



Prise de décision sous incertitude et raisonnement probabiliste chez l'enfant : aspects développementaux et différentiels

Jean Audusseau

► To cite this version:

Jean Audusseau. Prise de décision sous incertitude et raisonnement probabiliste chez l'enfant : aspects développementaux et différentiels. Psychologie. Université Rennes 2, 2016. Français. NNT : 2016REN20015 . tel-01407354

HAL Id: tel-01407354

<https://theses.hal.science/tel-01407354>

Submitted on 2 Dec 2016

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.

SOUS LE SCEAU DE L'UNIVERSITÉ EUROPEENNE DE BRETAGNE

UNIVERSITÉ RENNES 2

Ecole Doctorale - Sciences Humaines et Sociales

Centre de Recherches en Psychologie, Cognition et Communication (CRPCC, EA 1285)

Prise de décision sous incertitude et raisonnement probabiliste chez l'enfant : aspects développementaux et différentiels

Thèse de Doctorat

Discipline : Psychologie

Présentée par Jean AUDUSSEAU

Directeur de thèse : Jacques JUHEL

Soutenue le 13 mai 2016

Jury :

Pierre-Yves GILLES

Professeur à l'Université d'Aix - Marseille (Rapporteur)

Jacques JUHEL

Professeur à l'Université Rennes 2 (Directeur de thèse)

Jacques LAUTREY

Professeur émérite à l'Université Paris Descartes (Examineur)

Annie MAGNAN

Professeur à l'Université Lyon 2 (Rapporteuse)

Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer ma plus sincère gratitude à Jacques Juhel, qui m'a transmis avec une grande disponibilité le goût pour une activité de recherche ouverte aux niveaux d'analyse théoriques, méthodologiques et épistémologiques les plus divers. J'ai beaucoup apprécié le caractère artisanal de notre démarche, la possibilité de prendre le temps de nous appliquer et surtout de douter, quitte à souvent recommencer. Merci pour votre confiance et votre soutien, notamment dans les moments d'incertitude, ainsi que pour votre optimisme et votre sympathie.

Je remercie les Professeurs Pierre-Yves Gilles, Jacques Lautrey, et Annie Magnan d'avoir accepté d'être membre du jury de cette thèse, et d'avoir consacré du temps à examiner mon travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du département de psychologie de l'Université de Rennes 2, personnels de l'enseignement et de l'administration, avec lesquels j'ai eu le plaisir d'échanger durant mes années de thèse. Tout particulièrement Emmanuelle Bonjour, qui a encadré mon premier travail d'initiation à la recherche en psychologie du développement, m'a encouragé à poursuivre, et m'a été d'un soutien précieux à de nombreuses reprises durant l'ensemble de mon cursus. Thierry Marivain et Géraldine Rouxel, avec lesquels j'ai eu la chance de collaborer dans le cadre des enseignements de psychologie différentielle. Yvonnick Noël, pour sa pédagogie dans l'enseignement des statistiques.

Je ne saurais oublier de remercier vivement mes camarades doctorants, ingénieurs, et informaticiens, pour nos débats animés, nos moments de rigolade, et pour leur amitié.

Merci aux équipes pédagogiques des écoles de Guignen et de Betton, qui m'ont réservé les meilleures conditions d'accueil pour les passations, ainsi qu'à tous les enfants qui ont participé, avec joie et enthousiasme.

Je remercie également tous les étudiants de l'Université Rennes 2 et du CNAM Bretagne que j'ai pu croiser durant mes enseignements, et qui ont conforté mon envie de devenir enseignant.

Merci à mes parents et à tous mes proches pour leur soutien durant ces années.

Merci enfin à Natacha et à notre petite Yaelle, pour votre présence au quotidien.

« Ceux qui s'exercent à enregistrer et comparer les actions humaines ne se trouvent sur aucun point aussi embarrassés que lorsqu'il faut les coudre ensemble pour en faire un tout et les présenter sous le même jour car elles se contredisent ordinairement d'une façon si étrange qu'il semble impossible qu'elle soient parties d'une même boutique. [...] Et il y a autant de différence de nous à nous-mêmes que de nous à autrui. »

Montaigne, *Les Essais*, livre II (traduit du vieux français).

Sommaire

Introduction	8
La prise de décision sous incertitude.....	8
Positionnement théorique et méthodologique	11
Contenu du document.....	15
Partie I : Cadre théorique	18
Chapitre 1 : Formalisation mathématique des conduites de prise de décision sous incertitude	19
1. De l'espérance mathématique à l'utilité espérée.....	19
2. Modèles à utilité espérée	21
3. Modèles à utilité subjectivement espérée.....	23
4. Un exemple illustratif.....	24
Chapitre 2 : Hasard et incertitude en psychologie du développement de l'enfant	28
1. La contribution princeps de Piaget.....	28
1.1. Histoire du concept de hasard dans la pensée scientifique.....	28
1.2. Genèse de l'idée de hasard chez l'enfant	32
1.2.1. Réactions des enfants face aux phénomènes de mélange et d'irréversibilité.....	33
1.2.2. Quantification des probabilités.....	37
1.2.3. Logique combinatoire	40
2. Les travaux post-piagétien.....	41
2.1. Notion de phénomène aléatoire	42
2.2. Logique combinatoire	44
2.3. Quantification des probabilités.....	48
3. Conclusion.....	59
Chapitre 3 : Prise de décision sous incertitude et neurosciences cognitives	62
1. Rôle des émotions en situation de prise de décision sous incertitude : le point de vue neurologique.....	62
1.1. Bechara : modèle animal et toxicomanie	63
1.2. Damasio et l'hypothèse des marqueurs somatiques.....	64
1.2.1. Principes généraux de la théorie de Damasio.....	64
1.2.2. Un principe explicatif essentiellement neuronal	66
1.3. L'apparition de la tâche du casino dans le champ de la psychologie.....	68

1.4. Tâche du casino et marqueurs somatiques	72
1.5. Rôle des émotions à la tâche du casino : les travaux ultérieurs	75
2. Rôle du contrôle cognitif sur la prise de décision : le point de vue cognitiviste.....	78
2.1. Contrôle cognitif et fonctions exécutives.....	78
2.1.1. Travaux chez l'adulte	78
2.1.2. Travaux chez l'enfant.....	85
2.2. Rôle du contrôle cognitif à la tâche du casino : des résultats contrastés.....	87
2.2.1. Une étude princeps : dissociation de la mémoire de travail et de la prise de décision.....	88
2.2.2. La réhabilitation de la raison	91
3. Conclusion.....	93
Partie II : Travaux empiriques	97
Chapitre 4 : Rôle de la mémoire de travail en prise de décision sous incertitude chez l'enfant de 6 à 11 ans.....	98
1. Introduction	98
2. Méthode.....	103
2.1. Participants	103
2.2. Tâches et matériel.....	103
2.2.1. Children's Gambling Task	104
2.2.2. Tâche secondaire	106
2.2.3. Self-ordered Pointing Task.....	106
2.3. Analyses statistiques	107
3. Résultats	109
3.1. Différences liées à l'âge dans l'acquisition d'une conduite de décision adaptée à la CGT	111
3.2. Mémoire de travail et évolution vers une conduite de décision adaptée à la CGT	112
4. Discussion	114
Chapitre 5 : Analyse longitudinale du rôle des fonctions exécutives en prise de décision sous incertitude chez l'enfant de 5 à 7 ans	120
1. Introduction	120
1.1. Tâche du casino et fonctions exécutives	120
1.2. Objectifs de l'étude	123
2. Méthode.....	125

2.1. Participants	125
2.2. Matériel et procédure	126
2.2.1. Children's Gambling Task (CGT).....	126
2.2.2. Self-Ordered Pointing Task (SOPT)	127
2.2.3. Wisconsin Card Sorting Test (WCST).....	127
2.2.4. Tâche du Go/No Go (GNG)	127
2.3. Analyses statistiques	128
3. Résultats	130
3.1. Statistiques descriptives	130
3.2. Analyse des trajectoires développementales pour chacune des épreuves	130
3.3. Analyse des relations entre le développement des sujets à la CGT et aux autres épreuves.....	134
4. Discussion	135
Chapitre 6 : Variations individuelles et variations situationnelles à l'épreuve de quantification des probabilités chez l'enfant : une approche transactionnelle.....	143
1. Introduction	143
1.1. L'approche transactionnelle	Erreur ! Signet non défini.
1.2. Variations individuelles et situationnelles à l'épreuve de quantification des probabilités	Erreur ! Signet non défini.
2. Méthode.....	Erreur ! Signet non défini.
2.1. Participants	Erreur ! Signet non défini.
2.2. Tâche et matériel	Erreur ! Signet non défini.
2.3. Analyses statistiques	Erreur ! Signet non défini.
3. Résultats	Erreur ! Signet non défini.
3.1. Description des données agrégées et analyses préliminaires ...	Erreur ! Signet non défini.
3.2. Modélisation en classes latentes des blocs d'items considérés isolément ..	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Modélisation en classes latentes d'un ensemble de blocs d'items ..	Erreur ! Signet non défini.
3.4. Effet de l'âge sur l'appartenance aux différentes classes latentes ..	Erreur ! Signet non défini.
4. Discussion	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre 7 : Application du modèle de la valence espérée à la résolution de la tâche du casino chez l'enfant de 6 à 11 ans.....	144
1. La prise de décision sous incertitude.....	144
1.1. Aspects théoriques.....	144
1.2. La Children's Gambling Task.....	145
1.3. Le modèle de la valence espérée	146
2. Méthode.....	150
2.1. Participants	150
2.2. Démarche méthodologique	150
2.3. Estimation des paramètres du modèle de la valence espérée	151
3. Analyses	153
3.1. Analyses de niveau individuel : ajustement du modèle de la valence espérée ...	153
3.2. Analyse multi-niveaux : estimation des paramètres du modèle de la valence espérée	156
3.3. Etude de la validité des paramètres du modèle de la valence espérée	158
4. Conclusion.....	161
Discussion générale	163
Objectifs de la thèse : aspects théoriques et méthodologiques.....	164
Contrôle, raison, logique	165
Un cadre théorique alternatif.....	169
Remarques conclusives sur la notion de prise de risque	171
Références	176
Index des tableaux.....	198
Index des figures.....	200

Introduction

La prise de décision sous incertitude

Au cours de leur développement, les enfants sont de plus en plus souvent confrontés à des situations de prise de décision auxquelles ils doivent s'adapter de manière autonome, et qu'ils rencontreront ensuite fréquemment à l'âge adulte. Pour tenter de rendre compte de la nature de cette adaptation, un champ théorique s'est constitué en psychologie autour de l'appellation de *prise de décision* (*decision making*). De manière générale, ce terme désigne le processus par lequel un individu cherche à atteindre un but en sélectionnant une conduite psychologique parmi différentes alternatives. Une telle définition interpelle d'emblée par la diversité de situations auxquelles elle est susceptible de renvoyer. Ainsi, dans le domaine de la perception visuelle, des tâches de discrimination consistant à juger de la similarité de deux stimuli élémentaires ont été considérées comme évaluant la prise de décision des sujets (Lacouture & Marley, 2004). A l'autre pôle de la diversité des conduites psychologiques, un phénomène aussi complexe que la demande d'euthanasie a également été classé sous cette appellation (Dees, Vernooij-Dassen, Dekkers, Elwyn, Vissers, van Weel, 2013). Se pose alors la question de l'unité et des limites du concept de prise de décision au sein de la psychologie. William James (1890), alors qu'il cherche à définir les fondements de la discipline encore naissante, admet comme postulat initial que « *la poursuite d'un but et le choix des moyens pour l'atteindre sont la marque et le critère de la présence d'un phénomène mental* » (p. 8). James considère ainsi l'objet de la psychologie comme constitué par l'ensemble des phénomènes impliquant la poursuite d'un but et le choix des moyens pour l'atteindre. En notant la forte similarité entre cet objet et la définition du concept de prise de décision que nous avons proposée ci-dessus, on pourrait être tenté d'en conclure que toute conduite psychologique consiste en une prise de décision.

De toute évidence, nous ne pourrions donc pas prétendre étudier un objet aussi général dans le présent travail, et nous limiterons à un sous-ensemble néanmoins vaste des phénomènes de prise de décision. Afin de définir les limites de cet objet, nous examinerons la nature du rapport existant entre les deux éléments de définition de la prise de décision évoqués ci-dessus, à savoir, d'une part, le but que l'individu cherche à atteindre et, d'autre part, l'ensemble des moyens au sein duquel il effectue un choix. Nous distinguerons deux

types de rapport entre ces moyens et ce but, le rapport de nécessité et le rapport de contingence (ou d'incertitude), et c'est ce dernier qui retiendra principalement notre attention par la suite.

Dans certaines situations quotidiennes, on peut admettre que le choix d'un moyen par un individu lui permettra *nécessairement* d'atteindre le but escompté. Me rapprocher d'un feu permet de me réchauffer, venir en aide à une personne m'attire sa sympathie. La connaissance de tels invariants, qui se construit progressivement au cours du développement de l'individu, est souvent conçue comme une condition majeure de sa capacité à agir efficacement sur son environnement.

Mais, même à considérer des relations aussi nécessaires en apparence que celles que nous venons de citer, il n'est pas impossible, en forçant l'imagination, d'envisager la possibilité de conditions dans lesquelles le but ne serait pas atteint (si par exemple le feu se situe à une distance très éloignée, ou si j'attire malencontreusement des ennuis à la personne que je voulais aider). Et la reconnaissance de l'existence de l'une au moins de ces conditions suffit pour affirmer que l'atteinte du but n'est pas nécessaire en soi ou, en des termes équivalents, qu'elle est contingente. Au cours de l'histoire de la philosophie de la connaissance comme de celle des sciences, la part de contingence attribuée aux phénomènes naturels a nettement évolué dans le sens d'une augmentation, qui a laissé une large place aux concepts de probabilité, de hasard, et d'incertitude dans les tentatives d'explication contemporaines. Parallèlement, les conceptions déterministes, qui ont prédominé tout au long du XIX^{ème} siècle, ont vu par la suite leur influence diminuer dans de nombreux champs de recherche. Si l'on cherche à mettre en parallèle l'ontogenèse avec cette histoire, à s'inspirer de celle-ci pour mieux comprendre celle-là, on peut penser que le développement de l'intelligence chez l'individu consiste d'abord à repérer les rapports nécessaires qui existent entre certaines formes d'activité et l'atteinte de certains buts puis, dans un second temps, à se confronter aux limites de cette nécessité et à admettre alors que, au moins dans certains domaines, une part d'incertitude subsiste irréductiblement. Ainsi compris, le processus d'adaptation consisterait à distinguer, au sein d'un environnement complexe et changeant, ce qui demeure totalement imprévisible et ne privilégie donc pas certaines conduites, de ce qui constitue un invariant au regard duquel certaines conduites s'avèrent préférables. Comme nous le verrons par la suite, c'est en des termes similaires que Piaget & Inhelder (1951) proposèrent l'une des premières interprétations psychologiques des conduites de sujets confrontés à des situations présentant un fort degré d'incertitude.

L'objet de ce travail de thèse ainsi précisé, que nous dénommerons par le terme de prise de décision sous incertitude, renvoie à l'étude des processus psychologiques permettant à un individu d'atteindre un but en sélectionnant une conduite parmi plusieurs alternatives, lorsqu'il existe une incertitude quant aux conséquences respectives de ces différentes conduites. Les prototypes d'une telle situation sont le pari et le jeu de hasard (qui, comme nous le verrons, sont à l'origine de l'émergence du concept mathématique de probabilité). La situation qui consisterait par exemple à parier sur le résultat obtenu en lançant deux dés équilibrés, et en calculant la somme des issues, renvoie typiquement à une situation de prise de décision sous incertitude. Chaque nombre entier compris dans l'intervalle [2-12] constitue ici une alternative envisageable. Avec les outils cognitifs qui sont les siens, l'individu ne peut pas prédire avec exactitude le résultat obtenu, et est donc en partie incertain quant à la décision qui s'avèrera la plus favorable. Néanmoins, sa connaissance des lois combinatoires en œuvre dans cette situation pourrait l'inciter à préférer parier sur l'obtention du chiffre 7, qui est par exemple deux fois plus probable que l'obtention du chiffre 4 (en effet, dans cette situation, six combinaisons permettent d'obtenir le chiffre 7, et seulement trois le chiffre 4). Le fait que l'obtention du chiffre 7 soit un résultat plus probable constitue bien un invariant commun à l'ensemble des répétitions possibles de ce même jeu, mais la présence de cet invariant est potentiellement masquée par le caractère aléatoire de la situation.

Selon Wallon (1941), c'est précisément pour éviter au jeu de se ranger dans l'ordre et la régularité de la vie courante, i.e. dans l'invariance, que de tout temps le hasard lui a été combiné : « *le hasard est l'antidote du destin quotidien, il contribue à y soustraire le jeu* » (p. 69). Cette conception revient donc à distinguer l'activité de jeu des autres activités quotidiennes, en considérant que ce sont surtout les premières qui confrontent l'individu au hasard. Piaget & Inhelder (1951) estiment au contraire que « *le mélange inextricable des faits et des séquences causales nous impose sans cesse une attitude probabiliste* », et que « *c'est seulement en théorie, ou parfois en laboratoire, que les phénomènes se simplifient jusqu'à autoriser l'hypothèse de déterminations certaines* » (p.7). On pourrait ainsi objecter que le hasard, loin d'être cantonné aux jeux de hasard, est également en œuvre dans de nombreuses situations de notre vie quotidienne. Face à un environnement soumis à l'influence d'un très grand nombre de facteurs parfois indépendants, et du fait des limites des capacités de l'humain lorsqu'il cherche à appréhender la complexité de cet environnement, la pertinence d'une décision est le plus souvent soumise à un certain risque d'erreur. Quelques exemples suffiront à illustrer cette affirmation. Un agriculteur qui décide de la période la plus favorable pour semer ses graines s'expose aux aléas du climat. Un particulier souscrivant à une

assurance se prémunit contre un risque qu'il ne rencontrera peut être jamais. La situation est analogue pour un enseignant hésitant à modifier sa pratique pédagogique, un patient acceptant ou non la mise en place d'un nouveau protocole de soins, ou un amoureux choisissant le moment opportun pour déclarer sa flamme. Ainsi, si le jeu de hasard a pu être conçu par Wallon comme « *l'antidote du destin quotidien* » (p. 69), il pourrait au contraire être considéré comme la reproduction intentionnelle de notre incertitude quotidienne, à la différence non négligeable que les enjeux y sont généralement moindres. Dans cette seconde conception, le jeu de hasard constituerait une situation expérimentale particulièrement intéressante pour le psychologue qui étudie la manière dont les individus s'adaptent quotidiennement à des environnements incertains.

Positionnement théorique et méthodologique

Nous aborderons cette thématique de la prise de décision sous incertitude à travers les cadres théoriques et méthodologiques propres à trois sous-disciplines de la psychologie : la psychologie cognitive, la psychologie différentielle, et la psychologie du développement. Soulignons dès maintenant que notre intention n'est pas de délimiter les apports respectifs de ces trois disciplines, mais de chercher au contraire à les intégrer au sein d'une démarche commune. On peut néanmoins citer ici les concepts majeurs que nous emprunterons à chacune d'entre elles, et préciser la manière dont nous tenterons de les articuler.

Le cadre théorique de la psychologie cognitive nous suggèrera des hypothèses concernant les processus susceptibles d'être impliqués en situation de prise de décision sous incertitude. Après avoir présenté les processus dont le rôle a le plus fréquemment été supposé dans les études empiriques dédiées à cette question (ce qui nous fera faire quelques détours dans les champs de l'économie et de la neurologie), nous ciblerons nos hypothèses principales sur le rôle des processus de contrôle cognitif, qui seront rattachés aux concepts de mémoire de travail et de fonctions exécutives. Afin de tester certaines de ces hypothèses nous emploierons occasionnellement la méthode expérimentale, qui est la plus classiquement utilisée dans le champ de la psychologie cognitive, en comparant des groupes de sujets placés dans des conditions distinctes et en évaluant l'impact de cette manipulation sur les performances observées au sein de ces groupes. En un sens élargi, nous commencerons déjà à adopter ainsi une approche différentielle, puisque c'est bien de la *variabilité* entre des groupes de sujets dont il sera question.

Mais le niveau d'analyse que privilégie plutôt la psychologie différentielle, et auquel nous nous situerons régulièrement dans ce travail, est celui de la variabilité interindividuelle. Notre démarche consistera alors à sélectionner des tâches dont chacune est supposée échantillonner un processus de traitement de l'information particulier, et à mesurer l'efficacité de ce processus chez plusieurs individus à partir de leurs performances à la tâche considérée. Les différences de performances entre ces individus à cette tâche pourront alors être mises en lien avec les différences de performance de ces mêmes individus à d'autres tâches (qui échantillonnent d'autres processus). C'est alors la structure des différences de performances observées entre des individus dans un ensemble de tâches qui constituera l'objet de nos investigations. Ces tâches pourront ou bien évaluer un processus complexe, comme la prise de décision sous incertitude (les scores à ces tâches ayant alors le statut de variable dépendante), ou bien un processus plus élémentaire et supposé être mobilisé en situation de prise de décision sous incertitude (les scores à ces tâches ayant alors le statut de variable indépendante). Un autre niveau de variabilité auquel nous accorderons une importance toute particulière, et que nous mettrons en lien avec le niveau interindividuel, sera le niveau intra-individuel. Celui-ci sera abordé sous deux angles différents. Le premier concernera la variabilité observée chez un même individu selon les différents contextes de prise de décision dans lesquels il se situe, et nous permettra d'interroger les stratégies mobilisées par les individus. Le deuxième concernera le changement observé chez un même individu au cours du temps, lorsqu'une même décision lui est proposée de manière répétée. En intégrant ainsi la dimension temporelle à nos modèles, il deviendra difficile de prétendre que notre travail est bien spécifique de l'approche différentielle, sans reconnaître qu'il s'inscrit également dans une approche développementale.

Les contributions théoriques de la psychologie du développement aux questions relatives à la prise de décision sous incertitude seront abordées en nous focalisant sur une période de la vie qui s'accompagne de changements majeurs dans ce domaine, à savoir l'enfance. Dans nos propres travaux, nous avons choisi d'interroger cette période à travers deux niveaux de développement. Le premier niveau, que nous qualifierons de macrogénétique et qui est le plus classiquement utilisé au sein de la discipline, consiste à étudier les changements psychologiques se déroulant sur de longues périodes de temps (des mois ou des années). Nous distinguerons deux approches méthodologiques au sein de ce niveau, que nous avons toutes deux employées dans des études distinctes, l'approche transversale et l'approche longitudinale. Remarquons ici que l'adoption d'une approche longitudinale constitue une forme d'étude de la variabilité intra-individuelle, ce qui illustre le rapprochement important

qui existe entre les approches développementale et différentielle. Le deuxième niveau développemental qui nous intéressera est le niveau microgénétique, qui porte sur des changements se déroulant sur un temps court, par exemple à l'échelle de la résolution d'une tâche. Il constitue également une forme de variabilité intra-individuelle, et a connu un essor important ces dernières années, sous l'impulsion de psychologues développementalistes particulièrement attachés au concept de variabilité, comme Siegler (1995). Notons que l'intégration des niveaux macrogénétique et microgénétique a plus récemment été préconisée par des auteurs comme Lee et Karmiloff-Smith (2002). En suivant cette préconisation dans le champ de la prise de décision sous incertitude, nous aborderons à différentes reprises la question de la manière dont l'enfant se développe, à une échelle macrogénétique, dans sa manière de modifier sa conduite, à une échelle microgénétique.

Pour conclure sur la présentation de ces trois disciplines, nous voudrions souligner le fait que leurs statuts respectifs, bien qu'étroitement liés, ne seront pas strictement équivalents. A la psychologie cognitive, nous emprunterons essentiellement un cadre théorique, un ensemble de modèles concernant notre objet d'étude qu'est la prise de décision sous incertitude. La psychologie différentielle sera davantage sollicitée en tant qu'approche, et non en tant que discipline. Plutôt que des modèles théoriques, elle nous fournira les concepts et les méthodes qui nous permettront d'aborder notre objet sous l'angle de la variabilité. Nous parlerons ainsi d'« approche différentielle » (Lautrey, 2010), un terme qui ne désigne pas tant une discipline de la psychologie ayant son propre objet (la « psychologie différentielle »), mais plutôt une problématique qui transcende les différentes disciplines de la psychologie, en se proposant d'interroger leurs objets respectifs sous l'angle de la variabilité. La psychologie du développement aura quant à elle un statut plus hybride. Elle sera convoquée à la fois en tant que discipline, en apportant un savoir sur notre objet d'étude (via les travaux de Piaget et de ses successeurs sur la genèse du concept de hasard chez l'enfant), et également en tant qu'approche (l'« approche développementale »), en nous permettant d'interroger notre objet sous l'angle de la temporalité et du changement. Enfin, les approches développementale et différentielle seront considérées comme intimement reliées d'un point de vue théorique. Nous nous inscrirons pour cela dans la perspective proposée par Lautrey (2010), lorsqu'il affirme que « la modélisation du développement ne peut ignorer la différenciation des trajectoires et l'explication des différences ne peut ignorer leur genèse ».

Précisons également que notre volonté d'adopter les approches développementale et différentielle ne sera pas sans conséquences importantes sur nos choix méthodologiques. Il

faudra tout d'abord nous donner les moyens d'observer, au sein de nos données, les différentes formes de changement et de variabilité citées ci-dessus. C'est avant tout dans le choix, d'une part, des tâches psychologiques employées et, d'autre part mais de manière indissociable, des échantillons de sujets sélectionnés, que nous pourrons tenter d'y parvenir. Il nous faudra ensuite sélectionner les méthodes permettant d'analyser ces données en leur donnant une forme qui les rende interprétables. Au sein de la diversité de méthodes employées en psychologie, nous nous orienterons vers des méthodes de modélisation statistique, qui auront pour fonction de formaliser, dans un langage probabiliste, nos hypothèses relatives au changement et à la variabilité. Ces méthodes nous permettront de distinguer, au sein de la variabilité inhérente à nos données, ce qui, d'une part, semble relever d'un ensemble de lois psychologiques (développementales et/ou différentielles) et ce qui, d'autre part, semble relever d'une variation imprévisible.

On peut relever ici l'analogie qui existe entre cette démarche et celle que nous avons esquissée ci-dessus concernant l'individu placé en situation de prise de décision, qui cherche à distinguer le nécessaire du contingent au sein de la variabilité des phénomènes dont il fait l'expérience. Ainsi, dans ce domaine comme dans d'autres, la démarche du chercheur pourrait réflexivement constituer un modèle psychologique des conduites que ce chercheur se propose lui-même d'expliquer. Piaget, fondamentalement intéressé par des questions épistémologiques et étudiant le développement psychologique comme moyen de trouver des réponses à ces questions, nous fournira l'exemple d'une telle analogie. Plus récemment, la démarche d'inférence statistique a elle-même été considérée comme constituant un modèle pertinent de l'apprentissage humain, comme l'illustre par exemple le concept d'apprentissage bayésien, auquel nous ferons allusion ci-dessous (pour une application de ce concept au développement de l'enfant, voir Ullman, Goodman, & Tenenbaum, 2012).

On conçoit ainsi que des chercheurs s'appuyant plus ou moins explicitement sur une telle analogie, et eux-mêmes enclins à considérer leur démarche scientifique comme idéalement rationnelle, aient naturellement abouti à une conception rationnelle du fonctionnement psychologique et, plus particulièrement, de la prise de décision sous incertitude. Plusieurs modèles que nous aborderons par la suite nous familiariseront ainsi avec un sujet rationnel, qui exerce un certain contrôle sur son activité et soumet les informations dont il dispose à des traitements logico-mathématiques, afin d'aboutir à une décision qu'il espère la plus optimale possible. Les écarts à cette optimalité y seront interprétés dans les termes d'une défaillance ou d'un développement encore insuffisant de ces processus de

traitement. Notre propre contribution consistera à tenter d'évaluer la validité d'une telle conception rationnelle de la prise de décision sous incertitude.

Contenu du document

Le présent document débutera par un exposé des modèles qui constitueront les fondements théoriques de nos hypothèses, tout en faisant régulièrement allusion à d'autres modèles dont nous soulignerons le caractère opposé ou complémentaire. Nous commencerons le premier chapitre en présentant brièvement quelques repères historiques relatifs au concept de probabilité. Ces considérations nous permettront d'entrevoir comment sont ensuite apparues les premières tentatives de formalisation mathématique des conduites de sujets placés en situation de prise de décision sous incertitude, et comment elles ont débouché sur la famille des modèles à utilité espérée et des modèles à utilité subjectivement espérée, dans les champs de la psychologie et de l'économie. Dans le deuxième chapitre, nous aborderons cette même question sous l'angle de la psychologie du développement, en présentant les travaux que Piaget et ses successeurs ont consacrés au problème de la genèse du concept de hasard chez l'enfant. Nous terminerons cette partie théorique par un troisième chapitre, en nous tournant davantage vers les champs de la psychologie cognitive et de la neuropsychologie, et vers l'hypothèse d'une mobilisation des processus de contrôle cognitif chez l'individu placé en situation de prise de décision sous incertitude.

La section suivante sera découpée en quatre chapitres, dont chacun correspondra à la présentation d'une étude empirique réalisée durant cette thèse. A l'exception de l'étude présente dans le chapitre 6, toutes ces études auront pour objectif commun d'étudier les phénomènes de prise de décision sous incertitude en les opérationnalisant par la tâche du casino (« *gambling task* »), une épreuve fréquemment utilisée dans des contextes cliniques ou de recherche. Au-delà des nombreuses variantes qui en ont été proposées, la tâche du casino consiste pour le sujet à tenter de maximiser l'obtention d'un gain (argent fictif, bonbons,...). Le moyen dont il dispose pour atteindre ce but est de sélectionner, à chacun des nombreux essais qui composent la passation, une option parmi plusieurs alternatives. Il ignore cependant que seules certaines de ces options sont avantageuses (i.e. lui permettent de maximiser son gain sur le long terme), les autres étant au contraire désavantageuses. La difficulté principale de cette épreuve tient à la relation probabiliste, génératrice d'incertitude, qui unit chacune des options aux conséquences qu'elle engendre en termes de gain. C'est donc seulement sur la base d'une expérience accumulée au cours de plusieurs essais que le sujet pourra, le cas

échéant, induire le fait que certaines options sont plus avantageuses que d'autres. Les études présentées dans les chapitres 4, 5, et 7, auront ainsi pour objectif d'identifier les processus psychologiques impliqués dans la résolution de la tâche du casino.

Dans le chapitre 4, nous testerons l'hypothèse d'un rôle de la mémoire de travail, qui sera supposée assurer trois fonctions permettant à l'individu i) de maintenir temporairement en mémoire les informations utiles à la résolution de la tâche du casino (ces informations étant constituées par les conséquences des choix qu'il effectue) ii) de mettre à jour ces informations au fur et à mesure de l'avancement de la passation et iii) d'assurer la surveillance de ses performances (« *monitoring* »). Nous aborderons cette hypothèse de manière transversale, à partir des performances obtenues par un échantillon de 105 enfants âgés de 6-7 ans, 8-9 ans et 10-11 ans, et en suivant deux approches : l'approche intergroupe et l'approche interindividuelle. L'approche intergroupe consistera à comparer les performances obtenues dans deux conditions expérimentales, l'une étant une condition contrôle et l'autre une condition de double tâche dans laquelle les ressources de la mémoire de travail sont davantage sollicitées. L'approche interindividuelle consistera quant à elle à évaluer la relation existant entre les performances observées à la tâches du casino et celles observées à une tâche évaluant plus spécifiquement la mémoire de travail.

L'étude suivante, présentée dans le chapitre 5, aura également pour objectif d'identifier les processus impliqués dans la résolution de la tâche du casino, mais nous élargirons notre champ d'investigation à l'ensemble des fonctions exécutives : mise à jour en mémoire de travail, flexibilité attentionnelle et inhibition. Chacun de ces trois prédicteurs sera évalué à partir d'une épreuve spécifique, et les performances seront mises en lien avec celles observées à la tâche du casino. L'échantillon inclus dans cette étude comprendra 172 enfants âgés de 5 à 7 ans, qui seront vus à deux reprises séparées d'un intervalle de 10 mois. Le fait de disposer de données longitudinales, recueillies auprès d'un échantillon relativement vaste, et sur un nombre d'épreuves assez conséquent, nous permettra de tester des hypothèses se rapprochant de la complexité que les phénomènes étudiés nous semblent présenter, et notamment en ce qui concerne leur sensibilité au changement et à la variabilité.

L'étude présentée dans le chapitre 6 se focalise sur l'acquisition du concept de probabilité chez l'enfant entre les âges de 6 et 7 ans, dans le cadre d'une approche transactionnelle (Snow, 1991, 1992; Ohlmann, 1990, 1995). Celle-ci consiste à tenter d'identifier les stratégies adaptatives mobilisées par les individus en conciliant les avantages d'une approche générale, qui se définit par l'étude de l'effet des variations situationnelles sur

la conduite, et les avantages d'une approche différentielle, qui étudie les variations systématiques de cette conduite entre les individus. Nous nous appuierons pour cela sur les données obtenues auprès d'un échantillon composé de 167 enfants âgés de 6 à 7 ans, auxquels nous avons proposé une épreuve de quantification des probabilités similaire à celle employée par Piaget & Inhelder (1951).

La dernière étude, présentée dans le chapitre 7, portera à nouveau sur la tâche du casino, mais s'inscrira dans une démarche qui la distingue de manière assez fondamentale des deux premières. Celles-ci trouvent en effet leur fondement dans l'analyse de données recueillies au niveau d'un échantillon de sujets, et cherchent à atteindre des lois générales que l'on suppose ensuite pouvoir s'appliquer chez chacun des individus de la population dont cet échantillon est extrait (démarche inférentielle « descendante », du groupe vers l'individu). En nous appuyant sur des travaux qui remettent en cause cette supposition, nous chercherons au contraire à juger de la plausibilité d'un modèle psychologique au niveau individuel puis, dans un second temps, nous nous demanderons s'il est possible de regrouper certains individus sur la base du fait que ce modèle rend bien compte de leur données (démarche inférentielle « ascendante », de l'individu vers le groupe). Ce modèle individuel (modèle de la valence espérée, Busemeyer & Stout, 2002), qui peut être rattaché à la famille des modèles à utilité subjectivement espérée, correspondra à une formalisation mathématique des processus psychologiques que nous supposerons mobilisés par un individu lorsqu'il résout la tâche du casino, et sera estimé à partir des données recueillies chez chacun des sujets d'un échantillon de 54 enfants âgés de 6 à 11 ans. Notre niveau d'analyse sera donc avant tout microgénétique et individuel, via l'analyse de la variabilité intra-individuelle inhérente au pattern de réponses observé chez chaque enfant. Mais il nous sera possible d'atteindre dans un second temps le niveau interindividuel, après regroupement des seuls sujets dont les données semblent formalisables par un même modèle, et qui témoignent donc d'un fonctionnement psychologique qualitativement similaire.

La discussion générale sera finalement l'occasion de tenter de dégager quelques axes de réflexion communs à ces quatre études, en termes d'apports, de limites, et de perspectives pour des travaux futurs.

Partie I : Cadre théorique

Chapitre 1 : Formalisation mathématique des conduites de prise de décision sous incertitude

1. De l'espérance mathématique à l'utilité espérée

Les psychologues qui s'intéressent à la prise de décision sous incertitude ont coutume de faire remonter l'origine du problème à la naissance du concept de probabilité (Cadet et Chasseigne, 2009). Nous ferons également ce choix, en faisant remarquer qu'il traduit une tendance - déjà soulignée en introduction, et sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir ultérieurement - qu'ont certains auteurs à considérer la démarche scientifique, et en particulier la leur, comme un modèle pertinent des conduites des sujets placés en situation de prise de décision sous incertitude. Le calcul des probabilités, outil décisionnel privilégié par de nombreux scientifiques afin de tester la vraisemblance de leurs hypothèses, fut en effet considéré relativement tôt comme une procédure analogue à celle que les individus utilisent pour prendre leurs décisions quotidiennes.

On situe souvent l'origine du concept de probabilité au XVII^e siècle, une période durant laquelle le développement des jeux de hasard était florissant. Antoine Gombaud (1607-1684), plus connu sous le nom de Chevalier de Méré, organise de tels jeux en proposant aux participants de miser une certaine somme d'argent, et d'espérer remporter un gain si l'issue d'un lancer de dés s'avère correspondre à un évènement déterminé à l'avance. Gombaud s'aperçoit que certains des jeux qu'il conçoit lui permettent de gagner de l'argent sur le long terme (lorsque, pour gagner, le participant doit par exemple ne jamais obtenir l'évènement « six » en procédant à 4 lancers d'un dé) tandis que d'autres jeux qu'il perçoit comme analogues lui en font perdre (si par exemple le participant ne doit jamais obtenir l'évènement « douze » en lançant 24 fois une paire de dés). Ne comprenant pas la raison de cette différence, il soumet le problème à Blaise Pascal (1623-1662), qui parviendra à le résoudre en calculant la probabilité que le participant gagne dans chacun de ces jeux (elle est de 0,4823 dans le premier jeu, et de 0,5086 dans le deuxième). Ce calcul se fonde sur l'analyse combinatoire, qui permet de dénombrer le nombre d'évènements possibles dans cette situation. Peu de temps après et toujours dans le contexte des jeux de hasard, Pascal s'appuie sur la probabilité pour définir l'espérance mathématique de gain (produit des enjeux et de la probabilité de gain), un terme introduit quelques années plus tard par Huygens (1629-1695). L'apparition du concept d'espérance mathématique a son importance pour le sujet qui nous

préoccupe, puisqu'il constitue le critère mathématique à partir duquel une décision optimale peut être prise en situation d'incertitude. Il formalise ainsi les conduites d'un individu hypothétiquement rationnel placé en situation de prise de décision sous incertitude.

L'espérance mathématique considérée en tant que formalisation pertinente des conduites de prise de décision sous incertitude a été remise en cause quelques décennies plus tard sous l'impulsion de Bernoulli (1700-1782), auquel on avait soumis un problème qui prendra ensuite le nom de « paradoxe de Saint Petersburg ». Ce problème est apparu en 1713 aux Pays-Bas, et repose à nouveau sur un jeu d'argent qui consiste à jouer à pile ou face en procédant à un nombre indéfini de lancers, jusqu'à ce que l'évènement « face » intervienne. Le joueur remporte deux florins si cet évènement intervient dès le premier lancer, quatre florins s'il intervient au deuxième, huit au troisième, seize au quatrième, etc... La question est de connaître le montant qu'un joueur devrait raisonnablement décider d'investir pour être autorisé à participer à ce jeu. Si l'on s'appuie sur l'espérance mathématique de gain pour répondre à cette question, on s'aperçoit qu'elle est de :

$$\frac{1}{2} * 2 + \frac{1}{4} * 4 + \frac{1}{8} * 8 + \frac{1}{16} * 16 + \dots = +\infty ,$$

et on devrait donc en conclure que tout joueur raisonnable devrait décider de miser toute sa fortune dans ce jeu. Or, de toute évidence, une telle décision semble extrêmement risquée, et les résultats expérimentaux montrent que les individus ne sont généralement pas prêts à investir plus de deux dollars dans ce jeu (Hayden & Platt, 2009). L'explication du paradoxe trouve son origine dans les idées de Cramer (1704-1752), qui fait remarquer que l'espérance de gain du jeu n'est infinie qu'à cause des gains exorbitants qu'il serait possible d'emporter dans l'hypothèse très improbable selon laquelle on obtiendrait successivement l'évènement « pile » au cours de centaines de lancers (le gain est par exemple de $1,3 * 10^{30}$ unités monétaires au 100^{ème} lancer). Mais, aux yeux de Cramer, la perspective de gagner de tels montants astronomiques ne présente pas une valeur *subjectivement* différente de celle qu'il attribuerait au fait de gagner un montant plus faible, comme par exemple 16 millions d'unités monétaires, qui peut être obtenu en obtenant approximativement 24 fois l'évènement « pile ».

La conclusion principale que Bernoulli élaborera sur la base des idées de Cramer est que la valeur qu'un individu attribue à un gain potentiel est une valeur subjective, nommée *utilité*, qui diffère de sa valeur objective (Dehling, 1997). Bernoulli propose également une première formalisation de la relation qui associe la valeur monétaire d'un gain à son utilité, à partir d'une fonction logarithmique qui prendra le nom de « loi de Bernoulli ». Une

augmentation de la richesse se traduirait donc par une augmentation de l'utilité qui est d'autant plus faible que la richesse initiale est élevée. Dans le jeu du paradoxe de Saint Petersburg, ceci expliquerait pourquoi les individus qui suivent le raisonnement de Cramer n'attribuent pas une utilité beaucoup plus importante au fait de gagner $1,3 \cdot 10^{30}$ unités monétaires, relativement au fait d'en gagner seulement 16 millions.

La mise à l'épreuve d'une telle conception implique que l'utilité, qui s'avère présenter un contenu psychologique, puisse être estimée expérimentalement (Edgeworth, 1881; Pareto, 1906; Thurstone, 1931, 1954). Nous en donnerons un exemple ci-dessous lorsque nous présenterons les travaux de von Neumann et Morgenstern (1944). Notons pour l'instant qu'à la notion pascalienne d'espérance mathématique, considérée avant Bernoulli comme le critère de la prise de décision sous incertitude, va venir se substituer celle d'*utilité espérée*, formalisée en tant que produit de l'utilité d'un gain (ou, plus généralement, d'un événement) et de la probabilité d'obtenir ce gain (respectivement, de la probabilité que cet événement intervienne). Comme son nom l'indique, l'utilité espérée renvoie donc à l'utilité qu'un individu peut espérer tirer d'une décision donnée. On peut illustrer la différence entre espérance mathématique et utilité espérée par l'exemple des compagnies d'assurance. Celles-ci s'arrangent en effet pour que l'espérance de gain de leurs clients soit négative, sans quoi elle ne feraient pas de bénéfice, mais elles cherchent également à ce que l'utilité que ces clients espèrent générer en souscrivant à leurs contrats soit positive. Les jeux d'argent proposés par la Française des jeux constituent un autre exemple de ce même phénomène. Le concept d'utilité espérée se présente ainsi comme une référence formelle permettant de prédire les comportements de décision en présence d'incertitude, et en particulier lorsque ces décisions portent sur des éléments quantifiables comme l'argent.

2. Modèles à utilité espérée

Bien après les travaux de Bernoulli, vers le milieu du XX^e siècle, le concept d'utilité espérée va susciter un rapprochement important entre deux disciplines scientifiques : la psychologie et l'économie. La famille de modèles qui découlera de ce rapprochement est aujourd'hui dénommée par le terme de *modèles à utilité espérée*. Nous présentons ci-dessous un résumé des principes fondateurs de ces modèles, et reviendrons plus en détail sur l'un d'eux dans le chapitre 7.

Les modèles à utilité espérée s'appuient sur la philosophie hédoniste de Mill (1806-1873), selon laquelle l'action humaine est dirigée vers la recherche du plaisir (utilité positive)

et l'évitement de la douleur (utilité négative). L'individu dont ces modèles font l'hypothèse serait capable i) d'attribuer une utilité espérée à chacune des options qui lui sont présentées, ii) d'ordonner ces options selon leurs utilités espérées respectives et iii) de choisir finalement l'option qui maximise l'utilité espérée (Edwards, 1954). Les travaux portant sur les modèles à utilité espérée ont consisté pour l'essentiel à proposer des modèles mathématiques qui s'avèrent compatibles dans leur formalisation avec ces principes généraux, puis à évaluer l'ajustement de ces modèles en les soumettant à l'épreuve des faits.

Une importante contribution en ce sens, visant à formaliser la manière dont un individu estime l'utilité d'une option, a été proposé par von Neumann et Morgenstern (1944) dans leur ouvrage *princeps* sur la théorie des jeux. Un exemple permettra d'illustrer la méthode employée par ces auteurs. Imaginons le cas d'un sujet qui n'a aucune préférence entre les deux alternative suivantes : gagner 7 euros de manière certaine ou avoir une chance sur deux de gagner 10 euros (et donc une chance sur deux de gagner 0 euro). Ces deux alternatives peuvent donc être supposées avoir la même utilité pour ce sujet. Postulons de plus que l'utilité associée au fait de gagner 10 euros est de 10 utiles (une unité qui est à l'utilité ce que la sonie est à l'audition), et que celle associée au fait de gagner 0 euro est de 0 utile. Nous pouvons ainsi calculer l'utilité associée au fait de gagner 7 euros de la manière suivante :

$$U(7\text{€}) = 0,5 * U(10\text{€}) + 0,5 * U(0\text{€}) = 0,5 * 10 + 0,5 * 0 = 5$$

D'après ce raisonnement, celle-ci est donc de 5 utiles. En conservant ce résultat et en reproduisant l'expérience avec d'autres valeurs de probabilité, il est possible d'obtenir l'utilité associée à n'importe quel autre montant. On obtient ensuite l'utilité espérée en effectuant le produit de cette utilité avec la probabilité d'obtenir le montant considéré. Or il a été montré que l'utilité espérée ainsi estimée permettait de mieux prédire les décisions individuelles que l'espérance de gain (Mosteller & Nogee, 1951), un résultat qui attribue dès lors une certaine validité psychologique au concept d'utilité espérée (Edwards, 1954).

Mais la méthode d'estimation de l'utilité espérée proposée par von Neumann et Morgenstern (1944), bien que fondatrice, n'a pas été sans susciter certaines critiques qui ont abouti à de nombreuses évolutions dans les tentatives ultérieures de formalisation de l'utilité, et notamment dans l'identification d'une fonction mathématique qui, à un montant monétaire donné, permettrait d'associer son utilité espérée. A partir du milieu du siècle dernier et jusqu'à nos jours, on assiste ainsi dans ce domaine de recherche à une évolution de la pensée qui n'est pas sans rappeler les débats qui ont animé les psychophysiciens de la fin du XIX^e siècle au sujet de la formalisation des phénomènes perceptifs. Les modélisations se

complexifient progressivement, faisant intervenir un nombre souvent important de paramètres. Comme chez les psychophysiciens, cette évolution n'est pas uniquement suggérée par des considérations purement mathématiques, mais également par des questions épistémologiques qui concernent les fondements mêmes du concept de probabilité.

3. Modèles à utilité subjectivement espérée

La probabilité telle que nous l'avons jusqu'ici abordée, et qui apparaît comme étant au cœur de la définition du concept d'utilité espérée, est une probabilité qui peut être qualifiée d'objective. Elle est en effet définie en référence à des jeux de hasard dans lesquels l'ensemble des éventualités peut être identifié a priori (par exemple le nombre de faces d'un dé), et où la probabilité d'apparition d'un événement donné (l'apparition d'une des faces du dé) peut être déterminée objectivement du fait de l'équiprobabilité des issues. Mais, dès son apparition au XVII^e siècle, la probabilité fut également considérée dans un sens beaucoup plus subjectif, qui renvoie au degré de croyance d'un individu à l'égard d'une proposition, à la vraisemblance qu'il attribue à l'apparition d'un événement (Karni, 2014). Cette conception de la probabilité, que l'on doit aux idées fondatrices de Bayes (1764), est davantage susceptible d'intéresser le psychologue soucieux de la validité écologique de ses interprétations. La complexité d'une situation écologique est en effet telle que l'individu ne peut que rarement déterminer a priori l'ensemble des événements possibles, ni a fortiori estimer leur probabilité d'apparition. La source dont il dispose pour réduire cette incertitude est alors sa propre expérience, et plus particulièrement les informations qu'il tire progressivement des décisions effectuées. Dans une conception bayésienne de la prise de décision sous incertitude, on considère que ces informations vont lui permettre de mettre à jour ses degrés de croyance initiaux, et d'estimer ainsi subjectivement les probabilités associées aux événements susceptibles de se produire. Sous l'impulsion de Savage (1954), ces considérations vont être à l'origine d'une nouvelle famille de modèles : les modèles à utilité subjectivement espérée. Ces modèles reprennent les principes fondateurs des modèles à utilité espérée en y ajoutant l'idée essentielle selon laquelle les probabilités d'apparition des événements sont, de même que leur utilité, estimées subjectivement par l'individu.

A une différence d'ordre épistémologique entre deux conceptions de la probabilité correspond donc une différence d'ordre psychologique dans la manière dont on peut concevoir les conduites de prise de décision sous incertitude. Dans la conception objective, qui prévaut dans l'analyse des jeux de hasard, on suppose que la probabilité des événements

est connue a priori par l'individu. Dans la conception subjective, davantage liée aux conditions naturelles de vie, ce sont les décisions de l'individu, sources d'informations nouvelles, qui l'amènent à remettre à jour son estimation initiale des probabilités d'apparition des événements (i.e. à remettre à jour ses degrés de croyances initiaux). Cette seconde approche peut être qualifiée d'inductive pour deux raisons. Elle l'est tout d'abord pour l'individu, qui tire de son expérience les informations lui permettant d'élaborer des croyances sur les états de la nature. Mais elle l'est également pour le psychologue, car celui-ci attribue un degré de croyance à l'individu qu'il étudie en s'appuyant sur les données qu'il recueille, c'est-à-dire sur la base des décisions prises par cet individu.

4. Un exemple illustratif

Pour conclure sur la présentation des modèles à utilité subjectivement espérée, nous voudrions illustrer par un exemple la démarche qui peut être celle du psychologue lorsqu'il étudie les conduites de prise de décision sous incertitude à la lueur de ces modèles. L'exemple que nous choisissons est celui d'un amateur de randonnée originaire du Sud de la France, qui s'est récemment installé en Bretagne et qui, lorsqu'il prépare chacune de ses excursions, doit décider d'emporter ou non un imperméable. Pour ne pas complexifier notre exemple, nous considérerons que chacune des randonnées réalisées ne dure qu'une journée, que la météo est mitigée le matin du départ, et que celle-ci peut évoluer ou bien vers le beau temps, ou bien vers la pluie. Cet individu est bien placé en situation de prise de décision sous incertitude, puisqu'il doit effectuer un choix et qu'il est incertain quant aux conséquences que ce choix engendrera. Quatre éventualités sont envisageables. S'il emporte son imperméable, il sera inutilement chargé en cas de beau temps (éventualité 1) mais à l'abri en cas de pluie (éventualité 2). S'il ne l'emporte pas, il voyagera plus léger en cas de beau temps (éventualité 3), mais sera trempé en cas de pluie (éventualité 4). Le psychologue qui étudie le fonctionnement de ce randonneur peut mesurer, à chacune des randonnées effectuées, le choix binaire effectué (emporter ou non un imperméable) ainsi que les conditions météorologiques (évolution du temps vers le soleil ou la pluie).

Dans le cadre de l'utilisation des modèles à utilité subjectivement espérée, l'objectif est d'identifier le mécanisme psychologique qui a engendré les décisions prises par l'individu lors de ses randonnées successives, en posant une ou plusieurs hypothèses sur ce mécanisme. Ces hypothèses sont traduites par un système d'équations qui formalise les éléments suivants du modèle :

1) l'utilité que le randonneur attribue à chacune de ses décisions au regard des conséquences qu'elle a engendrée, également appelée « fonction d'utilité ». S'il fait par exemple le choix de ne pas prendre d'imperméable et qu'il pleut, on cherche à connaître l'utilité qu'il attribue subjectivement à cette expérience. Si on peut vraisemblablement supposer que cette utilité sera perçue négativement par la plupart des randonneurs, il reste à déterminer dans quelle mesure elle le sera chez celui dont on étudie le fonctionnement. Une des manières de procéder pourrait consister à attribuer arbitrairement une utilité de -1 à cette expérience, et à pondérer plus ou moins fortement cette valeur selon qu'elle semble impacter ou non les choix ultérieurs du randonneur. Si chaque promenade passée sans imperméable sous la pluie bretonne semble systématiquement inciter le randonneur à emporter son imperméable durant ses excursions suivantes, on peut penser que l'utilité de cette expérience est perçue très négativement. Un modèle formalisant cette idée devrait en conséquence appliquer une forte pondération à la valeur arbitraire de -1.

2) la probabilité que le sujet attribue à chacun des événements possibles. Dans notre exemple, celle-ci renvoie à la probabilité qu'il pleuve. Dans le cadre du modèle à utilité subjectivement espérée, on suppose que le randonneur estime cette probabilité en s'appuyant sur ses croyances initiales concernant le climat breton (éventuellement erronées), et en mettant à jour cette croyance à partir de la fréquence empirique de l'évènement « pluie » (celle dont il a fait l'expérience depuis qu'il vit en Bretagne). L'ampleur de cette mise à jour peut être considérée comme variant selon les randonneurs, et on peut par exemple imaginer qu'un randonneur particulier estime la probabilité qu'il pleuve en tenant principalement compte de ses expériences récentes, et en négligeant les plus anciennes, tandis qu'un autre randonneur procèdera inversement. Un paramètre pourrait alors être introduit dans le modèle, qui quantifierait la sensibilité du randonneur à ses expériences passées, relativement aux plus anciennes, dans son estimation de la probabilité qu'il pleuve.

3) l'utilité espérée associée à chacune des options. Dans notre exemple, elle renvoie à l'utilité dont le randonneur espère faire l'expérience s'il n'emporte pas d'imperméable, et est estimée sur la base des deux éléments du modèle décrits ci-dessus (probabilité qu'il pleuve et utilité associée au fait de se promener sans imperméable sous la pluie). L'utilité espérée est classiquement estimée en effectuant le produit de ces deux informations, mais d'autres formalisations peuvent être

envisagées, en particulier celles qui peuvent être suggérées par des hypothèses portant sur la manière dont s'effectue l'intégration de ces deux informations par le système cognitif (Anderson, 1981).

4) la relation entre les décisions de l'individu et l'utilité espérée associée à chaque option. Puisque le modèle à utilité subjectivement espérée postule que c'est l'option dont l'utilité espérée est la plus élevée qui a le plus de chance d'être choisie, le psychologue devra spécifier un modèle, généralement probabiliste, qui formalise la comparaison par l'individu des utilités espérées des différentes options. La construction d'un modèle approprié est guidée par les hypothèses du psychologue quant au mécanisme psychologique de cette comparaison.

Une fois le modèle spécifié, dans sa forme mathématique ainsi que dans la manière dont cette forme traduit des hypothèses relatives au fonctionnement psychologique de l'individu, la démarche consiste à évaluer l'ajustement de ce modèle à un ensemble de données. L'une des manières de procéder consiste à élaborer des prédictions à partir du modèle, en générant des données par simulation, puis à déterminer dans quelle mesure ces prédictions se vérifient empiriquement. Si cet ajustement s'avère satisfaisant, on peut alors attribuer une certaine validité à l'hypothèse psychologique formalisée par le modèle. Néanmoins, ici comme ailleurs, cette recherche de validité consiste le plus souvent à ne pas se contenter d'un unique modèle, mais à comparer les mérites respectifs de plusieurs modèles.

Pour conclure sur cette présentation assez générale des modèles à utilité subjectivement espérée, sur lesquels nous reviendrons dans le chapitre 7, nous voudrions souligner deux intérêts que cette démarche de modélisation nous semble présenter pour le psychologue.

Le premier intérêt nous semble résider dans l'importante flexibilité qui est autorisée dans la construction de ce type de modèles formels. Le psychologue peut faire l'hypothèse de l'implication d'un nombre plus ou moins important de processus (intégration des diverses informations, comparaison des utilités associées aux différentes options,...), et peut modifier à souhait la structure des relations entre ces processus. Ainsi, à partir des données recueillies dans une unique situation (naturelle ou expérimentale), et qui forment une unique variable (le pattern de réponses d'un individu), il est possible de tester un nombre théoriquement infini d'hypothèses psychologiques. Les limites que le psychologue peut rencontrer dans sa démarche, qui sont loin d'être négligeables si le modèle est complexe, sont principalement la

quantité de données dont il dispose pour procéder à l'estimation des paramètres du modèle, ainsi que les compétences qui sont les siennes dans la traduction mathématique de ses hypothèses.

Le deuxième intérêt que nous attribuons à ces modèles formels, et sur lequel nous reviendrons plus en détail par la suite, est qu'ils nous rapprochent du niveau d'analyse que le psychologue cherche à atteindre, à savoir le niveau de l'individu. Ces modèles peuvent en effet être estimés à partir des données obtenues de manière répétée chez un unique individu. Cette caractéristique les différencie de la plupart des modèles actuellement employés en psychologie, qui sont estimés à l'échelle d'un échantillon, et dont on suppose que les conclusions auxquelles ils mènent s'appliquent à chacun des individus qui composent la population dont cet échantillon est extrait. Mais cette supposition n'est que rarement soumise à l'épreuve des faits, un problème auquel on peut tenter de répondre en utilisant des modèles formels individuels comme les modèles à utilité subjectivement espérée. Ces derniers permettent notamment d'envisager une possibilité qui, dans l'approche différentielle qui est la nôtre, retiendra particulièrement notre attention : qu'à des individus différents puissent correspondre des modèles psychologiques différents.

Chapitre 2 : Hasard et incertitude en psychologie du développement de l'enfant

1. La contribution princeps de Piaget

L'essentiel des réflexions que Piaget a consacrées au concept de hasard est présenté dans deux ouvrages : *la genèse de l'idée de hasard chez l'enfant* (1951), écrit en collaboration avec Inhelder, et *introduction à l'épistémologie génétique* (1950). Si le premier de ces ouvrages porte principalement sur des considérations psychologiques, tandis que le deuxième est davantage orienté vers l'épistémologie, tous deux illustrent à quel point ces deux domaines sont indissociables dans la pensée piagétienne. Il est parfois difficile de savoir si c'est bien, comme le prétendait Piaget, la réflexion psychologique qui alimente la réflexion épistémologique, ou si la réciproque n'est pas tout aussi vraie. Piaget nous décrit en effet un sujet qui se présente comme l'analogue du scientifique, qui « *dissocie les facteurs* », « *organise les contre-épreuves* », « *élimine ou établit inductivement le rôle de certaines variables* » (p. 92). Ainsi, afin de présenter ensuite la manière dont la théorie opératoire permet de rendre compte des conduites des sujets qui se confrontent au hasard en situation de prise de décision sous incertitude, ce qui sera notre préoccupation principale dans cette section, il peut être utile de présenter brièvement l'histoire du concept de hasard dans la pensée scientifique, telle que Piaget la percevait.

1.1. Histoire du concept de hasard dans la pensée scientifique

Piaget (1950) distingue plusieurs grandes étapes dans cette histoire, étapes dont on peut souligner dès maintenant qu'elles constituent peu ou prou l'analogue des stades qui jalonnent la construction du concept de hasard chez l'enfant.

La première de ces étapes est antérieure à la civilisation gréco-romaine, et est analysée dans les travaux ethnologiques réalisés auprès de sociétés dites traditionnelles (Lévy-Bruhl, 1918). Le « primitif », comme le dénomme Piaget, serait étranger à l'idée de hasard. Il attribuerait l'ensemble des phénomènes qu'il perçoit à l'intervention de puissances occultes qui poursuivent une certaine finalité. Parallèlement à ce constat, Piaget souligne également le fait que le « primitif » n'a pas atteint un niveau de développement caractéristique du niveau opératoire. La réversibilité des opérations lui est en particulier inaccessible. Ces deux

acquisitions, réversibilité des opérations et concept de hasard, sont comme nous le verrons étroitement reliées dans la pensée piagétienne.

Cette réversibilité des opérations est en revanche clairement identifiable dans la pensée des savants de l'antiquité. Corrélativement, la notion de hasard commence à apparaître à cette époque en tant que réalité objective. Sans référence à une quelconque composition probabiliste, le hasard est alors conçu en tant qu'accident indéterminé, dépourvu de cause finale. Tout en reconnaissant son existence, Aristote le place en dehors du champ de sa physique puisque celle-ci vise précisément à l'identification des causes finales de la nature. Le hasard est alors conçu comme un phénomène « contre-nature ».

Durant la période bien plus récente de la physique classique, des travaux de Newton jusqu'au milieu du XIX^e siècle, le hasard est toujours situé en marge de la science. C'est l'âge d'or du déterminisme, et on insiste au contraire sur la régularité des relations causales en oeuvre dans la nature. Ces relations causales, et les équations qui les formalisent, sont conçues de manière réversible, une caractéristique sur laquelle Piaget insiste particulièrement. Par exemple, les équations de la mécanique classique restent vraies si l'on inverse tous les signes des vecteurs. Le mouvement, les compositions de forces, sont ainsi conçus comme des phénomènes réversibles. S'ils ne le sont pas nécessairement en fait, ils le seraient du moins suite à l'intervention de forces nouvelles (une force opposée à la pesanteur permettrait par exemple de faire remonter la pomme de Newton sur sa branche). Quant au hasard, qui procède comme nous le verrons de l'irréversibilité, et qui entraîne des variations aléatoires dont l'imprévisibilité est incompatible avec les lois de la physique classique, il sera tout simplement négligé durant cette période de l'histoire des sciences naturelles.

Cette négligence pourrait paraître étonnante tant le rôle du hasard dans l'environnement semble s'imposer à l'observateur contemporain. Pourquoi Newton n'aurait-il pas également médité sur l'extraordinaire variabilité qui caractérise la trajectoire de chute des feuilles mortes ? Plus généralement, pourquoi a-t-il fallu attendre le XIX^e siècle pour que le hasard commence à s'imposer comme un concept scientifique majeur ? D'après Piaget, cela n'eut pas été possible avant que les scientifiques ne disposent des instruments mathématiques - des « schèmes opératoires », serions-nous tenté de dire - leur permettant d'assimiler les phénomènes de hasard, i.e. tant que l'esprit n'était pas encore habitué à raisonner sous une forme combinatoire et probabiliste. Or, nous l'avons vu dans la section précédente, l'utilisation de logique combinatoire n'a permis d'asseoir le concept de probabilité qu'aux XVII^e et XVIII^e siècles. La logique combinatoire permet en effet de dénombrer l'ensemble des

événements possibles dans une situation donnée, et est donc nécessaire au calcul des probabilités puisque celles-ci représentent des fractions de cet ensemble d'événements possibles. Ce n'est donc qu'une fois le concept de probabilité suffisamment élaboré que de nouveaux objets purent apparaître aux yeux des scientifiques

Les phénomènes thermodynamiques constituèrent le premier de ces objets. La propagation de la chaleur d'un corps à un autre, et plus précisément la séquence des chocs qui se produisent à l'échelle microscopique entre les particules constitutives de ces deux corps, est un phénomène irréversible. En effet, puisque les particules se déplacent et que leur nombre est très élevé, la probabilité d'observer une séquence de chocs particulière parmi l'ensemble des séquences possibles est extrêmement faible. La réalisation de cette séquence plutôt qu'une autre est alors attribuée au hasard et il est impossible, du moins en fait, d'observer un retour à l'état initial par réversibilité de la séquence de chocs considérée. Mais cette irréversibilité de fait, qui s'observe à l'échelle globale d'un système, ne doit pas faire oublier que les opérations dont elle procède à l'échelle des éléments de ce système, et qui sont des opérations de combinaisons, sont, quant à elle, réversibles. Piaget (1950) propose un exemple pour illustrer cette idée fondamentale, exemple que nous modifions ici pour les besoins de notre présentation.

Considérons une poudre composée de 10 grains noirs et de 10 grains blancs, qui sont alignés de manière à ce que les deux ensembles soient séparés. Si l'on procède au mélange de cette poudre et que l'on aligne à nouveau les grains, la probabilité de retrouver la configuration initiale est de $1/184756$, soit une probabilité suffisamment faible pour que le phénomène de mélange soit considéré comme irréversible. Mais, si l'on considère un ensemble composé de seulement 4 grains (dont 2 noirs et 2 blancs), le retour à l'état initial a alors une chance sur six de se produire, et est donc relativement probable. Dans ces deux situations, l'opération logico-mathématique impliquée, qui répond aux lois de la logique combinatoire, est une opération de permutation des grains. Le calcul de la probabilité de retour à l'état initial est fondé sur le dénombrement de toutes les permutations possibles dans chacune des situations ($20!/(10!*10!)$ dans la première, et $4!/(2!*2!)$ dans la deuxième). Or, comme toutes les opérations combinatoires, la permutation est une opération réversible (le système de toutes les permutations possibles au sein d'un ensemble d'éléments obéit à une structure de groupe). Malgré ce caractère théoriquement réversible de la permutation, les deux exemples présentés ci-dessus permettent d'illustrer le fait que le retour à l'état initial est d'autant moins probable qu'un nombre important de permutations possibles est envisagé.

C'est seulement lorsque ce nombre est très élevé, comme dans les systèmes complexes, que l'irréversibilité s'impose dans les faits et que l'on parle alors de hasard.

D'où un paradoxe qui est au fondement de la conception piagétienne de la genèse de l'idée de hasard, tant au niveau épistémologique que psychologique : l'irréversibilité que l'intervention du hasard confère aux phénomènes ne peut être conçue qu'à partir de ce qui constitue pourtant son antithèse, à savoir des opérations réversibles (combinaisons et permutations). « *Au total, les réalités physiques irréversibles se réduisent ainsi à des phénomènes de mélange, donc de hasard, mais le mélange lui-même n'est compréhensible qu'au moyen d'opérations réversibles* » (Piaget, 1950, p.182). Nous reviendrons sur cette idée lorsque nous examinerons les travaux réalisés chez l'enfant.

Une fois que le hasard a pu être ainsi conceptualisé à l'aide de la probabilité (et des opérations de combinaison qui lui sont sous-jacentes), les scientifiques ont pu, de la fin du XIX^e siècle jusqu'à nos jours, découvrir ou redécouvrir un grand nombre de phénomènes dans ce nouveau cadre épistémologique. Nous ne commenterons pas cette évolution car elle nous éloignerait de notre sujet principal, et nous contenterons de noter que la reconnaissance du rôle du hasard dans l'environnement a engendré une représentation beaucoup plus complexe de cet environnement. Loin de se laisser réduire à la seule intervention d'un petit nombre de principes universels, celui-ci est davantage conçu comme un agrégat émergeant de l'interférence d'un grand nombre de lois, reliées entre elles à des degrés divers. C'est précisément lorsque cette interférence porte sur un grand nombre de séries causales indépendantes que l'on a coutume de parler de hasard (Cournot, 1851). La difficulté, pour le scientifique comme pour l'enfant qui cherche à appréhender un phénomène donné, est alors de savoir si ce phénomène résulte uniquement du hasard, comme cela semble parfois être le cas, ou si certaines lois identifiables se cachent derrière ce hasard. Tous deux cherchent à situer leur connaissance entre les deux pôles du hasard et de la détermination, en se rapprochant si possible de cette dernière. Piaget distingue deux étapes dans l'élaboration de cette connaissance: une étape inductive, qui consiste à isoler certains rapports ou lois au sein de l'ensemble enchevêtré des données du réel, puis une étape déductive ou cours de laquelle ces lois acquièrent une certaine structure.

Si l'on cherche à résumer l'évolution que nous venons brièvement de présenter, et qui n'était nullement inconnue de Piaget lorsqu'il entame ses travaux sur l'acquisition du concept de hasard chez l'enfant, on peut distinguer trois étapes :

- 1) une méconnaissance initiale du caractère fortuit de certains événements et une tendance au finalisme.
- 2) Une reconnaissance de l'intervention du hasard dans l'environnement en tant qu'accident, dénué d'intérêt scientifique car non appréhendable par la pensée déterministe dominante de l'époque, et sans possibilité de formalisation du concept faute des outils mathématiques le permettant.
- 3) le hasard devient assimilable aux cadres formels de la logique combinatoire. Grâce à l'émergence conjointe de la démarche inductive, des lois peuvent être identifiées au sein des phénomènes soumis à l'intervention du hasard.

Ces quelques repères épistémologiques nous aideront à mieux cerner la manière dont Piaget rend compte du développement de l'idée de hasard chez l'enfant. En procédant ainsi, nous employons une démarche qui peut sembler contraire à celle de l'épistémologie génétique puisque celle-ci s'appuie au contraire sur une étude scientifique du développement de l'enfant pour apporter des réponses sur le plan épistémologique. Néanmoins, comme souligné ci-dessus, les dimensions psychologique et épistémologique sont indissociables dans la pensée piagétienne, chacune d'entre elles étant donc susceptible de nous renseigner sur l'autre.

1.2. Genèse de l'idée de hasard chez l'enfant

Au premier abord, on pourrait penser que la théorie opératoire piagétienne permet difficilement de rendre compte de l'acquisition du concept de hasard. Les principales opérations dont Piaget a décrit la genèse (opérations de conservation, de sériation, d'inclusion, de classification, arithmétiques, spatiales) relèvent surtout de la déduction et de la nécessité, et semblent donc s'opposer à l'induction et à la contingence, qui nous intéressent ici. Si l'on considère l'exemple de la conservation de la matière, c'est parce que l'enfant d'un certain âge comprend que le fractionnement de la boule de pâte à modeler n'a ni ajouté ni ôté de matière, et/ou qu'il comprend également que cette opération est réversible, qu'il en *déduit* que la quantité de matière a *nécessairement* été conservée par cette opération. Or, nous l'avons vu précédemment, l'intervention du hasard tend au contraire à rendre les phénomènes non réversibles, non déductibles, et non nécessaires. Avant la publication de *la genèse de*

l'idée de hasard chez l'enfant en 1951, la théorie piagétienne est ainsi limitée en ce qu'elle ne permet pas encore de rendre compte des nombreuses situations quotidiennes qui confrontent l'individu à l'intervention du hasard. Cette limite, loin d'inciter Piaget à modifier sa théorie opératoire, l'amènera à considérer que l'enfant confronté au hasard parvient à construire de nouvelles opérations logico-mathématiques, qui procèdent de la réversibilité et de la déduction, afin d'assimiler les données non réversibles et non déductibles du réel. Ces opérations, Piaget les trouvera dans ce qui constitue le fondement logique du concept de probabilité, à savoir la logique combinatoire. On reconnaît dans cette thèse un mécanisme tout à fait équivalent à celui que nous avons mis en évidence dans la section précédente : la genèse de l'idée de hasard chez l'enfant récapitule celle de ce même concept au cours de l'histoire des sciences. Il nous faut maintenant examiner comment Piaget a pu trouver dans ses expériences les arguments en faveur de cette thèse. Nous ne présenterons pas l'ensemble des expériences menées par Piaget et Inhelder (1951) sur ce thème mais nous contenterons de trois d'entre elles, qui sont particulièrement centrales, et qui sont relatives à la compréhension des phénomènes de mélange, à la quantification des probabilités et à la logique combinatoire. Soulignons que les auteurs emploient la méthode clinique pour étudier chacune de ces notions. Le recueil des observations, bien que s'effectuant dans un contexte expérimental, est donc relativement peu standardisé.

1.2.1. Réactions des enfants face aux phénomènes de mélange et d'irréversibilité

Les phénomènes de mélange constituent le prototype de l'intervention du hasard dans le monde physique. Afin d'étudier les réactions de l'enfant face à ces phénomènes, Piaget et Inhelder (1951) utilisent un dispositif composé d'une boîte rectangulaire légèrement suspendue, et qu'il est possible de faire basculer sur son axe transversal (voir Figure 1). La boîte est initialement basculée sur l'un de ses deux côtés, et 8 billes rouges et 8 billes blanches sont alignées le long de ce côté. Les deux ensembles de couleur sont placés dans des casiers distincts, séparés par une petite cloison. Si l'on bascule la boîte pour la ramener ensuite dans sa position initiale, les billes quittent leur côté initial pour aller se placer du côté opposé, puis reviennent se placer du côté initial. La caractéristique essentielle du dispositif est que certaines permutations peuvent se réaliser entre les billes suite à cette opération de bascule, faisant éventuellement passer certaines billes rouges du côté des blanches, et vice versa. Le matériel est suffisamment bien construit pour que ce mélange dû aux permutations soit progressif. Il est généralement faible lors du premier mouvement de bascule et augmente progressivement au cours des mouvements de bascule ultérieurs.

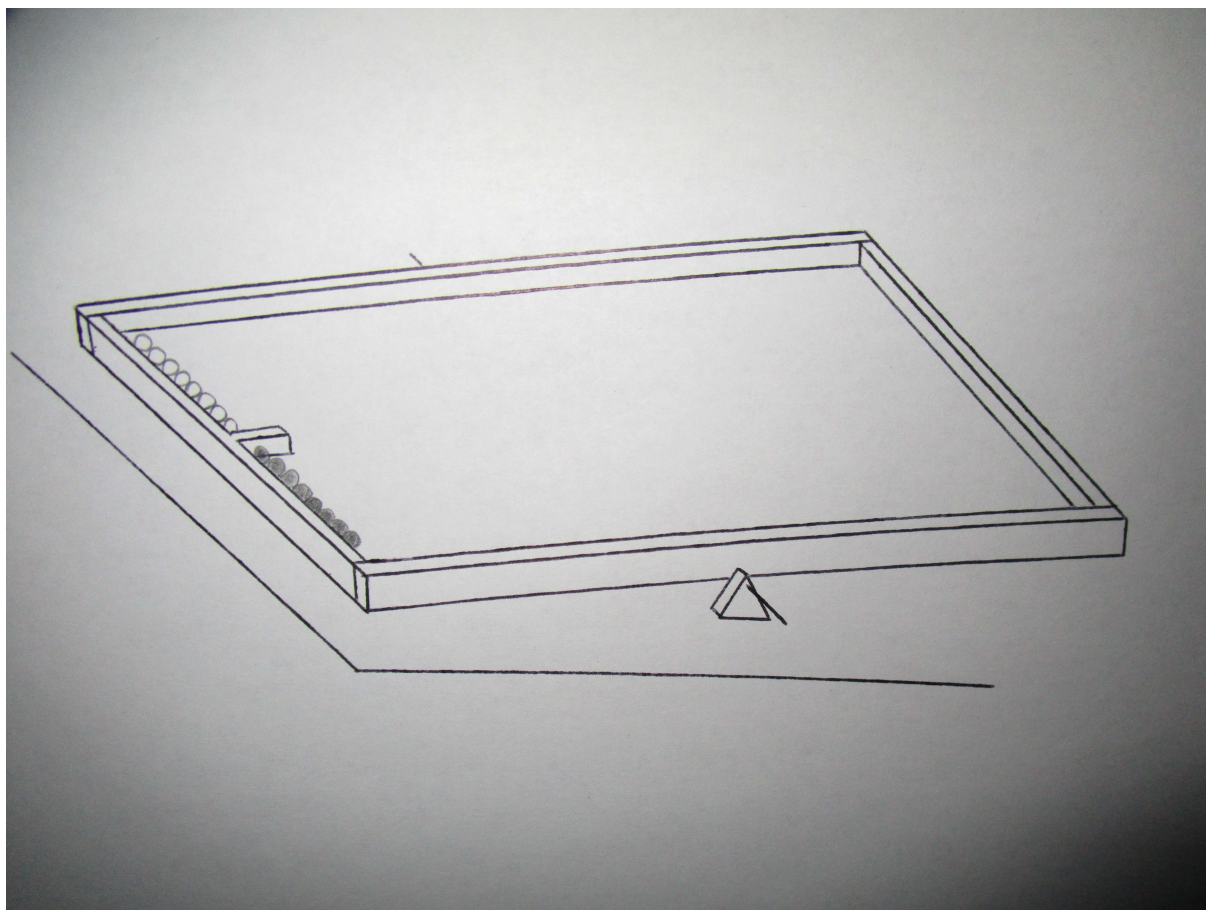


Figure 1. Matériel utilisé par Piaget et Inhelder (1951) pour étudier les réactions de l'enfant face aux phénomènes de mélange.

L'enfant est placé face au dispositif et on lui demande de prédire quelles seront les positions des billes après avoir fait basculer la boîte. L'expérimentateur cherche en particulier à savoir si l'enfant prédit que les billes rouges et blanches resteront séparées, ou s'il pense qu'elles se mélangeront (et dans ce cas, dans quelle proportion). Il est également possible de demander à l'enfant de dessiner les billes sur un schéma après l'opération de bascule, en les positionnant selon sa prévision. On peut enfin lui demander de représenter les trajectoires des billes au cours du basculement. Une fois ces informations recueillies, on procède au premier mouvement de bascule et on fait constater les déplacements à l'enfant (2 ou 3 billes passent généralement de l'autre côté de la cloison). On repose alors les mêmes questions, avant de procéder à un nouveau basculement, et on poursuit de la même manière durant un petit nombre d'essais au-delà duquel on se contente de demander à l'enfant de prévoir la configuration des billes dans l'hypothèse où l'on répèterait l'expérience un grand nombre de fois.

Les observations effectuées par Piaget et Inhelder chez des enfants âgés de 4 à 12 ans vont les amener à distinguer trois stades de développement dans cette situation. Si les auteurs admettent vaguement l'existence de différences interindividuelles au sein de ces stades, ceux-ci sont supposés se caractériser avant tout par leur forte homogénéité.

Le premier de ces stades (stade I) s'étend entre les âges de 4 et 7 ans. La prévision initiale des enfants du stade I (avant de procéder au premier basculement) est le plus souvent celle d'une absence de mélange et d'un retour à l'état initial. Si certains anticipent néanmoins un mélange des billes, ils conservent l'idée d'une étroite dépendance entre les billes d'une certaine couleur et leur casier initial (une bille « *doit être à sa place* »), ou entre les billes d'une même couleur lorsqu'elles se croisent avec les autres (« *les blanches iront là [dans le casier initial des rouges] et les rouges là [dans le casier initial des blanches]* »). Après constatation des premières permutations, les enfants de ce stade anticipent ou bien que les billes resteront désormais dans la même position (« *ça ne peut plus se mélanger davantage parce que c'est déjà beaucoup* »), ou bien un retour progressif à l'état initial (« *elles vont se remettre comme il faut* »), ou bien encore un mélange qui ne va pas dans le sens d'un désordre croissant mais qui procède au contraire de l'ordre puisque toutes les billes d'une couleur donnée sont supposées rejoindre l'emplacement initial des billes de l'autre couleur. En résumé, ou bien le mélange est nié, comme chez le « primitif », ou bien il tend à rétablir un ordre et, comme chez Aristote, l'ordre est alors privilégié au hasard. Les altérations de cet ordre sont perçues comme des phénomènes momentanés et contre-nature. Pour Piaget et Inhelder (1951), ces résultats proviennent d'une incapacité des enfants du stade I à concevoir les transformations en jeu comme des permutations. Si c'était le cas (i.e. si les enfants raisonnaient comme les mathématiciens), ils parviendraient à se représenter l'ensemble des permutations possibles dans cette situation, et comprendraient donc qu'aucune permutation particulière n'est à privilégier parmi toutes ces possibilités. L'ordre privilégié par ces enfants serait alors conçu comme une configuration rare au sein de l'ensemble du possible. Au contraire, comme ce sera le cas au stade suivant, le mélange serait privilégié.

Le second stade, qui s'étend entre les âges de 7 et 11 ans, correspond à la formation de la notion de hasard dans le monde physique. L'enfant anticipe un mélange progressif des billes au début de l'expérience. Le retour à l'état initial est alors conçu comme peu probable, voire exceptionnel, puisque l'enfant de ce stade pressent la possibilité d'un grand nombre de distributions possibles des billes, sans que l'une de ces distributions ne soit à privilégier. Néanmoins, l'enfant ayant atteint ce stade II pense également que si l'on prolonge

l'expérience suffisamment longtemps, on observera un retour à l'ordre : plus le mélange augmente, plus les billes rouges iront du côté des blanches, et réciproquement (et l'inverse devrait ensuite se produire, d'où un retour à l'état initial). Comme en témoigne sa représentation graphique des trajectoires des billes, ces trajectoires ne sont pas individualisées mais concernent les billes rouges d'une part, et blanches d'autre part. Il ne conçoit pas la possibilité d'une interférence entre les trajectoires des billes qui s'entrechoquent, mais conçoit les déplacements des billes d'une couleur donnée comme si les billes de l'autre couleur restaient immobiles. Autrement dit, il ne parvient pas à raisonner simultanément sur plusieurs déplacements à la fois, un raisonnement qui est précisément celui que nécessite la construction d'un schème de permutation. Or seule la pensée formelle, qui n'apparaîtra qu'au stade suivant, permet ainsi de raisonner selon deux systèmes de référence, à la fois différents et solidaires.

A partir du troisième et dernier stade, qui commence à l'âge de 11-12 ans, l'enfant anticipe désormais l'existence d'interférences entre les trajectoires des billes, et assimile les différentes configurations possibles à un système de permutations. Il prévoit également que chacune des permutations possibles a d'autant plus de chances d'être observée que l'on procède à un nombre important de mouvements de bascule du plateau (loi des grands nombres). Le retour à l'état initial est donc conçu comme possible, mais suffisamment rare pour que le phénomène de mélange soit considéré comme irréversible (sa probabilité théorique est de $1/184756$).

L'explication piagétienne de la compréhension des phénomènes de mélange par l'enfant, c'est-à-dire la compréhension du rôle du hasard dans l'environnement physique, apparaît finalement comme étroitement liée à celle du concept de permutation, cette dernière en constituant le fondement. Si cette explication pourra paraître convaincante, en particulier aux yeux du scientifique qui assimile lui-même le hasard au calcul des probabilités et à la logique combinatoire, elle est néanmoins davantage présentée par Piaget et Inhelder (1951) comme un postulat initial que comme une véritable démonstration : si l'enfant parvient (respectivement ne parvient pas) à envisager les opérations en jeu comme des permutations (i.e. s'il raisonne comme le logicien), il comprend alors (respectivement ne comprend pas) que le mélange est irréversible. La conception épistémologique de Piaget nous semble ici étayer sa conception psychologique, et non l'inverse.

Ce n'est qu'à la fin de leur ouvrage que le rapprochement entre permutation et compréhension du mélange est véritablement argumenté. Après une analyse détaillée des

conduites d'enfants à diverses épreuves de logique combinatoire (e.g. combiner ou permuter un ensemble de jetons de toutes les manières possibles, effectuer des arrangements de carte), les auteurs repèrent trois stades de développement au sein de ces conduites, et soulignent un parallélisme frappant entre ces stades et ceux déjà identifiés à propos de la compréhension des phénomènes de mélange. Leur conclusion est finalement celle de l'étayage du psychologique par la logique, et plus précisément de la nécessité d'avoir construit les schèmes combinatoires afin d'assimiler les phénomènes découlant de l'intervention du hasard dans l'environnement physique : *« c'est donc bien dans la mesure où s'élaborent les opérations combinatoires spontanées que sont, par ailleurs, structurées selon l'idée de hasard les situations où intervient le mélange »* (Piaget & Inhelder, 1951, pp. 152-153).

1.2.2. Quantification des probabilités

Les phénomènes analysés dans la partie précédente ne sauraient à eux seuls retracer la genèse du concept de probabilité, car celle-ci ne dépend pas seulement de la capacité du sujet à appréhender le vaste ensemble des événements possibles dans une situation faisant intervenir le hasard, mais également de sa capacité à établir la proportion que représentent certains événements particuliers au sein de cet ensemble. Piaget et Inhelder (1951) vont ainsi imaginer une situation expérimentale dans laquelle il est relativement facile, voire trivial, de dénombrer le nombre d'événements possibles (contrairement à l'expérience précédente), mais qui implique également la quantification de la probabilité d'observer un événement particulier. Puisqu'aux yeux du scientifique la probabilité se définit formellement comme un rapport, on peut dès maintenant anticiper que les auteurs analyseront les conduites des enfants à cette épreuve sous l'angle des opérations logico-mathématiques permettant le calcul d'un rapport. Nous pouvons d'ailleurs préciser d'emblée la nature de ces opérations réversibles : emboîtement des parties en une totalité ($A+A'=B$) ou, de manière quasi-équivalente, disjonction (si x appartient à B , alors x appartient à A ou x appartient à A'), et proportionnalité.

Le matériel est composé d'un ensemble de jetons blancs, dont certains seulement sont porteurs d'une croix au verso. A partir d'un petit nombre de ces jetons, l'expérimentateur compose sous les yeux de l'enfant deux collections de jetons. Après que l'enfant a pu prendre connaissance de cette composition, l'expérimentateur retourne les deux collections et les mélange, chacune séparément. Il demande alors à l'enfant de choisir la collection dans laquelle il a le plus de chances de sélectionner un jeton avec croix en procédant à un tirage au

sort. Différents items variant sous l'angle de la composition des collections peuvent ainsi être proposés à l'enfant :

- double impossibilité : les deux collections comprennent chacune deux ou trois jetons, mais aucune d'entre elles ne comprend de jetons avec croix.
- double certitude : les cas favorables seront par exemple de 2 sur 2 ou de 4 sur 4 (ce que nous noterons $2/2$ ou $4/4$), c'est-à-dire que tous les jetons sont porteurs d'une croix.
- certitude - impossibilité : l'une des deux collections contient autant de croix que d'éléments (e.g. $2/2$) et l'autre aucune croix sur un nombre égal d'éléments (e.g. $0/2$).
- possibilité - certitude : une collection contient un cas favorable sur deux ($1/2$) et l'autre un sur un ($1/1$), ou encore $1/2$ et $2/2$.
- possibilité - impossibilité : par exemple $1/2$ et $0/2$.
- compositions identiques des deux collections : par exemple $1/2$ et $1/2$.
- proportionnalité : par exemple $1/2$ et $2/4$, ou $1/3$ et $2/6$.
- inégalité des cas favorables et égalité des cas possibles : par exemple $1/4$ et $2/4$.
- égalité des cas favorables et inégalité des cas possibles : par exemple $1/2$ et $1/3$.
- inégalité respective des cas favorables et des cas possibles, sans proportionnalité : par exemple $1/2$ et $2/3$.

Sans surprise, l'analyse des réponses et des verbalisations d'un petit nombre d'enfants permet aux auteurs d'identifier trois stades, dont nous présentons ci-dessous les caractéristiques principales.

Le premier stade, qui s'écoule entre les âges de 4 et 7 ans, correspond à l'absence de comparaison logico-arithmétique des deux collections. L'enfant néglige le nombre de cas possibles et ne considère que le nombre des cas favorables en lui conférant une valeur absolue. La raison de cette négligence provient selon les auteurs d'une difficulté systématique à emboîter les parties dans le tout, c'est-à-dire à inclure les cas favorables (jetons avec croix) dans l'ensemble des cas possibles. Ce défaut de construction du schème réversible d'emboîtement, caractéristique du stade préopératoire, exclut par ailleurs la construction du schème plus complexe de disjonction. L'enfant ne peut ainsi concevoir qu'un événement *ou* un autre événement peuvent avoir lieu, ce qui explique que la notion même de contingence ou de possibilité lui échappe. En résumé, il y aurait à cet âge indifférenciation entre le possible,

le réel et le nécessaire, faute des opérations réversibles permettant d'appréhender ces notions. Piaget et Inhelder soulignent néanmoins l'apparition occasionnelle de certaines anticipations intuitives à la fin de ce premier stade, qui préparent les progrès observés au stade suivant. Ces anticipations, qui ne sont pas encore de nature opératoire, proviennent essentiellement de la configuration perceptive ou imagée des collections présentées : à égalité des cas possibles, l'enfant de ce stade préfère la collection qui contient le plus de cas favorables ; à égalité des cas favorables, il préfère la collection qui contient le moins de cas défavorables.

La réussite à des items de ce type, qui ne comportent qu'une seule variable, apparaît de manière relativement systématique au cours du deuxième stade (7-11 ans). La construction des opérations réversibles d'emboîtement et de disjonction permet désormais de concevoir un événement comme possible : le possible devient nécessaire. Lorsqu'il pioche au sein d'une collection comprenant des jetons avec croix et des jetons sans croix, l'enfant anticipe qu'il est possible de gagner ou de perdre. Mais il échoue encore aux items à deux variables : proportionnalité et inégalité respective des cas favorables et des cas possibles. La réussite à ces items implique en effet de raisonner simultanément sur deux dimensions afin de se représenter la relation entre nombre de cas favorables et nombre de cas possibles comme une relation de proportionnalité, ce qui nécessite pour Inhelder et Piaget (1955) d'avoir atteint le stade des opérations formelles. A la fin du deuxième stade, on peut néanmoins remarquer des réussites à ces items plus complexes, obtenues par tâtonnements empiriques. En utilisant par exemple les collections $1/2$ et $2/4$, une réponse correcte est parfois avancée si le sujet pense à dissocier la deuxième collection en deux collections équivalentes à la première (ou si l'expérimentateur effectue lui-même cette transformation).

Au-delà de 11 ans commence le troisième stade, au cours duquel on assiste à une réussite à l'ensemble des items et notamment à ceux impliquant deux variables. Si le calcul des fractions associées à chacune des collections n'est pas nécessairement observé, on assiste néanmoins à une mise en correspondance des deux rapports mis en jeu, ce qui correspond bien à une opération à la seconde puissance caractéristique du stade formel. A l'item $1/3$ vs. $2/5$, l'un des enfants rencontré par les auteurs, âgé de 12 ans, choisit la collection $2/5$ « *parce que ça fait deux chances contre trois et là une chance contre deux. Il faudrait qu'il y ait 4 sans croix là (donc $2/6$) pour que ce soit égal. Alors puisqu'il y en a une de moins c'est plus facile* » (p.148).

1.2.3. Logique combinatoire

Afin de ne pas alourdir notre propos, nous ne détaillerons pas ici les nombreuses expériences réalisées par Piaget et Inhelder (1951) afin d'étudier le développement du raisonnement combinatoire, et nous contenterons d'en souligner les caractéristiques principales. Les épreuves utilisées par ces auteurs consistent par exemple à construire toutes les combinaisons possibles de deux jetons à partir d'un ensemble de jetons de couleurs différentes, à réaliser toutes les permutations possibles dans l'ordre dans lequel est aligné un petit ensemble de jetons, ou encore à effectuer des arrangements en réalisant toutes les sélections ordonnées de deux éléments qu'il est possible de faire au sein d'un ensemble comprenant trois types d'éléments différents. Avant 6-7 ans, l'enfant ne parvient que très partiellement à réaliser l'ensemble des combinaisons qui lui sont demandées, et ceci uniquement par tâtonnements empiriques. La démarche se systématisait vers 6-7 ans grâce à la construction de l'opération de combinaison mais, faute de systématisation des produits de cette opération, l'ensemble demeure incomplet jusqu'à l'âge de 11-12 ans, période à laquelle l'enfant développe une maîtrise formelle des lois de la logique combinatoire et peut donc s'assurer qu'il n'oublie aucune combinaison lorsqu'on lui demande de les réaliser dans leur ensemble. Ainsi ce développement se déroule selon trois stades dont les âges de transition correspondent à ceux identifiés ci-dessus dans les champs de la compréhension du mélange et de la quantification des probabilités. Ce parallélisme est interprété dans les termes d'un étayage de la genèse de l'idée de hasard sur la construction des opérations de la logique combinatoire.

Pour conclure sur les apports de la théorie opératoire concernant la question de l'acquisition du concept de hasard chez l'enfant, on peut tout d'abord discuter le lien étroit qui est établi entre cette acquisition et le développement des opérations logiques et arithmétiques. Dans un premier temps, avant que ces opérations ne se construisent, l'idée de hasard semble tout à fait étrangère à l'enfant. Le raisonnement de Piaget est pour l'essentiel le suivant : si le jeune enfant avait construit ces opérations (combinaisons, emboîtements,...), l'idée de hasard lui serait du même coup accessible ; puisque l'idée de hasard ne lui est pas accessible, c'est donc parce qu'il n'a pas encore construit ces opérations. La première de ces deux affirmations, qui sert de fondement à l'ensemble de la théorie, nous semble discutable dans la mesure où elle repose sur des arguments logiques qui, s'ils peuvent sembler évidents aux yeux d'un scientifique habitué à appréhender le concept de probabilité sur des bases logico-

mathématiques, ne le sont pas nécessairement pour l'enfant. Dans la partie suivante, nous aborderons des travaux remettant en cause certains aspects de la théorie opératoire, et montrant notamment que les opérations relatives à la proportionnalité ou à la logique combinatoire continuent de poser des difficultés bien après l'enfance, et le plus souvent tout au long de la vie. Dans un deuxième temps (entre 7 et 10 ans), la construction des opérations réversibles à un niveau concret, et notamment celles relatives à la logique combinatoire, aux emboîtements, et à la disjonction, permettent à l'enfant d'accéder progressivement à l'idée de possibilité. En d'autres termes, il conçoit que certains phénomènes ne sont pas déductibles a priori, mais sont simplement contingents. Et c'est seulement parce que le caractère déductible d'autres phénomènes, comme par exemple la conservation, est en train d'être reconnu en parallèle par l'enfant, que, par antithèse, peut se construire l'idée de hasard en tant qu'ensemble des phénomènes résistant à la déduction et mettant donc en échec les opérations construites jusqu'alors. Il faudra attendre l'apparition de la pensée formelle, se traduisant notamment par l'achèvement de la construction des schèmes combinatoires et la possibilité d'intégrer en systèmes plusieurs opérations d'emboîtement et de disjonction, pour assister à ce que Piaget (1950) appelle « *la revanche de l'opération sur le hasard* » (p. 175), au cours de laquelle l'irrationalité apparente du hasard devient pleinement assimilable aux schèmes combinatoires. L'apparition d'une combinaison particulière peut alors être envisagée en tant que « *fraction de certitude* », au sens où cette combinaison particulière est considérée relativement à l'ensemble des combinaisons possibles. A travers l'explication de ce processus, l'épistémologie génétique rend ainsi compte d'un pan essentiel de la démarche scientifique moderne : l'induction, c'est-à-dire le passage du fait à la loi via « *l'isolement de certains rapports (constants ou probables) au sein de l'ensemble enchevêtré des données* » (Piaget, 1950, p. 190). La question de savoir si cette démarche scientifique est transposable au fonctionnement de l'individu demeure, comme nous allons le voir, sujette à caution.

2. Les travaux post-piagétien

Il est possible de distinguer deux courants de recherche qui font suite aux travaux de Piaget, et qui se rattachent respectivement à une approche générale et à une approche différentielle de la psychologie. Nous présentons ici des travaux s'inscrivant essentiellement dans la première de ces approches, dans la mesure où ceux caractéristiques de l'approche différentielle seront développés dans le chapitre 6. L'approche générale consiste à comparer les performances moyennes observées au sein de groupes d'individus, et interprète plus ou

moins implicitement les différences entre ces individus comme de l'erreur de mesure. Ces groupes se distinguent par les conditions expérimentales dans lesquelles sont placés les individus qui les composent, ainsi que par l'âge moyen de ces individus. Les travaux caractéristiques de cette approche peuvent être répartis selon différentes catégories d'objets d'étude (Bryant & Nunes, 2012) qui, de manière cohérente avec la démarche piagétienne, semblent davantage se constituer sur la base de considérations logico-mathématiques que sur celle de références psychologiques, puisqu'elles constituent les étapes fondamentales du calcul des probabilités :

- notion de phénomène aléatoire, de mélange : il s'agit tout d'abord de reconnaître le caractère aléatoire du phénomène étudié.
- logique combinatoire : on procède ensuite au recensement de l'ensemble des éventualités qui peuvent caractériser l'intervention de ce phénomène.
- quantification des probabilités : on établit le rapport du nombre d'éventualités d'un évènement cible sur le nombre total d'éventualités.

Nous résumons ci-dessous les travaux portant sur chacun de ces objets d'étude. Comme nous le verrons, l'essentiel des travaux a consisté à faire varier les conditions expérimentales employées par Piaget et Inhelder (1951) afin de tester la généralisabilité de leurs conclusions, notamment en ce qui concerne les âges d'acquisitions des notions. Nous verrons également émerger de nouveaux cadres théoriques pour rendre compte des conduites observées.

2.1. Notion de phénomène aléatoire

Kuzmak et Gelman (1986) remettent en cause l'idée selon laquelle les enfants de moins de 7 ans ne seraient pas capables de comprendre le caractère aléatoire d'un phénomène. Les expériences menées à ce sujet par Piaget et Inhelder (1951, cf., par exemple l'expérience du plateau à bascule décrite ci-dessus) leur paraissent critiquables de par le caractère peu transparent des questions posées aux enfants (*« dans quel ordre reviendront les perles ? Les rouges resteront-elles d'un côté et les blanches de l'autre, ou se mélangeront-elles, et dans quelles proportions approximatives ? »*), le manque de mise en saillance des informations permettant de repérer le fonctionnement aléatoire du mécanisme et, à l'inverse, la focalisation de l'attention des enfants sur les informations suggérant un fonctionnement déterministe du mécanisme.

Leur propre contribution consiste à comparer les réponses fournies par des enfants de 3 à 7 ans selon la condition expérimentale dans laquelle ils sont placés. Dans la première de ces conditions, on présente à l'enfant un dispositif consistant en une cage sphérique dans laquelle sont placées un certain nombre de boules colorées. La mise en rotation de cette cage permet aux boules de se mélanger avant d'être évacuées une à une par une petite ouverture, l'ordre de cette évacuation étant imprévisible du fait du mélange préalable. Dans la deuxième condition, on présente également à l'enfant des boules de couleurs différentes qui vont être évacuées par un mécanisme, mais celui-ci consiste simplement en une rigole le long de laquelle les boules sont alignées. L'ordre de leur évacuation est entièrement prévisible puisque celui-ci correspond à l'ordre dans lequel les boules sont alignées. La procédure est la même dans les deux conditions : après que l'enfant s'est familiarisé avec le mécanisme en procédant à l'évacuation de quelques boules, on lui demande s'il lui est possible de prédire la couleur de la prochaine boule qui va être évacuée. Kuzmak et Gelman (1986) remarquent que la majorité des enfants âgés de 4 ans ou plus répondent correctement en affirmant que la prédiction est impossible avec le premier dispositif, et certaine avec le deuxième. Les auteurs en concluent que les enfants sont capables de distinguer des séquences aléatoires de séquences déterministes dès l'âge de 4 ans. En accord avec la théorie piagétienne, ils considèrent que c'est la compréhension de la notion de causalité qui, en permettant d'identifier des séquences comme déterministes, permet par antithèse d'identifier les séquences qui ne le sont pas. La compréhension de la notion de phénomène aléatoire reposerait ainsi sur celle de causalité. Si l'argument semble convaincant, on peut néanmoins penser que si les enfants les plus jeunes affirment ne pas pouvoir prédire les issues avec le premier dispositif, c'est non pas sur la base de leur compréhension du caractère aléatoire de la situation, mais simplement parce que le matériel leur paraît trop complexe (Bryant & Nunes, 2012). Cette remarque va dans le sens de travaux ayant montré que les adultes sont assez enclins à qualifier d'aléatoires les séquences d'événements dont ils ne perçoivent pas l'organisation (Falk & Konold, 1997). Il nous semble d'ailleurs que les scientifiques n'échappent pas à cette tendance lorsqu'ils qualifient d'erreur de mesure des variations dont le caractère systématique leur échappe.

D'autres travaux portant sur cette même question suggèrent au contraire que la compréhension des lois du tirage aléatoire est plus tardive que d'après Piaget et Inhelder (1951). Watson et Moritz (2003) présentent plusieurs dés à 6 faces à 108 enfants âgés de 8 à 15 ans. L'un de ces dés est pipé de telle sorte que la face « deux » sorte deux à trois fois plus fréquemment que les autres faces. Lorsque, avant toute manipulation, l'expérimentateur demande aux enfants si les dés sont équilibrés, plus du tiers d'entre eux pensent qu'ils ne le

sont pas (62% des enfants de 8-9 ans, 40% des enfants de 12-13 ans, et 21% des enfants de 14-15 ans), et 87% ne parviennent pas à justifier leur réponse. Lorsqu'on les incite à manipuler les dés afin de vérifier leur affirmation, 93% d'entre eux ne pensent pas à procéder à des tirages successifs et seulement 3 enfants lancent les dés plus de 18 fois. Seul l'un de ces trois enfants, âgé de 14-15 ans, procède à 20 lancers du dé pipé avant de rejeter explicitement l'hypothèse selon laquelle il est équilibré. Ces résultats suggèrent donc que certains aspects relativement élémentaires des lois du tirage aléatoire ne sont appréhendés qu'assez tardivement par la majorité des enfants. A la différence de l'étude présentée dans le paragraphe précédent, qui décrit une acquisition plus précoce et fondée sur des aspects logico-mathématiques, Watson et Moritz (2003) soulignent la manière dont les stratégies des enfants reposent sur des croyances intuitives, comme par exemple l'influence d'une puissance supérieure, le rôle de la technique de celui qui lance le dé, ou encore sa volonté. De telles croyances, souvent assez ancrées dans les représentations des enfants (mais également des adultes), peuvent expliquer que le fait de supposer et de tester empiriquement le caractère équiprobable de différents événements n'intervienne que tardivement.

Nous ne résumerons pas ici les nombreux autres travaux ayant abordé cette question (e.g., Falk & Konold, 1997; Green, 1979; Batanero & Serrano, 1999; Pratt & Noss, 2002; Paparistodemou, Noss, & Pratt, 2008), et nous contenterons de retenir que le débat sur la question de l'âge auquel les enfants parviennent à reconnaître le caractère aléatoire d'un phénomène, ainsi que sur la question des processus leur permettant d'appréhender les principes fondamentaux qui régissent cette notion de tirage aléatoire, est encore loin d'être clos.

2.2. Logique combinatoire

Le développement de la logique combinatoire, qui est supposé permettre à l'enfant d'accéder au concept de probabilité en procédant au recensement de l'ensemble des éventualités qui peuvent caractériser l'intervention d'un phénomène aléatoire (« espace des observables »), est sans doute le domaine dans lequel la contribution de Piaget et Inhelder a suscité le plus de critiques, et notamment - une fois n'est pas coutume - du fait de sa surestimation des progrès de l'enfant.

Une étude de Kahneman et Tversky (1972) montre que la résolution d'un problème relativement simple continue de poser des difficultés jusqu'à l'âge adulte, alors que ces difficultés seraient facilement évitées si ces adultes avaient pu construire une représentation

solide du concept d'espace des observables. Dans ce problème, on demande à 92 participants adultes de répondre au problème suivant. « Une étude porte sur l'ensemble de toutes les familles de 6 enfants habitant une ville. Dans 72 familles, l'ordre des naissances correspond à la séquence FGFGGF (G : garçon ; F : fille). A votre avis, dans combien de familles de cette ville la séquence GFGGGG est -elle apparue ? ». Les résultats montrent que 75 participants sur 92 tendent à considérer la deuxième séquence comme moins probable, alors que les deux événements sont en vérité équiprobables. Or, si les participants commençaient par déterminer l'espace des observables, ils s'apercevraient que chacune de ces séquences constitue l'une des 2^6 (64) séquences possibles. Si l'on admet que la probabilité d'être un homme est sensiblement la même que celle d'être une femme, on s'aperçoit alors que ces deux séquences présentent la même probabilité d'apparition, qui est de $1/64$. On peut donc en conclure que les nombreux adultes qui échouent cette épreuve ne maîtrisent pas suffisamment les lois de la logique combinatoire qui leur permettraient de déterminer l'espace des observables. Nous empruntons ici un mode de démonstration typiquement piagétien, assez analogue au raisonnement par l'absurde, consistant à commencer par supposer que l'individu raisonne selon les lois de logique formelle, et devrait donc réussir l'épreuve, avant de conclure au regard de son échec que la supposition initiale est fausse. L'explication de Kahneman et Tversky (1972) est très différente, et repose sur l'existence d'une heuristique de traitement qu'ils nomment «biais de représentativité », et qui consiste à évaluer la probabilité d'un événement sur la base de sa ressemblance avec les caractéristiques de la population. Dans l'épreuve considérée ci-dessus, le fait que la population soit composée d'hommes et de femmes en proportions sensiblement identiques laisse penser aux individus que la séquence GFGGGG est moins probable que la séquence FGFGGF. On repère ici deux manières bien distinctes de rendre compte d'un même phénomène, l'une plutôt logico-mathématique et l'autre procédant d'une heuristique intuitive.

Keren (1984) présente à des étudiants un problème dont la consigne introduit deux enfants, Dan (D) et Mike (M), qui effectuent un tirage aléatoire avec remise au sein d'un paquet comprenant 52 cartes, dont 26 cartes rouges et 26 cartes noires. Si la carte est noire, D gagne une pièce ; si elle est rouge, c'est M qui gagne une pièce. On demande aux sujets quel est l'évènement qui se produira le plus probablement si l'on procède à trois tirages successifs :

- un enfant gagne trois pièces, l'autre aucune.
- un enfant gagne deux pièces, l'autre une.

- les deux évènements sont équiprobables.

Ce problème apparaît comme relativement simple une fois que l'espace des observables a été déterminé : il y a deux manières d'observer le premier évènement (DDD,MMM) et six manières d'observer le deuxième évènement (DDM, DMD, MDD, MMD, MDM, DMM). Ce dernier est donc plus probable. Les résultats montrent que 48% des étudiants donnent une mauvaise réponse (la majorité d'entre eux considèrent que les deux évènements sont équiprobables), ce qui suggère à l'auteur que les lois élémentaires de la logique combinatoire continuent de poser problème jusqu'à l'âge adulte, même sur des problèmes aussi simples que celui-ci. Ainsi cette étude, comme la précédente, laisse augurer des difficultés qui se retrouveront, au moins également, chez des sujets plus jeunes.

Lecoutre (1992) présente à des sujets âgés de 15 à 17 ans une boîte contenant deux bonbons à l'orange et un bonbon au citron, et leur demande de choisir l'affirmation qui leur semble la plus exacte dans l'hypothèse où l'expérimentateur procède au tirage de deux bonbons :

- la probabilité d'obtenir un bonbon au citron et un bonbon à l'orange est la même que la probabilité d'obtenir deux bonbons à l'orange.
- il y a plus de chances d'obtenir un bonbon à l'orange et un bonbon au citron.
- il y a plus de chances d'obtenir deux bonbons à l'orange.
- il n'est pas possible de répondre.

L'établissement de l'espace des observables de ce problème permet à nouveau de le résoudre. Cet espace comprend trois évènements : sélectionner deux bonbons à l'orange ; sélectionner un bonbon au citron et l'un des bonbons à l'orange ; sélectionner un bonbon au citron et l'autre bonbon à l'orange. On s'aperçoit ainsi qu'il n'y a qu'une seule manière de sélectionner deux bonbons à l'orange, et deux manières de sélectionner un bonbon au citron et un bonbon à l'orange. La probabilité de piocher un bonbon au citron et un bonbon à l'orange est donc deux fois plus élevée que la probabilité d'obtenir deux bonbons à l'orange. Malgré la facilité apparente de ce problème, les résultats obtenus par Lecoutre (1992) montrent que la bonne réponse n'est obtenue que par 45% des participants, la majorité des échecs se traduisant par une croyance à l'équiprobabilité des évènements. Ce résultat suggère donc à nouveau une difficulté à établir l'espace des observables d'un problème, même si celui-ci ne se compose que de trois évènements. Lecoutre (1992) suppose que les individus, plutôt que de chercher à déterminer cet espace des observables, mettent souvent en place une heuristique se

traduisant par un « biais d'équiprobabilité », qui consiste à penser qu'un événement aléatoire se traduit nécessairement par des événements équiprobables.

Dans cette même étude, Lecoutre (1992) propose une variante de la tâche précédente dans laquelle les bonbons sont remplacés par des formes géométriques dont on autorise la manipulation par l'enfant. Les bonbons à l'orange sont remplacés par des triangles, et le bonbon au citron par un carré. On fait remarquer au participant que la combinaison de ces deux types de forme permet de créer un losange ou une maison. Le pourcentage de réussite des adolescents passe alors à 75%. On peut ainsi penser que la possibilité de manipuler un matériel concret les a incités à inhiber la tendance à la mise en place du biais d'équiprobabilité, à se faire une représentation de l'espace des observables, et par conséquent à remarquer qu'il y a deux manières de former une maison, mais seulement une manière de former un losange.

Dans une étude réalisée auprès d'enfants de 10 à 12 ans ayant bénéficié d'un programme d'enseignement portant sur le concept de probabilité, Fischbein et Gazit (1984) demandent aux participants d'estimer la probabilité que la somme des issues obtenues en lançant deux dés soit de a) 6, b) 13 (événement impossible) et c) supérieure à 9. La majorité des sujets parvient à identifier l'événement 13 comme impossible. En revanche les taux de réussite à la question a) sont de 0% chez les enfants de 10 ans, et de 51% chez les enfants de 12 ans. A la question c), ils sont de 0% chez les enfants de 10 ans, et de 30% chez les enfants de 12 ans. Les auteurs expliquent ces nombreuses erreurs en rapportant que la plupart des enfants affirme que l'espace des observables se compose de 12 éléments, alors qu'il est de 36. Ils appliquent ainsi une heuristique intuitive d'addition ($6+6$), et ne parviennent donc pas à comprendre que la logique combinatoire procède fondamentalement par multiplication.

Avant de conclure cette partie portant sur la logique combinatoire, nous présenterons une épreuve classiquement utilisée chez l'enfant, le problème du produit cartésien, dans lequel le participant doit réaliser toutes les combinaisons possibles au sein d'un ensemble d'éléments. On lui demande par exemple combien de sandwiches différents il est possible de composer à partir de trois types de pains (blanc, complet, céréales) et de quatre ingrédients (thon, fromage, jambon, poulet). De manière concordante avec l'étude présentée dans le paragraphe précédent, Brown (1981) et Nesher (1988) montrent que les enfants de moins de 10 ans résolvent généralement ce type de problèmes multiplicatifs de manière additive, et en déduisent dans notre exemple que 7 ($3+4$) combinaisons sont possibles. Ce résultat suggère que les enfants de 10 ans ne sont pas encore capables de raisonner selon les principes

fondamentaux de la logique combinatoire. En cohérence avec la théorie piagétienne, English (1991) montre néanmoins que les enfants parviennent à résoudre ce type d'épreuves dès l'âge de 9 ans si on leur laisse la possibilité de réaliser concrètement les combinaisons à partir d'un matériel (Bryant, Morgado & Nunes, 1992). On retrouve à nouveau l'idée selon laquelle la mise en place d'une heuristique intuitive peut, dans certaines conditions, être inhibée et laisser la place à un raisonnement logico-mathématique.

2.3. Quantification des probabilités

Une tentative visant à mettre en évidence le caractère précoce du raisonnement probabiliste a été proposée par Xu et Denison (2009) chez des bébés de 10 à 11 mois. L'enjeu est assez considérable puisque la mise en évidence d'une acquisition aussi précoce remettrait très sérieusement en cause la théorie piagétienne. Nous ne présentons ici qu'une partie du dispositif et des hypothèses des auteurs. L'expérimentateur commence par présenter à l'enfant des boîtes remplies de boules rouges et blanches. Certaines de ces boîtes contiennent une majorité de boules rouges (83%), d'autres une majorité de boules blanches (83%). Dans un deuxième temps, l'expérimentateur procède aux tirages successifs de cinq boules au sein d'une boîte dont le contenu ne peut pas être vu par l'enfant (et n'a pas été vu auparavant). L'expérimentateur ferme les yeux ou porte un masque, signifiant ainsi qu'il ne peut pas voir les boules qu'il sélectionne (les auteurs supposent que l'enfant parvient à cette déduction, ce dont il est possible de douter). Mais le dispositif est en réalité truqué, de telle sorte que les cinq boules piochées par l'expérimentateur sont systématiquement de la même couleur (cinq boules blanches ou cinq boules rouges). Une fois les cinq boules sélectionnées, on ouvre la boîte et on laisse l'enfant prendre connaissance du contenu. Celui-ci peut être majoritairement composé de boules rouges, le tirage de cinq boules blanches étant alors un événement improbable tandis que celui de cinq boules rouges est un événement probable. Le contenu peut également être majoritairement composé de boules blanches, le tirage de cinq boules rouges étant alors un événement improbable tandis que celui de cinq boules blanches est un événement probable. Si l'événement improbable est bien perçu comme tel par l'enfant (i.e., s'il comprend que la séquence observée n'est pas cohérente avec le caractère aléatoire du tirage), les auteurs s'attendent à ce qu'il le regarde plus longtemps que l'événement probable. Il est en effet largement reconnu qu'un événement nouveau ou surprenant pour l'enfant se traduit par des temps d'observation plus longs (cf. paradigme d'habituation/réaction à la nouveauté). Or c'est bien ce qui est observé puisque les résultats de Xu et Denison (2009)

montrent que les temps d'observation en présence de l'évènement improbable durent environ deux secondes de plus qu'en présence de l'évènement probable. Les auteurs en concluent que les très jeunes enfants disposent d'un mécanisme d'inférence statistique suffisamment sophistiqué pour leur permettre de se construire une représentation des caractéristiques d'une population sur la base de celles d'un échantillon. Si l'on peut admettre avec eux que ces jeunes enfants présentent une réaction face à un évènement improbable, on peut en revanche douter de leur capacité à reconnaître que les évènements improbables, bien que rares par définition et donc potentiellement surprenants, interviennent occasionnellement, et ceci d'autant plus probablement que l'expérience est répétée un grand nombre de fois. On peut plus fondamentalement douter du caractère véritablement probabiliste de leur raisonnement, qui impliquerait la comparaison des proportions observées, d'une part, dans l'échantillon sélectionné et, d'autre part, dans la population contenue dans la boîte. Il nous semble envisageable que l'évènement dit « improbable » puisse susciter une simple réaction de discrimination entre un ensemble composé majoritairement d'une couleur et un autre ensemble composé majoritairement d'une autre couleur.

Une série d'études présentant un objectif similaire a été réalisée par Teglas, Girotto, Gonzalez, et Bonatti (2007) chez des bébés de 12 mois. Dans la première de ces études, l'expérimentateur propose à ces bébés de visualiser une vidéo présentant un récipient contenant quatre objets se déplaçant de manière aléatoire. Trois de ces objets sont identiques tandis que le troisième diffère tant par la forme que par la couleur. Un tuyau placé sur le récipient permet également l'extraction aléatoire des objets. Au bout de 13 secondes, le récipient est masqué et l'un des quatre objets est évacué par le tuyau : soit l'un des trois objets identiques (évènement probable), soit l'objet singulier (évènement improbable). Les résultats montrent que l'évènement improbable suscite des temps d'observation qui durent environ trois secondes de plus qu'en présence de l'évènement probable. Bien que les auteurs en concluent que les enfants sont capables de juger du caractère plus ou moins probable d'un évènement, ils admettent également que leurs résultats pourraient être le simple reflet d'une familiarisation des enfants aux objets les plus fréquents, et par conséquent d'une réaction de curiosité lorsque l'objet qui leur est présenté leur est moins familier. Les auteurs réalisent donc une seconde étude dans laquelle le récipient est séparé en deux compartiments par une paroi infranchissable. Les objets les plus fréquents sont placés dans le compartiment qui est opposé au tuyau d'extraction, et ne devraient donc pas pouvoir être évacués du récipient, tandis que l'objet le moins fréquent est le seul placé du côté du tuyau d'extraction. Ainsi l'extraction d'un des trois objets fréquents constitue un évènement impossible et celui de

l'objet fréquent un événement possible. Les résultats montrent que les bébés observent l'événement impossible pendant environ deux secondes de plus que l'événement possible. Puisque l'événement impossible est plus familier que l'événement possible, les auteurs en déduisent que la première expérience illustre bien l'effet d'un raisonnement probabiliste, et non un simple effet de familiarité. Ils insistent de plus sur le fait que cette capacité inférentielle n'est pas le simple fruit d'un apprentissage fréquentiste puisque les résultats sont obtenus dès la première présentation du dispositif aux enfants, et en concluent que l'origine du concept de probabilité ne découle pas de l'expérience que fait l'enfant de la fréquence des événements, mais constitue une intuition *a priori*.

Bien que les deux expériences réalisées par Teglas et al. (2007) apparaissent comme plutôt convaincantes, nous partageons les objections que Bryant et Nunes (2012) expriment en faisant remarquer qu'il est difficile d'apprécier la démonstration apportée par la seconde expérience. Celle-ci porte en effet sur le caractère possible vs. impossible d'un événement, tandis que la première expérience porte uniquement sur des événements possibles, qui diffèrent par leur probabilité d'apparition respective. Afin d'éviter cette confusion, il serait possible de construire un dispositif similaire à celui de la deuxième expérience, mais dans lequel les deux compartiments contiendraient chacun quatre objets choisis de telle sorte que la probabilité de tirage d'un objet dans un des compartiments soit opposée à la probabilité de tirage de ce même objet dans l'autre compartiment. Un tel dispositif garantirait une même exposition des bébés à tous les objets, et éviterait donc un biais éventuel de familiarité. La présence d'un tuyau d'évacuation dans chacun des compartiments permettrait de définir certains événements comme probables et d'autres comme improbables, et de tester ainsi la sensibilité des bébés à ces différentes probabilités sur le même principe que celui de la première expérience.

Les travaux réalisés chez le bébé apportent ainsi des résultats qui interpellent d'emblée par le caractère précoce des acquisitions, et par la distance qui les sépare des conclusions de Piaget et Inhelder (1951). Mais plusieurs doutes subsistent quant aux interprétations proposées, doutes qui ne peuvent être écartés trop rapidement étant donné l'enjeu que représente la validation de ces interprétations.

Concernant les travaux réalisés chez les enfants plus âgés, nous avons vu que Piaget et Inhelder considéraient que l'acquisition de la notion de probabilité était fondée sur celle de la notion de proportion. Ce présupposé a été remis en cause dans une étude réalisée par Fischbein et Gazit (1984), que nous avons déjà abordée ci-dessus. Les auteurs proposent à des

enfants de 10, 11 et 12 ans de suivre pour la première fois un enseignement portant sur la notion de probabilité, constitué de 12 séances (l'expérience comporte également un groupe contrôle composé d'enfants ne réalisant pas cet apprentissage). A la suite, ces enfants réalisent une série d'exercices présentés sous forme de problèmes. L'un de ces problèmes, qui n'est pas proposé dans le groupe contrôle, introduit une boîte contenant trois billes rouges et quatre billes noires, et on demande à l'enfant de calculer les probabilités des événements suivants :

- piocher une bille rouge ($3/7$ soit 0,43).
- piocher une bille noire ($4/7$ soit 0,57).
- après tirage avec remise d'une bille noire, piocher à nouveau une bille noire (0,57).
- après tirage sans remise d'une bille noire, piocher à nouveau une bille noire ($3/6$ soit 0,5).

Les taux de réussite à l'ensemble de ces questions se situent entre 22 et 30% chez les enfants de 10 ans. A 11 ans, environ 65% des enfants réussissent les trois premières questions, et 43% la quatrième. Dès 12 ans, environ 90% des enfants réussissent les trois premières questions, et 71% la quatrième. Ces résultats témoignent de progrès importants entre les âges de 10 et 12 ans dans la manière dont les enfants peuvent profiter d'un apprentissage probabiliste. Or on notera que cette période correspond à l'entrée dans le stade piagétien des opérations formelles, au cours duquel la pensée plus intégrative de l'enfant lui permet d'accéder à la notion de proportion. Bien que les enfants de l'étude de Fischbein et Gazit (1984) aient tous bénéficié du même programme d'enseignement, on peut penser que les plus âgés d'entre eux ont été davantage familiarisés à la notion de proportion au cours de leur scolarité. En concordance avec les travaux de Piaget et Inhelder, les résultats de cette étude pourraient ainsi laisser penser que le développement du raisonnement probabiliste dont cette étude fait état est fortement lié au développement du raisonnement proportionnel. La conclusion des auteurs est néanmoins toute autre. Leur protocole comprend en effet un problème de proportionnalité ne mettant pas en jeu la notion de probabilité. Or les résultats montrent que les enfants ayant suivi le programme d'enseignement parviennent moins souvent à résoudre ce problème de proportionnalité que les enfants issus du groupe contrôle (tandis que ces derniers, qui n'ont jamais appris le calcul des probabilités, ne seraient évidemment pas capables de résoudre le problème probabiliste). Les auteurs en concluent que la pensée probabiliste et le raisonnement proportionnel reposent sur deux schémas mentaux distincts et que, par conséquent, les acquisitions effectuées dans l'un des domaines ne se transfèrent pas à l'autre. Ils ajoutent que « *la probabilité, en tant qu'attitude mentale*

spécifique, n'implique pas nécessairement une compréhension formelle du concept de proportion » (p. 23).

La théorie de la trace floue (*fuzzy trace theory*, Reyna & Brainerd, 1991) s'appuie également sur une telle mise à distance face à la métaphore piagétienne de l'enfant logicien, une métaphore considérée comme contraire à la manière dont la pensée humaine procède véritablement. Cette théorie, que nous ne détaillerons pas ici, met principalement l'accent sur la variabilité que les représentations mnésiques du sujet présentent en termes de précision (continuum allant de représentations détaillées à des représentations floues), ainsi que sur les mécanismes cognitifs qui interviennent dans le traitement de ces représentations. Parmi ces processus, celui d'interférence tient une place importante. L'interférence interviendrait lorsqu'une situation tend à activer simultanément une représentation détaillée (« *verbatim* ») et une représentation floue (« *gist* »), alors que l'une seulement de ces représentations permet de s'adapter à la situation.

Son rôle dans la quantification des probabilités par l'enfant a été examiné par Reyna (1995), une étude dont nous présentons ici les caractéristiques majeures. Le matériel utilisé dans cette expérience, similaire dans son principe à celui employé par Piaget et Inhelder (1951) dans l'épreuve de quantification de probabilités, se compose de deux récipients contenant un certain nombre d'animaux miniatures, des vaches et des chevaux, en proportion variable. La consigne donnée à l'enfant est de choisir le récipient dans lequel il préférerait piocher afin de sélectionner l'animal préalablement défini comme cible. Dans la version non interférente de la tâche, le nombre total d'animaux ne varie pas d'un récipient à l'autre (l'un des récipients contient par exemple 7 vaches et 3 chevaux, l'autre récipient 5 vaches et 5 chevaux). Si la vache est définie comme animal cible, la représentation floue activée par la tâche consiste à sélectionner le récipient qui contient le plus de vaches, tandis que la représentation détaillée consiste à sélectionner le récipient dans lequel la proportion de vaches est la plus importante. Comme on peut le constater avec cette version non interférente de l'épreuve, les deux représentations entraînent des réponses équivalentes. Au contraire, dans la version interférente, le nombre total d'animaux diffère d'un récipient à l'autre, et le nombre d'exemplaires de l'animal cible est plus élevé dans le récipient qui présente la plus faible probabilité de sélectionner cet animal cible (l'un des récipients contient par exemple 5 vaches et 5 chevaux, l'autre récipient 3 vaches et 2 chevaux, l'animal cible étant à nouveau la vache). La prise en compte de la représentation floue incite alors le sujet à émettre une mauvaise réponse, tandis que la représentation détaillée l'incite à émettre la bonne réponse. C'est en ce

sens que les auteurs parlent d'interférence entre les représentations du sujet. Or la théorie de la trace floue prédit que les réponses des individus sont généralement biaisées en faveur des représentations floues et au détriment des représentations détaillées (Reyna & Brainerd, 1992), ce qui expliquerait les nombreux écarts à la rationalité que leurs conduites manifestent. Les données recueillies avec le matériel présenté ci-dessus révèlent effectivement des difficultés beaucoup plus importantes avec la version interférente de la tâche, difficultés qui semblent se conserver jusqu'à l'âge adulte (Acredolo, O'Connor, Banks, & Horobin, 1989; Reyna & Brainerd, 1993). Si ces résultats n'apportent rien de fondamentalement nouveau à ceux déjà rapportés par Piaget et Inhelder (1951), l'explication proposée s'appuie davantage sur l'existence d'un processus d'interférence entre les représentations du sujet, qui est source d'écarts à la rationalité tout au long de la vie, plutôt que sur la construction progressive de structures logiques permettant, une fois le stade formel atteint, la manifestation d'une conduite désormais rationnelle. Dans la suite de cette section, nous aborderons deux études qui postulent l'existence conjointe de ces deux modes de raisonnement, l'un exclusivement logico-mathématique, et l'autre plus intuitif et source d'écarts à la rationalité.

Schlottmann (2001) étudie le raisonnement probabiliste en s'appuyant sur la théorie de l'intégration de l'information proposée par Anderson (1981, 1996). Elle présente à des enfants âgés de 6 à 9 ans (ainsi qu'à des adultes) le dispositif schématisé sur la figure 2, composé d'une rigole séparée en plusieurs compartiments de même taille. Une bille peut se déplacer le long de cette rigole après avoir été mise en mouvement, avant de s'arrêter de manière aléatoire dans l'un des compartiments. On peut voir sur la figure que ces compartiments se répartissent en deux catégories qui diffèrent par leur couleur (blanc ou gris sur la figure), de telle sorte que la proportion de compartiments d'une couleur donnée définit la probabilité que la bille s'arrête sur cette couleur. Au dessus de chacune des catégories de compartiments figurent un certain nombre de crayons, qui représentent le gain obtenu par un joueur hypothétique, une poupée, lorsqu'elle lance la bille dans la rigole. On présente à l'enfant plusieurs rigoles qui diffèrent par les proportions de compartiments de l'une et de l'autre couleur (0,2 vs. 0,8 ; 0,5 vs. 0,5 ; 0,8 vs. 0,2), ainsi que par les valeurs de gains (1, 3, 6 ou 10 crayons), et on lui demande pour chacune des rigoles de juger de la satisfaction qu'aurait la poupée de jouer à ce jeu (réponse sur une échelle linéaire en 17 points adaptée aux jeunes enfants). Ce score de satisfaction est considéré comme une mesure de la valence espérée du jeu, c'est-à-dire du caractère plus ou moins plaisant de l'état émotionnel procuré par le jeu, tel que l'enfant le perçoit (cette notion, initialement proposée par Lewin (1935) est assez proche

de celle d'utilité espérée, que nous avons présentée dans le chapitre 1). On peut le comparer à la valence espérée que présente objectivement le jeu :

$$VE = p_1 * v_1 + p_2 * v_2,$$

où p_i ($i = [1,2]$) représente la probabilité des deux issues du jeu et v_i ($i = [1,2]$) la valeur du gain associée à chacune de ces issues. La valence espérée associée à la première rigole de la figure 2 est par exemple de $0,8*6+0,2*1 = 5$.

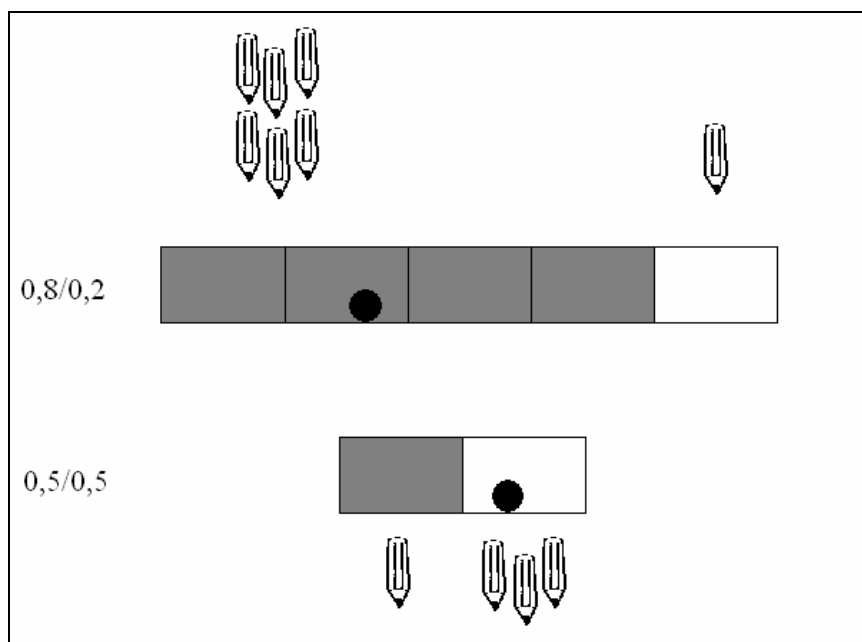


Figure 2. Représentation schématique de deux rigoles. Avec la première rigole, la probabilité que la bille s'arrête dans un compartiment gris est de 0,8 (soit 0,2 pour le compartiment blanc). La poupée gagne 6 crayons si la bille s'arrête dans un compartiment gris, et 1 crayon si elle s'arrête dans un compartiment blanc (d'après Schlottmann, 2001).

Une fois le recueil des données effectué auprès d'un échantillon comprenant 56 enfants, Schlottmann (2001) tente d'identifier la fonction qui relie les probabilités de gain ainsi que les valeurs de gain à la valeur espérée du jeu telle que les enfants la perçoivent. Ils comparent alors cette fonction à celle théoriquement obtenue en calculant la valence espérée à l'aide de la formule présentée ci-dessus. Les éventuels écarts observés peuvent découler 1) ou bien d'une difficulté à saisir la relation multiplicative qui unit chacune des probabilités à la valeur de gain correspondante, ou bien 2) d'une difficulté à saisir la relation additive qui unit la valence espérée des deux issues du jeu.

Concernant le premier de ces deux écarts potentiels, les résultats montrent que les deux fonctions coïncident fortement, ce qui permet de conclure que les enfants de 6 à 9 ans, lorsqu'ils estiment la satisfaction de la poupée, sont sensibles à la probabilité que la bille se situe dans un compartiment donné et, de plus, que leur estimation de cette probabilité est assez précise. De manière notable, ces résultats montrent également que les participants ont construit une représentation assez fidèle du rapport multiplicatif qui unit la probabilité de gain à la valeur du gain lorsque l'on cherche à estimer la satisfaction que l'on peut tirer du fait de jouer à ce jeu. Ils ont en d'autres termes construit une représentation de la notion formelle d'espérance mathématique. On peut s'étonner que des enfants aussi jeunes parviennent à émettre un jugement nécessitant l'intégration multiplicative de deux dimensions, un résultat qui contraste avec les travaux portant sur l'acquisition par l'enfant de notions physiques comme la surface ou la vitesse (e.g. Wilkening, 1981). Ces derniers montrent en effet que l'intégration multiplicative de deux dimensions n'intervient généralement pas avant l'âge de 8 ans. Schlottmann (2001) explique cette divergence en faisant remarquer que les quantités physiques comme la surface ou la vitesse nécessitent de combiner deux dimensions afin d'en former une troisième, tandis que le problème posé dans son étude nécessite plus simplement de pondérer une dimension (une probabilité) à partir d'une autre dimension (la valeur du gain). Ils supposent ainsi que la multiplication en tant qu'opération de conjonction correspond à un niveau de développement plus élevé que la multiplication en tant qu'opération de pondération.

Concernant ensuite le deuxième écart potentiel, la confrontation des fonctions individuelles à la fonction théorique suggère l'existence de différences interindividuelles dans la capacité à intégrer additivement les valences espérées des deux issues du jeu. Chez certains enfants, cette relation additive semble bien appréhendée. Chez d'autres, on repère plutôt l'existence d'une stratégie intuitive consistant à tenir compte uniquement de la valence espérée de l'option dans laquelle le gain est le plus élevé, et à négliger celle de l'option dans laquelle ce gain est plus faible, un pattern que l'auteur interprète comme témoignant d'une tendance à la prise de risque (« *risk seeking* »). Enfin, dans un troisième groupe d'individus, une autre stratégie intuitive est identifiée, qui consiste à tenir compte uniquement de la valence espérée de l'option la plus probable, et à négliger celle de l'option la moins probable, un pattern que l'auteur interprète comme témoignant d'une aversion pour le risque (« *risk averse* »).

En résumé, l'étude de Schlotmann (2001) invite à reconnaître l'existence de deux types de stratégie de réponse, l'une s'appuyant exclusivement sur un raisonnement logico-mathématique consistant en une intégration additive et multiplicative des informations disponibles, l'autre combinant un raisonnement logico-mathématique (intégration multiplicative) à une procédure intuitive. De manière tout à fait intéressante de notre point de vue, l'auteur souligne que cette deuxième stratégie est davantage employée chez les enfants les plus jeunes de l'échantillon, l'inverse étant vrai chez les adultes.

Nous concluons cette revue non exhaustive de la littérature par la présentation d'une étude réalisée par Falk et Wilkening (1998), qui s'inscrit dans une démarche assez similaire au travail empirique que nous présenterons dans le chapitre 6. Cette étude porte sur un échantillon de 70 enfants répartis en sept groupes correspondant aux âges de 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 13 ans. A chacun des essais que comporte la passation, on présente à l'enfant deux boîtes dont l'une contient des billes bleues et jaunes en proportion variable (1, 2 ou 3 exemplaires de chaque couleur, soit 9 types d'essais possibles), tandis que l'autre boîte contient systématiquement 6 billes jaunes. On demande alors à l'enfant de compléter cette deuxième boîte avec des billes bleues, de telle sorte qu'il y ait autant de chance de piocher au hasard une bille bleue dans chacune des boîtes (tâche d'ajustement). Afin de motiver l'enfant, on lui précise qu'à la fin de chaque essai l'expérimentateur choisira une des boîtes et attribuera l'autre à l'enfant. Puis chacun des deux joueurs effectuera un tirage au sort au sein de sa boîte, et gagnera un jeton s'il parvient à sélectionner une bille bleue. A la fin de la passation (24 essais), le joueur qui aura accumulé le plus de jetons gagnera un prix (les choix de l'expérimentateur sont en réalité déterminés à l'avance).

Une des particularités essentielles de cette étude est de s'interroger sur l'existence d'une variabilité interindividuelle dans les stratégies mobilisées par les enfants pour résoudre la tâche. Les auteurs font l'hypothèse de trois stratégies d'ajustement, qui correspondent à des niveaux de développement hiérarchisés : égaliser le nombre de billes bleues dans les deux boîtes sans tenir compte des billes jaunes (« stratégie unidimensionnelle »), ajouter des billes bleues jusqu'à ce que la différence du nombre de billes bleues et de billes jaunes soit la même dans les deux boîtes (« stratégie de différence »), ajouter des billes bleues jusqu'à ce que la proportion de billes bleues et jaunes soit la même dans les deux boîtes (« stratégie de proportionnalité »). Il est possible de prédire les réponses dont découle la mobilisation de ces différentes stratégies à chacun des essais de la passation. Par exemple, si la première boîte contient 3 billes bleues et 2 billes jaunes, le nombre de billes bleues placées par l'enfant dans

la deuxième boîte (qui, rappelons-le, contient systématiquement 6 billes jaunes) serait de 3 avec la stratégie unidimensionnelle, 7 avec la stratégie de différence, et 9 avec la stratégie de proportionnalité. La démarche des auteurs consiste, sur la base du pattern de réponse de chaque enfant à l'ensemble des items, à définir la stratégie que cet enfant a le plus probablement employée. Pour cela, les auteurs effectuent une ANOVA pour chacun des enfants, dans laquelle le nombre de billes bleues placé par l'enfant correspond à la variable dépendante. Les variables indépendantes, supposées catégorielles du fait du choix de l'ANOVA, correspondent au nombre de billes jaunes de la première boîte d'une part, et au nombre de billes bleues de la première boîte d'autre part. C'est la significativité des effets de ces deux variables indépendantes qui permet aux auteurs de déterminer la stratégie employée par l'enfant : la stratégie unidimensionnelle suppose uniquement la significativité de l'effet simple du nombre de billes bleues de la première boîte ; la stratégie de différence suppose un effet simple des deux variables (nombre de billes jaunes de la première boîte et nombre de billes bleues de la première boîte) ; la stratégie de proportionnalité suppose un effet simple de chacune de ces deux variables, auquel s'ajoute l'effet de leur interaction. Cette méthode de classification des enfants en termes de stratégie est assez laborieuse puisqu'elle doit être utilisée pour chaque enfant, et présente plusieurs inconvénients (la détermination de la stratégie est assez arbitraire puisque reposant sur le seuil de significativité auquel on compare la valeur p , le choix de l'ANOVA suppose une indépendance des observations qui n'est évidemment pas respectée lorsque l'on applique le modèle aux scores d'un seul individu, l'effectif de ces scores [24] est trop faible au regard du nombre de modalités des variables indépendantes [croisement de deux variables à trois modalités],...). La démarche n'en est pas moins tout à fait intéressante de notre point de vue puisqu'elle repose sur une intégration des approches expérimentale (manipulation des conditions de passations au cours des différents essais), différentielle (étude des différences interindividuelles de stratégies) et développementale (étude de l'évolution des stratégies en fonction de l'âge).

Les résultats de l'étude de Falk et Wilkening (1998), résumés par le tableau 1, témoignent tout d'abord de la diversité interindividuelles des stratégies puisque 17 enfants mobilisent la stratégie unidimensionnelle, 9 enfants mobilisent la stratégie de différence, et 13 enfants mobilisent la stratégie de proportionnalité. Parmi les 31 enfants restants, 6 semblent mobiliser un autre type de stratégie, tandis que les données obtenues chez les 25 autres enfants ne permettent pas aux auteurs d'identifier une quelconque stratégie. La deuxième conclusion importante de cette étude est que les trois stratégies se hiérarchisent d'un point de vue développemental. Ce développement semble se caractériser par une coordination

progressive des deux dimensions initialement considérées comme indépendantes, d'abord de manière additive, puis de manière proportionnelle. On retrouve donc la description que Piaget et Inhelder (1951) proposent, fondée sur une coordination progressive de schèmes, à laquelle s'ajoute l'idée d'une variabilité des stratégies chez des enfants d'un même âge. En résumé, cette étude suggère que la question du niveau de développement des conduites ne se pose pas uniquement à un niveau d'analyse inter-âge, mais également à un niveau interindividuel. A cela nous serions tentés d'ajouter que cette question se pose également au niveau intra-individuel, via les changements de stratégies qu'un individu peut effectuer en réponse aux variations situationnelles dont il fait l'expérience. Cette forme de variabilité semble peu intéresser Falk et Wilkening (1998), qui la décrivent comme une inconsistance propre aux enfants les plus jeunes, un vacillement entre différentes approches dénué de tout caractère adaptatif.

Tableau 1. Nombre d'enfants mobilisant chacune des stratégies à l'épreuve d'ajustement de probabilités dans les différents groupes d'âge (d'après Falk et Wilkening, 1998).

Groupe d'âge	Stratégie unidimensionnelle	Stratégie de différence	Stratégie de proportionnalité	Stratégie autre	Stratégie non identifiable
6	3	0	0	0	3
7	2	0	0	0	7
8	2	1	1	1	5
9	2	3	1	3	3
10	1	4	1	2	3
11	3	1	5	0	2
13	0	0	9	0	1
total	13	9	17	6	25

3. Conclusion

Depuis la contribution princeps de Piaget et Inhelder (1951), et au regard de l'ensemble des travaux plus récents que nous venons de présenter, la recherche en psychologie du développement concernant la question de la genèse de la notion de hasard chez l'enfant nous semble avoir été abordée dans trois cadres théoriques différents. Nous synthétisons ci-dessous les caractéristiques principales de ces cadres explicatifs, soulignons la relation qu'ils entretiennent avec la théorie piagétienne, et discutons la question des âges d'acquisition dont ils font l'hypothèse.

Certains de ces travaux, assez minoritaires, sont pour l'essentiel restés fidèles à l'ancrage logico-mathématique piagétien et à l'hypothèse d'un enfant dont l'objectivité croissante le rapproche continuellement du sujet épistémique. Les travaux de Kuzmak et Gelman (1986) et de Bryant et al. (1992) nous semblent assez révélateurs de cette tendance. Ces auteurs interrogent l'acquisition de notions qui, d'après la théorie piagétienne, apparaissent antérieurement à celle de probabilité puisqu'elles en constituent le fondement (respectivement la compréhension de la notion d'aléatoire et la logique combinatoire de niveau opératoire formel). L'acquisition de ces notions est supposée reposer sur la construction préalable d'une structure logico-mathématique (respectivement la causalité et la logique combinatoire de niveau opératoire concret). Enfin, de par leur opérationnalisation, ces deux études cherchent à identifier non pas le caractère élaboré des notions qu'elles étudient, mais au contraire les prémisses de leur compréhension par l'enfant. A la différence des autres travaux que nous avons cités dans cette partie, elles expriment par conséquent un certain optimisme quant aux âges d'acquisition des notions d'aléatoire et de combinatoire. Cet optimisme est assez cohérent avec la position de Piaget et Inhelder selon laquelle l'acquisition de ces deux notions doit logiquement précéder l'apparition du raisonnement probabiliste. Celle-ci étant supposée se manifester dès l'âge de 7 ans environ, certains auteurs ont pu, consciemment ou non, orienter leurs travaux d'une manière qui surestime les progrès de l'enfant dans l'acquisition des notions d'aléatoire et de combinatoire. Chez Piaget, ce besoin d'optimisme pourrait être motivé par la perspective prioritairement épistémologique qui est la sienne, puisque la théorie des probabilités s'appuie en effet sur la logique combinatoire et sur la notion de variable aléatoire. On retrouve ici l'idée selon laquelle l'interprétation piagétienne a pu accorder une importante excessive au parallèle entre l'évolution des connaissances chez l'espèce humaine et le développement psychologique du sujet, au risque

de nous peindre un tableau légèrement déformé de ce développement afin de mieux le laisser s'insérer dans le cadre qui lui préexistait.

La majorité des travaux postérieurs à celui de Piaget et Inhelder (1951) vont rompre avec l'ancrage logico-mathématique, et plus généralement avec l'idée selon laquelle les individus parviennent à construire de manière objective les notions de hasard et de probabilité, et à s'adapter sur la base d'une formalisation de ces notions. Ils vont au contraire insister sur l'existence de modes de traitement de l'information que nous dénommerons par le terme d'heuristique (Simon, 1955, Tversky & Kahneman, 1974). Si l'on trouve de nombreuses définitions du terme dans la littérature, les auteurs s'accordent généralement sur le fait qu'une heuristique désigne une stratégie mobilisée automatiquement, et permettant de résoudre un problème de manière intuitive, rapide, peu coûteuse cognitivement, et partielle dans la prise en compte des données du problème. Si elle permet le plus souvent de résoudre les problèmes simples auxquels notre activité quotidienne nous confronte, l'heuristique est également source de biais face à des problèmes plus complexes et, pour ces raisons, est généralement considérée comme opposée au raisonnement logico-mathématique. La majorité des travaux présentés dans cette partie font l'hypothèse de l'existence d'heuristiques comme le biais de représentativité (Kahneman & Tversky, 1972), le biais d'équiprobabilité (Lecoutre, 1992) ou la substitution d'une stratégie additive à une stratégie multiplicative (Fischbein & Gazit, 1984; Brown, 1981; Nesher, 1988). A cette opposition théorique entre l'approche en heuristique et l'approche logico-mathématique correspond parallèlement une divergence importante dans la description des étapes du développement des notions de probabilités et de hasard. Si nous avons vu que l'approche logico-mathématique tendait à présenter ce développement comme relativement précoce (en particulier concernant l'acquisition des notions d'aléatoire et de combinatoire), l'approche en heuristique en offre un portrait beaucoup plus modeste, qui se traduit par d'importantes difficultés perdurant jusqu'à l'âge adulte. Au service d'une telle démonstration, les auteurs s'inscrivant au sein de l'approche heuristique sélectionnent généralement des tâches beaucoup plus complexes qu'ils administrent à des sujets plus âgés. Cette différence entre les deux approches, dans l'échantillonnage des sujets et des situations, nous semble rendre difficile la mise en évidence de leurs mérites respectifs.

De ce point de vue, la troisième approche qui se dégage de l'ensemble des travaux que nous avons présentés nous semble intéressante dans la mesure où elle constitue une tentative de dépassement de l'opposition entre les approches logico-mathématique et heuristique. Nous

la dénommerons sous le terme d'approche de la théorie du double processus (*dual-process theory*). Cette approche intègre de nombreuses théories faisant l'hypothèse commune d'un rôle complémentaire de deux types de processus qui, le plus souvent, font écho à l'ancienne distinction proposée par James (1890) entre processus automatiques et processus contrôlés. L'application de la théorie de la trace floue au problème de la genèse de l'idée de hasard par Reyna (1995), via la dialectique entre représentations « *verbatim* » et représentations « *gist* », s'inscrit dans une telle démarche, bien que l'importance soit davantage accordée aux représentations « *gist* » (floues). Les études de Schlotmann (2001) et Falk et Wilkening (1998) nous semblent également révélatrices de cette tendance dans la mesure où elles reconnaissent l'existence de deux formes de stratégies adaptatives, l'une étant de nature logico-mathématique et l'autre de nature intuitive. Dans ces travaux, la préférence pour l'une ou l'autre des stratégies, ou encore pour une utilisation mixte des deux types de stratégies, est source de différences interindividuelles qui correspondent, en partie mais pas seulement, à des différences liées à l'âge. Plus précisément, bien que l'on observe une variabilité des stratégies au sein de chacun des groupes d'âge, les enfants les plus jeunes tendent à utiliser davantage des stratégies intuitives tandis que les plus âgés mobilisent plus volontiers des stratégies de nature logico-mathématique. Cette conjonction des regards développementaux et différentiels, associée à un dépassement du débat traditionnel entre les tenants de la logique et les tenants de l'intuition, nous semble constituer une piste de travail tout à fait encourageante.

Chapitre 3 : Prise de décision sous incertitude et neurosciences cognitives

Dans la partie précédente, nous avons constaté l'existence de deux conceptions théoriques complémentaires en psychologie du développement, s'appuyant respectivement sur une explication logico-mathématique et intuitive des conduites. Nous retrouverons un dualisme similaire dans cette partie consacrée au champ des neurosciences cognitives, à travers l'hypothèse du rôle complémentaire de deux processus dans l'explication des conduites individuelles en situation de prise de décision sous incertitude : les émotions d'une part, et le contrôle cognitif d'autre part. Cette partie est essentiellement consacrée à la présentation du rôle hypothétique de ces deux processus, au sein d'un courant de recherche qui s'appuie sur une opérationnalisation de la prise de décision sous incertitude à partir de la tâche du casino. Nous verrons que cette épreuve cristallise à elle seule une partie importante du débat qui s'est déroulé ces vingt dernières années sur la question des processus mobilisés en situation de prise de décision sous incertitude. Cette focalisation sur la tâche du casino pourra également éviter les désaccords qui, comme nous l'avons remarqué dans la partie précédente, semblent parfois résulter du simple fait que les auteurs utilisent des épreuves différentes pour mesurer un même concept. Si le fait de nous restreindre à cette seule épreuve limitera inévitablement la généralisabilité de notre propos, nous tâcherons en contrepartie d'être attentifs à la question de la validité des interprétations que l'on peut proposer des performances individuelles à cette épreuve.

1. Rôle des émotions en situation de prise de décision sous incertitude : le point de vue neurologique

Le champ de recherche que nous allons maintenant aborder est issu de la rencontre entre deux neurologues, Antoine Bechara et Antonio Damasio, qui, dans un article désormais célèbre, ont présenté pour la première fois la tâche du casino (Bechara, Damasio, Damasio, & Anderson, 1994). Afin de mieux faire comprendre les raisons qui les ont amenés à proposer cette épreuve, et qui nous semblent avoir fortement orienté les débats ultérieurs, nous consacrerons les deux parties suivantes à la présentation de ces deux auteurs.

1.1. Bechara : modèle animal et toxicomanie

L'ensemble des travaux publiés par Bechara avant le début de sa collaboration avec Damasio se situe dans le champ de la biologie moléculaire. Travaillant au sein du département de génétique médicale et de microbiologie de l'université de Toronto, il se consacre principalement à l'étude de l'effet des opiacés sur le fonctionnement cérébral. Ses publications portent notamment sur les effets paradoxaux des opiacés, considérés comme source potentielle de renforcement, mais également d'aversion (e.g., Bechara & van der Kooy, 1985, 1987; Bechara, Martin, Pridgar, & van der Kooy, 1993). Tous ces travaux s'appuient sur le modèle animal et sont réalisés chez le rat. Ils visent donc, par généralisation, à nous renseigner sur l'impact de la consommation de drogues chez l'humain. La méthode, dont on comprendra qu'elle est inapplicable chez l'humain, consiste principalement à observer l'effet de l'injection de doses variables d'opiacés sur l'attirance ultérieure à l'égard du produit, et à évaluer la manière dont la destruction de certaines zones cérébrales peut modifier cette action du produit. L'attirance ou l'aversion à l'égard du produit sont le plus souvent mesurées par un test de préférence de place conditionnée, qui consiste à placer le rat dans une cage comprenant deux compartiments, à lui injecter systématiquement la drogue dans l'un de ces deux compartiments, et à observer la proportion de temps que l'animal choisira ensuite de passer dans ce compartiment (attirance) ou dans l'autre compartiment (aversion). L'objectif général de ce type d'étude est d'identifier les circuits neuronaux motivationnels qui conduisent l'individu à l'attirance ou, au contraire, à l'aversion à l'égard de la substance toxique. Il s'agit également d'imaginer comment des médicaments agissant sur ces circuits pourraient stimuler cette aversion et/ou réduire cette attirance.

Nous ne rentrerons pas ici dans les détails de ce champ de recherche, qui dépassent de très loin les limites de notre objet. Nous retiendrons simplement les répercussions principales que ces travaux auront lorsque Bechara passera du modèle animal à l'humain en construisant la tâche du casino. Tout d'abord, l'étude de la prise de décision sous incertitude à partir de la tâche du casino sera comme nous le verrons marquée par l'existence d'une dichotomie entre, d'une part, un « bon » choix, qui se traduit par des conséquences jugées favorables à long terme pour l'individu et, d'autre part, un « mauvais » choix qui, par analogie avec le fonctionnement des personnes atteintes de toxicomanie, se traduit par la recherche d'une récompense immédiate *au risque de* faire l'expérience des conséquences négatives de ce choix à plus long terme (Bechara & Martin, 2004). Cette volonté plus ou moins explicite d'opérationnaliser, par la tâche du casino, un choix entre un fonctionnement « normal » et un

fonctionnement « pathologique » analogue à la toxicomanie, pourra également expliquer, comme nous le verrons, que cette épreuve ait pu être utilisée pour caractériser la tendance à la prise de risque observée dans de nombreuses catégories de troubles psychiatriques.

1.2. Damasio et l'hypothèse des marqueurs somatiques

1.2.1. Principes généraux de la théorie de Damasio

Antoine Damasio est un célèbre neurologue qui a dirigé pendant près de vingt ans le département de neurologie de l'université de l'Iowa, au sein duquel il a rencontré Bechara. L'essentiel de ses travaux porte sur l'étude des circuits neuronaux impliqués dans les processus mnésiques (et notamment la reconnaissance des visages et des objets), le déclenchement de la maladie d'Alzheimer et, ce qui nous intéressera davantage, la relation entre émotion et prise de décision.

L'année durant laquelle est publié l'article dans lequel la tâche du casino est présenté pour la première fois correspond également à l'année de publication d'un des ouvrages principaux de Damasio, *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain* (Damasio, 1994), dont le contenu théorique constitue encore le cadre interprétatif le plus souvent mobilisé pour rendre compte des conduites individuelles lors de la résolution de la tâche du casino. La thèse principale de l'auteur se présente à la fois comme une critique du rationalisme cartésien, à travers la mise en évidence du rôle crucial des émotions dans la régulation de la cognition, ainsi que comme une critique du dualisme cartésien, auquel il substitue une conception incarnée de la cognition. L'objet d'étude que Damasio aborde dans cet ouvrage est assez vaste puisqu'il concerne toutes les situations dans lesquelles raison et émotion concourent au choix d'une solution adaptative par l'individu, que le contexte de cette décision soit social ou non, et que l'enjeu soit faible ou élevé. Pour reprendre les exemples de l'auteur, sa théorie est supposée rendre compte tout aussi bien de la décision d'un individu lorsqu'il est menacé par la chute d'un objet que lorsqu'il doit accepter ou non une demande en mariage. On retrouve ici le caractère très général du concept de prise de décision, que nous avons souligné dès le premier paragraphe du présent manuscrit.

L'argumentation de Damasio (1994) en faveur de sa thèse concernant la relation entre raison et émotion en situation de prise de décision, qu'il nomme l'hypothèse des marqueurs somatiques, commence par une remise en cause de la possibilité de rendre compte des conduites de prise de décision dans une approche strictement rationaliste (*high-reason view*).

Le caractère limité de nos ressources attentionnelles (notamment de notre mémoire de travail) face à la multitude des informations pertinentes à la plupart de nos décisions, l'impossibilité de traduire symboliquement ces informations afin de leur appliquer des règles logiques, et l'extrême complexité des algorithmes que nécessiterait une telle déduction logique, sont autant de facteurs qui rendent nécessaire le recours à un cadre explicatif qui ne se borne pas à la raison pure. Ces critiques nous semblent tout à fait applicables aux approches que nous avons développées dans les deux parties précédentes : la modélisation cognitive formelle et l'approche logico-mathématique piagétienne.

L'hypothèse des marqueurs somatiques est donc présentée par Damasio (1994, 1998) comme une alternative nécessaire face aux limites des explications rationalistes traditionnelles. Lorsqu'un individu se trouve en situation de prise de décision (c'est-à-dire très fréquemment), un marqueur somatique désigne une sensation corporelle, viscérale ou non, qui apparaît au moment précis où cet individu fait l'expérience pour la première fois des conséquences associées à l'une des options qui lui sont présentées (variation du rythme cardiaque et de la pression sanguine, motilité intestinale, sécrétions hormonales, sudation,...). Cette option se trouve ainsi « marquée » par cette sensation du corps (« soma » en grec). Lorsque, par la suite, l'individu rencontre à nouveau cette situation, le fait de considérer cette même option déclenchera à nouveau ce marqueur somatique, mais cette fois par anticipation. Celui-ci agira alors comme un signal d'alarme, le plus souvent non conscient, focalisant l'attention de l'individu sur les conséquences de l'option qu'il est en train de considérer. Deux cas de figure peuvent alors se présenter. Dans un premier cas, le marqueur somatique est dit « négatif », au sens où il est associé à des conséquences désavantageuses. Il correspond alors à une sensation désagréable qui incitera l'individu à rejeter cette option potentiellement désavantageuse, afin de retrouver un état d'homéostasie. Dans un deuxième cas, le marqueur est positif et il incitera alors l'individu à sélectionner l'option potentiellement avantageuse. L'application répétée de ce mécanisme à l'ensemble des options qui s'offrent à l'individu va lui permettre d'éliminer les options potentiellement désavantageuses, et de ne conserver finalement que les options les plus favorables, entre lesquelles un choix désormais rationnel peut finalement s'effectuer (mécanisme de sélection par les conséquences).

Les marqueurs somatiques, s'ils ne se suffisent donc pas à eux-mêmes et n'interdisent pas le recours à la raison, permettent néanmoins de faciliter grandement le processus décisionnel en éliminant de manière automatique les options les plus risquées. Leur champ d'action est très large puisqu'il couvre notamment les décisions réalisées en contexte social,

en permettant à l'individu de décider des théories de l'esprit de ses pairs et, en conséquence, de décider de la conduite qu'il a le plus avantageusement intérêt à adopter en retour. Ils permettent également de rendre compte, selon Damasio (1994), des sacrifices que certains individus parviennent à réaliser lorsque la perspective de gratification à plus long terme est associée à un marqueur somatique positif. L'hypothèse des marqueurs somatiques rendrait ainsi compte de la manière dont un individu peut ou non privilégier des buts à long terme relativement à des buts à court terme.

1.2.2. Un principe explicatif essentiellement neuronal

La question qui nous semble se poser de manière assez cruciale à l'issue de cette présentation générale de la théorie est celle de l'origine des marqueurs somatiques. Si, comme l'explique Damasio, ces sensations corporelles naissent par association avec la représentation des conséquences futures d'une décision, il reste à rendre compte du mécanisme et de la genèse de cette association.

En guise de présupposé, Damasio (1994) commence par expliquer, de manière assez caricaturale de notre point de vue, que la genèse d'un marqueur somatique adaptatif « *nécessite que le cerveau et la culture soient normaux* » (p. 177). La première de ces qualités fait particulièrement défaut chez les psychopathes, qui commettent des crimes sans ressentir la moindre émotion, du fait d'un fonctionnement neuronal anormal apparu « *tôt dans le développement* » (p. 178). On retrouve ce dysfonctionnement émotionnel à un moindre degré dans différentes populations cliniques, et notamment chez certains patients porteurs de lésions cérébrales acquises (Damasio parle de « *sociopathie acquise* » pour les désigner), un résultat sur lequel nous aurons à revenir puisqu'ils constituent l'un des fondements de l'hypothèse des marqueurs somatiques et de son application à la prise de décision sous incertitude. Quant à la deuxième de ces deux qualités, la normalité de la culture, Damasio illustre son absence par plusieurs exemples, comme l'Allemagne nazie, l'Union Soviétique entre 1930 et 1950, la révolution culturelle chinoise, ou encore le régime de Pol Pot au Cambodge.

Lorsque ces présupposés ne font pas défauts, il est alors possible d'examiner la manière dont se construisent normalement les marqueurs somatiques, c'est-à-dire d'ouvrir la boîte noire du comportementalisme en étudiant le mécanisme conduisant à la genèse de l'association entre la représentation des conséquences futures d'une décision et la production d'une sensation corporelle. Le niveau d'analyse choisi par Damasio pour rendre compte de cette association est essentiellement neurologique. S'il peut être intéressant d'en présenter les

caractéristiques principales, comme nous le ferons ci-dessous, l'explication fournie demeurera assez absconse avec le regard psychologique et peu formé aux explications matérialistes qui est le nôtre dans ce travail. Le seul point de vue psychologique nous permettra de retenir que cette association « est guidée par l'expérience » (p. 180), sous le contrôle d'un système interne (neuronal) et sous l'influence d'un ensemble de circonstances externes qui comprend des objets physiques, des événements de vie, des conventions sociales, et des règles éthiques. Concernant par exemple l'évitement des options désavantageuses, Damasio (1994, p. 180) résume le phénomène en les termes suivants :

« When the choice of option X, which leads to bad outcome Y, is followed by punishment and thus painful body states, the somatic marker system acquires the hidden, dispositional representation of this experience-driven, noninherited, arbitrary connection. Reexposure of the organism to option X, or thoughts about outcome Y, will now have the power to reenact the painful body state and thus serve as an automated reminder of bad consequences to come ».

Il nous semble que cette description est assez peu différente de celle d'un apprentissage par conditionnement, et que ce qui différencie fondamentalement l'approche de Damasio de celle des comportementalistes n'est pas à chercher au niveau psychologique, mais au niveau neurologique.

Du point de vue neurologique, Damasio (1994) affirme que la zone cérébrale principalement responsable du processus associatif permettant l'apparition des marqueurs somatiques est le cortex préfrontal. Cette zone cérébrale, qui constitue la partie antérieure de notre cerveau et dont la taille importante est spécifique de l'humain, est également celle qui fut en partie détruite chez le fameux patient Phineas Gage au milieu de XIX^{ème} siècle (Damasio, Grabowski, Frank, Galaburda, & Damasio, 1994). Elle présente la particularité d'être connectée à la plupart des autres zones cérébrales, et notamment les aires sensibles ainsi que les principales glandes endocrines. Lorsqu'un individu choisit d'agir d'une certaine manière afin de s'adapter à une situation nouvelle, le cortex préfrontal reçoit ainsi des informations relatives aux conséquences de ce choix, qui concernent aussi bien le monde extérieur à l'organisme que son état interne, et qui apparaissant de manière contingente et spécifique à la rencontre entre l'individu et la situation. Lorsqu'il parvient au cortex préfrontal, cet ensemble complexe d'informations va activer un réseau neuronal qui, par le fait même de cette activation, permettrait l'émergence d'une représentation des conséquences de sa décision par l'individu. Dans un second temps, en réponse à l'émergence de cette

représentation, le cortex préfrontal envoie un signal aux aires motrices ainsi que dans différentes glandes endocrines, ce qui débouche sur l'expérience d'une émotion, plaisante ou non, et incarnée dans le corps. Par la suite, lorsque l'expérience de l'individu le confrontera une nouvelle fois à cette situation, l'évocation des conséquences de la décision prise par le passé activera à nouveau la représentation « située » dans le cortex préfrontal, et l'individu ressentira par anticipation l'émotion passée, celle-ci l'incitant alors à renouveler son choix, ou au contraire à l'éviter.

En résumé, l'hypothèse des marqueurs somatiques se propose de rendre compte de la genèse d'une association, qui s'effectue entre la manière dont un individu décide d'agir, les conséquences de cette décision, et l'émotion qu'il ressent. Le cœur de cet apprentissage se situe davantage au niveau neurologique qu'au niveau psychologique, et procède d'un circuit neuronal dont l'activation d'abord contingente tend, via l'action de mécanismes bio-chimiques, à se reproduire ultérieurement de manière plus systématique.

1.3. L'apparition de la tâche du casino dans le champ de la psychologie

Bechara sera recruté par Damasio dans le cadre d'un contrat postdoctoral à l'université de l'Iowa. C'est dans une revue de psychologie (*Cognition*) qu'ils publieront, en 1994, leur article princeps intitulé *Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex* (parmi les auteurs de cet article figurent également Hanna Damasio, l'épouse d'Antonio Damasio, et Steven Anderson, tous deux neurologues). L'Iowa Gambling Task (IGT) introduite pour la première fois dans cet article, et qui sera abordée à de nombreuses reprises dans la suite de ce document, présente les caractéristiques suivantes.

Le participant (ou joueur) est assis devant quatre paquets de cartes de taille et d'apparence similaire, et on lui offre 2000\$ d'argent fictif (billets falsifiés). On lui explique que le jeu consiste en une longue séquence de sélections de cartes, piochées une à une dans les paquets de son choix, jusqu'à ce qu'on lui demande de s'interrompre. Après avoir retourné *chacune* des cartes, le participant reçoit une somme d'argent dont le montant est précisé sur le dos de la carte, et varie d'un paquet à l'autre. Après avoir retourné *certaines* cartes, le joueur reçoit également de l'argent, mais on lui demande en supplément de payer une pénalité. Le montant de cette pénalité, révélé une fois la carte retournée, varie selon les paquets mais également selon la position de la carte au sein du paquet considéré, selon une séquence déterminée à l'avance et inconnue par le participant. On lui précise que 1) le but du jeu est de tenter de gagner le plus d'argent possible, 2) il peut changer de paquet autant de fois qu'il le

souhaite. En revanche, il ne connaît pas le nombre total de sélections qu'il devra effectuer, qui est de 100. Deux paquets de cartes parmi les quatre présentés au participant, que nous appellerons les paquets A et B, permettent de gagner 100\$ lors de chaque sélection d'une carte. Dans les deux autres paquets, C et D, ce gain est de 50\$. Ces valeurs de gain ne sont toutefois pas révélatrices des intérêts respectifs des deux paquets puisque les montants des pénalités sont plutôt élevés dans les paquets présentant un gain élevé (A et B), et plutôt faibles dans les paquets présentant un gain faible (C et D). Par exemple, après avoir retourné 10 cartes dans le paquet A, le joueur a gagné 1000\$, mais il a également reçu 5 pénalités d'un montant de 250\$, soit 1250\$, ce qui porte son bilan à une perte de 250\$. Le même scénario se déroule si le participant pioche 10 cartes dans le paquet B, à la seule différence qu'il ne recevra qu'une seule pénalité, d'un montant de 1250\$ (le bilan est donc le même qu'avec le paquet A). Concernant les paquets C et D, la sélection de 10 cartes aboutit à un gain de 500\$, auquel s'ajoutent 250\$ de pénalités (5 fois 50\$ avec le paquet C et une fois 250\$ avec le paquet D), soit un bilan correspondant à un gain de 250\$. En résumé, les paquets A et B présentent la même espérance de gain, qui est négative. La différence entre ces deux paquets est que la fréquence des pénalités est plus élevée dans le paquet A, mais les montants de ces pénalités y sont également plus faibles. Les paquets C et D présentent également la même espérance de gain, mais celle-ci est cette fois positive. La différence entre ces deux paquets est que la fréquence des pénalités est plus élevée dans le paquet C, mais les montants de ces pénalités y sont également plus faibles. Du fait de ces caractéristiques, les paquets A et B seront appelés les paquets « désavantageux », et les paquets C et D les paquets « avantageux ».

En début de passation, l'incertitude du joueur quant au caractère plus ou moins avantageux des différents paquets est totale. Son objectif consistera ainsi, consciemment ou non, à réduire cette incertitude sur la base de son expérience au cours des différents essais. Cet apprentissage s'effectue nécessairement de manière progressive puisque le participant ne connaît pas les caractéristiques générales des différents paquets, et doit donc les inférer au fur et à mesure qu'il fait l'expérience des conséquences aléatoires de ses décisions. Si un joueur pioche davantage dans les paquets désavantageux, on peut considérer qu'il se focalise sur l'obtention de gains immédiats importants, et néglige les pertes sur le long terme. À l'inverse, l'individu qui pioche davantage dans le paquet avantageux se satisfait de gains plus modestes à court terme et privilégie la perspective d'un gain sur le long terme. Il existe plusieurs manières de quantifier la performance à cette épreuve, ce sur quoi nous reviendrons à

plusieurs reprises dans ce document. La plus simple d'entre elles correspond au nombre de sélections dans les paquets avantageux au cours des 100 essais que comporte la passation.

Cette version de l'IGT, qui est la plus classiquement employée mais dont nous découvrirons quelques variantes dans la suite de ce travail, a été utilisée pour la première fois auprès d'une population de patients présentant des lésions du cortex préfrontal (Bechara et al., 1994). Le fonctionnement prototypique de ces patients est présenté comme celui d'un sujet qui prend des décisions sources de conséquences négatives, « *contre son meilleur intérêt* », tout en étant « *incapable d'apprendre de ses erreurs* » (p. 7), et ceci malgré un fonctionnement intellectuel tout à fait normal. En d'autres termes, un fonctionnement « anormal » est supposé en situation naturelle de vie, mais les auteurs ne sont pas parvenus à le mettre en évidence en utilisant des tests d'intelligence de laboratoire. L'IGT sera ainsi conçue pour étayer empiriquement cette supposition, en vertu de sa forte validité écologique. Celle-ci proviendrait du fait que, comme dans le quotidien de l'individu, les décisions effectuées à l'IGT sont soumises à une forte incertitude quant aux conséquences qu'elles risquent d'engendrer. Ainsi cette volonté de s'intéresser non pas à la prise de décision en général, mais à la prise de décision sous incertitude, répond initialement à un besoin de validité écologique de la part des chercheurs. L'IGT est une épreuve qui a été conçue afin d'objectiver une intuition des auteurs, celle du caractère inadapté de la conduite quotidienne de certains individus, intuition qui, malgré plusieurs tentatives, n'avait jusqu'alors pas pu être étayée empiriquement à partir de tâches de laboratoire.

Les résultats obtenus par Bechara et al. (1994) leur permettront d'atteindre cet objectif. La comparaison des performances à l'IGT de 44 sujets contrôle et de 7 patients présentant des lésions du cortex préfrontal montre en effet que ceux-ci sont plus enclins à sélectionner des cartes dans les paquets désavantageux. Plus précisément, environ 70% des décisions effectuées dans le groupe contrôle sont orientées en direction de l'un des deux paquets avantageux, contre 40% dans le groupe de patients. L'IGT constitue ainsi pour Damasio (1994, p. 214) « *la première tâche de laboratoire ayant permis de mesurer un déficit dans la prise de décision telle qu'elle a lieu dans la vie réelle (« real-life choices ») du patient* ». Pour désigner ce déficit, qui se caractérise par une insensibilité aux conséquences futures des décisions effectuées et à une focalisation exclusive sur leurs conséquences immédiates, les auteurs proposeront le terme de « *myopie pour le futur* » (Bechara et al., 1994, p. 14).

On peut souligner la manière dont ce premier travail s'inscrit dans la continuité logique des préoccupations antérieures de Bechara et de Damasio, ce qui pourra nous aider à mieux saisir les interprétations proposées plus récemment dans la littérature.

Premièrement, la myopie pour le futur que Bechara et al. (1994) mettent en évidence rappelle fortement le fonctionnement du sujet toxicomane, dont nous avons vu qu'il a été étudié pendant plus de dix ans par Bechara, à partir du modèle animal. Quelques années plus tard, Bechara présentera précisément la toxicomanie comme une tendance à la prise de risque sans prise en compte des conséquences futures (e.g., Bechara & Martin, 2004). Il nous semble donc assez probable que l'intérêt préalable de Bechara pour la toxicomanie ne soit pas indépendant de la manière dont il a construit l'IGT. La conjugaison de gains et de pertes dont le sujet fait l'expérience en piochant dans les paquets désavantageux rappelle également les effets paradoxaux de l'effet de la drogue, source à la fois d'attrait et d'aversion, que les travaux réalisés par Bechara avaient mis en évidence chez le rat. Nous remarquons par ailleurs que la manière dont l'IGT opérationnalise, à partir du modèle initial de la toxicomanie, une dichotomie entre l'avantageux et le désavantageux, c'est-à-dire entre un « bon » et un « mauvais » choix pour l'individu (les termes de « bon paquet » et de « mauvais paquet » sont très souvent employés dans la littérature, et notamment dans les publications de Bechara et Damasio), sera rapidement transposée au niveau d'une autre distinction : celle du normal et du pathologique. Nous verrons en effet que l'IGT a été utilisée pour tenter de caractériser les dysfonctionnements propres à de nombreux troubles psychiatriques qui, comme pour la toxicomanie, suggèrent à l'observateur que l'individu effectue un choix qui lui sera préjudiciable à long terme.

Deuxièmement, cette première étude rejoint à la fois les conceptions de Bechara et celles de Damasio en faisant d'une particularité neurologique la cause des déficits observés. Les lésions que présentent les patients se situent de plus au niveau du cortex préfrontal, ce qui va tout à fait dans le sens de l'hypothèse des marqueurs somatiques. Mais, pour que la démonstration soit complète et s'intègre dans le cadre théorique de Damasio, il reste encore à mettre en évidence ce qui contribuera grandement au succès de l'hypothèse des marqueurs somatiques dans le champ de la psychologie : le rôle des émotions dans la résolution de l'IGT.

1.4. Tâche du casino et marqueurs somatiques

L'article auquel il est sans doute fait le plus souvent référence dans le domaine de la prise de décision sous incertitude est celui publié par Bechara, Damasio, Tranel et Damasio (1997) dans la revue Science. L'échantillon rencontré dans cette étude comprend 10 sujets contrôle et 6 sujets présentant des lésions du cortex préfrontal ventromédian (CPFVM), qui ont résolu l'IGT selon la procédure décrite ci-dessus. En complément à la performance globale obtenue par les participants à l'épreuve, les auteurs décident de mesurer leur activité électrodermale tout au long de la passation. L'activité électrodermale est une mesure de la conductance de la peau, et varie donc corrélativement au degré de sudation. De nombreux auteurs admettent que la mesure de l'activité électrodermale d'un individu permet de quantifier son état d'éveil (degré d'activation du système nerveux sympathique). Sachant qu'une augmentation de l'état d'éveil peut avoir pour cause l'apparition d'une émotion, et bien que d'autres causes comme l'attention puissent être évoquées, plusieurs auteurs considèrent que l'activité électrodermale est une mesure valide de l'intensité des émotions ressenties par l'individu (pour une discussion sur le sujet, voir Boucsein, 2012). Bechara et al. (1997) s'attendent à ce que cette activité électrodermale soit moins importante chez les patients, ce qui révélerait leur incapacité à développer les marqueurs somatiques leur permettant d'éviter les paquets désavantageux. En complément à la mesure de l'activité électrodermale, les auteurs recueillent les verbalisations des sujets, aux essais 20, 30, 40, ..., 100, en réponse aux questions suivantes : « *dites-moi tout ce que vous savez sur ce qui se passe dans ce jeu* » et « *dites-moi comment vous vous sentez en jouant à ce jeu* ».

Les verbalisations de chaque sujet sont utilisées par les auteurs pour distinguer 4 phases durant la passation (voir figure 3).

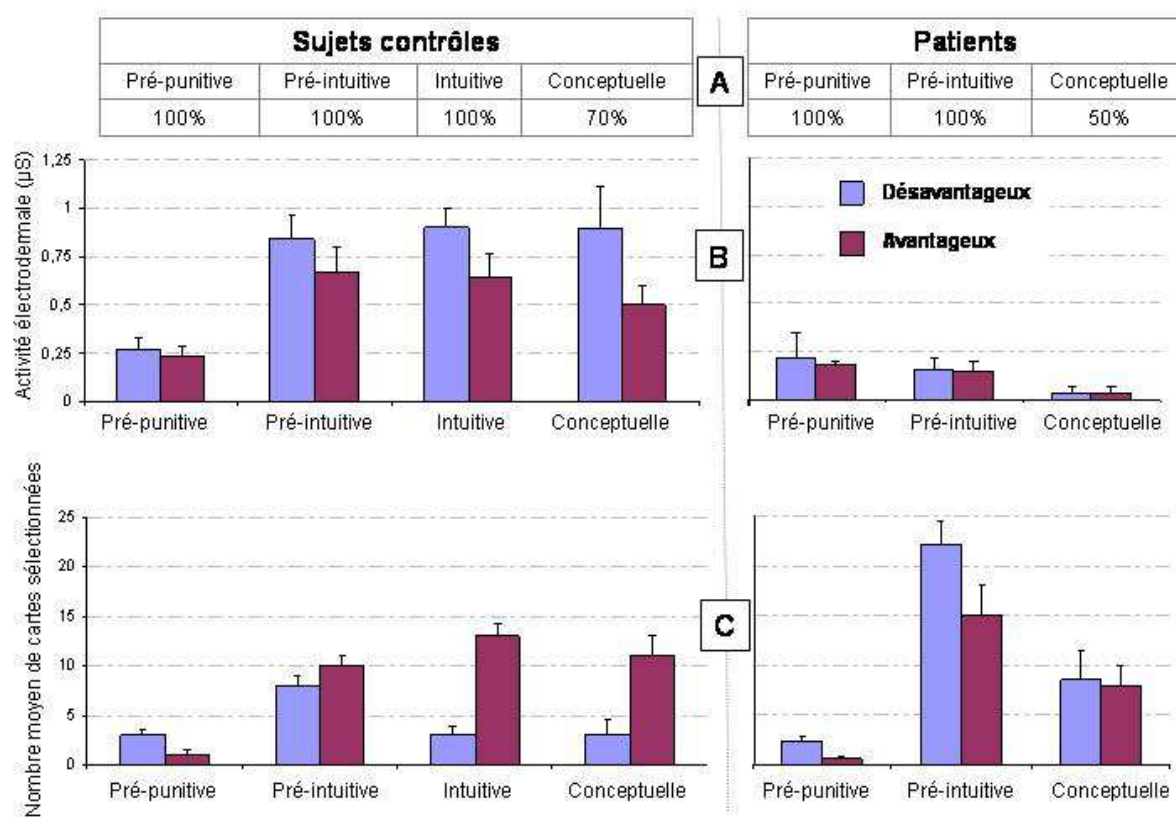


Figure 3. Résultats obtenus par Bechara et al. (1997) auprès de patients présentant des lésions du CPFVM et des sujets contrôle durant chacune des phases de la résolution de l'IGT. A) Pourcentage de sujets ayant atteint chacune des quatre phases. B) Activité électrodermale des participants dans chacune des quatre phases et pour chacun des types de paquets (avantageux ou désavantageux). C) Nombre de cartes sélectionnées dans les paquets avantageux et désavantageux pour chacune des quatre phases de la passation.

La phase pré-punitive s'écoule du début de la passation jusqu'à l'obtention des premières pénalités par l'individu. Elle se caractérise par une préférence pour les paquets désavantageux, une absence d'activité électrodermale, et se termine aux alentours du 10^{ème} essai.

La deuxième phase, appelée phase pré-intuitive, s'écoule de l'essai 10 à l'essai 50 chez les sujets contrôle, et jusqu'à l'essai 80 chez les patients. Durant cette phase, tous les participants affirment ne pas comprendre le principe général du jeu. Les patients développent une préférence pour le paquet désavantageux, tandis que les sujets contrôle piochent tout autant dans les deux types de paquets. On remarque chez les sujets contrôle l'apparition d'une activité électrodermale pendant la période qui précède la sélection des cartes, et qui ne diffère

pas significativement selon le type de paquet (voir figure 3). Cette augmentation de l'activité électrodermale est en revanche absente chez les patients.

A partir de l'essai 50 commence la phase dite intuitive chez les sujets contrôle, qui commencent à exprimer une intuition selon laquelle les paquets A et B sont plus risqués que les paquets C et D. Leur activité électrodermale anticipatrice se maintient (bien que la figure 3 suggère que cette activité est plus élevée avec le paquet désavantageux qu'avec le paquet avantageux, cette différence n'est pas significative). Parallèlement, les sujets contrôle développent une préférence pour le paquet avantageux. De manière notable, cette phase intuitive est absente chez les patients, qui se maintiennent dans la phase pré-intuitive.

Enfin, à partir de l'essai 80 environ et jusqu'à la fin de la passation, 7 sujets contrôle atteignent une phase dite conceptuelle, durant laquelle ils sont capable d'expliquer pourquoi les paquets A et B sont désavantageux sur le long terme. Leur activité électrodermale anticipatrice se maintient (à nouveau, la différence entre le niveau d'activité électrodermale ne varie pas significativement entre les deux paquets), et leurs décisions continuent de s'orienter majoritairement vers les paquets avantageux. Cette phase conceptuelle sera atteinte par 3 patients (ceux-ci passent donc directement de la phase pré-intuitive à la phase conceptuelle) qui, de manière étonnante, ne développent pas pour autant de préférence pour le paquet avantageux (pas de différence significative dans la tendance à sélectionner dans les deux paquets). Chez ces patients, l'absence d'augmentation de l'activité électrodermale demeure.

L'ensemble de ces résultats confirme tout d'abord le fait que les patients atteints de lésions du cortex préfrontal ventromédian obtiennent des performances moyennes plus faibles que le reste de la population. Néanmoins, si Bechara et al. (1997) insistent à plusieurs reprises sur le fait que ces patients présentent une forte tendance à piocher dans le paquet désavantageux, nous remarquons qu'ils ne le font pas nécessairement plus que dans le paquet avantageux, tout particulièrement en fin de passation. Il nous semble donc difficile d'exclure totalement la possibilité qu'ils aient répondu au hasard. Concernant la significativité des différents effets constatés, on pourrait regretter les effectifs très faibles de cette étude (10 sujets contrôle et 6 patients) qui, de notre point de vue, rendent peu pertinent le choix de l'ANOVA par les auteurs, en particulier lorsqu'ils évaluent l'effet conjugué de trois variables indépendantes (groupe, période de la passation et type de paquet).

Il n'en reste pas moins que cette étude met en évidence un résultat tout à fait central concernant la question du rôle des émotions à l'IGT, et qui constitue un argument majeur en faveur de l'hypothèse des marqueurs somatiques : l'apparition d'une activité électrodermale

anticipatrice chez les sujets contrôle, mais pas chez les patients. En cohérence avec la théorie de Damasio, on peut supposer que les sujets contrôle manifestent une réaction émotionnelle lorsqu'ils font l'expérience des conséquences de leurs décisions en début de passation. L'activation d'un circuit neuronal spécifique, situé dans le CPFVM, permettrait qu'une association s'établisse, de manière non consciente, entre cette émotion d'une part et, d'autre part, la décision effectuée ainsi que les conséquences qui l'accompagnent. Par la suite, et du fait de cette association, la simple présentation d'un des paquets de cartes, ou la simple évocation des conséquences que la sélection de ce paquet peut entraîner, suffirait à déclencher par anticipation l'émotion ressentie auparavant, désormais appelée marqueur somatique. Si ce marqueur somatique correspond à une émotion agréable, il inciterait le sujet à sélectionner le paquet ; s'il correspond à une émotion désagréable, il l'inciterait au contraire à considérer une autre option. Le caractère implicite de cet apprentissage expliquerait le fait que les sujets contrôle commencent à développer intuitivement une préférence pour les paquets avantageux avant même de comprendre pourquoi ces paquets sont avantageux. En parallèle à cet apprentissage intuitif se mettrait en place une autre forme d'apprentissage, plus longue et plus coûteuse, qui consiste en un raisonnement logique appliqué aux informations pertinentes (gains et pertes dont l'individu fait l'expérience) et qui permettrait, en fin de passation, d'aboutir à une compréhension conceptuelle du principe général de l'épreuve. Chez les patients dont le CPFVM est détruit, les marqueurs somatiques ne pourraient pas être établis, ce qui expliquerait leur absence d'activité électrodermale par anticipation des conséquences de leurs décisions. Seul le raisonnement logique, long et fastidieux, serait accessible à trois d'entre eux. Ceux-ci parviendraient ainsi, comme les sujets contrôle à comprendre le principe général de la tâche mais, faute d'incitation émotionnelle, ne piocheraient pas pour autant davantage dans les paquets avantageux.

1.5. Rôle des émotions à la tâche du casino : les travaux ultérieurs

L'introduction de l'hypothèse des marqueurs somatiques dans le champ de la prise de décision sous incertitude (Bechara & Damasio, 2005; Bechara, Damasio & Damasio, 2000; Bechara et al., 1994; Bechara et al., 1997) a eu un retentissement relativement important. L'un des points essentiels de cette théorie, à savoir le rôle central du CPFVM lors de la résolution de l'IGT, a par la suite été confirmé par de nombreuses études portant sur des patients porteurs de lésions (Bechara, Damasio, Damasio, & Lee, 1999; Fellows & Farah, 2005; Manes et al., 2002) ou réalisées chez des sujets « normaux » à partir de techniques d'imagerie

cérébrale comme la tomographie par émission de positons (Ernst et al., 2002), ou l'IRM fonctionnel (Frangou, Kington, Raymont, & Shergill, 2008; Lawrence, Jollant, O'Daly, Zelaya, Phillips, 2009; Northoff et al., 2006; Tanabe et al., 2007; Windmann et al., 2006). Toutes ces études s'inscrivent dans le champ de la neurologie, et on peut se demander comment la conclusion d'un rôle des émotions en prise de décision sous incertitude a pu être aussi largement exportée dans le champ de la psychologie. Cette dernière n'a de notre point de vue pas les moyens, au niveau d'analyse qui est le sien, de remettre en cause l'hypothèse des marqueurs somatiques, et donc de la soumettre à l'épreuve des faits.

Un premier élément de réponse nous semble tenir précisément à ce caractère infalsifiable de la théorie de Damasio au niveau d'analyse psychologique, qui entraîne une tendance assez récurrente dans la littérature : lorsque l'hypothèse du rôle d'un quelconque processus psychologique dans la résolution de l'IGT n'est pas confortée par les données, les auteurs se reposent fréquemment, par un choix qui semble effectué par défaut, sur l'hypothèse des marqueurs somatiques (on reconnaît ici une démarche qui consiste à valider une hypothèse nulle, puisqu'une absence d'effet est présentée comme confortant l'hypothèse des marqueurs somatiques). Comme nous le verrons dans la partie suivante, cette tendance est d'autant plus évidente que le processus dont on suppose initialement l'intervention est perçu comme opposé à un processus émotionnel, ou du moins comme très différent. Ainsi, il nous semble que la plupart des études *de psychologie* qui présentent des conclusions allant dans le sens de l'hypothèse des marqueurs somatiques le font essentiellement à titre de spéculations, et sans avoir pour autant évalué empiriquement la vraisemblance de cette théorie (e.g., Crone & van der Molen, 2004; Overman et al., 2004; Crone, Bunge, Latenstein, & van der Molen, 2005; Turnbull, Evans, Bunce, Carzolio, & O'Connor, 2005). Parmi ces travaux, certains s'appuient sur le constat d'une amélioration des performances à l'IGT au cours du développement de l'enfant pour tenter de justifier leurs spéculations, en soulignant la corrélation qui existe entre cette amélioration et la croissance anatomique du cortex préfrontal durant l'enfance (e.g., Crone et al., 2005). Ce type d'argument nous semble douteux dans la mesure où il permettrait de placer sous la dépendance du cortex préfrontal tous les processus psychologiques, pour le moins nombreux, dont l'efficacité augmente durant l'enfance.

L'introduction de l'hypothèse des marqueurs somatiques dans le champ de la psychologie nous semble également tenir à une deuxième raison, qui concerne l'analogie qui a régulièrement été proposée entre les conduites des patients porteurs de lésions du CPFVM et celles d'autres populations étudiées en psychologie. Cette analogie n'est, de notre point de

vue, pas toujours suffisamment justifiée. C'est notamment le cas des travaux qui, sur la base « *d'une similarité frappante entre les performances des jeunes enfants et celles des patients présentant des lésions du CPFVM* », en déduisent que, à l'appui de l'hypothèse des marqueurs somatiques, « *les changements développementaux en prise de décision sous incertitude sont associés à la lente maturation du cortex préfrontal* » (Crone & van der Molen, 2007, pp. 1297-1298; voir aussi Crone & van der Molen, 2004; Hooper, Luciana, Conklin, & Yarger, 2004). Un autre exemple de cette tendance à la généralisation est celui de la toxicomanie, dont nous avons vu qu'elle a d'abord été étudiée par Bechara chez le rat. Bechara et al. (2001) comparent les performances obtenues à l'IGT chez des sujets contrôle (n = 40), des patients toxicomanes (n = 41) et des patients présentant des lésions du CPFVM (n = 5). Les résultats montrent tout d'abord que le niveau de performance moyen à l'IGT est plus faible chez les patients toxicomanes et les patients fronto-lésés que chez les sujets contrôle. En dépit du faible effectif des patients fronto-lésés, les auteurs comparent la distribution de leurs performances à l'IGT, qu'ils supposent normale, à la distribution de ces mêmes scores chez les patients toxicomanes. Ils s'aperçoivent que 61% des patients toxicomanes obtiennent un score inférieur au meilleur score observé chez les patients porteurs de lésion, et en déduisent l'existence d'un recouvrement important entre les deux distributions. Leur conclusion est que le déficit observé chez la majorité des patients toxicomanes en prise de décision sous incertitude est comparable à celui observé chez les patients présentant des lésions du CPFVM et que, par conséquent, la présence d' « *un cortex préfrontal dysfonctionnel est un facteur qui contribue à la persistance des individus toxicomanes à consommer de la drogue malgré les conséquences négatives [de cette décision]* » (Bechara et al., 2001, p. 385). De même que chez l'enfant, il nous semble que l'observation de niveaux de performances similaires dans deux populations ne constitue pas un argument qui autorise à en déduire que les processus à l'origine de ces performances sont équivalents. Cette similarité de performance semble néanmoins suffire aux auteurs pour inférer, sur la base d'une théorie neurologique, les caractéristiques psychologiques des patients toxicomanes, à savoir leur insensibilité émotionnelle vis-à-vis des conséquences négatives de leur conduite addictive.

En résumé, si le rôle des émotions dans la résolution de la tâche du casino nous semble vraisemblable, sa mise à l'épreuve dans le champ de la psychologie n'a à notre connaissance pas encore été réalisée, ou du moins pas à partir de l'hypothèse des marqueurs somatiques, et ce malgré les nombreuses références dont cette hypothèse fait l'objet. Cette théorie apporte des éléments intéressants sur cette question, mais ne nous semble pas suffisante aux yeux du psychologue qui ne souhaite pas réduire son niveau d'analyse à celui de la biologie.

2. Rôle du contrôle cognitif sur la prise de décision : le point de vue cognitiviste

Dans cette partie, nous nous intéresserons à un ensemble de processus que l'on peut résumer par le terme de contrôle cognitif, ou de fonctions exécutives, et examinerons l'hypothèse de leur rôle durant la résolution de la tâche du casino. Ces processus, que l'on résume parfois par le terme de cognition « froide » au sens où ils impliquent un raisonnement abstrait n'impliquant pas de réaction émotionnelle, sont souvent considérés comme opposés, ou au contraire comme complémentaires, aux processus émotionnels que nous avons abordés dans la partie précédente (le terme de cognition « chaude » est souvent employé pour désigner l'intervention des fonctions exécutives dans un contexte faisant intervenir les émotions).

Si nous avons vu que l'hypothèse des marqueurs somatiques était fondée empiriquement sur une base neurobiologique (l'activation d'un marqueur somatique se manifeste aux yeux du chercheur par une activation neuronale et une réponse physiologique associée), les fonctions exécutives, bien qu'également « localisées » d'un point de vue neurologique et historiquement associées au champ de la neurologie, peuvent être fonctionnellement appréhendées du point de vue du psychologue et, de plus, s'opérationnalisent par des épreuves dont le niveau d'analyse est celui de la conduite.

2.1. Contrôle cognitif et fonctions exécutives

2.1.1. Travaux chez l'adulte

Les concepts de fonctions exécutives et de contrôle cognitif, fortement rattachés l'un à l'autre, ont connu un intérêt grandissant de la part des psychologues ces 30 dernières années. Leur définition reste néanmoins très peu consensuelle, ce qui leur confère un statut épistémologique assez flou. Nous tâcherons dans cette partie de dégager les caractéristiques relativement admises de ces processus, tout en repérant les principales zones d'ombre.

De manière générale, les fonctions exécutives se présentent comme un ensemble de processus dits « de haut niveau », qui permettent à l'individu de s'adapter à des situations nouvelles et complexes, dans lesquelles la mise en place de simples routines sur-apprises, ou de processus automatiques, est insuffisante. En d'autres termes, les fonctions exécutives interviennent dès lors qu'un certain *contrôle* de son activité par l'individu est nécessaire pour atteindre un objectif donné (contrôle cognitif et fonctions exécutives sont en ce sens des

termes quasi-interchangeables, le premier se rattachant davantage au champ de la psychologie cognitive et le deuxième au champ de la neuropsychologie).

On peut distinguer deux fondements historiques à l'apparition de la notion de fonctions exécutives (Godefroy, Jeannerod, Allain, & Le Gall, 2008). Le premier de ces fondements, auquel nous avons déjà fait allusion dans la partie précédente, concerne la volonté de rendre compte, à un niveau psychologique, des différents déficits présentés par les patients porteurs de lésions des aires frontales (nombreux après les deux guerres mondiales). Durant la première moitié du XX^{ème} siècle apparaissent plusieurs tentatives de classification de ces troubles, de nature essentiellement descriptive, s'appuyant sur la construction de tests psychométriques standardisés. Le deuxième fondement, qui dépasse largement le cadre de la pathologie frontale, concerne le besoin qu'ont ressenti certains psychologues, après avoir identifié un certain nombre de processus mobilisés par les individus, de rendre compte de la cohérence globale de la conduite.

L'intégration de ces deux préoccupations a été proposée par Luria (1966, 1973), qui identifie les lobes frontaux comme une zone fondamentale du cerveau, qui permettrait d'assurer le fonctionnement d'ensemble de l'activité intellectuelle via la planification de la conduite, l'évaluation des résultats de cette conduite en référence à un but, et l'inhibition des conduites non adaptées. Luria (1966) considère également que les corrélats anatomiques de ces différentes fonctions se situent dans des zones distinctes du cortex préfrontal, pressentant ainsi la nécessité d'une distinction de plusieurs fonctions exécutives liées les unes aux autres.

Quasiment à la même époque, Baddeley et Hitch (1974) développent une conception similaire dans laquelle la sélection et le maintien mnésique des informations pertinentes à l'atteinte d'un but sont placés sous la dépendance d'une structure de régulation de la conduite appelée l'« exécutif central ». Celui-ci permettrait :

- la focalisation d'une attention sélective sur les informations pertinentes à l'atteinte d'un but dans une situation donnée.
- l'intégration d'un nombre limité de ces informations via l'allocation de ressources à des systèmes de stockage correspondant à différents canaux de traitement de l'information.
- l'inhibition des informations non pertinentes à l'atteinte du but.
- la sélection consécutive d'une stratégie planifiée dans le temps.
- le changement de stratégie, ou flexibilité (*shifting*).

Cet ensemble de fonctions constitue l'une des manières dont il est possible de concevoir les fonctions exécutives. La principale critique qui sera adressée à ce modèle est celle du caractère trop unitaire de l'exécutif central et de l'absence de prise en compte des relations que ces différentes fonctions entretiennent (Zelazo & Muller, 2002).

Un troisième modèle de référence, que Baddeley (1986) mobilise afin de préciser le fonctionnement de l'exécutif central, est celui proposé par Norman et Shallice (1986). Ce modèle s'appuie sur la distinction qui peut être faite entre processus automatiques et processus contrôlés (Shiffrin & Schneider, 1977), et qui rejoint celle proposée auparavant par James (1890) entre les activités impliquant ou non la volonté, la conscience. L'idée principale est que de nombreuses situations n'autoriseraient pas la seule mobilisation de processus automatiques pour permettre l'adaptation du sujet, en particulier lorsque ces situations nécessitent une planification de l'action, une prise de décision, la résolution d'un problème, la mise en place d'une activité nouvelle, ou encore l'évitement d'un danger ou d'une difficulté technique. L'individu doit alors mettre en place des processus « contrôlés », au sens où ces processus sont soumis à l'intervention d'un « système attentionnel superviseur », dont le rôle consiste pour l'essentiel à rendre plus probable la sélection des schémas d'action qui sont pertinents dans la situation considérée, et à inhiber ceux qui ne le sont pas. En cohérence avec les modèles du contrôle cognitif cités ci-dessus, l'intervention du système attentionnel superviseur est supposée être due à l'activation du cortex préfrontal (Shallice, 2002).

Parmi les trois modèles que nous venons de présenter, deux d'entre eux font l'hypothèse d'une structure globale de contrôle cognitif (Baddeley & Hitch, 1974; Norman & Shallice, 1986) tandis que Luria (1966, 1973) insiste plutôt sur l'existence d'une pluralité de fonctions exécutives. A partir des années 80 et jusqu'à aujourd'hui, un débat va ainsi se mettre en place autour de la question du caractère unitaire, ou bien pluriel, de la notion de contrôle cognitif (Jurado & Rosselli, 2007). Duncan, Emslie, Williams, Johnson, & Freer (1996) considèrent par exemple que les patients présentant des lésions du lobe frontal ont en commun le fait de négliger le but et les exigences des tâches qui leur sont proposées, un aspect qu'il relie étroitement au facteur général proposé par Spearman (1904). A l'inverse, l'observation de patients présentant un profil similaire suggère à Godefroy, Cabaret, Petit-Chenal, Pruvo et Rousseaux (1999) que le niveau de performance de ces patients varie intra-individuellement selon les épreuves utilisées. Ils en concluent que les fonctions de contrôle sont par nature séparables et défendent l'intérêt d'une approche modulaire.

Une approche se proposant de dépasser cette opposition va progressivement faire son apparition avant de devenir majoritaire. Zelazo, Carter, Reznick et Frye (1997) considèrent par exemple que le fonctionnement exécutif est assuré par une macrostructure qui permet de s'adapter à toute situation de résolution de problème. Cette macrostructure émerge du fonctionnement de quatre sous-structures, qui constituent des fonctions exécutives distinctes et présentent la particularité d'être ordonnées temporellement : représentation du problème, planification, exécution et évaluation. Ce lien temporel entre les fonctions exécutives illustre l'approche intégrative des auteurs, qui les rapproche de l'hypothèse de l'existence de plusieurs systèmes fonctionnels intégrés proposée par Luria (1966). Cette approche s'oppose à une vision modulaire du fonctionnement exécutif et, corrélativement, à une vision très localisée des différentes fonctions exécutives dans le cerveau. Elle invite en conséquence à nuancer le rôle prépondérant du cortex préfrontal et suggère une conception plus « distribuée » de la notion de fonctionnement exécutif au niveau cérébral. Si cette position reste controversée, Alvarez et Emory (2006) font en effet remarquer que plusieurs travaux ont montré que certains patients porteurs de lésions frontales ne présentaient pas de déficits des fonctions exécutives (e.g., Vilkkii, Ahola, Holst, Öhman, Servo, & Heiskanen, 1994; Shallice & Burgess, 1991) et, réciproquement, que des patients porteurs de lésions non frontales pouvaient présenter de tels déficits (Anderson, Damasio, Jones, & Tranel, 1991; Heaton, 1981). De manière plus modérée, Godefroy et al. (2008, p. 123) considèrent que *« la notion de système de contrôle unique a été contestée par des travaux issus de l'imagerie fonctionnelle, de l'enregistrement neuronal chez l'animal éveillé et de la pathologie humaine, qui montrent que les opérations de contrôle cognitif dépendent certes de façon prédominante des régions frontales, mais que selon la nature de l'opération, ou la nature de l'information à manipuler, les secteurs des structures préfrontales impliquées diffèrent »*.

Une autre manière de dépasser l'opposition entre le caractère unitaire et pluriel du fonctionnement exécutif a consisté à recueillir les performances de sujets à un ensemble varié d'épreuves impliquant un certain degré de contrôle cognitif, et à modéliser ces performances à partir de l'analyse factorielle hiérarchique. Si cette approche ne permet pas de décrire le fonctionnement exécutif, et notamment les relations fonctionnelles entre les différentes fonctions exécutives, avec autant de finesse que certains des travaux cités ci-dessus, elle apporte néanmoins une contribution plus étayée sur le plan expérimental, et permet de questionner la validité et l'homogénéité des nombreuses épreuves utilisées pour mesurer le fonctionnement exécutif. Elle s'inscrit de plus fondamentalement dans une approche différentielle.

Parmi les modèles factoriels des fonctions exécutives, le modèle qui est sans doute le plus cité est celui proposé par Miyake, Friedman, Emerson, Witzki et Howerter (2000, voir aussi Miyake & Friedman, 2012). Les auteurs s'appuient sur les performances obtenues par 137 étudiants à une batterie comprenant trois épreuves de flexibilité (tâche plus/moins, tâche lettre/chiffre, tâche local/global) trois tâches de mise à jour en mémoire de travail (« *keep-track* », « *tone monitoring* », et mémorisation de lettres), et trois tâches d'inhibition (anti-saccade, stop signal, stroop). Comme attendu, l'analyse factorielle confirmatoire des corrélations entre les performances à ces différentes épreuves permet aux auteurs de retrouver les trois facteurs communs supposés, qu'ils interprètent respectivement comme mesurant trois fonctions exécutives : la flexibilité, la mise à jour en mémoire de travail, et l'inhibition (voir figure 4). On remarque également que ces trois fonctions exécutives sont modestement corrélées, ce qui incite les auteurs à conclure au caractère à la fois unitaire et pluriel du concept de fonctions exécutives (« *unity/diversity framework* »). Le caractère unitaire, qui n'est pas particulièrement mis en évidence dans le modèle représenté sur la figure 4, a été plus récemment renforcé dans une étude réalisée par cette même équipe (Friedman, Miyake, Young, DeFries, Corley, & Hewitt, 2008), dans laquelle les auteurs font l'hypothèse d'un facteur général des fonctions exécutives. A partir des données obtenues auprès d'un vaste échantillon d'individus jumeaux, ils concluent au caractère fortement héréditaire de ce facteur général des fonctions exécutives, et à son déterminisme essentiellement génétique (une position très contestée, voir par exemple Lawson, Hook, Hackman, & Farah, 2016). Concernant les différentes épreuves utilisées, qui figurent pour la plupart au sein des batteries classiques des fonctions exécutives, les résultats montrent que chacune d'entre elles se caractérise par une variance résiduelle importante, ce qui souligne, si besoin en était, que ces épreuves ne sont pas « purement » exécutives et impliquent également l'intervention de processus de « bas niveau ».

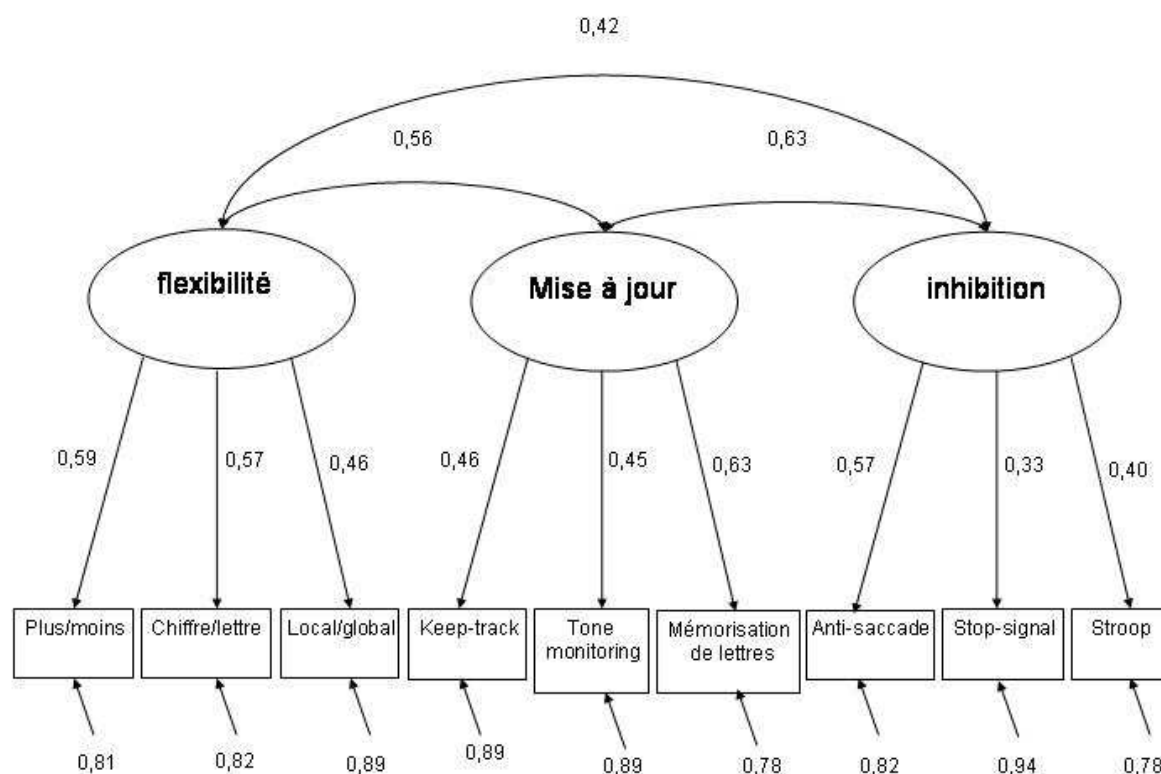


Figure 4. Modèle factoriel obtenu par Miyake et al. (2000, 2012).

La démarche factorielle confirmatoire a été appliquée à la question de la dimensionnalité des fonctions exécutives par de nombreux autres auteurs (e.g., de Frias, Dixon, & Strauss, 2006; Hedden & Yoon, 2006; Hull, Martin, Beier, Lane, & Hamilton, 2008; Salthouse, Atkinson, & Berish, 2003). La conclusion principale que l'on peut retenir de ces travaux est qu'ils ne font pas consensus, en particulier en ce qui concerne le nombre et l'interprétation des facteurs obtenus. Si la diversité des tâches utilisées explique sans doute en grande partie ce phénomène, celui-ci montre plus fondamentalement que le concept de fonctions exécutives demeure un concept qui, s'il semble se justifier sur les plans théorique et clinique, est encore assez flou d'un point de vue opérationnel.

Salthouse (2005) a cherché à réduire cette confusion dans une approche structurale qui intègre également d'autres mesures correspondant à des dimensions classiques de l'intelligence: raisonnement, vitesse de traitement de l'information, vocabulaire, mémoire épisodique, visualisation spatiale. Son objectif est notamment de questionner la validité du concept de fonctions exécutives, mais aussi sa nouveauté par rapport à d'autres notions plus

anciennes. La démarche employée consiste à estimer un modèle factoriel confirmatoire à cinq facteurs. Ces facteurs correspondent aux cinq dimensions de l'intelligence que nous venons de citer, et chacun d'eux est mesuré par trois indicateurs (quatre indicateurs pour le vocabulaire). A ce modèle de mesure s'ajoute également un modèle structural dans lequel une variable « cible » est régressée sur chacun des cinq facteurs. Cette variable cible correspond à une mesure du fonctionnement exécutif, que l'auteur fait varier au cours d'une série d'estimations du modèle. Les performances des sujets à plus d'une vingtaine de tâches exécutives vont ainsi constituer à tour de rôle la variable cible. Parmi ces épreuves, on trouve de nombreuses tâches classiques comme le test de tri de cartes du Wisconsin, le *Trail Making Test*, plusieurs épreuves de fluence, une tâche de *n-back*, une tâche de *keep-track*, le test de Stroop,..., etc. Les résultats montrent que les scores factoriels associés aux dimensions de raisonnement d'une part, et de vitesse de traitement d'autre part, permettent de rendre compte de manière significative des performances des sujets à plusieurs de ces épreuves exécutives. Plus précisément, le raisonnement est associé à la performance aux tâches de mémoire de travail et à certaines tâches de flexibilité, tandis que la vitesse de traitement est associée à la performance aux tâches d'inhibition et à certaines tâches de flexibilité. La conclusion de Salthouse (2005, p. 542) est assez tranchée : *« les résultats de ces analyses suggèrent par conséquent que les épreuves couramment utilisées par les neuropsychologues pour évaluer le fonctionnement exécutif chez l'adulte ne représentent peut être pas de nouveaux aspects du fonctionnement. Elles apparaissent plutôt comme reflétant les dimensions différentielles évaluées par les tests cognitifs plus traditionnels, dont les propriétés psychométriques sont sans doute meilleures »* (pour une conclusion similaire, voir Obonsawin et al., 2002, ou Blair, 2006).

Dans une démarche visant à remettre en cause de telles conclusions, Friedman et al. (2006) mettent en relation les trois fonctions exécutives du modèle de Miyake et al. (2000; flexibilité, inhibition et mise à jour en mémoire de travail) avec les concepts d'intelligence fluide et d'intelligence cristallisée tels qu'ils sont mesurés par l'échelle de Wechsler (1997). Les résultats témoignent d'une liaison très étroite entre d'une part, l'intelligence fluide et l'intelligence cristallisée et, d'autre part, la mémoire de travail. En revanche les construits de flexibilité et d'inhibition sont assez indépendants des deux formes d'intelligence. Les auteurs en concluent que les fonctions exécutives forment un construit distinct de celui d'intelligence, bien que lié sous certains aspects. La divergence de point de vue entre cette étude et celle présentée précédemment illustre à nouveau la confusion qui entoure la notion de fonction exécutive (pour une position intermédiaire, voir Burgess, Braver, & Gray, 2006).

2.1.2. Travaux chez l'enfant

L'étude des fonctions exécutives chez l'enfant a été initiée de manière plus tardive que chez l'adulte. On a longtemps considéré qu'elle présentait un faible intérêt du fait de l'immaturité du cortex préfrontal avant l'âge adulte (Fuster, 1993) et par conséquent l'incapacité supposée des enfants à contrôler leur activité cognitive. Cet argument a par la suite été largement remis en cause, et il est aujourd'hui admis que les fonctions exécutives, bien que d'apparition progressive, commencent à apparaître de manière relativement précoce (e.g., Case, 1992; Houdé, 1997; Smith, Kates & Vriezen, 1992).

Les premiers travaux consacrés à la question se sont largement inspirés de ceux déjà réalisés chez l'adulte, en proposant aux enfants les épreuves utilisées par les cliniciens auprès des patients présentant des lésions frontales, et en transposant dans cette nouvelle population les cadres théoriques, méthodologiques et cliniques identifiés chez l'adulte. Si cette transposition a pu favoriser l'émergence des premiers travaux chez l'enfant, il faut néanmoins souligner le caractère hypothétique de cette analogie entre le fonctionnement de l'enfant et celui de l'adulte, tant à un niveau cognitif que cérébral (Roy, Le Gall, Roulin, & Fournet, 2012).

Concernant l'étude spécifique de l'enfant dans le domaine du fonctionnement exécutif et du contrôle cognitif, les auteurs néo-piagétien font figure de précurseurs et permettent, de manière intéressante pour notre propos, d'établir un lien entre la théorie opératoire piagétienne et la notion plus contemporaine de fonctions exécutives (Roy et al., 2012). Pascual-Leone (1987) intègre par exemple à son modèle l'idée d'un répertoire individuel de schèmes exécutifs, qu'il définit comme un ensemble de structures de planification et de contrôle permettant à l'individu de réguler l'utilisation stratégique de ses capacités cognitives. Qu'il s'agisse ensuite des théories de Case (1978, 1991), de Fischer (1980, voir aussi Fischer & Bidell, 2006) ou de Halford (1982, 1993), ces modèles partagent l'idée d'un développement au cours duquel l'enfant parcourt différents stades, le passage d'un stade à l'autre s'effectuant par intégration successive d'unités mentales qualitativement distinctes. Cette intégration permet un élargissement progressif du focus attentionnel, qui peut ainsi s'orienter sur des concepts de plus en plus généraux, et se déplacer avec une flexibilité accrue au sein des sous-unités qui composent cette unité plus générale. Cet élargissement du focus attentionnel vers des unités mentales de plus en plus nombreuses, et de mieux en mieux intégrées, fait explicitement référence à une augmentation de la capacité de la mémoire de travail. On voit à travers cette description que l'essentiel des propriétés attribuées aux

fonctions exécutives (planification, flexibilité, mémoire de travail, focalisation attentionnelle), était déjà identifié par les auteurs néo-piagétien dans les années 80, dans un cadre théorique qui souligne également la dynamique développementale dans laquelle ces processus s'insèrent, tant à l'échelle de l'apprentissage microgénétique qu'à celui du développement macrogénétique.

Les travaux plus récents, que nous nous contenterons ici de résumer, s'appuient généralement sur les performances d'enfants d'âges divers aux épreuves classiquement utilisées chez l'adulte, ou à des versions simplifiées de ces épreuves, afin d'identifier les grandes étapes du développement des fonctions exécutives. Ce développement, dont l'ampleur se présente comme assez spectaculaire, semble suivre une trajectoire non linéaire, caractérisée par des accélérations vers les âges de 2 ans, 8 ans, et à la fin de l'adolescence, ce qui correspond aux périodes de croissance anatomique principales du cortex préfrontal (Anderson, Northam, Hendy, & Wrenall, 2001). Il faut néanmoins nuancer ces tendances générales du fait de l'existence de décalages, selon les fonctions exécutives examinées, dans l'allure de ces trajectoires (Jurado & Rosselli, 2007). La fonction exécutive la plus précoce, qui émerge au cours de la première année de vie, serait la capacité à inhiber un comportement automatique, tandis que l'inhibition des informations non pertinentes n'interviendrait qu'entre les âges de 6 et 10 ans. La planification et la flexibilité sembleraient apparaître à partir de 3 ans environ, et connaître une progression importante après l'âge de 7 ans. La fonction exécutive dont l'apparition est la plus tardive serait la fluence verbale, qui est aussi celle qui est la plus fortement prédite par les caractéristiques de l'environnement social dans lequel l'enfant évolue.

Roy et al. (2012) répertorient un certain nombre de problèmes auxquels se heurte le repérage de ces tendances générales. L'un de ces problèmes concerne précisément la diversité des trajectoires développementales des différentes fonctions exécutives que nous venons d'aborder. Sa présence complexifie grandement la question fondamentale des relations entre ces fonctions exécutives, et tout particulièrement quant à leur caractère unitaire ou pluriel, dont nous avons vu qu'il était le sujet d'un débat chez l'adulte. En effet, du fait de cette diversité de trajectoires, la réponse que l'on peut donner à la question de la dimensionnalité des fonctions exécutives est susceptible de varier selon les étapes du développement examinées. Un autre problème auquel se confrontent les travaux sur cette question, que nous avons également repéré chez l'adulte, est celui de l'indépendance des fonctions exécutives vis-à-vis d'autres construits comme l'intelligence.

Plusieurs travaux ont enfin tenté d'utiliser l'analyse factorielle confirmatoire afin d'identifier la structure des relations entre les différentes fonctions exécutives (Brocki & Bohlin, 2004; Bull, Espy, Wiebe, Sheffield, & Nelson, 2011; Hughes, Ensor, Wilson, & Graham, 2010; Lehto et al., 2003; van der Sluis, de Jong, & van der Leij, 2007; Wiebe, Espy, & Charak, 2008; Willoughby, Pek, & Blair, 2013). De même que chez l'adulte, ces études ne s'accordent pas sur la question du nombre (entre 1 et 3) et de l'interprétation des différentes dimensions obtenues. Une part importante d'entre elles conclue à l'existence d'un facteur général exécutif, ce qui montre que la notion même de pluralité des fonctions exécutives, largement admise dans le champ de la clinique, ne fait pas encore consensus d'un point de vue théorique.

Au regard des quelques travaux que nous avons sélectionnés au sein de la vaste littérature, les fonctions exécutives nous apparaissent comme une notion encore mal définie malgré l'intérêt qu'elle suscite (Jurado & Rosselli, 2007). Si elle semble utile au clinicien qui cherche à décrire des déficits multiples, et si elle a pu aboutir à des tentatives de théorisation assez séduisantes, son fondement empirique demeure assez instable. Les zones d'ombre principales renvoient à la question de la dimensionnalité du concept et, corrélativement, à son caractère plus ou moins localisé dans le cerveau. Il est enfin possible, comme le suggèrent certains auteurs comme Salthouse (2005), que l'engouement actuel pour le concept de fonctions exécutives consiste davantage en une relecture du concept d'intelligence (et notamment du concept d'intelligence fluide [Cattell, 1971]) au regard des récentes avancées de la neurologie, plutôt qu'en une réelle « découverte », dans le champ de la psychologie, de processus méconnus jusqu'alors.

2.2. Rôle du contrôle cognitif à la tâche du casino : des résultats contrastés

Afin d'éviter au maximum les redondances dans ce document, nous ne présenterons pas ici l'ensemble des travaux dédiés à la question de la relation entre contrôle cognitif et performances à la tâche du casino. Ceux-ci seront abordés dans les deux études que nous présentons dans les chapitres 4 et 5. Nous nous contenterons donc de résumer ici les grandes lignes du débat.

Les informations présentées à l'individu lorsqu'il tente de résoudre l'IGT sont de nature essentiellement quantitatives, et on pourrait donc penser que cette épreuve est résoluble à partir du raisonnement logico-mathématique, par des processus relevant strictement de la cognition froide, et sans faire appel au fonctionnement émotionnel du sujet. Tel un

programme statistique, l'individu stockerait les informations numériques qui lui parviennent lorsqu'il pioche dans les différents paquets de cartes, calculerait l'espérance mathématique de gain dans chacun de ces paquets et, sur la base d'une mise à jour de cette information au cours des différents essais, pourrait développer une préférence pour les paquets dont l'espérance de gain est la plus élevée. Une telle description rappelle d'emblée le fonctionnement de la mémoire de travail, et nous allons voir que c'est bien elle qui sera à l'origine du débat sur l'intervention des fonctions exécutives à la tâche du casino.

Rappelons tout d'abord que l'hypothèse des marqueurs somatiques se présente clairement comme une critique de ce rôle exclusif de la raison pure en prise de décision ou, en des termes équivalents, comme une critique du seul rôle de la cognition froide. Mais cette critique telle qu'elle est formulée par Damasio (1994), bien que visant à souligner le rôle des processus émotionnels, entrevoit néanmoins occasionnellement la possibilité d'un rôle conjoint de la raison et de l'émotion (les marqueurs somatiques permettent d'éliminer les options les plus risquées et de ne conserver que les options potentiellement avantageuses, entre lesquelles un choix rationnel est ensuite supposé pouvoir s'effectuer). Il est sur ce point difficile de savoir si le propos de Damasio se veut polémique ou réconciliateur, bien que le titre de son ouvrage, *L'erreur de Descartes*, puisse suggérer la première option.

2.2.1. Une étude princeps : dissociation de la mémoire de travail et de la prise de décision

Le premier article publié sur la question de la relation entre la performance à la tâche du casino et un processus cognitif « froid », à savoir la mémoire de travail, a été rédigé par Bechara, Damasio, Tranel et Anderson (1998). L'hypothèse que font initialement les auteurs est celle d'une dissociation entre la mémoire de travail et la prise de décision, qu'ils argumentent de deux manières. La première provient du fait que les patients porteurs de lésions du CPFVM présentent des difficultés à l'IGT mais pas aux tests d'intelligence classique, tandis que les patients porteurs de lésions du cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL ; une région qui, par contraste avec le CPFVM, est souvent rattachée à la cognition froide) présentent des difficultés aux épreuves de mémoire de travail mais pas en prise de décision (à en juger par leur comportement quotidien). Deuxièmement, les auteurs considèrent que le rôle de la mémoire de travail, qui pourrait consister en un maintien mnésique des informations pertinentes à la résolution de l'IGT (conséquences des choix dans les différents paquets de cartes) ainsi qu'en une mise à jour de ces informations au cours de la passation, ne suffit pas en soi à expliquer le passage à l'action, c'est-à-dire au choix d'un

paquet de cartes particulier. L'hypothèse des marqueurs somatiques est au contraire supposée rendre compte de ce passage à l'action.

Afin de mettre à l'épreuve cette hypothèse de dissociation, Bechara et al. (1998) recueillent les performances obtenues à l'IGT et à deux tâches de mémoire de travail (réponse différée) par 21 sujets contrôle, 9 patients porteurs de lésions du CPFVM, et 10 patients porteurs de lésions du CPFDL. Ces derniers présentent bien le pattern de réponse attendu (déficit en mémoire de travail et performances normales à l'IGT). En revanche, les patients présentant des lésions du CPFVM, s'ils sont bien déficitaires à l'IGT, se distinguent en deux groupes selon leur performance aux épreuves de mémoire de travail : cinq d'entre eux présentent un déficit aux épreuves de mémoire de travail, mais pas les quatre autres. Dans le premier de ces deux groupes de patients (déficit à l'IGT et en mémoire de travail), les auteurs s'aperçoivent que les lésions se situent dans la zone la plus postérieure du CPFVM. C'est à l'inverse chez les patients dont la lésion du CPFVM est la plus antérieure que l'on observe un déficit à l'IGT et une préservation de l'efficacité de la mémoire de travail. Cette distinction entre les deux groupes de patients présentant des lésions du CPFVM va aboutir à une conclusion assez ambiguë de notre point de vue concernant la présence ou non d'une dissociation entre prise de décision et mémoire de travail.

Premièrement, les résultats obtenus dans le groupe dont les lésions du CPFVM sont les plus antérieures (déficit à l'IGT mais pas en mémoire de travail), en complément à ceux obtenus chez les patients présentant des lésions du CPFDL (déficit en mémoire de travail mais pas à l'IGT), incitent les auteurs à conclure à « *une double dissociation entre les déficits aux deux tâches, c'est-à-dire entre la prise de décision d'une part et la mémoire de travail [...] d'autre part* » (Bechara et al., 1998, p. 434). Deuxièmement, les résultats obtenus dans le groupe dont les lésions du CPFVM sont les plus postérieures (déficit à l'IGT et en mémoire de travail), en complément à ceux obtenus chez les patients présentant des lésions du CPFDL (déficit en mémoire de travail mais pas à l'IGT), ne laissent pas d'autres choix aux auteurs que d'admettre le caractère partiel de cette dissociation : l'efficacité en mémoire de travail ne dépend pas de l'efficacité en prise de décision, mais, à l'inverse et de manière plus intéressante pour notre propos, « *la prise de décision semble influencée par la préservation de la mémoire de travail ; i.e., la prise de décision du sujet est affectée par le fait d'avoir une mémoire de travail anormale* » (p. 434).

Mais ce caractère partiel de la dissociation entre mémoire de travail et prise de décision ou, ce qui revient d'après nous au même, ce rôle de la mémoire de travail sur les

conduites des individus à la tâche du casino, bien que reconnu discrètement par Bechara et al. (1998) au début de leur conclusion, semble tout à fait oublié à la fin de leur article. Les auteurs font alors allusion à la possibilité que les fonctions exécutives d'inhibition et de flexibilité puissent expliquer les déficits à l'IGT chez les patients présentant des lésions du CPFVM. En effet, puisque les paquets désavantageux sont plus attrayants sur le court terme, ils sont souvent privilégiés par les sujets qui vont ainsi devoir inhiber cette tendance initiale, et passer de manière flexible à une décision plus adaptée :

« puisque, dans notre version de la tâche du casino, les sujets commencent par faire l'expérience de plusieurs gains avant de rencontrer une perte lorsqu'ils piochent dans le paquet désavantageux, on pourrait penser que les faibles performances des patients présentant des lésions du CPFVM sont causées par un défaut d'inhibition, c'est-à-dire par une incapacité du sujet à interrompre une réponse anciennement source de récompense, et à déplacer son attention (shifting attention) vers les paquets avantageux », Bechara et al. (1998, p. 436).

Mais, à peine posée, cette hypothèse est écartée par les auteurs sur la base de deux arguments, que nous présentons ici en les discutant brièvement.

Le premier argument est que les patients porteurs de lésions antérieures du CPFVM ne présentent aucun déficit lorsqu'ils résolvent des tests neuropsychologiques. Comme nous l'avons vu, cet argument est en revanche rejeté en ce qui concerne les épreuves de mémoire de travail lorsque les lésions sont postérieures, soit chez plus de la moitié des patients de cette étude, mais les auteurs ne font plus allusion ici à ce phénomène.

Le deuxième argument est que les patients porteurs de lésions antérieures du CPFVM changent souvent de paquet, et ne présentent donc pas de défaut de flexibilité. Mais il nous semble que cette flexibilité est essentiellement comportementale et pourrait simplement traduire la présence de réponses données au hasard. Elle ne manifeste pas à nos yeux la présence d'une flexibilité *cognitive*, qui pourrait s'effectuer entre plusieurs représentations de la situation par le sujet.

Dans une conclusion finale qui nous semble évacuer le caractère partiel de la dissociation entre mémoire de travail et prise de décision, les auteurs concluent en ces termes :

« En résumé, nous pensons que ces faits constituent des arguments forts en défaveur d'une explication des déficits à la tâche du casino par des déficits d'inhibition et d'attention. Nous allons même jusqu'à conclure que la capacité à sélectionner une

réponse avantageuse parmi un ensemble de réponse alternatives est probablement distincte de la mémoire de travail, de l'inhibition, et de l'attention », Bechara et al. (1998, p. 436).

Par ces mots, et malgré l'apparente conciliation de la raison et de l'émotion que l'hypothèse des marqueurs somatiques nous semblait laisser entrevoir, le champ de la raison, de la cognition froide ou, plus précisément, des fonctions exécutives, nous semble avoir été écarté. Mais, comme nous allons le voir, cette mise à l'écart ne fut que provisoire.

Dans la lignée de cette étude princeps, de nombreux travaux dont nous reparlerons plus en avant dans ce document concluront à l'absence du rôle des fonctions exécutives dans la résolution de la tâche du casino (principalement mémoire de travail, inhibition, et flexibilité). Le rejet de cette hypothèse s'effectuera le plus souvent au profit de l'hypothèse des marqueurs somatiques. Celle-ci, malgré les critiques qu'elle a suscitées, constitue encore le cadre explicatif principal dans le champ de la prise de décision sous incertitude telle qu'elle est opérationnalisée par la tâche du casino.

2.2.2. La réhabilitation de la raison

Comme nous l'avons vu précédemment, l'un des arguments principaux en faveur de l'hypothèse des marqueurs somatiques est que les individus dits « normaux » commencent à développer une préférence pour les paquets avantageux avant même de développer une compréhension conceptuelle du principe de la tâche (phases pré-intuitive et intuitive). Bechara et al. (1997) expliquent ce phénomène par l'apparition de marqueurs somatiques, qui guident les décisions du sujet à partir des émotions ressenties, et sans que ce processus soit conscient pour le sujet (« *covert biases* »).

Cette explication va être fortement remise en cause par une étude de Maia et McClelland (2004), qui ouvrira la voie à l'étude du rôle des processus rationnels et de la cognition froide. La critique principale adressée à l'étude de Bechara et al. (1997) est que les questions posées afin d'inférer la connaissance conceptuelle que les participants ont du principe de la tâche (« *dites-moi tout ce que vous savez sur ce qui se passe dans ce jeu* » et « *dites-moi comment vous vous sentez en jouant à ce jeu* ») sont beaucoup trop générales, comme en témoignent les travaux réalisés dans le champ de l'apprentissage implicite (e.g., Cleeremans, Destrebecqz, & Boyer, 1998; Shanks & St. John, 1994). Ils proposent donc de répliquer strictement l'expérience de Bechara et al (1997) dans un groupe expérimental composé de 20 participants, et de comparer leurs réponses à celles observées dans un

deuxième groupe de même effectif, dans lequel la connaissance conceptuelle et explicite du principe de la tâche par le participant est évaluée à l'aide d'un questionnaire beaucoup plus précis et détaillé (on demande par exemple au sujet d'estimer le montant qu'il gagnerait s'il piochait 10 cartes successives dans un paquet de cartes donné ou, dans l'hypothèse où on lui imposerait de ne sélectionner qu'un seul paquet jusqu'à la fin de la passation, de décider du paquet qu'il choisirait). Comme dans l'étude de Bechara, ces différentes questions sont posées à l'essai 20, puis tous les 10 essais. A partir des réponses des sujets, Maia et McClelland (2004) distinguent trois niveaux de compréhension de la tâche, qui sont assez semblables à ceux identifiés dans l'étude de Bechara (phase pré-intuitive, intuitive, et conceptuelle) :

- niveau 0 : le participant n'a aucune connaissance explicite du caractère plus ou moins avantageux des différents paquets.
- Niveau 1 : la participant a identifié au moins un des deux paquets avantageux, mais n'est pas capable de justifier sa réponse sur la base des conséquences que ce paquet engendre quantitativement en termes de gains et de pertes.
- -niveau 2 : le participant a identifié au moins un des deux paquets avantageux et est capable de justifier sa réponse sur la base des conséquences que ce paquet engendre quantitativement en termes de gains et de pertes.

Les résultats révèlent tout d'abord une absence de différence de performances à l'IGT dans les deux conditions, ce qui montre que l'utilisation d'un questionnaire plus précis n'a pas eu d'incidence sur les décisions des participants. De manière tout à fait centrale et en contradiction avec les conclusions de Bechara et al. (1997), ces résultats montrent également que la très grande majorité des participants qui, à un certain moment de la passation, développe une préférence pour les paquets avantageux (19 sujets sur 20) a, à ce même moment, atteint une compréhension conceptuelle de niveau 2. Ces participants ont donc consciemment accès au caractère plus ou moins avantageux des différents paquets, cette connaissance explicite pouvant constituer le fondement de leurs décisions adaptées. Cette interprétation s'oppose ainsi radicalement à celle proposée par Bechara et al. (1997, p. 1293), selon laquelle « *des biais non conscients guident le comportement avant qu'une connaissance consciente ne le fasse [...] et avant que le sujet ne prenne conscience du caractère plus ou moins avantageux des choix qu'il effectue* ». En résumé, il n'y aurait aucun besoin de faire l'hypothèse des marqueurs somatiques pour rendre compte des conduites des sujets. Si Maia et McClelland (2004) concèdent que l'intervention de processus émotionnels ne peut pas être

totalement écartée par leurs résultats, ils leur refusent un statut causal dans l'explication des décisions individuelles.

Maia et McClelland (2004) pensent plutôt que ces décisions s'appuient sur un raisonnement explicite. Sachant que les participants disposent de tout le temps nécessaire pour prendre leurs décisions, il leur semble probable que ceux-ci parviennent à conserver une trace mnésique (« *keep track* ») des informations quantitatives qui leur parviennent en conséquence de leurs décisions et, sur cette base, à appréhender la structure de l'IGT. La mémoire de travail semble parfaitement désignée pour remplir une telle fonction de stockage et de mise à jour des informations et les auteurs soulignent en quoi cette interprétation viendrait remettre en cause la dissociation supposée par Bechara et al. (1998).

Les auteurs font également remarquer que l'ordre des cartes dans chacun des paquets que comporte l'IGT est le même pour tous les participants dans la version initiale de l'épreuve (nous rencontrerons plus tard des versions dans lesquelles les cartes sont véritablement mélangées aléatoirement). Or, dans les paquets désavantageux, cet ordre est tel que la première perte n'intervient que tardivement (pas avant la 9^{ème} carte pour le paquet B), et donc potentiellement après que le participant a commencé à développer une préférence pour ces paquets désavantageux (dont les gains immédiats sont élevés). Maia et McClelland (2004) considèrent donc que l'IGT requiert probablement un inversement de l'apprentissage (« *reversal learning* »), et donc, selon notre interprétation, une certaine flexibilité cognitive de la part du participant.

Ainsi, et bien que cette hypothèse ne soit pas testée dans leur travail, Maia et McClelland (2004) concluent finalement à une possible implication des fonctions exécutives, principalement la mise à jour en mémoire de travail et la flexibilité, dans la résolution de l'IGT. Ils ouvrent ainsi la voie à une importante série de travaux, dont Bechara et al. (1998) avaient initialement souligné le caractère vain en concluant à l'existence d'une dissociation entre fonctions exécutives et prise de décision.

3. Conclusion

Dans la partie précédente, consacrée au développement des notions de hasard et de probabilité chez l'enfant, nous avons conclu à l'existence d'une opposition dialectique entre raisonnement logico-mathématique et heuristique intuitive, et avons remarqué les tentatives de dépassement de cette opposition dans le cadre des théories du double processus. Il nous semble que le débat que nous venons de présenter autour de la question des processus

impliqués en prise de décision sous incertitude permet d'aboutir à une conclusion sensiblement similaire.

Au stade auquel nous avons interrompu notre discussion, et bien que nous ayons entrevu quelques possibilités de réconciliation, les défenseurs de la raison d'une part et de l'émotion d'autre part semblent campés sur leurs positions respectives. Par la suite, de nombreux travaux ont été consacrés à cette question. Nous avons fait le choix de ne pas les présenter ici afin d'éviter des redondances avec les études expérimentales que nous présenterons dans les parties suivantes. En guise de conclusion, nous souhaiterions néanmoins préciser comment ces travaux ultérieurs se sont positionnés en référence à l'opposition entre raison et émotion.

Tout d'abord, les auteurs qui ont récemment étudié les processus émotionnels dans le cadre de la théorie de Damasio (1994) reconnaissent généralement le rôle complémentaire des processus de la cognition froide, comme les fonctions exécutives. Dans une réponse à l'article de Maia et McClelland (2004), Bechara, Damasio, Tranel et Damasio (2005) tentent de défendre l'hypothèse des marqueurs somatiques tout en évitant la polémique, et admettent que les processus cognitifs « purs », assistés par les marqueurs somatiques, contribuent à rendre compte des conduites de décision. Antoine Bechara ira plus loin en consacrant plusieurs travaux au rôle des fonctions exécutives dans la résolution de la tâche du casino. Revenant radicalement sur la position qu'il défendait auparavant, il considérera que :

« le rôle des mécanismes d'inhibition et de flexibilité pourrait être crucial pour le processus de sélection de la réponse. En effet, en présence d'un dilemme, une fois qu'une option stockée en mémoire de travail a été étiquetée comme positive ou négative, le participant doit ensuite répondre en rejetant ou en acceptant cette option. Nous considérons que cette sélection de la réponse dépend en grande partie des mécanismes d'inhibition et de flexibilité » (Noël, Bechara, Dan, Hanak, & Verbanck, 2007, p. 779).

Il attribuera également les déficits que présentent les personnes toxicomanes en prise de décision à leurs faibles performances en mémoire de travail (Bechara & Martin, 2004).

A l'inverse, les auteurs qui étudient le rôle des fonctions exécutives à la tâche du casino adoptent des positions diverses sur la question du rôle complémentaire des émotions. Dans certains travaux, ce rôle est clairement reconnu, bien que non étudié. Dans d'autres travaux, les auteurs ne font pas nécessairement allusion au rôle des processus émotionnels ou, du moins, pas dans le cadre de l'hypothèse des marqueurs somatiques. Cette réticence peut

éventuellement s'expliquer par une croyance forte de certains auteurs en le caractère nécessairement rationnel d'une conduite adaptée. Elle peut également traduire une méfiance de certains psychologues envers le niveau explicatif neurobiologique de l'hypothèse des marqueurs somatiques. Dans une revue de la littérature sur l'hypothèse des marqueurs somatiques, Reimann et Bechara (2010, p. 768) semblent ainsi regretter les critiques que leur adressent les psychologues :

« La théorie des marqueurs somatiques est le plus souvent critiquée et comparée à partir de modèles dont la perspective n'est pas neurologique. Plus spécifiquement, des cadres théoriques apparemment concurrents, - pour la plupart psychologiques, cognitifs, ou comportementaux - font dériver leurs critiques du point de vue de leur propre domaine et école de pensée, alors que la théorie des marqueurs somatiques a été établie sur des faits neurologiques, basés sur la comparaison des stratégies de prise de décision chez des patients présentant des lésions cérébrales localisées et chez des sujets sains. Du fait de l'origine théorique de ces deux approches -neurologie et neurosciences pour la théorie des marqueurs somatiques, et psychologie, sciences cognitives et comportementalisme pour d'autres modèles de la prise de décision - une comparaison conceptuelle mène simplement à la comparaison des « pommes et des oranges » et, par conséquent, n'apporte pas un éclairage significatif ».

De notre point de vue, il est tout sauf étonnant que les psychologues puissent mettre en doute la pertinence d'une théorie qu'ils n'ont pas les moyens de tester au niveau d'analyse qui est le leur. Cette citation nous semble illustrer le fait que, en dépit de l'engouement que suscite actuellement un concept comme celui de cognition incarnée, l'intérêt de l'intégration des approches neurologique et psychologique n'est pas évident pour tout le monde. Et apparemment pas pour un neurologue de formation comme Antoine Bechara qui, il y a plus de vingt ans, co-publiait son article princeps dans la revue *Cognition*, avec l'ambition évidente de susciter un rapprochement entre les deux disciplines (Bechara et al., 1994).

L'intégration de l'hypothèse des marqueurs somatiques et du concept de fonctions exécutives dans le champ de la psychologie peut paraître d'autant plus délicate que de nouveaux modèles intégratifs, rattachés à la théorie du double processus et ne s'appuyant pas sur un niveau d'explication neurobiologique, ont déjà été proposés en psychologie pour rendre compte des conduites de prise de décision sous incertitude. S'ils ne font pas tous explicitement référence au fonctionnement émotionnel du sujet, ou aux fonctions exécutives, ces modèles conservent l'idée générale d'une complémentarité entre des processus « de bas

niveau », intuitifs, et non conscients d'une part, et des processus de raisonnement plus contrôlés d'autre part. On peut notamment citer la contribution de Kahneman (2011) ou, dans le contexte de la tâche du casino, les travaux de Figner, Mackinlay, Wilkening et Weber (2009) et de Amsel, Close, Sadler et Klaczynski (2009). La théorie de la trace floue, à laquelle nous avons déjà fait allusion ci-dessus, a également été proposée par Jansen, van Duijvenvoorde et Huizenga (2012) pour rendre compte des conduites à la tâche du casino. Malgré l'intérêt que présenterait la présentation de ce champ de recherche, nous avons choisi de ne pas l'aborder ici dans la mesure où les deux premières études empiriques que nous allons maintenant présenter interrogent essentiellement le rôle des fonctions exécutives à la tâche du casino, et non pas celui de processus intuitifs ou émotionnels. S'il nous a paru essentiel de préciser en quoi l'hypothèse du rôle des fonctions exécutives à la tâche du casino est apparue par opposition à un cadre théorique princeps postulant l'existence de processus de bas niveau, la question intéressante de l'intégration de ces deux cadres théoriques dépasse l'objectif que nous nous sommes fixé.

Partie II : Travaux empiriques

Parmi les quatre études présentées dans cette partie, la première et les deux dernières ont fait l'objet d'une publication :

- Chapitre 4 : Audusseau, J. & Juhel, J. (2015). Working memory in children predicts performance on a Gambling Task. *The Journal of Genetic Psychology*, 176(1), 38-54.
- Chapitre 6 : Audusseau, J., & Juhel, J. (2016, sous presse). Variations individuelles et variations situationnelles à l'épreuve de quantification des probabilités chez l'enfant : une approche transactionnelle. *Enfance*, 4, pp *** - ***.
- Chapitre 7 : Audusseau, J., & Juhel, J. (2015). Approche individuelle et différentielle de la prise de décision chez l'enfant. In J. Juhel & G. Rouxel (Eds.), *Différences et variabilités en psychologie* (pp. 197-216). Rennes: P.U.R.

Nous avons choisi d'insérer ces publications dans le présent document sans leur faire subir de modifications majeures (hormis la traduction de l'anglais vers le français concernant la première d'entre elles). Nous prions le lecteur de nous excuser des quelques redondances occasionnées par ce choix.

Chapitre 4 : Rôle de la mémoire de travail en prise de décision sous incertitude chez l'enfant de 6 à 11 ans

1. Introduction

Au cours de leur développement, les enfants rencontrent de plus en plus régulièrement des situations de PDD, impliquant la réalisation d'un choix entre au moins deux alternatives afin d'atteindre un but donné, et dans lesquelles l'impossibilité d'anticiper l'ensemble des conséquences d'un choix donné est génératrice d'incertitude. L'étude de la PDD sous incertitude chez l'enfant vise à identifier les processus mobilisés par l'enfant lorsqu'il tente de réduire cette incertitude afin de prendre une décision adaptée. L'identification de ces processus fait l'objet d'un débat qui prend son origine dans l'opérationnalisation de la PDD sous incertitude par l'Iowa Gambling Task (IGT), conçue par Bechara, Damasio, Damasio, et Anderson (1994). Le but des participants qui résolvent l'IGT est d'accumuler autant d'argent fictif que possible en piochant successivement des cartes au sein de quatre paquets. Afin de maximiser leurs gains, les participants doivent apprendre à éviter les deux paquets désavantageux qui, s'ils peuvent sembler avantageux de prime abord, sont désavantageux sur le long terme. En effet, bien que les cartes provenant de ces deux paquets sont associées à des gains élevés, elles sont également associées, occasionnellement et de manière imprédictible, à des pertes très importantes. Les participants doivent donc apprendre à préférer piocher au sein des deux paquets avantageux dont les cartes, bien qu'associées à des gains plus modestes, entraînent un bilan positif sur le long terme puisque les pertes qui leur sont associées sont très faibles. Au commencement de la passation, l'incertitude des enfants quant à ce caractère plus ou moins avantageux des deux paquets est totale. Ce n'est qu'au fur et à mesure de la passation, alors qu'ils font l'expérience des conséquences de leurs choix, que cette incertitude est susceptible de décroître en aboutissant à une préférence pour certains paquets de cartes relativement aux autres paquets. L'interprétation des performances des participants à l'IGT a été principalement proposée dans le cadre de l'hypothèse des marqueurs somatiques (Damasio, 1998). Rappelons brièvement que cette hypothèse consiste à supposer que l'émotion qui résulte du choix d'une carte (et des gains et pertes consécutifs à ce choix) entraîne une sensation dénommée « marqueur somatique ». L'établissement progressif d'une association entre le choix d'un paquet et un marqueur somatique permettrait de guider les choix ultérieurs et serait donc à l'origine des performances observées à l'IGT. Au sein de ce

courant de recherches, de nombreuses études ont ainsi considérées que les performances à l'IGT dépendent de processus cognitifs de nature émotionnelle ou, en des termes équivalents, de la « cognition chaude » (pour une revue de ce type de travaux, voir Reimann et Bechara, 2010).

Bien que l'implication des processus émotionnels dans la résolution de l'IGT (ou de tâches similaires) semble une hypothèse tout à fait probante, ce cadre théorique a été régulièrement remis en cause par des auteurs qui considèrent que des processus cognitifs renvoyant à la « cognition froide » sont également impliqués dans la résolution de l'IGT. Les auteurs qui défendent cette dernière perspective insistent généralement sur le fait que l'émotion générée par les gains et pertes dont le participant fait l'expérience ne peut orienter ses choix ultérieurs vers une décision adaptée que si ce participant recherche activement et traite cognitivement les indices qui permettent de s'orienter vers cette décision adaptée. Parmi les processus qui pourraient permettre d'assurer une telle fonction, la mémoire de travail (MDT ; e.g., Baddeley, 1986; Cowan, 1999) semble un candidat idéal. Différentes fonctions de MDT peuvent être mentionnées en référence aux exigences que l'IGT est susceptible d'imposer au système cognitif. Les différentes informations dont la prise en compte est nécessaire à l'obtention d'une performance élevée doivent être maintenues temporairement sous une forme accessible et mises à jour (e.g., Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, & Howerter, 2000) au fur et à mesure de la passation. Une autre fonction de la MDT, serait d'assurer la surveillance (*monitoring*) de sa performance par le participant (Cassotti, Houdé, & Moutier, 2011). Nous utiliserons par la suite de ce chapitre le terme générique d'*efficience de la MDT* afin de désigner l'efficacité des processus de maintien temporaire, de mise à jour de l'information et de surveillance de la performance. Cette hypothèse d'une implication de la MDT en prise de décision sous incertitude a été testée dans plusieurs études, avec pour participants des patients adultes cérébrolésés (Bechara, Damasio, Tranel, & Anderson, 1998; Manes et al., 2002), et des adultes « tout venants » (Dretsch & Tipples, 2008; Hinson, Jameson, & Whitney, 2002; Jameson, Hinson, & Whitney, 2004; Pecchinenda, Dretsch, & Chapman, 2006; Turnbull, Evans, Bunce, Carzolio, & O'Connor, 2005). Malgré le nombre de ces études, leurs résultats ne permettent pas de conclure quant à une éventuelle implication de la MDT dans l'acquisition d'une conduite adaptée à l'IGT.

D'autres études portant sur l'IGT (ou des tâches similaires), dont nous présentons les conclusions ci-dessous, ont adopté une approche développementale pour aborder la question de l'implication de la MDT en PDD sous incertitude, en comparant des sujets appartenant à

différents groupes d'âge (principalement des enfants). Soulignons le fait que les tâches employées dans ces études pour opérationnaliser la PDD sous incertitude, que nous dénommerons par le terme de « tâche du casino », sont très similaires à l'IGT mais présentent certaines modifications qui permettent de les rendre plus attractives et adaptées à de jeunes participants (les montants des gains et des pertes impliquent notamment de plus petites quantités). Comme nous allons le voir, le manque de concordance entre les conclusions de ces différentes études montre que le débat n'est pas encore clos.

Crone et van der Molen (2004) étudient les performances de participants âgés de 6-9, 10-12, 13-15, et 18-25 ans, répartis dans deux conditions expérimentales. Dans la première condition, afin de diminuer la charge en MDT que la tâche du casino est supposée induire, les participants reçoivent un feed-back sur les conséquences de leurs choix précédents. Ce feed-back, qui est remis à jour à chaque essai, consiste à faire apparaître sous la forme d'une barre horizontale la proportion de gains et de pertes dont le participant a fait l'expérience depuis le début de la passation, ceci pour chacun des paquets de cartes. La deuxième condition est une condition contrôle dans laquelle aucun feed-back n'apparaît. Les auteurs n'observent pas de différences entre les deux conditions, et en concluent que la MDT n'intervient pas dans la performance à la tâche du casino. Ils émettent toutefois quelques doutes relatifs à la capacité des participants à interpréter le feed-back lorsqu'il leur est proposé, en particulier en ce qui concerne les plus jeunes d'entre eux. Puisqu'on leur présente un indicateur leur permettant de classer les quatre paquets de cartes du plus avantageux au moins avantageux au regard des essais précédents, il nous semble également difficile de comprendre pourquoi l'appartenance à cette condition n'entraîne pas de meilleures performances, sauf à supposer comme le font les auteurs que les participants n'ont pas été capables d'interpréter le feed-back qui leur est proposé.

L'hypothèse d'une relation développementale entre PDD sous incertitude et MDT chez l'enfant a également été testée par Crone, Bunge, Latenstein et van der Molen (2005). Ces auteurs comparent les performances obtenues à la tâche du casino dans deux conditions expérimentales, chez des enfants âgés de 7-9, 10-12 et 13-15 ans. Dans la première condition, qui est supposée diminuer la charge en MDT de la tâche du casino, on ne présente que deux paquets de cartes aux participants (l'un avantageux, l'autre désavantageux). Dans la deuxième condition, les quatre paquets de cartes sont présentés. N'observant aucune différence entre ces deux conditions en termes d'effet de l'âge, les auteurs concluent à l'absence de relation entre PDD sous incertitude et MDT. Nous faisons remarquer que l'observation d'une telle

différence aurait impliqué l'existence d'un effet de l'âge dans au moins l'une des deux conditions, ce qui n'est pas le cas dans cette étude. Nous reviendrons par la suite sur ce manque de sensibilité des tâches de PDD sous incertitude à l'âge des participants, qui est un problème récurrent dans la littérature.

L'étude de van Duijvenvoorde, Jansen, Bredman, et Huizenga (2012) est l'une des seules ayant mis en évidence l'existence d'une relation entre la MDT et la performance à la tâche du casino dans une approche développementale. Les participants, âgés de 7 à 29 ans, sont répartis dans deux conditions expérimentales. Dans la première, la charge en MDT (qui résulte de la nécessité de maintenir en mémoire les informations pertinentes à la résolution de la tâche du casino) est allégée en présentant explicitement la fréquence et le montant des gains et pertes associés à chacun des quatre paquets de cartes. Ces informations sont absentes dans la deuxième condition. Les résultats témoignent d'un effet de l'âge sur la performance des participants, qui diffère entre les deux conditions. Dans la première condition, tous les participants, quel que soit leur âge, choisissent préférentiellement les cartes dans les paquets avantageux. Dans la deuxième condition, ce résultat ne s'observe que chez les participants de plus de douze ans, mais pas chez les plus jeunes. Ce pattern de résultats suggère que les performances des sujets dépendent bien de la charge imposée à leur MDT.

A la différence des études que nous venons de présenter, qui comparent les performances observées à la tâche du casino dans différentes conditions expérimentales, d'autres travaux ont examiné l'hypothèse d'une relation entre MDT et performance à la tâche du casino à un niveau interindividuel. Smith, Xiao, et Bechara (2012) mesurent l'efficacité de la MDT chez des participants âgés de 8 à 17 ans par la Self-Ordered Pointing Task (SOPT ; Petrides & Milner, 1982), dont une version pour enfants sera présentée ci-dessous, et n'observent aucune relation corrélationnelle entre les performances à cette tâche et celles à la tâche du casino. De manière similaire, chez des participants âgés de 9 à 17 ans, Hooper, Luciana, Conklin, et Yarger (2004) n'observent aucune relation entre les performances à la tâche du casino et les scores obtenus à une tâche d'empan de chiffres (à l'endroit et à l'envers). Un résultat analogue est obtenu par Crone et van der Molen (2004) chez des enfants âgés de 7-8, 11-12 et 15-16 ans. En résumé, ces études corrélationnelles réalisées auprès d'enfants et adolescents concluent toutes à l'absence de relation entre l'efficacité de la MDT et la performance à la tâche du casino.

Cet ensemble de résultats nous semble cependant à remettre en perspective pour différentes raisons d'ordre psychométrique et expérimentale. Premièrement, les résultats de

plusieurs des études citées laissent penser que les différentes versions de la tâche du casino utilisées sont trop difficiles pour la majorité des participants. En effet, certaines de ces études ne mettent en évidence aucune amélioration des participants au cours de la passation dans leur capacité à effectuer un choix adapté. C'est plus précisément le cas des enfants de 8-10 ans et 12-14 ans dans l'étude de Crone et van der Molen (2007), et de ceux de 7-9, 9-11 et 11-13 ans dans l'étude de van Duijvenvoorde et al. (2012). Nous soulignons également le fait qu'aucune des études précédemment citées n'a permis de mettre en évidence un effet de l'âge sur l'amélioration de la performance à la tâche du casino avant l'âge de 12-13 ans. Le fait que les performances à la tâche du casino ne dépendent pas de l'âge des enfants est particulièrement problématique lorsque l'on cherche à rendre compte des conduites de PDD sous incertitude à partir d'un processus comme la MDT. En effet, il est bien établi que l'efficacité de la MDT des enfants varie selon leur âge (e.g., Courage & Cowan, 2009). De plus, pour des raisons psychométriques, il est toujours difficile de mettre en évidence l'effet d'un prédicteur sensible à l'âge (comme par exemple la MDT) sur une variable (comme par exemple la performance à la tâche du casino) qui n'est pas sensible à l'âge. Pour cette raison, il semblerait préférable d'utiliser une tâche de PDD sous incertitude dont le niveau de difficulté est adapté à l'âge des participants, et de s'assurer que les résultats qu'elle permet d'obtenir dépendent bien de l'âge. En suivant ce raisonnement, Kerr et Zelazo (2004) ont proposé une tâche qui semble mieux adaptée aux enfants que l'IGT : la Children's Gambling Task (CGT). Tout en restant très similaire à l'IGT dans son principe, elle s'en distingue par l'utilisation de seulement deux paquets de cartes (l'un avantageux, l'autre désavantageux) et par une meilleure adéquation aux intérêts et aux capacités des participants. Les gains et les pertes ne renvoient pas à des centaines de dollars fictifs, comme c'est le cas de l'IGT, mais à des bonbons réels et en faible quantité. Il n'existe à notre connaissance qu'une seule étude ayant testé chez l'enfant l'hypothèse d'une relation entre l'efficacité en MDT et la PDD sous incertitude opérationnalisée par la CGT. Cette étude, réalisée par Hongwanishkul, Happaney, Lee et Zelazo (2005) auprès d'enfants de 3 à 5 ans et utilisant la SOPT pour mesurer l'efficacité de la MDT, a permis de conclure à l'existence d'une relation faible mais significative entre MDT et PDD sous incertitude durant l'enfance. Des études supplémentaires restent donc à mettre en œuvre afin d'examiner plus en détail cette question.

L'étude présentée dans ce chapitre se propose d'examiner cette hypothèse d'une implication de la MDT dans l'amélioration de la performance au cours de la passation de la CGT, et procède selon deux points de vue : intergroupe et interindividuel. Premièrement, l'amélioration de la performance à la CGT est examinée en comparant deux conditions

expérimentales dont l'une correspond à une passation classique de la CGT (condition contrôle), et l'autre dans laquelle les participants, en parallèle à la passation de la CGT, réalisent une tâche secondaire impliquant la MDT (condition double tâche, dont la description est donnée dans la section suivante). En effet, si la résolution de la CGT implique bien les processus de MDT, le fait de devoir réaliser en parallèle une tâche secondaire qui sollicite la MDT des sujets devrait entraîner une division des ressources entre les deux tâches. En conséquence, nous nous attendons à ce que la vitesse d'acquisition d'une décision adaptée à la CGT soit plus lente chez les participants placés en condition double tâche relativement à ceux placés en condition contrôle. Deuxièmement, une approche interindividuelle est également adoptée pour tester notre hypothèse principale, en examinant la relation existant entre le score des participants à la SOPT et leur vitesse d'acquisition d'une décision adaptée à la CGT. Toujours au niveau interindividuel mais en considérant uniquement les sujets placés en condition double tâche, nous testerons l'hypothèse d'une relation entre le score obtenu à la tâche secondaire et la vitesse d'acquisition d'une décision adaptée à la CGT. Nous nous assurerons au préalable que la performance à cette tâche secondaire est bien corrélée positivement à celle obtenue à la SOPT, ce à quoi nous pouvons logiquement nous attendre si la performance à la tâche secondaire dépend bien de l'efficacité de la MDT.

2. Méthode

2.1. Participants

Un échantillon comprenant 105 enfants scolarisés dans deux écoles élémentaires de l'agglomération rennaise a participé à cette étude. Un accord parental a été obtenu pour chacun des enfants rencontrés. Ces enfants étaient répartis en trois groupes d'âges : 35 CP (20 garçons et 15 filles ; $M_{\text{age}} = 6,7$ ans ; $SD_{\text{age}} = 0,32$ ans) dans le groupe de 6-7 ans, 35 CE2 (15 garçons et 20 filles ; $M_{\text{age}} = 8,6$ ans ; $SD_{\text{age}} = 0,29$ ans) dans le groupe de 8-9 ans et 35 CM2 (20 garçons et 15 filles ; $M_{\text{age}} = 10,7$ ans ; $SD_{\text{age}} = 0,39$ ans) dans le groupe de 10-11 ans.

2.2. Tâches et matériel

Chaque enfant a réalisé individuellement la CGT et la SOP, l'ordre de passation des tâches étant contrebalancé d'un sujet à l'autre. L'ensemble de la passation dure environ 40 minutes par enfant.

2.2.1. Children's Gambling Task

A chacun des 100 essais de la passation, l'enfant est invité à piocher une carte (plastifiée et de format 7*10 cm) au sein de l'un des deux paquets placés en face de lui. Les deux paquets sont facilement distinguables, car présentant des motifs distincts au verso (respectivement des lignes et des carrés). Le recto des cartes, révélé une fois la carte retournée, est divisé verticalement en deux surfaces de même taille (voir figure 5). Sur le haut de la carte figurent un certain nombre de visages souriants (« smileys ») ; sur le bas un certain nombre de visages tristes, qui correspondent respectivement aux gains et aux pertes obtenus par l'enfant, mesurés en nombre de bonbons (M&M's®). Les cartes provenant de l'un des deux paquets affichent davantage de visages souriants (i.e., un gain plus important) que celles de l'autre paquet, mais certaines de ces cartes affichent également, de manière imprédictible, un nombre très important de visages tristes (i.e., une perte plus importante), ce qui rend ce paquet désavantageux sur le long terme (espérance négative). A l'inverse, les cartes provenant de l'autre paquet affichent un faible nombre de visages souriants, mais aussi un nombre très faible de visages tristes, ce qui rend ce paquet avantageux sur le long terme (espérance positive). Plus précisément, les cartes issues du paquet avantageux entraînent systématiquement un gain de un bonbon, et une perte qui peut être de un ou zéro bonbon (l'espérance de gain de ce paquet est de cinq bonbons pour dix cartes piochées). Les cartes issues du paquet désavantageux entraînent systématiquement un gain de deux bonbons, et une perte qui peut être de zéro, quatre, cinq ou six bonbons (l'espérance de perte de ce paquet est de cinq bonbons pour dix cartes piochées). L'ordre des cartes au sein de chaque paquet est le même pour chaque participant, et correspond à la procédure employée par Kerr et Zelazo (2004).

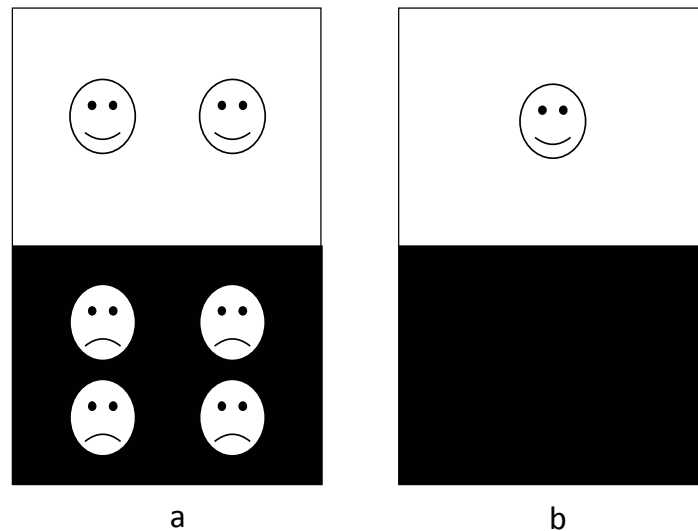


Figure 5. Deux exemples de cartes issues de la CGT : a) carte issue du paquet désavantageux (gain : 2 ; perte : 4) ; b) carte issue du paquet avantageux (gain : 1 ; perte : 0).

Une fois que l'enfant a rapidement fait connaissance avec l'expérimentateur, on lui propose de faire de son mieux pour essayer de gagner le plus de bonbons possible en piochant des cartes dans le paquet de son choix, et en l'autorisant à changer de paquet quand bon lui semble¹. On l'informe également que l'un des paquets est avantageux (i.e. permet de gagner des bonbons sur le long terme), tandis que l'autre est désavantageux (i.e. entraîne des pertes sur le long terme). Un verre cylindrique est placé entre les deux paquets de cartes, dans lequel on place les bonbons gagnés par l'enfant et duquel on retire les bonbons perdus. L'expérimentateur place initialement dix bonbons dans le verre, puis procède à six essais de démonstration (les trois premières cartes de chaque paquet sont utilisées). Durant ces essais de démonstration, l'expérimentateur s'assure que chaque enfant comprend bien la relation entre le nombre de visages souriants (respectivement tristes) et le nombre de bonbons gagnés (respectivement perdus). Lorsqu'une carte est retournée, seule sa partie supérieure est visible (i.e. le nombre de visages souriants), la partie inférieure étant recouverte par une vignette autocollante. Après que l'expérimentateur a placé dans le verre le nombre de bonbons correspondant au nombre de visages souriants figurant sur la carte, la vignette est révélée afin de révéler le nombre de visages tristes, qui sont ensuite retirés du verre par l'expérimentateur. Cette façon de procéder permet de s'assurer que les gains et les pertes sont bien tous deux pris

¹ A la fin de l'expérience, et indépendamment de sa performance, chaque enfant est remercié de sa participation par un petit paquet de bonbons.

en compte par l'enfant. La tâche débute ensuite dès la fin des six essais de démonstration, et se déroule exactement de la même manière que ces derniers, à la seule différence qu'elle comprend 100 essais. Durant chacun de ces essais, l'expérimentateur prend note du paquet sélectionné par l'enfant. Puisqu'il n'y a que deux paquets, cette information peut être résumée pour chaque participant par le nombre de choix effectués dans le paquet avantageux. Nous décrirons ces scores dans la section dédiée aux statistiques descriptives, mais utiliserons par la suite un niveau d'analyse plus précis, celui de l'essai.

2.2.2. *Tâche secondaire*

Comme mentionné précédemment, l'une des méthodes utilisées dans cette étude afin d'évaluer le rôle de la MDT dans l'acquisition d'un comportement de choix adapté lors de la résolution de la CGT consiste en la comparaison de deux conditions expérimentales. La condition contrôle ($n = 54$) correspond à une passation standard de la CGT, telle que décrite dans la section précédente. Dans la condition de double tâche ($n = 51$), en supplément à cette passation standard, les participants procèdent également au rappel du nombre de visages tristes (i.e., du nombre de bonbons perdus) affichés sur les quatre dernières cartes piochées, ceci à dix reprises au cours de la passation. Ces dix occasions de rappel sont réparties selon un ordre aléatoire qui est le même pour chaque participant. L'objectif de l'ajout de cette tâche secondaire de rappel est de solliciter les ressources de la MDT des sujets, puisqu'elle nécessite en effet le maintien d'une information en mémoire à court terme (nombre de visage tristes affichés sur les cartes piochées à chacun des essais précédents), mais également la mise à jour de cette information à chaque nouvel essai². Le score individuel à cette tâche secondaire correspond au nombre de rappels corrects parmi les 40 rappels effectués (10 occasions de rappel comprenant chacune 4 informations à rappeler).

2.2.3. *Self-ordered Pointing Task*

La SOPT (Petrides & Milner, 1982) est généralement considérée comme mesurant l'efficacité de la MDT dans ses composantes de contrôle exécutif et de surveillance (e.g., Cragg & Nation, 2007). Nous utilisons dans notre étude la version adaptée pour enfants proposée par Hongwanishkul et al. (2005). On présente au participant des planches plastifiées au format A4 (21*29,7 cm), sur lesquelles figurent un certain nombre d'images. La tâche

² Afin que cette condition de double tâche soit aussi similaire que possible à la condition contrôle, nous avons choisi de ne pas introduire une tâche secondaire qui serait indépendante de la CGT (e.g., une tâche de comptage de sons), mais plutôt une tâche qui garantit une situation écologique relativement à la passation de la CGT.

débute par un essai de démonstration au cours duquel des planches de trois images sont utilisées. On demande tout d'abord à l'enfant de pointer du doigt l'une de ces images. On lui présente ensuite une nouvelle planche comportant les trois mêmes images, celles-ci étant localisées à des emplacements différents de la planche précédente, et on demande à l'enfant de pointer une image qu'il n'a pas pointée auparavant. S'il y parvient, on lui donne la même consigne en lui présentant une troisième planche qui comporte à nouveau les mêmes images localisées différemment. Si à un moment quelconque de la passation l'enfant pointe une image déjà pointée auparavant, on lui donne une deuxième chance de réussir en lui présentant à nouveau une séquence de planches comportant trois images, selon le même protocole mais en utilisant de nouvelles images. Une fois que l'enfant a réussi une série de planches, en pointant successivement toutes les images sans répétition, une nouvelle série de planches comportant une image supplémentaire lui est proposée (soit une série de planches comportant quatre images après la série de planches comportant trois images). La passation de la SOPT se poursuit ainsi jusqu'à ce que l'enfant commette une erreur (en pointant une image déjà pointée auparavant), puis une deuxième erreur au cours de la présentation d'une série de planches de même difficulté. On interrompt également la passation si l'enfant atteint la série de planches de difficulté maximale, qui comprend onze images. Le score obtenu correspond finalement au nombre d'images présentées sur la dernière série de planches réussie par l'enfant (soit un score compris entre 3 et 11).

2.3. Analyses statistiques

L'évolution des décisions de l'enfant au cours de la passation de la CGT est mesurée par la probabilité d'adopter une conduite de décision adaptée à chaque essai (i.e., probabilité de piocher dans le paquet avantageux) et par la vitesse d'acquisition de cette conduite de décision adaptée. Dans la majorité des études réalisées jusqu'à présent, cette acquisition de la conduite de décision adaptée est évaluée en comparant les performances moyennes obtenues au sein de différents blocs d'essai, et la vitesse d'acquisition est donc une mesure inter-blocs. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle conduit à négliger la variabilité intra-individuelle susceptible d'intervenir au sein des blocs d'essai, une forme de variabilité potentiellement porteuse d'informations. En agrégeant par exemple les performances au sein de blocs de 20 essais, un participant qui pioche 10 cartes dans l'un des paquets, puis 10 cartes dans le deuxième paquet, obtiendra la même performance qu'un autre participant qui alterne systématiquement d'un paquet à l'autre à chacun des essais, et ceci malgré la différence qui

caractérise de tout évidence le processus d'acquisition de ces deux individus. D'après Busemeyer, Koling, Cox et Davis (2005), ce type d'analyse inter-blocs classiquement utilisée empêche notamment la possibilité d'un examen détaillé des stratégies de décision. En admettant le bien-fondé de ce constat, nous avons choisi d'évaluer l'évolution des choix des participants en nous situant à un niveau d'analyse qui est celui du choix binaire effectué à chacun des essais. Ce choix nous permet de comparer, à un niveau d'analyse plus précis, la vitesse d'acquisition et la probabilité de sélectionner le paquet avantageux (tout au long de la tâche et en particulier à l'essai final) au sein de groupes d'enfants d'âges différents.

L'influence des variables indépendantes (groupe d'âge, condition expérimentale, score à la SOPT, score à la tâche secondaire) sur la variable dépendante binaire (sélection ou non d'une carte dans le paquet avantageux à chacun des 100 essais) est testée dans le cadre d'un modèle linéaire généralisé (lien logit)³. Dans un objectif de comparaison aux études précédentes sur le sujet, nous présentons tout d'abord les résultats qui concernent les effets principaux de chacune des variables indépendantes. Nous poursuivons ensuite par des modélisations plus complexes nous permettant de tester nos hypothèses en tenant compte de la dynamique temporelle de la performance durant la passation de la CGT, ce que des modèles plus simples ne permettent pas. Nous choisissons de tester ces hypothèses dans une approche par comparaison de modèles, consistant à construire différents modèles formalisant des hypothèses variées, à comparer ces modèles en retenant finalement celui dont l'ajustement aux données est le plus satisfaisant. Cet ajustement est évalué à partir du critère d'information bayésien (BIC ; Schwarz, 1978), un critère de sélection s'appuyant sur la fonction de vraisemblance du modèle, et introduisant une pénalité relative au nombre de paramètres du modèle ainsi qu'à la taille de l'échantillon. Si l'on considère deux modèles mis en compétition, on retient celui dont le BIC est le plus faible. D'après Raftery (1995), on peut conclure de manière probante qu'un modèle s'ajuste mieux qu'un autre modèle si la différence de BIC entre ces deux modèles se situe entre 2 et 6. Au-delà de 6, cette différence d'ajustement devient évidente.

L'évolution de la probabilité de choisir le paquet avantageux durant la passation de la CGT est formalisée à partir de l'équation suivante :

$$\log(\pi_i / 1 - \pi_i) = \beta_0 + \beta_1(temps)_i + \beta_2(temps)_i^2, \quad (1)$$

³ Le choix d'une telle modélisation se justifie par l'indépendance des réponses entre les enfants.

dans laquelle l'indice t renvoie à l'essai considéré. La probabilité de piocher dans le paquet avantageux à l'essai t est notée π_t . La variable *temps* est une variable discrète définie sur l'intervalle $\{1,2,3,\dots,100\}$ qui formalise l'avancement de la passation. Les coefficients β_0 , β_1 et β_2 renvoient respectivement à l'intercept, à la pente linéaire et à la pente quadratique du modèle. Les choix des enfants au cours de la passation sont modélisés en ajoutant différents prédicteurs au modèle formalisé par l'équation 1 : l'âge (3 groupes), la condition expérimentale (2 groupes), ainsi que les scores à la SOPT et à la tâche secondaire (covariables). Tous ces prédicteurs sont introduits en interaction avec la variable *temps* (mais pas avec *temps*² puisque nous cherchons uniquement à prédire la vitesse d'acquisition de la conduite de choix adapté, et non pas son accélération), afin d'évaluer leur effet sur l'évolution des choix des participants durant la passation de la CGT. Toutes les analyses sont conduites avec le logiciel R (package glm ; R Core Team, 2014) et les paramètres du modèle sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance.

3. Résultats

Le tableau 2 présente les moyennes et écarts-types des scores des enfants ainsi que les effectifs de chacun des groupes expérimentaux. On observe un effet significatif de l'âge sur les performances à la CGT, se traduisant par une différence de performance entre le groupe des enfants de 6-7 ans et ceux de 8-9 ans ($B = 0.65$, $SE = 0.05$, $p < .0001$) ainsi qu'une différence entre le groupe des enfants de 8-9 ans et ceux de 10-11 ans ($B = 0.12$, $SE = 0.06$, $p < .05$). La condition expérimentale a un effet significatif sur les performances à la CGT ($B = 0.12$, $SE = 0.06$, $p < .05$), ce qui est également vrai du score à la SOPT ($B = 0.09$, $SE = 0.01$, $p < .0001$).

Tableau 2. Effectifs, moyennes et écarts-types (parenthèses) des scores des enfants à la CGT (nombre de cartes piochées dans le paquet avantageux), à la SOPT et à la tâche secondaire, dans chacun des groupes d'âge et dans chacune des conditions expérimentales.

Groupe d'âge	Condition	Effectif	CGT	SOPT	Tâche secondaire
6-7 ans	Contrôle	18	60.22 (20.59)	8.78 (2.29)	-
	Double tâche	17	60.53 (21.91)	8.71 (2.64)	19.41 (3.74)
8-9 ans	Contrôle	18	78.44 (16.42)	8.89 (2.63)	-
	Double tâche	17	70.11 (21.72)	9.59 (1.76)	24.71 (3.61)
10-11 ans	Contrôle	18	78.94 (14.83)	10.56 (1.04)	-
	Double tâche	17	74.18 (19.87)	10.18 (1.70)	26.69 (3.34)

Afin de tester plus précisément nos hypothèses principales, nous comparons tout d'abord le modèle formalisé par l'équation 1 à un modèle très similaire mais dont l'intercept est fixé à 0,5 (soit 0 sur une échelle logit). Cette modification revient à affirmer que tous les enfants, quel que soit leur âge, débutent la CGT dans une situation d'incertitude totale, sans aucune raison de préférer l'un des deux paquets de cartes. Les résultats montrent que ce dernier modèle s'ajuste mieux aux données (BIC = 12554) que le modèle correspondant à l'équation 1 (BIC = 12564). De plus, en début de passation, la tendance moyenne à choisir le paquet avantageux augmente avec le nombre d'essais ($B = 3.34$, $SE = 0.15$, $p < .0001$) puis se stabilise à partir de l'essai 50 environ (composante quadratique du modèle, $B = -2.38$, $SE = 0.19$, $p < .0001$). La probabilité que l'enfant sélectionne une carte dans le paquet avantageux est 43% supérieure à l'essai 50 qu'au premier essai. A l'inverse, aucun changement dans cette probabilité de sélectionner le paquet avantageux n'est observé entre l'essai 50 et la fin de la passation. Nous remarquons de plus d'importants changements quant à la probabilité de choisir le paquet avantageux, qui se déroulent sur de courtes périodes de temps, tout particulièrement au cours des premiers essais de la passation. Par exemple, la probabilité que l'enfant pioche dans le paquet avantageux, telle que prédite par ce modèle, est 13% plus élevée à l'essai 10 qu'au premier essai.

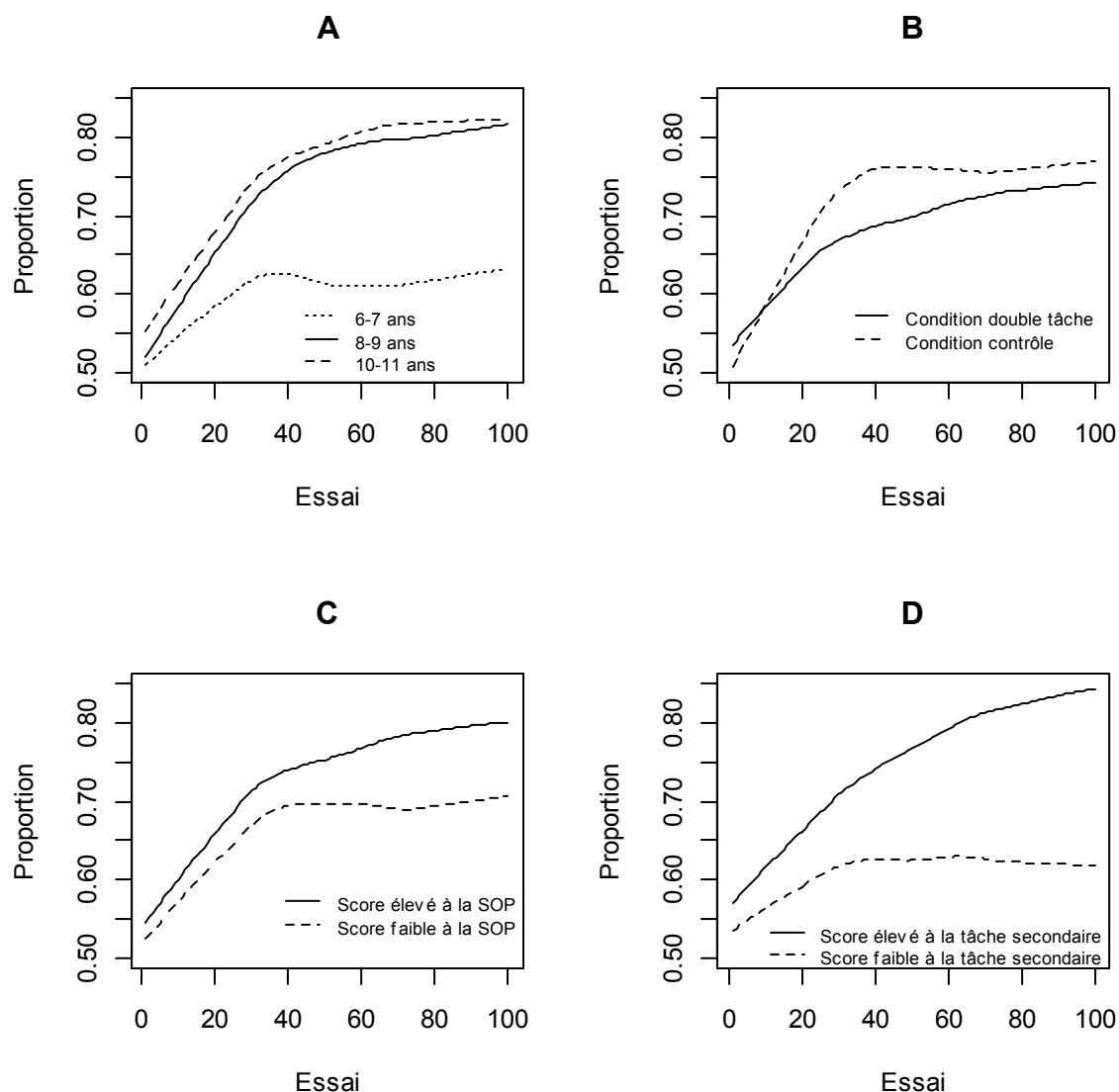


Figure 6. Proportion observée des enfants piochant dans le paquet avantageux, en fonction de l'essai (courbe obtenue pas lissage de Tukey), et : du groupe d'âge (A) ; de la condition expérimentale (B) ; du score des participants à la SOP (séparation par la médiane) (C) ; et du score des participants à la tâche secondaire (séparation par la médiane) (D).

3.1. Différences liées à l'âge dans l'acquisition d'une conduite de décision adaptée à la CGT

Nous testons l'effet de l'âge (trois modalités) sur l'évolution des performances à la CGT en incluant au meilleur modèle retenu jusqu'ici (i.e., un modèle comportant un intercept nul ainsi que *temps*, et *temps*² comme prédicteurs) un terme d'interaction entre *temps* et le groupe d'âge. Ce modèle présente un meilleur ajustement aux données (BIC = 12287). La

figure 6A présente la proportion observée d'enfants qui sélectionnent une carte dans le paquet avantageux, en fonction de l'essai et du groupe d'âge. La visualisation de cette figure suggère que notre modèle pourrait encore être amélioré en faisant l'hypothèse d'une absence de différence de performance entre les enfants de 8-9 ans et ceux de 10-11 ans. Nous construisons donc un nouveau modèle qui correspond à cette hypothèse, en conservant une interaction entre *temps* et le groupe d'âge, cette dernière variable ne comprenant désormais que deux modalités. L'ajustement de ce nouveau modèle (BIC = 12281) est meilleur que celui du précédent. L'évolution des conduites des enfants de 6-7 ans en direction d'une décision adaptée peut donc être considérée comme plus lente que celle des enfants plus âgés ($B = -1.34$, $SE = 0.08$, $p < .0001$). De plus, ce retard n'est pas rattrapé par la suite puisque les enfants de 6-7 ans se différencient toujours des enfants plus âgés au dernier essai de la passation, lors duquel la probabilité qu'ils piochent dans le paquet avantageux (telle qu'elle est prédite par le modèle) est de .53, contre .82 chez leurs aînés.

3.2. Mémoire de travail et évolution vers une conduite de décision adaptée à la CGT

L'existence d'un effet de la condition expérimentale (double tâche vs. contrôle) sur l'évolution de la probabilité de piocher dans le paquet avantageux est testée en ajoutant au meilleur modèle précédemment retenu (i.e., un modèle à intercept nul et *temps*, *temps*², ainsi qu'une interaction entre *temps* et le groupe d'âge [2 modalités] comme prédicteurs) un terme d'interaction entre *temps* et la condition expérimentale. Ce nouveau modèle présente à nouveau un meilleur ajustement (BIC = 12271). Comme on peut le voir sur la figure 6B, l'effet significatif d'interaction entre *temps* et la condition expérimentale ($B = -0.34$, $SE = 0.08$, $p < .0001$) est dû à une évolution plus faible des choix en direction du paquet avantageux chez les enfants placés en situation de double tâche.

Afin de tester la possibilité que cet effet de la condition expérimentale ne soit pas le même dans tous les groupes d'âges, nous estimons un autre modèle en ajoutant un effet d'interaction de troisième ordre, entre *temps*, le groupe d'âge (2 modalités) et la condition expérimentale, au modèle formalisé par l'équation 1 (intercept fixé à 0,5). L'ajustement augmente légèrement avec ce nouveau modèle (BIC = 12268). Des analyses supplémentaires montrent que ce meilleur ajustement provient du fait que l'effet d'interaction entre *time* et la condition expérimentale décrit dans le paragraphe précédent (i.e., une meilleure amélioration des performances dans la condition contrôle que dans la condition double tâche) n'est

significatif que chez les enfants de 8-9 et 10-11 ans ($B = 0.599$, $SE = 0.12$, $p < .0001$), mais pas chez les enfants les plus jeunes ($B = 0.02$, $SE = 0.12$, $p = .88$).

Afin de tenter d'améliorer le modèle considéré dans le paragraphe précédent, nous avons ajouté un effet d'interaction entre *temps* et le score à la SOPT, ce qui s'est à nouveau traduit par un gain d'ajustement ($BIC = 12225$), témoignant ainsi du fait que cet effet d'interaction est bien significatif ($B = 0.13$, $SE = 0.02$, $p < .0001$). La figure 6C permet de visualiser cet effet d'interaction, en distinguant deux groupes de sujets selon que leur score à la SOPT est supérieur ou non à la médiane de l'échantillon. On remarque que les enfants dont le score à la SOPT est élevé orientent plus rapidement leurs choix en direction du paquet avantageux. La figure 6C illustre également le fait que cet effet du score à la SOPT est plutôt faible en début de passation, puis s'accroît fortement. Le modèle prédit par exemple que la probabilité qu'un enfant pioche dans le paquet avantageux à l'essai 20 est de 0,63 si son score à la SOPT est de 8 (un score relativement faible correspondant au premier quartile de la distribution des scores à la SOPT), et de 0,65 si son score à la SOPT est de 11 (un score relativement élevé correspondant au troisième quartile de la distribution des scores à la SOPT), soit une différence de probabilité de 0,02 entre ces deux enfants. Au dernier essai de la passation, ces mêmes probabilités seront respectivement de 0,67 et 0,78, soit une différence de probabilité de 0,11⁴. En d'autres termes, l'amélioration de la performance entre l'essai 20 et le dernier essai est plus de cinq fois plus élevée chez un enfant dont le score à la SOPT est de 11 que chez un enfant dont le score à la SOPT est de 8. Pour conclure cette série d'analyses, retenons que le meilleur modèle retenu jusqu'à présent comporte un intercept nul, un effet linéaire de *temps*, un effet quadratique de *temps*, une interaction de troisième ordre entre *temps*, le groupe d'âge (6-7 ans vs. 8-9 et 10-11 ans), et la condition expérimentale, et un effet d'interaction entre *temps* et le score à la SOPT. Aucun autre modèle parmi tous ceux que nous avons testés, fût-il plus complexe, n'a permis d'obtenir un meilleur ajustement à nos données.

Les analyses considérées ci-dessous concernent uniquement les données des sujets placés en condition de double tâche ($n = 50$)⁵. Nous observons premièrement une corrélation de 0,43 entre le score à la tâche secondaire et le score à la SOPT ($t(48) = 3.25$, $p < .001$), ce qui suggère que la tâche secondaire effectuée par les sujets en parallèle à la résolution de la

⁴ Une telle différence de probabilité pourrait paraître relativement faible au premier abord. Elle représente en fait plus de 30% de la marge d'augmentation possible entre la valeur de la probabilité à l'essai 20 (0,67) et la valeur de probabilité maximale (1).

⁵ Les données obtenues à la tâche secondaire sont manquantes pour l'un des enfants.

CGT peut être interprétée comme mesurant l'efficacité de la MDT des sujets⁶. Deuxièmement, le modèle formalisé par l'équation 1 présente un moins bon ajustement (BIC = 6213) qu'un modèle basé sur l'équation 1 dans lequel l'intercept est fixé à 0,5 ((i.e., $\beta_0 = 0$ sur une échelle logit ; BIC = 6205). L'ajout d'un effet d'interaction entre *temps* et le score à la tâche secondaire améliore à nouveau l'ajustement du modèle (BIC = 5980). Cette amélioration de l'ajustement est due au fait que la progression des choix en direction du paquet avantageux est d'autant plus rapide que le score à la tâche secondaire est élevé ($B = 0.19$, $SE = 0.01$, $p < .0001$). Cet effet peut être apprécié sur la figure 6D, construite sur la base d'une séparation des sujets en deux effectifs égaux, de part et d'autre de la médiane. On remarque que le score à la tâche secondaire présente un effet qui, bien que faible, s'observe dès le début de la passation de la CGT, puis ne cesse de s'accroître. La performance à la CGT des enfants dont le score à la tâche secondaire est faible cesse de s'améliorer assez rapidement après le début de la passation, à l'inverse de celle des sujets dont le score à la tâche secondaire est élevé, qui ne cesse de s'améliorer. Ce modèle prédit que la probabilité qu'un enfant pioche une carte dans le paquet avantageux à l'essai 20 est de 0,58 si le score de cet enfant à la tâche secondaire est de 20 (un score relativement faible correspondant au premier quartile de la distribution des scores à la tâche secondaire). Elle est de 0,63 si le score de cet enfant à la tâche secondaire est de 26 (un score relativement élevé correspondant au troisième quartile de la distribution des scores à la SOPT), soit une différence de 0,05 entre ces deux probabilités. Pour ces deux mêmes scores à la tâche secondaire, les probabilités correspondantes à l'essai 60 seraient respectivement de 0,60 et 0,82, soit une différence de 0,22.

4. Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'étudier la manière dont l'efficacité de la MDT chez l'enfant est susceptible de rendre compte de la vitesse d'acquisition d'une conduite de décision adaptée à la CGT. Comme mentionné en introduction, la MDT est supposée permettre la maintenance et la mise à jour des informations nécessaires à la résolution de la CGT, ainsi que la surveillance de sa performance par l'individu. L'approche intergroupe que nous avons adoptée a permis de corroborer cette hypothèse. En effet, les enfants auxquels on demande de résoudre une tâche secondaire en parallèle à la passation de la CGT (une situation qui sollicite particulièrement leur MDT) témoignent d'une vitesse d'acquisition plus faible que les enfants placés en condition contrôle, qui devaient simplement résoudre la CGT. De

⁶ Cette corrélation demeure significative lorsque l'on contrôle l'âge des sujets.

plus, le score des enfants à la tâche secondaire est corrélé positivement à une mesure de l'efficacité de leur MDT (i.e., leur score à la SOPT), ce qui indique que les participants placés en situation de double tâche ont, comme attendu, alloué des ressources de MDT à la résolution de la tâche secondaire.

La tâche secondaire utilisée dans notre étude présente l'avantage d'être relativement écologique puisque les informations à mémoriser sont inhérentes à la CGT (pertes aux quatre essais précédents). On pourrait cependant faire remarquer que le choix de cette tâche secondaire est en partie inopportun puisqu'il focalise l'attention des participants sur un indice qui les aide à répondre correctement à la CGT. Toutefois, nos résultats ne semblent pas aller dans le sens de cette critique puisque les participants placés en situation de double tâche ont une performance moyenne qui est plus faible que celle de ceux placés en situation contrôle. On pourrait spéculer sur le fait que cette différence entre les deux conditions aurait pu être plus importante si nous avions choisi une tâche secondaire n'impliquant pas le traitement d'informations pertinentes à la résolution de la CGT.

Nous voudrions par ailleurs souligner le fait que, bien que la performance à la CGT soit plus faible en condition de double tâche (en comparaison à la condition contrôle), une relation positive est observée entre le score à la tâche secondaire et le score à la CGT. Ce résultat nous semble important puisqu'on aurait pu s'attendre au contraire à une relation négative entre les scores à la tâche secondaire et à la CGT, sous l'hypothèse d'un compromis (« *tradeoff* ») entre les deux tâches (i.e., les enfants obtiennent de meilleures performances à la CGT parce qu'ils n'allouent pas leurs ressources attentionnelles à la résolution de la tâche secondaire). La relation positive observée entre les scores à la tâche secondaire et à la CGT va donc à l'encontre d'une argumentation en termes de compromis. Ce résultat montre que les enfants qui obtiennent de bonnes performances à la CGT en condition double tâche sont également ceux qui parviennent à mobiliser leur MDT sur des informations pertinentes à la résolution de la CGT (pertes aux essais précédents).

Avant de conclure sur les résultats obtenus dans le cadre de l'approche intergroupe, nous voudrions exprimer une réserve quant à l'effet que nous venons de commenter, celui de la condition expérimentale sur les performances à la CGT. Avant d'effectuer l'ensemble des analyses présentées ci-dessus, nous avons réalisé une autre série d'analyses, assez similaire quant aux variables analysées, mais différente dans la famille de modèles auxquels elle se rattache : les modèles linéaires généralisés à effets mixtes (GLMM ; pour une introduction à l'utilisation des modèles à effets mixtes en psychologie du développement, voir Wainwright,

Leatherdale, & Dubin, 2007). L'un des principaux avantages de ces modèles est qu'ils permettent d'envisager la possibilité que l'effet d'une (ou de plusieurs) variable(s) indépendante(s) puisse varier selon les individus de l'échantillon. Il suffit pour cela que le paramètre du modèle renvoyant à l'effet de la variable indépendante considéré (généralement symbolisé par β dans les équations) ne soit plus considéré comme prenant la même valeur chez tous les individus de l'échantillon (comme c'était le cas dans les analyses présentées ci-dessus), mais comme constituant une variable aléatoire suivant sa propre loi de distribution. Nous avons plus précisément construit des modèles strictement équivalents à ceux que nous avons présentés ci-dessus, mais dans lesquels les effets de *time* et de *time*² peuvent varier d'un individu à l'autre. En d'autres termes, nous ne modélisons pas une courbe d'apprentissage moyenne (comme dans les analyses que nous avons présentées), mais tenons compte de l'existence de différences interindividuelles dans l'apprentissage de la CGT, en modélisant un ensemble de courbes d'apprentissage individuelles dont les paramètres respectifs suivent une loi de distribution (normale). Or ces analyses se sont révélées aboutir aux mêmes résultats que tous ceux présentés ci-dessus, à l'exception notable de l'effet de la condition expérimentale. Ceci suggère que la différence entre les vitesses *moyennes* d'apprentissage de la CGT dans les deux conditions ne doit pas masquer une importante variabilité interindividuelle de la vitesse d'apprentissage au sein de ces conditions. D'autres facteurs que la MDT seraient sans doute à évoquer pour rendre compte de cette variabilité inexplicée dans nos analyses, comme par exemple le rôle des processus émotionnels auxquels nous avons fait allusion en introduction.

En complément à l'approche intergroupe dont nous venons de discuter, les résultats obtenus dans le cadre de l'approche interindividuelle corroborent également l'hypothèse selon laquelle la MDT joue un rôle dans l'acquisition d'une conduite de décision adaptée à la CGT. On remarque en effet que le score des enfants à la SOPT est d'autant plus élevé que leur vitesse d'acquisition d'une conduite de décision adaptée l'est également. Puisque la SOPT est considérée comme mesurant l'efficacité de la MDT des participants, nous en concluons que l'efficacité des fonctions assurées par la MDT, à savoir le maintien temporaire et la mise à jour de l'information, ainsi que la surveillance de la performance, qui diffère selon les individus, est en partie responsable de leur performance à la CGT. Les participants dont l'efficacité en MDT est élevée ont donc tendance à développer plus rapidement une conduite de décision adaptée à la CGT, relativement à ceux dont cette efficacité est faible.

Cet ensemble de résultats vient contredire la majorité des études que nous avons citées en introduction, et en particulier celles de Crone et van der Molen (2004), Crone et al. (2005),

Smith, Xiao, et Bechara (2012), et Hooper et al. (2004). Comme mentionné précédemment, aucune de ces études n'a permis de mettre en évidence un effet de l'âge sur l'évolution de la performance au cours de la passation de la tâche du casino avant l'âge de 12-13 ans. Nous avons insisté sur le fait que cette absence de sensibilité à l'âge pose particulièrement problème lorsque l'on cherche à prédire la performance à la tâche du casino par un processus aussi sensible à l'âge que la MDT. En utilisant la CGT, une tâche bien adaptée aux jeunes enfants car plus simple, nous sommes parvenus à montrer que la vitesse d'acquisition d'une conduite de décision adaptée dépend du groupe d'âge auquel l'enfant appartient, cette vitesse d'acquisition étant plus faible chez les enfants de 6-7 ans, et équivalente chez les enfants de 8-9 ans d'une part et 10-11 ans d'autre part. La possibilité que nos résultats soient dus au fait que la CGT est sensible à l'âge est cohérente avec les résultats obtenus chez des enfants plus jeunes (3 et 4 ans) par Kerr et Zelazo (2004), Hongwanishkul et al. (2005), et Gao, Wei, Bai, Lin, et Li (2009). Nous interprétons plus précisément notre pattern de résultats comme témoignant de la sensibilité à l'âge de la CGT jusqu'à l'âge de 8-9 ans. Puisque ni la vitesse d'acquisition d'une conduite adaptée ni le niveau de performance finale ne diffèrent entre les enfants de 8-9 ans et ceux de 10-11 ans, nos résultats indiquent également que la CGT ne permet pas de mettre en évidence une amélioration de la performance qui serait sensible à l'âge dans une population plus âgée. L'ensemble de ces résultats indique finalement que la plupart des versions de la tâche du casino (i.e., celles qui reprennent les principes généraux de l'Iowa Gambling Task) sont trop difficiles chez les enfants de 8-9 à 12-13 ans, à l'exception de la CGT qui est au contraire trop facile. Une hypothèse alternative, qui nous semble moins plausible, serait de supposer qu'il n'existe aucun développement dans les conduites de PDD sous incertitude entre les âges de 8-9 ans et 12-13 ans.

Une autre limite commune à la plupart des études précédemment citées, qui a le potentiel d'expliquer pourquoi celles-ci n'ont pas permis de mettre en évidence une relation entre les performances à la tâche du casino et l'efficacité de la MDT, est que, à notre connaissance, aucune d'entre elles n'a fait état d'une amélioration des performances des enfants au cours de la passation de la tâche du casino. Tout se passe comme si les enfants échouaient à réduire leur incertitude quant au caractère plus ou moins avantageux des différents paquets de cartes, ce qui témoigne à nouveau du caractère trop difficile des différentes versions de la tâche du casino utilisées dans ces études. En supplément à ce problème de difficulté, il nous semble également important de souligner une autre caractéristique de ces études qui peut expliquer l'absence d'amélioration de la performance au cours de la passation de la tâche du casino. Celle-ci renvoie à la manière dont cette

amélioration de la performance est le plus souvent modélisée, qui se situe à un niveau de description pouvant sembler inadéquat si l'on cherche à rendre compte de la dynamique d'apprentissage des enfants. En effet, les études portant sur la tâche du casino ont généralement adopté une présentation et une analyse des données par blocs d'essais (e.g., en résumant ces données par les valeurs moyennes obtenues dans des blocs de 20 essais), un choix qui revient à affirmer que la performance au sein d'un bloc d'essais est constante, et peut donc entraîner une spécification inadéquate du modèle d'apprentissage (un risque contre lequel Newell, Mayer-Kress, Hong et Liu (2010) mettent en garde). Une telle modélisation en blocs d'essais (20 essais classiquement) est en outre totalement arbitraire, et ne correspond en aucune manière à ce dont les participants ont fait l'expérience durant la passation. Ces participants répondent durant 100 essais successifs, qui ne sont séparés par aucune pause (e.g., tous les 20 essais), et il nous semble donc dommage d'utiliser une modélisation incohérente au regard de l'expérience des sujets. Il est en effet tout à fait possible qu'au sein d'un bloc (de 20 essais par exemple), des changements très importants interviennent. C'est d'ailleurs précisément ce que nous avons mis en évidence dans cette étude en choisissant un niveau d'analyse qui est celui de l'essai, une approche qui nous a offert une représentation plus détaillée de la dynamique d'acquisition d'une préférence pour l'un des paquets relativement à l'autre. Le choix de cette modélisation nous a permis de montrer que la probabilité de piocher dans le paquet avantageux (a) est initialement la même que celle de piocher dans le paquet désavantageux (incertitude totale), (b) augmente principalement durant les premiers essais de la passation, (c) présente une augmentation au cours du temps qui est de forme curvilinéaire, et (d) cesse pratiquement d'augmenter durant la deuxième moitié de la passation.

Cette méthode consistant à analyser les données au niveau de l'essai, et plus généralement à s'intéresser à la variabilité intra-individuelle au cours de la passation d'une tâche, s'inscrit dans une approche microgénétique, dont les avantages ont été soulignés à de nombreuses reprises ces dernières années (e.g., Siegler, 1995). Cette approche consiste à analyser des conduites psychologiques à des périodes au cours desquelles le changement est particulièrement important, en se situant à un niveau d'analyse assez fin (idéalement l'essai), ceci dans l'objectif d'inférer le processus qui a donné lieu à ce changement. Cette approche microgénétique fut complétée dans notre étude par une comparaison de niveau macrogénétique (comparaison de groupes d'âges différents permettant une étude du changement sur de longues périodes de temps). En ayant recours simultanément à ces deux approches, notre objet d'étude peut finalement être défini comme le *développement de*

l'acquisition d'une conduite de choix adaptée en situation de PDD sous incertitude. Une telle combinaison des approches micro- et macrogénétiques dans les travaux de psychologie du développement est recommandée par Lee et Karmiloff-Smith (2002). Son potentiel est davantage exploitable à l'heure actuelle suite aux récents progrès dans le champ de la modélisation statistique, qui permettent désormais d'intégrer de manière flexible les niveaux d'analyse micro- et macrogénétiques. Un choix préférable au nôtre aurait par exemple consisté à utiliser une « approche longitudinale par mesure en rafale » (burst measurement longitudinal approach ; Nesselroade, 1991). Cette approche est plus exigeante, notamment en termes de recueil des données puisque le changement macrogénétique est observé de manière longitudinale, mais elle est également l'une des plus adaptées afin d'intégrer l'analyse des deux niveaux de changement.

En conclusion, cette étude apporte quelques éléments à l'appui de l'hypothèse selon laquelle l'efficacité de la MDT des enfants joue un rôle dans leur adaptation aux situations de PDD sous incertitude. Cette conclusion s'oppose à celle proposée par la majorité des études précédentes sur le sujet, mais rejoint néanmoins celles de Hongwanishkul et al. (2005) et de van Duijvenvoorde et al. (2012). Plus généralement, cette étude apporte quelques éléments de réponse à la question de savoir si la résolution de la tâche du casino dépend des aspects chauds de la cognition, associés au fonctionnement du CPFVM (Bechara et al., 1994; Bechara et al., 1998), ou aux aspects froids, associés au fonctionnement du cortex préfrontal dorsolatéral (Manes et al., 2002). Notre étude plaide en faveur d'une prise en compte complémentaire, en montrant comment les aspects froids peuvent affecter la prise de décision chez l'enfant, sans toutefois remettre en cause le rôle des aspects chauds.

Chapitre 5 : Analyse longitudinale du rôle des fonctions exécutives en prise de décision sous incertitude chez l'enfant de 5 à 7 ans

1. Introduction

L'Iowa Gambling Task (IGT; Bechara, Damasio, Damasio, & Anderson, 1994), présentée ci-dessus, a été largement employée pour étudier la prise de décision sous incertitude, tant auprès de populations cliniques que non cliniques. Malgré le nombre de travaux visant à identifier les processus psychologiques mobilisés par cette tâche, aucun consensus n'a pu être clairement établi. Rappelons que Bechara et al. (1994) ont proposé la première tentative en ce sens, dans une étude réalisée auprès de patients atteints de lésions du cortex préfrontal ventro-médian, et ont montré que ces patients obtiennent des performances faibles à l'IGT. Dans le cadre de l'hypothèse des marqueurs somatiques (Damasio, 1994), la préférence des patients pour les paquets désavantageux a été interprétée comme témoignant de leur difficulté à intégrer leurs réactions émotionnelles sous la forme de marqueurs somatiques qui permettraient de guider leurs décisions futures. Des difficultés similaires ont depuis été rapportées dans des études réalisées auprès de populations diverses, comme par exemple des patients toxicomanes (Bechara & Damasio, 2002), des joueurs pathologiques (Cavedini, Riboldi, Keller, D'Annuncci, & Bellodi, 2002), des enfants et adolescents manifestant des troubles déficitaires de l'attention avec ou sans hyperactivité (Toplak, Jain, & Tannock, 2005), ou des personnes présentant des troubles de l'alimentation (Cavedini et al., 2004).

1.1. Tâche du casino et fonctions exécutives

Dans leur article princeps, Bechara et al. (1994) font allusion à l'hypothèse selon laquelle la mémoire de travail pourrait jouer un rôle dans la résolution de l'IGT, mais écartent cette interprétation dans un premier temps, au profit d'une explication formulée dans le cadre de l'hypothèse des marqueurs somatiques. Nous avons vu que certains auteurs comme Maia et McClelland (2004) ont remis en cause l'apport de l'hypothèse des marqueurs somatiques, en argumentant que les participants qui choisissent de piocher dans le paquet avantageux ne sont pas nécessairement guidés de manière non consciente par leurs réactions émotionnelles, mais

plutôt par une connaissance explicite de la séquence des gains et des pertes qu'occasionnent les choix dans les différents paquets. La recherche des processus susceptibles de permettre une telle connaissance, et d'adapter les décisions futures sur la base des expériences passées, s'est rapidement orientée vers les fonctions exécutives. Un champ de recherche s'est ainsi constitué récemment autour de l'hypothèse du rôle que les fonctions exécutives pourraient jouer dans la résolution de la tâche du casino (en particulier l'IGT).

L'une des modélisations du concept de fonctions exécutives les plus souvent évoquées est celle proposée par Miyake et al. (2000, 2012, voir aussi Friedman et al., 2008), qui les définissent comme des mécanismes de contrôle dont la visée très générale permet de moduler les opérations de nombreux processus cognitifs qui leur sont subordonnés, et ainsi de réguler la dynamique de la cognition individuelle. A partir des données obtenues auprès de 137 participants (un effectif qui peut paraître assez faible au regard des objectifs des auteurs) ayant résolu 9 épreuves classiquement considérées comme nécessitant un contrôle cognitif de son activité par le participant, les auteurs mobilisent l'analyse factorielle confirmatoire afin d'extraire des facteurs présentant un certain degré de communauté dans leur manière de différencier les individus à l'ensemble des épreuves. Cette analyse les amène à conclure en faveur d'un modèle à trois dimensions qui, bien que distinctes, présentant des intercorrélations assez élevées : flexibilité, mise à jour en mémoire de travail, et inhibition (voir figure 4, chapitre 3, partie 2.1.1.).

La fonction la plus étudiée en relation avec la performance aux tâches de gambling est la mémoire de travail, dont nous avons déjà étudié le rôle dans le chapitre 4. Pour rappel, l'hypothèse principale consiste à supposer que les gains et pertes dont le participant fait l'expérience à chacun des essais de la passation doivent être temporairement maintenus en mémoire, et mis à jour au fur et à mesure de l'avancement de la passation. Un autre argument issu des travaux du champ de la neuropsychologie consiste à affirmer que la mémoire de travail et la prise de décision sous incertitude font intervenir les mêmes zones cérébrales, situées dans le cortex préfrontal. De nombreuses études ont également posé l'hypothèse selon laquelle l'inhibition et la flexibilité pourraient être mobilisées par les individus qui résolvent l'IGT (e.g., Brand, Recknor, Grabenhorst, & Bechara, 2007; Carlson, Zayas, & Guthormsen, 2009; Dunn, Dalgleish, & Lawrence, 2006; Noël, Bechara, Dan, Hanak, & Verbanck, 2007; Pecchinienda, Dretsch, & Chapman, 2006; Van Duijvenvoorde, Jansen, Bredman, & Huizenga, 2012). L'une des stratégies communément employées lors de la passation de l'IGT, et en particulier lorsque celle-ci débute, consiste en effet à piocher des cartes dans les paquets

qui permettent fréquemment d'obtenir des gains élevés, c'est à dire dans les deux paquets désavantageux. L'obtention d'une bonne performance pourrait alors passer par une inhibition de cette tendance initiale à se focaliser uniquement sur les gains. Ce processus d'inhibition pourrait conduire à un changement de perspective (flexibilité), qui consisterait à passer d'un intérêt pour l'obtention immédiate de gains élevés à une focalisation sur des buts à plus long terme, via la considération non plus seulement des gains mais également des pertes éventuelles, et donc à une préférence pour les paquets avantageux (Bechara & Damasio, 2002; Hooper, Luciana, Conklin, & Yarger, 2004). De ces hypothèses découle également l'idée selon laquelle un déficit des processus d'inhibition et de flexibilité constitue une source de difficultés aux tâches de gambling et, de manière plus générale, favorise l'adoption de conduites à risque.

Une revue de la littérature réalisée par Toplak, Sorge, Benoit, West et Stanovich (2010) a recensé jusqu'à 43 études ayant interrogé les liens corrélationnels susceptibles d'exister entre l'IGT (ou des variantes de l'IGT) et les trois fonctions exécutives mentionnées ci-dessus. La majorité de ces études (72%) porte sur des individus dont le fonctionnement a été diagnostiqué comme pathologique. Le résultat principal à retenir de cette revue de la littérature est que 30% des études recensées ont fait état d'une corrélation significative entre l'IGT et au moins l'une des trois fonctions exécutives considérées (36% pour l'inhibition, 28% pour la flexibilité et 27% pour la mémoire de travail). Les auteurs en concluent pour l'essentiel que les construits de prise de décision et de fonctions exécutives sont indépendants. On peut néanmoins émettre quelques réserves quant à cette conclusion sur la base des caractéristiques des études recensées. L'effectif moyen de ces études est de 29 participants, un nombre qui est de toute évidence trop faible lorsque l'on cherche à obtenir des estimations fiables avec des méthodes d'analyse corrélationnelles (voir par exemple Schönbrodt & Perugini, 2013). A l'appui de cette affirmation, on peut remarquer que si l'on sélectionne uniquement les études dont l'effectif est supérieur à 50 sujets (un effectif qui reste néanmoins insuffisant), le pourcentage d'études faisant état d'au moins une corrélation significative atteint 56%. On peut ainsi imaginer que des effectifs plus élevés (au moins 100 sujets) renforceraient l'hypothèse d'une relation entre fonctions exécutives et prise de décision sous incertitude.

Parmi les études examinées par Toplak et al. (2010), certaines portent sur une population d'enfants, une population caractérisée par un développement majeur ainsi que par d'importantes différences interindividuelles dans la capacité à réguler et à contrôler son

activité. De même que chez l'adulte, la question du rôle des fonctions exécutives dans l'adaptation des enfants aux situations de prise de décision sous incertitude est assez controversée. Dans le chapitre 4, nous avons déjà présenté les principales études qui se sont penchées sur le rôle de la mémoire de travail, tant dans une approche expérimentale que corrélationnelle. Les conclusions de ces travaux quant à l'implication de la mémoire de travail étaient comme nous l'avons vu assez mitigées chez l'adulte, et tendaient plutôt à rejeter l'hypothèse chez l'enfant. Nous avons vu que notre propre travail, qui se différencie des travaux antérieurs sous plusieurs aspects (tâche simplifiée pour enfants, modélisation statistique tenant compte de la dynamique d'apprentissage), offre des résultats qui confortent au contraire l'hypothèse d'une implication de la mémoire de travail, en particulier entre les âges de 8-9 ans et 10-11 ans. Aucune étude n'a en revanche été réalisée chez l'enfant concernant le rôle du processus de flexibilité, et seulement deux études concernant le rôle de l'inhibition. Hooper et al. (2004) observent une corrélation non significative entre le score à l'IGT et le score à l'épreuve du Go/No-Go, tandis que Lamm, Zelazo, & Lewis (2006) rapportent une corrélation significative entre ces deux mêmes tâches. Les critiques que nous avons déjà développées dans le chapitre 4 concernant le choix de l'IGT chez l'enfant ainsi que la manière de coder la performance à l'IGT sous la forme d'un score moyen, peuvent également être adressées à ces deux études. Étant donné que leurs conclusions divergent par ailleurs, des investigations supplémentaires nous semblent à mener afin d'apporter un éclairage sur ces questions.

1.2. Objectifs de l'étude

L'essentiel des travaux ayant interrogé la relation entre prise de décision sous incertitude et fonctions exécutives s'inscrit dans une perspective corrélationnelle, mais non développementale. Ces études considèrent donc implicitement que la structure des différences interindividuelles observées à des épreuves comme l'IGT et les tâches évaluant les fonctions exécutives, lorsqu'elle est étudiée à un instant donné, nous renseigne fidèlement sur l'état de cette structure tout au long du développement de l'individu. Cette structure est en d'autres termes considérée comme stable au cours du temps, et la variabilité que l'on observerait sans doute en la mesurant à plusieurs occasions est attribuée à de l'erreur de mesure. Ce postulat implicite nous semble tout à fait discutable, en particulier lorsque les travaux portent sur une population d'enfants. L'enfance se caractérise en effet par d'importants changements dans l'adaptation aux situations impliquant les fonctions exécutives et la prise de décision. Certains

travaux ont tenté de tenir compte de ce phénomène en comparant des groupes d'enfants d'âges différents (e.g., Crone et van der Molen, 2004; Crone, Bunge, Latenstein, et van der Molen, 2005; Van Duijvenvoorde et al., 2012), un choix que nous avons également effectué dans le chapitre 4. La remarque que l'on pourrait néanmoins adresser à ces travaux est que l'approche transversale qu'ils adoptent permet uniquement d'étudier le développement à un niveau moyen. Cette approche exclut la possibilité d'envisager des différences interindividuelles dans les trajectoires de développement, que seule une approche longitudinale permet d'étudier. Or, en particulier lorsque ces différences de trajectoires sont importantes, on peut se demander le sens qu'il y a à étudier le niveau moyen. Celui-ci peut très bien être stable au cours du temps malgré la présence d'une forte variabilité dans les trajectoires de développement individuelles (si par exemple les performances de la moitié de l'échantillon tendent à augmenter, tandis que celles de l'autre moitié diminuent). Ainsi, le premier objectif de cette nouvelle étude sera d'étudier longitudinalement le développement de l'enfant dans le domaine de la prise de décision sous incertitude (opérationnalisée par la Children's Gambling Task) et des fonctions exécutives (opérationnalisées par la Self-Ordered Pointing Task, le Go/No-Go et le Wisconsin Card Sorting Test). Chaque enfant sera rencontré à deux reprises séparées d'un intervalle de 10 mois⁷.

Nous nous demanderons également si les différences interindividuelles de performance, tant en ce qui concerne l'épreuve de prise de décision sous incertitude que les épreuves de fonctions exécutives, doivent être mesurées de manière uniquement quantitative, comme c'est le plus souvent le cas, ou si des différences de nature qualitative peuvent également être identifiées. Les travaux présentés ci-dessus font généralement le choix d'une mesure essentiellement quantitative. Par exemple, l'adaptation des individus dans le domaine de la prise de décision sous incertitude est évaluée sur la base de leur score à l'IGT, calculé en dénombrant simplement le nombre d'essais durant lesquels le sujet a pioché au sein du paquet avantageux ou, ce qui est presque équivalent, en soustrayant à ce nombre le nombre d'essais durant lesquels le sujet a pioché au sein du paquet désavantageux. Ces études acceptent donc l'idée selon laquelle les différences interindividuelles caractérisant l'adaptation des individus à l'IGT sont essentiellement quantitatives, et peuvent s'ordonner le long d'un même continuum. Ce postulat peut sembler critiquable si l'on admet que des différences de nature qualitative peuvent également intervenir, renvoyant par exemple à des différences dans les

⁷ Nous employons donc le terme d'« approche longitudinale » en un sens restreint, puisque l'étude ne comprend que deux occasions de mesure (le terme d'approche test/retest, qui se rattache davantage à l'étude de la fidélité, aurait également pu convenir).

stratégies que les sujets mobilisent. Le deuxième objectif de notre travail consistera ainsi à tenter d'identifier de telles différences qualitatives. Au sein des différences interindividuelles de trajectoires développementales dans les scores observés à chacune des épreuves, nous tenterons d'identifier des groupes de sujets présentant des trajectoires qualitativement similaires. Si nous y parvenons pour une épreuve donnée, nous considérerons par la suite que l'évolution de la performance des sujets à cette épreuve est mesurée par cette différenciation qualitative. Si nous n'y parvenons pas, nous conserverons la différenciation quantitative plus classique, en nous appuyant sur un score de différence entre les deux occasions de mesure.

Après avoir ainsi caractérisé les différences dans les trajectoires développementales observées à chacune des épreuves, nous nous pencherons vers notre objectif principal qui interroge la structure des relations entre ces différentes épreuves. Nous tenterons plus précisément de prédire le développement de l'enfant en prise de décision sous incertitude par son développement dans le domaine du fonctionnement exécutif (mise à jour en mémoire de travail, inhibition et flexibilité). Notre hypothèse principale est celle d'un parallélisme des trajectoires développementales des individus dans ces différents domaines, autrement dit d'une corrélation entre les trajectoires de développement propres à des construits psychologiques distincts. Si l'on prend l'exemple de la relation entre l'épreuve de prise de décision sous incertitude et l'épreuve de mémoire de travail, nous nous attendons à ce que les enfants qui progressent le plus (respectivement le moins) à l'une de ces épreuves soient également ceux qui progressent le plus (respectivement le moins) à l'autre épreuve.

2. Méthode

2.1. Participants

L'échantillon se compose de 172 enfants scolarisés dans six écoles de l'agglomération rennaise, dont 78 garçons et 94 filles. Au commencement de l'étude, les enfants sont inscrits en classe de Grande Section (GS ; N = 88) et en Classe Préparatoire (CP ; N = 84), et sont âgés de 5 à 7 ans (moyenne : 6 ans ; E.T. : 0,6 ans). Lors de la deuxième vague de mesure, l'échantillon ne comprend plus que 166 enfants, soit une « mortalité expérimentale » de 3%. Une autorisation parentale a été obtenue pour chaque passation.

2.2. Matériel et procédure

Toutes les tâches décrites ci-dessous ont été informatisées à partir du logiciel Inquisit Computer Software (2010), et sont présentées à l'enfant sur une tablette tactile (11,6’’). Un clavier est ajouté à la tablette lorsque la barre d'espace est nécessaire pour répondre. Les passations se déroulent individuellement et durent environ 50 minutes. L'enfant commence par résoudre la Children's Gambling Task (CGT) puis, dans un ordre contrebalancé, la Self-Ordered Pointing Task (SOPT), le Wisconsin Card Sorting Test (WCST) et la tâche du Go/No Go (GNG). Lors de la première occasion de mesure (172 enfants), les données sont manquantes pour un enfant à la CGT, pour deux enfants à la SOPT, pour deux enfants au WCST, et pour deux enfants au GNG. Lors de la deuxième occasion de mesure (166 enfants), les données sont complètes pour la CGT, manquantes pour un enfant à la SOPT, complètes pour le WCST, et manquantes pour deux enfants au GNG.

2.2.1. Children's Gambling Task (CGT)

La CGT présente les mêmes caractéristiques générales que la version utilisée dans le chapitre 4. Les seules modifications apportées sont i) l'informatisation de la tâche sur tablette tactile (cf. figure 7) et ii) la disparition des vignettes autocollantes qui masquaient les pertes dans la version manuelle de la tâche. Le score correspond au nombre de cartes piochées dans le paquet avantageux (compris entre 0 et 100).

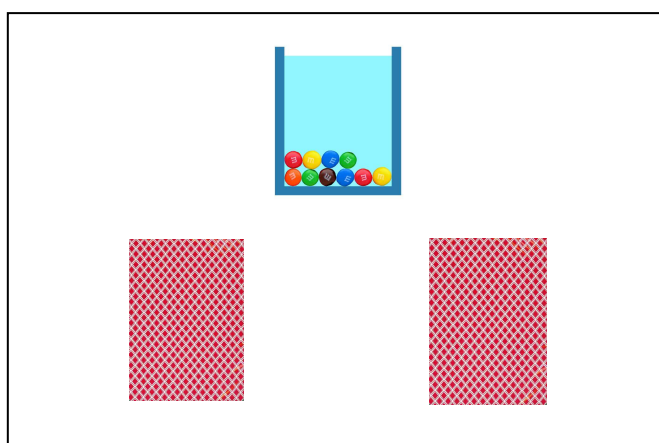


Figure 7. Capture d'écran de la version informatisée de la CGT.

2.2.2. *Self-Ordered Pointing Task (SOPT)*

La SOPT (Petrides & Milner, 1982), désormais informatisée, présente les mêmes caractéristiques générales que la version utilisée dans le chapitre 4. Nous avons simplement augmenté le score maximal qu'il est possible d'atteindre, qui est de 14 dans cette nouvelle étude (11 dans la précédente).

2.2.3. *Wisconsin Card Sorting Test (WCST)*

Le WCST (Grant & Berg, 1948) est une tâche considérée comme mesurant la flexibilité cognitive. Dans cette version adaptée aux enfants, on utilise un ensemble de cartes sur lesquelles des animaux sont représentés, ceux-ci pouvant différer par leur couleur (rouge, bleu, vert, ou jaune) et par leur forme (chat, oiseau, lapin, cheval). Au début de la passation, quatre cartes sont alignées en bas de l'écran, sur lesquelles figurent respectivement un chat rouge, un oiseau vert, un lapin jaune, et un cheval bleu.

L'expérimentateur demande d'abord à l'enfant de décrire chacune des cartes, afin de s'assurer qu'il perçoit bien les différences de forme et de couleur. La tâche commence ensuite par l'apparition d'une nouvelle carte en haut de l'écran, et l'expérimentateur demande à l'enfant laquelle des quatre cartes du bas « va bien » avec celle du haut. Au cours des premiers essais, une bonne réponse est obtenue en choisissant la couleur comme critère de similarité. Lorsque l'enfant trie la carte correctement (respectivement incorrectement), un « smiley » souriant (respectivement triste) apparaît sur l'écran. Après que l'enfant a répondu, la carte placée en haut de l'écran est remplacée par une nouvelle carte, ce qui correspond au début d'un nouvel essai. Si l'enfant parvient à trier correctement 6 cartes successives, le critère change subitement sans qu'il n'en soit averti, et il faut désormais choisir la forme comme critère de sélection. Si l'enfant y parvient 6 fois consécutives, le critère change à nouveau pour la couleur. Le quatrième et dernier critère est à nouveau la forme. La tâche s'interrompt si, à un quelconque moment de la passation, l'enfant ne parvient pas à trier correctement 6 cartes successives au cours de 20 essais. Le score obtenu par l'enfant correspond finalement au nombre de critères auxquels il parvient à s'adapter, d'une valeur comprise entre 0 et 4.

2.2.4. *Tâche du Go/No Go (GNG)*

Le GNG est une tâche classiquement utilisée afin d'évaluer la capacité de l'enfant à inhiber une réponse prépondérante. Dans la version utilisée dans cette étude, on demande à

l'enfant d'appuyer aussi rapidement que possible sur la barre d'espace du clavier dès qu'un stimulus "Go" apparaît sur l'écran (image représentant une salade, un pain, une poire ou une banane), mais d'inhiber cette réponse dès qu'un stimulus "No-Go" apparaît (image représentant un crocodile). L'épreuve commence avec 15 essais de démonstration ne comportant que des stimuli "Go", durant lesquels l'enfant est encouragé à appuyer le plus rapidement possible. Puis on propose à l'enfant de poursuivre le même jeu, mais en prenant garde de ne pas appuyer lorsqu'un crocodile apparaît. La tâche comporte 90 essais, correspondant à 80 stimuli "Go" et 10 stimuli "No-Go" mélangés aléatoirement. Le score que nous utilisons correspond au pourcentage de fausses alarmes, c'est à dire au pourcentage de fois où l'enfant appuie sur le bouton en présence d'un stimulus "No-Go".

2.3. Analyses statistiques

Pour chacune des épreuves, les données ont été analysées à partir d'un modèle de régression mixte à classes latentes (Muthén & Asparouhov, 2009). Comme son nom l'indique, ce modèle intègre les caractéristiques des modèles mixtes (ou modèles à coefficients aléatoires) et des analyses en classes latentes. Dans le contexte de notre étude, nous pourrions ainsi étudier le changement longitudinal en termes de trajectoires développementales individuelles (modèle mixte), tout en repérant les éventuelles différences qualitatives qui caractérisent ces trajectoires (analyse en classes latentes).

Soient $Y1_i$ et $Y2_i$ les scores du sujet i à l'épreuve, considérés au temps 1 et au temps 2. Les classes latentes auxquelles les sujets appartiennent sont définies par la variable catégorielle C , qui comprend K catégories ($c = 1, 2, \dots, K$) et suit une loi de distribution multinomiale. L'équation du modèle de premier niveau est la suivante :

$$Y2_{i|C_i=c} = \beta_{0_c} + \beta_{1_{ci}} Y1_i + r_i, (1)$$

$r_i \sim N(0, \theta_1)$ désigne les résidus du modèle. β_{0_c} correspond à l'intercept, qui peut varier selon les classes latentes mais reste fixe chez les sujets appartenant à une même classe latente. $\beta_{1_{ci}}$, qui désigne la pente du modèle et peut s'interpréter comme un indicateur de la progression du sujet entre les deux occasions de mesure, varie également selon les classes latentes mais aussi selon les individus. La distribution de cette pente aléatoire selon les individus se formalise selon l'équation de second niveau suivante :

$$\beta_{1_{ci}} = \gamma_{1c} + u_{1i}, (2)$$

où γ_{1c} désigne la valeur moyenne de la pente au sein de la classe latente c , et $u_{1i} \sim N(0, \theta_{2c})$ les écarts individuels à cette moyenne. En résumé, ce modèle formalise bien l'idée selon laquelle les individus se différencient qualitativement dans leurs trajectoires de développement.

Les paramètres de ce modèle sont estimés à partir de la méthode du maximum de vraisemblance robuste, une méthode qui fournit des estimations fiables lorsque les données ne se distribuent pas tout à fait normalement. Son ajustement est estimé à partir du BIC, un critère qui tient compte à la fois de la vraisemblance et de la parcimonie du modèle. Afin de déterminer le nombre optimal de classes latentes, cet indicateur d'ajustement est calculé pour une série de modèles faisant l'hypothèse d'un nombre croissant de classes latentes (par exemple un modèle ne comprenant que deux classes latentes, puis un modèle en comprenant trois, puis quatre,...), le modèle retenu étant finalement celui dont le BIC est le plus petit (Schwarz, 1978). Nous cessons d'augmenter le nombre de classes latentes lorsque nous observons une augmentation du BIC à la suite d'une diminution, ou lorsque le logiciel commence à rencontrer des difficultés d'estimation. Nous tenons également compte de l'entropie du modèle, un indicateur qui quantifie la différence entre les patterns de réponses d'enfants appartenant à des classes latentes distinctes (elle est de 1 lorsque la classification est parfaitement univoque). Enfin, nous examinons systématiquement la répartition des sujets dans les différentes classes prédites par le modèle, afin de s'assurer que celle-ci n'est pas déséquilibrée à l'extrême, comme c'est par exemple le cas lorsqu'une classe ne comprend qu'un unique sujet. L'ensemble de ces analyses est réalisé à partir du logiciel Mplus (Muthén & Muthén, 1998-2015).

Les résultats obtenus avec la méthode décrite ci-dessus sont dans un second temps utilisés afin d'analyser les relations entre les trajectoires développementales à la CGT et aux autres épreuves. Nous effectuons pour cela une analyse de régression multinomiale dans laquelle la variable dépendante correspond aux classes latentes obtenues pour la CGT (régression binomiale si nous n'obtenons que deux classes latentes pour la CGT), et les variables indépendantes correspondent aux classes latentes obtenues pour les épreuves de fonctions exécutives. Si la répartition des sujets en différentes classes latentes ne semble pas possible pour une épreuve quelconque (du fait d'une absence d'hétérogénéité qualitative au sein de l'échantillon), les trajectoires individuelles sont simplement quantifiées par la

différence entre le score à la seconde occasion de mesure et le score à la première occasion. Cette deuxième partie des analyses est réalisée avec le logiciel R (R Core Team, 2014).

3. Résultats

3.1. Statistiques descriptives

Le tableau 3 présente les moyennes et écarts-types des scores obtenus pour chacune des épreuves et à chacune des occasions de mesure.

Tableau 3. Performances moyennes des sujets (écarts-types entre parenthèses) à la CGT (nombre de cartes piochées dans le paquet avantageux), à la SOP (score d'empan), au WCST (nombre de critères atteints) et au GNG (pourcentage de fausses alarmes).

	CGT	SOP	WCST	GNG
T1	56,93 (12,09)	7,51 (2,56)	2,19 (1,48)	34,69 (18,13)
T2	62,32 (14,35)	8,30 (2,72)	2,11 (1,57)	32,29 (17,42)

La réalisation de tests de Student en apparié révèle que la progression des enfants entre les deux occasions de mesure est significative pour la CGT ($t = -4.25$, $df = 155$, $p < 0.01$) et la SOP ($t = -2.84$, $df = 162$, $p < 0.01$), mais pas pour le WCST ($t = 0.48$, $df = 163$, $p = 0.63$) ni pour le GNG ($t = 1.46$, $df = 163$, $p = 0.15$).

3.2. Analyse des trajectoires développementales pour chacune des épreuves

A partir des données longitudinales obtenues à chacune des épreuves, nous mettons en compétition plusieurs modèles mixtes à classes latentes qui diffèrent par le nombre de classes latentes dont on fait l'hypothèse. Le lecteur trouvera ci-dessous plusieurs parties dont chacune est consacrée à l'une de ces épreuves. Ces parties débutent par un tableau indiquant, pour chacun des modèles testés, le nombre de classes latentes dont on a fait l'hypothèse, la valeur du BIC, et celle de l'entropie. Nous justifions le choix du « meilleur » modèle à la suite du tableau. Nous représentons enfin les trajectoires développementales caractéristiques de chacune des classes latentes sur un graphique, en affectant chaque sujet à la classe latente à laquelle il est le plus probablement rattaché d'après les prédictions du meilleur modèle.

CGT

Tableau 4. Statistiques d'ajustement de différents modèles mixtes à classes latentes (BIC et entropie) variant selon le nombre de classes latentes, pour les performances à la CGT.

Nombre de classes latentes	BIC	Entropie
2	1254	0,85
3	1266	0,49

Nous retenons comme meilleur modèle celui qui fait l'hypothèse de deux classes latentes, car il présente un BIC plus faible que celui à trois classes latentes, et une entropie satisfaisante car relativement proche de 1 (cf. tableau 4). Ce modèle prédit que 24% des sujets appartiennent à la première classe latente, et 76% à la deuxième. Les performances des sujets appartenant à ces deux classes latentes peuvent être visualisées sur la figure 8. La classe latente « progression », d'effectif moindre, se caractérise par une augmentation importante des performances entre les deux occasions de mesure, tandis que la classe latente « stabilité », dont l'effectif est plus important, se caractérise au contraire par une absence de progression.

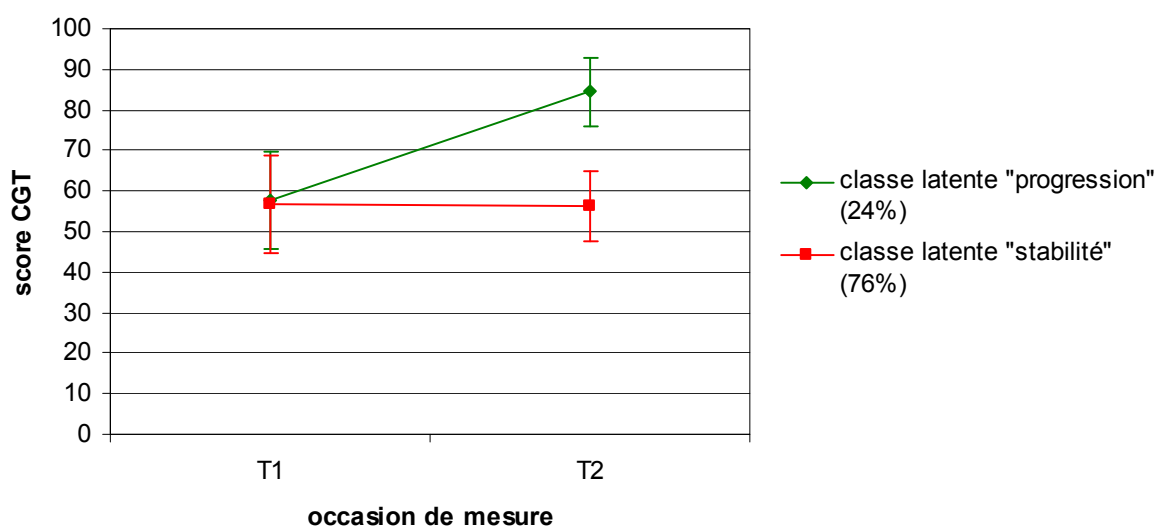


Figure 8. Trajectoires développementales des performances à la CGT dans chacune des deux classes latentes (moyennes et écarts types). Le pourcentage de sujets compris dans chacune des deux classes latentes est indiqué entre parenthèses dans la légende.

SOP

Tableau 5. Statistiques d'ajustement de différents modèles mixtes à classes latentes (BIC et entropie) variant selon le nombre de classes latentes, pour les performances à la SOP.

Nombre de classes latentes	BIC	Entropie
2	819	0,51
3	834	0,61

Le meilleur ajustement est obtenu avec le modèle à deux classes latentes, mais celui-ci présente une entropie très éloignée de 1, ce qui indique qu'il n'est pas possible de distinguer clairement ces deux classes (cf. tableau 5). En réponse à cette absence de différence qualitative entre les sujets, nous mesurerons par la suite le développement des enfants de manière essentiellement quantitative, à partir d'un score de différence entre leurs performances aux deux occasions de mesure.

WCST

Tableau 6. Statistiques d'ajustement de différents modèles mixtes à classes latentes (BIC et entropie) variant selon le nombre de classes latentes, pour les performances au WCST.

Nombre de classes latentes	BIC	Entropie
2	533	0,95
3	540	0,82

Nous retenons comme meilleur modèle celui qui fait l'hypothèse de deux classes latentes, car il présente un BIC plus faible que celui à trois classes latentes, et une entropie satisfaisante car très proche de 1 (cf. tableau 6). Ce modèle prédit que 55% des sujets appartiennent à la première classe latente, et 45% à la deuxième. Les performances des sujets appartenant à ces deux classes latentes peuvent être visualisées sur la figure 9. Contrairement à ce que la partie consacrée aux statistiques descriptives a pu nous laisser penser (stabilité des performances), l'une de ces classes latentes se caractérise par une nette progression des performances, et l'autre par une diminution. On remarque également la présence d'une forte variance des performances lors de la première occasion de mesure, qui rend floue la distinction entre les deux classes latentes, et qui diminue fortement lors de la seconde occasion de mesure, alors que les deux classes se distinguent.

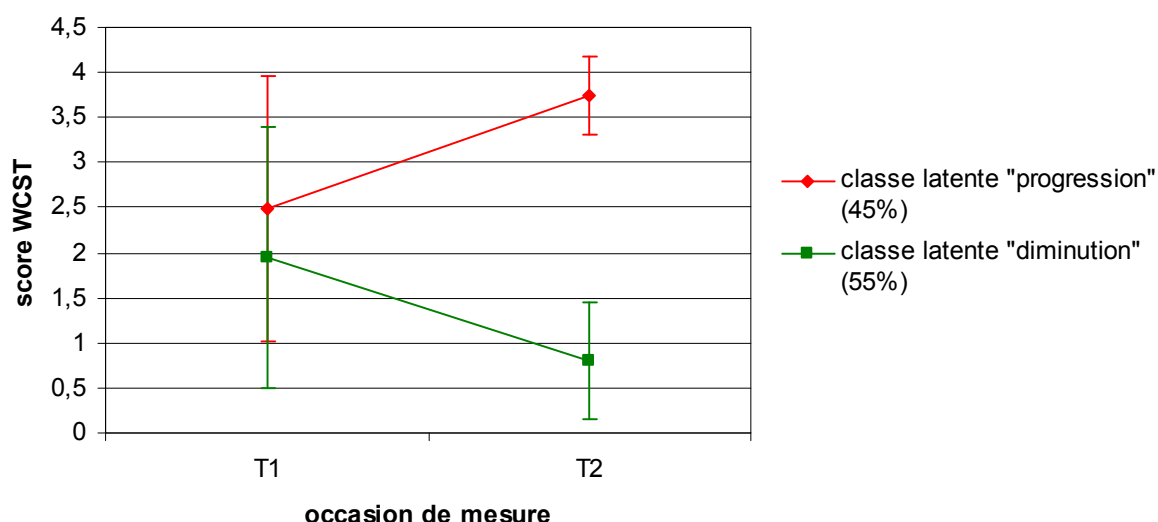


Figure 9. Trajectoires développementales des performances au WCST dans chacune des deux classes latentes (moyennes et écarts types). Le pourcentage de sujets compris dans chacune des deux classes latentes est indiqué entre parenthèses dans la légende.

GNG

Tableau 7. Statistiques d'ajustement de différents modèles mixtes à classes latentes (BIC et entropie) variant selon le nombre de classes latentes, pour les performances au GNG.

Nombre de classes latentes	BIC	Entropie
2	1426	0,91
3	1429	0,54

Le modèle à deux classes latentes présente un BIC plus faible que celui à trois classes latentes, et une entropie satisfaisante car proche de 1 (cf. tableau 7). Les deux classes latentes sont néanmoins très déséquilibrées en termes d'effectif, puisque le modèle prédit que 95% des sujets appartiennent à la première classe latente, et 5% à la deuxième. Les performances des sujets appartenant à ces deux classes latentes peuvent être visualisées sur la figure 10. On peut voir sur cette figure que la classe latente minoritaire présente un profil assez inattendu car le pourcentage d'erreur augmente de manière très importante entre les deux occasions de mesure. Puisque ce phénomène nous semble difficilement interprétable, et qu'il concerne un effectif assez faible, nous mesurerons par la suite le développement des enfants non pas seulement selon leur appartenance à ces deux classes latentes, mais également de manière quantitative à partir d'un score de différence entre leurs performances aux deux occasions de mesure.

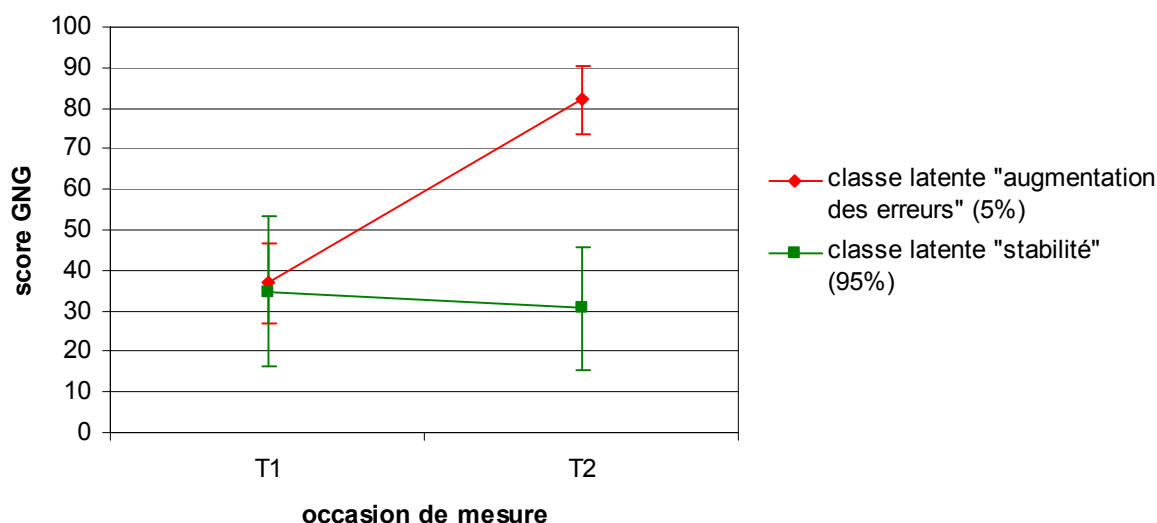


Figure 10. Trajectoires développementales des performances au GNG dans chacune des deux classes latentes (moyennes et écarts types). Le pourcentage de sujets compris dans chacune des deux classes latentes est indiqué entre parenthèses dans la légende.

3.3. Analyse des relations entre le développement des sujets à la CGT et aux autres épreuves

Les relations entre le développement des sujets à la CGT et aux autres épreuves sont analysées à partir d'une régression binomiale. La variable dépendante à deux modalités correspond à la classe latente occupée par le sujet concernant sa trajectoire de développement à la CGT (progrès ou stabilité). Les variables indépendantes, introduites séparément les unes des autres dans le modèle, mesurent les trajectoires développementales pour la SOP (score quantitatif de différence), le WCST (classe latente à deux modalités : progression vs. diminution) et le GNG (score quantitatif de différence et classe latente à deux modalités : augmentation vs. stabilité).

Les résultats de ces analyses ne permettent pas de rejeter l'hypothèse d'une absence de relation entre, d'une part, les trajectoires développementales mesurées à la CGT et, d'autres part, les trajectoires développementales à la SOP ($B = -0,08$; $SE = 0,06$; $p = 0,15$) et au GNG mesurées de manière qualitative ($B = 0,21$; $SE = 1,17$; $p = 0,86$) ou quantitative ($B = 0,01$; $SE = 0,01$; $p = 0,31$). Le seul effet significatif est finalement obtenu avec le WCST ($B = -$

0,93 ; $SE = 0,43$; $p < 0,05$), mais dans un sens opposé à celui de notre hypothèse. Comme on peut le voir dans le tableau 8, les enfants ont d'autant plus tendance à progresser à la CGT qu'ils ont tendance à régresser au WCST. Cet effet est essentiellement présent parmi les enfants qui progressent à la CGT, dont les performances au WCST tendent à diminuer entre les deux occasions de mesure. Etant donné leur effectif relativement faible, le caractère peu massif de cet effet, et son incohérence au regard de la littérature et de nos hypothèses, nous préférons rester prudent et, en attendant des investigations supplémentaires, conclure ici à l'absence d'effet.

Tableau 8. Table de contingence des trajectoires développementales à la CGT et au WCST (effectifs).

		trajectoire développementale CGT	
		progression	Stabilité
trajectoire développementale WCST	progression	9	59
	diminution	24	62

4. Discussion

L'ensemble de nos résultats ne permet pas de rejeter l'hypothèse selon laquelle l'efficacité de processus comme la mise à jour en mémoire de travail, la flexibilité mentale, et l'inhibition, ne joue aucun rôle lorsque des jeunes enfants tentent de résoudre une tâche de prise de décision sous incertitude comme la CGT. Nous avons vu en introduction que l'ensemble des 43 études recensées par Toplak et al. (2010) sur le sujet est majoritairement orienté vers l'hypothèse d'une absence d'effet des fonctions exécutives sur les conduites de prise de décision sous incertitude. Malgré les critiques que nous avons formulées à ces études, critiques d'ordre essentiellement méthodologique, notre propre travail rejoint leurs conclusions sur le plan théorique.

Afin de rendre compte de cette absence générale des effets attendus, on peut commencer par évoquer certains aspects méthodologiques. Tout d'abord, lorsque Miyake et al. (2000, 2012) proposent le modèle factoriel des fonctions exécutives sur lequel nous nous sommes appuyés, et qui comprend neuf variables manifestes, les corrélations entre ces variables manifestes sont pour la majorité non significatives, les autres ayant des valeurs ne dépassant que rarement le seuil de 0,30. En d'autres termes, bien que les auteurs parviennent à

isoler une variance commune à ces différentes épreuves, leurs parts de spécificité respectives restent très élevées. Notre choix de mesurer chacune des fonctions exécutives à l'aide d'une unique épreuve, s'il se justifie d'un point de vue pratique, n'était donc peut être pas le plus pertinent de ce point de vue. Une autre critique méthodologique que l'on peut faire au présent travail est précisément celle que nous avons adressée à de nombreux travaux dans le chapitre précédent, à savoir leur absence de prise en compte de la dynamique d'apprentissage de la tâche du casino. Nous avons souligné la possibilité que cette absence de prise en compte puisse expliquer l'absence d'effets que ces études rapportent. Or, dans la présente étude, nous nous contentons d'un score global (nombre de cartes piochées dans le paquet avantageux), un choix qui peut paraître étonnant et qui pourrait également expliquer l'absence d'effets face à laquelle nous nous trouvons ici. La raison de ce choix est que nous ne sommes pas encore parvenus à estimer de manière satisfaisante un modèle qui tienne compte à la fois de la dynamique d'apprentissage au cours de la passation (niveau microgénétique), et du changement longitudinal (niveau macrogénétique). Nous avons donc fait ici le choix de nous focaliser sur le niveau macrogénétique, par souci de complémentarité avec l'étude précédente qui n'offrait pas d'analyse longitudinale, et tenterons par la suite de parvenir à une solution plus satisfaisante dans l'intégration de ces deux niveaux d'analyse. Cette intégration sera selon nous plus à même de révéler le rôle éventuel de certaines fonctions exécutives. Enfin, une troisième remarque méthodologique concerne le nombre d'occasions de mesure de notre étude longitudinale, très faible puisqu'il est seulement de deux, ce qui offre une représentation nécessairement grossière des trajectoires de développement individuelles. Pour des raisons pratiques, nous n'avons pas pu effectuer davantage d'occasions de mesure. Nous aurions pu choisir de rencontrer moins de sujets de manière plus fréquente, mais ce choix aurait limité nos possibilités d'analyse au niveau interindividuel.

D'un point de vue plus théorique, on peut regretter notre choix du modèle de Miyake et al. (2000, 2012) qui, initialement proposé chez l'adulte, n'était peut être pas également pertinent chez l'enfant. Ce modèle a attiré notre attention parce qu'il est factoriel et s'intègre donc relativement bien à la perspective différentielle qui est la nôtre, et également parce que les trois fonctions dont il fait l'hypothèse sont celles dont on suppose le plus souvent qu'elles sont mobilisées à la tâche du casino (Toplak et al., 2010). Mais le choix d'un modèle du fonctionnement adulte transposé chez l'enfant revient à négliger la dynamique de mise en place des fonctions exécutives (Roy et al., 2012 ; van der Ven, Kroesbergen, Boom, & Leseman, 2013). De ce point de vue, il aurait pu être intéressant de nous référer à des modèles factoriels longitudinaux des fonctions exécutives, proposés chez l'enfant, comme par exemple

celui de Usai, Viterbori, Traverso et De Franchis (2014) qui distingue seulement deux dimensions (inhibition d'une part, et flexibilité et mémoire de travail d'autre part).

L'interprétation de nos résultats nous semble également devoir tenir compte de l'âge des enfants de notre échantillon. Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une étude qui rapporte un lien entre mise à jour en mémoire de travail et performances à la CGT chez l'enfant. Cette première étude présente donc apparemment une contradiction avec la présente étude sur la question du rôle de la mémoire de travail. Mais il faut rappeler que l'effet de la mise à jour en MDT constaté dans la première étude s'exerçait en interaction avec l'âge des enfants, de telle sorte que cet effet n'était significatif que chez les enfants les plus âgés de notre échantillon, c'est-à-dire ceux ayant entre 8 et 11 ans. On peut donc supposer que le rôle de la mise à jour en MDT, qui semble inexistant au regard des résultats de la présente étude réalisée chez des enfants de 5-7 ans, aurait pu être révélé par le choix d'un échantillon plus âgé. Si l'on pousse encore un peu plus loin la spéculation, on peut penser que cet échantillon plus âgé aurait également révélé le rôle des autres fonctions exécutives que sont la flexibilité et l'inhibition, puisque celles-ci forment avec la mise à jour en mémoire de travail un ensemble supposé présenter une certaine homogénéité.

C'est d'ailleurs cette homogénéité supposée des fonctions exécutives qui est à l'origine de l'élargissement de notre intérêt, d'abord restreint à la mémoire de travail dans le chapitre 4, puis généralisé à l'ensemble des fonctions exécutives. En procédant de la sorte, il est possible que nous ayons surestimé une homogénéité qui, si elle est souvent argumentée au niveau théorique, reste assez relative au niveau empirique (cf. chapitre 3). Nous reprenons ainsi une tendance assez fréquente dans les travaux actuels, qui est de faire l'hypothèse du rôle de l'ensemble des fonctions exécutives dès lors que le rôle de seulement l'une d'entre elles semble se justifier. Il est assez révélateur de mettre en parallèle le nombre d'études qui se sont consacrées à l'hypothèse du rôle des fonctions d'inhibition et de flexibilité dans la résolution des tâches de gambling (environ une trentaine) avec la faiblesse des arguments en faveur de cette hypothèse. Ces derniers se résument en effet à l'idée selon laquelle le participant inhibe une mauvaise réponse initialement prépondérante (i.e., piocher dans le paquet désavantageux) puis, grâce à la flexibilité de son système cognitif, change de réponse (i.e., pioche dans le paquet avantageux). Ce fonctionnement hypothétique, dont on pourrait supposer l'intervention à chaque fois qu'un individu effectue un apprentissage sur la base d'une succession d'essais et d'erreurs, ne susciterait peut être pas autant d'interrogations si l'intérêt des auteurs n'avait pas été avant tout tourné vers la mémoire de travail. Tout nous

semble se passer comme si le simple fait de supposer qu'une épreuve nécessite un certain contrôle exécutif de son activité par l'individu justifiait le fait de mobiliser l'ensemble de la batterie des tests neuropsychologiques dédiés au fonctionnement exécutif.

Un autre aspect discutable dans notre étude concerne le choix d'une démarche qui consiste à s'appuyer essentiellement sur la variabilité qualitative des performances (bien que celle-ci soit extraite à partir d'une source de variabilité quantitative, celle des performances observées aux différentes occasions de mesure). Lorsqu'il a été possible de distinguer différentes classes de participants, il s'est avéré que leur nombre était de deux seulement, ce qui ne nous a donc permis d'obtenir qu'une distinction assez grossière au sein de notre échantillon. Cette distinction est par ailleurs descriptive pour l'essentiel. Dans le cas de la CGT, nous n'obtenons par exemple qu'une simple dichotomie entre les enfants qui ont progressé entre les deux occasions de mesure et ceux qui n'ont pas progressé. On pourrait néanmoins répondre à cette remarque en soulignant que le choix plus classique de n'étudier que la variabilité quantitative, bien que permettant le plus souvent une discrimination plus fine des individus, nous aurait amené à situer sur un même continuum des conduites dont nos analyses suggèrent qu'elles se distinguent qualitativement. De plus, sans cette analyse qualitative réalisée grâce à l'analyse en classe latente, nous aurions simplement conclu à une stabilité des performances moyennes entre les deux occasions de mesure pour le GNG et le WCST, comme nous l'avons fait dans la partie consacrée aux statistiques descriptives. Nous serions ainsi passé à côté d'une information potentiellement intéressante, à savoir le fait que certains sujets progressent, et que d'autres régressent ou restent stables entre les deux occasions de mesure, et, de plus, que ces différents profils se distinguent nettement.

Concernant plus précisément les scores obtenus à la CGT, la faible variance qui les caractérise n'était pas attendue. Les résultats de l'analyse en classes latentes ont montré que la majorité des enfants (76%) ne progresse pas entre les deux occasions de mesure et obtient des taux de réussite proches du seuil de 50% à chacune de ces occasions. Dans des analyses non présentées ici⁸, nous avons pu observer que ces enfants ne progressent pas *au cours* de chacune des passations, c'est-à-dire qu'ils ne développent pas de préférence pour l'un des paquets et alternent plus ou moins régulièrement de l'un à l'autre comme si leur incertitude initiale ne parvenait pas à se réduire. Nous avons déjà remarqué ce phénomène chez les

⁸ Ces analyses ont été effectuées à partir d'un modèle markovien à classes latentes. La passation de la CGT est considérée comme composée de cinq blocs de vingt essais, et l'on suppose que la performance des sujets à chacun de ces blocs varie qualitativement en spécifiant un certain nombre de classes latentes. L'analyse des probabilités de transitions d'une classe latente à une autre au cours de la succession des blocs d'essais permet de repérer les différentes trajectoires d'apprentissage individuelles.

enfants les plus jeunes de notre première étude (6-7 ans), présentée dans le chapitre 4. Notre raisonnement, qui s'est avéré faux, a été de supposer que le choix d'un échantillon encore plus jeune (5-6 ans lors de la première occasion de mesure) dévoilerait des préférences pour le paquet désavantageux, révélateur d'une focalisation exclusive sur la recherche de gains immédiats. Nous espérons ainsi repérer i) des enfants qui préfèrent le paquet désavantageux, ii) d'autres qui hésitent et ne développent pas de préférence, et enfin iii) des enfants qui préfèrent le paquet avantageux. Le fait que la première de ces catégories ne soit finalement pas observée laisse penser que la focalisation exclusive sur les gains de certains sujets, souvent supposée dans la littérature, ne va pas de soi. Les pertes, bien qu'aléatoires, semblent prises en compte, même par des enfants aussi jeunes que ceux compris dans notre échantillon.

Cette remise en cause de l'idée répandue selon laquelle certains sujets seraient indifférents aux pertes à long terme, et ne se focaliseraient que sur la recherche de gains élevés et immédiats, nous semble avoir des conséquences théoriques non négligeables, puisque cette idée est au fondement du domaine de recherche qui nous intéresse ici. Il est tout à fait possible que les sujets de notre échantillon qui ont davantage tendance que les autres à piocher dans le paquet désavantageux (classe latente « stabilité »), et qui sont majoritaires, ne manifestent pas tant une tendance accrue à la prise de risque, comme on le suppose volontiers dans la littérature, mais plutôt une tendance à répondre au hasard. Face à la difficulté de la tâche et à un éventuel découragement dû à leur incapacité initiale à augmenter le nombre de bonbons contenus dans le verre, certains sujets répondraient au hasard et, tel le joueur qui préfère la machine à sous au poker, se laisseraient simplement divertir par le spectacle de la fluctuation de leurs gains et par les émotions associées, sans chercher à influencer ces fluctuations d'une manière qui pourrait leur être avantageuse.

Afin d'examiner plus en détail cette hypothèse qui, si elle s'avérait justifiée, amènerait selon nous à une remise en cause de l'interprétation des performances aux tâches de gambling classiquement proposée dans la littérature, nous avons repris les études qui, parmi celles citées dans cette thèse, fournissent des informations permettant de juger du rôle qu'a pu jouer le hasard dans les réponses des sujets. Certaines de ces études fournissent explicitement un test de Student (hypothèse nulle : la probabilité de piocher dans le(s) paquet(s) avantageux(s) est de $1/2$), d'autres nous permettent simplement d'apprécier visuellement cette information sur un graphique.

On remarque premièrement de manière incontestable que de très nombreuses études rapportent des résultats qui démontrent que certains sujets développent une préférence pour

le(s) paquet(s) avantageux(s), rendant hautement improbable l'hypothèse selon laquelle ils répondent au hasard. Dans les travaux portant sur une population d'adultes, ces sujets appartiennent le plus souvent à des groupes contrôles qui sont comparés à des groupes de sujets atypiques. Dans les études réalisées chez l'enfant, ils appartiennent souvent aux groupes d'enfants les plus âgés, comme ce fut le cas dans le chapitre 4.

Concernant deuxièmement la possibilité que certains sujets développent une préférence pour le(s) paquet(s) désavantageux(s), celle-ci nous semble beaucoup plus discutable, que ce soit chez l'adulte ou chez l'enfant. Chez l'enfant, la seule population dont nous avons appris qu'elle tendait à préférer le paquet désavantageux est celle des enfants de 3 ans (Bunch, Andrews, & Halford, 2007; Kerr & Zelazo, 2004; Hongwanishkul et al., 2005). Mais l'écart au seuil de 50%, en plus d'être relativement faible (environ 60% des choix dans le paquet désavantageux), n'est significatif que pour 2 ou 3 des cinq blocs d'essais qui composent la passation. Chez l'adulte, seules les études réalisées par Antoine Bechara auprès de patients présentant des lésions du CPFVM pourraient paraître aller dans ce sens (Bechara et al., 1994; Bechara et al., 1998; Bechara et al., 2000; Bechara & Damasio, 2002). Dans ces quatre études, on remarque que les patients orientent environ 60% de leurs décisions en direction du paquet désavantageux. L'écart au seuil de 50%, qui serait obtenu si les réponses étaient données au hasard, est donc assez faible, et les informations données par les auteurs ne permettent pas d'apprécier sa significativité. L'hypothèse d'une préférence significative pour le paquet désavantageux chez ces patients nous semble donc sujette à caution, d'autant que les effectifs de ces groupes de patients se situent entre 6 et 9. Soulignons que parmi ces études figure celle de Bechara et al. (1994), qui a introduit l'Iowa gambling Task et à laquelle se réfère la quasi-totalité des études portant sur la prise de décision sous incertitude. Y est introduit pour la première fois le concept de myopie pour le futur, qui s'appuie précisément sur la préférence supposée des patients pour les paquets désavantageux, et dont nous avons vu qu'il signifiait une focalisation exclusive sur les conséquences à court terme des décisions effectuées, une insensibilité aux conséquences futures de ces décisions, et qui serait la cause d'une tendance accrue à la prise de risque. Il reste à comprendre pourquoi de nombreux auteurs affirment que certains sujets préfèrent les paquets désavantageux alors même que les décisions de ces sujets s'orientent presque autant dans les deux types de paquets. Ce biais de raisonnement pourrait selon nous provenir du niveau de comparaison exclusivement intergroupe qu'ils adoptent : les performances des patients atteints de lésions (ou celles des enfants de 3 ans) sont comparées à celles d'un groupe de sujets contrôle (ou à un groupe d'enfants plus âgés) qui piochent davantage dans le paquet avantageux (jusqu'à 75% des

décisions en direction du paquet avantageux). Si la comparaison vaut à un niveau intergroupe (les patients se tournent davantage vers le paquet désavantageux que les sujets du groupe contrôle), elle ne vaut pas nécessairement au niveau intragroupe (les patients ne préfèrent pas le paquet désavantageux au paquet avantageux, ils n'ont aucune préférence et répondent au hasard).

Enfin, de nombreuses études font état de résultats qui, incontestablement, ne permettent pas de rejeter l'hypothèse de réponses émises au hasard par les sujets (environ 45 à 55% des décisions en direction du paquet avantageux). C'est notamment le cas dans des études réalisées auprès de patients alcooliques (Noël et al., 2007; Brevers, Bechara, Cleeremans, Kornreich, Verbanck, & Noël, 2014), de sujets obtenant des scores élevés sur des échelles d'impulsivité (Zermatten, Van der Linden, d'Acremont, Jermann, & Bechara, 2005), de patients toxicomanes (Bechara & Damasio, 2002; Bechara & Martin, 2004; Vadhan, Hart, Haney, van Gorp, & Foltin, 2009), de patients présentant des lésions du cortex préfrontal dorso-latéral ou dorso-médian (Manes et al., 2002), de patients atteints du SIDA (Arentoft, Thames, Panos, Patel, & Hinkin, 2013), de joueurs pathologiques (Brevers, Koritzky, Bechara, & Noël, 2014), de personnes atteintes d'anorexie, de boulimie, ou d'obésité (Brogan, Hevey, & Pignatti, 2010) et de criminels incarcérés (Luo, Feng, Tang, Huang, & Li, 2011). Chez l'enfant, la tendance à sélectionner les différents paquets de cartes dans des proportions proches de celles qui seraient obtenues en piochant au hasard est observée dans plusieurs études, à partir de 4 ans et jusqu'à la fin de l'adolescence (Crone & van der Molen, 2004; Crone & van der Molen, 2007; Hooper et al., 2004; Hongwanishkul et al., 2005; Prencipe, Kesek, Cohen, Lamm, Lewis, & Zelazo, 2011; Smith et al., 2012; Van Duijvenvoorde et al., 2012). Les patterns de données observés dans ces différentes populations peuvent être obtenus de différentes manières, comme l'alternance régulière entre les différents paquets ou encore le changement de paquet dès qu'une perte est obtenue. On obtient dans tous les cas des scores proches de ceux obtenus par la seule intervention du hasard, et il nous semble alors discutable de parler de « tendance à la prise de risque » ou de « myopie pour le futur ». Comme précisé dans le paragraphe précédent, ces qualificatifs découlent simplement du fait que l'on effectue une comparaison avec des sujets qui piochent plus fréquemment dans le(s) paquet(s) avantageux (groupe contrôle ou enfants plus âgés).

De manière tout à fait centrale pour notre propos, s'il s'avérait que cette tendance des sujets à répondre au hasard est effectivement aussi marquée que nous le supposons ici, elle invaliderait du même coup l'hypothèse d'un rôle de l'inhibition et de la flexibilité. En effet,

s'il n'y a pas de tendance initiale à ne se focaliser que sur les gains immédiats et à négliger les conséquences futures, alors il n'y a plus besoin d'inhiber cette focalisation exclusive sur les gains, ni a fortiori de passer de cette focalisation exclusive à une intégration des gains et des pertes visant une adaptation à plus long terme. Ainsi, parmi les différentes fonctions exécutives, seule la mise à jour en mémoire de travail nous semblerait conserver son rôle éventuel.

Chapitre 6 : Variations individuelles et variations situationnelles à l'épreuve de quantification des probabilités chez l'enfant : une approche transactionnelle

Ce chapitre ne fait partie de la version librement consultable de cette thèse.

Référence :

Chapitre 6 : Audusseau, J., & Juhel, J. (2016, sous presse). Variations individuelles et variations situationnelles à l'épreuve de quantification des probabilités chez l'enfant : une approche transactionnelle. *Enfance*, 4, pp *** - ***.

Chapitre 7 : Application du modèle de la valence espérée à la résolution de la tâche du casino chez l'enfant de 6 à 11 ans.

1. La prise de décision sous incertitude

1.1. Aspects théoriques

De nombreuses situations de notre vie quotidienne nécessitent d'effectuer un choix entre au moins deux possibilités d'action pour atteindre un objectif donné, ces situations étant désignées par le terme de prise de décision. Bien souvent, les conséquences de ces différentes alternatives ne peuvent être totalement anticipées par l'individu ; on parle alors de prise de décision sous incertitude. Plusieurs modèles ont été proposés ces dernières années pour rendre compte des conduites des individus en situation de prise de décision sous incertitude. Le plus régulièrement cité renvoie à l'hypothèse des marqueurs somatiques qui fait appel à des processus de nature émotionnelle (par ex., Reimann & Bechara, 2010). D'autres investigations ont été menées sur le rôle de la mémoire de travail (par ex., Bechara, Damasio, Tranel, & Anderson, 1998; Crone, Bunge, Latenstein, & van der Molen, 2005; Dretsch & Tipples, 2008; Jameson, Hinson, & Whitney, 2004; Hooper, Luciana, Conklin, & Yarger, 2004; Manes, Sahakian, Clark, Rogers, Antoun, Aitken, & Robbins, 2002; Pecchinenda, Dretsch, & Chapman, 2006; Smith, Xiao & Bechara, 2012; Turnbull, Evans, Bunce, Carzolio, & O'Connor, 2005; Van Duijvenvoorde, Jansen, Bredman, & Huizenga, 2012), de l'inhibition cognitive (par ex., Hooper, Luciana, Conklin, & Yarger, 2004; Lamm, Zelazo, & Lewis, 2006; Shuster & Toplak, 2009), de la flexibilité cognitive (par ex., Brand, Recknor, Grabenhorst, & Bechara, 2007; Hongwanishkul, Happaney, Lee, & Zelazo, 2005), de l'impulsivité (par ex., Smith, Xiao, & Bechara, 2012) et de la sensibilité du sujet à l'égard des pertes occasionnées par une décision (par ex., Aïte, Cassotti, Rossi, Poirel, Lubin, Houdé, & Moutier, 2012).

Plusieurs des travaux précédemment cités ont étudié dans une approche développementale le phénomène de prise de décision sous incertitude chez l'enfant, ce dernier étant d'autant plus confronté à des situations de ce type qu'il devient de plus en plus autonome. Une amélioration dans l'adaptation à ces situations de prise de décision sous incertitude a été mise en évidence à différentes reprises au cours du développement de

l'enfant (par ex., Kerr & Zelazo, 2004; Hongwanishkul, Happaney, Lee, & Zelazo, 2005). Un champ de la psychologie se constitue ainsi à l'heure actuelle autour de la question des processus responsables des changements liés à l'âge dans la capacité à s'adapter aux situations de prise de décision sous incertitude. Nous aborderons certains de ces processus lorsque nous présenterons le modèle formel dont ce chapitre traite, après avoir décrit la tâche sur laquelle il s'appuie.

1.2. La Children's Gambling Task

La *Children's Gambling Task* (CGT ; Kerr & Zelazo, 2004) correspond à une version simplifiée de la *Iowa Gambling Task* (Bechara, Damasio, Damasio, & Anderson, 1994), cette dernière constituant la situation expérimentale la plus utilisée pour opérationnaliser le concept de prise de décision sous incertitude.

L'enfant a pour consigne de tenter de gagner le plus de bonbons possible en piochant dans deux paquets de cartes. Il est informé que l'un des paquets est avantageux pour atteindre cet objectif tandis que l'autre est désavantageux. À chacun des 100 essais que comporte la passation, il peut sélectionner une carte dans le paquet de son choix et peut également changer de paquet d'un essai à l'autre dès qu'il le souhaite. Une fois retournée, chaque carte représente un certain nombre de visages souriants et de visages tristes, correspondant respectivement au nombre de bonbons gagnés et perdus par l'enfant. L'ordre des cartes ainsi que la contingence des gains et des pertes au sein de chaque paquet sont les mêmes pour tous les participants (Kerr & Zelazo, 2004). Comme on peut le visualiser sur la figure 13, qui présente deux exemples de cartes, les visages souriants sont placés sur la partie supérieure de la carte et les visages tristes sur la partie inférieure. L'un des deux paquets aboutit à des gains plus importants (i.e., plus de visages souriants), mais est néanmoins désavantageux sur le long terme puisqu'il occasionne parfois, et de manière imprédictible, des pertes très importantes. L'autre paquet aboutit à des gains moins importants (i.e., moins de visages souriants) mais s'avère avantageux sur le long terme du fait de pertes occasionnelles moins élevées. Plus précisément, les cartes du paquet désavantageux aboutissent systématiquement à un gain de deux bonbons, qui s'accompagne d'une perte pouvant être de zéro, quatre, cinq ou six bonbons (avec une espérance de perte de cinq bonbons pour dix cartes piochées). Celles issues du paquet avantageux entraînent systématiquement un gain de un bonbon, et une perte de un ou zéro bonbon (avec une espérance de gain de cinq bonbons pour dix cartes piochées).

Un verre cylindrique est placé face à l'enfant (entre les deux paquets de cartes), dans lequel on dépose les bonbons qu'il gagne au cours de la passation, et duquel on retire ceux qu'il perd. Après avoir placé un stock initial de dix bonbons dans ce verre, l'expérimentateur procède sous les yeux de l'enfant à six essais de démonstration en piochant les trois premières cartes de chaque paquet. Il s'assure alors de la compréhension par l'enfant du lien entre le nombre de visages souriants et tristes et le nombre de bonbons gagnés et perdus. Lors du retournement de chacune des cartes, seuls les visages souriants sont visibles, les visages tristes étant masqués par la présence d'une vignette autocollante. Une fois les bonbons gagnés déposés dans le verre de l'enfant, cette vignette est soulevée, révélant ainsi le nombre de bonbons perdus. Ceux-ci sont alors retirés du verre de l'enfant. Cette procédure permet de s'assurer que gains et pertes sont tous deux pris en compte par le participant. Pour chacun des 100 essais de la passation, le choix binaire effectué par l'enfant est finalement mesuré.

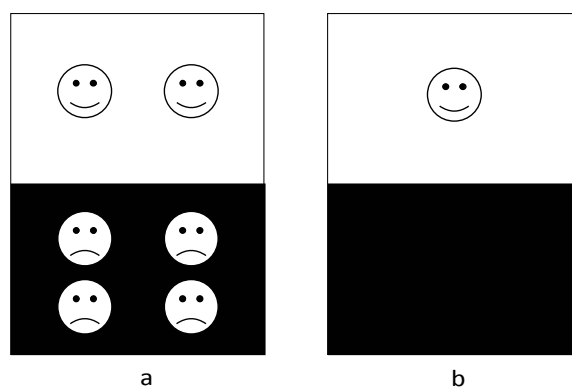


Figure 11. Deux exemples de cartes de la CGT : a) un exemple de carte issue du paquet désavantageux (gain : 2 ; perte : 4) ; b) un exemple de carte issue du paquet avantageux (gain : 1 ; perte : 0).

1.3. Le modèle de la valence espérée

Le modèle de la valence espérée a été initialement proposé par Busemeyer et Stout (2002) pour modéliser les performances de sujets à la *Iowa Gambling Task* qui, à la différence de la CGT, comprend quatre paquets de cartes et des valeurs de gains et de pertes plus importantes (exprimées en centaines de dollars). Ce modèle appartient à la famille des

modèles cognitifs formels⁹ et présente la particularité de se situer à un niveau d'analyse intra-individuel en permettant une estimation des paramètres du modèle au niveau individuel. En conservant les caractéristiques principales du modèle initial de la valence espérée, nous en proposons ici quelques modifications afin que celui-ci puisse rendre compte des performances de sujets à la CGT.

Le premier concept théorique formalisé dans ce modèle est celui de valence, définie comme une réaction émotionnelle dont le participant ferait l'expérience à chaque essai, lorsqu'il pioche une carte dans l'un des deux paquets. Cette valence correspond à une intégration des gains et des pertes obtenus à cet essai, et peut être formalisée selon l'équation suivante :

$$\text{Val}_{k,t} = (1-w) \times \text{Gain}_{k,t} + w \times \text{Perte}_{k,t}, \quad w \in [0;1] \quad (1)$$

où $\text{Val}_{k,t}$ désigne la valence dont le sujet fait l'expérience en piochant dans le paquet k ($k = \{1,2\}$) à l'essai t ($t = \{1,2,...,100\}$). $\text{Gain}_{k,t}$ et $\text{Perte}_{k,t}$ renvoient respectivement aux gains et aux pertes obtenus en piochant dans le paquet k à l'essai t . Le paramètre w traduit l'idée selon laquelle les gains et les pertes obtenus n'ont pas nécessairement le même poids dans la détermination de la valence dont le participant fait l'expérience. Plus la valeur de ce paramètre est élevée, plus le participant est sensible aux pertes en comparaison aux gains.

Le concept de valence espérée correspond à la valence dont un individu espère faire l'expérience à un essai donné en piochant dans un des deux paquets. Il est formalisé comme suit :

$$E(\text{Val}_{k,t+1}) = E(\text{Val}_{k,t}) + a \times (\text{Val}_{k,t} - E(\text{Val}_{k,t})), \quad a \in [0;1] \quad (2)$$

où $E(\text{Val}_{k,t+1})$ désigne la valence espérée par le participant à l'essai $t+1$ s'il pioche dans le paquet k , $E(\text{Val}_{k,t})$ désigne la valence dont le participant espérait faire l'expérience à l'essai précédent en piochant dans le paquet k et $\text{Val}_{k,t}$ désigne la valence dont il a effectivement fait l'expérience à l'essai précédent. L'expression $\text{Val}_{k,t} - E(\text{Val}_{k,t})$ située à droite de l'équation

⁹ Les modèles cognitifs formels sont des modèles mathématiques qui formalisent les liens hypothétiques au sein d'un réseau de processus psychologiques. Ils visent à décrire, sur la base de ces processus, le mécanisme de génération des données comportementales recueillies chez un ou plusieurs individus lors de la passation d'une tâche expérimentale. La pertinence d'un modèle formel peut être évaluée non seulement au regard de sa capacité à décrire et à prédire des données recueillies, mais également par la compatibilité de cette formalisation avec les processus théoriquement impliqués dans la tâche considérée. La recherche de cette compatibilité passe ainsi par un questionnement théorique sur ces processus, différentes conceptions théoriques pouvant aboutir à des formalisations distinctes.

(2), formalise ainsi l'écart entre la valence dont le sujet a effectivement fait l'expérience et celle dont il espérait faire l'expérience. Cet écart est positif (respectivement négatif) lorsque la valence espérée du paquet considéré augmente (respectivement diminue) entre l'essai $t+1$ et l'essai t . L'équation (2) formalise ainsi la mise à jour de la valence espérée au fur et à mesure de la passation. Le paramètre a renvoie quant à lui à la vitesse de cette mise à jour. Si ce paramètre est proche de 1, la mise à jour de la valence espérée est très rapide car très influencée par les expériences récentes du sujet. A l'inverse, si a est proche de 0, la mise à jour de la valence espérée se fait très lentement au cours de la passation. Précisons enfin que seule la valence espérée du paquet sélectionné est remise à jour lors d'un essai, celle du paquet non sélectionné n'étant pas modifiée.

L'objectif principal du modèle de la valence espérée est de déterminer, à chaque essai de la passation, quelle est la probabilité que le paquet avantageux soit sélectionné par le sujet (le complément à 1 de cette dernière permettant de déduire la probabilité de sélectionner le paquet désavantageux). Cette probabilité est une fonction croissante de la valence espérée du paquet avantageux, et une fonction décroissante de celle du paquet désavantageux, comme le formalise l'équation suivante :

$$P_{1,t+1} = \frac{e^{E(\text{Val}_{1,t})/\text{Expl}_t}}{e^{E(\text{Val}_{1,t})/\text{Expl}_t} + e^{E(\text{Val}_{2,t})/\text{Expl}_t}} \quad (3)$$

où $P_{1,t+1}$ désigne la probabilité que le sujet pioche dans le paquet $k=1$, que l'on considérera arbitrairement comme correspondant au paquet avantageux, à l'essai $t+1$. Le paramètre Expl_t permet de formaliser un processus d'exploration au hasard des deux paquets. On peut en effet supposer qu'en début de passation, l'enfant explore les deux paquets sans préférence particulière pour s'orienter préférentiellement ensuite, lorsque son expérience de la tâche le lui suggère, vers le paquet présentant la plus forte valence espérée. Expl_t formalise ainsi l'ampleur de l'exploration du sujet à l'essai considéré. Si l'on suppose que celle-ci évolue au cours de la passation, la vitesse de cette évolution peut être formalisée comme suit :

$$\text{Expl}_t = \left(\frac{10}{t} \right)^c, \quad c \in [-5; 5] \quad (4)$$

Une valeur élevée du paramètre c renvoie au fonctionnement d'un sujet qui explore les deux paquets en début de passation mais réduit ensuite cette exploration en orientant ses choix sur la base de la valence espérée des paquets. Cette réduction est d'autant moins importante que la valeur du paramètre c se rapproche de 0. Ce paramètre peut également prendre des valeurs négatives, formalisant ainsi la possibilité pour certains sujets d'augmenter leurs

conduites d'exploration au cours de la passation. Ce type de fonctionnement est supposé être mis en œuvre chez des participants pour lesquels la tâche provoque de l'ennui ou de la fatigue, et qui abandonnent progressivement la recherche d'une décision adaptée au profit de choix effectués au hasard dans les deux paquets.

Le modèle de la valence espérée (figure 14) comprend finalement trois paramètres à estimer au regard des données : w , a et c . Chacun de ces paramètres renvoie au rôle d'un processus psychologique hypothétique, la manière dont celui-ci est formalisé étant *a priori* compatible avec la connaissance théorique du processus. Dans la partie suivante, nous présenterons la méthode employée pour estimer individuellement les valeurs de ces trois paramètres.

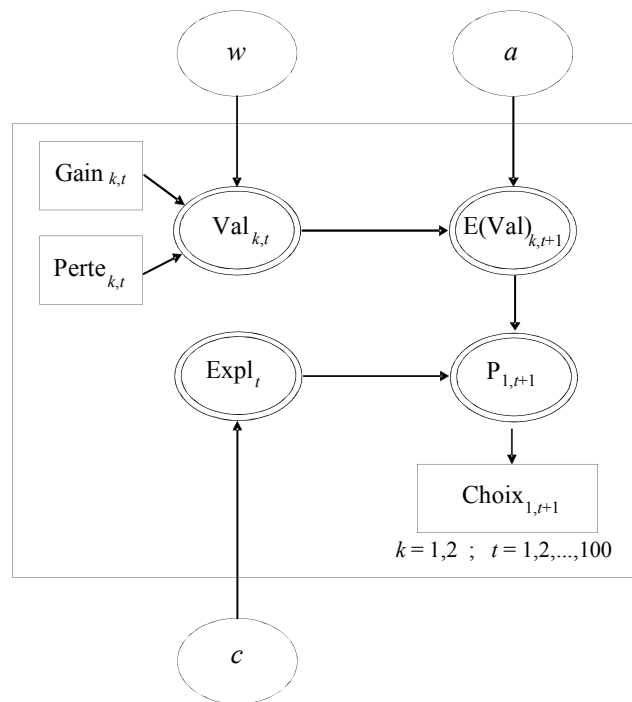


Figure 12. Représentation du modèle de la valence espérée chez un participant. $\text{Choix}_{1,t+1}$ est une variable binaire prenant la valeur 1 si le sujet a pioché dans le paquet avantageux à l'essai $t+1$, 0 s'il a pioché dans le paquet désavantageux. Les variables entourées d'un rectangle sont observées, celles entourées d'une ellipse double sont entièrement déterminées, celles entourées d'une ellipse simple sont à estimer.

2. Méthode

2.1. Participants

La passation de la CGT a été effectuée auprès de 54 enfants, dont 26 filles et 28 garçons, scolarisés dans des écoles de l'agglomération rennaise. Parmi ces enfants, 18 appartenaient à la classe d'âge de 6-7 ans (âge moyen : 80.5 mois, écart-type : 3.8 mois), 18 à la classe d'âge de 8-9 ans (âge moyen : 102.8 mois, écart-type : 3.5 mois), et 18 à la classe d'âge de 10-11 ans (âge moyen : 129.4 mois, écart-type : 3.9 mois). Les passations se sont déroulées au sein de l'école, individuellement et en présence d'un expérimentateur. La participation de chaque enfant était soumise à un accord parental.

2.2. Démarche méthodologique

Notre démarche s'inscrit dans la perspective idiographique prônée par Molenaar (Molenaar, 2004; Molenaar & Campbell, 2009; Molenaar, Huizenga, & Nesselroade, 2002) qui défend l'idée que les analyses menées au niveau de la population échouent généralement à rendre compte des variations (intra-) individuelles dès lors que sont impliqués des processus individuels spécifiques. L'approche est donc centrée sur la variabilité intra-individuelle et sa modélisation. Deux étapes d'analyse se succèdent. Le modèle de la valence espérée s'appliquant au changement individuel au cours de la passation, nous évaluerons l'ajustement du modèle aux données recueillies chez chaque participant. Nous intégrerons dans un deuxième temps les niveaux d'analyse intra- et interindividuels au sein d'un modèle multi-niveaux. Le principe général de cette deuxième étape est de considérer que les valeurs de paramètres obtenues au niveau intra-individuel sont issues d'une distribution de niveau interindividuel¹⁰. Le modèle multi-niveaux permet ainsi une estimation des paramètres (et une prédiction des valeurs individuelles prises par chacun de ces paramètres) en considérant que les différences interindividuelles dans la valeur d'un paramètre donné peuvent être modélisées par une loi de distribution. Nous inspirant des propositions de Nesselroade et Molenaar (1999), nous ne conserverons pour l'estimation du modèle multi-niveaux que les sujets pour lesquels l'ajustement du modèle (intra-) individuel présente un ajustement « satisfaisant ». A

¹⁰ Cela revient à considérer que les estimations d'un paramètre sur un ensemble de sujets constituent une variable aléatoire. L'approche multi-niveaux s'intègre ainsi très naturellement à un modèle bayésien puisque dans ce dernier, tout paramètre est considéré comme une variable aléatoire (qu'il se situe ou non au niveau interindividuel).

un modèle populationnel, nous proposons ainsi de substituer un modèle sous-populationnel c'est-à-dire un modèle appliqué aux seuls sujets dont il décrit le comportement de manière satisfaisante.

2.3. Estimation des paramètres du modèle de la valence espérée

Wetzels, Vandekerckhove, Tuerlinckx et Wagenmakers (2010) ont mis en évidence les avantages que présente l'estimation des paramètres du modèle de la valence espérée dans un cadre bayésien en comparaison à l'approche plus traditionnelle du maximum de vraisemblance. Il s'agit dans ce cadre de déterminer pour un individu donné la distribution *a posteriori*¹¹ des trois paramètres du modèle. Chaque paramètre est considéré comme une variable aléatoire et l'on cherche à connaître la densité de probabilité jointe des trois paramètres w , a et c sachant les données recueillies chez le sujet considéré. Deux éléments essentiels de l'estimation bayésienne doivent être spécifiés pour obtenir cette distribution *a posteriori*.

- Il faut d'abord spécifier la distribution *a priori* des paramètres qui correspond, comme la distribution *a posteriori*, à une densité de probabilité jointe sur les trois paramètres. La distribution *a priori* traduit l'incertitude initiale quant aux valeurs des paramètres. Dans le cas du modèle de la valence espérée, chaque paramètre est borné à gauche et à droite mais aucune information sur ses valeurs les plus probables n'est disponible. Un modèle de distribution adapté à ce type de variable est une distribution beta¹² dans laquelle les paramètres α et β sont fixés à 1, ce qui équivaut à une distribution uniforme sur l'intervalle $[0;1]$. En postulant que les distributions *a priori* de chacun des paramètres sont indépendantes, le produit de ces distributions permet d'obtenir une distribution jointe qui constitue la distribution *a priori* des trois paramètres.

- Il faut aussi spécifier la fonction de vraisemblance qui correspond, comme dans l'approche fisherienne, à la densité de probabilité des données observées pour un modèle de distribution donné. Dans le cadre du modèle de la valence espérée, les données sont constituées par le choix binaire du sujet dans l'un des deux paquets de cartes, à chacun des

¹¹ La distribution *a posteriori* définit la probabilité d'obtenir les valeurs possibles d'un paramètre conditionnellement aux données individuelles recueillies.

¹² La distribution beta prend ses valeurs entre 0 et 1, ce qui est également le cas des paramètres w et a . Puisque le paramètre c est initialement borné entre -5 et 5, nous lui avons appliqué la transformation suivante : $(c+5)/10$.

essais de la passation de la CGT. Un modèle de distribution adapté à ce type de données correspond à une distribution de Bernoulli.

La distribution *a posteriori* des paramètres du modèle de la valence espérée est finalement obtenue par application de la formule de Bayes, en effectuant le produit de la distribution *a priori* et de la fonction de vraisemblance¹³.

On peut ensuite chercher à résumer les valeurs des trois paramètres pour un sujet donné, à partir de la moyenne de la distribution *a posteriori* de chacun de ces paramètres. L'obtention de cette moyenne nécessite d'intégrer mathématiquement la distribution *a posteriori*, ce qui constitue une contrainte majeure de l'approche bayésienne, notamment lorsque cette distribution n'a pas une forme connue (par ex., autre que normale, beta, gamma,...) et qu'elle est, comme ici, multivariée. On peut alors se tourner vers des méthodes de simulation Monte Carlo par Chaîne de Markov (MCMC) qui consistent à simuler un grand nombre de valeurs au sein de cette distribution *a posteriori*¹⁴. Différents résumés statistiques peuvent être ensuite calculés à partir de l'échantillon des valeurs de paramètres tirées de la distribution *a posteriori*.

L'approche bayésienne par estimation MCMC offre aussi une possibilité intéressante pour évaluer l'ajustement du modèle aux données à travers la notion de distribution prédictive *a posteriori*. Contrairement à la distribution *a posteriori*, la distribution prédictive *a posteriori* est une distribution sur les données (et non pas sur les paramètres). Elle peut être définie comme la distribution de données futures qui seraient générées par le modèle considéré (Lynch, 2007). Cette prédiction de données futures prend en compte à la fois l'incertitude sur l'estimation des paramètres, qui découle de la distribution *a posteriori* de ces paramètres, et également l'incertitude liée à l'échantillonnage des données, qui découle de la densité de probabilité de ces données (spécifiée par la fonction de vraisemblance). Afin de juger de l'ajustement du modèle de la valence espérée aux données d'un individu, il est ainsi possible, une fois les paramètres estimés pour cet individu, de générer des données prédites par le modèle à partir de la distribution prédictive *a posteriori*. Si ces données prédites sont similaires à celles effectivement recueillies chez ce sujet, c'est-à-dire si le mécanisme de

¹³ À une constante de normalisation près, qui correspond à l'inverse de la distribution marginale des données.

¹⁴ Pour chacun des paramètres individuels, nous avons choisi d'approximer la distribution *a posteriori* à partir d'un échantillon de 18000 valeurs simulées. Ces 18000 valeurs simulées correspondent à 3 chaînes de Markov comprenant chacune 7000 itérations, les 1000 premières itérations de chaque chaîne étant supprimées afin de ne conserver que des estimations situées dans la phase de convergence de la chaîne. La méthode de « thinning » employée ici ne conserve qu'une seule itération sur deux successives, afin d'éviter la présence d'autocorrélations entre des itérations successives (chaque chaîne comportait à l'origine 14000 itérations).

génération des données a bien été reconstruit par le modèle, on pourra alors conclure à un bon ajustement du modèle de la valence espérée chez cet individu. Nous détaillons en note la manière dont nous avons procédé pour chaque participant¹⁵. Signalons enfin que toutes les analyses présentées plus loin ont été effectuées à l'aide du logiciel WinBUGS, piloté via R à partir du package R2WinBUGS.

3. Analyses

Les résultats des analyses sont présentés en trois sous-sections : i) analyses de niveau individuel : évaluation pour chaque individu de l'ajustement du modèle de la valence espérée ; ii) analyse multi-niveaux : estimation des paramètres du modèle chez les seuls participants pour lesquels le modèle individuel présente un ajustement « satisfaisant » ; iii) analyses de validité des paramètres du modèle.

3.1. Analyses de niveau individuel : ajustement du modèle de la valence espérée

Comme indiqué précédemment, l'ajustement du modèle de la valence espérée est évalué chez chaque enfant à partir du pourcentage de prédictions vérifiées de ce modèle (voir note de bas de page). La figure 15 présente la distribution du pourcentage de prédictions valides des réponses par le modèle de la valence espérée, dans chacun des groupes d'âge.

¹⁵ La fonction de vraisemblance du modèle correspond ici à une distribution de Bernoulli (choix binaire à chaque essai de la passation). La distribution prédictive a posteriori permet donc, pour chaque essai de la passation et sachant les valeurs de paramètres estimées pour le sujet considéré, de générer un certain nombre de réponses binaires prédites par le modèle. L'espérance de l'évènement « le paquet avantageux est sélectionné à cet essai » est calculée à partir de 18000 réponses générées. Si cette espérance est supérieure à 0.5, le modèle prédit que l'enfant a une probabilité plus forte de piocher dans le paquet avantageux que dans le paquet désavantageux. On peut alors vérifier, à partir de la réponse de cet enfant à cet essai, si la prédiction du modèle est avérée ou non. En procédant de la même manière pour chacun des essais de la passation, il est alors possible de déterminer le pourcentage d'essais pour lesquels le modèle effectue une prédiction qui s'est effectivement vérifiée. Ce « pourcentage de prédictions vérifiées » peut ainsi être considéré comme une mesure de l'ajustement du modèle aux données recueillies chez l'individu.

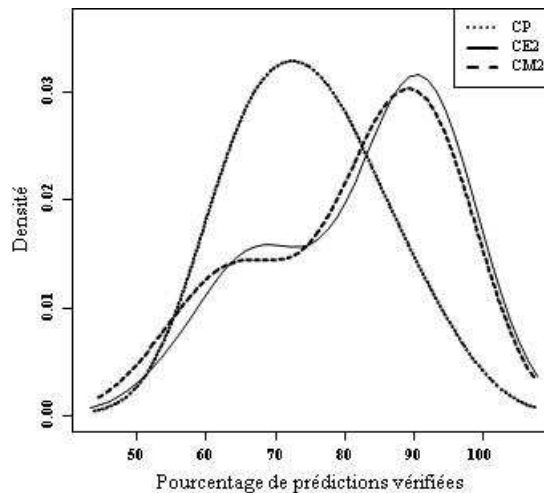


Figure 13. Représentation graphique de la distribution du pourcentage de prédictions valides des réponses des participants par le modèle de la valence espérée, dans chacun des groupes d'âge.

Sans distinguer les groupes d'âge, le modèle de la valence espérée effectue une prédiction valide quant au paquet qui va être sélectionné par l'enfant dans 79,3% des essais. En régressant le pourcentage de prédictions valides sur la variable « groupe d'âge », on remarque également, à un seuil proche de la significativité habituelle, que cette prédiction est moins bonne chez les 6-7 ans que chez les 8-9 ans et les 10-11 ans ($B = -7.5$, $SE = 4.0$, $p = .07$), ces deux derniers groupes d'âge ne se distinguant pas l'un de l'autre ($B = -1.28$, $SE = 4.0$, $p = .75$).

Pour tester l'hypothèse d'un meilleur ajustement du modèle pour des performances élevées, nous avons construit une variable quantifiant les performances de chaque enfant à la CGT en mesurant le nombre d'essais pour lesquels le paquet avantageux a été choisi (borné entre 0 et 100). Comme attendu, la régression de cette variable sur le groupe d'âge montre que la performance à la CGT est moins élevée chez les 6-7 ans que chez les 8-9 ans et les 10-11 ans ($B = 18.87$, $SE = 6.02$, $p < .01$), ces deux derniers groupes d'âge ne se distinguant pas l'un de l'autre ($B = 3.49$, $SE = 6.02$, $p = .57$). Un résultat comparable apparaît en régressant le pourcentage de prédictions valides du modèle de la valence espérée sur la performance à la CGT. Notons cependant qu'à l'effet linéaire de la performance à la CGT ($B = -1.44$, $SE = 0.21$, $p < .0001$) s'ajoute un effet quadratique de cette même variable ($B = -0.02$, $SE = 0.002$, $p < .0001$). Ces résultats mettent en évidence un bon ajustement du modèle de la valence espérée chez les enfants dont les performances à la CGT sont élevées. A titre d'illustration, les prédictions du modèle de la valence espérée sont vérifiées pour 96% des essais chez

l'enfant dont le score à la CGT est le plus élevé (97 choix dans le paquet avantageux sur 100 essais). L'ajustement du modèle est également satisfaisant chez les enfants peu performants. Les prédictions du modèle se vérifient ainsi pour 77% des choix effectués chez l'enfant n'ayant choisi le paquet avantageux que 23 fois sur 100. L'ajustement du modèle est en revanche de mauvaise qualité chez les enfants dont les performances à la CGT sont de niveau intermédiaire. Par exemple, le moins bon ajustement du modèle (54% des choix effectués) est observé chez un enfant ayant régulièrement alterné d'un paquet à l'autre tout au long de la passation et choisi le paquet avantageux 48 fois sur 100. Notons enfin que l'ajustement du modèle de la valence espérée s'améliore au cours de la passation¹⁶.

Tableau 9. Moyenne et écart-type (E.T.) du pourcentage d'enfants, par blocs de 20 essais et pour l'ensemble de la passation, pour lesquels la prédiction du modèle de la valence espérée est avérée.

Essais	Moyenne (E.T.)
1 à 20	65.9 (10.5)
21 à 40	78.1 (4.8)
41 à 60	81.4 (5.3)
61 à 80	83.6 (4.6)
81 à 100	84.9 (4.4)
Total	78.8 (9.3)

En résumé, le modèle de la valence espérée permet de prédire près de 80% des choix effectués par les enfants. Cet ajustement global dissimule cependant une assez forte variabilité, attribuable aux sujets d'une part et à l'avancement de la passation d'autre part. Concernant les différences d'ajustement entre enfants, une grande disparité a été observée, allant de prédictions vérifiées dans 96% des essais jusqu'à des prédictions proches de celles qui seraient fournies par le simple hasard (54%). Pour tenter de rendre compte de ce phénomène, rappelons que l'ajustement le moins bon est obtenu chez des enfants qui

¹⁶ Un modèle de régression appliqué à ces données met en évidence une différence d'ajustement entre le premier et le deuxième bloc d'essais ($B = 12.22$, $SE = 2.02$, $p < .0001$) ainsi qu'entre le deuxième bloc d'une part, le troisième, le quatrième et le cinquième bloc d'autre part ($B = 5.85$, $SE = 1.65$, $p < .0001$).

paraissent choisir la carte au hasard et alternent régulièrement d'un paquet à l'autre. Or le modèle de la valence espérée vise à décrire la manière dont un individu s'éloigne d'un état d'incertitude totale pour développer progressivement une préférence pour l'un des paquets. Il n'est donc pas étonnant que ce modèle ne parvienne pas à prédire les réponses dont l'incertitude reste élevée tout au long de la passation. Cette interprétation est corroborée par le lien observé entre l'ajustement du modèle de la valence espérée et l'avancement de la passation (voir tableau 13) : assez faible en début de passation, plus élevé ensuite pour se stabiliser aux alentours du troisième bloc d'essais (soit à partir du quarantième essai environ). Or, en début de passation, les enfants sont dans l'incertitude la plus totale. Comme nous l'avons vu précédemment, le modèle de la valence espérée suppose que la réduction de cette incertitude passe par une phase d'exploration au cours de laquelle la sélection des deux paquets est aléatoire. Ce n'est que dans un deuxième temps, sur la base de cette expérience initiale, qu'une préférence pour l'un des paquets peut éventuellement se développer. On ne s'étonnera donc pas qu'un modèle formel ne puisse rendre compte de manière satisfaisante de conduites d'exploration guidées, en début de passation, par le hasard.

En conclusion, l'ajustement du modèle de la valence espérée à des données individuelles n'est pas satisfaisant pour tous les enfants de l'échantillon. Ces difficultés semblent en partie attribuables à la présence de choix effectués au hasard par les individus, en particulier au début de la passation. S'il est possible que ces choix effectués au hasard se maintiennent tout au long de la passation chez certains enfants, expliquant alors le faible ajustement du modèle, une autre explication de ce phénomène peut être envisagée. On peut en effet considérer que le modèle de la valence espérée présente des difficultés à prédire non pas l'absence de préférence pour l'un des paquets, mais l'alternance de cette préférence d'un paquet à l'autre au cours de la passation. Le problème serait alors moins lié au fait que certains sujets répondent au hasard qu'à une trop grande labilité des préférences que le modèle ne parviendrait pas à reconstruire chez certains sujets. Nous reviendrons sur cette question plus loin.

3.2. Analyse multi-niveaux : estimation des paramètres du modèle de la valence espérée

L'estimation des paramètres du modèle multi-niveaux qui intègre les niveaux intra- et interindividuel peut tenir compte des enseignements des analyses (intra-) individuelles précédentes en portant uniquement sur les données des enfants pour lesquels le modèle de la valence espérée présente un ajustement satisfaisant. Le critère choisi et sur lequel repose cette

agrégation « informée » des données consiste à retenir les sujets pour lesquels le modèle de la valence espérée prédit de manière valide au moins 2/3 des décisions. L'application de ce critère conduit à retenir 44 enfants, dont 14 appartiennent au groupe d'âge des 6-7 ans, 16 au groupe d'âge des 8-9 ans, et 14 au groupe d'âge des 10-11 ans.

La distribution *a posteriori* de chacun des paramètres du modèle multi-niveaux a été obtenue à partir de 6000 valeurs simulées¹⁷. L'ajustement du modèle, évalué sur la base des prédictions obtenues à partir de la distribution prédictive *a posteriori* (elles sont vérifiées, tous sujets confondus, pour 83.2% des essais) apparaît acceptable. Le tableau 14 présente les moyennes et écarts-type de la moyenne de la distribution *a posteriori* des trois paramètres w , a , et c , dans chacun des groupes d'âge et pour l'ensemble des 44 enfants. On vérifie que les estimations fournies par le modèle (intra-) individuel correspondent parfaitement à celles fournies par le modèle multi-niveaux ($w : r(44) = 0.96, p < 0.01$; $a : r(44) = 0.98, p < 0.01$; $c : r(44) = 0.93, p < 0.01$).

Tableau 10. Moyennes et écarts-type des trois paramètres du modèle de la valence espérée, dans chacun des groupes d'âge et pour l'ensemble de l'échantillon (N=44).

Groupe d'âge	w	a	c
6-7 ans	0.43 (0.20)	0.44 (0.21)	0.64 (0.30)
8-9 ans	0.60 (0.16)	0.44 (0.23)	0.60 (0.29)
10-11 ans	0.64 (0.16)	0.42 (0.18)	0.62 (0.37)
Total	0.56 (0.19)	0.43 (0.20)	0.62 (0.31)

Ces résultats montrent que l'intégration des niveaux d'analyse inter- et intra-individuel conduit à une légère amélioration de l'ajustement du modèle, le pourcentage de prédictions vérifiées passant de 79.3% à 83.2%. La très forte corrélation observée entre les estimations du modèle (intra-) individuel et celles du multi-niveaux, quel que soit le paramètre considéré, montre surtout que la structure des différences interindividuelles obtenue en considérant

¹⁷ Ces 6000 valeurs simulées correspondant à 3 chaînes de Markov comprenant chacune 2500 itérations, les 500 premières itérations de chaque chaîne étant supprimées afin de ne conserver que des estimations situées dans la phase de convergence de la chaîne. Nous utilisons également la méthode de « thinning », en ne conservant qu'une seule itération parmi deux successives (chaque chaîne comportait à l'origine 5000 itérations). Précisons également que ce modèle a été estimé en distribuant chacun des paramètres du niveau (intra-) individuel (w , a et c) selon une distribution beta de niveau interindividuel. En suivant les recommandations de Ortega, Wagenmakers, Lee, Markowitsch et Piefke (2012), les paramètres α et β de cette distribution de niveau interindividuel ont été transformés sous la forme d'une moyenne et d'une variance (cette re-paramétrisation est plus classiquement utilisée dans le cadre des modèles hiérarchiques beta-binomiaux auxquels s'apparente le modèle appliqué ici).

isolément chaque sujet est similaire à celle dégagée en considérant que chaque sujet appartient à un groupe d'individus qui présentent le même pattern de variabilité intra-individuelle¹⁸. Cette similarité rend légitime la comparaison interindividuelle de paramètres estimés au niveau individuel, dès lors que le degré d'ajustement du modèle confère une validité suffisante à l'estimation individuelle des paramètres chez chacun des sujets considérés.

3.3. Etude de la validité des paramètres du modèle de la valence espérée

En proposant le modèle de la valence espérée, Busemeyer et Stout (2002) envisageaient la possibilité d'une interprétation clinique des paramètres estimés. La valeur du paramètre w constituerait ainsi une information sur la sensibilité de l'individu aux pertes dont il fait l'expérience (relativement aux gains). Celle du paramètre a renseignerait sur le taux de mise à jour de la valence espérée au fur et à mesure que l'expérience du sujet s'accroît. Celle du paramètre c renverrait à l'évolution de la tendance du sujet à explorer au hasard les différents paquets. Tout en incitant à la prudence quant à ce type d'interprétation clinique du fait d'une trop grande incertitude sur l'estimation des paramètres à l'échelle individuelle, Wetzels *et al.* (2010) présentent des résultats d'analyses de comparaison entre groupes qui confortent ce type d'interprétation.

Quelle est la validité des paramètres estimés dans ce travail sachant que l'interprétation de Busemeyer et Stout (2002) et de Wetzels *et al.* (2010) s'applique à une autre population (des adultes) et à une tâche conceptuellement identique mais plus difficile (la *Iowa Gambling Task*) ? Des éléments de réponse à cette question sont apportés en régressant les performances des enfants à la CGT (mesurées par le nombre de choix effectués dans le paquet avantageux) sur les valeurs estimées des paramètres du modèle de la valence espérée. On s'attend d'abord à ce que le paramètre w soit un prédicteur positif des performances à la CGT. L'obtention d'une performance élevée nécessite en effet de ne pas se focaliser uniquement sur les valeurs des gains obtenus dans les deux paquets, qui sont particulièrement saillantes car constantes, mais de tenir compte également des pertes variables que ces paquets occasionnent. Nous faisons également l'hypothèse d'un lien quadratique entre le paramètre a et les performances à la CGT : une forte vitesse de mise à jour de la valence espérée entraînerait des performances moyennes puisque l'individu tient principalement compte des

¹⁸ Le critère d'ajustement satisfaisant du modèle de la valence espérée retenu dans cette étude garantit un certain niveau de comparabilité d'individus dont le comportement correspond à un pattern de réduction progressive de l'incertitude et de développement de la préférence pour l'un des paquets de cartes.

événements les plus récents, et change donc de paquet dès qu'il fait l'expérience d'une valence négative (il piocherait donc aussi souvent dans les deux paquets, en alternant régulièrement). Une mise à jour lente pourrait quant à elle entraîner une préférence pour le paquet désavantageux d'une part (performances faibles), ou désavantageux d'autre part (performances élevées). En effet, les valences dont ces sujets font l'expérience en piochant dans l'un ou l'autre des paquets affectent peu leurs choix ultérieurs et leur préférence pour l'un des paquets tend à se maintenir tout au long de la tâche. Le paramètre c devrait enfin présenter un lien positif avec les performances à la CGT, les sujets qui cessent rapidement d'explorer les paquets au hasard devant obtenir de meilleures performances.

Les effets des différents paramètres sur la performance à la CGT ont été analysés par régression linéaire multiple en introduisant séquentiellement les paramètres dans le modèle. Les relations entre paramètres et performance à la CGT peuvent être visualisées sur la figure 16. Le paramètre w est un prédicteur significatif de la performance à la CGT ($B = 85.36$, $SE = 6.82$, $p < .001$) et il rend compte de la majeure partie de la variance de la performance à la CGT ($R^2 = 0.79$). Le paramètre a prédit également significativement la performance à la CGT ($B = 17.25$, $SE = 6.65$, $p < .05$), mais la part supplémentaire de variance expliquée obtenue en ajoutant ce paramètre est très faible (le R^2 passe de 0.79 à 0.82). Enfin, le paramètre c est sans relation avec la performance à la CGT ($B = -0.49$, $SE = 4.29$, $p = .91$).

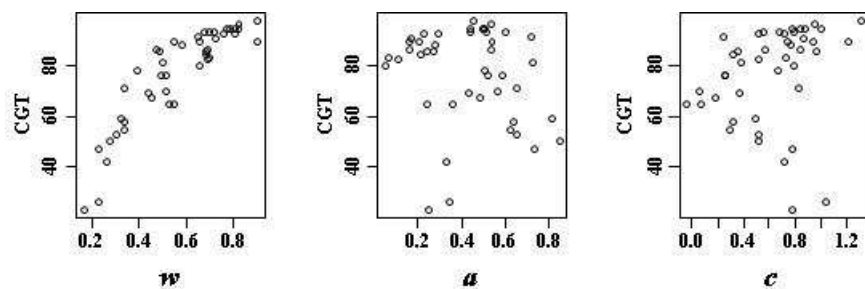


Figure 14. Représentation graphique des liens entre la performance à la CGT et chacun des paramètres w , a et c .

L'essentiel à retenir de ces analyses concerne le paramètre w , qui rend compte de près de 80% de la variance des performances à la CGT. Cette relation linéaire va dans le sens attendu : à une valeur élevée de w correspond une performance élevée à la CGT. Ce résultat conforte l'interprétation de w en termes de sensibilité des enfants à l'égard des pertes dont ils font l'expérience (et non pas seulement à l'égard des gains). La sensibilité à l'égard des pertes

constitue donc le processus qui détermine principalement la performance des enfants de 6 à 11 ans à la CGT. Les résultats obtenus pour le paramètre a , prédicteur positif de la performance à la CGT, sont plus contre intuitifs. Une mise à jour rapide de la valence espérée au cours de la passation (i.e., une forte sensibilité à l'effet de récence) semble conduire à de meilleures performances à la CGT. Ce résultat est à relativiser fortement du fait de la très faible part de variance expliquée par a . De plus, le deuxième graphique de la figure 16 suggère que l'existence de cette relation est en partie attribuable aux deux sujets dont les performances à la CGT sont les plus faibles, c'est-à-dire ceux qui développent une préférence pour le paquet désavantageux¹⁹. Il est donc difficile de conclure en faveur d'un quelconque pouvoir explicatif du paramètre a dans cette étude. La même conclusion vaut pour le paramètre c dont nous avons vu qu'il était sans lien avec la performance à la CGT.

En conclusion de cette série d'analyses, le modèle de la valence espérée, s'il fait preuve d'une capacité satisfaisante à reconstruire les données des participants de cette étude, apparaît insuffisamment parcimonieux, ce qui nous semble pouvoir s'expliquer de deux manières.

Il se peut tout d'abord que ces résultats soient spécifiques aux participants de l'échantillon, la difficulté principale de la CGT tenant plus à la prise en compte des pertes qu'à l'absence de focalisation sur les gains, plus élevés dans le paquet désavantageux. Cette prise en compte pourrait être suffisante pour identifier progressivement le paquet avantageux sans que ni la mise à jour des expériences passées (paramètre a), ni la vitesse de diminution des conduites d'exploration (paramètre c), n'interviennent chez des enfants de 6 à 11 ans.

On peut en revanche supposer que d'autres processus non formalisés dans le modèle puissent intervenir à cette période de développement, par exemple les compétences en numéracie. En effet, le modèle de la valence espérée suppose dans sa formalisation qu'une perte de six bonbons lors du choix d'une carte est perçue par l'enfant comme six fois plus élevée qu'une perte de un bonbon lors du choix d'une autre carte. Si cette supposition peut sembler vraisemblable chez l'adulte, elle reste à éprouver chez de jeunes enfants en imaginant des modifications du modèle formalisant les traitements numériques effectués lors de la comparaison de valeurs de pertes distinctes, et en comparant l'ajustement d'un modèle incluant ces modifications à celui du modèle initial.

¹⁹ Les résultats d'analyses complémentaires montrent que cette relation n'est plus significative lorsque les données de ces deux enfants ne sont plus prises en compte.

Cette stratégie de recherche qui consiste à mettre en compétition des formalisations s'appuyant sur des conceptions théoriques distinctes, pourrait également être envisagée si les résultats présentés dans cette section ne sont pas spécifiques aux enfants âgés de 6 à 11 ans, mais généralisables à tout type de population. Si le paramètre w qui formalise un processus de sensibilité aux pertes, semble être le principal déterminant des performances des individus aux tâches de *gambling* (CGT ou IGT), les mécanismes qui sous-tendent ce processus restent à préciser. A différentes manières de concevoir processuellement le paramètre w pourraient ainsi correspondre différents modèles formels dont les mérites peuvent être comparés sur la base de leurs ajustements respectifs. Par exemple, l'équation 1 du modèle de la valence espérée véhicule une conception capacitaire de la sensibilité du sujet aux conséquences de ses choix : cette sensibilité y est conçue comme une quantité répartie entre les gains et les pertes, de manière analogue à un système de vases communicants. De par cette relation de complémentarité, la sensibilité aux gains est considérée comme étroitement dépendante de la sensibilité aux pertes. A cette conception pourrait se substituer une formalisation postulant l'indépendance de ces deux types de sensibilité, chacun d'eux se voyant associer un paramètre distinct. En étendant cette proposition théorique, on pourrait également imaginer un modèle dans lequel les paramètres associés à ces deux types de sensibilité pourraient prendre des valeurs différentes au cours de la passation de la tâche.

4. Conclusion

L'étude scientifique du fonctionnement psychologique consiste le plus souvent à adopter une approche « descendante » qui privilégie un niveau d'analyse général pour atteindre des lois de niveau différentiel, lois éventuellement heuristiques à un niveau individuel (Juhel, 2013). Nous avons cherché dans ce travail à illustrer l'intérêt d'une approche alternative qualifiée d'« ascendante » au sens où celle-ci consiste à juger de la plausibilité d'un modèle au niveau individuel avant de l'appliquer aux individus qui présentent un pattern « identique » de variabilité intra-individuelle (Nesselroade, 2010). Une telle démarche présente l'avantage de légitimer les comparaisons effectuées ensuite au sein de l'ensemble des individus ainsi regroupés. L'un des aspects sur lequel des investigations sont à mener concerne les critères d'agrégation des individus, et en particulier l'établissement de critères permettant de considérer par exemple que l'ajustement du modèle individuel est acceptable ou que deux patterns de variabilité intra-individuelle sont identiques. Le critère

relativement arbitraire appliqué dans ce travail, s'il ne constitue pas le premier seuil de décision arbitraire utilisé en psychologie, pourrait ainsi être davantage justifié.

Ce chapitre fournit également une illustration des possibilités offertes par les modèles cognitifs formels pour désintriquer les processus échantillonnés par une tâche cognitive complexe. En choisissant une situation de prise de décision sous incertitude, nous avons cherché à éprouver la pertinence du modèle de la valence espérée en évaluant sa capacité à prédire les données recueillies, et en questionnant la validité de l'interprétation psychologique des paramètres. Si les prédictions de ce modèle se sont avérées relativement bonnes, le fait que l'un des paramètres suffise à rendre compte de la quasi-totalité de la variance de la performance à la CGT laisse penser que d'autres modèles sont à envisager, du moins lorsque l'on s'intéresse à une population d'enfants de l'âge de ceux de notre échantillon. Dans cette démarche d'amélioration du modèle, toute hypothèse psychologique théoriquement fondée est finalement susceptible d'être formalisée, mise à l'épreuve des faits et/ou mise en compétition avec d'autres modèles cognitifs formels. Lorsque l'un de ces modèles semble se distinguer, il est également possible de questionner sa validité de façon plus externe, en évaluant les relations entre les paramètres du modèle, estimés dans un cadre expérimental donné, et les processus sous-jacents mesurés avec des tâches dont l'interprétation théorique est plus assurée.

Discussion générale

Objectifs de la thèse : aspects théoriques et méthodologiques

L'objectif de cette thèse était d'identifier les différents processus que les enfants mobilisent au cours de leur développement afin de s'adapter aux situations de prise de décision sous incertitude. Parmi ces processus, nous avons pour l'essentiel restreint nos investigations à ceux qui se rattachent au champ du contrôle cognitif et du raisonnement logique, bien que certaines parties rapportent également quelques éléments empiriques sur la question du rôle des heuristiques (chapitre 6), de la sensibilité aux gains, et de la tendance à l'exploration (chapitre 7). Afin d'espérer atteindre cet objectif, nous avons adopté de manière conjointe les niveaux d'analyse propres aux approches différentielle (variabilité inter- et intra-individuelle des conduites) et développementale (changement micro- et macrogénétique) de la psychologie. La mobilisation de ces deux approches a eu des répercussions importantes sur nos choix théoriques et méthodologiques.

Concernant tout d'abord les aspects théoriques, les modèles factoriels des fonctions exécutives auxquels nous nous sommes référés, ainsi que le modèle de la vicariance proposé par Reuchlin (1978), ont permis d'inscrire notre travail dans le cadre de l'étude de la structure des différences interindividuelles. Cette structure a également été envisagée comme variant au niveau intraindividuel, et ce de deux manières. Tout d'abord, la mobilisation de l'approche transactionnelle présentée dans le chapitre 6 nous a permis d'imaginer des modifications de la structure des différences interindividuelles selon les différentes situations que rencontrent les individus. Deuxièmement, en nous situant dans la continuité des travaux de Piaget et de ses successeurs, nous avons cherché à rendre compte de la manière dont cette structure change au cours du temps, que ce temps soit envisagé à l'échelle de la résolution d'une épreuve ou à celle du développement.

Concernant ensuite nos choix méthodologiques, il nous a paru essentiel de sélectionner des méthodes qui nous permettent de traduire opérationnellement nos hypothèses relatives à la variabilité et au changement. De ce point de vue, notre choix de nous plonger au sein de la multitude de modèles statistiques qui s'offrent au psychologue, et d'en présenter ici un échantillon, ne reflète pas tant notre goût pour la technicité que l'estimation de ces modèles implique parfois ; il découle davantage d'une intention de ne pas en rester uniquement à un discours conceptuel sur l'intérêt de prendre en compte la variabilité et le changement, et d'une volonté de connecter ce discours à une réalité empirique qui puisse en constituer le fondement.

Contrôle, raison, logique

Les quatre études empiriques que nous avons présentées dans ce document se focalisent pour l'essentiel sur l'hypothèse selon laquelle l'adaptation de l'enfant en situation de prise de décisions sous incertitude repose sur la mobilisation de processus impliquant le contrôle de son activité par l'enfant, son raisonnement, sa logique. De façon schématique, on peut donc rattacher l'ensemble de notre travail à l'étude des aspects « froids » de la cognition, au sens où les aspects émotionnels ne sont pas directement pris en considération, et à l'étude du versant « haut niveau » de la cognition, au sens où le caractère automatique ou intuitif de la conduite n'est pas envisagé. Afin de résumer les conclusions de ces quatre études, il nous semble important de distinguer celles qui portent sur la tâche du casino (chapitres 4, 5 et 7) de celle qui porte sur l'épreuve piagétienne de quantification des probabilités (chapitre 6). Si les deux épreuves impliquent bien la notion de hasard, la tâche du casino est une épreuve durant laquelle le participant doit s'appuyer sur son expérience afin d'ajuster sa conduite, tandis que l'épreuve de quantification des probabilités implique davantage un raisonnement formel effectué a priori.

Concernant tout d'abord l'épreuve de quantification des probabilités, et en conformité avec le cadre théorique piagétien, les stratégies de résolution que nous avons identifiées s'appuient sur des formes de raisonnement qui, bien que plus ou moins élaborées, sont toutes de nature logico-mathématique. Elles s'appuient en effet sur la prise en compte de l'une au moins des deux dimensions quantitatives impliquées dans l'épreuve (nombre de cas avantageux et nombre de cas désavantageux). Plusieurs niveaux de développement sont identifiés, qui se caractérisent par une coordination plus ou moins élaborée des transformations opérées sur les deux dimensions. Sur ce point, notre contribution ne fait que confirmer les nombreux travaux déjà dédiés à cette question. De par notre intérêt pour la variabilité de niveau interindividuel, nous insistons en outre sur le fait que ces différents niveaux de développement ne caractérisent pas uniquement des enfants d'âges différents, mais également des enfants de même âge. L'approche transactionnelle que nous avons adoptée invite également à tenir compte de la flexibilité que l'enfant parvient progressivement à mettre en place entre des modes de traitement assez rudimentaires et non coordonnés, dès lors qu'il perçoit plus largement l'utilité adaptative des possibilités d'action offertes par les diverses situations qu'il rencontre. Nous mettons ainsi en évidence l'existence de différences interindividuelles dans la tendance qu'ont les enfants à varier au niveau intraindividuel. Le fait que cette variabilité intraindividuelle soit interprétée en termes de flexibilité permet par

ailleurs de rattacher cette étude aux notions de fonctions exécutives et de contrôle cognitif, et donc aux travaux présentés dans les chapitres 4 et 5. Cette flexibilité apparaît comme plus importante chez les enfants plus âgés de notre échantillon, ce qui nous semble un résultat intéressant bien que cette comparaison inter-âge soit fortement limitée par le faible empan d'âge de notre étude (6 et 7 ans). Sur ce point, il eut sans doute été intéressant d'examiner en complément des enfants plus âgés, et notamment des enfants ayant atteint le stade des opérations formelles. Une autre possibilité pour des travaux futurs serait de rencontrer les mêmes enfants un peu avant leur sortie de l'école primaire, et de leur proposer à nouveau de résoudre l'épreuve de quantification des probabilités.

Au regard des résultats de l'étude portant sur la quantification des probabilités, il semble finalement vraisemblable que les conduites des enfants s'appuient sur le raisonnement logique et, dans une certaine mesure, sur le contrôle cognitif. Mais une question qui nous semble cruciale est celle de savoir si cette conclusion peut légitimement être généralisée au champ de la prise de décision sous incertitude (ce qui est suggéré par notre choix d'avoir accordé un chapitre à la quantification des probabilités au sein d'un document consacré à la prise de décision sous incertitude). Si l'épreuve de quantification des probabilités nécessite bien que le participant prenne une décision, elle se différencie fortement de la tâche du casino puisque le participant ne fait jamais l'expérience des conséquences de sa décision et, n'est donc pas directement confronté à de l'incertitude. En cohérence avec la perspective épistémologique de son concepteur, et comme son nom l'indique, cette épreuve se présente davantage comme une évaluation de la compréhension de la notion formelle de probabilité que comme une mesure écologique de la capacité de l'enfant à s'adapter à un environnement incertain. Afin de rendre plus transparente notre démarche, il faut peut être expliquer ici au lecteur que nous avons initialement inclus cette épreuve au sein du protocole présenté dans le chapitre 5, en tant que variable indépendante, car nous nous demandions s'il était possible de rendre compte des performances à la tâche du casino à partir de celles obtenues à l'épreuve de quantification des probabilités. Nous cherchions ainsi à savoir si la tâche du casino impliquait une quantification explicite des probabilités de gain dans les différents paquets de cartes. Cette hypothèse n'a pas été confortée par les données, et nous avons alors décidé de consacrer une étude à la seule quantification des probabilités (chapitre 6). Nous reconnaissons néanmoins qu'il est difficile de prétendre que l'épreuve de quantification évalue la prise de décision sous incertitude au même titre que la tâche du casino et, partant, nous admettons que la mise en évidence du rôle du raisonnement logique et du contrôle cognitif dans cette

épreuve n'implique pas que ces processus soient mobilisés dans des situations plus écologiques de prise de décision sous incertitude comme la tâche du casino.

Concernant maintenant la tâche du casino, nos interprétations n'accordent finalement qu'une place relativement limitée aux processus de contrôle cognitif, qui se résume à la mise en évidence d'une mobilisation de la mémoire de travail au cours de la résolution de l'épreuve chez les enfants de 8 à 11 ans, mais pas chez les enfants de 6-7 ans (chapitre 4). En revanche, la mise à jour des informations par le modèle de la valence espérée (paramètre a), que l'on pourrait rattacher au fonctionnement de la mémoire de travail, n'a pas pu être mise en relation avec la performance à la tâche du casino chez des enfants de même âge. Enfin, aucun effet des fonctions exécutives n'a pu être mis en évidence dans l'étude longitudinale réalisée chez les enfants de 5 à 7 ans. Deux attitudes nous semblent envisageables pour rendre compte de cette absence des effets attendus.

Une première option consisterait à ne pas abandonner trop rapidement nos hypothèses concernant le rôle des processus de contrôle à la tâche du casino, à faire ressortir les différents défauts que nos études présentent sur le plan méthodologique et à spéculer sur le fait que, sans ces défauts, ces effets auraient éventuellement été significatifs. On peut notamment souligner, comme nous l'avons fait, que le choix d'un échantillon aussi jeune n'était pas judicieux dans notre étude longitudinale. Sachant par ailleurs que les épreuves que nous avons employées afin d'évaluer le fonctionnement exécutif ne sont pas « pures » et font intervenir d'autres processus, il aurait sans doute été préférable d'utiliser davantage d'épreuves et de chercher à extraire leur variance commune par des variables latentes. On peut enfin penser que de nouvelles tentatives de modélisation statistique de notre ensemble relativement vaste de données permettront par la suite de poser un autre regard sur ces données et, éventuellement, de valider certaines hypothèses psychologiques relatives au rôle des processus de contrôle cognitif à la tâche du casino.

Alternativement, en tenant compte des nombreux travaux ayant exprimé une certaine réserve vis-à-vis de l'hypothèse de l'implication du contrôle cognitif à la tâche du casino, il nous semble également possible de conclure que cette hypothèse ne semble pas plausible chez les enfants de l'âge de notre échantillon (et en particulier avant l'âge de 8 ans), et de se centrer sur les limites que notre travail présente à un niveau plus théorique. On peut en particulier s'interroger sur les raisons du succès de l'hypothèse du rôle du contrôle cognitif, dans notre travail comme dans celui d'autres auteurs, en dépit du peu de résultats qui la corroborent. Comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises dans la partie théorique de ce document, le

champ de la prise de décision sous incertitude nous semble se prêter facilement à une interprétation de la conduite de l'individu par analogie avec la démarche du chercheur qui étudie cette conduite. L'individu est ainsi volontiers conçu comme ayant construit certaines connaissances concernant les propriétés des objets qui l'environnent, connaissances qu'il chercherait à parfaire en sélectionnant certaines informations au sein de son environnement, et en les mettant à jour au fur et à mesure de son expérience. Il soumettrait ensuite ces données à un certain nombre d'opérations logico-mathématiques de nature probabiliste qui, via une inhibition du bruit environnant, lui permettraient d'isoler certains invariants au sein de l'ensemble enchevêtré des données. Ces invariants acquerraient alors le statut de lois qui engendreraient éventuellement, si la flexibilité du système de connaissance de l'individu le lui permet, une remise en cause de ses croyances initiales. On reconnaît dans une telle description l'intervention des fonctions exécutives (inhibition, flexibilité et mise à jour en mémoire de travail) et des opérations probabilistes dont Piaget et Inhelder (1951) font l'hypothèse, le tout étant intégré au sein d'un fonctionnement d'ensemble tout à fait similaire à celui dont les modèles cognitifs formels font l'hypothèse. En d'autres termes, l'essentiel du cadre théorique que nous avons présenté au début de ce document est ici mobilisé pour rendre compte du fonctionnement d'un individu hypothétique dont la démarche rappelle de toute évidence celle de nombreux scientifiques, et notamment celle qui fut la nôtre dans les travaux que nous avons présentés. A l'heure où nous clôturons ce document, cette « projection » nous apparaît comme excessive, en particulier lorsqu'il s'agit, comme dans notre travail, de rendre compte des conduites d'enfants ayant entre 5 et 7 ans. Il nous semble que, au moins pour une majorité des enfants de cet âge, l'adaptation aux situations de prise de décision sous incertitude ne s'effectue pas sur la base d'un raisonnement inductif aussi sophistiqué. Nous pouvons simplement affirmer que, entre les âges de 8 et 11 ans, les enfants qui obtiennent des performances élevées à la tâche du casino semblent davantage mémoriser et mettre à jour les informations quantitatives qui leur parviennent.

En dehors de ces cadres théoriques rattachés au contrôle cognitif et au raisonnement logique, notre travail n'offre que très peu d'éléments empiriques qui pourraient nous permettre de rendre compte des conduites que nous avons observées à la tâche du casino. La seule piste que nous entrevoyons à ce stade de nos investigations provient du fait que le paramètre w du modèle de la valence espérée, qui est compatible dans sa formalisation avec un processus de sensibilité aux pertes, s'est avéré être un prédicteur de la performance à la tâche du casino chez l'enfant de 6 à 11 ans (chapitre 7). Mais deux limites importantes de ce résultat sont à souligner. La première est que ce paramètre w rend compte de près de 80% de

la variance des performances à la tâche du casino, et l'on peut ainsi se demander s'il ne quantifie pas rien de plus que cette performance elle-même, ce qui limiterait pour le moins son « pouvoir explicatif ». La deuxième est que cette « explication » en appelle une autre : si l'on peut admettre que les enfants qui obtiennent les performances les plus élevées (respectivement les moins élevées) à la CGT sont aussi ceux qui sont les plus sensibles (respectivement les moins sensibles) aux pertes dont ils font l'expérience, il reste à expliquer les raisons de cette sensibilité ainsi que le mécanisme par lequel elle influence les décisions de l'individu.

Un cadre théorique alternatif

Si l'on admet, comme nous venons de le faire, que le cadre théorique dont nous avons principalement fait l'hypothèse ne permet que modestement de rendre compte des conduites de prise de décision sous incertitude des jeunes enfants à la tâche du casino, il est possible, en guise de perspectives, d'évoquer brièvement les modèles qui pourraient constituer une alternative pertinente.

Nous avons vu dans le chapitre 3 que le modèle auquel il est le plus souvent fait référence dans la littérature correspond à l'hypothèse des marqueurs somatiques (Damasio, 1994). Nous avons souligné le fait que cette hypothèse s'appuie sur un niveau d'explication neurobiologique et avons émis certaines réserves quant à la possibilité d'importer ce modèle dans le champ de la psychologie, puisque celle-ci n'a pas les moyens, au niveau d'analyse qui est le sien, de tester cette hypothèse. A une époque où les rapprochements entre psychologie et neurologie sont florissants, et où le concept de cognition incarnée attire fortement l'attention, cette réticence est souvent critiquée par des auteurs qui y voient un dualisme caractéristique de la pure abstraction idéaliste. Il nous semble pour notre part que la théorie des marqueurs somatiques n'appelle pas à un éclectisme théorique alliant psychologie et neurologie, mais défend plutôt explicitement une position qui réduit le niveau d'analyse de la psychologie à celui de la matière neuronale. Si cette piste de recherche nous semble tout à fait légitime, et sans doute prometteuse, nous pensons également que le psychologue n'est pas tenu, même lorsque ses cadres théoriques font défaut, d'adopter le niveau d'analyse de la biologie. La théorie des marqueurs somatiques ne s'impose donc pas à nos yeux comme une alternative au cadre théorique dont nous avons fait l'hypothèse dans notre travail.

Si l'on se tourne maintenant davantage vers la psychologie, il nous semble que relativement peu de cadres explicatifs alternatifs à ceux reposant sur le contrôle cognitif et le

raisonnement logique ont à ce jour été proposés afin de rendre compte des conduites de prise de décision sous incertitude. L'un des modèles les plus cités est celui proposé par Kahneman (2011), qui s'inscrit au sein de la théorie du double processus en proposant une dichotomie entre deux systèmes de traitement de l'information : le système 1, qui est plutôt rapide, intuitif, guidé par les émotions, et soumis à l'intervention de biais, et le système 2, qui est au contraire lent, logique, et rationnel. Comme dans la théorie de la trace floue de Reyna & Brainerd (1991), l'accent est essentiellement mis sur le système 1 et donc sur les processus intuitifs de la cognition, dont notre propre cadre théorique ne rend pas compte. Si ce type de modèles nous semble prometteur dans son ambition générale, il nous semble qu'il lui manque encore une structure fonctionnelle d'ensemble. Le système 1 de Kahneman (2011) nous apparaît en effet consister pour l'essentiel en une liste d'heuristiques et de biais cognitifs encore peu intégrés les uns aux autres, et demeurant à un niveau assez descriptif du comportement.

Il est très probable que nous assisterons dans les années à venir à l'application de nouveaux modèles à la question de la prise de décision sous incertitude, modèles qui partageront cette volonté d'intégrer des pans de la cognition jusqu'ici considérés comme opposés.

Une tentative en ce sens serait d'appliquer à la question de la prise de décision sous incertitude la distinction proposée par Reuchlin (1973) entre processus de *formalisation* et processus de *réalisation*. Cette proposition se présente comme une relecture du postulat selon lequel « *la logique est une axiomatique de la raison* » (Piaget, 1947, p. 51). Reuchlin (1973, p. 37) souligne la manière dont Piaget lui-même a pu émettre des doutes sur ce postulat, en admettant que « *les travaux actuels sur les limites de la formalisation montrent assez qu'au-delà et par conséquent en deçà de cette formalisation, existent des réalités « intuitives » dont il faut bien dégager les rapports avec les structures formalisées, si puissantes que soient devenues ces dernières* ». Le propos de Reuchlin ne se présente pas comme une simple remise en cause de la métaphore du sujet logicien, mais plutôt comme une contribution que l'on pourrait être tenté de qualifier de néo-piagétienne au sens où elle cherche à concilier la théorie opératoire de l'intelligence avec les travaux plus récents issus de la psychologie cognitive, et notamment ceux parmi ces travaux qui insistent sur le caractère limité des capacités de traitement de l'information. Cette conciliation s'opère par l'hypothèse de l'existence conjointe des processus de formalisation d'une part, et de réalisation d'autre part. Le processus de formalisation est défini comme remplissant une fonction adaptative similaire à

l'équilibration piagétienne. Il permettrait à l'individu de résoudre des problèmes complexes grâce à la construction de structures formelles obéissant aux règles de la logique. Le deuxième processus, la réalisation, « *aurait pour fonction de générer des contenus, c'est-à-dire des blocs unitaires d'informations, non articulés, non sécables, susceptibles de fournir dans certains cas des modalités d'adaptation plus économiques que celles qui sont réglées par la formalisation* » (Reuchlin, 1973, p. 40). Ce caractère économique se traduit principalement par le fait que les informations fournies par le processus de réalisation sont immédiatement accessibles et utilisables, ce qui lui confère un avantage sur la formalisation dans la plupart des situations de la vie quotidienne (cf., plus récemment la notion d'heuristique). Les principales limites qui caractérisent le processus de réalisation concernent le nombre d'informations qu'il est capable de générer (cf., limites de la capacité de la mémoire de travail), ainsi que les interférences qui peuvent intervenir du fait que les contenus d'informations générés sont non sécables et que, par conséquent, les informations pertinentes s'accompagnent parfois d'informations parasites (cf., notion d'inhibition). Mais, face à ces limites, et à la différence des auteurs néo-piagétien ainsi que de ceux qui insistent sur le rôle des fonctions exécutives, Reuchlin ne fait pas allusion à l'hypothèse d'un contrôle exécutif de son activité par l'individu. Il opte plutôt pour un fonctionnement qui, bien qu'opérant de concert avec le raisonnement formel, est naturellement intuitif et, parfois, source de biais.

Enfin et de manière tout à fait centrale pour notre propos, Reuchlin (1973) fait l'hypothèse selon laquelle la manière dont les processus de formalisation et de réalisation interagissent, que cette interaction prenne la forme d'une dominance, d'une complémentarité, ou d'un antagonisme, est soumise à l'existence de différences interindividuelles. Ces différences se traduisent par l'existence de préférences pour l'utilisation de l'un ou l'autre de ces processus (cf., notion de styles cognitifs proposée par Witkin, 1965), et également par une plus ou moins grande *mobilité* des individus lorsque la situation exige le passage de l'un à l'autre de ces processus. On reconnaît ici les grandes lignes de la théorie de la vicariance (cf. chapitre 6), que Reuchlin (1978) exposera peu de temps après, et qui pourrait servir de cadre au rapprochement entre les explications rationnelles d'une part, et intuitives d'autre part, proposées dans le champ de la prise de décision sous incertitude.

Remarques conclusives sur la notion de prise de risque

Pour conclure ce travail, nous souhaiterions faire part au lecteur d'une réflexion qui nous a notamment été inspirée par un résultat dont nous avons fait état dans le chapitre 5, et

qui nous semble avoir des conséquences importantes pour notre propos. A partir d'un examen relativement vaste de la littérature, nous avons fait remarquer que les réponses fournies à la tâche du casino dans de nombreuses populations, et en particulier celles que l'on qualifie volontiers de déficitaires à cette épreuve, ne manifestent jamais une préférence nette pour le paquet désavantageux, et ne permettent pas d'exclure la possibilité que les individus répondent majoritairement au hasard. Cette hypothèse nous semble également vraisemblable au regard des diverses observations que nous avons nous-mêmes pu faire lors de la passation de la tâche du casino. Nombreux sont les enfants qui, par découragement ou par lassitude, nous ont semblé renoncer à comprendre le principe de la tâche et, ne parvenant pas à identifier une stratégie leur permettant d'augmenter le nombre de bonbons dans le verre, ont pu se réfugier dans une stratégie de réponses données au hasard ou, ce qui revient quasiment au même, dans une alternance plus ou moins systématique entre les différents paquets de cartes. Nous avons également fait remarquer que cette tendance à répondre au hasard à la tâche du casino se retrouve dans de nombreuses populations que l'on décrit régulièrement comme adoptant plus fréquemment des conduites à risque que la population adulte « normale », comme les enfants et les adolescents, les personnes alcooliques ou toxicomanes, les personnes présentant des lésions du cortex préfrontal, les personnes atteintes du SIDA, les joueurs pathologiques, les personnes atteintes d'anorexie, de boulimie, ou d'obésité, ou encore les criminels incarcérés. Or il nous semble qu'il y a une incohérence à affirmer que les performances à la tâche du casino dans ces différentes populations reflètent une « myopie pour le futur », c'est à dire un fonctionnement « court-termiste » orienté vers la prise de risque et la recherche de gains immédiats si, comme nous le supposons, leurs réponses sont simplement données au hasard. Afin de mieux cerner les raisons de cette incohérence, on peut commencer par reprendre l'exemple de la toxicomanie, dont nous avons vu qu'il était au fondement de la construction de la tâche du casino par Bechara.

Bechara explique aujourd'hui sur le site de son université que le patient toxicomane se caractérise par i) un déni des problèmes qui sont les siens, ii) une tendance à faire le mauvais choix, c'est-à-dire à privilégier la recherche d'une récompense immédiate au risque d'occasionner des conséquences négatives sur le long terme (perdre sa réputation, son emploi, sa maison, sa famille). De ce délaissement d'activités impliquant la sphère sociale au profit d'une pratique marginalisée consistant en une auto-administration d'un plaisir lié au corps, Bechara ne retient donc que la dimension temporelle, en cherchant à comprendre pourquoi le patient toxicomane privilégie le court terme sur le long terme, et pourquoi ce patient ne comprend pas, malgré les évidences, que son choix est « mauvais ». La construction de la

tâche du casino permettra d'opérationnaliser cette dialectique entre but à court terme et but à long terme, tout en éliminant les différences de nature pouvant exister entre ces deux types de buts. Par analogie avec un choix d'investissement boursier dont on peut dire en toute objectivité qu'il s'est avéré avantageux ou non au regard de la somme monétaire finalement empochée, on considère ainsi implicitement que le patient toxicomane qui préfère s'injecter immédiatement une dose d'héroïne plutôt que de chercher un emploi duquel il puisse tirer une certaine reconnaissance sociale est comparable à l'individu qui préfère dépenser 100 euros plutôt qu'investir 50 euros dans un placement prometteur. A aucun moment n'est évoquée la question de la fonction de la conduite toxicomaniaque chez l'individu. On postule simplement qu'elle est un mauvais choix, une myopie pour le futur, et on cherche à objectiver expérimentalement cette erreur de jugement afin d'en identifier les déterminants.

Par un raisonnement similaire, la tâche du casino a été employée auprès de nombreuses populations chez lesquelles l'observateur extérieur perçoit la réalisation fréquente de mauvais choix (cf. liste dans l'avant dernier paragraphe). On pourrait finalement avoir le sentiment que la tâche du casino, sous couvert d'objectivité scientifique, permet de dresser une ligne de partage qui n'est pas indépendante de certaines considérations morales. Remarquons que cette ligne de partage, entre un bon et un mauvais choix, a été délimitée par des chercheurs ayant consacré de longues années à l'obtention d'un diplôme et d'une situation sociale confortable. Comme Damasio (1994) l'explique, l'hypothèse des marqueurs somatiques ne permet pas seulement de comprendre pourquoi les psychopathes « *volent, violent, tuent, et mentent* », mais également pourquoi d'autres personnes plus adaptées « *pratiquent le jogging, font des études supérieures, et s'inscrivent dans une école de médecine* ». Ces derniers sont en effet guidés « *par l'image d'une issue future positive, qui est à la base de leur capacité à endurer des expériences déplaisantes dans la perspective d'un avenir potentiellement meilleur* » (p. 175). Les marqueurs somatiques expliquent également « *les sacrifices que les braves gens (plain good individuals) font pour les autres, ceux que les bons citoyens faisaient jadis pour leur roi, et ceux que certain héros des temps modernes font encore* », et grâce auxquels ils récoltent « *satisfaction personnelle, reconnaissance sociale, honneurs, affection, prestige, et peut être même argent* » (pp. 175-176). En résumé, nous pensons que la tâche du casino est une épreuve qui suscite très souvent des interprétations à connotation morale, en particulier lorsqu'elle est proposée à des individus issus d'une population dans laquelle on présuppose une tendance à l'adoption de conduites à risque.

Lorsque ces individus obtiennent des performances relativement faibles, et bien que ces performances laissent penser qu'ils n'ont pas développé de préférences pour certains paquets de cartes, leur performance est interprétée par contraste avec celle des sujets qui piochent davantage dans le paquet avantageux. On considère alors qu'ils ont développé une préférence pour le paquet désavantageux, qui manifeste leur myopie pour le futur et leur tendance à la prise de risque, alors même qu'il semble tout à fait vraisemblable qu'ils échouent simplement à saisir la complexité du principe de l'épreuve et répondent donc au hasard.

Les observations informelles que nous avons pu réaliser durant la passation de la tâche de casino nous laissent bien penser que certains enfants prennent effectivement un risque lorsqu'ils sélectionnent des cartes dans le paquet désavantageux. Mais, contrairement à la majorité d'enfants qui répondent au hasard, ceux-ci ont compris que l'un des deux paquets était avantageux et obtiennent généralement de bonnes performances à l'épreuve. Simplement, de manière occasionnelle, ils manifestent un certain plaisir mêlé d'appréhension à « tenter le coup », en piochant dans le paquet désavantageux. Si l'issue est favorable, ils expriment alors une grande satisfaction mais ne réitèrent pas immédiatement, car ils ont conscience du risque que cela engendrerait. Ils finissent néanmoins le plus souvent par retenter leur chance. Lorsque l'issue est défavorable, l'amusement s'accompagne alors d'une déception, « je le savais », « j'aurais pas dû ». Certains de ces enfants ne prendront un tel risque qu'à une ou deux reprises, d'autres plus fréquemment, mais dans tous les cas c'est un risque qui nous semble choisi, pris en connaissance de cause, et non pas un risque subi comme chez les autres enfants qui n'ont pas compris le principe de la tâche, et répondent au hasard. Il faut souligner ici que la tâche du casino est une tâche qui peut s'avérer très ennuyeuse pour celui qui a identifié le paquet avantageux et qui cherche à amasser le plus de bonbons sans prendre de risques. Certains enfants que nous avons rencontrés ont exprimé leur préférence pour le paquet avantageux dès les dix premiers essais et, pendant environ un quart d'heure, il leur a fallu attendre patiemment le 100ème et dernier essai, en piochant systématiquement dans le paquet avantageux. Si certains ont eu cette patience économe, d'autres ont été tentés par une prise de risque choisie et occasionnelle, source de divertissement. Nous revenons donc sur la distance que nous avons initialement exprimée dans l'introduction de ce document, à propos de la phrase de Wallon (1941, p. 69) selon laquelle « *le hasard est l'antidote du destin quotidien, il contribue à y soustraire le jeu* ». Les risques que prennent les individus toxicomanes, alcooliques, joueurs pathologiques, etc..., plutôt que révélant une incapacité à envisager les conséquences futures de leurs actes,

pourraient en effet constituer un moyen de provoquer le destin, de rompre la monotonie, tout en refusant parfois les idéaux moralisateurs qui leur sont proposés. C'est ce que nous semble affirmer Le Joueur de Dostoïevski (1866, p. 47) lorsqu'il s'adresse à un général bien-pensant : *« L'enrichissement ! Il n'y a pas longtemps que je suis né ; mais ce que j'ai vu chez ces gens-là révolte ma nature tartare. Par Dieu ! je ne veux pas de telles vertus ! [...] Ces gens vertueux sont dans leur droit quand ils disent : ces scélérats ! en parlant de tous ceux qui n'amassent pas, à leur exemple. Eh bien ! j'aime mieux faire la fête à la russe ; je ne veux pas être Hoppe et Cie dans cinq générations ; j'ai besoin d'argent tout de suite ; je me préfère à mon capital... Après ça, j'ai peut-être tort, mais telles sont mes convictions »*.

En conclusion, deux attitudes nous semblent envisageables afin d'étudier la prise de décision sous incertitude sous l'angle de la prise de risque. La première est celle que nous avons adoptée, et qui est également celle proposée par la théorie des marqueurs somatiques. On considère que l'efficacité de l'individu dans la mobilisation d'un certain nombre de processus (contrôle cognitif, inhibition de l'impulsivité, traitement des émotions,...) lui permet d'identifier certaines options comme avantageuses afin d'atteindre des objectifs à long terme. Cet individu accepte alors de surmonter les difficultés de son quotidien car il est guidé par la perspective d'une satisfaction ultérieure importante. Lorsque ces processus sont déficients, cette projection sur le long terme n'est pas possible, et l'individu est alors davantage attiré par la recherche d'une satisfaction immédiate, qu'il pourra éventuellement trouver dans l'adoption de conduites à risque qui lui seront probablement préjudiciables sur le long terme (pari, alcool, drogue, cigarette, sexualité non protégée, sports extrêmes, risques au volant,...). Dans la deuxième conception, que nous ne faisons ici qu'esquisser, le risque est volontairement choisi par l'individu, et la tâche du psychologue est alors de saisir quelle pourrait être la fonction de ce choix chez cet individu particulier. Dans un mouvement épistémologique qui rejoint en un certain sens la volonté que nous avons eu dans notre travail de nous rapprocher du niveau d'analyse individuel, on admet alors que cet individu fonctionne d'une manière qui, si elle peut éventuellement être partagée, ne doit pas nécessairement s'interpréter en référence à une norme qui serait la même pour tous, et notamment lorsqu'il s'agit d'une norme non pas seulement psychologique mais également morale.

Références

- Acredolo, C., O'Connor, J., Banks, L., & Horobin, K. (1989). Children's ability to make probability estimates: Skills revealed through application of Anderson's functional measurement methodology. *Child Development*, 60(4), 933-945.
- Aïte, A., Cassotti, M., Rossi, S., Poirel, N., Lubin, A., Houdé, O., & Moutier, S. (2012). Is human decision making under ambiguity guided by loss frequency regardless of the costs? A developmental study using the soochow gambling task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 113, 286-294.
- Alvarez, J. A., & Emory, E. (2006). Executive Function and the Frontal Lobes: A Meta-Analytic Review. *Neuropsychology Review*, 16(1), 17-42.
- Amsel, E., Close, J., Sadler, E., & Klaczynski, P. A. (2009). College students' awareness of irrational judgments on gambling tasks: A dual-process account. *The Journal of Psychology: Interdisciplinary and Applied*, 143(3), 279-292.
- Anderson, N. H. (1981). *Foundations of information integration theory*. London: Academic Press.
- Anderson, N. H. (1996). *A functional theory of cognition*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Anderson, S. W., Damasio, H., Jones, R. D., & Tranel, D. (1991). Wisconsin Card Sorting Test performance as a measure of frontal lobe damage. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 13(6), 909-922.
- Anderson, V., Northam, E., Hendy, J., & Wrenall, J. (2001). *Developmental neuropsychology: A clinical approach*. New York : Psychology Press.
- Arentoft, A., Thames, A., Panos, S., Patel, S., & Hinkin, C. (2013). A deconstruction of gambling task performance among HIV+ individuals: The differential contributions of problem solving and risk taking. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 35(10), 1036-1047.
- Audusseau, J. & Juhel, J. (2015). Working memory in children predicts performance on a Gambling Task. *The Journal of Genetic Psychology*, 176(1), 38-54.

- Audusseau, J., & Juhel, J. (2016, sous presse). Une approche transactionnelle de la quantification des probabilités chez l'enfant. *Enfance*, 4, pp *** - ***.
- Audusseau, J., & Juhel, J. (2015). Approche individuelle et différentielle de la prise de décision chez l'enfant. In J. Juhel & G. Rouxel (Eds.), *Différences et variabilités en psychologie* (pp. 197-216). Rennes: P.U.R.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. New York, NY US: Clarendon Press/Oxford University Press.
- Baddeley, A., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.) *Recent advances in learning and motivation* (vol. 8). New York: Academic.
- Batanero, C., & Serrano, L. (1999). The meaning of randomness for secondary school students. *Journal for Research in Mathematics Education*, 30(5), 558-567.
- Bechara, A., & Damasio, H. (2002). Decision-making and addiction (part I): Impaired activation of somatic states in substance dependent individuals when pondering decisions with negative future consequences. *Neuropsychologia*, 40(10), 1675-1689.
- Bechara, A., & Damasio, A. R. (2005). The somatic marker hypothesis: A neural theory of economic decision. *Games and Economic Behavior*, 52(2), 336-372.
- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A. R. (2000). Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral Cortex*, 10(3), 295-307.
- Bechara, A., Damasio, A. R., Damasio, H., & Anderson, S. W. (1994). Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition*, 50(1-3), 7-15.
- Bechara, A., Damasio, H., Damasio, A. R., & Lee, G. P. (1999). Different contributions of the human amygdala and ventromedial prefrontal cortex to decision-making. *The Journal of Neuroscience*, 19(13), 5473-5481.
- Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Anderson, S. W. (1998). Dissociation of working memory from decision making within the human prefrontal cortex. *The Journal of Neuroscience*, 18(1), 428-437.
- Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1997). Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy. *Science*, 275(5304), 1293-1295.

- Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (2005). The Iowa Gambling Task and the somatic marker hypothesis: Some questions and answers. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(4), 159-162.
- Bechara, A., Dolan, S., Denburg, N., Hindes, A., Anderson, S. W., & Nathan, P. E. (2001). Decision-making deficits, linked to a dysfunctional ventromedial prefrontal cortex, revealed in alcohol and stimulant abusers. *Neuropsychologia*, 39(4), 376-389.
- Bechara, A., & Martin, E. M. (2004). Impaired Decision Making Related to Working Memory Deficits in Individuals With Substance Addictions. *Neuropsychology*, 18(1), 152-162.
- Bechara, A., Martin, G. M., Pridgar, A., & Van der Kooy, D. (1993). The parabrachial nucleus: A brain stem substrate critical for mediating the aversive motivational effects of morphine. *Behavioral Neuroscience*, 107(1), 147-160.
- Bechara, A., & Van der Kooy, D. (1985). Opposite motivational effects of endogenous opioids in brain and periphery. *Nature*, 314(6011), 533-534.
- Bechara, A., & Van der Kooy, D. (1987). Kappa receptors mediate the peripheral aversive effects of opiates. *Pharmacology, Biochemistry and Behavior*, 28(2), 227-233.
- Blair, C. (2006). How similar are fluid cognition and general intelligence? A developmental neuroscience perspective on fluid cognition as an aspect of human cognitive ability. *Behavioral and Brain Sciences*, 29(2), 109-160.
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal activity (2nd ed.)*. New York, NY, US: Springer Science.
- Brand, M., Recknor, E. C., Grabenhorst, F., & Bechara, A. (2007). Decisions under ambiguity and decisions under risk: Correlations with executive functions and comparisons of two different gambling tasks with implicit and explicit rules. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 29(1), 86-99.
- Brevers, D., Bechara, A., Cleeremans, A., Kornreich, C., Verbanck, P., & Noël, X. (2014). Impaired decision-making under risk in individuals with alcohol dependence. *Alcoholism, Clinical and Experimental Research*, 38(7), 1924-1931.
- Brevers, D., Koritzky, G., Bechara, A., & Noël, X. (2014). Cognitive processes underlying impaired decision-making under uncertainty in gambling disorder. *Addictive Behaviors*, 39(10), 1533-1536.

- Brocki, K. C., & Bohlin, G. (2004). Executive functions in children aged 6 to 13: A dimensional and developmental study. *Developmental Neuropsychology*, 26(2), 571-593.
- Brogan, A., Hevey, D., & Pignatti, R. (2010). Anorexia, bulimia, and obesity: Shared decision making deficits on the Iowa Gambling Task (IGT). *Journal of the International Neuropsychological Society*, 16(4), 711-715.
- Brown, M. (1981). Number operations. In Hart, K. (eds.), *Children's understanding of mathematics: 11-16* (pp. 23-47). Windsor: NFER-Nelson.
- Bryant, P., Morgado, L. and Nunes, T. (1992). *Children's understanding of multiplication*. Paper presented at the Psychology of Mathematics Education, Tokyo, Japan.
- Bryant, P., & Nunes, T. (2012). *Children's understanding of probability : A literature review*. London, England : Nuffield Foundation.
- Bull, R., Espy, K. A., Wiebe, S. A., Sheffield, T. D., & Nelson, J. M. (2011). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: Sources of variation in emergent mathematic achievement. *Developmental Science*, 14(4), 679-692.
- Bunch, K. M., Andrews, G., & Halford, G. S. (2007). Complexity effects on the children's gambling task. *Cognitive Development*, 22(3), 376-383.
- Burgess, G. C., Braver, T. S., & Gray, J. R. (2006). Exactly how are fluid intelligence, working memory, and executive function related? Cognitive neuroscience approaches to investigating the mechanisms of fluid cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 29, 128-129.
- Bussemeyer, J. R., & Stout, J. C. (2002). A contribution of cognitive decision models to clinical assessment: Decomposing performance on the Bechara gambling task. *Psychological Assessment*, 14(3), 253-262.
- Bussemeyer, J., Koling, A., Cox, C. R., & Davis, H. (2005). Older Adults as Adaptive Decision Makers: Evidence From the Iowa Gambling Task. *Psychology and Aging*, 20(2), 220-225.
- Cadet, B. & Chasseigne, G. (2009). *Psychologie du jugement et de la décision*. Bruxelles : De Boeck.

- Carlson, S. M., Zayas, V., & Guthormsen, A. (2009). Neural correlates of decision making on a gambling task. *Child Development*, 80(4), 1076-1096.
- Case, R. (1978). Intellectual development from birth to adulthood: A neo-Piagetian interpretation. In R. S. Siegler & R. S. (Ed) Siegler (éd.), *Children's thinking: What develops?* (pp. 37-71). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Case, R. (1991). *The mind's staircase: Exploring the conceptual underpinnings of children's thought and knowledge*. Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Case, R. (1992). The Role of the Frontal Lobes in the Regulation of Cognitive Development. *Brain and Cognition*, 20, 51-73.
- Cassotti, M., Houdé, O., & Moutier, S. (2011). Developmental changes of win-stay and loss-shift strategies in decision making. *Child Neuropsychology*, 17(4), 400-411.
- Cattell, R. B. (1971). *Abilities: their structure, growth, and action*. Oxford, England: Houghton Mifflin.
- Cavedini, P., Bassi, T., Ubbiali, A., Casolari, A., Giordani, S., Zorzi, C., & Bellodi, L. (2004). Neuropsychological investigation of decision-making in anorexia nervosa. *Psychiatry Research*, 127(3), 259-266.
- Cavedini, P., Riboldi, G., Keller, R., D'Annuncci, A., & Bellodi, L. (2002). Frontal lobe dysfunction in pathological gambling patients. *Biological Psychiatry*, 51(4), 334-341.
- Cleeremans, A., Destrebecqz, A., & Boyer, M. (1998). Implicit learning: News from the front. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(10), 406-416.
- Courage, M. L., & Cowan, N. (2009). *The development of memory in infancy and childhood (2nd ed.)*. New York, NY US: Psychology Press.
- Cournot, A. (1851). *Essai sur les fondements de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique*. Paris : Hachette (1912, nouvelle édition).
- Cowan, N. (1999). An Embedded-Processes Model of working memory. In A. Miyake & P. Shah (Ed.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. (pp. 62-101). New York, NY US: Cambridge University Press.
- Cragg, L., & Nation, K. (2007). Self-ordered pointing as a test of working memory in typically developing children. *Memory*, 15(5), 526-535.

- Crone, E. A., Bunge, S. A., Latenstein, H., & van der Molen, M. W. (2005). Characterization of Children's Decision Making: Sensitivity to Punishment Frequency, Not Task Complexity. *Child Neuropsychology*, 11(3), 245-263.
- Crone, E. A., & van der Molen, M. W. (2004). Developmental changes in real life decision making: Performance on a gambling task previously shown to depend on the ventromedial prefrontal cortex. *Developmental Neuropsychology*, 25(3), 251-279.
- Crone, E. A., & van der Molen, M. W. (2007). Development of decision making in school-aged children and adolescents: Evidence from heart rate and skin conductance analysis. *Child Development*, 78(4), 1288-1301.
- Damasio, A. R. (1994). *Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain*. New York: Grosset /Putnam.
- Damasio, A. R. (1998). The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. In A. C. Roberts, T. W. Robbins, & L. Weiskrantz (Ed.), *The prefrontal cortex: Executive and cognitive functions* (pp. 36-50). New York, NY US: Oxford University Press.
- Damasio, H., Grabowski, T., Frank, R., Galaburda, A. M., & Damasio, A. R. (1994). The Return of Phineas Gage: Clues about the Brain from the Skull of a Famous Patient. *Science*, 264, 1102-1105.
- Dauvier, B., Chevalier, N., & Blaye, A. (2012). Using finite mixture of glms to explore variability in children's flexibility in a task-switching paradigm. *Cognitive Development*, 27, 440-454.
- de Frias, C. M., Dixon, R. A., & Strauss, E. (2006). Structure of four executive functioning tests in healthy older adults. *Neuropsychology*, 20(2), 206-214.
- De Ribaupierre, A., & Pascual-Leone, J. (1984). Pour une intégration des méthodes en psychologie : approches expérimentale, psycho-génétique et différentielle. *L'année psychologique*, 84(2), 227-250.
- Dees, M. K., Vernooij-Dassen, M. J., Dekkers, W. J., Elwyn, G., Vissers, K. C., & van Weel, C. (2013). Perspectives of decision-making in requests for euthanasia: A qualitative research among patients, relatives and treating physicians in the Netherlands. *Palliative Medicine*, 27(1), 27-37.

- Dehling, H. G. (1997). Daniel Bernoulli and the St. Petersburg Paradox. *Nieuw Archief voor Wiskunde*, 15, 223-227.
- Dewey, J. (1896). The reflex arc concept in psychology. *The Psychological Review*, 3(4), 357-370.
- Dostoïevski, F. (1866). *Le Joueur*. La Bibliothèque électronique du Québec.
- Dretsch, M. N., & Tipples, J. (2008). Working memory involved in predicting future outcomes based on past experiences. *Brain and Cognition*, 66(1), 83-90.
- Drew A. Linzer, Jeffrey B. Lewis (2011). poLCA: An R Package for Polytomous Variable Latent Class Analysis. *Journal of Statistical Software*, 42(10), 1-29.
- Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R., & Freer, C. (1996). Intelligence and the frontal lobes: The organization of goaldirected behavior. *Cognitive Psychology*, 30, 257-303.
- Dunn, B. D., Dalgleish, T., & Lawrence, A. D. (2006). The somatic marker hypothesis: A critical evaluation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30(2), 239-271.
- Edgeworth (1881). *Mathematical Psychics: an Essay on the Application of Mathematics to the Moral Sciences*. Kegan Paul, London.
- Edwards, W. (1954). The theory of decision making. *Psychological Bulletin*, 51(4), 380-417.
- English, L. (1991). Young children's combinatoric strategies. *Educational Studies in Mathematics*, 22, 451-474.
- Ernst, M., Bolla, K., Mouratidis, M., Contoreggi, C., Matochik, J. A., Kurian, V., ... London, E. D. (2002). Decision-making in a risk-taking task: A PET study. *Neuropsychopharmacology*, 26(5), 682-691.
- Falk, R., & Konold, C. (1997). Making sense of randomness: Implicit encoding as a basis for judgment. *Psychological Review*, 104(2), 301-318.
- Falk, R., & Wilkening, F. (1998). Children's construction of fair chances: Adjusting probabilities. *Developmental Psychology*, 34(6), 1340-1357.
- Fellows, L. K., & Farah, M. J. (2005). Different Underlying Impairments in Decision-making Following Ventromedial and Dorsolateral Frontal Lobe Damage in Humans. *Cerebral Cortex*, 15(1), 58-63.

- Figner, B., Mackinlay, R. J., Wilkening, F., & Weber, E. U. (2009). Affective and deliberative processes in risky choice: Age differences in risk taking in the Columbia Card Task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(3), 709-730.
- Fischbein, E. & Gazit, A. (1984). Does the teaching of probability improve probabilistic intuitions? *Educational Studies in Mathematics*, 15, 1-24.
- Fischer, K. W. (1980). A theory of cognitive development: The control and construction of hierarchies of skills. *Psychological Review*, 87(6), 477-531.
- Fischer, K. W., & Bidell, T. R. (2006). Dynamic Development of Action and Thought. In R. M. Lerner, W. Damon, R. M. (Ed) Lerner, & W. (Ed) Damon (éd.), *Handbook of child psychology (6th ed.): Vol 1, Theoretical models of human development*. (pp. 313-399). Hoboken, NJ, US: John Wiley & Sons Inc.
- Frangou, S., Kington, J., Rayment, V., & Shergill, S.S. (2008). Examining ventral and dorsal prefrontal function in bipolar disorder: a functional magnetic resonance imaging study. *European Psychiatry*, 23, 300-308.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., DeFries, J. C., & Hewitt, J. K. (2006). Not All Executive Functions Are Related to Intelligence. *Psychological Science*, 17(2), 172-179.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201-225.
- Fuster, J. (1993). Frontal lobes. *Current Opinion in Neurobiology*, 3, 160-165.
- Gao, S., Wei, Y., Bai, J., Lin, C., & Li, H. (2009). Young children's affective decision-making in a gambling task: Does difficulty in learning the gain/loss schedule matter? *Cognitive Development*, 24(2), 183-191.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin Company.
- Godefroy, O., Cabaret, M., Petit-Chenal, V., Pruvo, J.-P., & Rousseaux, M. (1999). Control functions of the frontal lobe: Modularity of the central-supervisory system. *Cortex*, 35, 1-20.

- Godefroy, O., Jeannerod, M., Allain, P., & Le Gall, D. (2008). Lobe frontal, fonctions exécutives et contrôle cognitif. *Revue Neurologique*, 164(Suppl 3), S119-S127.
- Grant, D. A., & Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 404-411.
- Green, D. R. (1979). The chance and probability project. *Teaching Statistics*, 1(3), 66-71.
- Guttman, L. (1944). A basis for scaling qualitative data. *American Sociological Review*, 9, 139-150.
- Halford, G. S. (1982). *Development of thought*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Halford, G. S. (1993). *Children's understanding: The development of mental models*. Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Hayden, B. Y., & Platt, M. L. (2009). The mean, the median, and the St. Petersburg paradox. *Judgment and Decision Making*, 4(4), 256-272.
- Heaton, R. K. (1981). *Wisconsin Card Sorting Test Manual*. Odessa, FL : Psychological Assessment Resources.
- Hedden, T., & Yoon, C. (2006). Individual differences in executive processing predict susceptibility to interference in verbal working memory. *Neuropsychology*, 20(5), 511-528.
- Hinson, J. M., Jameson, T. L., & Whitney, P. (2002). Somatic markers, working memory, and decision making. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 2(4), 341-353.
- Hongwanishkul, D., Happaney, K. R., Lee, W. S. C., & Zelazo, P. D. (2005). Assessment of Hot and Cool Executive Function in Young Children: Age-Related Changes and Individual Differences. *Developmental Neuropsychology*, 28(2), 617-644.
- Hooper, C. J., Luciana, M., Conklin, H. M., & Yarger, R. S. (2004). Adolescents' Performance on the Iowa Gambling Task: Implications for the Development of Decision Making and Ventromedial Prefrontal Cortex. *Developmental Psychology*, 40(6), 1148-1158.
- Houdé, O. (1997). Numerical development: From the infant to the child. Wynn's (1992) paradigm in 2- and 3-year olds. *Cognitive Development*, 12(3), 373-391.

- Hughes, C., Ensor, R., Wilson, A., & Graham, A. (2010). Tracking executive function across the transition to school: A latent variable approach. *Developmental Neuropsychology*, 35(1), 20-36.
- Hull, R., Martin, R. C., Beier, M. E., Lane, D., & Hamilton, A. C. (2008). Executive function in older adults: A structural equation modeling approach. *Neuropsychology*, 22(4), 508-522.
- Inhelder, B., & Piaget, J. (1955). *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent. Essai sur la conservation des structures opératoires formelles*. Paris, PUF.
- Inquisit 3.0.4.0 [Computer software]. (2009). Seattle, WA: Millisecond Software.
- James, W. (1890). *The principles of psychology, Vol I*. New York, NY, US: Henry Holt and Co.
- Jameson, T. L., Hinson, J. M., & Whitney, P. (2004). Components of working memory and somatic markers in decision making. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(3), 515-520.
- Jansen, B. R. J., & van der Maas, H. L. J. (2002). The development of children's rule use on the balance scale task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 81(4), 383-416.
- Jansen, B. R. J., van Duijvenvoorde, A. C. K., & Huizenga, H. M. (2012). Development of decision making: Sequential versus integrative rules. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111(1), 87-100.
- Juhel, J. (2013). La recherche d'invariants différentiels dans les variations développementales: de la population à l'individu et réciproquement ! In S. Le Sourn-Bissaoui, G. Le Maner-Idrissi, V. Dardier, E. Bonjour & A. Lacroix (Eds.), *Développements et variabilités* (pp. 13-43). Rennes: PUR
- Jurado, M. B., & Rosselli, M. (2007). The elusive nature of executive functions: A review of our current understanding. *Neuropsychology Review*, 17(3), 213-233.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. New York, NY, US: Farrar, Straus and Giroux.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1972). Subjective probability: A judgment of representativeness. *Cognitive Psychology*, 3(3), 430-454.

- Karni, E. (2014). Axiomatic Foundations of Expected Utility and Subjective Probability. In M. J. Machina & W. K. Viscusi (Eds.), *Handbook of the Economics of Risk and Uncertainty*. (pp. 1-39). Oxford: North Holland.
- Keren, G. (1984). On the importance of identifying the correct « problem space. » *Cognition*, 16(2), 121-128.
- Kerr, A., & Zelazo, P. D. (2004). Development of « hot » executive function: The children's gambling task. *Brain and Cognition*, 55(1), 148-157.
- Kuzmak, S. D., & Gelman, R. (1986). Young children's understanding of random phenomena. *Child Development*, 57(3), 559-566.
- Lacouture, Y., & Marley, A. A. J. (2004). Choice and response time processes in the identification and categorization of unidimensional stimuli. *Perception & Psychophysics*, 66(7), 1206-1226.
- Lamm, C., Zelazo, P.D., & Lewis, M.D. (2006). Neural correlates of cognitive control in childhood and adolescence: Disentangling the contributions of age and the development of executive function. *Neuropsychologia*, 44, 2139-2148.
- Lautrey, J. (2003). A pluralistic approach to cognitive differentiation and development. In R. J. Sternberg, J. Lautrey, & T. Lubart (Eds.), *Models of Intelligence: International perspectives* (pp. 117-131). Washington, DC: American Psychological Press.
- Lautrey, J. (2010). L'évolution des spécificités de l'approche différentielle et ses répercussions sur l'identité de la sous-discipline. In A. de Ribaupierre, P. Ghisletta, T. Lecerf, & J.-L. Roulin (Eds.), *Identités et spécificités de la psychologie différentielle*. Presses Universitaires de Rennes.
- Lawrence, N.S., Jollant, F., O'Daly, O., Zelaya, F., Phillips, M.L. (2009). Distinct roles of prefrontal cortical subregions in the Iowa Gambling Task. *Cerebral Cortex*, 19, 1134-1143.
- Lawson, G. M., Hook, C. J., Hackman, D. A., & Farah, M. J. (2016). Socioeconomic status and the development of executive function: Behavioral and neuroscience approaches. In J. A. Griffin, P. McCardle, L. S. Freund, J. A. (Ed) Griffin, P. (Ed) McCardle, & L. S. (Ed) Freund (éd.), *Executive function in preschool-age children: Integrating measurement, neurodevelopment, and translational research*. (p. 259-278). Washington, DC, US: American Psychological Association.

- Lecoutre, M-P. (1992). Cognitive models and problem spaces in 'purely random' situations. *Educational Studies in Mathematics*, 23(6), 557-568.
- Lee, K., & Karmiloff-Smith, A. (2002). Macro- and microdevelopmental research: Assumptions, research strategies, constraints, and utilities. In N. Granott & J. Parziale (Éd.), *Microdevelopment: Transition processes in development and learning*, Cambridge studies in cognitive perceptual development (pp. 243-292). New York, NY US: Cambridge University Press.
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L., & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59-80.
- Lévy-Bruhl, L. (1918). *Fonctions mentales dans les sociétés inférieures*, Alcan.
- Lewin, K. (1935). *A dynamic theory of personality*. New York, NY, US: McGraw-Hill.
- Longeot, F. (1969). *Psychologie différentielle et théorie opératoire de l'intelligence*. Paris : Dunod.
- Luo, Y., Feng, T.-Y., Tang, X.-D., Huang, H., & Li, H. (2011). Different types of criminals' decision-making defects in the Iowa Gambling Task. *Acta Psychologica Sinica*, 43(1), 30-41.
- Luria, A. R. (1966). *Higher Cortical Functions in Man*. Basic Books Inc Publishers. New York.
- Luria, A. R. (1973). *The Working brain: An introduction to neuropsychology*. New York: Basic.
- Lynch, S. (2007). *Introduction to Applied Bayesian Statistics and Estimation for Social Scientists*. Springer Verlag.
- Maia, T. V., & McClelland, J. L. (2004). A reexamination of the evidence for the somatic marker hypothesis: What participants really know in the Iowa gambling task. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 45, 16075-16080.
- Manes, F., Sahakian, B., Clark, L., Rogers, R., Antoun, N., Aitken, M., & Robbins, T. (2002). Decision-making processes following damage to the prefrontal cortex. *Brain: A Journal of Neurology*, 125(3), 624-639.

- McLachlan, G.J., & Basford, K.E. (1988). *Mixture models: Inference and applications to clustering*. New York : Dekker.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., & Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex « frontal lobe » tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100.
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(1), 8-14.
- Molenaar, P. C. M. (2004). A manifesto on Psychology as idiographic science: Bringing the person back into scientific psychology, this time forever. *Measurement*, 2, 201-218.
- Molenaar, P. C. M., & Campbell, C. G. (2009). The new person-specific paradigm in psychology. *Current Directions in Psychology*, 18, 112-117.
- Molenaar, P. C. M., Huizenga, H. M., & Nesselroade, J. R. (2003). The relationship between the structure of inter-individual and intra-individual variability: A theoretical and empirical vindication of developmental systems theory. In U.M. Staudinger & U. Lindenberger (Eds.), *Understanding human development: Dialogues with lifespan psychology* (pp. 339-360). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Mosteller, F., & Nogee, P. (1951). An Experimental Measurement of Utility. *Journal of Political Economy*. 59, 371-404.
- Muthén, B.O., & Asparouhov, T. (2009). Multilevel regression mixture analysis. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*. 172, 639-657.
- Muthén, L.K., & Muthén, B.O. (1998). *Mplus User's Guide. Seventh Edition*. Los Angeles, CA: Muthén & Muthén (2015, 7e édition).
- Nesher, P. (1988). Multiplicative school word problems: Theoretical approaches and empirical findings. In Hiebert, J. and Behr, M. (eds.), *Number Concepts and Operations in the Middle Grades* (pp. 19-40). Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Nesselroade, J. R. (1991). The warp and the woof of the developmental fabric. In R. M. Downs, L. S. Liben, & D. S. Palermo (Ed.), *Visions of aesthetics, the environment & development: The legacy of Joachim F. Wohlwill*. (pp. 213-240). Hillsdale, NJ England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

- Nesselroade, J. R. (2010). On an emerging third discipline of scientific psychology. In P.C.M. Molenaar & Newell, K.M. (Eds.), *Individual pathways of change: Statistical models for analyzing development and change* (pp. 209-218). Washington, DC: APA.
- Nesselroade, J.R., & Molenaar, P.C.M. (1999). Pooling lagged covariance structures based on short, multivariate time series for dynamic factor analysis. In R. H. Hoyle (Ed.), *Statistical strategies for small sample research* (pp. 223-250). Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc.
- Newell, K. M., Mayer-Kress, G., Hong, S. L., & Liu, Y.-T. (2010). Decomposing the performance dynamics of learning through time scales. In P. C. M. Molenaar & K. M. Newell (Ed.), *Individual pathways of change: Statistical models for analyzing learning and development*. (pp. 71-86). Washington, DC US: American Psychological Association.
- Noël, X., Bechara, A., Dan, B., Hanak, C., & Verbanck, P. (2007). Response inhibition deficit is involved in poor decision making under risk in nonamnesic individuals with alcoholism. *Neuropsychology*, 21(6), 778-786.
- Noetling, G. (1982). *Le développement cognitif et le mécanisme de l'équilibration*. Chicoutimi, Québec : Gaetan Morin.
- Norman, D. A. and Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In Davidson, R. J., Schwartz, G. E., & Shapiro, D. (Eds), *Consciousness and Self-Regulation: Advances in Research and Theory*. (pp. 1-18). New York : Plenum.
- Northoff, G., Grimm, S., Boeker, H., Schmidt, C., Bermpohl, F., Heinzl, A., Hell, D., & Boesiger, P. (2006). Affective judgment and beneficial decision making: ventromedial prefrontal activity correlates with performance in the Iowa gambling task. *Human Brain Mapping*, 27, 572-587.
- Obonsawin, M. C., Crawford, J. R., Page, J., Chalmers, P., Cochrane, R., & Low, G. (2002). Performance on tests of frontal lobe function reflect general intellectual ability. *Neuropsychologia*, 40(7), 970-977.
- Ohlmann, T. (1990). Affordances et vicariances mises en jeu par la régulation posturale. In R. Martin (Ed.), *Informatique et différences individuelles* (pp. 425-439). Lyon : PUL.

- Ohlmann, T. (1995). Processus vicariants et théorie neutraliste de l'évolution : une nécessaire convergence. In J. Lautrey (Ed.), *Universel et Différentiel en Psychologie* (pp. 77-105). Paris : PUF.
- Ortega, A., Wagenmakers, E.-J., Lee, M. D., Markowitsch, H. J., & Piefke, M. (2012). A Bayesian latent group analysis for detecting poor effort in the assessment of malingering. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 27, 453-465.
- Overman, W. H., Frassrand, K., Ansel, S., Trawalter, S., Bies, B., & Redmond, A. (2004). Performance on the IOWA card task by adolescents and adults. *Neuropsychologia*, 42(13), 1838-1851.
- Paparistodemou, E., Noss, R., & Pratt, D. (2008). The interplay between fairness and randomness in a spatial computer game. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 13(2), 89-110.
- Pareto, V. (1909). *Manuel d'économie politique*. Paris, Giard & Brière.
- Pascual-Leone, J. (1987). Organismic processes for neo-Piagetian theories: A dialectical causal account of cognitive development. *International Journal of Psychology*, 22(5-6), 531-570.
- Pecchinenda, A., Dretsch, M., & Chapman, P. (2006). Working memory involvement in emotion-based processes underlying choosing advantageously. *Experimental Psychology*, 53(3), 191-197.
- Perret, P., Bailleux, C., & Dauvier, B. (2011). The influence of relational complexity and strategy selection on children's reasoning in the Latin Square Task. *Cognitive Development*, 26(2), 127-141.
- Petrides, M., & Milner, B. (1982). Deficits on subject-ordered tasks after frontal- and temporal-lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, 20(3), 249-262.
- Piaget, J. (1947). *La psychologie de l'intelligence*. Paris : Armand Colin.
- Piaget, J. (1950). *Introduction à l'épistémologie génétique*. Paris: PUF.
- Piaget, J. (1967). *Biologie et connaissance: essai sur les relations entre les régulations organiques et les processus cognitifs*. Paris: Gallimard.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1951). *La Genèse de l'idée de hasard chez l'enfant*. Paris : PUF (1974, 2e édition).

- Pratt, D., & Noss, R. (2002). The Microevolution of Mathematical Knowledge: The Case of Randomness. *Journal of the Learning Sciences*, 11(4), 453-488.
- Prencipe, A., Kesek, A., Cohen, J., Lamm, C., Lewis, M. D., & Zelazo, P. D. (2011). Development of hot and cool executive function during the transition to adolescence. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 621-637.
- R Core Team (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raftery, A. E. (1995). Bayesian model selection in social research. *Sociological Methodology*, 25, 111-163.
- Reimann, M., & Bechara, A. (2010). The somatic marker framework as a neurological theory of decision-making: Review, conceptual comparisons, and future neuroeconomics research. *Journal of Economic Psychology*, 31(5), 767-776.
- Reuchlin, M. (1973). Formalisation et réalisation dans la pensée naturelle : une hypothèse. *Journal de psychologie normale et pathologique*, 4, 389-408.
- Reuchlin, M. (1978). Processus vicariants et différences individuelles. *Journal de Psychologie*, 2, 133 -145.
- Reyna, V. F. (1995). Interference effects in memory and reasoning: A fuzzy trace theory analysis. In F. N. Dempster, C. J. Brainerd, F. N. (Ed) Dempster, & C. J. (Ed) Brainerd (éd.), *Interference and inhibition in cognition*. (pp. 29-59). San Diego, CA, US: Academic Press.
- Reyna, V. F., & Brainerd, C. J. (1991). Fuzzy-trace theory and children's acquisition of mathematical and scientific concepts. *Learning and Individual Differences*, 3(1), 27-59.
- Reyna, V. F., & Brainerd, C. J. (1992). A fuzzy-trace theory of reasoning and remembering: Paradoxes, patterns, and parallelism. In A. F. Healy, S. M. Kosslyn, R. M. Shiffrin, A. F. (Ed) Healy, S. M. (Ed) Kosslyn, & R. M. (Ed) Shiffrin (éd.), *Essays in honor of William K. Estes, Vol. 1: From learning theory to connectionist theory; Vol. 2: From learning processes to cognitive processes*. (pp. 235-259). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Reyna, V. F., & Brainerd, C. J. (1993). Fuzzy memory and mathematics in the classroom. In G. M. Davies, R. H. Logie, G. M. (Ed) Davies, & R. H. (Ed) Logie (éd.), *Memory in*

- everyday life*. (pp. 91-119). Amsterdam, Netherlands: North-Holland/Elsevier Science Publishers.
- Rieben, L., de Ribaupierre, A., & Lautrey, J. (1983). *Le développement opératoire de l'enfant entre 6 et 12 ans*. Paris: Editions du C.N.R.S.
- Roulin, J.L., & Longeot, F. (1985). Quantification des chances ou quantification des probabilités. In J. Bideaud & M. Richelle (Eds.). *Psychologie développementale, Problèmes et réalités. Hommage à Pierre Oléron* (pp. 317-330). Bruxelles: Mardaga.
- Roy, A., Le Gall, D., Roulin, J.-L., & Fournet, N. (2012). Les fonctions exécutives chez l'enfant: Approche épistémologique et sémiologie clinique. *Revue de Neuropsychologie, Neurosciences Cognitives et Cliniques*, 4(4), 287-297.
- Salthouse, T. A. (2005). Relations Between Cognitive Abilities and Measures of Executive Functioning. *Neuropsychology*, 19(4), 532-545.
- Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive Functioning as a Potential Mediator of Age-Related Cognitive Decline in Normal Adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132(4), 566-594.
- Savage, L. J. (1954). *Foundations of statistics*. Oxford, England: Wiley.
- Schlottmann, A. (2001). Children's probability intuitions: Understanding the expected value of complex gambles. *Child Development*, 72(1), 103-122.
- Schönbrodt, F. D., & Perugini, M. (2013). At what sample size do correlations stabilize? *Journal of Research in Personality*, 47(5), 609-612.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6, 461-464.
- Shanks, D. R., & St. John, M. F. (1994). Characteristics of dissociable human learning systems. *Behavioral and Brain Sciences*, 17(3), 367-447.
- Shallice, T. (2002). Fractionation of the supervisory system. In D. T. Stuss, R. T. Knight, D. T. (Ed) Stuss, & R. T. (Ed) Knight (éd.), *Principles of frontal lobe function*. (pp. 261-277). New York, NY, US: Oxford University Press.
- Shallice, T., & Burgess, P. (1991). Higher-order cognitive impairments and frontal lobe lesions in man. In H. S. Levin, H. M. Eisenberg, A. L. Benton, H. S. (Ed) Levin, H. M. (Ed) Eisenberg, & A. L. (Ed) Benton (éd.), *Frontal lobe function and dysfunction*. (pp. 125-138). New York, NY, US: Oxford University Press.

- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 84(2), 127-190.
- Shuster, J., & Toplak, M.E. (2009). Executive and motivational inhibition: Associations with measures of everyday inhibition. *Consciousness and Cognition*, 18, 471-480.
- Siegler, R.S. (1981). Developmental sequences within and between concepts. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 46(2), 84-84.
- Siegler, R. S. (1995). How does change occur: A microgenetic study of number conservation. *Cognitive Psychology*, 28(3), 225-273.
- Siegler, R. S. (1996). *Emerging minds: The process of change in children's thinking*. New York : Oxford University Press.
- Simon, H. A. (1955). A behavioral model of rational choice. *Quarterly Journal of Economics*, 69, 99-118.
- Smith, M. L., Kates, M. H., & Vriezen, E. R. (1992). The development of frontal lobe functions. In S. J. Segalowitz, I. Rapin, S. J. (Ed) Segalowitz, & I. (Ed) Rapin (éd.), *Handbook of neuropsychology*, Vol. 7. (pp. 309-330). New York, NY, US: Elsevier Science.
- Smith, D. G., Xiao, L., & Bechara, A. (2012). Decision making in children and adolescents: Impaired Iowa Gambling Task performance in early adolescence. *Developmental Psychology*, 48(4), 1180-1187.
- Snow, R.E. (1991). The concept of aptitude. In R.E. Snow & D.F. Wiley (Eds.), *Improving inquiry in social science* (pp. 249-284). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Snow, R.E. (1992). Aptitude theory: Yesterday, today, and tomorrow. *Educational Psychologist*, 27, 5-32.
- Spearman, C. (1904). « General intelligence, » objectively determined and measured. *The American Journal of Psychology*, 15(2), 201-293.
- Stouffer, S.A., Guttman, L., Suchman, E.A., Lazarsfeld, P.F., Starr, S.A., & Clausen, J.A. (1950). *Measurement and Prediction* (vol. 4). Princeton, NJ: Princeton University Press.

- Tanabe, J., Thompson, L., Claus, E., Dalwani, M., Hutchison, K., Banich, M.T. (2007). Prefrontal cortex activity is reduced in gambling and nongambling substance users during decision-making. *Human Brain Mapping*, 28, 1276-1286.
- Teglas, E., Girotto, V., Gonzales, M. and Bonatti, L. (2007). Intuitions of probabilities shape expectations about the future at 12 months and beyond. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (48), 19156-19159.
- Thurstone, L. L. (1931). The indifference function. *The Journal of Social Psychology*, 2, 139-167.
- Thurstone, L. L. (1954). The measurement of values. *Psychological Review*, 61(1), 47-58.
- Toplak, M. E., Jain, U., & Tannock, R. (2005). Executive and motivational processes in adolescents with Attention-Deficit-Hyperactivity Disorder (ADHD). *Behavioral and Brain Functions*, 1, 1-8.
- Toplak, M. E., Sorge, G. B., Benoit, A., West, R. F., & Stanovich, K. E. (2010). Decision-making and cognitive abilities: A review of associations between Iowa Gambling Task performance, executive functions, and intelligence. *Clinical Psychology Review*, 30(5), 562-581.
- Tourniaire, F. (1986). Proportions in Elementary School. *Educational Studies in Mathematics*, 17, 401-412.
- Turnbull, O. H., Evans, C. E. Y., Bunce, A., Carzolio, B., & O'Connor, J. (2005). Emotion-based learning and central executive resources: An investigation of intuition and the Iowa Gambling Task. *Brain and Cognition*, 57(3), 244-247.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185(4157), 1124-1131.
- Ullman, T. D., Goodman, N. D., & Tenenbaum, J. B. (2012). Theory learning as stochastic search in the language of thought. *Cognitive Development*, 27(4), 455-480.
- Usai, M. C., Viterbori, P., De Franchis, V., & Traverso, L. (2014). Latent structure of executive function in 5 to and 6 year old children: a longitudinal study. *European Journal of Developmental Psychology*, 11, 447-462.

- Vadhan, N. P., Hart, C. L., Haney, M., van Gorp, W. G., & Foltin, R. W. (2009). Decision-making in long-term cocaine users: Effects of a cash monetary contingency on Gambling task performance. *Drug and Alcohol Dependence*, 102(1-3), 95-101.
- van der Sluis, S., de Jong, P. F., & van der Leij, A. (2007). Executive functioning in children, and its relations with reasoning, reading, and arithmetic. *Intelligence*, 35(5), 427-449.
- van der Ven, S. H. G., Kroesbergen, E. H., Boom, J., & Leseman, P. P. M. (2013). The structure of executive functions in children: A closer examination of inhibition, shifting, and updating. *British Journal of Developmental Psychology*, 31(1), 70-87.
- van Duijvenvoorde, A. C. K., Jansen, B. R. J., Bredman, J. C., & Huizenga, H. M. (2012). Age-related changes in decision making: Comparing informed and noninformed situations. *Developmental Psychology*, 48(1), 192-203.
- Venables, W.N. & Ripley, B.D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York.
- Vilkki, J., Ahola, K., Holst, P., Öhman, J., Servo, A., & Heiskanen, O. (1994). Prediction of psychosocial recovery after head injury with cognitive tests and neurobehavioral ratings. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 16(3), 325-338.
- Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton, NJ, US: Princeton University Press.
- Wainwright, P. E., Leatherdale, S. T., & Dubin, J. A. (2007). Advantages of mixed effects models over traditional ANOVA models in developmental studies: A worked example in a mouse model of fetal alcohol syndrome. *Developmental Psychobiology*, 49(7), 664-674.
- Wallon, H. (1941). *L'évolution psychologique de l'enfant*. Oxford, England: A. Colin.
- Watson, J. M., & Moritz, J. B. (2003). Fairness of the dice: A longitudinal study of students' beliefs and strategies for making judgments. *Journal for Research in Mathematics Education*, 34(4), 270-304.
- Wechsler (1997). *Wechsler Adult Intelligence Scale (3rd edn.)*. Psychological Corporation, San Antonio.

- Wetzels, R., Vandekerckhove, J., Tuerlinckx, F., & Wagenmakers, E.-J. (2010). Bayesian parameter estimation in the expectancy valence model of the Iowa gambling task. *Journal of Mathematical Psychology*, 54(1), 14-27.
- Wiebe, S. A., Espy, K. A., & Charak, D. (2008). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: I. Latent structure. *Developmental Psychology*, 44(2), 575-587.
- Wilkening, F. (1981). Integrating velocity, time, and distance information: A developmental study. *Cognitive Psychology*, 13(2), 231-247.
- Willoughby, M. T., Pek, J., & Blair, C. B. (2013). Measuring executive function in early childhood: A focus on maximal reliability and the derivation of short forms. *Psychological Assessment*, 25(2), 664-670.
- Windmann, S., Kirsch, P., Mier, D., Stark, R., Walter, B., Gunturkun, O., Vaitl, D. (2006). On framing effects in decision making: linking lateral versus medial orbitofrontal cortex activation to choice outcome processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(7), 1198-1211.
- Witkin, H.A. (1965). Psychological differentiation and form of pathology. *Journal of abnormal and social Psychology*, 70, 317-336.
- Xu, F. & Denison, S. (2009). Statistical inference and sensitivity to sampling in 11-month-old infants. *Cognition*, 112, 97-104.
- Zelazo, P. D., Carter, A., Reznick, J. S., & Frye, D. (1997). Early development of executive function: A problem-solving framework. *Review of General Psychology*, 1(2), 198-226.
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002). Executive function in typical and atypical development. In U. Goswami & U. (Ed) Goswami (éd.), *Blackwell handbook of childhood cognitive development*. (pp. 445-469). Malden: Blackwell Publishing.
- Zermatten, A., Van der Linden, M., d'Acremont, M., Jermann, F., & Bechara, A. (2005). Impulsivity and Decision Making. *Journal of Nervous and Mental Disease*, 193(10), 647-650.

Index des tableaux

<i>Tableau 1. Nombre d'enfants mobilisant chacune des stratégies à l'épreuve d'ajustement de probabilités dans les différents groupes d'âge (d'après Falk et Wilkening, 1998).</i>	58
<i>Tableau 2. Effectifs, moyennes et écarts-types (parenthèses) des scores des enfants à la CGT (nombre de cartes piochées dans le paquet avantageux), à la SOPT et à la tâche secondaire, dans chacun des groupes d'âge et dans chacune des conditions expérimentales.....</i>	110
<i>Tableau 3. Performances moyennes des sujets (écarts-types entre parenthèses) à la CGT (nombre de cartes piochées dans le paquet avantageux), à la SOP (score d'empan), au WCST (nombre de critères atteints) et au GNG (pourcentage de fausses alarmes).</i>	130
<i>Tableau 4. Statistiques d'ajustement de différents modèles mixtes à classes latentes (BIC et entropie) variant selon le nombre de classes latentes, pour les performances à la CGT.</i>	131
<i>Tableau 5. Statistiques d'ajustement de différents modèles mixtes à classes latentes (BIC et entropie) variant selon le nombre de classes latentes, pour les performances à la SOP.</i>	132
<i>Tableau 6. Statistiques d'ajustement de différents modèles mixtes à classes latentes (BIC et entropie) variant selon le nombre de classes latentes, pour les performances au WCST.</i>	132
<i>Tableau 7. Statistiques d'ajustement de différents modèles mixtes à classes latentes (BIC et entropie) variant selon le nombre de classes latentes, pour les performances au GNG.</i>	133
<i>Tableau 8. Table de contingence des trajectoires développementales à la CGT et au WCST (effectifs).</i>	135
<i>Tableau 9. Proportion de jetons « avec croix » au sein de chacun des deux ensembles de jetons, pour chacun des 18 items de l'épreuve de QDP et pour chacun des blocs d'essais. La proportion la plus avantageuse est, le cas échéant, indiquée en caractère gras.</i>	Erreur ! Signet non défini.

<i>Tableau 10. Caractéristiques du meilleur modèle retenu (nombre de classes latentes et présence ou non d'une hypothèse sur l'invariance de mesure du modèle) pour chacun des blocs d'items considérés isolément.</i>	Erreur ! Signet non défini.
<i>Tableau 11. Effectifs et proportions d'enfants dans chacune des classes latentes d'après les prédictions du modèle pour un ensemble de blocs d'items</i>	Erreur ! Signet non défini.
<i>Tableau 12. Répartition des effectifs dans chacune des classes latentes et dans chacun des groupes d'âge.</i>	Erreur ! Signet non défini.
<i>Tableau 13. Moyenne et écart-type (E.T.) du pourcentage d'enfants, par blocs de 20 essais et pour l'ensemble de la passation, pour lesquels la prédiction du modèle de la valence espérée est avérée.</i>	155
<i>Tableau 14. Moyennes et écarts-type des trois paramètres du modèle de la valence espérée, dans chacun des groupes d'âge et pour l'ensemble de l'échantillon (N=44).</i>	157

Index des figures

<i>Figure 1. Matériel utilisé par Piaget et Inhelder (1951) pour étudier les réactions de l'enfant face aux phénomènes de mélange.</i>	<i>34</i>
<i>Figure 2. Représentation schématique de deux rigoles. Avec la première rigole, la probabilité que la bille s'arrête dans un compartiment gris est de 0,8 (soit 0,2 pour le compartiment blanc). La poupée gagne 6 crayons si la bille s'arrête dans un compartiment gris, et 1 crayon si elle s'arrête dans un compartiment blanc (d'après Schlottmann, 2001).</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3. Résultats obtenus par Bechara et al. (1997) auprès de patients présentant des lésions du CPFVM et des sujets contrôle durant chacune des phases de la résolution de l'IGT. A) Pourcentage de sujets ayant atteint chacune des quatre phases. B) Activité électrodermale des participants dans chacune des quatre phases et pour chacun des types de paquets (avantageux ou désavantageux). C) Nombre de cartes sélectionnées dans les paquets avantageux et désavantageux pour chacune des quatre phases de la passation.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 4. Modèle factoriel obtenu par Miyake et al. (2000, 2012).</i>	<i>83</i>
<i>Figure 5. Deux exemples de cartes issues de la CGT : a) carte issue du paquet désavantageux (gain : 2 ; perte : 4) ; b) carte issue du paquet avantageux (gain : 1 ; perte : 0).</i>	<i>105</i>
<i>Figure 6. Proportion observée des enfants piochant dans le paquet avantageux, en fonction de l'essai (courbe obtenue par lissage de Tukey), et : du groupe d'âge (A) ; de la condition expérimentale (B) ; du score des participants à la SOPT (séparation par la médiane) (C) ; et du score des participants à la tâche secondaire (séparation par la médiane) (D).</i>	<i>111</i>
<i>Figure 7. Capture d'écran de la version informatisée de la CGT.</i>	<i>126</i>
<i>Figure 8. Trajectoires développementales des performances à la CGT dans chacune des deux classes latentes (moyennes et écarts types). Le pourcentage de sujets compris dans chacune des deux classes latentes est indiqué entre parenthèses dans la légende.</i>	<i>131</i>
<i>Figure 9. Trajectoires développementales des performances au WCST dans chacune des deux classes latentes (moyennes et écarts types). Le pourcentage de sujets compris dans chacune des deux classes latentes est indiqué entre parenthèses dans la légende.</i>	<i>133</i>

- Figure 10. Trajectoires développementales des performances au GNG dans chacune des deux classes latentes (moyennes et écarts types). Le pourcentage de sujets compris dans chacune des deux classes latentes est indiqué entre parenthèses dans la légende. 134
- Figure 11. Proportions de réussite à l'épreuve de QDP, pour chacun des blocs d'items et dans chacun des groupes d'âge. **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 12. Probabilités de réponses prédites par le modèle pour chacune des modalités de réponse possibles (réussite par choix du paquet de jetons avantageux, échec par choix du paquet de jetons désavantageux, échec par absence de préférence), pour chacun des blocs d'items et dans chacune des classes latentes. **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 13. Deux exemples de cartes de la CGT : a) un exemple de carte issue du paquet désavantageux (gain : 2 ; perte : 4) ; b) un exemple de carte issue du paquet avantageux (gain : 1 ; perte : 0). 146
- Figure 14. Représentation du modèle de la valence espérée chez un participant. $Choix_{l,t+1}$ est une variable binaire prenant la valeur 1 si le sujet a pioché dans le paquet avantageux à l'essai $t+1$, 0 s'il a pioché dans le paquet désavantageux. Les variables entourées d'un rectangle sont observées, celles entourées d'une ellipse double sont entièrement déterminées, celles entourées d'une ellipse simple sont à estimer. 149
- Figure 15. Représentation graphique de la distribution du pourcentage de prédictions valides des réponses des participants par le modèle de la valence espérée, dans chacun des groupes d'âge. 154
- Figure 16. Représentation graphique des liens entre la performance à la CGT et chacun des paramètres w , a et c 159

Prise de décision sous incertitude et raisonnement probabiliste chez l'enfant : aspects développementaux et différentiels

Résumé

L'étude de la prise de décision sous incertitude en psychologie vise à identifier les processus permettant à l'individu d'atteindre un but en sélectionnant une conduite parmi plusieurs alternatives, lorsqu'il existe une incertitude quant aux conséquences respectives de ces différentes conduites. Nos hypothèses se centrent sur le rôle des fonctions exécutives et du raisonnement logico-mathématique chez l'enfant de 5 à 11 ans. Nous abordons cette thématique sous l'angle des approches différentielle (variabilité inter- et intra-individuelle) et développementale (changement micro- et macrogénétique). Quatre études sont présentées. Les deux premières soulignent le rôle de la mémoire de travail dans la résolution de la tâche du casino chez l'enfant de 8 à 11 ans, et émettent quelques réserves quant au rôle des fonctions exécutives à cette même épreuve chez les enfants de 5 à 7 ans (approche longitudinale). La troisième étude vise à étudier les stratégies des enfants de 5 et 6 ans à l'épreuve de quantification des probabilités à partir d'une analyse conjointe des variations individuelles et situationnelles. Nous identifions plusieurs stratégies correspondant à des niveaux de développement distincts, et nous montrons que les enfants les plus âgés témoignent d'une plus grande flexibilité stratégique en réponse aux variations situationnelles. Enfin, la dernière étude cherche à rendre compte des conduites des enfants de 6 à 11 ans à la tâche du casino à partir du modèle de la valence espérée. La perspective est idiographique et se focalise d'abord sur un modèle individuel, avant d'aboutir à une comparaison des seuls individus chez lesquels ce modèle individuel semble pertinent.

Mots-clés : prise de décision sous incertitude, développement, différences individuelles, enfant.

Decision Making under uncertainty and probabilistic reasoning in children: developmental and differential aspects

Abstract

The study of decision making under uncertainty in psychology attempts to identify the various processes by which individuals select a course of action among several alternative possibilities in order to reach a particular goal, when the outcomes of this course of action are uncertain. We hypothesize that executive function and logical-mathematical reasoning may play a role in decision making under uncertainty in children aged 5 to 11. We adopt an individual differences approach (between- and within-individual variability) combined with a developmental approach (micro- and macrogenetic change). Four studies have been conducted. The first two studies underline working memory role in a gambling task in children aged 8 to 11, and cast some doubts on executive function implication in this gambling task in children aged 5 to 7 (test/retest approach). The third study aims to identify the strategies children aged 5 to 6 use in a probability quantification task. By considering both individual and situational variations, we identify various strategies that relates to distinct developmental levels. We show that older children display a greater strategic flexibility in response to situational variations. Finally, the fourth study seeks to investigate decision making in a gambling task with the Expected Valence model in children aged 6 to 11. Our idiographic approach first focuses on an individual model, and then compares the only children whose decisions were appropriately captured by the individual model.

Keywords : decision making under uncertainty, development, individual differences, children.

CRPCC – EA 1285
Université Rennes 2
Place du Recteur Henri Le Moal
CS 24307
35043 Rennes Cedex

