the health professions* (pp. 117-128). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann Ltd.
- Paubel, P.-V., Averty, P., & Raufaste, E. (2010). Evaluation of an Automated Conflict Solver, ERASMUS, Using Pupillometric Measures. *Proceedings of the International Conference on Human Computer Interaction in Aerospace, Automation Integration and Function Allocation*. November, 03-November, 05, 2010. Florida: Cap Canaveral.
- Paubel, P.-V., Averty, P. & Raufaste, E. (2011). Effects of an automated conflict solver, ERASMUS, on the visual activity of air traffic controllers. *International Journal of Aviation Psychology*, 23(2), 181-196.
- Peavler, W. S. (1974). Pupil size, information overload and performance differences. *Psychophysiology*, 11, 559-566.
- Perez-Martin, A., Schuster, I., & Dautat, M. (2006). *Électroencéphalographie. PCEM 2 - Module de Base 6*. Faculté de Médecine Montpellier-Nîmes.
- Peterson, L., & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 193-198.
- Phillips, C., E., Jarrold, C., Baddeley, A. D., Grant, J., & Karmiloff-Smith, A. (2004). Comprehension of spatial language terms in Williams syndrome: evidence for an interaction between domains of strength and weakness. *Cortex*, 40, 85-101.
- Piaget, J. (1928). *Judgment and Reasoning in the Child*. New York: Harcourt.
- Picot, A. (2009). *Détection d'hypovigilance chez le conducteur par fusion d'informations physiologiques et vidéo*. Thèse soutenue sous la direction de Caplier, A., & Charbonnier, S., Institut Polytechnique de Bourgogne.
- Pigeau, R., Hoffman, R., Purcell, S., & Moffitt, A. (1988). The Effect of Endogenous Alpha on Hemispheric Asymmetries and the Relationship of Frontal Theta to Sustained Attention. In K. Jessen (Ed.), *Electric and magnetic activity of the central nervous system: Research and clinical applications in aerospace medicine*. France: NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development.
- Polich, J., & Kok, A. (1995). Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review. *Biological Psychology*, 41, 103-146.
- Pomplun, M., & Sunkara, S. (2003). Pupil dilation as an indicator of cognitive workload in human-computer interaction. In *Proceedings of the International Conference on HCI* (pp. 542-546).
- Pope, A. T., Bogart, E. H., & Bartolome, B. S. (1995). Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task. *Biological Psychology*, 40, 187-195.

- Portrat, S., Barrouillet, P., & Camos, V. (2009). Time-related decay or interference-based forgetting in working memory? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *34*, 1561-1564.
- Portrat, S., Camos, V., & Barrouillet, P. (2009). Working memory in children: A time-constrained functioning similar to adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, *102*, 368-374.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *32*, 3-25.
- Qin, Y., Sohn, M. H., Anderson, J. R., Stenger, V. A., Fissell, K., Goode, A., & Carter, C. S. (2003). Predicting the practice effects on the blood oxygenation level-dependent (BOLD) function of fMRI in a symbolic manipulation task. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *100*, 4951-4956.
- Raajimakers, J. G. W. & Schiffrin, R. M. (2003). Models versus descriptions: Real differences and language differences. *Behavioral and Brain Sciences*, *26*, 753-753.
- Rao, S. C., Rainer, G., & Miller, E. K. (1997). Integration of What and Where in the Primate Prefrontal Cortex. *Science*, *276*, 821-824.
- Ravizza, S. M., Behrmann, M., & Fiez, J. A. (2005). Right parietal contributions to verbal working memory: Spatial or executive? *Neuropsychologia*, *43*, 2057-2067.
- Recarte, M. A., Pérez, E., Conchillo, A., & Nunes, L. M. (2008). Mental workload and visual impairment: Differences between pupil, blink, and subjective rating. *The Spanish Journal of Psychology*, *11*, 374-385.
- Reder, L. M., & Anderson, J. R. (1980). A partial resolution of the paradox of interference: the role of integrating knowledge. *Cognitive Psychology*, *12*, 447-472.
- Rechtschaffen, A., & Kales, A. (1968). *A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects*. National Institute of Health Publication, Washington DC, US government printing office edition.
- Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload* (pp. 185-218). Amsterdam: Elsevier.
- Richer, F., & Beatty, J. (1985). Pupillary Dilations in Movement Preparation and Execution. *Psychophysiology*, *22*, 204-207.
- Ricker, T. J. & Cowan, N. (2014). Differences between presentation methods in working memory procedures: a matter of working memory consolidation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *40*, 417-428.
- Rist, R. S. (1989). Schema creation in programming. *Cognitive Science*, *13*, 67-96.

Bibliographie

- Rihs, T. A., Michel, C. M., & Thut, G. (2007). Mechanisms of selective inhibition in visual spatial attention are indexed by alpha-band EEG synchronization. *European Journal of Neuroscience*, *25*, 603-610.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of experimental psychology: General*, *124*, 207-231.
- Roux F., & Uhlhaas, P. J. (2014). Working memory and neural oscillations: alpha-gamma versus theta-gamma codes for distinct WM information? *Trends in Cognitive Sciences*, *18*, 16-25.
- Ryu, K., & Myung, R. (2005). Evaluation of mental workload with a combined measure based on physiological indices during a dual task of tracking and mental arithmetic. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *35*, 991-1009.
- Sagberg, F., Jackson, P., Krüger, H. P., Muzet, A. & Williams. A. (2004). Fatigue, sleepiness and reduced attention as risk factor in driving. *Workshop about driver fatigue and sleepiness*. Oslo, Institut of Transport Economics, Norway.
- Salvucci, D. D. & Taatgen, N. A. (2008). Threaded cognition: an integrated theory of concurrent multitasking. *Psychological Review*, *115*, 101-130.
- Salvucci, D. D., & Taatgen, N. A. (2010). *The multitasking mind*. Oxford: Oxford University Press.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Schabus, M., & Doppelmayr, M. (2005). Fronto-parietal EEG coherence in theta and upper alpha reflect central executive functions of working memory. *International Journal of Psychophysiology*, *57*, 97-103.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Heise, K., Gruber, W., Holz, E., Karim, A., Glennon, M., Gerloff, C., Birbaumer, N., & Hummel, F. (2009). Brain Oscillatory Substrates of Visual Short-Term Memory Capacity. *Current Biology*, *19*, 1846-1852.
- Savage, S. W., Potter, D. D., & Tatler, B. W. (2013). Does preoccupation impair hazard perception? A simultaneous EEG and Eye Tracking study. *Transportation Research Part F*, *17*, 52-62.
- Saygin, Z., Scott, T., Feather, J., Youssoufian, D., Fedorenko, E., & Kanwisher, N. (2015). The VWFA and FFA have sharply contrasting functional selectivities and patterns of connectivity. *Journal of Vision*, *15*, 914-914.
- Schacter, D. L. (1977). EEG theta waves and psychological phenomena: a review and analysis. *Biological Psychology*, *5*, 47-82.
- Schmeck, A., Opfermann, M., van Gog, T., Paas, F., & Leutner, D. (2014). Measuring cognitive load with subjective rating scales during problem solving: differences between immediate and delayed ratings. *Instructional Science*, *43*, 93-114.

- Schmidt-Weigand, F. Kohnert, A., & Glowalla, U. (2010). A closer look at split visual attention in system- and self-paced instruction in multimedia learning. *Learning and Instruction, 20*, 100-110.
- Schneider, W. (1985). Training high performance skills: Fallacies and guidelines. *Human Factors, 27*, 285-300.
- Schneider, W., & Schiffrin, R.M. (1977). Controlled and Automatic Human Information Processing: I. Detection, Search, and Attention. *Psychological Review, 84*, 1-66.
- Schnotz, W., & Kurschner, C. (2007). A Reconsideration of Cognitive Load Theory. *Education Psychology Review, 19*, 469-508.
- Schumacher, E. H., Seymour, T. L., Glass, J. M., Fencsik, D. E., Lauber, E. J., Kieras, D. E., & Mayer, D. E. (2001). Virtually Perfect Time Sharing in Dual-Task Performance: Uncorking the Central Cognitive Bottleneck. *Psychological Science, 12*, 101-108.
- Schvaneveldt, R. W. (1969). Effects of complexity in simultaneous reaction time tasks. *Journal of Experimental Psychology, 81*, 289-296.
- Schwepe, J., & Rumber, R. (2014). Attention, Working Memory, and Long-Term Memory in Multimedia Learning: An Integrated Perspective Based on Process Models of Working Memory. *Educational Psychology Review, 26*, 285-306.
- Sereno, S. C. & Rayner, K. (2003). Measuring words recognition in reading: eye movements and event-related potentials. *Trends in Cognitive Sciences, 7*, 489-493.
- Shiffrin, R. M. (1975). Short-term store: the basis for a memory system. In F. Restle, R.M. Shiffrin, N.J. Castellan, H. Lindman & D.B. Pisoni (Eds.), *Cognitive theory*. (Vol. 1). (pp. 193-218). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Shiffrin, R.M. (1976). Capacity limitations in information processing, attention and memory. In W.K. Estes (Ed.), *Handbook of learning and cognitive processes*. Vol. 4: Memory processes. (pp. 177-236). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Shiffrin, R.M., & Schneider, W. (1977). Controlled and Automatic Human Information Processing: II. Perceptual Learning, Automatic Attending, and a General Theory. *Psychological Review, 84*, 127-190.
- Shipstead, Z., Lindsey, D. R. B., Marshall, R. L., & Engle, R. W. (2014). The mechanisms of working memory capacity: Primary memory, secondary memory, and attention control. *Journal of Memory and Language, 72*, 116-141.
- Shomstein, S., Kravitz, D. J., & Behrmann, M. (2012). Attentional control: Temporal relationships within the fronto-parietal network. *Neuropsychologia, 50*, 1202-1210.
- Simon, D. J., & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception, 28*, 1059-1074.

Bibliographie

Simon, D. P., & Simon, H. A. (1978). Individual differences in solving physics problems. In R. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* (pp. 325-348). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Simon, H. A., & Gilmarin, K. (1973). A simulation of memory for chess positions. *Cognitive Psychology*, 5, 59-46.

Sirevaag, E., Kramer, A., DeJong, R. & Mecklinger, A. (1988). A psychophysiological analysis of multi-task processing demands. *Psychophysiology*, 25, 482-482.

Slobounov, S. M., Fukada, K., Simon, R., Rearick, M., & Ray, W. (2000). Neurophysiological and behavioral indices of time pressure effects on visiomotor task performance. *Cognitive Brain Research*, 9, 287-298.

Smith, M. E., McEvoy, L. K., & Gevins, A. (1999). Neurophysiological indices of strategy development and skill acquisition. *Cognitive Brain Research*, 7, 389-404.

Smith, M. E., Gevins, A., Brown, H., Karnik, A., & Du, R. (2001). Monitoring Task Loading with Multivariate EEG Measures during Complex Forms of Human-Computer Interaction. *Human Factors*, 43, 366-380.

Smulders, F. T. Y., Kenemans, J. L., Jonkman, L. M., & Kok, A. (1997). The effects of sleep loss on task performance and the electroencephalogram in young and elderly subjects. *Biological Psychology*, 45, 217-239.

Solomons, L. M., & Stein, G. (1896). Normal motor automatism. *Psychological Review*, 3, 492-512.

Soloway, E., Adelson, B., & Ehrlich, K. (1988). Knowledge and processes in the comprehension of computer programs. In Chi, M. T. H., Glaser, R. & Farr, M.J. (Eds). *The Nature of Expertise*. (pp. 129-152). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Spanjers, I. A. E., van Gog, T., & van Merriënboer, J. J. G. (2010). A Theoretical Analysis of How Segmentation of Dynamic Visualizations Optimizes Students' Learning. *Educational Psychology Review*, 22, 411-423

Sperandio, J. C. (1971) Variation of operator's strategies and regulating effects on workload. *Ergonomics*, 14, 571-577.

Stein, E. (1992). *Air traffic control visual scanning* (No. DOT/FAA/CT-TN92/16). Atlantic City International Airport: FAA Technical Center.

Sterman, M. B., Mann, C. A., Kaiser, D. A., & Suyenobu, B. Y. (1994). Multiband topographic EEG analysis of a simulated visuomotor aviation task. *International Journal of Psychophysiology*, 16, 49-56.

Sterman, M. B., & Mann, C.A. (1995). Concepts and applications of EEG analysis in aviation performance evaluation. *Biological Psychology*, 40, 115-130.

Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, 153, 652-654.

- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12, 257-285.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty and instructional design. *Learning and Instruction*, 4, 295-312.
- Sweller, J. (2015). In Academe, What Is Learned, and How Is It Learned? *Current Directions in Psychological Science*, 24, 190-194.
- Sweller, J., & Cooper, G. (1985). The Use of Worked Examples As A Substitute For Problem Solving In Learning Algebra. *Cognition and Instruction*, 2, 59-89.
- Sweller, J., & Chandler, P. (1991). Evidence for cognitive load theory. *Cognition and instruction*, 8, 351-362.
- Sweller, J., & Chandler, P. (1994). Why some material is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, 12(3), 185-233.
- Sweller, J., Van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. (1998). Cognitive architecture and Instructional design. *Educational Psychology Review*, 10, 251-296.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. Springer: New York.
- Szulewski, A., Roth, N., & Howes, D. (2015). The Use of Task-Evoked Pupillary Response as an Objective Measure of Cognitive Load in Novices and Trained Physicians: A New Tool for the Assessment of Expertise. *Academic Medicine*, 90, 981-987.
- Tatler, B. W., Wade, N. J., Kwan, H., Findlay, J. M., & Velichkovsky, B. M. (2010). Yabus, eye movements, and vision. *i-Perception*, 1, 7-27.
- Thereau, J. (2002). La notion de “charge mentale” est-elle soluble dans l’analyse du travail, la conception ergonomique et la recherche neurophysiologique? In M. Jourdan, & J. Thereau (Eds), *Charge mentale: notion floue et vrai problème* (pp. 41-70). Toulouse: Octares.
- Thiffault, P., & Bergeron, J. (2003). Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 35, 381-391.
- Thorpe, S. J. (2011). Grandmother Cells and Distributed Representations. In N. Kriegeskorte & G. Kreiman (Eds.), *Visual population codes - Toward a common multivariate framework for cell recording and functional imaging* (pp. 23-51). Cambridge: MIT Press.
- Thorpe, S. J. (2015). 10 Questions (and answers) to cognitive sciences. In *Memory Mechanisms in Man and Machine*. Conference held in Albi, France, October, 2015.
- Tiberghien, G. (1997). *La Mémoire Oubliée*. Liège: Mardaga.

Bibliographie

- Tole, J. R., Stephens, A. T., Harris, R. L., & Ephrath, A. R. (1982). Visual scanning behavior and mental workload in aircraft pilots. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *53*, 54-61.
- Treisman, A. M. (1964). Selective Attention in Man. *British Medical Bulletin*, *20*, 12-16.
- Treisman, A.M. (1969). Strategies and Models of Selective Attention. *Psychological Review*, *76*, 282-299.
- Tricot, A., & Chanquoy, L. (1996). La charge cognitive, " vertu dormitive " ou concept opérationnel ? Introduction. *Psychologie Française*, *41*, 313-318.
- Tricot, A., & Sweller, J. (2014). Domain-Specific Knowledge and Why Teaching Generic Skills Does Not Work. *Educational Psychology Review*, *26*, 265-283.
- Tricot, A., Sweller, J., Amadiou, F., Chanquoy, L., & Mariné, C. (2008). Strategies used by humans to reduce their own cognitive load. *Cognitive Load Theory Conference*, Wollongong, 29 Feb-2 March.
- Tsang, P. S., & Velazquez, V. L. (1996). Diagnosticity and multidimensional subjective workload ratings. *Ergonomics*, *39*, 358-381.
- Tulving, E. (1985). How Many Memory Systems Are There. *American Psychologist*, *40*, 385-398.
- Tuovinen, J. E., & Sweller, J. (1999). A Comparison of Cognitive Load Associated With Discovery Learning and Worked Examples. *Journal of Educational Psychology*, *91*, 334-341.
- Turati, C., Simion, F., Milani, I., & Umiltà, C. (2002). Newborns' preference for faces: what is crucial? *Developmental psychology*, *38*, 875-882.
- Underwood, G., Jebbert, L., & Roberts, K. (2004). Inspecting pictures for information to verify a sentence: Eye movements in general encoding and in focused search. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *57A*, 165-182.
- Ungerleider, M., & Mishkin, L. G. (1982) Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of Visual Behavior* (pp. 549-586). Cambridge: MIT Press.
- Valentino, D. A., Arruda, J., & Gold, S. (1993). Comparison of qEEG and response accuracy in good vs. poorer performers during a vigilance task. *International Journal of Psychophysiology*, *15*, 123-133.
- 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*, 21-30.
- Van Gog, T., & Scheiter, K. (2010). Eye tracking as a tool to study and enhance multimedia learning. *Learning and Instruction*, *20*, 95-99.

- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E., & Martinerie, J. (2001). The brainweb: Phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 229-239.
- Velichkovsky, B.V., Rothert, A., Kopf, M., Dornhoeffler S. M., & Joos, M. (2002). Towards an Express-Diagnostics for Level of Processing and Hazard Perception. *Transportation Research, Part F*, 5, 145-156.
- Velichkovsky, B. M., Joos, M., Helmert, J. R., & Pannasch, S. (2005). Two visual systems and their eye movements: Evidence from static and dynamic scene perception. In *Proceedings of the XXVII conference of the cognitive science society* (pp. 2283-2288). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Verbruggen, F., McLaren, I. P. L., & Chambers, C. D. (2014). Banishing the Control Homunculi in Studies of Action Control and Behavior Change. *Perspectives on Psychological Science*, 9, 497-524.
- Vergauwe, E., Dewaele, N., Langerock, N., & Barrouillet, P. (2012). Evidence for a central pool of general resources in working memory. *Journal of Cognitive Psychology*, 24, 359-366.
- Vergauwe, E., Camos, V., & Barrouillet, P. (2014). The impact of storage on processing: implications for structures and functioning of working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 40, 1072-1095.
- Vergauwe, E., Hartstra, E., Barrouillet, P., & Brass, M. (2015). Domain-general involvement of the posterior frontolateral cortex in working memory: an fMRI study of the time-based interplay between maintenance and processing. *NeuroImage*, 115, 104-116.
- Vidulich, M.A., & Tsang, P.S. (2012). Mental Workload and Situation Awareness. In G. Salvendy (Ed.) *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (pp. 243-273). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Vignali, L., Himmelstoss, N. A., Hawelka, S., Richlan, F., & Hutzler, F. (2016). Oscillatory Brain Dynamics during Sentence Reading: A Fixation-Related Spectral Perturbation Analysis. *Frontiers in Human Neurosciences*, 10, 1-13.
- Voss, J. F., Greene, T. R., Post, T. A., & Penner, B. C. (1983). Problem-solving skill in the social sciences. *The psychology of learning and motivation*, 17, 165-213.
- Ward, L. M. (2003). Synchronous neural oscillations and cognitive processes. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 553-559.
- Wascher, E., Rasch, B., Sanger, J., Hoffmann, S., Schneider, D., Rinkenauer, G., Heuer., H., & Gutberlet, I. (2014). Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue. *Biological Psychology*, 96, 57-65.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple Resources and Performance Prediction. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 3, 159-177.

Bibliographie

- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors*, 50, 449-455.
- Wickens, C. D., & Alexander, A. L. (2009). Attentional Tunneling and Task Management in Synthetic Vision Displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 19, 182-199.
- Wierville, W. W., & Connor, S. A. (1983). Evaluation of 20 Workload Measures Using a Psychomotor Task in a Moving-Base Aircraft Simulator. *Human Factors*, 25, 1-16.
- Wilson, G. F., & Russell, C. A. (2003). Operator Functional State Classification Using Multiple Psychophysiological Features in an Air Traffic Control Task. *Human Factors*, 45, 381-389.
- Wilson, G. F., & Russell, C. A. (2007). Performance Enhancement in an Uninhabited Air Vehicle Task Using Psychophysiologicaly Determined Adaptive Aiding. *Human Factors*, 49, 1005-1018.
- Won Han, S., & Marois, R. (2014). Functional Fractionation of the Stimulus-Driven Attention Network. *The Journal of Neuroscience*, 34, 6958-6969.
- Wood, N., & Cowan, N. (1995). The cocktail party phenomenon revisited: how frequent are attention shifts to one's name in an irrelevant auditory channel? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21, 255-260.
- Xie, B., & Salvendy, G. (2000). Prediction of Mental Workload in Single and Multiple Tasks environments. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 4, 213-242.
- Yamada, F. (1998). Frontal midline theta rhythm and eye blinking activity during a VDT task and a video game: useful tools for psychophysiology in ergonomics. *Ergonomics*, 41(5), 678-688.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye movements and vision*. New York: Plenum Press.
- Yeh, Y.-Y., & Wickens, C. D. (1988). Dissociation of performance and subjective measures of workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 30, 111-120.
- Zhao, C., Zhao, M., Liu, J. & Zheng, G. (2012). Electroencephalogram and electrocardiograph assessment of mental fatigue in a driving simulator. *Accident Analysis and Prevention*, 45, 83-90.

Table des illustrations

Figure 1. Illustration de l'effet du problème résolu	16
Figure 2. Représentation du modèle en composantes multiples de la mémoire de travail. Inspiré de Baddeley (2010)	34
Figure 3. Schéma des voies ventrales et dorsales selon Ungerleider et Mishkin (1982)	39
Figure 4. Représentation d'un rythme thêta, d'un rythme gamma et de la somme des deux....	41
Figure 5. Représentation du modèle de Lisman (2010) de rafraîchissement des éléments en mémoire de travail.....	41
Figure 6. Le modèle de Wickens.....	53
Figure 7. Illustration d'une tâche de distraction (Barrouillet et al., 2007) et les variations du ratio temporel induites.....	61
Figure 8. Représentation du modèle TBRS (tirée de Barrouillet & Camos, 2014).....	63
Figure 9. Variations du ratio temporel lors d'une tâche d'empan complexe	65
Figure 10. Illustration des variations du ratio temporel	66
Figure 11. La Tâche de Gestion de Priorité (TGP) utilisée durant l'expérimentation 1	118
Figure 12. Moyennes et écart-types pour les données subjectives, pupillométriques et comportementales lors de l'expérimentation 1	121
Figure 13. Rythme thêta durant les phases 1 à 4 de l'expérimentation 1 pour chaque cluster	123
Figure 14. Illustration de la segmentation du signal lors des "Fixation Locked Spectral Analysis"	133
Figure 15. Interaction entre les facteurs "rythme" et "tâche" lors de l'expérimentation 1	135
Figure 16. Interaction entre les facteurs "région" et "tâche" lors de l'expérimentation 1	136
Figure 17. Interaction entre les facteurs "latéralité" et "tâche" lors de l'expérimentation 1...	137
Figure 18. Activité électro-encéphalographique en fonction de la tâche réalisée dans l'expérimentation 1	138
Figure 19. Illustration des ratios temporels des deux modalités de l'expérimentation 2.....	146
Figure 20. Tâche interférente de l'expérimentation 2.....	149
Figure 21. Protocole de l'expérimentation 2.....	151
Figure 22. Nombre de séries correctes réalisées lors de l'expérimentation 3.....	159
Figure 23. Illustration des ratios temporels des expérimentations 3 et 4	163
Figure 24. Nombre de séries correctes réalisées lors de l'expérimentation 4.....	168
Figure 25. Illustration des ratios temporels des expérimentations 3, 4 et 5.	172
Figure 26. Nombre de séries correctes réalisées lors de l'expérimentation 5.....	177
Figure 28. Puissance du rythme thêta dans région frontale lors de la condition "lettres"	193
Figure 29. Puissance du rythme thêta dans la condition "calculs"	194
Figure 30. Puissance du rythme thêta dans la condition "lettres"	195
Figure 31. Puissance du rythme alpha dans région frontale lors de la condition "lettres"	197
Figure 32. Puissance du rythme alpha dans la condition "calculs"	198
Figure 33. Puissance du rythme alpha dans la condition "lettres"	199

Table des tableaux

Tableau 1. Répartition des 16 électrodes sélectionnées. Ces électrodes ont permis d'analyser les données en fonction de 4 régions cérébrales pour les deux hémisphères	134
Tableau 2. Moyennes et écart-types du nombre de séries réalisés sans erreur en fonction de l'ordre de présentation des modalités.	190
Tableau 3. Moyennes et écart-type des performances et temps de réaction obtenus dans l'expérimentation 6	190
Tableau 4. Moyennes et écart-types du nombre de séries correctement réalisées pour chaque modalité de chaque condition expérimentale	191
Tableau 5. Nombre de séries correctement réalisées et taille de l'échantillon par série	191
Tableau 6. Moyennes et écart-types de la puissance associée au rythme thêta sur l'ensemble du scalp.....	192
Tableau 7. Moyennes et écart-types de la puissance associée au rythme thêta dans la région frontale	193
Tableau 8. Moyennes et écarts-types des puissances associées au rythme alpha sur l'ensemble du scalp.....	196
Tableau 9. Moyennes et écarts-types de la puissance spectrale associée au rythme alpha dans la région frontale	197