

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

UNE ARCHITECTURE COGNITIVE INSPIRÉE DES THÉORIES DES
PROCESSUS DUAUX POUR UNE INTERACTION FLUIDE DES
COMPORTEMENTS RÉACTIFS ET DÉLIBÉRATIFS

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN INFORMATIQUE COGNITIVE

PAR

OTHALIA LARUE

MARS 2015

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord, mon directeur de recherche, Pierre Poirier, et mon codirecteur Roger Nkambou, pour leurs encouragements, leurs précieux conseils, les nombreuses opportunités qu'ils m'ont offertes et la confiance qu'ils ont eu en moi. Je remercie Pierre pour nos discussions qui ont fait beaucoup pour la définition de ce sujet, pour les nombreuses heures qu'il m'a accordées et qui bien au delà de cette présente thèse m'a inculqué l'éthique et la méthodologie de la recherche scientifique. Je remercie Roger pour ses conseils toujours pertinents, pour m'avoir accueillie au sein du laboratoire GDAC, et aussi pour son soutien financier et logistique sans lequel il aurait été plus difficile de mener à bien cette thèse. Sans eux, il n'est pas certain que je me serais rendue jusqu'au bout. Leur support est l'élément clé qui a permis la réalisation de cette recherche.

Je remercie également l'ensemble des membres du laboratoire GDAC et plus particulièrement Schahrazed Fennouh et Patrick Tchouanto. Je pense notamment aux discussions enrichissantes et au soutien moral qu'ils m'ont apporté. Je remercie également Laurane Varhaillon qui au cours d'un stage au GDAC a travaillé sur l'interface de configuration et l'interface graphique de l'architecture qui ont rendu mon travail bien plus agréable lorsque je me suis attelée aux tâches d'expérimentation. Je remercie aussi les membres de l'Institut des Sciences Cognitives, et plus particulièrement, Nicole Richard et Guillaume Chicoisne. L'ISC a été pour moi en tant qu'étudiant un formidable environnement d'apprentissage et d'échange.

J'adresse aussi des remerciements aux membres du jury, Sébastien Hélie, Hakim Lounis et Serge Robert pour la lecture de cette thèse et leurs commentaires, qui ont grandement contribué à l'amélioration de cette version finale.

Enfin, ce travail n'aurait pas été possible si je n'avais pas bénéficié d'un grand support émotionnel. Je voudrais tout d'abord remercier Antoine sans l'affection et les petits soins duquel je n'aurais jamais pu terminer mon doctorat. J'admire la patience et la compréhension dont il a fait preuve toutes ces années. Merci à lui de m'avoir aimé et supporté pendant les douloureux moments de rédaction de thèse.

A Gérard, je dis merci pour la sagesse. Merci pour le temps jamais compté, les fins de semaine, les heures avant le lever du soleil et les Noëls sacrifiés. Merci de ne jamais s'être lassé de m'entendre me plaindre et d'avoir toléré toutes mes bizarreries. Merci pour l'écoute et la chaleur. Merci d'avoir su m'encourager, mais aussi d'avoir su, quand il était temps, arrêter les encouragements pour me donner un bon "coup de pied au derrière". Cette recherche ne serait aussi pas la même s'il ne m'avait pas encouragé dans ma folie. En écoutant attentivement mes idées, en discutant avec moi comme avec un égal, il a su préserver ma créativité et me transmettre les outils critiques et méthodologiques qui m'ont permis de transformer mon idée folle de départ en un travail de recherche maîtrisé et original.

Merci aux Exclamateurs pour les parenthèses enchantées. Merci à Yahel, Sébastien, Maïna, Robert, Patrick, Geneviève, Vincent et Marie qui m'ont permis de décompresser et ont su garder mon moral au beau fixe. Merci aux sages Tania et Nicolas qui ont offert une oreille attentive et compatissante à mes plaintes.

Je remercie enfin mon frère Nicolas pour son soutien tout au long de ma thèse, ainsi que mes parents Jean-Paul et Florence qui m'ont inculqué la rigueur et la discipline qui étaient nécessaires à ce travail.

À Annaïse

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
RÉSUMÉ.....	1
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I	
THEORIES UNIFIÉES DE LA COGNITION ET ARCHITECTURES	
COGNITIVES.....	7
1.1 Théories unifiées de la cognition : Approches cognitives	9
1.1.1 SOAR.....	9
1.1.2 ACT-R.....	12
1.2 Théories unifiées de la cognition : Approches biologiques	16
1.2.1 LEABRA.....	16
1.2.2 SPA.....	18
1.3 Les critères d'évaluation des d'architectures cognitives.....	20
1.3.1 Comportement.....	22
1.3.2 Cognition.....	27
1.3.3 Réalismes	29
1.3.4 Propriétés représentationnelles.....	30
1.3.5 Validité scientifique	31
1.4 Architectures à dualité forte.....	32
1.4.1 Dualité structurale	33
1.4.2 Dualité théorique.....	35
1.5 Discussion	38
CHAPITRE II	
COEXISTENCE DES COMPORTEMENTS RÉACTIFS ET DÉLIBÉRATIFS	
DANS LES THÉORIES DES « PROCESSUS DUAUX ».....	41
2.1 Théorie des processus duaux.....	41
2.2 Framework tripartite de Stanovich.....	44
CHAPITRE III	
LES ÉMOTIONS COMME RÉGULATEUR DE COMPORTEMENT.....	
3.1 Approches théoriques des émotions.....	50

3.1.1 Théories des émotions de base	50
3.1.2 Théorie de l'évaluation cognitive (<i>appraisal</i>)	51
3.1.3 Théories dimensionnelles	54
3.1.4 Théorie situationniste des émotions	57
3.1.5 Théories neurobiologiques des émotions	58
3.2 Modèles émotionnels et architecture cognitive	61
3.2.1 EMA et SOAR-Emote : implémentation dans SOAR	61
3.2.2 HCogAff	65
3.2.3 SPA : Approche constructiviste	65
3.2.4 Implémentation implicite des émotions	67
3.3 Discussion et conclusion	69
CHAPITRE IV	
MÉTHODOLOGIE	73
4.1 Justification des choix	75
4.1.1 Le choix des théories des processus duaux	75
4.1.2 Le choix d'une théorie des processus duaux spécifiques : le Framework tripartite de Stanovich	79
4.1.3 Le choix d'une approche multi-agents	82
4.2 Cadre conceptuel : Système Multi-agents et approche organisationnelle	85
4.2.1 Agent	85
4.2.2 Système multi-agents (SMA) et adaptation	87
4.2.3 Organisation	88
4.3 Architecture	90
4.3.1 Echanges de messages entre agents	91
4.3.2 Organisations supportant le comportement dual (voir annexe A)	93
4.3.3 Modulateurs des différents profils au sein de l'architecture : modèle émotionnel	103
4.4 Implémentation	109
CHAPITRE V	
VALIDATION	113
5.1 Cadre de validation	113

5.2	Validation pratique.....	116
5.2.1	Contrôle cognitif et tâche de Stroop.....	117
5.2.2	Flexibilité cognitive : test de tri du Wisconsin (Wisconsin Card Sorting Task).....	131
5.2.3	Raisonnement logique et tâche de Wason.....	146
5.2.4	Émotions et neuromodulation : tâche de Stroop émotionnelle	163
5.2.5	Tâche de pari de l'Iowa (IGT) : anticipation du risque.....	173
5.3	Validation théorique : critère d'évaluation des architectures cognitives	183
5.3.1	Comportement.....	183
5.3.2	Cognition.....	187
5.3.3	Réalismes	189
5.3.4	Propriétés représentationnelles.....	190
5.3.5	Validité scientifique	190
	CONCLUSION	193
	ANNEXE A	207
	BIBLIOGRAPHIE	213

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Description du modèle tripartite de Stanovich.....	45
4.1 Description des organisations notation Cheeseboard	93
4.2 Architecture de l'agent.....	95
4.3 Correspondances fonctionnelles	102
4.4 Emotions et neuromodulation	107
5.1 Framework tripartite de Stanovich et tâches psychologiques.....	114
5.2 Temps de réponse moyen par blocs pour essais congruents, incongruents dans les conditions 25% congruentes et 50% incongruentes.....	125
5.3 Résultats à la tâche de Stroop classique de ACT-R et l'humain (Juvina, 2007), et notre proposition	127
5.4 Résultats à la tâche de Stroop classique de LEABRA (Herd, Banich et O'reilly, 2006) et notre proposition.....	129
5.5 Temps de réponse moyen (s) par bloc pour les congruents, incongruents et sémantiquement incongruents.....	130
5.6 Tâche de tri du Wisconsin.....	133
5.7 Déroulement d'une tâche de tri du Wisconsin dans le système avec découplage	138
5.8 Résultats à la tâche de WCST	144
5.9 Matrices « modusponens » et « modus tollens »	155
5.10 Temps de réponse moyens et barre d'erreurs pour quatre conditions.	157
5.11 Étapes de résolution de la tâche en fonction des 4 conditions.....	161

5.12	Temps de réponse moyens (seconde) pour les mots neutres et émotionnels dans des conditions normales et dans des conditions à faible taux de sérotonine et dopamine.....	170
5.13	Activation des agents « sadness », « fear », et « anger » pour « Cancer » dans les conditions normal et « déprimé » dans le système pour une seule simulation lors de la présentation de la carte « Cancer »	172
5.14	Résultats de ACT-R et résultats humains comparés aux résultats de notre proposition avec barre d'erreurs.....	181

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.1	Critères d'évaluation d'architecture cognitive.....	25
4.1	Intervalles d'envoi de messages.....	92
5.1	Correspondance entre tâches psychologiques et fonctionnalités de l'architecture	116
5.2	Extrait de log d'une simulation au degré de sensibilité 1/8	141
5.3	Performance du système en fonction du degré de sensibilité	142
5.4	Résultats moyen pour le degré de sensibilité 1/8.....	143
5.5	Les paramètres initiaux des agents neuromodulateurs.....	168
5.6	Déroulement d'une tâche d'Iowa.....	174

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AGR	Agent Groupe Rôle
ACC	<i>Anterior Cingular Cortex</i> /Cortex cingulaire antérieur
DLPFC	<i>DorsoLateral Prefrontal cortex</i> /Cortex dorsolatéral préfrontal
IFC	<i>Inferior Frontal Cortex</i> /Cortex frontal inférieur
OCR	<i>Optical Character Recognition</i> /Reconnaissance optique de caractère
PFC	<i>Prefrontal Cortex</i> /Cortex préfrontal
RCMS	<i>Response Conflict Monitoting System</i> /Système de surveillance des conflits
RLPFC	<i>Rostrolateral prefrontal cortex</i> /Cortex rostrolateral préfrontal
RNA	Réseau de neurones artificiels
SSA	Système superviseur attentionnel
SMA	Système multi-agents
TASS	<i>The Autonomous Set of Systems</i> /Ensemble autonome de systèmes
TOC	Trouble obsessionnel compulsif
IGT	<i>Iowa Gambling Task</i>
WCST	<i>Wisconsin Card Sorting Task</i>

RÉSUMÉ

La présente thèse a pour objectif de développer une architecture cognitive capable de manifester un comportement séquentiel-délibératif et réactif cohérent. Pour réaliser cet objectif, nous avons conçu une architecture cognitive capable de rendre compte de la dualité du comportement humain, où ces deux types de comportement coexistent et contribuent de manière fluide au fonctionnement d'un système unifié.

Notre architecture est développée d'après une théorie des processus duaux, le modèle tripartite de Stanovich (2009), qui rend compte des différents biais cognitifs manifestés par les sujets humains ainsi que les différences individuelles entre les humains. L'architecture cognitive est implémentée grâce à un système multi-agents où plusieurs organisations d'agents forment les trois niveaux définis dans le modèle tripartite : réactif, algorithmique et réflexif. Le groupe réactif, une carte conceptuelle d'agents réactifs liés à des capteurs et effecteurs, constitue les mémoires à long terme et de travail du système. Le groupe algorithmique effectue les opérations de contrôle dans le système et agit sur le niveau réactif. Enfin, les agents du groupe réflexif contiennent les objectifs à long terme du système et agissent tant sur les niveaux réactifs (activation/inhibition) et algorithmiques (déclenchement d'opérations de découplage). Un comportement hybride (séquentiel-délibératif et réactif) émerge de l'interaction de ces trois groupes d'agents.

Nous proposons une validation tant théorique que pratique de l'architecture. La première consistera à évaluer le système proposé en tant qu'architecture cognitive alors que la seconde consistera à évaluer les performances du système sur des tâches exigeant de l'attention, de la flexibilité cognitive, des capacités de raisonnement et des réactions émotionnelles. Cette évaluation a mis en évidence l'aptitude de l'architecture à simuler adéquatement un certain nombre de phénomènes cognitifs ainsi qu'à reproduire différents profils cognitifs humains.

Mots clés : architecture cognitive, théories des processus duaux, système multi-agents, Framework tripartite de Stanovich, séquentialité, réactivité

ABSTRACT

In this dissertation, we aim to develop a cognitive architecture that acts consistently while fluidly switching between sequential-deliberative and reactive behaviors in adequacy with its environment. To achieve this goal, we build a cognitive architecture that can reproduce the human cognitive duality: the coexistence of two types of behavior and its contribution to dynamic adaptation into a unified system.

Our architecture is based on a dual-process theory, Stanovich's tripartite Framework (2009), which accounts for different cognitive biases as well as individual differences among humans. The cognitive architecture is implemented in a multi-agent system where organizations of agents correspond to the three levels of the tripartite model: reactive, algorithmic and reflective. The reactive group (a conceptual map of reactive agents connected to sensors and effectors) constitutes the long-term and working memory of the system. The algorithmic group is the place where cognitive control occurs by its action on the reactive level. Finally, agents of the reflexive group carry the long-term goals of the system and initiate actions at the reactive (initiating inhibition of habitual response) and algorithmic (launching the operation of cognitive decoupling) levels. A fluidly switching hybrid behavior (deliberative and reactive) emerges from the interaction of the three groups of agents.

We offer both theoretical and empirical validations of the architecture, that is, we evaluate the architecture's theoretical compliance to a number of cognitive architectures criteria found in the literature, and then we evaluate its performance in tasks requiring attention, cognitive flexibility, reasoning skills and emotions. The empirical validation highlights the architecture's ability to appropriately simulate a number of cognitive phenomena as well as to reproduce different cognitive profiles.

Keywords: cognitive architecture, dual-process theories, multi-agent system, cognitive modeling, Stanovich's tripartite framework, adaptation.

INTRODUCTION

Bien que quelques pionniers aient déjà amorcé le développement de modèles cognitifs à portée globale, notamment ACT (Anderson, 1983) ou encore le General Problem Solver (Newell, 1972), la majorité des modèles en sciences cognitives et en intelligence artificielle jusqu'aux années 90 visaient surtout à reproduire des phénomènes ou des capacités spécifiques (ou locales) : la capacité à mettre les verbes au passé (Rumelhart et McClelland, 1986), la production de réponses (Graesser et Franklin, 1990), la mémoire (Klein et Loftus, 1990). Dans son livre *Unified Theories of Cognition* (1990), Newell affirme la nécessité de réorienter la recherche dans le domaine de la modélisation cognitive. Aux approches de modélisations spécifiques, il préfère une approche intégrant différentes micro théories et de développer des hypothèses générales quant à la cognition humaine. Ainsi, Newell souligne la nécessité de corriger la « myopie théorique » en développant des théories de la cognition humaine qui rendent compte d'un large éventail de phénomènes cognitifs. Ces théories computationnelles, dites « théories unifiées de la cognition », définissent un système unique, une *architecture cognitive*, dont l'ensemble des mécanismes tente de rendre compte de la variété de comportements cognitifs humains (résolution de problème, prise de décisions, routine, action, mémorisation, apprentissage, activité motrice, langage, motivation, émotion, imagination, rêve, etc.), permettant ainsi leur compréhension (ou explication) unifiée.

Pour évaluer les théories unifiées de la cognition, et d'abord la sienne à l'époque (SOAR), Newell (1990) propose une liste de critères que des théories unifiées de la cognition devraient satisfaire. D'autres architectures cognitives, fondées sur d'autres théories unifiées de la cognition (ACT-R, CLARION, SPA, etc.), ont depuis lors été développées et ont permis d'augmenter la liste des critères à satisfaire pour une architecture cognitive. Parmi ceux-ci, deux critères, cités dans plusieurs travaux sur les critères d'évaluation, nous paraissent particulièrement importants : la réactivité (la capacité de produire rapidement une action en réponse à un changement de l'environnement) et la séquentialité (la capacité d'élaborer de manière délibérative une séquence comportementale capable de réaliser une tâche complexe), ainsi que l'aptitude d'un système à passer de l'un à l'autre de manière fluide (flexibilité du comportement). L'incapacité des architectures cognitives actuelles à manifester cette flexibilité cognitive a d'ailleurs été reconnue comme une de leurs faiblesses majeures (Langley, Laird et Rogers, 2009). Le fait qu'une variante de ces critères se retrouve dans la plupart des listes de critères et qu'on ait reconnu la difficulté à les intégrer efficacement dans des architectures comme une des faiblesses importantes du domaine traduit la volonté des concepteurs d'architecture cognitive à rendre compte du caractère à la fois séquentiel et réactif du comportement humain, de la coexistence de ces deux types de comportements et de la manière dont ceux-ci coopèrent ou entrent en compétition au sein d'un système.

Comment en effet une architecture cognitive peut-elle simultanément, ou au moment opportun, manifester un comportement séquentiel et réactif? Comment faire coexister et coopérer ces deux types de comportement au sein d'un système unifié méritant le statut d'architecture cognitive? Enfin, comment lui faire adopter différents profils cognitifs (où ces deux types de comportement coexisteraient à des degrés variés) de manière fluide?

C'est de ces questions que nous traitons dans cette thèse. Pour ce faire, nous nous intéressons à la manière dont ces types de comportement sont rendus possibles chez l'humain. Une tendance actuelle en sciences cognitives, supportée par les dernières études en neurosciences, est de postuler que l'esprit humain serait un système dual (Kahneman, 2011) ou à processus duaux (Evans, 2008 ; Stanovich, 2011 ; Stanovich, 2009). Constituant ce système *dual*, les processus de type 1 et les processus de type 2 seraient ainsi composés de processus ayant des propriétés opposées (implicite vs explicite, automatique vs volontaire, etc.) et entreraient en compétition ou collaboreraient d'une manière qui expliquerait le comportement humain observé.

Nous faisons l'hypothèse qu'une architecture cognitive qui rendra compte de la séparation fonctionnelle entre processus de type 1 et processus de type 2 aura la capacité de varier son comportement de réactif à séquentiel-délibératif en adéquation avec les demandes de son environnement. Nous faisons de plus l'hypothèse qu'une architecture cognitive reposant sur une théorie des processus duaux comme théorie unifiée de la cognition serait capable d'exhiber de manière cohérente des comportements réactifs et délibératifs, et de simuler un large éventail de phénomènes cognitifs. Nous proposons dans cette thèse un prototype d'architecture cognitive qui pallie la faiblesse actuelle des différentes architectures cognitives qu'est la coexistence intégrée de comportements séquentiels et réactifs.

Dans le chapitre I, nous présenterons diverses théories unifiées de la cognition implémentées dans des architectures cognitives. Deux théories unifiées d'inspiration cognitive et les architectures cognitives qui y sont associées seront d'abord présentées : SOAR (Laird, 2012) et ACT-R (Anderson, 1996). Nous présenterons ensuite deux théories unifiées de la cognition (et leurs architectures cognitives respectives) d'inspiration biologique : LEABRA (O'Reilly, 1996) et SPAUN (Eliasmith, 2013).

Les critères d'évaluation choisis par les différents concepteurs d'architectures cognitives sont souvent orientés par la théorie unifiée de la cognition choisie au moment de la conception de ces architectures cognitives. Pour éviter de biaiser nos critères vers tel ou tel type de théorie unifiée de la cognition, nous procéderons à une synthèse de ces critères d'évaluation des architectures cognitives. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux travaux de Sun (2004), Anderson et Lebiere (2003), Langley, et coll. (2009) et Eliasmith (2013). Enfin, nous étudierons la manière dont la question de la dualité ou dichotomie de comportements (réactifs vs délibératifs, etc.) a été traitée dans différentes architectures cognitives. Ce faisant, nous aborderons l'une des problématiques majeures qui a guidé le développement de notre architecture. La dualité de comportements au sein d'architectures cognitives sera abordée dans un premier temps par la présentation de quelques architectures ayant traité cette problématique (structuralement et théoriquement), puis, dans le chapitre II par la présentation des théories duales de la cognition, et notamment de celle que nous avons retenue pour le développement de notre architecture cognitive : le Framework tripartite de Keith Stanovich (2009). Nous avons choisi le modèle tripartite de Stanovich puisque, axé sur l'explication des différences individuelles, il apporte plus de détails quant à la nature de la séparation des différentes fonctions au sein des deux systèmes ainsi que la manière dont celles-ci interagissent. Chez Stanovich, les processus de type 1, nommé « esprit autonome », incluent les processus instinctifs, les processus surappris, les connaissances spécifiques au domaine, la régulation émotionnelle et l'apprentissage implicite. Les processus de type 2 sont partagés en deux classes de processus, qu'il nomme « esprit algorithmique » et « esprit réflexif ». L'« esprit réflexif » est le lieu du raisonnement de haut niveau, à long terme du système alors que l'« esprit algorithmique » est le lieu du contrôle cognitif.

Si le cadre tripartite de Stanovich nous offre une idée de la manière dont le comportement émerge de l'interaction des différentes fonctions cognitives, notre

intérêt pour une interaction fluide entre réactivité et séquentialité exige que nous nous attardions à la manière dont une architecture pourra adapter rapidement son comportement à l'environnement en priorisant certains processus ou certains comportements au dépens d'autres. Chez l'humain, cette capacité de priorisation est souvent attribuée aux émotions et diverses architectures cognitives intègrent maintenant des modèles émotionnels pour servir ce rôle, notamment SOAR-Emote (Marinier III et Laird, 2004), ou encore HCogAff (Sloman, 2001). C'est pourquoi nous étudierons au chapitre III les courants théoriques majeurs en ce qui concerne les émotions (émotions de bases, théorie de l'évaluation cognitive, théories dimensionnelles, théorie situationniste des émotions et théorie neurobiologique des émotions), puis verrons comment celles-ci ont été appliquées dans le domaine des architectures cognitives. Nous suggérerons enfin comment nous pensons intégrer les émotions au modèle tripartite de Stanovich.

Dans le chapitre IV, nous présentons notre architecture cognitive et le cadre méthodologique dans lequel elle a été conçue. Dans la mesure où notre modélisation se focalise sur l'interaction de différentes fonctions cognitives organisées en différents groupes ou systèmes, nous avons retenu pour notre architecture cognitive une approche multi-agents qui nous permet de modéliser avec simplicité la séparation de ces sous-systèmes ainsi que leur coopération. Nous présenterons ensuite notre architecture inspirée du modèle tripartite de Stanovich. Dans un premier temps, nous décrirons les différents modules fonctionnels qui composent cette architecture puis le modèle de contrôle du comportement par lequel nous régulons les interactions dans l'architecture et dirige l'émergence du comportement de l'architecture.

Dans le chapitre V, nous présenterons enfin notre cadre de validation. Nous proposons de valider notre architecture d'abord de manière pratique ou expérimentale, puis de manière théorique. Les différents modèles cognitifs ont pu être mis à l'épreuve expérimentale grâce à une panoplie de tests des performances

cognitives développés par les psychologues cognitifs et les neuropsychologues, lesquels soutiennent l'évaluation de différentes fonctions cognitives : la tâche de Stroop (1935) pour évaluer le contrôle de l'attention, la tâche de tri du Wisconsin pour la flexibilité cognitive, la tâche de sélection de Wason (1966) pour le raisonnement, et la tâche de pari de l'Iowa pour la gestion du risque dans la prise de décision. Pour valider notre système en tant qu'outil potentiel de simulation cognitive, nous le soumettrons donc à ces différentes tâches : tâche de Stroop (classique, émotionnel et sémantique) (voir section 5.2.1 et 5.2.4), tâche de tri du Wisconsin (Milner, 1963) (voir section 5.2.2), tâche de Wason (1966) (voir section 5.2.3) et finalement tâche de pari d'Iowa (Bechara *et al.*, 1994) (voir section 5.2.5). Nous comparerons les résultats obtenus aux résultats humains. Et, lorsque ce sera possible (puisque notre architecture est la seule à ce jour à proposer une simulation complète de certaines de ces tâches), nous comparerons nos résultats à ceux obtenus par d'autres architectures cognitives, notamment ACT-R (Anderson, 1996) comme représentant des architectures d'inspiration plus cognitive et LEABRA (O'Reilly, 1996) comme représentant des architectures d'inspiration biologique. L'évaluation théorique de notre architecture se fera grâce aux critères d'évaluations des architectures cognitives présentés dans le chapitre I. Cette évaluation, où nous confronterons les capacités de notre architecture à une synthèse de l'ensemble des critères développés par la communauté, sera pour nous l'occasion de procéder à une discussion critique de notre architecture

CHAPITRE I

THEORIES UNIFIÉES DE LA COGNITION ET ARCHITECTURES COGNITIVES

Différentes théories de la cognition ont été développées dans le domaine des sciences cognitives; toutefois, puisque, nous nous concentrons ici sur les architectures cognitives, nous nous limiterons aux théories utilisées dans ce cadre, celles auxquelles Newell réfère par le terme de *théories unifiées de la cognition* (1990), et aux théories que nous avons adoptées pour notre proposition d'architecture.

Bien que des tentatives antérieures aient été faites dans ce sens, ACT notamment (Anderson, 1983) ou encore le General Problem Solver (Newell, 1972), la paternité de l'expression de *théorie unifiée de la cognition*¹ et l'identification précise de cette problématique revient à Newell dans *Unified Theories of Cognition* (1990). Il y souligne la nécessité de se concentrer sur le développement de théories de la cognition humaine rendant compte d'un large éventail de phénomènes cognitifs. Les théories unifiées de la cognition sont des théories computationnelles qui par le biais

¹ Nous emploierons dans cette thèse l'expression de théories unifiées de la cognition au sens de Newell.

d'un ensemble de mécanismes appartenant à un système unique décrivent la variété de comportements cognitifs humains (résolution de problème, prise de décisions, routine, action, mémoire, apprentissage, activité motrice, langage, motivation, émotion, imagination, rêve, etc.). Aucune théorie unifiée de la cognition ne rend actuellement compte de l'intégralité de ces éléments, mais, cet objectif a permis à Newell de définir une approche méthodologique intégrative unifiant différentes micro-théories (c'est-à-dire, des théories à portée plus limitée et délimitée) en un système unique. Une théorie unifiée de la cognition se décrit sous la forme d'une architecture cognitive. Newell propose sa propre théorie unifiée de la cognition (SOAR, que nous présenterons dans la section 1.1.1) mais ne rejette pas l'existence d'autres théories de la cognition, notamment ACT (Anderson, 1983), qui existait déjà à cette époque.

Nous présenterons dans un premier temps deux théories unifiées fortement cognitives et leurs implémentations SOAR et ACT-R, et deux théories unifiées fortement biologiques et leurs implémentations LEABRA et SPA. Nous nous intéresserons ensuite aux différents critères d'évaluation qui ont été développés par les auteurs d'architectures cognitives. Ce faisant, nous aborderons l'une des problématiques majeures qui a guidé le développement de notre architecture : la dualité de comportement au sein d'architectures cognitives, d'abord par la présentation de quelques architectures ayant abordé cette problématique (structuralement et théoriquement), puis par la présentation des théories duales de la cognition et notamment celle que nous avons retenue pour le développement de notre architecture cognitive.

1.1 Théories unifiées de la cognition : Approches cognitives

1.1.1 SOAR

SOAR, qui tient pour *State, Operator And Result* (Laird, 2012 ; Newell, 1990), est la théorie unifiée de la cognition proposée par Newell. Dans la continuité du *General Problem Solver* (Newell, 1972), l'accent initial est mis sur la résolution de problèmes.

Toutes les tâches, de la plus simple (routine) à la plus complexe, y sont représentées sous forme d'espaces problèmes et la prise de décision se fait selon l'Hypothèse de l'Espace Problème (*Problem Space Hypothesis*): « L'activité rationnelle dans laquelle une personne s'engage pour résoudre un problème peut être décrite par (1) un ensemble d'états de connaissances, (2) les opérateurs qui permettront la transition d'un état à l'autre, (3) les contraintes sur l'application de ces opérateurs et (4) le contrôle des connaissances guidera le choix du prochain opérateur. » (Newell 1990, p33). Les espaces problèmes sont ainsi un ensemble d'états et d'opérateurs qui manipulent ces états. Les états finaux sont ceux qui mèneront à la résolution du problème (ou de la tâche).

SOAR dans sa version originale est constitué d'une mémoire à long terme unique. Le contrôle s'y effectue au cours d'un cycle de décision constitué de deux étapes : élaboration et décision. Lors de la phase d'élaboration, les productions qui peuvent être appariées à la mémoire à court terme actuelle sont transférées de la mémoire à long terme à la mémoire à court terme. Les nouveaux éléments détectés déclencheront de nouvelles productions (soit, celles dont la condition est vraie), qui elles aussi seront transférées de la mémoire à long terme à la mémoire à court terme jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de productions adéquates à déclencher ou qu'une solution soit atteinte. Dans la phase de décision, la base des préférences associées à ces connaissances, s'il y a lieu, déterminera quelle sera la prochaine étape à engager dans

l'espace problème. Cette prise de décision marquera le début d'un nouveau cycle de décision.

L'opérateur dans SOAR est distribué dans plusieurs règles qui permettent de créer une structure de données dans la mémoire à court terme. Certaines de ces règles pourront notamment ajuster les préférences des opérateurs en rapport à la situation actuelle. À cette structure de données est associée la préférence acceptable pour que l'opérateur puisse être sélectionné. Les opérateurs modifient la mémoire à court terme (interne) ou d'appliquer une action.

Lorsque le cycle de décision est insuffisant pour déterminer la prochaine étape, on est dans une impasse. Lors d'une impasse, l'architecture définit un sous-objectif afin d'acquérir les connaissances manquantes à la résolution de cette impasse. Une fois le sous-objectif choisi, un nouveau cycle de décision a lieu. De nouvelles impasses peuvent survenir lors de la réalisation d'un sous-objectif, il y aura alors des hiérarchies d'objectifs et sous-objectifs.

En plus des mécanismes que nous venons de décrire, et qui organisent les productions dans un espace problème pour la réalisation d'une tâche, SOAR est doté d'un mécanisme supportant l'acquisition de nouvelles connaissances permanentes : le *chunking*. Par le mécanisme de *chunking*, le processus ayant permis de résoudre un problème en rapport à un objectif est stocké sous la forme de règles en mémoire à long terme. Les *chunks* pourront être réutilisés dans des situations analogues : ils constituent la mémoire épisodique du système.

SOAR est aussi doté de capacités motrices et sensorielles. Le système perceptuel génère des éléments qui pourront être stockés temporairement en mémoire à court terme. Le système de cognition centrale que nous avons précédemment décrit générera des éléments qui seront placés dans la mémoire à court terme pour être exécutés par le système moteur. Les systèmes sensoriels et moteurs sont des systèmes

clos : des mécanismes d'encodage et décodage (sous la forme de production) supportent la communication avec le reste du système.

Alors que dans sa version originale, SOAR n'implémentait qu'un seul mécanisme d'apprentissage. SOAR 9 (Laird, 2012) supporte plusieurs mécanismes d'apprentissages (*chunking*, apprentissage par renforcement, sémantique et épisodique) ainsi que différents systèmes de mémoires à long terme (procédural, épisodique et sémantique) et de représentations (symbolique, numérique et visuelles). Bien que les ajouts à l'architecture soient encore inspirés par le modèle humain, ce n'est plus l'objectif principal des concepteurs de l'architecture, le parallèle biologique est d'ailleurs un axe de développement qui a été abandonné dans les nouvelles versions de SOAR. Les ajouts peuvent être classés dans deux catégories (non forcément exclusives) : les modules d'apprentissages et de mémoire qui capturent de nouveaux types de connaissances (notamment, visuels) et encodent les règles, et les représentations non symboliques des connaissances. Par le biais d'un algorithme (*distribution based algorithm*) les opérateurs les plus adéquats pour la situation actuelle seront sélectionnés sur la base des préférences numériques associés aux opérateurs. L'apprentissage par renforcement ajustera ces préférences numériques. Le processus de prise décision est ainsi amélioré à chaque cycle. Alors que dans la version originale de SOAR, on ne pouvait pas encoder directement la mémoire sémantique, cette fonctionnalité a été ajoutée. La base de connaissances sémantique est ainsi enrichie à chaque cycle. Enfin, l'imagerie mentale visuelle est intégrée au socle original de SOAR, grâce à des processus qui créent des structures symboliques à partir des images. Des problèmes de raisonnement spatial sont ainsi résolus. Une mémoire à court terme est associée à l'imagerie mentale visuelle. Celle-ci a accès à une mémoire à long terme des images et peut ainsi construire et manipuler des images.

1.1.2 ACT-R

L'objectif initial d'ACT-R, *Adaptive Control of Thought-Rational* (Anderson, 1996), est la description d'une théorie complète de la cognition humaine. Des architectures que nous décrirons, c'est celle qui est la plus proche de SOAR. La cognition émerge de l'interaction entre structures procédurales et déclaratives (la mémoire sémantique était l'élément clef des premières versions d'ACT-R). Dans ACT-R, la cognition repose sur des modules, chacun dédié au traitement d'une information particulière. On compte notamment un module responsable de l'identification des objets présents dans le champ visuel, un module moteur/manuel, un module déclaratif s'occupe de récupérer l'information dans la mémoire déclarative, un module responsable du maintien de l'objectif et des intentions actuelles (Anderson, 2004). Similaires aux systèmes esclaves de la théorie de la mémoire de travail de Baddeley (1986), les modules sont coordonnés par un module central (sous la forme d'un système de production) capable de reconnaître des patrons d'informations présents dans les buffers qui lui sont présentés et de modifier ceux-ci.

L'information est encapsulée dans ces modules et ceux-ci ne communiquent que par l'intermédiaire des buffers (de l'information visible sur ces buffers). Le contenu des buffers est limité à une seule unité déclarative de connaissance (similaire aux *chunks* de SOAR) restreignant ainsi le nombre d'éléments issus des modules pouvant être traités par la cognition centrale (un seul souvenir à la fois, un seul objet visuel à la fois). Bien que la cognition centrale ne puisse prendre en charge que l'exécution d'une règle à la fois, le fonctionnement des modules se fait en parallèle et de manière asynchrone.

Il y a deux types de connaissances: les connaissances déclaratives (factuelles) et procédurales (opérations). Des mémoires distinctes y sont associées. Les deux unités de connaissances utilisées sont :

- Les *chunks*, qui sont les unités de connaissance dans la mémoire déclarative (connaissances factuelles). Ils contiennent un nombre limité d'éléments (deux ou trois) qui sont en relation. Les éléments d'un *chunk* peuvent être d'autres *chunks*, rendant ainsi possible une organisation hiérarchique dans la mémoire à long terme. Les *chunks* sont créés soit par l'encodage direct des objets présents dans l'environnement, soit par l'encodage à long terme d'élaborations internes.
- Les règles de productions, qui sont les unités de connaissances dans la mémoire procédurale. La notion de règles de production est reprise de Newell et SOAR. Les règles de production encodent les compétences cognitives sous la forme de paires condition-action. Elles auront accès à la mémoire déclarative et la modifieront. Elles sont spécifiques à des types de buts tout en étant suffisamment générales pour être applicables à un large ensemble de problèmes (p. ex. une règle de production pour additionner des termes peut être appliquée à n'importe quel problème d'addition, mais seulement à des problèmes impliquant des additions).

Ces deux unités ont en commun de décroître de force avec le temps.

En plus des structures symboliques précédemment décrites, ACT-R possède un niveau sous-symbolique qui affecte la sélection des chunks (en influençant les niveaux d'activation) et règles de production (en y associant des utilités espérées utilisables en cas de conflit) ainsi que l'apprentissage. Deux méthodes d'apprentissage sous-symbolique sont utilisées: l'apprentissage par renforcement et l'apprentissage statistique (Anderson, 1996).

De même que dans SOAR, la prise de décision se fait par cycle. Au cours d'un cycle cognitif, le module central déclenchera une production en fonction des patrons (correspondant aux conditions des règles de production) qui auront été reconnus sur les buffers des modules esclaves (qui contiennent les représentations internes et

externes du monde). L'action associée à la règle de production modifiera les buffers et les mettra à jour pour le prochain cycle (Anderson, 2004).

Plusieurs travaux (Anderson, 2007) ont été effectués afin de montrer la correspondance entre les différents modules qui composent ACT-R et des structures cérébrales humaines. Ainsi, les ganglions de la base, plus particulièrement deux des noyaux qui le constituent (le pallidum et le striatum), et le thalamus sont associés au module central (qui implémente les règles de production) dans ACT-R. Le striatum est associé au support d'une fonction de reconnaissance de patrons (Frank, 2001), le pallidum est impliqué dans la résolution de conflit et le thalamus contrôle l'exécution des actions (productions de ACT-R). Ces trois régions sont connectées : le striatum projette vers le pallidum, le pallidum en retour agira en inhibant les cellules de thalamus qui projettera dans cinq différentes régions du cortex frontal, supportant la sélection des actions dans le cortex et le contrôle du comportement (Middleton, 2000). Les règles de productions représentant dans ACT-R la mémoire procédurale, cette proposition de structure est compatible avec les recherches (Ashby et Waldron, 2000) qui identifient les ganglions de la base comme le siège de l'apprentissage procédural (Anderson, 2004).

Les aires corticales qui projettent du striatum correspondent ainsi aux buffers auxquels le module central a accès. Le buffer de buts, qui conserve une trace des états internes lors de la résolution d'un problème, correspond au cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC) (Anderson, 2004). Le buffer du module déclaratif qui contient l'information récupérée dans la mémoire déclarative à long terme est associé au cortex préfrontal ventrolatéral (VLPFC)(Wagner *et al.*, 2001). Les modules perceptuels et moteurs sont associés avec les aires corticales motrices et somatosensorielles qui soutiennent le contrôle et la gestion du mouvement des mains (cervelet) ainsi que la vision (lobe occipital).

ACT-R est l'architecture dans laquelle le plus de modèles et simulations de phénomènes cognitifs ont été développés. Certains de ces modèles ont ensuite évolué pour donner des architectures à part entière utilisant comme base ACT-R. Weaver++ (Roelofs, 2003) (Word Encoding by Activation and VERification), une architecture spécialisée dans les simulations de contrôle attentionnel en lien avec la production de langage, en est un exemple. Des modifications importantes ont été faites sur la structure originale des réseaux sémantiques ainsi que sur le module central attentionnel pour approfondir l'architecture de l'attention sélective en simulant deux aspects : l'attention sur la base des informations perceptuelles et sur la base de la sémantique de l'ensemble des réponses. Weaver++ peut ainsi effectuer des simulations dans des tâches impliquant des relations sémantiques (p. ex., tâche de Stroop sémantique).

Les deux architectures précédemment présentées, bien qu'incorporant des aspects connexionnistes dans le traitement des différents processus cognitifs, restent des architectures à forte dominante symbolique. Alors que les auteurs de ACT-R développent de plus en plus depuis quelques années en tenant compte du parallèle neurologique, la force de ACT-R réside encore dans la simulation de phénomènes cognitifs de haut niveau.

Dans la section qui suit, nous nous intéresserons à des architectures qui expliquent l'émergence du comportement humain en mettant davantage l'accent sur le niveau biologique (ou neurologique).

1.2 Théories unifiées de la cognition : Approches biologiques

1.2.1 LEABRA

L'objectif initial de LEABRA (*Local, Error-driven and Associative, Biologically Realistic Algorithm*) (O'Reilly, 1996) était la création d'un algorithme (pour réseau de neurones) neurobiologiquement plausible capturant les propriétés computationnelles du néocortex et sous-tendant différentes fonctions cognitives. LEABRA se veut dans sa version actuelle une théorie cohérente complète du fonctionnement neuronal basique qui sous-tend la cognition. La modélisation de la cognition, à l'inverse des deux précédentes approches, se fait du niveau neurologique au niveau cognitif.

LEABRA est aujourd'hui un ensemble d'algorithmes définissant une théorie computationnelle du cerveau défendue par cette architecture selon deux axes : macrostructure de la cognition (niveau fonctionnel des régions cérébrales et des systèmes cognitifs qu'elles réalisent) et microstructure de la cognition (mécanismes neuronaux basiques qui ont lieu dans les différentes aires cérébrales) (O'Reilly, Hazy et Herd, 2012).

Les 4 principes de computation neuronale suivants régissent la microstructure de la cognition :

- Les réseaux de neurones sont les unités de traitement d'information fondamentales dans le cerveau : chaque neurone est un détecteur qui attend des patrons synaptiques particuliers pour alerter d'autres neurones une fois que ce patron a été détecté.
- Les poids synaptiques encodent les connaissances et s'adaptent pour supporter l'apprentissage.
- Les unités de traitement primaire qui réalisent la cognition de haut niveau (reconnaissance d'objets, traitement spatial, langage, contrôle moteur,

fonctions exécutives) sont les neurones pyramidaux, des neurones excitateurs fortement connectés (bidirectionnellement)

- Les interneurones sont le deuxième type majeur de neurones soutenant la cognition de haut niveau. La dynamique d'inhibition et de compétition générée par les interneurones entre les neurones pyramidaux est ce qui régule l'activité dans le néocortex (apprentissage et performance).

Chaque région cérébrale utilise ainsi le même ensemble de mécanismes neuronaux, c'est le paramétrage des mécanismes microstructuraux que nous venons de présenter qui supporte leur spécialisation dans des régions cérébrales distinctes. Trois régions cérébrales majeures définissent la macrostructure de la cognition dans LEABRA : le cortex postérieur, le cortex préfrontal et l'hippocampe. Les représentations sont ici dans des patrons d'activation neuronale.

Le cortex postérieur est spécialisé dans le traitement perceptuel et sémantique (mémoire à long terme) supporté par un apprentissage statistique lent. L'hippocampe est en revanche le lieu de l'apprentissage rapide d'informations nouvelles supportant la mémoire épisodique. Ces caractéristiques d'apprentissage correspondent à des propriétés biologiques connues des réseaux neuronaux de l'hippocampe et du néocortex. Différents systèmes de neuromodulations qui aident l'apprentissage (dopamine, norépinephrine, acétylcholine) sont intégrés à ce niveau.

Enfin, le cortex préfrontal et les ganglions de la base forment la troisième structure. Fonctionnellement similaire au module central de ACT-R (section 1.1.2), elle est spécialisée dans la maintenance active et flexible des objectifs, la sélection de l'action et l'apprentissage par renforcement (ganglions de la base) pour servir le contrôle cognitif et la mémoire de travail (cortex préfrontal) dans le système. Les informations sont rapidement mises à jour grâce à un mécanisme adaptatif de blocage/régulation.

De la même manière qu'une spécialisation par le paramétrage des neurones a permis de distinguer trois structures cérébrales supportant différents types d'information, au

sein du néocortex, les structures sont spécialisées par leur contenu (différentes parties du néocortex sont utilisées pour différents types d'informations). Cet aspect permet notamment de traiter hiérarchiquement des contenus de plus en plus complexes à chaque couche.

Les deux algorithmes d'apprentissages principaux sont un algorithme d'apprentissage par l'erreur et un algorithme d'apprentissage de type hebbien (Hebb, 2005). L'apprentissage par l'erreur s'appuie sur la communication bidirectionnelle entre neurones pour propager l'information d'erreur. Plusieurs modèles d'apprentissage par renforcement reproduisant l'effet de récompense en fonction des systèmes mésolimbiques de dopamine ont pu être testés dans LEABRA.

De nombreuses simulations ont été réalisées pour explorer les modèles neurobiologiques qui sous-tendent le contrôle cognitif (O'Reilly, Herd et Pauli, 2010), la recherche visuelle (Herd, Banich et O'reilly, 2006), la mémoire de travail et les fonctions exécutives dans le cortex préfrontal (Hazy, Frank et O'Reilly, 2007) et, l'apprentissage dans les régions corticales (O'Reilly et Munakata, 2000).

1.2.2 SPA

L'hypothèse centrale de l'architecture SPA est la suivante :

« Au sein des systèmes biologiques, les fonctions cognitives de haut niveau sont supportées par des pointeurs sémantiques. Les pointeurs sémantiques sont des représentations neuronales qui ont un contenu sémantique fragmentaire/partiel, et peuvent être composés dans les structures représentationnelles nécessaires pour la cognition complexe. » (Eliasmith, 2013)

Cette architecture est réalisée grâce à NEF (Neural Engineering Framework). Ce Framework de simulation neuronale s'articule autour de trois principes :

1. Les représentations neuronales sont définies grâce à l'encodage non linéaire (p. ex. courbes d'accord des neurones (*neuron tuning curves*) et réseaux à impulsions) et le décodage linéaire pondéré (sur les populations de neurones et au fil du temps).
2. Les transformations de représentations neuronales sont des fonctions des variables représentées par les populations neuronales. Ces transformations sont déterminées en utilisant un décodage linéaire (*alternately weighted linear decoding*).
3. Dans cette dynamique neuronale, les représentations neuronales sont vues comme des variables à état de système dynamique. Les dynamiques de systèmes neurobiologiques peuvent être analysées en utilisant la théorie du contrôle (ou encore théorie des systèmes dynamiques). SPA s'inspire ainsi des approches symboliques en reconnaissant la nécessité de représentations syntaxiquement et sémantiquement structurées et des approches connexionnistes où les espaces vectoriels peuvent être utilisés pour capturer les aspects sémantiques. Un espace vectoriel à haute dimensionnalité (*High dimensional vector space*) est ainsi utilisé pour décrire les relations sémantiques entre représentations dans le système cognitif. Les pointeurs sémantiques sont décrits dans cette espace. Le terme de « pointeur » réfère directement à la notion standard de pointeur; le terme de « sémantique » réfère lui au fait que les représentations qui jouent le rôle de pointeurs contiennent elles-mêmes des informations sémantiques : l'information sémantique contenue dans le pointeur sémantique est une version compacte de l'information contenue dans une représentation plus complexe. La relation entre le pointeur sémantique et la structure de données plus complexe sur laquelle il pointe n'est donc pas arbitraire. Les représentations holographiques réduites (*holographic reduced representations*) (Plate, 2003) permettent de lier ces vecteurs afin de conserver la complexité syntaxique de ces représentations (Thagard, 2013).

Les propriétés neuronales suivantes sous-tendent cette structure. Les neurones y sont hétérogènes avec différents patrons temporeux résultant de différents

neurotransmetteurs. Ce n'est ainsi pas seulement les activations des neurones, mais les patrons d'activations qui déterminent leur capacité représentationnelle. Les représentations se font sur des réseaux neuronaux larges (plusieurs millions de neurones) et sont organisées dans des sous réseaux fonctionnels dont on peut établir la correspondance avec des régions cérébrales.

SPA pose par le biais des pointeurs sémantiques des hypothèses quant à la manière dont le traitement neuronal pourrait intervenir dans la résolution de problèmes et la compréhension linguistique. Les pointeurs sémantiques sont le lien entre représentations symboliques et sous symboliques. En particulier, la notion de pointeur sémantique fournit une simulation du processus de conceptualisation tel que théorisé par Barsalou (1999): les pointeurs sémantiques qui supportent la manipulation de représentations symboliques dans ce système sont en lien avec des représentations neuronales de plus bas niveau qui sont en lien avec l'expérience sensorimotrice du système (Thagard, 2013).

Les théories unifiées de la cognition sont des théories computationnelles (c'est ce qui les différencie d'autres théories de l'esprit) et leur résultante ou spécification se fait sous la forme d'architectures cognitives. Ces architectures cognitives intègrent les structures computationnelles nécessaires à l'élaboration d'un système à l'intelligence générale (Laird, 2012). Dans cette section, nous avons présenté des architectures cognitives et leurs théories unifiées de la cognition. Dans la section qui suit, nous décrirons les critères d'évaluation qui ont été développés par leurs concepteurs.

1.3 Les critères d'évaluation des architectures cognitives

La proposition de théorie unifiée de la cognition faite par Newell était avant tout une proposition méthodologique pour le développement de théories intégratives rendant compte d'une grande étendue de phénomènes cognitifs. Différents travaux (Anderson et Lebiere, 2003 ; Langley, Laird et Rogers, 2009 ; Newell, 1990 ; Sun, 2004) ont par

la suite été poursuivis pour déterminer les caractéristiques nécessaires à une théorie de la cognition et par extension une architecture cognitive.

Les différents critères d'évaluation d'architectures cognitives (Anderson et Lebiere, 2003 ; Langley, Laird et Rogers, 2009 ; Newell, 1990 ; Sun, 2004) qui ont été proposés par les auteurs des différentes architectures cognitives (respectivement, ACT-R, CLARION, SOAR et SPA) visent à évaluer la caractérisation de la cognition faite dans l'ensemble des architectures cognitives. Toutefois, ayant été proposés par les défenseurs d'une architecture précise, ces critères sont parfois biaisés par l'approche méthodologique de leurs concepteurs. Après une brève mise en contexte des travaux des différents auteurs dans l'établissement de ces critères, nous décrivons en détail dans la section suivante une synthèse de l'ensemble de ces critères. Afin de décrire plus précisément ses forces et ses faiblesses, nous évaluons notre architecture cognitive en rapport à ces critères.

Newell dès 1980 (Newell, 1980) a posé un certain nombre de questions qui, à terme, devraient être adressées par toute théorie unifiée de la cognition, et par là même toute architecture cognitive. Ces questions faisaient alors office aussi bien de guide méthodologique que de critères d'évaluation. Ces critères ont été mis à jour par Anderson et Lebiere (2003). Ce sont les critères de cette dernière liste que nous utilisons dans notre synthèse. Par la suite, (Sun, 2004) a proposé des critères (*desiderata*) plus fonctionnels où l'accent était mis sur la dichotomie « implicite » et « explicite », au centre du développement de son architecture (CLARION), ainsi que sur les différents niveaux de réalismes qui devraient être poursuivis (évolutif, cognitif et écologique). Langley, Laird et Rogers (2009) présentent quant à eux une synthèse des différentes architectures, critères, et des défis qu'il reste à explorer dans le développement des architectures cognitives. Enfin, Eliasmith dans ses *Core Cognitive Criteria* (Eliasmith, 2013) met lui l'accent sur les structures représentationnelles et les propriétés qui sous-tendent leur manipulation.

Les critères proposés dans ces différents travaux se recoupent, et le nombre de ces recouvrements peut être directement corrélé au paradigme initial de conception de ces architectures. Nous avons classé l'ensemble de ces critères dans 5 catégories distinctes : Comportement, Cognition, Réalismes, Propriétés représentationnelles, Validité scientifique.

Newell, Laird (SOAR) et Anderson (ACT-R), et Sun (CLARION) proposent des architectures cognitives qui bien que distinctes² partagent certaines propriétés représentationnelles (règles incluses dès le départ dans SOAR et ACT-R mais apprises dans CLARION ; certains types d'algorithme d'apprentissage commun). Elles sont le plus facilement appariables et sont présentées principalement dans les sections « Comportement », « Cognition », et « Réalismes ». Les critères proposés par Eliasmith en revanche sont moins présents dans les travaux des trois auteurs précédents (le paradigme de conception utilisé étant très différent). Ils portent plus particulièrement sur les aspects représentationnels (portés dans cette architecture par les pointeurs sémantiques) et sont les plus présents dans les sections « Propriétés représentationnelles » et « Validité scientifique ». Un récapitulatif de l'ensemble de ces critères est présenté dans le tableau 1.

1.3.1 Comportement

1.3.1.1 Rationalité

Ce critère est présent dans les critères de Anderson et Lebiere, et dans la liste de Langley et coll. Au sens de Newell (repris par Anderson et Lebiere), la rationalité de l'architecture pourra s'évaluer en étudiant la relation entre les actions du système en rapport aux connaissances et buts qu'ils possèdent. Chez Langley et coll., cette aptitude est assortie à une autre, l'optimalité, qui évalue l'aptitude du comportement

² CLARION est l'architecture qui se différencie le plus des deux précédentes du fait de son hybridisme (combinaisons de représentations implicites et explicites), et, de la présence forte d'un modèle connexionniste dans l'architecture qui peut ainsi apprendre des structures/règles.

choisi à obtenir de meilleurs résultats. Dans cette optique, la rationalité limitée ou écologique (Gigerenzer et Selten, 2002 ; Simon, 1955) désigne, en rapport à un but, l'aptitude à être aussi optimal que possible étant donné des ressources limitées de l'environnement (écologique). Cette propriété est proche de celle de réalisme écologique proposée par Sun et que nous décrivons dans la section 1.3.3.4.

1.3.1.2 Généralité, versatilité et généricité

Trois critères sont nécessaires selon Langley et coll. pour la réalisation d'un comportement général intelligent: la généralité, la versatilité et la généricité. Le critère de généralité (Langley, Laird et Rogers, 2009) devrait selon eux guider la construction d'un système intelligent qui sera employé dans des tâches diverses et des environnements distincts. La versatilité est liée à la généralité. Elle s'évalue par la mesure des efforts requis de la part du développeur pour adapter le système à chaque nouvelle tâche et environnement. Enfin, le troisième critère, généricité, a lui un impact à la fois sur la généralité et la versatilité. Il désigne l'aptitude de l'architecture à réaliser différentes tâches sur le simple envoi d'une commande (commande en provenance d'un autre agent ou d'un humain). Cette aptitude ne doit pas être uniquement liée à une base de connaissances (mémoire à long terme) assignée au système. La généricité rend l'architecture plus versatile puisque sa présence réduit le temps nécessaire au développeur pour adapter l'architecture à un nouvel environnement, la versatilité rend l'architecture générale puisqu'adaptable à plus de tâches. Un critère qui permet de réduire la maintenance de l'architecture serait la capacité de l'architecture à apprendre de ses expériences et de son environnement. Ce critère apparaît en partie chez Anderson et Lebiere (« Apprendre de son environnement »). Sun le désigne lui par le terme de minimalité. En effet, pour Sun (2004), une approche minimaliste est nécessaire dans le développement d'architecture. Dans ce contexte, minimalité peut prendre deux sens: 1) une architecture ne devrait inclure que les structures initiales minimales et utiliser l'apprentissage afin de développer de nouvelles structures sur cette base.

L'architecture est ainsi à la base aussi constituée de capacité d'apprentissage minimale .2) La minimalité désigne la réduction de la structure interne et des représentations au minimum, tout en maintenant l'aptitude à modéliser les phénomènes désirés par le concepteur. En modélisant une architecture, nous devrions prendre soin de privilégier ces deux aspects.

1.3.1.3 Réactivité

Ce critère se retrouve chez plusieurs auteurs (Anderson et Lebiere, 2003 ; Langley, Laird et Rogers, 2009 ; Sun, 2004). Chez Sun, la réactivité désigne l'aptitude à réagir à l'inattendu. Anderson et Lebiere font référence au comportement dynamique. Selon eux, une théorie de la perception et de l'action ainsi qu'une théorie de la cognition sont nécessaires pour supporter ce type de comportement. Chez Sun (2004), la réactivité désigne les réponses directes et immédiates, qui ne nécessitent pas de computation longue et ne reposent pas sur des représentations explicites élaborées. Pour Langley et Laird, un critère, la persistance, doit être assorti à la réactivité. La persistance, un critère que nous décrivons dans la section qui suit, mesure à quel point une architecture sera capable de poursuivre ses buts malgré les changements dans l'environnement.

Tableau 1.1 Critères d'évaluation d'architecture cognitive

1. Comportement
1.1 Rationalité
1.2 Généralité, versatilité et généricité
1.3 Réactivité
1.4 Robustesse
1.5 Sequentialité et Routine
1.6 Adaptabilité
1.7 Efficacité et mise à l'échelle
1.8 Autonomie et opération étendue
2. Cognition
2.1 Langage naturel
2.2 Dichotomie des processus implicites et explicites
2.3 Conscience
2.4 Généralisation syntaxique
2.5 Apprentissage
2.6 Modularité
2.7 Mémoire
3. Réalismes
3.1 Réalisme cognitif
3.2 Réalisme biologique
3.3 Réalisme évolutif
3.4 Réalisme écologique
4. Propriétés représentationnelles
4.1 Bases de connaissances vastes
4.2 Variétés des types de connaissance
4.3 Systématicité
4.4 Compositionnalité
4.5 Liage massif
4.6 Productivité
5. Validité scientifique
5.1 Triangulation
5.2 Simplicité

1.3.1.4 Robustesse

Le critère de robustesse est proche de la notion de persistance présentée dans la section précédente. Mais, en plus de désigner l'aptitude à maintenir un but dans un environnement non prévisible, la robustesse caractérise, dans les descriptions d'Eliasmith, l'aptitude d'une architecture à se conduire de manière robuste avec des données imprécises ou bruitées. La robustesse caractérise aussi l'aptitude de l'architecture à maintenir une bonne performance au cours de l'enchaînement de plusieurs tâches.

1.3.1.5 Séquentialité et Routine

Nous présentons ici deux critères qui se définissent par leur opposition. Selon Sun, plusieurs types d'activités ont une nature séquentielle et leur réalisation repose sur des structures fonctionnelles essentielles. Ses activités séquentielles sont décomposables en étapes. Le critère de routine s'applique aux activités (ou séquences d'activités) qui à l'inverse sont devenues routinières (réponses habituelles). Les routines peuvent éventuellement être mise à jour grâce à l'expérience (notamment l'adaptation essai-erreur que nous verrons dans la section suivante).

1.3.1.6 Adaptabilité

Ce critère chez Eliasmith désigne l'aptitude d'un système à tenir compte dans ses actions futures de ses expériences passées. Un critère proche se retrouve chez Sun : l'adaptation essai-erreur. Des apprentissages probabilistes ou le conditionnement chez l'humain peuvent adapter les routines et c'est cet aspect que vise à évaluer ce critère.

1.3.1.7 Efficacité et mise à l'échelle

L'efficacité selon Langley et Laird se mesure en termes quantitatifs. Ce critère sera évalué selon deux dimensions, le temps et l'espace requis par le système. Ce critère se rapproche du critère de temps réel de Anderson et Lebiere, où le système doit agir à des temps comparables à ceux de l'humain et doit rendre compte aussi de ces variations de temps en fonction par exemple, de la complexité de la tâche. Ce critère est lié à un deuxième critère, la mise à l'échelle. L'efficacité de l'architecture, dans le temps et dans l'espace, peut se mesurer en observant la manière dont elle est influencée par la complexité. Ainsi, le moins l'efficacité de l'architecture sera affectée par cette variation, le plus elle remplira le critère de mise à l'échelle.

1.3.1.8 Autonomie et opération étendue (*extended operation*)

L'architecture doit être capable de créer ses propres objectifs pour rester autonome sur une longue période. Elle doit aussi rester robuste sur cette période. Le critère d'opération étendue s'évalue en mesurant le temps qu'un agent met à échouer dans un environnement réel et complexe, ou la mesure du temps au bout duquel il cessera d'agir.

1.3.2 Cognition

1.3.2.1 Langage naturel

Selon Newell, puis Anderson et Lebiere, une théorie de la cognition se doit d'inclure des hypothèses quant au langage. Chez Newell, cet aspect repose sur la manipulation des symboles. En ce qui concerne la manipulation des symboles, nous explorerons plus en détail les critères représentationnels qui ont été avancés par Eliasmith dans la section 1.3.4.

1.3.2.2 Dichotomie des processus implicites et explicites

Ce critère vient de Sun et est au centre de l'architecture CLARION. Les processus et connaissances implicites sont difficilement accessibles alors que les processus et

connaissances explicites sont à l'inverse facilement accessibles. Cette dichotomie porte par extension sur des éléments liés aux notions d'implicite et explicite: conscient versus inconscient, traitement symbolique versus sous symbolique, conceptuel versus sous conceptuel.

1.3.2.3 Conscience

Initialement décrit par Newell comme la manifestation d'une conscience ou sens de soi, Anderson et Lebiere tout en ne traitant pas de ce critère dans ACT-R le reconnaissent dans leurs critères d'architecture cognitive.

1.3.2.4 Généralisation syntaxique

Selon Eliasmith, ce critère désigne la capacité à généraliser sur la base de la structure syntaxique des représentations.

1.3.2.5 Apprentissage

L'apprentissage est un critère essentiel chez Sun, et chez Anderson et Lebiere. Pour Anderson et Lebiere les apprentissages concernés contribuent à la mémoire sémantique, la mémoire épisodique, le conditionnement et les aptitudes (skills). L'apprentissage ascendant (de l'implicite vers l'explicite) est un critère au centre des critères proposés par Sun et l'architecture CLARION.

1.3.2.6 Modularité

Ce critère est présenté par Sun. Pour lui dans la mesure où les facultés cognitives sont spécialisées et séparées, soit fonctionnellement, soit dans des régions cérébrales distinctes ou bien les deux, elles devraient être représentées au sein d'une architecture cognitive dans des modules distincts.

1.3.2.7 Mémoire

Selon Eliasmith, une architecture cognitive doit rendre compte des différentes fonctions associées à la mémoire. Il considère plus précisément la relation entre mémoire de travail et mémoire à long terme. L'évaluation de ce critère passerait alors par la manière dont une architecture est capable de rendre compte des phénomènes observés dans les différentes tâches cognitives liées à la mémoire.

1.3.3 Réalismes

1.3.3.1 Réalisme cognitif

Selon Sun, lors de la conception d'une architecture cognitive, il faut tenir compte des caractéristiques connues du comportement humain et des différentes fonctions cognitives telles qu'on en rend compte en neuroscience, psychologie et philosophie. La triangulation est une méthodologie pour la conception d'une telle architecture. Ce critère est développé chez Eliasmith et nous le présenterons plus en détail dans la section 1.3.5.

1.3.3.2 Réalisme biologique

Selon Anderson et Lebiere, une architecture cognitive doit pouvoir être implémentée dans un substrat neuronal. Plus particulièrement, il doit être possible d'associer les processus qui se trouvent dans l'architecture à des régions cérébrales.

1.3.3.3 Réalisme évolutif

Chez Newell et Anderson, il est fait référence à la nécessité de prévoir de tenir compte dans la conception de l'architecture cognitive des théories évolutives. Sun, quant à lui, fait référence au fait que l'architecture doit être réductible à un modèle d'intelligence animal.

1.3.3.4 Réalisme écologique

Selon Sun, une architecture cognitive doit rendre compte du fait que certaines fonctions cognitives sont essentielles à la survie de l'agent en rapport à son environnement. L'agent cognitif doit être situé dans son environnement et avoir les fonctions suffisantes pour réagir et s'adapter à son environnement. Ces fonctions sont chez l'humain des fonctions de survies.

1.3.4 Propriétés représentationnelles

1.3.4.1 Bases de connaissances vastes

Ce critère est défini chez Anderson et Lebiere. Les connaissances sont vastes (reproduisant la complexité du monde réel) et une architecture cognitive doit être capable d'utiliser cette information dans des contextes où celle-ci est appropriée et dans des contraintes de temps raisonnables.

1.3.4.2 Variétés des types de connaissance

Anderson et Lebiere insistent aussi sur la variété des types de connaissances à manipuler, là encore à l'image de la variété de types de connaissances présentes dans le monde réel. Chez Sun, on insiste sur la dichotomie implicite et explicite des connaissances (notamment, mémoire implicite et explicite).

1.3.4.3 Systématicité

Quel que soit le type de représentation choisi, le caractère systématique de nos pensées, c'est-à-dire la connexion nécessaire entre des pensées et d'autres pensées, doit être retranscrit. Alors qu'Eliasmith reconnaît d'autres possibilités, l'implémentation qu'il propose est proche des propositions de Fodor et Pylyshyn (1988) (langage syntaxiquement et sémantiquement combinatoire).

1.3.4.4 Compositionnalité

Au sens d'Eliasmith, une représentation est compositionnelle si le sens de cette représentation peut être déduit de sa structure et du sens de ses constituants. Ce n'est

pas seulement cette simple compositionnalité (celle des langages formels) qui est ici visée, mais une plus complexe (p. ex. poisson-chat : on ne peut pas simplement combiner les sens de poisson et de chat pour comprendre le sens de l'expression). Anderson et Lebiere font aussi référence à cet aspect dans le critère d'intégration des connaissances, où il est attendu que l'architecture soit capable comme l'humain de combiner ses connaissances.

1.3.4.5 Liage massif

Selon Eliasmith, une architecture cognitive doit avoir la capacité de générer des structures complexes dans une durée de temps appropriée. Ces structures reproduisent la complexité du monde réel. Pour ce faire l'architecture requiert un mécanisme de liage adaptable.

1.3.4.6 Productivité

Selon Eliasmith, une architecture doit avoir la capacité de générer une variété infinie de phrases grammaticales avec un ensemble fini de mots et une grammaire finie. Une architecture cognitive devrait être capable de reproduire le pouvoir et la limite (celle d'un système à capacité de traitement limité) de la réelle productivité : flexibilité des représentations, génération et compréhension de structures syntactiques complexes. Cette capacité est mesurée par la longueur des variables et le nombre de variables d'une structure qui peuvent être manipulés avec succès.

1.3.5 Validité scientifique

Cette catégorie de critères proposée par Eliasmith permet d'évaluer directement les théories unifiées de la cognition sur lesquelles les différentes architectures cognitives se basent. On s'intéresse ici à leur validité en tant que théorie scientifique.

1.3.5.1 Triangulation

Au sens de Eliasmith, la triangulation désigne le fait que la théorie unifiée de la cognition sur laquelle une architecture cognitive est basée doit être complète et ainsi présenter clairement sa relation à toutes les disciplines qui visent à comprendre l'organisation fonctionnelle et biologique du cerveau. L'architecture pourra ainsi rendre compte d'un maximum de comportements connus. Sun réfère quant à lui à cette propriété en tant qu'électisme méthodologique. Il l'associe à un autre type d'électisme, l'électisme technique, qui est particulièrement bien illustré dans CLARION où le concepteur ne s'est pas limité à une seule approche (réseau de neurones ou règle de production) mais les a combinées.

1.3.5.2 Simplicité

La théorie peut être décrite de manière brève. Bien que pour Eliasmith la référence en la matière soit une théorie mathématique, ce critère désigne toutes théories où l'on peut rendre compte de tous les effets par une théorie socle solide et non par l'ajout de différents paramètres dans le modèle visant à rendre compte d'une condition spécifique.

En lien avec les dichotomies de comportement et représentations que nous avons présentées dans la section précédente (dichotomie de comportement avec réactivité et séquentialité, dichotomie de processus implicite et explicite), nous allons dans la section qui suit nous intéresser à la manière dont des comportements duaux ont pu être représentés dans différentes architectures. Puis, nous verrons comment ce type de comportement est expliqué dans les théories cognitives actuelles.

1.4 Architectures à dualité forte

Dans cette recherche, nous nous intéressons particulièrement à la question de l'hybridisme de comportement (délibératif et réactif). Quelques architectures cognitives se sont également attachées au problème de la dualité. Nous les présentons

dans la section suivante selon deux axes : les architectures à dualité structurale (hybride de connexionnisme et symbolisme), et les architectures à dualité théorique (théories duales de la cognition).

1.4.1 Dualité structurale

L'architecture CLARION (Sun, Lane et Matthews, 2009) reproduit la dualité implicite/explicite en accord avec le critère de dichotomie implicite/explicite précédemment présenté dans la section 1.3.2.2. Dans cette architecture, apprentissage et connaissance implicites et explicites interagissent pour produire un comportement. Une spécificité de cette architecture est d'utiliser l'apprentissage bottom-up (ascendant), un apprentissage qui permet l'acquisition de connaissances implicites et ensuite sur la base de celles-ci l'apprentissage de connaissances explicites.

L'architecture est décomposée en quatre sous-systèmes : le système non orienté action, le sous-système motivationnel, le sous-système orienté action, le sous-système métacognitif. Le système non orienté action est celui où l'on trouve les représentations des connaissances générales du monde. Le sous-système motivationnel est celui où l'on trouve les motivations du système (« pourquoi l'action est accomplie »). Dans le sous-système orienté action, l'information sur l'état courant du monde est traitée séparément par les processus implicites et explicites. Les résultats de ces traitements sont combinés, et sur cette base la prise de décision est faite. Le sous-système métacognitif est quant à lui très proche du système motivationnel. Il contrôle et régule les processus cognitifs dans le système. Chacun de ces sous-systèmes se sépare en deux niveaux de représentations : implicite et explicite. Les représentations explicites sont symboliques et locales, les représentations implicites sont distribuées.

L'acquisition de connaissances implicites se fait par apprentissage par renforcement.

Les connaissances résultantes sont utilisées pour modifier les connaissances explicites grâce à des mécanismes d'apprentissage « bottom-up ». Et, l'extraction des connaissances de la résultante de l'activation de ces règles est réalisée grâce à un apprentissage « top-down ». Tout comme dans les théories des processus duaux que nous présenterons dans la section 2.1, deux systèmes, un sous-système métacognitif et un sous-système motivationnel, coopèrent pour produire un comportement combinant les recommandations d'actions des deux niveaux (implicite et explicite) ou pour combiner apprentissage « top-down » et « bottom-up ». CLARION a été utilisé pour la simulation l'apprentissage de compétences (Sun 2005) mais aussi des phénomènes cognitifs de haut niveau (Hélie et Sun, 2010 ; Sun et Naveh, 2007). Les modules sensori-moteurs ont en revanche été assez peu développés.

SAL est un autre exemple d'hybridisme structural. SAL (Jilk *et al.*, 2008) est une synthèse de deux architectures : LEABRA (O'Reilly, 1996), que nous avons décrit dans la section 1.2.1, et ACT-R (Anderson, 1996) que nous avons décrit dans la section 1.1.2. Ces deux théories pourtant conçues dans des paradigmes différents (plutôt symbolique pour ACT-R et connexionniste pour LEABRA) identifient dans leur modèle les mêmes régions cérébrales rendant ainsi la correspondance entre certains modules des deux architectures possibles. Les deux architectures reconnaissent notamment un rôle central aux ganglions de la base : dans LEABRA, il est identifié comme le lieu de convergence des entrées d'un grand nombre de régions corticales ; dans ACT-R, il est associé au module central vers lequel convergent les différents modules. Les ganglions de la base sont aussi chargés dans LEABRA d'envoyer des données au cortex frontal qui seront utiles pour la maintenance d'information en rapport à la tâche, cette même action est observable dans ACT-R où le module central est connecté aux buffers des modules assumant ce rôle. Dans ces deux architectures, la division procédural/déclaratif occupe aussi une place forte. Enfin, les propriétés mathématiques du niveau sous symbolique de ACT-R peuvent être rapprochées de certains des algorithmes implémentés au niveau neuronal dans

LEABRA (Jilk *et al.*, 2008).

La combinaison de ces deux architectures nait d'une volonté de leurs concepteurs de pallier aux manques des deux théories qui les fondent. En effet, ACT-R utilise des mécanismes sous-symboliques et peut interagir avec des modules où le traitement des connaissances est supporté par des mécanismes qui ne sont pas symboliques (mécanismes d'apprentissage notamment), mais cela se fait nécessairement à un moment ou à un autre par la traduction de l'information en symboles. L'architecture tripartite de LEABRA qui émerge de la spécialisation des différents neurones en fonction de la région cérébrale qu'ils supportent n'est pas encore capable de supporter des simulations complexes larges impliquant des fonctions cognitives de haut niveau (Jilk *et al.*, 2008). Les mécanismes moteurs et de perceptions de LEABRA ont été repris dans SAL. Ils sont combinés aux mécanismes cognitifs de haut niveau décrits dans ACT-R. L'hybridisme se fait par le biais des modules. Les interactions entre ACT-R et LEABRA se font par l'intermédiaire du buffer visuel : les données reçues de LEABRA sont transformées au sein d'un module en *chunks* qui sont rendus disponibles dans le buffer visuel et les requêtes qui sont envoyées à ce buffer par les autres modules contrôlent les opérations dans LEABRA (Vinokurov *et al.*, 2013). Alors que les deux théories à la base de ces deux architectures ne fournissaient que peu de détails quant à la manière dont émergent les symboles dans l'esprit en partant de la base organique du cerveau, l'union de ces deux architectures supporte des travaux dans ce sens (Jilk *et al.*, 2008).

1.4.2 Dualité théorique

LIDA (Franklin *et al.*, 2007) est une architecture cognitive hybride mélangeant aussi approche symbolique et approche connexionniste. Nous mettrons cependant ici l'accent sur la théorie duale à la base de cette architecture. La dualité se situe dans cette approche entre ce qui est conscient et inconscient. Dans le cycle cognitif de LIDA, le passage de conscient à inconscient se fait au cours de plusieurs étapes. Les

codelets sont des entités qui sont impliquées dans plusieurs étapes de ce cycle, ce sont des agents responsables de l'exécution d'une petite portion de code qui fonctionnent indépendamment les uns des autres. Ils peuvent être spécialisés, et nous identifierons leurs rôles dans la description du cycle cognitif de LIDA. Le début du cycle est préconscient. Les stimuli sensoriels sont reçus et interprétés par les unités de perception. Le percept, et son sens qui a été extrait à l'étape précédente, sont enregistrés dans la mémoire tampon préconsciente de la mémoire de travail de LIDA par des *codelets* perceptuels. Sur la base des percepts et du contenu résiduel de la mémoire tampon préconsciente, des associations locales sont transférées de la mémoire épisodique et de la mémoire déclarative à la mémoire de travail à long terme. Les associations locales contiennent des enregistrements des émotions passées, des actions et des situations qui leurs étaient associées. La prochaine étape du cycle, la compétition pour l'attention, marque le passage à un traitement conscient. Les codelets attentionnels entrent ici en jeu. Ils sont responsables d'une tâche très simple et agissent comme des démons qui scrutent l'espace pour détecter la situation où les conditions seront réunies pour leur action. La détection de cette situation mènera notamment à une augmentation de leur activation. Ils passent en revue la mémoire de travail à long terme et forment des coalitions qui entrent en compétition dans l'espace de travail pour porter des faits à la conscience. Lorsque l'une des coalitions (un codelet d'attention et les codelets contenant l'information lui étant liée) l'emporte, elle accède à l'espace de travail global et son contenu est diffusé à travers le système. Le contenu émotionnel passé associé à une cognition renforcera ses chances de l'emporter. Trois mécanismes fondamentaux d'apprentissage ont lieu à ce niveau pour mettre à jour les mémoires perceptuelles (par l'apprentissage de nouvelles catégories, objets, etc.), épisodiques (quoi, où, quand) et procédurales (par l'apprentissage de nouvelles actions ou séquence d'actions) avec le contenu actuel de la conscience. Le plus fort le contenu émotionnel associé est, le plus fort l'encodage sera. Des représentations de comportements (*schemes*) adéquates sont ensuite recrutées en accord avec le contenu précédemment diffusé. En fonction du contexte,

les objectifs sont réorganisés dans une nouvelle hiérarchie dans un réseau comportemental. Le cycle s'achèvera par la sélection et l'exécution de codelets d'actions déterminés par l'objectif contextuel qui aura été instancié. A ces codelets d'action sont associées des attentes (*expectations*) qui porteront à la conscience du système des résultats en lien avec l'exécution de cette action.

HCogAff³ (Sloman et Chrisley, 2003) est une architecture décrivant la cognition d'une manière compatible avec les théories des processus duaux que nous aborderons dans le chapitre II. HCogAff est une architecture à 3 niveaux : un niveau réactif, un niveau des processus délibératifs, un niveau des processus réflexifs. Les niveaux supérieurs exercent un contrôle sur les niveaux inférieurs, mais ce contrôle peut être perturbé (signaux d'alarme en provenance du niveau réactif, certains stimuli de l'environnement, motivations). Les propriétés suivantes distinguent ces niveaux :

- Niveau réactif : processus perceptuels et sensoriels. Le contenu de ce niveau change constamment en relation avec l'environnement du système.
- Niveau délibératif : processus moteurs, effecteurs et action qui agissent sur l'environnement et modifient les états internes du système. Planification, décision, raisonnement hypothétique sur les actions futures et passées.
- Niveau réflexif : des unités spécialisées décrivant le traitement de l'information interne. Ces opérations de « méta-management » incluent la capacité de : répondre à des questions sur ses pensées et expériences, se rendre compte que le système boucle, prioriser les actions, adapter son plan d'action en fonction des résultats (conserver la stratégie la plus efficace).

³ CogAff est une grammaire des architectures proposée par Sloman. HcogAff est une architecture développée sur le modèle conceptuel/schéma CogAff Sloman, *Varieties of affect and the cogaff architecture schema*

Cette architecture a été implémentée en utilisant la plateforme SimAgent, une plateforme qui a été initialement conçue pour l'implémentation d'agents cognitifs complexes.

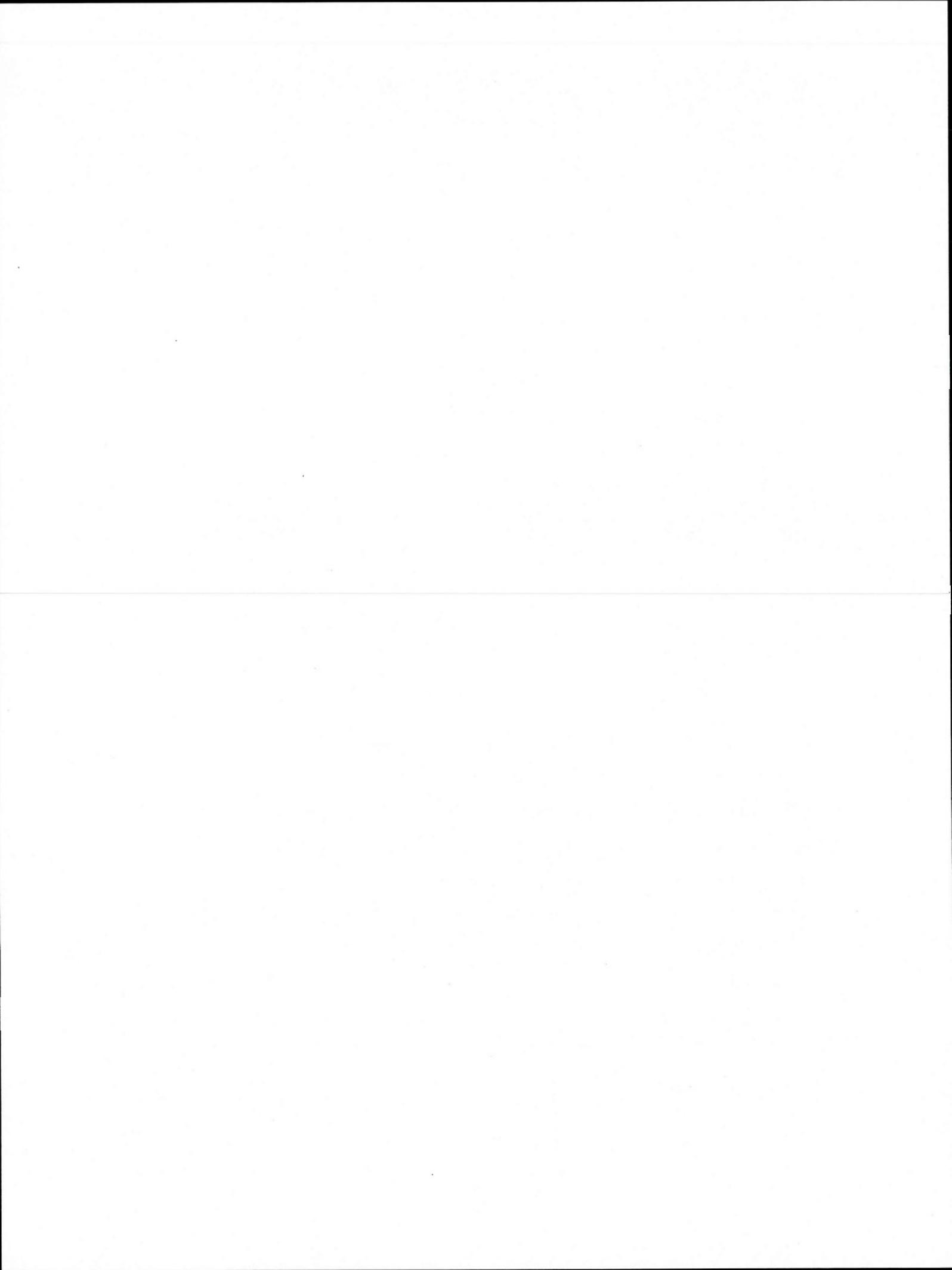
L'architecture DUAL (Petrov et Kokinov, 1999) est une architecture cognitive généraliste, implémentation de la société de l'esprit (Minsky, 1986). Dans la société de l'esprit, le cerveau est organisé comme une société d'agents simples. Seuls, ils n'ont pas un comportement intelligent, mais l'intelligence émerge de l'interaction de l'ensemble des agents. Minsky distingue le cerveau A (esprit) et le cerveau B (contrôle, interruption de boucles). Dans DUAL, les coalitions d'agents forment le cerveau A, et des formations d'agents décrivent la structure macroscopique du système (cerveau B). Ces derniers travaillent avec des modèles cognitifs externes au système. Ces coalitions d'agents fonctionnent par propagation de signaux.

1.5 Discussion

Afin de combiner les différentes propriétés des approches symboliques et connexionnistes, la plupart des approches hybrides (au plan structural) présentées ont recours à des méthodes qui brisent l'unité structurelle de l'architecture (par ex. par le biais d'un interfaçage entre un réseau de neurones et un système de règles) ou qui limitent tout de même l'une ou l'autre des approches (par ex. dynamisme limité dans les systèmes à base symboliques, ou lisibilité limitée dans les RNA à propagation de signaux). Nous avons choisi, pour éviter ces écueils, une méthode d'implémentation et de conceptualisation différente. Nous varions ainsi naturellement la complexité et l'implémentation des différentes fonctionnalités de notre architecture cognitive sans briser l'unité structurelle du système (chapitre IV).

Bien que la division en niveau délibératif et réactif soit déjà implémentée dans quelques architectures (principalement CogAff), nous constatons qu'aucun des concepteurs de ces architectures n'est allé puiser directement dans les théories des processus duaux et les différents mécanismes qui y sont décrits pour supporter la

dualité de la cognition. Nous avons choisi ici de faire autrement en nous inspirant directement de ces théories. Chaque architecture cognitive présente une forme de spécialisation découlant de la théorie unifiée de la cognition initialement choisie, laquelle, bien que se voulant une approche unifiée de la cognition, rendra toujours compte du biais focal de son concepteur. Notre approche repose sur l'hypothèse fondamentale de la dualité du comportement, nous nous sommes spécifiquement intéressés aux théories des processus duaux pour en rendre compte. Nous présenterons, dans la section qui suit, quelques théories des processus duaux et plus particulièrement celle sur laquelle nous basons notre architecture cognitive : le Framework tripartite de Stanovich qui explique l'émergence de notre comportement par l'interaction entre trois niveaux, ou trois « esprits », l'esprit autonome, l'esprit algorithmique, l'esprit réflexif.



CHAPITRE II

COEXISTENCE DES COMPORTEMENTS RÉACTIFS ET DÉLIBÉRATIFS DANS LES THÉORIES DES « PROCESSUS DUAUX »

2.1 Théorie des processus duaux

L'expression « théories des processus duaux » (Frankish et Evans, 2009) désigne un ensemble de théorie qui caractérise l'esprit par l'opposition de deux systèmes (dualité de l'esprit). Un courant de ces théories place cette distinction sur deux systèmes de raisonnement interdépendant : système 1 (plus récemment renommé processus de type 1) et système 2 (plus récemment renommé processus de type 2).

Les processus de type 1, où opèrent les heuristiques, sont évolutivement plus anciens. C'est le lieu du jugement intuitif, traitement rapide et parallèle, sans effort et quasi automatique. Les processus de type 2 sont le siège du raisonnement nécessitant plus d'effort, séquentiel et donc plus lent. Les deux types de processus fonctionnent sur la base de représentation conceptuelle. Les biais systématiques naissent ainsi de la divergence entre attribut cible (ou objectif) et attribut heuristique (ou réponse habituelle). Une fonction primordiale des processus de type 2 est l'inhibition des processus de type 1 par le biais des mécanismes propres au contrôle cognitif. L'échec de l'inhibition peut mener à un comportement irrationnel. Une deuxième fonction importante des processus de type 2 est la production d'une réponse plus adéquate que celle qui a été inhibée.

Dans le cadre de la théorie heuristique-analytique (Evans, 1998), où système 1 et système 2 sont associés respectivement aux systèmes heuristique (raisonnement rapide) et analytique (raisonnement abstrait et hypothétique), trois principes gouvernent le fonctionnement de ces deux systèmes (Evans, 1998): le principe de singularité, le principe de pertinence et le principe de « satisfaisance ». Le principe de singularité (imposé par la capacité limitée de notre système cognitif) désigne la construction d'un modèle mental unique représentant la situation hypothétique. Le principe de pertinence (heuristique) est représenté par le fait que ce modèle mental est conçu pragmatiquement par rapport au contexte. Différents aspects du problème sont représentés de manière sélective sur la base des informations pertinentes trouvées en mémoire. La pertinence est jugée grâce à des principes de crédibilité et probabilité. Ces représentations sont soumises à un système d'évaluation (analytique) répondant à un principe de « satisfaisance » : le système fonctionnera avec la représentation initiale peut-être biaisée tant qu'il ne se heurtera pas à une raison de l'abandonner. Les biais se produisent aussi quand le sujet a la capacité logique de résoudre le problème puisque l'information logique peut être jugée non pertinente au stade heuristique.

L'heuristique est assimilable à une règle non systématique utilisée pour résoudre un problème ou prendre une décision mais qui ne mènera pas systématiquement à la réponse correcte (Lemaire, 2006), c'est une stratégie de résolution non optimale. Dans le cadre des théories des processus duaux les heuristiques sont plus précisément associées aux processus de type 1 et sont vues comme un ensemble de principes qui réduisent les tâches complexes d'estimation de probabilités et de prédiction de valeurs à des opérations de jugements plus simples. La plupart du temps utiles, elles sont là-aussi néanmoins vues comme des sources potentielles d'erreurs graves et systématiques (Tversky et Kahneman, 1974 1124). Trois heuristiques sont plus précisément identifiées par Tversky et Kahneman (Kahneman, 2003): l'heuristique de représentativité, l'heuristique de disponibilité et l'heuristique d'ajustement.

L'heuristique de représentativité concerne les jugements d'appartenance et d'inclusion. Les sujets sont guidés dans leur réponse par la représentation qu'ils se font de la situation et la probabilité de l'événement est évaluée en fonction des propriétés que cette représentation partage avec une population parente, mais aussi avec des caractéristiques marquantes du processus qui les a générées (Baratgin, 2002). Les éléments sont placés dans une catégorie s'ils sont proches d'un élément appartenant à celle-ci. Cette heuristique est responsable notamment des biais où l'individu extrapole à partir d'un petit échantillon non représentatif des propriétés pour les appliquer à une population (Tversky et Kahneman, 1974). Cette heuristique est incluse dans des travaux ultérieurs de Kahneman (2003) comme les heuristiques prototypes, qui s'appuient sur un mécanisme psychologique commun de représentation des catégories par leur prototype (caractérisé par les valeurs moyennes des propriétés remarquables de ses membres).

Dans le cadre de l'heuristique de disponibilité (« availability »), les sujets s'appuient sur leur mémoire pour évaluer la probabilité d'un événement à venir. Si cette situation évoque un événement récent en mémoire, son degré de disponibilité sera élevé et utilisé comme indicateur direct de fréquence dans le calcul de la probabilité. Une estimation trop élevée biaisera l'individu.

L'heuristique d'ajustement – ancrage (« adjustment – anchoring ») est la troisième heuristique. Le sujet, biaisé par cette heuristique se base (« anchoring ») sur une information particulière pour juger d'autres informations. Ce qui crée le biais, c'est par la suite l'ajustement trop faible que fera le sujet à partir de cette « ancre » pour juger d'un élément : l'information particulière n'étant pas forcément en rapport avec l'élément.

Des travaux de neuropsychologie (Goel, 2009 ; Lieberman, 2009) sont venus appuyer cette famille de théorie en identifiant des systèmes anatomiquement distincts qui s'activeraient en fonction du type de raisonnement engagé. Lorsque la compréhension

de la logique du problème est impliquée, une activation est observée dans le ACC (détection du conflit associé au biais) et le cortex préfrontal droit (contrôle exécutif). Dans le cadre d'études sur la prise de décision incluant des récompenses immédiates ou différées (nécessitant donc de la part du sujet une simulation mentale – processus de type 2) (McClure *et al.*, 2004), les régions préfrontales et corticales étaient activées dans le cas des récompenses différées et le système limbique pour les récompenses immédiates.

2.2 Framework tripartite de Stanovich

Le modèle tripartite de Stanovich (2009) est axé sur l'explication des différences individuelles par leur émergence des différentes interactions de trois « esprits ». Chez Stanovich, les processus de type 1 nommés « esprit autonome » regroupent :

- les comportements instinctifs (modules darwiniens),
- des processus surappris (processus tant répétés qu'ils sont devenus automatiques) et des connaissances spécifiques au domaine, appris grâce aux mécanismes généraux d'apprentissage,
- les processus de régulation émotionnelle,
- les processus d'apprentissages implicites.

Le traitement heuristique est un traitement adapté à l'environnement courant, mais qui échoue en environnement hostile. . À ce niveau, il y a peu de différences individuelles.

C'est dans sa description des processus de type 2 que Stanovich se distingue des autres théories des processus duaux. Il partage les processus de type 2 en deux classes de processus, qu'il nomme « esprit algorithmique » et « esprit réflexif ». L'« esprit réflexif » est le lieu du raisonnement de haut niveau, à long terme du système. Il s'y décide ce que fait le système et pourquoi. L'« esprit algorithmique » est le lieu du

contrôle cognitif. Il est en charge de la réalisation du plan décidé par le niveau réflexif.

Nous décrivons ci-dessous les interactions entre ces différents systèmes. Les lettres du texte réfèrent aux lettres (Figure 2.1) du schéma ci-dessous :

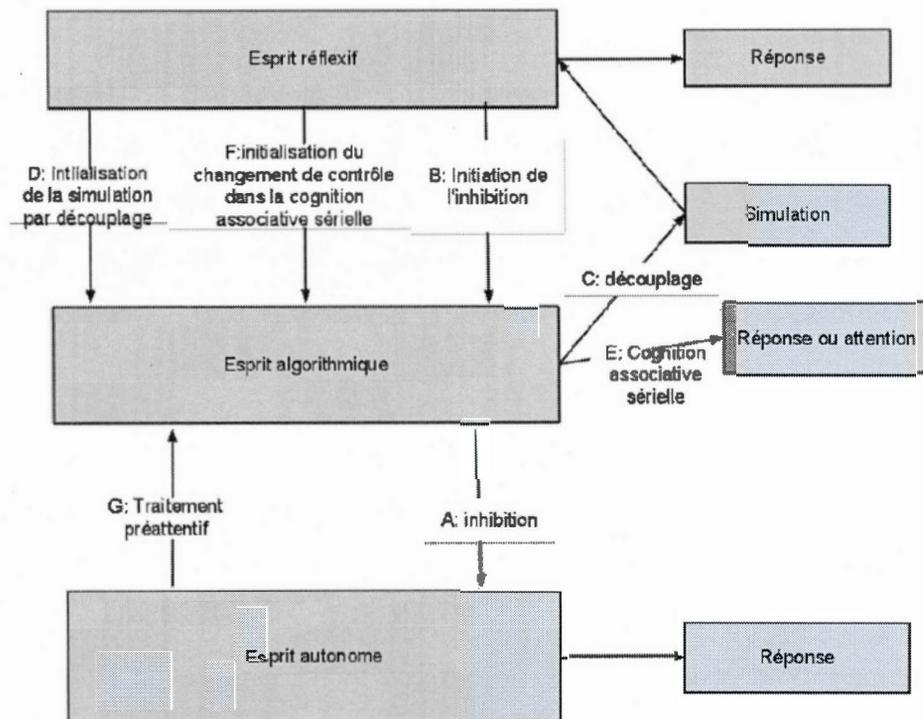


Figure 2.1 Description du modèle tripartite de Stanovich (adapté de Stanovich 2009, p174)

Le système autonome fournit des informations à l'« esprit algorithmique » (processus pré attentif — G dans la figure 2.1). L'esprit algorithmique prend en charge trois éléments : l'inhibition (A dans la figure 1) des comportements de l'esprit autonome, la simulation par découplage (C) et la cognition associative séquentielle (E). L'« esprit réflexif » est celui qui amorce l'appel (B) à cette inhibition. Ce système se

situerait dans le cortex cingulaire antérieur (*anterior cingulate cortex*, ACC) (Stanovich, 2011).

Le système réflexif amorce aussi le processus de simulation (D) qui sera réalisé par l'« esprit algorithmique » au moyen d'une opération dite de découplage (C). La simulation cognitive est la création de modèles temporaires du monde sur lequel différentes alternatives (mondes possibles) pourront être testées. Ces modèles du monde (ou causes alternatives) n'influent pas sur la représentation courante du monde qu'a le sujet. Cette opération est coûteuse cognitivement : il est difficile d'accomplir une autre opération de type 2 lorsqu'un découplage a lieu. L'opération de découplage serait prise en charge par le cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC), et c'est l'ACC qui, en cas de conflit de ces deux réponses, déciderait du lancement des opérations de découplage (Stanovich, 2011).

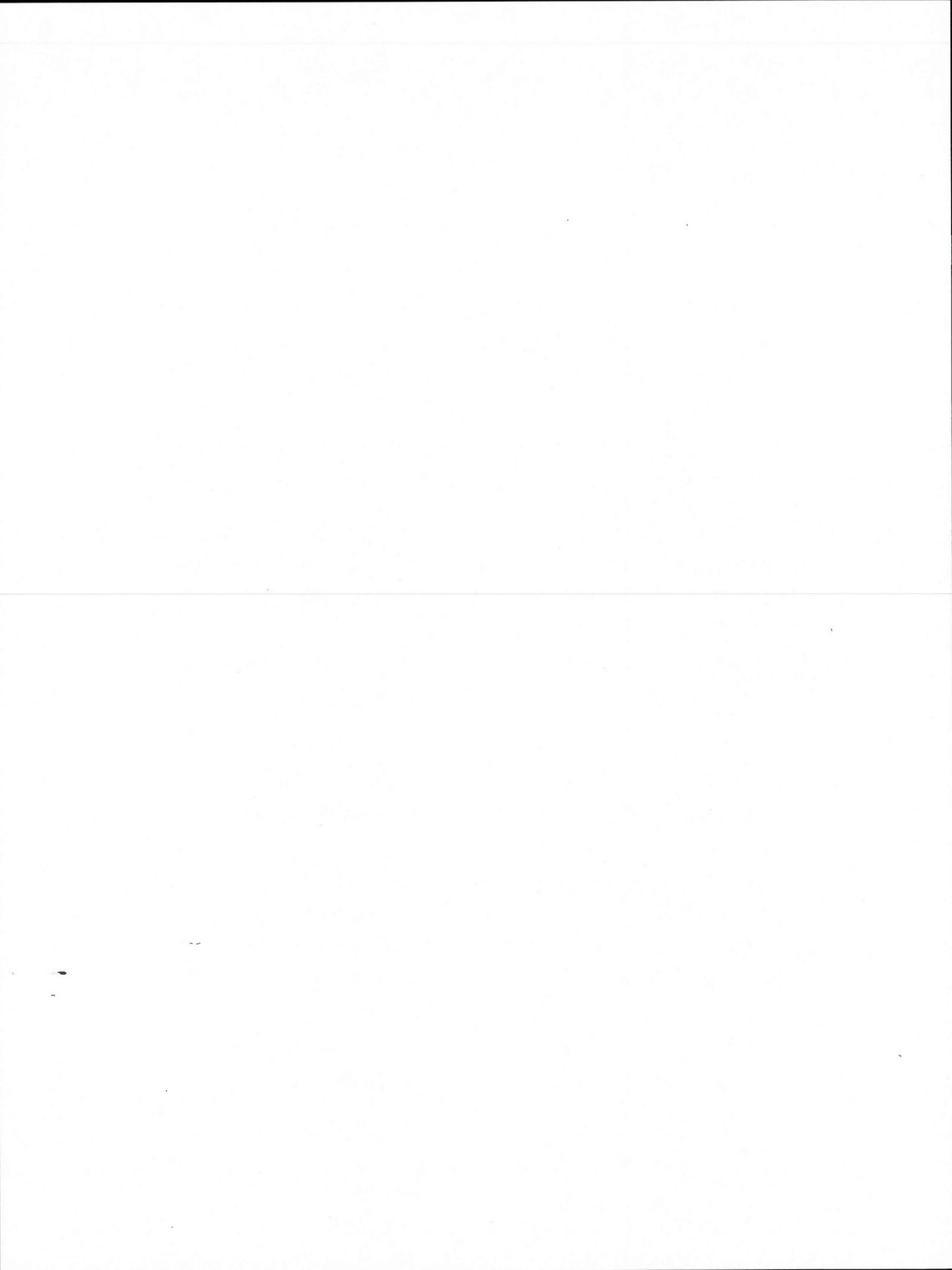
Le découplage n'a pas lieu systématiquement et il est parfois incomplet : le sujet applique alors simplement des règles ou modèles simples qui lui semblent adaptés à la situation. Dans ces cas-là, la cognition associative séquentielle prend en charge l'exécution de ce modèle, une opération lente et séquentielle. Bien que son exécution soit lente, cette opération représente une charge cognitive moins forte, ce qui explique que le sujet y ait souvent recours. Un biais est associé à ce type de cognition, le biais focal : cette règle ou ce modèle simple choisi rapidement n'est pas forcément le meilleur pour cette situation, un meilleur aurait pu être obtenu par découplage.

Les opérations prises en charge par l'esprit réflexif ont peu été décrites dans les autres théories des processus duaux. Ce niveau définit le style cognitif de l'individu : « la tendance à collecter des informations avant de se faire une opinion sur un sujet, la tendance à rechercher différents points de vue avant d'en arriver à une conclusion, l'aptitude à penser en profondeur à un problème avant de fournir une réponse, la tendance à calibrer le poids de sa propre opinion par rapport au poids des indices/preuves dont nous disposons, la tendance à penser aux conséquences futures

avant d'agir, la tendance à peser le pour et le contre avant de prendre une décision, et la tendance à rechercher la nuance et à éviter l'absolutisme » (Stanovich, West et Toplak, 2010) p378. L'esprit réflexif a trois fonctions. Nous avons déjà décrit les deux premières : l'initiation des simulations dans l'esprit algorithmique (D), et l'initiation des inhibitions effectuées par l'esprit algorithmique sur l'esprit autonome (B). La troisième fonction est liée à l'association cognitive séquentielle. L'esprit réflexif peut interrompre celle-ci en modifiant la séquence en cours d'exécution. Il peut alors soit proposer une nouvelle séquence d'action à effectuer en ce qui concerne la cognition associative séquentielle (E), soit amorcer une simulation complète de la situation (C). Il n'interagira pas en revanche directement avec l'esprit autonome, c'est l'esprit algorithmique qui s'en chargera.

Le découpage de la cognition humaine en trois classes au lieu de simplement deux comme dans les autres théories des processus duaux permet de mieux rendre compte des différences individuelles. Les performances de l'esprit algorithmique seront celles des capacités cognitives et de l'intelligence de fluide, alors que celles de l'esprit réflexif s'observeront plus dans la pensée critique ou encore le « style cognitif » de l'individu.

Alors que les théories des processus duaux et plus particulièrement la théorie tripartite de Stanovich, nous ont permis ici de délimiter les différentes fonctions cognitives sur lesquelles l'émergence de comportement dual repose, nous n'avons pas encore exploité les mécanismes qui font varier l'implication de différentes fonctions cognitives dans un comportement face à une situation. C'est ce que nous ferons dans le chapitre qui suit.



CHAPITRE III

LES ÉMOTIONS COMME RÉGULATEUR DE COMPORTEMENT

Dans les différentes architectures cognitives que nous avons précédemment présentées, des mécanismes de régulation supportent la dynamique du comportement. Nous avons notamment traité de la reproduction des effets de la dopamine sur les fonctions liées au renforcement des objectifs (mécanisme de récompenses) dans l'architecture LEABRA (voir section 1.2.1). Nous avons aussi traité de mécanismes d'alertes de l'architecture HCogaff (voir section 1.4.2) qui modulent le comportement de l'architecture et qui rappellent les mécanismes des émotions primaires de Damasio (1991). Nous partageons la même conviction que les créateurs des architectures cognitives précédemment mentionnées : le rôle de régulateur du comportement qu'opèrent les émotions (et par extension la neuromodulation) en rapport à l'environnement peut être retranscrit dans une architecture cognitive. Les émotions nous feront notamment varier l'implication des différentes fonctions cognitives pour adopter un comportement en accord avec la situation. De plus, divers chercheurs ont proposé un rôle similaire des émotions chez les humains (De Sousa, 1990 ; Naqvi, Shiv et Bechara, 2006).

Dans la section qui suit, nous présenterons tout d'abord différentes approches théoriques aux émotions, nous décrirons ensuite la manière dont celles-ci ont inspiré des modèles implémentés dans différentes architectures cognitives existantes.

3.1 Approches théoriques des émotions

3.1.1 Théories des émotions de base

Ce courant de théories postule l'existence d'un nombre limité d'émotions basiques (aussi désignée comme primaire) universelles (Ekman, 1992 ; Tomkins, 1984). Une émotion basique est une émotion discrète (qui peut être distinguée des autres émotions) et qui résulte d'un processus d'adaptation évolutif (Ekman, 2011). Ces émotions basiques sont au nombre de cinq (éventuellement six) : joie, peur, tristesse, colère, dégoût et surprise (cette sixième émotion porte à débats). Les émotions complexes (ou secondaires) sont un mélange de ces émotions de bases.

Les émotions basiques ont présenté, évolutivement, un intérêt pour notre survie. Grâce à elles nous nous comportons de la manière qui évolutivement s'est avérée la plus efficace (pour une situation donnée). Ainsi, les émotions basiques seront les facteurs qui détermineront le plus notre comportement lorsque la situation les ayant élicités est proche de la situation ayant motivé leur fonction évolutive originale (Ekman, 2011). L'apprentissage culturel et social a une influence sur l'intensité de l'expérience de ces émotions, mais la plupart des chercheurs s'accordent sur le fait que l'apprentissage ne peut pas mener à la création de nouvelles émotions basiques : celles-ci seraient plutôt génétiquement déterminées (Izard, 2011 ; Levenson, 2011 ; Panksepp, 2011). Chaque émotion basique n'est pas simplement un état affectif ou psychologique, mais plutôt une famille d'états liés. Les critères qui les définissent différeront d'une famille à l'autre (Ekman, 2011).

Le mécanisme biologique ou cognitif qui sous-tend une émotion basique est un processus rapide, un mécanisme quasi (mais non exclusivement) automatique. L'aspect quasi automatique rend le système capable de produire une réponse sans impliquer de processus cognitivement coûteux tels que la conscience. Evolutivement anciens, ces jugements rapides soutiennent une action rapide et efficace face aux stimuli présentés et sont conceptuellement proches des mécanismes heuristiques que

nous avons précédemment présentés (cf. section 2.1). Elles sont d'ailleurs présentes dans l'esprit autonome du Framework tripartite de Stanovich.

La fréquence d'usage de ces émotions dans la vie de tous les jours est un point de divergence chez les chercheurs de cette école. Pour plusieurs d'entre eux (Izard, 2011 ; Panksepp, 2011), les émotions basiques sont critiques au cours du développement chez l'enfant, mais moins chez les adultes où les capacités d'apprentissage et de réflexion cognitive font que les émotions éprouvées sont plus des états complexes que des émotions basiques. Alors que pour d'autres (Ekman, 2011) certaines émotions critiques seraient apprises et deviendraient basiques avec le temps (par exemple, la *schadenfreude*, le fait de se réjouir du malheur d'autrui).

Ces différentes classes d'émotions seraient supportées par des systèmes neuronaux séparés et aux histoires évolutives distinctes (systèmes limbiques, amygdale, etc.) et des patrons neuronaux spécifiques seraient dédiés à l'activation d'une émotion. Les émotions basiques auraient ainsi des réseaux neuronaux et une physiologie distincts et résulteraient dans des comportements tout aussi distincts. La peur serait associée à la région de l'amygdale, le dégoût avec l'insula, la tristesse avec l'activation du cortex préfrontal médian, la colère avec l'activation du cortex orbitofrontal et le bonheur avec l'activation de cortex cingulaire antérieur rostral.

3.1.2 Théorie de l'évaluation cognitive (*appraisal*)

À l'inverse de la théorie précédente, les émotions sont ici plus considérées comme des processus que comme des états. Dans la mesure où il peut être complexe, les émotions sur la base des états/symptômes observés, l'avantage des théories de l'évaluation cognitive est de définir l'émotion en rapport à son sens situationnel. Une émotion référerait ainsi à un épisode émotionnel où des changements sur différents systèmes et sous-systèmes organiques (Moors, 2013) ont lieu. Cette théorie fournit notamment plus d'information quant à la manière dont se déclenchent les émotions. Dans cette approche, les émotions sont considérées comme une réponse à des

événements considérés comme importants par l'organisme sous la forme de variations dans différents éléments de l'organisme (Scherer, 2001 33). Les théories de l'évaluation cognitive donnent une grande importance au rapport entre situation et émotion.

L'évaluation cognitive (ou *appraisal*) désigne un processus d'évaluation rapide et non conscient d'un stimulus ou d'un événement selon un ensemble de critères cognitifs (une succession d'étapes de traitement du stimulus) qui déterminent l'émotion ou le mélange de plusieurs émotions ressenti par l'individu (Sander et Scherer, 2009). Les différentes émotions se décrivent en termes de patrons d'évaluation cognitifs distincts. Lazarus, Averill et Opton (1970) expliquent ce processus selon trois composantes évaluatives : évaluation primaire, évaluation secondaire et réévaluation. L'évaluation primaire est l'appréciation d'un stimulus en rapport à sa cohérence au but et à son agrément. L'évaluation secondaire correspond au mécanisme d'adaptation (*coping*) de l'individu, c'est-à-dire, à l'analyse des ressources que l'individu aura pour faire face à la situation. Les premières impressions sont modifiées après réévaluation et l'émotion suscitée au cours de l'interaction de l'individu avec son environnement.

Les critères d'évaluation cognitive employés par l'individu seraient les suivants : 1) évaluation de la nouveauté et de la prédictibilité de l'événement, 2) caractère plaisant intrinsèque, 3) importance pour les buts, 4) possibilité de gérer les conséquences de l'événement, 5) compatibilité avec les normes sociales ou personnelles.

Pour décrire ce processus d'évaluation plus en détail, nous allons nous référer à une théorie de l'évaluation cognitive spécifique : le modèle des processus composants de Scherer (Scherer, 2001). Le processus d'évaluation y est vu comme une succession rapide d'étapes de traitement de stimulus à l'origine de l'émotion. Les différentes composantes du processus émotionnel sont les suivantes : évaluation cognitive des stimuli ou des situations, physiologie (changements corporels), expression motrice,

motivation (approche et évitement), sentiment subjectif reflétant l'expérience émotionnelle vécue (reflet des changements se produisant dans les quatre autres composantes du processus émotionnel).

Dans le cadre des théories des émotions de la base, les études neurologiques visaient à identifier des régions cérébrales spécifiques associées à des émotions spécifiques. Plusieurs travaux ont pourtant montré que certaines de ces régions cérébrales étaient activées dans le cadre de plus d'une émotion (Lindquist *et al.*, 2012). L'amygdale en est un parfait exemple puisqu'elle semble associée plutôt qu'à une émotion particulière (la peur dans la théorie des émotions de la base) au support d'une opération cognitive utile à plusieurs émotions. L'insula quant à elle ne serait pas directement liée au dégoût, mais serait liée à la conscience de nos états internes (interoception) et donc indirectement souvent active lorsque nous avons une sensation de dégoût, mais pas uniquement pour cette émotion-là. Chacun des critères d'évaluations précédemment proposés et des opérations cognitives qui leurs sont liées semblent ainsi associées aux régions cérébrales suivantes :

- 1) Évaluation de la nouveauté : la détection de la nouveauté semble supportée par des réseaux neuronaux basés dans les régions temporales médiales telles que l'hippocampe et l'amygdale et s'étendant au cortex préfrontal et au cortex temporo-pariétal.
- 2) Caractère plaisant intrinsèque (*concern relevance*): Détection rapide de l'importance des stimuli en rapport avec les intérêts directs de l'individu. Alors que l'amygdale est souvent associée avec la détection des stimuli associés à la peur, elle est de plus en plus associée dans différentes études à la détection de stimuli non négatifs et même de certains stimuli positifs. L'amygdale serait en fait active pour détecter la pertinence des stimuli étant donné les objectifs et les besoins de la personne.

3) Importance pour les buts (*Goal congruence*) : Cette opération serait supportée par une boucle de contrôle des conflits entre le cortex cingulaire antérieur (ACC) et le cortex dorsolateral préfrontal (DLPFC). Plus précisément, l'ACC détecte les conflits actuels alors que le DLPFC sert à prévenir les conflits futurs.

4) Gestion des conséquences et causes des événements (ce qui est causé par soi, autrui, les événements). La conscience de soi et l'intéroception sont liées à l'activité de l'insula, alors que la cognition sociale et la théorie de l'esprit⁴ seraient supportées par un vaste réseau qui inclurait la jonction temporel-pariétale (TPJ), le précuneus et le DLPFC.

5) Compatibilité avec les normes et valeurs personnelles. L'accès aux concepts et connaissances liées aux normes (par ex. : comportement socialement acceptable, conformités du comportement aux valeurs personnelles de l'individu, etc.) est lié à l'activation du cortex préfrontal médial. Le DLPFC quant à lui serait lié à l'inhibition des comportements conformes à nos valeurs personnelles lorsque nous avons à adopter des comportements en conflit avec nos valeurs personnelles.

3.1.3 Théories dimensionnelles

L'accent n'est ici pas placé sur les termes émotionnels, comme c'est le cas dans les théories des émotions de bases. En effet, de nombreuses théories dimensionnelles rejettent les catégories d'émotion discrètes telles que précédemment décrites. Ces termes émotionnels sont plutôt vus comme des labels « sans réalité » profonde qui sont attribués rétrospectivement sur des états perçus.

Les émotions dans le cadre de cet ensemble de théories ne sont pas conçues comme des événements isolés, elles existent au contraire dans un espace multidimensionnel

⁴ La théorie de l'esprit désigne le système d'inférences par lequel un individu est capable d'imputer des états mentaux à d'autres ou d'inférer ses propres états mentaux, et d'en tirer des prédictions (Premack et Woodruff 1978).

continu. À la base de cet ensemble de théories, la théorie de Wundt (1897) distingue trois dimensions de base pour décrire le sentiment subjectif de l'émotion (plaisant/déplaisant, tension/relaxation, excitant/déprimant).

Les modèles dimensionnels sont aujourd'hui le plus souvent à deux dimensions (valence et activation/arousal), et ces dimensions sont vues comme des dimensions élémentaires indépendantes représentant les propriétés phénoménologiques basiques de l'expérience affective. L'activation varie le long d'un continuum allant d'un point minimum (sommeil) à un point maximum (effort extrême et excitation intense). La valence est la dimension clé de l'émotion (caractère agréable versus désagréable d'une situation). Certains modèles comportent plus de dimensions. Les modèles à trois dimensions, notamment ont une dimension supplémentaire, la dominance (soumis ou contrôlant) (Valdez et Mehrabian, 1994), et, ceux à quatre dimensions comportent une dimension supplémentaire d'imprévisibilité (Fontaine *et al.*, 2007).

Russell, l'un des représentants les plus actifs de cette famille de théories, propose les six éléments suivants comme composants d'un épisode émotionnel (Russell, 2003) :

- Événement externe antécédent
- Qualité affective : perception de l'antécédent en termes de sa qualité affective (sa capacité à causer un changement dans le *core affect*). La qualité affective peut-être décrite en utilisant les mêmes critères que le *core affect*.
- *Core affect* : Le *core affect* est la notion centrale de cette théorie. L'événement antécédent modifie le *core affect*. Cette modification peut commencer avant que l'événement soit perçu consciemment par l'individu et continuera à changer au cours de l'épisode. Il influencera aussi les autres éléments de l'épisode émotionnel.
- Attribution : L'événement antécédent devient l'objet auquel le *core affect* est attribué.

- Évaluation : le traitement perceptuel cognitif de l'objet est poursuivi pour évaluer sa pertinence aux objectifs de l'individu, ses perspectives futures, ses antécédents causaux.

Il y a quelques similarités entre les théories dimensionnelles et les théories de l'évaluation cognitive. Le caractère plaisant intrinsèque de l'événement ayant élicité l'épisode émotionnel peut notamment être associé à la dimension permettant d'évaluer la valence de l'émotion (caractère agréable versus désagréable d'une situation). La dimension dominance est proche de la propriété d'adaptation (coping) présente dans certaines théories de l'évaluation cognitive (notamment le modèle de Lazarus que nous verrons par la suite) et la dimension d'activation peut être associée à la mesure de l'intensité émotionnelle. Enfin, de la même manière que les théories de l'évaluation cognitive, les théories dimensionnelles s'abstiennent d'associer des régions spécifiques du cerveau à des émotions spécifiques (Barrett, 2006).

Il y a en revanche une différence clé entre cette théorie et la théorie précédente : leur rapport à l'objet (Moors *et al.*, 2013). Dans les théories de l'évaluation cognitive, ce lien est fort, l'émotion est toujours en rapport à un objet, et l'élément clé d'évaluation cognitive est toujours de type relationnel (liens entre des structures, des objets, les événements, les croyances personnelles). Le *core affect*, processus clé des théories dimensionnelles, n'est pas relationnel, c'est un état unique global de l'individu sans relation à un objet précis. Le *core affect* est en effet vu comme une variation dans un espace continu multi dimensionnel de sentiments (*feelings*) dont le déplacement sera influencé par les événements internes et externes. Un processus de catégorisation de l'émotion aura lieu, il mènera à l'objectification (ou attribution) de l'émotion. Mais, ce processus d'objectification n'est pas obligatoire, l'état émotionnel peut aussi exister sans objet: « Core affect per se can be free floating (as in feeling down but not knowing why), but it can come to be directed at something. The full experience of core affect can thus become intentional in the philosophical sense, in much the same way that the full experience of a pain can become intentional » (Russell, 2009).

3.1.4 Théorie situationniste des émotions

Les deux théories précédemment présentées traitaient de l'émotion en rapport à la situation, cette théorie poursuit également cette voie. Nous verrons que ce type de théories partage d'ailleurs plusieurs notions avec la théorie dimensionnelle de Russell précédemment décrite. Le problème qui est ici traité est celui de l'« ancrage émotionnel » : l'extraction de la signification émotionnelle à partir de l'information sensorielle sur la base de mécanismes sémantiques, physiologiques et cognitifs. Dans l'approche constructiviste du modèle « Conceptual Act » (Lindquist, 2013), les émotions sont vues comme des « conceptualisations situées » (Barsalou, 1999) qui émergent lorsque les expériences antérieures servent à donner du sens à des entrées sensorielles. Elles émergent de l'interaction de primitives psychologiques⁵ qui ne sont pas spécifiques aux émotions. Il n'y a pas encore de description complète d'une émotion en termes de primitives psychologiques, mais Lindquist et coll. conviennent que les quatre opérations psychologiques suivantes offrent une bonne première approximation de ces primitives psychologiques : *core affect*, conceptualisation située, l'ancrage et l'attention exécutive. Le *core affect* réfère à la même notion générale que chez Russell (section précédente). Une précision de nature biologique est apportée: le *core affect* serait associé aux signaux sensoriels, viscéraux et moteurs dans l'organisme. La conceptualisation située a lieu lorsque les expériences antérieures sont utilisées pour tirer du sens, en contexte, de sensations. C'est la manière dont nous sommes automatiquement capable de « donner du sens à un état affectif viscéral affect en nous engageant dans une conceptualisation située qui le lie à une situation ou à un objet » (Lindquist, 2013). La conceptualisation est une notion proche de celle d'évaluation cognitive. Lindquist *et al.* émettent l'hypothèse que la

⁵ Les primitives psychologiques sont des processus psychologiques qui ne peuvent être réduits à rien d'autre de mental, une réduction supplémentaire conduirait à la description de mécanismes biologiques.

conceptualisation située est réalisée dans les mêmes régions cérébrales que celles qui sous-tendent la mémoire épisodique. L'ancrage linguistique désigne l'ancrage de l'événement dans une catégorie émotionnelle (association à un concept d'émotion). L'attention exécutive décidera quelles représentations seront mises en avant ou supprimées au cours du processus où un sens est donné à une sensation, quelles représentations sensorielles doivent être privilégiées, et ainsi quel *core affect* deviendra conscient.

3.1.5 Théories neurobiologiques des émotions

Les différentes théories que nous venons de présenter, à l'exception de la dernière qui évoquait les bases biologiques de l'émotion, se limitaient à l'interprétation cognitive de l'émotion. Les dernières théories que nous allons présenter traitent des bases neurobiologiques des émotions.

Les émotions sont ici vues comme des « modes dynamiques de fonctionnement » (Fellous 2009, p. 912) ou comme des patrons dynamiques de neuromodulations (Arbib et Fellous, 2004). Dans cette perspective, les émotions ne sont pas considérées comme résultant de l'activité d'un centre émotionnel unique (par exemple, l'amygdale), ou encore d'un ensemble de structures cérébrales, mais plutôt comme un modèle continu de la neuromodulation des structures cérébrales. Ainsi, d'après Fellous, quand une émotion est reconnue comme capable de modifier un comportement donné, c'est parce que la neuromodulation agit sur des structures neurales, modifiant ainsi leur fonctionnement et par là même le comportement qu'ils réalisent. L'émotion est donc le résultat du calcul neuronal sur la base de l'activité d'impulsion neuronale et ses neuromodulations (Fellous, 1999). Selon lui, sérotonine, dopamine et opiacés sont les neuromodulateurs qui sont les plus impliqués au niveau des émotions (Arbib et Fellous, 2004).

La dopamine est présente principalement sur deux voies : la voie mésocorticale (lobe frontal et le cortex préfrontal), impliquée dans la mise à jour de la mémoire de travail,

et la voie nigrostriatale (noyaux gris centraux), impliquée dans la motricité. La dopamine est également connue pour avoir un impact sur le *set shifting*. La sérotonine, par la voie qui projette des noyaux du raphé au thalamus, subthalamus, le système limbique et le cortex cérébral, semble influencer la mémoire à long terme et le contrôle exécutif. Les faibles niveaux de sérotonine chez le sujet humain sont notamment associés à la dépression (Bear, Connors et Paradiso, 2007) et l'anxiété (Lövheim, 2012). La norépinephrine (système noradrénergique) agit sur la voie du locus coeruleus au cerveau antérieur et au tronc cérébral, et est connue pour créer l'excitation (dans le sens de « arousal » ou éveil). Son action sur la voie du locus coeruleus au lobe pariétal postérieur semble avoir un impact sur l'intégration de l'information sensorielle. La noradrénaline affecte également la mémoire de travail de la même façon que la dopamine (Berridge, 2003). L'acétylcholine (système cholinergique) influe sur la régulation de relais sensoriel spécifique (par modulation de l'activité dans le cerveau antérieur basal), un niveau élevé d'acétylcholine est lié à une augmentation de la réactivité aux stimuli sensoriels. Les faibles niveaux d'acétylcholine semblent se traduire par une diminution de la vigilance. Cette neuromodulation semble également être impliquée dans le maintien de l'attention soutenue et l'attention divisée (Bear, Connors et al. 2007).

Les neuromodulateurs semblent être eux-mêmes influencés par une dynamique neuronale spécifique. L'hypothèse est faite que le niveau d'acétylcholine a une relation antagoniste avec les niveaux de sérotonine et dopamine. Le blocage des récepteurs de dopamine D3 a un impact sur la modulation de la fonction cholinergique préfrontale : il semble se traduire par une augmentation de la libération d'acétylcholine frontale, mais pas sur celle de l'hippocampe. L'action de la dopamine sur ces récepteurs de dopamine D3 semble donc être capables d'inhiber les entrées cholinergiques fronto-corticales. L'acétylcholine (nicotinique et muscarinique) modifie les niveaux de neurotransmission de la noradrénaline, la sérotonine et la dopamine (Briand *et al.*, 2007).

Des recherches ont été menées pour identifier la signature neuromodulatoire spécifique associée à chaque émotion et des modèles intéressants utilisant les données cérébrales et décrivant le lien entre neurotransmetteurs et émotions (Lövheim, 2012) et entre neurotransmetteurs, émotions et états de conscience ont émergé (Hobson, 2002).

Le travail de Lövheim est un exemple de la synthèse de ce travail de recherche dans un modèle tridimensionnel reliant les émotions et les monoamines de base. Les trois modulateurs (dopamine, sérotonine et noradrénaline) représentent les trois axes définissant un espace tridimensionnel (avec niveaux bas et élevé de chaque neuromodulateur sur chaque axe). Les huit émotions de base (Tomkins, 1984) (excitation, joie, surprise, détresse, peur, honte, dégoût, colère) sont situées dans chaque coin de l'espace qui en résulte (Lövheim, 2012). Différentes combinaisons de monoamine sont possibles et les émotions sont définies par les huit valeurs extrêmes (soit zéro, soit maximum, pour chaque dimension). Par exemple, de faibles niveaux de sérotonine sont associés à des émotions négatives comme la peur, la détresse, la honte, la colère et le niveau des deux autres neuromodulateurs (dopamine et la noradrénaline) distinguera ces émotions entre-elles.

Le lien entre neuromodulation et émotion a également été étudié dans le cadre d'une théorie plus globale des états de conscience : le modèle AIM de Hobson (2002). Trois paramètres définissent le modèle de AIM (Hobson, 2002):

- *Activation (dimension A)* : La position dans la dimension A détermine le niveau général de l'activation du cerveau et de la forme de conscience expérimenté par l'individu (veille, sommeil, somnolence, etc.) Le niveau d'activation peut être représenté par une mesure d'ondes cérébrales.
- *Mode (dimension M)* : La modulation chimique dominante actuelle du cerveau. La position dans la dimension M varie du niveau aminergique faible

à élevé. La dimension Mode représente la modulation chimique entre le système cholinergique (l'acétylcholine) et aminergique (noradrénaline et la sérotonine). La valeur de M détermine si oui ou non l'esprit conserve la trace de l'expérience (par exemple, si les expériences sont mémorisées ou non).

- *Input (dimension I)* : L'entrée externe et la sortie du système. La position dans la dimension I détermine la sensibilité du système au monde extérieur.

Dans ces trois dimensions, on peut imaginer les passages entre états de conscience comme des trajectoires d'une position à une autre dans l'espace AIM. Au lieu de considérer les émotions comme des valeurs extrêmes (les coins de l'espace), le modèle AIM rend compte de granularité fine des états émotionnels et conscients (l'intensité des émotions et de leur éventuelle combinaison des émotions complexes).

3.2 Modèles émotionnels et architecture cognitive

Nous allons maintenant nous intéresser à la représentation de ces différentes théories dans le domaine des architectures cognitives. Les théories de l'évaluation cognitive sont celles qui sont les plus représentées dans le domaine des architectures cognitives et globalement en IA, probablement du fait de leur simplicité à être retranscrites sous forme de règles « si-alors ». Nous présenterons dans un premier temps, Ema et SOAR Emote, deux modèles inspirés d'un modèle très répandu, le modèle computationnel OCC issu des théories de l'évaluation cognitive et implémentés dans SOAR. Nous présenterons ensuite le modèle émotionnel décrit dans CogAff, qui décrit les interactions entre niveaux d'architecture à l'aide de signaux/alertes assimilables à des signaux neurobiologiques.

3.2.1 EMA et SOAR-Emote : implémentation dans SOAR

Le modèle computationnel OCC (Clare et Ortony, 1988) a été largement utilisé dans différentes applications en informatique. Dans cette thèse, nous présenterons son application exclusivement dans le domaine des architectures cognitives. OCC est un

modèle issu des théories de l'évaluation cognitive, et en tant que tel, les émotions y sont caractérisées en rapport aux situations auxquelles elles contribuent à donner du sens. Le modèle OCC est un modèle axé sur la structure, à l'inverse d'autres modèles (issus des théories de l'évaluation cognitive) où l'emphase est mise sur le processus qui mène à l'émotion. Les traits des situations prototypes qui mènent au déclenchement d'une émotion sont spécifiés dans le modèle, mais le processus dont l'évaluation cognitive est faite n'est pas décrit.

Trois éléments centraux définissent ce modèle : événements, agents, objets. Les émotions sont des réactions (à valence) à trois types d'éléments/stimuli. Les émotions sont classées selon ces types ; il y a trois types d'émotions puisque trois types de stimuli :

- Content ou non content (*pleased/displeased*) : une valeur positive ou négative en rapport à un événement et ses conséquences. L'intensité émotionnelle est dans ce cas déterminée par la désirabilité d'un événement en rapport aux objectifs.
- Approuver ou désapprouver (*approve/disapprove*) une action. La *Praiseworthiness* en réaction à des actions d'agents est évaluée grâce aux normes.
- Aimer ou ne pas aimer (*like/dislike*) différents aspects d'un objet.

Ce modèle est ici plus particulièrement décrit dans le cadre de deux modèles qui en sont inspirés et qui sont implémentés dans l'architecture SOAR : Emile (Gratch et Marsella, 2001) et EMA - *EMotion and Adaptation* (Gratch et Marsella, 2004).

EMILE est à la fois une implémentation dans SOAR du modèle OCC et de la théorie de Lazarus (Lazarus, 1991). La divergence avec le modèle OCC se traduit par le rôle important des plans dans le raisonnement émotionnel, cet aspect est inspiré par la théorie de Lazarus. Les émotions affectent ainsi principalement la sélection ou le changement de plan, et la sélection d'action menant à la réalisation du plan. Contenu

dans les connaissances à long terme, des cadres d'interprétation spécifiant les conditions (objectifs, standards, attentes (*expectations*)) associées à certaines émotions, sont utilisés pour générer des plans. Un module d'évaluation cognitive est responsable de la réponse émotionnelle, réponse dont l'intensité dépend de sa probabilité et de son importance, et décroît avec le temps (Gratch et Marsella, 2001).

L'architecture EMA - *EMotion and Adaptation*, (Gratch et Marsella, 2004) poursuit les travaux amorcés dans Emile renforçant l'importance de la notion d'adaptation (*coping*) dans une approche intégrative grâce à la théorie de Lazarus et Smith qui offre une vision unifiée des évaluations cognitives et de l'adaptation (*coping*). Le comportement y est caractérisé grâce à ces deux processus basiques. L'évaluation caractérise la relation de la personne avec son environnement et l'adaptation ou *coping* suggère des stratégies pour maintenir et adapter cette relation. Enfin, l'accent est mis dans EMA sur la dynamique des évaluations cognitives. Cette dynamique émerge de l'interaction des processus perceptuels et inférentiels qui opèrent sur l'interprétation faite par le sujet (ici le système) de sa relation à l'environnement. Des représentations mentales qui contiennent des informations sur la manière dont les événements peuvent être mis en relation avec les dispositions internes (p. ex. les objectifs) sont construites. Elles seront utilisées lors de l'évaluation cognitive. L'adaptation se fait ensuite par l'exploration et la suggestion de stratégies qui modifieront la relation entre la personne et l'environnement. Dans EMA, l'interprétation se fera grâce à des variables d'évaluation cognitive (*appraisal*), et, en réponse à cette interprétation, un autre ensemble de processus (les stratégies d'adaptation) modifiera ces représentations. Les représentations des croyances, désirs et intentions, et les diverses représentations causales (développées au cours du processus de planification) sont les deux types de représentations utilisés par EMA (Marsella, 2009). Par le biais de ces différentes représentations et grâce aux processus que nous avons décrits, les émotions dans EMA, en plus de leur action sur l'attention

(shift d'attention) et la planification, peuvent adapter l'architecture BDI (Belief, Desire, Intention) de l'agent.

SOAR-Emote (Marinier III et Laird, 2004) est aussi une implémentation dans SOAR utilisant une version simplifiée de EMA (et donc par extension du modèle OCC), combiné en revanche cette fois-ci à une théorie qui n'est pas dérivée des théories de l'évaluation cognitive : la théorie des marqueurs somatiques de Damasio (1991). Cette théorie sera décrite plus en détail dans la section 5.2.5. Les auteurs de cette architecture s'inspirent de la théorie de Damasio dans l'architecture générale du système et en ce qui concerne les aspects physiologiques de l'émotion et la perception. Les aspects physiologiques et cognitifs de l'émotion sont pris en compte dans l'architecture en combinant deux théories. EMA est le modèle par lequel l'aspect cognitif de l'émotion est décrit. Les émotions sont traduites en règles. L'utilisation de la théorie de Damasio est complémentaire à EMA, puisque les aspects physiques de l'émotion n'étaient pas définis dans EMA.

SOAR Emote est une version de SOAR où les émotions sont intégrées dans la structure de l'architecture (et non sous forme règles comme dans EMA) grâce à trois modules. Ces modules sont : le synthétiseur d'évaluation cognitive (*Appraisal Summarizer*), la physiologie interne et le système émotionnel (*Emotion System*). Le synthétiseur d'évaluation cognitive transforme les évaluations cognitives en contributions cognitives qui agiront sur le corps. Dans EMA, ce mécanisme architectural (implémenté sous la forme de règles) produisait directement une émotion (et non une contribution cognitive à l'émotion). La contribution cognitive est l'influence de la cognition sur la prochaine émotion, son intensité est un produit de la désirabilité et de la probabilité moyenne de l'événement en rapport à l'objectif. En parallèle, le mécanisme de physiologie interne procède à l'évaluation cognitive de l'état actuel du corps. Le système émotionnel combine ensuite les informations de ces deux premiers mécanismes afin d'instancier l'émotion actuelle du système. Enfin, le

modèle EMA est simplifié. EMA simule différents degrés de plusieurs émotions à la fois, la version présente, SOAR-Emote, n'exprimait qu'une seule émotion.

3.2.2 HCogAff

L'architecture HCogAff (Sloman, 2001) est spécialement conçue pour illustrer les interactions entre affect et cognition. Comme nous l'avons détaillé dans la section 1.4.2, l'architecture est constituée de trois niveaux cognitifs : réactif, délibératif et métacognitif. Le niveau réactif utilise des associations conditions/actions pour répondre directement à l'environnement. Le niveau délibératif opère sur les objectifs et raisonne sur les scénarios futurs par la manipulation d'objectifs et états mentaux. Le niveau métacognitif opère sur les propres pensées et expériences du système. Les émotions sont le système d'alarme de l'architecture. Un mécanisme, rapide et central, reçoit des informations de tout le système et le réorganise rapidement globalement. D'autres mécanismes plus longs intervenant au niveau le plus élevé de l'architecture produisent les émotions à long terme ou plus complexes (Sloman, 2004).

Trois types d'émotions associées à chaque niveau de l'architecture peuvent coexister : les émotions primaires, secondaires et tertiaires (Sloman et Chrisley, 2003). Au niveau le plus bas, réactif, les émotions sont nourries par les capteurs et déclenchent l'envoi de signaux rapides aux effecteurs. Cette notion peut être rapprochée de la notion d'émotion primaire chez Damasio (2005). Les émotions secondaires sont basées sur les mécanismes délibératifs et peuvent agir rapidement et globalement. Les émotions tertiaires sont celles qui requièrent une action du troisième niveau et peuvent interrompre un processus de pensée enclenché.

3.2.3 SPA : Approche constructiviste

Le modèle émotionnel proposé par Thagard est adapté à l'architecture SPA que nous avons présenté dans la section 1.2.2. C'est un modèle inspiré des théories

constructivistes de Barrett (2006), Barsalou (1999) et Russell (2009) que nous avons présenté dans la section 3.1.3.

Thagard utilise le cadre théorique fourni par l'hypothèse des pointeurs sémantiques d'Eliasmith (section 1.2.2) pour ancrer son modèle. Les pointeurs sémantiques selon lui peuvent rendre compte d'un grand nombre d'aspects biologiques, sociaux et cognitifs des émotions. Par leur intermédiaire, des représentations à contenu « symbolique » seront créées qui transcrivent la relation de ces représentations à l'environnement et aux autres représentations grâce à des opérations syntaxiques complexes. Les pointeurs sémantiques assureront le contrôle du flux d'informations pour atteindre les objectifs assignés au système. La possibilité de créer des représentations complexes permet de les lier aux informations perceptuelles et motrices, mais aussi à l'information émotionnelle.

Dans cette perspective, le pointeur sémantique est le résultat d'une opération de liage de différentes représentations clés, celles de la situation qui crée la réponse émotionnelle, de la synthèse des perceptions physiologiques, et des résultats de l'évaluation cognitive. Les trois représentations sont des représentations compressées qui pointent vers d'autres représentations, et retranscrivent toute la complexité de l'émotion. La représentation de la situation qui crée l'émotion contient les relations entre agents et actions ayant donné lieu à l'émotion. Sur cet aspect, Thagard est donc plus proche de la vision des émotions de Russell que celle de Barrett puisque l'émotion est ici forcément en lien avec un objet. La représentation physiologique est une compression de plusieurs types de changement dans des états corporels comme la respiration. La représentation de l'évaluation cognitive est une compression du processus complexe de satisfaction qui détermine l'importance de la situation par rapport à l'objectif. L'apparition d'émotions dépend de la cascade de pointeurs sémantiques auxquels on accède grâce à un premier pointeur sémantique contenant des informations perceptuelles jusqu'aux pointeurs sémantiques finaux qui par leurs

relations auront permis de définir une situation, des relations syntactiques complexes entre les différentes représentations et ainsi, des émotions sémantiquement complexes (par ex. : « If you're happy and you know it, clap your hands. »).

3.2.4 Implémentation implicite des émotions

Des aspects neurobiologiques et indirectement émotionnels influencent la conception de certains des mécanismes qui constituent différentes architectures cognitives sans pour autant que celles-ci implémentent explicitement un modèle émotionnel. La reproduction de l'effet de la dopamine sur le renforcement des buts ayant mené l'architecture à un succès en est un exemple dans LEABRA et ACT-R. Dans LEABRA, notamment, les ganglions de la base sont modulés par un modèle de la dopamine, qui signale la récompense ou la punition. Les signaux positifs (de récompense) renforcent les actions procédurales associées alors que les signaux négatifs (punition) réduisent la possibilité future de produire la même action. Dans le système procédural de ACT-R, les succès passés seront enregistrés par le biais d'un apprentissage par renforcement.

Un modèle neurobiologique plus explicite a déjà été implémenté dans une extension d'ACT-R : ACT-R Phi. Celui-ci ne traite pas directement des émotions, mais des affects. Le rôle de l'affect est ici celui théorisé par Panksepp et Biven (2012) dans lequel certains circuits neuronaux primaires correspondent à l'implémentation de différents affects. Le plus basique de ceux-ci, et dont le comportement est reproduit dans cette architecture, est le système SEEKING (motivation liée à l'appétit). ACT-R Phi se limite à cet affect.

ACT-R Phi est une extension de ACT-R où cette architecture est interfacée avec Hum-Mod. Hum-Mod est un module pour la simulation de données physiologiques et qui fonctionne en parallèle de ACT-R. Les résultats des simulations peuvent être stockés dans le module physio, et comme nous le verrons les variables utilisées pour la simulation par HumMod peuvent être mises à jour en tout temps. Le module

physio fait le lien entre Hum-Mod et ACT-R (c.-à-d. entre physiologie et cognition) par le biais d'un buffer *physio-substrate* qui a été ajouté à l'architecture. Cette communication est bidirectionnelle.—Dans un sens, ce buffer peut être utilisé pour récupérer la valeur d'une variable faisant partie de la simulation HumMod. Cette variable pourra être utilisée par les autres buffers pour faire varier les utilités. Dans l'autre sens, cette variable, qui sera par la suite utilisée dans la simulation HumMod, pourra être instanciée en utilisant la valeur présente dans le buffer du module et qui aura été modifiée par les autres modules (ceux de ACT-R). La modification sur la simulation réalisée dans HumMod peut donc être faite en tout temps par le changement de cette variable.

Dans CLARION, la motivation est la combinaison de drives implicites et d'objectifs explicites. Les drives peuvent être divisées en deux catégories : les primaires, celles de bas niveau, et les secondaires, celles de haut niveau. Les drives primaires sont assimilables aux besoins physiologiques de base (se nourrir, dormir, éviter le danger, éviter les stimuli déplaisants, etc.). Les drives secondaires ont une visée sociale (pouvoir, reconnaissance, appartenance, autonomie, déférence, curiosité, etc.). Différentes propriétés sont associées à ces drives : leurs activations sont proportionnelles au déficit perçu, une priorité est donnée à la poursuite d'une action entamée, mais une « drive » peut éventuellement interrompre l'action en cours. Les préférences issues des différentes « drives » pour une certaine action sont combinables pour mener à sa sélection sur la base d'une préférence générale. Le sous-système motivationnel est lié au sous-système métacognitif, et peut assigner un objectif à partir de celui-ci. Il est aussi lié au système centré action, et peut ainsi interrompre la séquence d'action en cours pour remplacer celle-ci par une nouvelle séquence d'action.

3.3 Discussion et conclusion

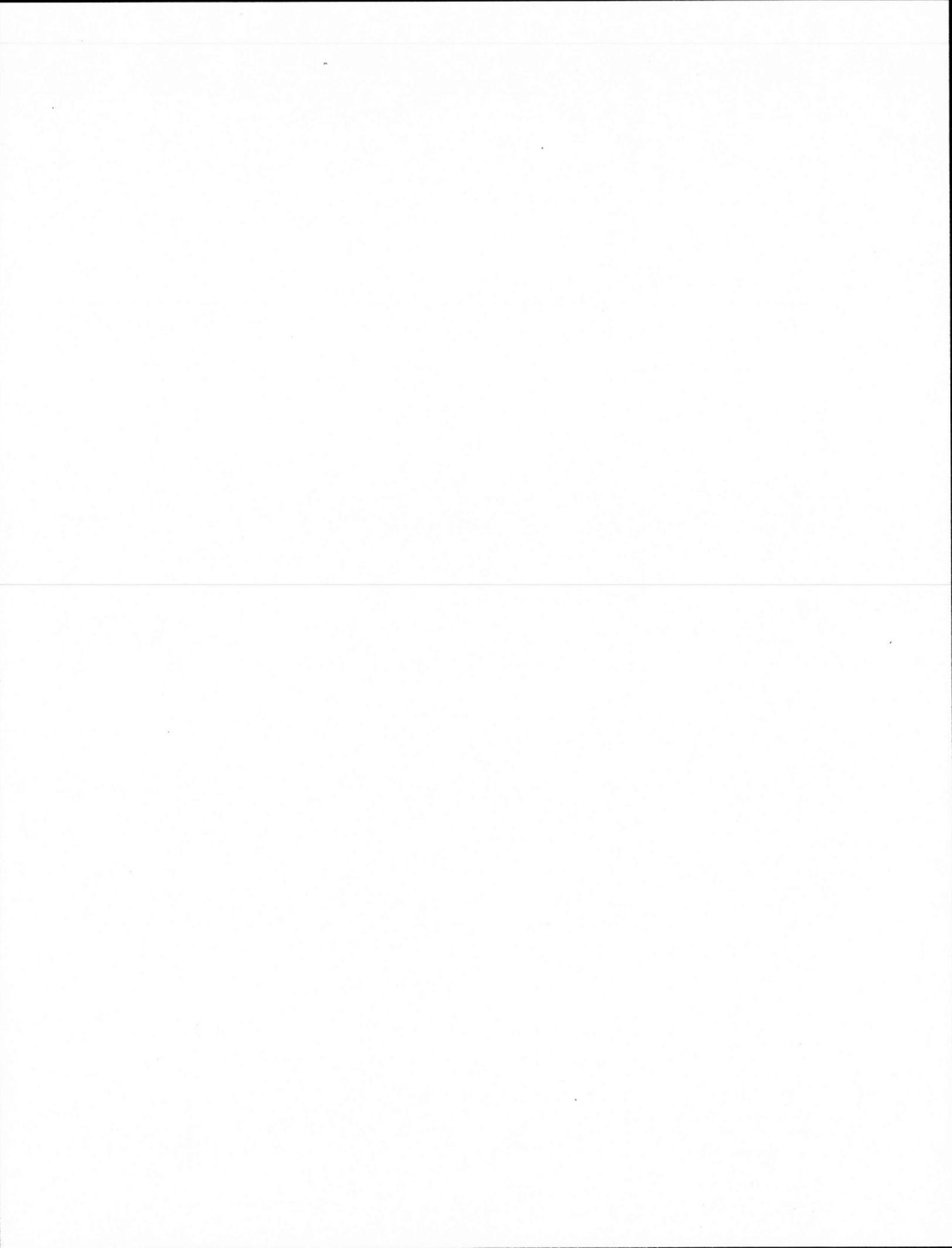
Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux différents courants théoriques émotionnels. Les théories des émotions de base (Ekman, 1992 ; Tomkins, 1984) postulent l'existence d'un nombre limité (5) d'émotions basiques universelles qui résultent d'un processus d'adaptation évolutif. Des systèmes neuronaux séparés, aux histoires évolutives distinctes, et des patrons neuronaux spécifiques seraient dédiés à l'activation d'une émotion. À l'inverse, dans la théorie de l'évaluation cognitive, les émotions sont considérées comme des processus plutôt que des états. L'émotion est définie en rapport à son sens situationnel. Une émotion référerait ainsi à un épisode émotionnel qui implique des changements sur différents systèmes et sous-systèmes organiques. Ce ne sont pas ici les émotions qui sont associées à une région cérébrale précise, mais les opérations cognitives qui réalisent l'évaluation cognitive. Dans les théories dimensionnelles, les termes émotionnels sont vus comme des étiquettes « sans réalité » qui sont attribuées rétrospectivement sur des états perçus. Les émotions existent dans un espace multidimensionnel continu, les dimensions sont l'intensité des émotions, le caractère plaisant de l'émotion, etc. Les théories situationnistes des émotions et plus particulièrement une, le modèle « Conceptual Act » (Lindquist, 2013), l'« ancrage émotionnel », l'extraction de la signification émotionnelle à partir de l'information sensorielle sur la base de mécanismes sémantiques, physiologiques et cognitifs, est au centre de cette théorie. Certaines des notions dans cette théorie sont partagées avec les théories dimensionnelles, le *core affect* notamment. Dans cette conception, les émotions émergent de l'interaction de quatre primitives psychologiques. Le *core affect* désigne les informations sensorielles ainsi que du corps (informations viscérales et motrices). La conceptualisation située est le mécanisme par lequel les expériences antérieures sont utilisées pour donner un sens, en contexte, aux sensations. Elle lie l'émotion à un événement ou un objet. L'ancrage linguistique est l'ancrage de l'événement dans une catégorie émotionnelle. Enfin, l'attention exécutive pourra diriger les processus psychologiques pour décider

quelles représentations seront mises en avant et lesquelles seront supprimées, et ainsi ce qui sera conscient. Différents modèles neurobiologiques visent à expliquer les processus neurobiologiques qui sous-tendent l'expression des émotions. Notamment, des niveaux de neuromodulations sont associés à certaines émotions dans plusieurs de ces modèles. Les théories de l'évaluation cognitive, et plus particulièrement un modèle qui en est issu, le modèle OCC, sont le plus souvent appliquées dans le domaine des architectures cognitives, comme nous l'avons vu dans SOAR-Emote, Ema et Emile, d'autres architectures les ont appliquées plus implicitement, l'effet des émotions en reproduisant certaines de leurs propriétés physiologiques (ACT-R, LEABRA).

Nous avons, dans notre approche, voulu combiner à la fois l'aspect physiologique et « conceptuel » des émotions. Pour cela, nous avons choisi l'approche de Lindquist qui décrit un ancrage linguistique de l'émotion. Toutefois, à l'inverse, de Lindquist et en accord avec les théories dimensionnelles, nous ne souhaitons pas nécessairement lier l'émotion à un objet. Nous souhaitons aussi rendre compte du rôle sous-cognitif (neurobiologique) des émotions, un aspect qui est abordé dans la théorie de Lindquist, mais que nous souhaitons approfondir par l'ajout d'un modèle de neuromodulation modulant les différentes fonctions du système. Pour cela, nous avons décidé de choisir une théorie rend compte de ces deux aspects, le Conceptual Act de Lindquist. Dans ce modèle, les émotions sont des « conceptualisations situées » qui émergent lorsque les expériences antérieures servent à donner un sens à des entrées sensorielles. Nous avons fait le choix de combiner à cette théorie un modèle de neuromodulation pour mieux décrire le *core affect* et la modulation du comportement.

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, l'interdépendance entre les différents neuromodulateurs, leur lien avec les émotions, mais aussi aux différents processus cognitifs a servi d'inspiration pour la dynamique interne de notre système

(et plus particulièrement l'interaction entre les processus cognitifs modulés) et, par extension, pour la manière dont nous rendons compte des émotions.



CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIE

Après la présentation de quatre différentes architectures cognitives, ACT-R (Anderson, 1996), SOAR (Laird, 2012), SPAUN (Eliasmith, 2013) et LEABRA (O'Reilly, 1996), nous avons procédé à un inventaire et une synthèse de différents critères d'évaluation proposés dans la littérature. Cette synthèse met en évidence des critères dont la répétition dans les travaux de différents auteurs nous permet d'affirmer l'importance : l'adaptabilité, la réactivité et la séquentialité. L'adaptabilité est un critère primordial, pour concevoir un système à la fois séquentiel et réactif nous devons respecter ce critère. Ces deux propriétés sont au cœur de notre recherche. Cette capacité a été étudiée chez l'humain et peut notamment être expliquée par une architecture duale de l'esprit, la présence de deux types de processus. Alors que différentes théories dans ce courant ont permis de rendre compte de l'implication de ces deux types de processus dans des tâches d'ordre logique ou social, peu ont jusqu'à présent fourni une explication claire des différentes fonctions impliquées dans ces deux types de processus, c'est-à-dire du moyen par lequel ceux-ci interagissent. Leur portée est souvent limitée au domaine de la psychologie du raisonnement ou de la psychologie sociale. Peu, notamment, ont cherché à expliquer l'implication des deux systèmes dans des tâches d'évaluation des fonctions exécutives (attention, flexibilité). Or, une approche générale est essentielle pour la conception d'une architecture cognitive. Pour cette raison, nous avons retenu comme théorie socle de notre architecture, le Framework tripartite de Stanovich, une théorie

qui rend particulièrement bien compte des interactions des différentes fonctions cognitives, ainsi que de la variation de ces interactions que l'on peut observer dans différentes tâches d'évaluation des fonctions cognitives. Chez Stanovich, les processus de type 1, nommé « esprit autonome », incluent les comportements instinctifs, implicites, sur-appris et les processus de régulation émotionnelle. Les processus de type 2 sont partagés en deux classes de processus, nommés « esprit algorithmique » et « esprit réflexif ». L'« esprit réflexif » est le lieu du raisonnement de haut niveau, à long terme du système alors que l'« esprit algorithmique » est le lieu du contrôle cognitif.

Le Framework tripartite de Stanovich nous offre une idée de la manière dont différents profils cognitifs peuvent émerger de l'interaction des différentes fonctions cognitives, organisées en trois sous-systèmes. Toutefois, pour être adaptatif, notre système doit être capable de modifier la dynamique de ces interactions pour exhiber différents comportements en rapport avec son environnement. Chez l'humain, on attribue souvent ce rôle aux émotions et c'est pourquoi nous avons procédé dans le chapitre III à une revue des courants théoriques majeurs sur les émotions. Deux théories que nous avons présentées nous semblent adéquates pour rendre compte à la fois du caractère conceptuel et du caractère neurobiologique des émotions. L'approche situationniste de Lindquist rend compte, à travers quatre opérations (primitives psychologiques), du lien attachant le stimulus à l'émotion puis au comportement cognitif. De plus, une approche neurobiologique peut aisément y être combinée et fournit le substrat biologique nécessaire à certaines opérations décrites par Lindquist (*core affect*).

La séparation en différents modules fonctionnels et l'interaction modulable entre ceux-ci, dont émerge le comportement global du système, nous a amené à retenir pour notre architecture cognitive une approche multi-agents, dans laquelle nous pourrions

modéliser avec simplicité la séparation de ces sous-systèmes, leur coopération ainsi que leur modulation.

La proposition d'une solution passe par sa conception, son implémentation et son évaluation. La conception et l'implémentation reposent sur un cadre conceptuel que nous avons constitué, fondé essentiellement sur les concepts d'agent, de systèmes multi-agents et d'approche organisationnelle. Dans le chapitre qui suit nous justifierons le choix de la théorie ainsi que la méthode d'implémentation qui a été retenue. Nous expliquerons ensuite plus particulièrement l'approche multi-agents retenue. Ensuite, nous décrirons les différents modules fonctionnels qui composent cette architecture et, le modèle de contrôle du comportement (module émotionnel) qui régule les interactions dans l'architecture et dirige ainsi l'émergence du comportement de l'architecture.

4.1 Justification des choix

Dans cette section, nous justifions nos différents choix.

4.1.1 Le choix des théories des processus duaux

La démonstration de la plausibilité cognitive des théories des processus duaux est faite dans la littérature par l'intermédiaire de deux types de résultats: les observations comportementales et neurologiques. Dans la section qui suit, nous présentons certains de ces résultats. Une revue plus exhaustive de ces différents travaux pourra être trouvée dans (Evans et Stanovich, 2013).

L'existence de deux types de processus a été mise en évidence grâce à plusieurs tâches de raisonnement. Nous présenterons l'une d'entre elles, la tâche de Wason, plus en détail dans la section 5.2.3. Chez Evans *et al.* (2010) il est demandé aux sujets d'inférer des conclusions sur la base de propositions causales conditionnelles avec des degrés variés de crédibilités de la conclusion. Les sujets sont ici influencés dans leur application du *modus ponens* et du *modus tollens* par le degré de crédibilité. Il est

possible d'atténuer ce biais de croyance en ajoutant et soulignant des instructions poussant au raisonnement déductif dans l'énoncé. Deux types de raisonnement sont alors observés, un raisonnement heuristique, s'appuyant sur les croyances, et un raisonnement logique. Les sujets qui ont des capacités de raisonnement logique plus élevées (i.e. du fait d'un entraînement à ce type de raisonnement) sont sensibles au même biais, mais sont capables d'avoir le deuxième type de raisonnement et de détecter leur erreur s'il leur est demandé explicitement de raisonner logiquement et de réfléchir aux conclusions qu'ils ont tirées de l'énoncé (Evans *et al.*, 2010). Le système attentionnel semble aussi impliquer dans l'application et le déclenchement de ce raisonnement logique. Lors de la tâche de Wason (voir section 5.2.3) notamment, une tâche de raisonnement logique où le sujet pour répondre correctement doit appliquer *modus ponens* et *modus tollens*, le sujet qui est obligé de réaliser une tâche attentionnelle concurrente (De Neys, 2006) ne parviendra pas ou ne pensera pas à appliquer le *modus tollens* (une opération plus coûteuse en attention). Ces expériences démontrent l'existence de deux types de processus concurrents, l'un heuristique (qui ne nécessite pas notre pleine attention), l'autre analytique, dont l'exécution est fortement corrélée aux capacités attentionnelles.

Dans la section 2.1, nous avons discuté brièvement des propriétés temporelles associées à ces deux types de processus. Les processus de type 1 seraient plus rapide, les processus de type 2 plus lents. Ces résultats sont illustrés dans différentes expériences. Notamment dans les expériences de Greene *et al.* (2004), où la différence de temps entre raisonnement moral conséquentialiste et raisonnement déontologique est mesurée, ce premier type de raisonnement s'avère plus coûteux en temps. De Neys (2006) a aussi mesuré les temps de réponse au travers du problème Linda (Tversky et Kahneman, 1983), un test où le sujet est confronté à plusieurs propositions dont il doit juger de la probabilité. Les réponses fournies par les sujets sont alors plus basées sur les informations personnalisantes contenues que sur la probabilité des propositions, qui les mènent à d'autres choix. Dans cette variation de

l'expérience, les sujets répondaient plus rapidement lorsqu'ils étaient sensibles à ce biais de représentativité que lorsqu'ils répondaient à la suite d'un raisonnement logique et probabiliste. Dans une variation du problème de Linda, Villejoubert (2009) a imposé des contraintes de temps aux sujets. Ceux-ci s'avéraient plus sensibles au biais de représentativité lorsque la contrainte de temps était forte. De même, dans la tâche de sélection de Wason, que nous verrons plus en détail dans la section 5.2.3, une réponse erronée, apparée sur l'énoncé de la tâche, est la réponse la plus fréquente lorsque la tâche est effectuée sous pression de temps (Roberts et Newton, 2001).

Comme nous l'avons présenté plus succinctement dans la section 2.1, des résultats neurologiques viennent aussi appuyer les théories des processus duaux. Des régions cérébrales distinctes semblent impliquées dans la production de réponses basées sur un raisonnement et la production de réponses basées sur les croyances comme cela est illustré dans différentes expériences dont nous présenterons ici quelques -unes.

Dans les travaux de De Neys, Vartanian et Goel (2008), au cours d'un problème classique « des ingénieurs et des avocats ⁶», l'activité de deux régions, le cortex cingulaire antérieur (ACC) et le cortex rostrolatéral préfrontal (RLPFC), que l'on estime impliquer respectivement dans la détection de conflit et l'inhibition de réponses intuitives augmentait lorsque les participants détectent et inhibent leur pensée stéréotypée.

Goel et Dolan (2003) ont eux aussi étudié l'influence des croyances sur le raisonnement déductif lors de tâches mettant en jeu différents degrés de croyance (taux de croyances neutres, facilitatrices, ou en opposition avec la logique de la tâche

⁶ Les sujets ont tendance à ignorer l'importance des informations statistiques disponibles (sur les « taux de base ») lors d'un problème de jugement probabiliste et à se focaliser sur les données propres à un certains cas.

et à inhiber). Ces tests ont mis en évidence l'implication du cortex ventral médial préfrontal lorsque les sujets sont sujets à un biais de croyances. Cette région cérébrale semble impliquée dans le traitement émotionnel, un aspect qui est aussi représenté par les processus de type 1 dans différentes théories des processus duaux (et plus particulièrement dans le TASS du Framework tripartite de Stanovich). Tsujii et Watanabe (2010) mettent eux aussi en évidence l'implication du lobe temporal gauche lors de raisonnements basés sur les croyances. Leurs travaux permettent plus de mettre en évidence une fonction primordiale des processus de type 2 : l'inhibition. Lorsque le sujet répond logiquement, c'est-à-dire, lorsqu'il a été capable d'inhiber les croyances qui induisent l'erreur du participant, le cortex frontal droit serait le plus actif. Le cortex frontal inférieur droit plus particulièrement aurait un rôle fonctionnel dans l'inhibition d'heuristiques. Les sujets sont soumis à des tâches doubles, une tâche primaire de raisonnement syllogistique congruente ou incongruente effectuée en parallèle avec une tâche secondaire d'attention lourde ou légère. Lorsque la tâche secondaire créait une surcharge attentionnelle, l'activité du cortex frontal inférieur (IFC) droit (sans particulièrement impacté le gauche) était décriue. L'activité accrue de l'IFC droit était corrélée à une meilleure performance lors de raisonnements incongruents (croyance en désaccord avec la réponse logique). Les sujets pour lesquels la réalisation d'une tâche secondaire lourde menait à une diminution de l'activité de l'IFC n'arrivaient pas à maintenir de bonnes performances dans les tâches de raisonnement in congruent. Cette diminution de performance coïncidait comportementalement avec un échec dans la résolution logique de la tâche et à des réponses non aléatoires, basées sur les croyances du sujet, supportant ainsi l'existence de deux types de processus distincts. L'ensemble de ces expériences semble indiquer que le système analytique est un système dont la performance est en lien avec nos capacités attentionnelles et que lorsque celles-ci sont autrement accaparées par des tâches secondaires, les sujets se reposent sur le système heuristique automatique, ce qui entraîne un biais de croyance sur ces tâches de raisonnement syllogistique.

L'ensemble de ces expériences et l'activité cérébrale enregistrée au cours de celle-ci confirment pour nous l'existence de deux types de processus (l'un heuristique et l'autre analytique) dont le traitement est réalisé par trois types d'opérations cognitives telles que décrites dans le Framework tripartite de Stanovich (logique - réflexif, attention - algorithmique et intuition - autonome) et de régions cérébrales associées à ces trois opérations.

4.1.2 Le choix d'une théorie des processus duaux spécifiques : le Framework tripartite de Stanovich

Certaines critiques ont été faites sur les théories des processus duaux (Gigerenzer et Gaissmaier, 2011 ; Keren et Schul, 2009). La critique la plus répandue concerne la définition de ces théories, on leur reproche d'être trop simplifiée et de ne pas rendre compte du problème d'interface. Keren et Schul (2009) plus particulièrement critiquent la tendance des auteurs de théories de processus duaux à spécifier deux systèmes qui agissent en parallèle et de manière isolée (« parrallel competitive ») sans rendre réellement compte de ce qui résoudrait cette compétition. Les théories de Evans et Stanovich (2013) et Kahneman (2011), en opposition à cette critique sont des théories dites de « default-interventionism ». Dans ce type de théories, les deux systèmes ne sont pas isolés, au contraire, les processus de type 2 peuvent interrompre les processus de type 1. Mais, la théorie de Stanovich est la seule qui propose de diviser des processus de type 2 en deux sous-systèmes (algorithmique et réflexif) explicitant ainsi l'interaction de ces sous-systèmes et des actions qu'ils initient ou remplacent dans le système autonome.

Alors que les théories des processus duaux antérieures à celles de Stanovich expliquaient particulièrement bien les erreurs dues à un défaut d'implication suffisant des processus de type 2, Stanovich explique les multiples erreurs qui peuvent être observées même lorsque les processus de type 2 sont impliqués dans la prise de décision.

Le défaut principal des autres théories des processus duaux est de ne pas mettre en évidence une distinction forte entre deux types de raisonnement au sein des processus de type 2: ceux liés à l'intelligence et ceux liés à la pensée critique. La plupart des théories de processus duaux rendent compte du biais suivant: utiliser par défaut les processus de type 1. Mais, Stanovich soutient que les erreurs de type 2 traditionnellement observées sont de deux types : les erreurs dues à des problèmes de traitement de l'information au niveau algorithmique et les failles dues à un manque de règles de traitement conscient de l'information (ou à de mauvaises règles de traitement conscient de l'information). Cette distinction est d'ailleurs illustrée par un certain nombre de tâches développées par son groupe de recherche (Stanovich, 2009). Il fait ainsi l'hypothèse que ces deux types distincts d'erreurs s'expliqueront mieux si on distingue au sein des processus de type 2 les processus algorithmiques des processus réflexifs.

Par la description de ces deux sous-systèmes supplémentaires, cette théorie explique différents biais. Le sujet n'a pas systématiquement recours à une opération de découplage cognitif. Si l'action nécessite une intervention des processus de type 2 (par exemple une situation nouvelle pour laquelle nous ne possédons pas une stratégie surapprise), le recours par défaut au processus de type 1 par l'utilisation de mauvaises connaissances ou de mauvaises stratégies surappprises peut entraîner une erreur.

Comme nous l'avons vu, le découplage cognitif est une opération primordiale. Cette opération a été évoquée dans d'autres théories et liée à la pensée hypothétique (Evans, 2006a) sans pour autant que sa fonction soit décrite en détail, et ce, bien que cette opération (le découplage cognitif) soit reconnue comme primordiale dans la dynamique des processus duaux (Evans et Stanovich, 2013). Cette fonctionnalité a été décrite plus en détail par des chercheurs d'approches théoriques différentes (Cosmides et Tooby, 2000 ; Nichols et Stich, 2003) mais pas en tant que composante d'une théorie des processus duaux. Le Framework tripartite de Stanovich fournit une

bonne description de la manipulation « hors ligne » des représentations secondaires. Le découplage cognitif a peu été reproduit dans les autres architectures cognitives, et lorsqu'il l'a été, la volonté des concepteurs était uniquement de reproduire les succès liés à son utilisation (et non son implication dans différents biais de résolution de problème).

En effet, plusieurs erreurs peuvent encore se produire si un découplage cognitif a lieu. Deux erreurs découlent du fait que le découplage cognitif implique les deux niveaux: le niveau réflexif, car il initie cette opération, le niveau algorithmique, car il implémente cette opération. Le niveau réflexif par erreur peut ne pas initier de découplage cognitif; nous illustrerons plus particulièrement cette situation grâce à la tâche de Wisconsin. Si le découplage a été initié, le niveau algorithmique, peut ne pas fournir suffisamment de moyens pour réaliser ce découplage cognitif, c'est-à-dire mal manipuler les représentations secondaires (indépendantes et isolées). D'autres erreurs peuvent se produire au cours du découplage cognitif. Le sujet du fait d'un biais focal⁷, peut construire un modèle incomplet. Enfin, en l'absence de certaines dispositions de pensées le découplage cognitif peut se dérouler incomplètement.

Enfin, en admettant que nous ayons choisi la bonne solution du fait d'un bon découplage cognitif, il est encore possible d'avoir une dernière erreur, un échec d'inhibition des processus de type 1 par les processus de type 2 qui nous empêchera d'imposer une autre action. Ces différentes situations sont bien illustrées dans la tâche de Wason.

⁷ Le biais focal désigne le fait qu'un système est très fortement disposé à gérer seulement les modèles les plus facilement constructibles, qui donc ne représenteront qu'un état des choses et accepteront directement les informations qui lui sont présentées sans les remettre en cause.

C'est la reproduction de ces multiples interactions et les échecs qu'elles peuvent entraîner qui font que cette théorie reproduit les différences individuelles et donc de reproduire différents profils cognitifs. L'étendue de ces phénomènes cognitifs n'est justement pas capturée par les autres théories des processus duaux, d'une part, parce que le mécanisme responsable de ce phénomène n'est pas capturé dans ce degré de détail, d'autre part parce qu'ils ne l'ont pas fait en explicitant ces trois niveaux.

4.1.3 Le choix d'une approche multi-agents

Dans la section précédente, nous avons montré que l'on pouvait rendre compte d'un certain nombre d'erreurs cognitives grâce à l'interaction des différents modules décrits dans la théorie de Stanovich (par l'interruption ou l'encouragement). La méthode informatique la plus à même de rendre compte de ces interactions, tout en offrant la possibilité d'implémenter des modules complexes, est l'approche multi-agents. Plusieurs arguments nous ont permis d'en venir à ce choix.

Nous avons exploré l'utilité des SMA pour la simulation de phénomènes cognitifs avant de concevoir notre propre architecture. Nous avons alors adapté le système CAAS – Complex Auto Adaptive System (Camus, 2007) pour en faire un outil de simulation cognitive: chargement de base de données contextuelle, ajout de capteurs et effecteurs spécifiques pour la lecture et la reconnaissance de caractères. CAAS ne comportant qu'un embryon de mémoire de travail, nous nous sommes limités à la simulation de Stroop classique (Larue, Camus et Poirier, 2010 ; Larue, Poirier et Camus, in press) et la simulation incomplète d'une tâche de Wason. La tâche de Stroop classique nous a permis de valider le fait que nous pouvions simuler certaines différences individuelles au niveau de la mémoire de travail de manière intéressante par la variation de la fréquence d'envoi de messages entre agents. En ce qui concerne la tâche de Wason (Larue, 2011), le système exécutait la version déontique avec succès, mais échouait dans les versions abstraites. L'impossibilité de reproduire cet

aspect de la tâche nous a fait prendre conscience de la nécessité de la prise en compte des processus duaux dans la conception d'une architecture cognitive.

La théorie de Stanovich explique les erreurs cognitives par l'interaction de divers processus ou modules. Avec l'approche multi-agents, nous pouvons simuler simplement les interactions entre les différents modules (ici considérés comme des agents).

Comme nous le décrirons par la suite, l'approche multi-agents nous offre aussi la possibilité de modifier dynamiquement et simplement l'organisation des agents au sein de l'architecture, et les interactions des différentes organisations, modifiant ainsi le profil de l'agent dynamiquement au cours d'une simulation. Cet aspect entre en jeu dans la simulation des phénomènes que nous visions dans cette thèse. Nous l'avons plus particulièrement exploité dans notre simulation du découplage cognitif (tâche de Wisconsin et Wason).

Bien que certaines architectures présentent des similarités avec notre architecture au niveau délibératif (CogAff, CLARION) et que quelques tentatives aient été amorcées pour tenir plus compte des théories des processus duaux (Kennedy et Patterson, 2012) dans ACT-R, aucune de ces architectures ne rend parfaitement compte des interactions présentes dans le Framework de Stanovich.

Plus précisément :

- ACT-R ne prévoit pas d'opération de découplage cognitif, et le niveau délibératif nécessiterait plusieurs ajustements
- Le niveau métacognitif de CLARION a de l'influence sur l'ensemble des modules de CLARION, là où notre niveau réflexif n'a d'influence que sur le niveau algorithmique et, ce sur la base d'un nombre limité d'information fournie par celui-ci (influencé/biaisé par la focale) – il en est de même pour les représentations secondaires du découplage cognitif (dont la modification

se fait indépendamment du niveau réactif). Sur cet aspect spécifiquement, le compartimentage de l'information auquel différents agents ont accès est plus naturel dans un environnement multi-agents.

- CogAff ne permettait pas adéquatement de modifier l'intensité des interactions entre modules (ce que nous faisons grâce aux fréquences d'envois de message entre agents), et n'était pas suffisamment « à jour ».

Par ailleurs, les architectures cognitives sont généralement réutilisées par des développeurs qui souhaitent redévelopper une fonction précise ou un module, et tester ce module ou cette théorie qui porte sur une fonction cognitive. Ce n'était pas notre volonté dans cette thèse : notre volonté est de tester une théorie générale de l'organisation de différentes fonctions cognitives. Nous n'avons donc pas cherché à modifier une structure existante. Mais, dans des travaux futurs, nous nous intéresserons à la manière d'ajouter des modules fonctionnels provenant d'autres architectures sur l'architecture que nous avons créée dans la présente thèse par le moyen que nous expliquons dans le prochain paragraphe.

De plus, l'un des bénéfices des systèmes multi-agents est leur adhésion naturelle au critère de versatilité. Puisqu'ils sont modulaires par définition il est plus simple pour un développeur d'y ajouter ou d'y soustraire des capacités, et de rendre ces capacités actives ou inactives lorsque le système fonctionne. Ceci rend l'approche SMA particulièrement appropriée à un système appelé à être modifié ou augmenté. Nous l'illustrons particulièrement bien avec le système émotionnel dans notre architecture.

En outre, bien que la portée du présent travail se limite à valider l'intérêt du socle Stanovich dans notre architecture. Nous estimons qu'une approche SMA, de part sa modularité, facilitera tout rajout de nouvelles capacités à notre architecture.

Enfin, ce travail permet de voir ce que pourrait apporter une approche SMA aux architectures cognitives, mais aussi, ce que des patterns organisationnels cognitifs pourraient apporter dans le domaine des SMA (en matière de contrôle du système).

4.2 Cadre conceptuel : Système Multi-agents et approche organisationnelle

4.2.1 Agent

Un agent est une entité logicielle encapsulée qui réagit à l'environnement dans lequel elle est située (Zambonelli, Jennings et Wooldridge, 2001). Cette entité a un comportement autonome, proactif et flexible pour atteindre ses objectifs de conception. Dans le contexte des systèmes multi-agents, les agents sont sociaux : ils coopèrent avec d'autres agents pour atteindre un objectif, ou pour aider d'autres agents à atteindre leur objectif (Jennings, 2000 ; Zambonelli, Jennings et Wooldridge, 2001) selon des relations prédéfinies. L'agent est caractérisé par son architecture (son organisation interne) et son comportement (ses actions).

On peut distinguer des agents à complexités diverses et ces degrés de complexité peuvent être définis sur un axe allant des agents purement réactifs à ceux purement cognitifs : entre les deux, d'autres styles d'agents possédant des propriétés communes à ces deux types peuvent exister (Ferber, 1995).

L'agent réactif a un comportement simple. Il ne dispose que d'un module de communication réduit. Il possède les connaissances nécessaires (non symboliques) pour réagir aux situations (actions à effectuer), mais n'a pas de représentation mentale du monde dans lequel il évolue. Il réagit directement aux modifications de son environnement (stimulus/réponse) sans pour autant avoir un but explicite, des mécanismes de planifications (pas de raisonnement a priori) ou de résolution de problème. La prise de décision se fait sur la base d'informations locales. C'est un agent simple à l'usage limité à l'atteinte d'objectif ne nécessitant qu'une vision à court terme (Wooldridge, 2009). L'intelligence d'un système composé d'agents

réactifs émerge alors de son comportement global qui résulte de la coexistence et de la coopération des agents (Ferber, 1995 ; Wooldridge, 2009). L'architecture de subsomption (Brooks, 1991) est un exemple d'architecture d'agent réactif. L'agent y est décomposé en modules et chaque module est responsable d'une action très simple. Les interactions sont fixes, et un rapport de dominance est défini : les modules supérieurs dominants inhibent la sortie des modules inférieurs. Bien que notre système ne soit pas composé exclusivement d'agents réactifs, certains des principes illustrés dans l'architecture de subsomption et portés par la réactivité des agents de cette architecture sont visibles dans notre architecture :

- Agent situé et incarnation (*Embodiment*) : L'intelligence réelle est située dans le monde et non dans un système de résolution de problème utilisant des symboles non ancrés dans le monde (Harnad, 1990). L'agent situé utilise le monde (c'est-à-dire l'environnement dans lequel il évolue) comme son propre modèle pour prendre des décisions. La cognition est distribuée dans le système.
- Intelligence et émergence : La prise de décision émerge (auto-organisation) des interactions entre composants primitifs de l'agent : corps (*embodiment*) et environnement (*situatedness*). L'intelligence est déterminée par le comportement complet du système et les interactions.

Alors que les agents réactifs sont conçus comme des entités simples, les agents cognitifs sont des entités intelligentes, ayant une structure élaborée, qui disposent de capacités de résolution de problème. Ces agents sont équipés d'un module de raisonnement : une base de connaissances contenant une représentation des informations liées à leur domaine d'application et à la communication avec les autres agents. Les agents cognitifs comportent généralement des représentations symboliques mais peuvent aussi contenir un mélange de représentations symboliques et sous symboliques. Ces agents sont capables individuellement d'avoir un comportement complexe, ils sont intentionnels. Comparativement à l'agent réactif

dont le comportement réflexe est régi par des perceptions, l'agent cognitif a un comportement dirigé vers des buts explicites et il possède des plans d'actions explicites pour accomplir ses buts (Ferber, 1995).

Nous avons ici insisté sur les différences entre agents cognitifs et agents réactifs, et la possibilité de faire varier la complexité de ceux-ci. Il est en effet possible de concevoir des agents hybrides, des agents possédant à la fois une couche cognitive et une couche réactive. InteRRaPP (Müller, 1996) est notamment un exemple de système multi-agents où les agents sont constitués de trois couches, une couche réactive, une couche de planification et une couche qui supporte l'action coordonnée avec d'autres agents. Nous en présenterons un autre exemple dans la section suivante. Plusieurs des agents de notre architecture exhibent d'ailleurs un mélange des propriétés cognitives et réactives que nous venons de présenter.

4.2.2 Système multi-agents (SMA) et adaptation

La construction d'un système complexe mobilise généralement plus d'un agent. C'est dans un tel cadre que nous introduisons le concept de SMA. Un SMA est une organisation de plusieurs agents qui interagissent. Au sein d'un SMA, il est possible de faire interagir des agents de natures (architecture) diverses. Cette propriété apparaît pour nous comme le moyen de combiner les avantages de différents paradigmes (connexionnistes, symboliques et dynamiques) tout en conservant une certaine unité dans la conception du système. Nous pourrions ainsi combiner plusieurs des aspects précédemment décrits dans une seule architecture de manière uniforme.

Les travaux en adaptation fournissent des pistes pour ce qui est de la combinaison des avantages des approches réactives et cognitives : l'utilisation de couches cognitives pour le contrôle des couches réactives. On peut distinguer deux approches à l'adaptation en SMA, la première, observable dans l'architecture DIMA (Guessoum *et al.*, 2004), est d'ajouter à chaque agent une couche cognitive pour prendre des décisions et s'adapter avec le temps aux nouvelles circonstances. Dans cette

approche, l'adaptation peut être structurelle. Le changement d'accointance de l'agent amènera alors à la modification de certains modules (p. ex., module de communication). L'adaptation peut aussi être comportementale. Le processus de décision (mise à jour des données de choix de stratégies) évolue alors en fonction de l'environnement. La deuxième approche, celle que nous employons dans une certaine mesure, est de combiner plusieurs couches d'agents à niveau d'intelligence différents, avec une couche de contrôle et une couche plus réactive. Nous nous situons ainsi dans la lignée des travaux d'Alain Cardon (Cardon, 2005) qui ont été appliqués dans différents SMA (Campagne, 2005 ; Camus, 2007 ; Guessoum *et al.*, 2004). Pour réaliser une telle adaptation, il faut avoir dans le SMA une composante organisation d'agents (niveau micro) et une composante adaptative (niveau macro). La composante organisation contient les agents du domaine dans un réseau classique d'accointances où chaque agent résout une partie du problème global. La composante adaptative contient le réseau d'interdépendances de ces agents et réifie l'ensemble des tendances du système. Enfin, des agents moniteurs observent l'organisation d'agents et fournissent ces observations à la partie adaptative. En utilisant une telle approche, nous souhaitons reproduire les aspects fonctionnels et la régulation dynamique propre au fonctionnement cognitif humain.

Pour gérer la complexité d'un système décomposable en autant de parties que décrites dans le modèle tripartite de Stanovich, nous considérons ce modèle comme un système hiérarchique (ou à organisations), un système composé de sous-systèmes interdépendants. La nature des relations organisationnelles varie entre les différents sous-systèmes.

4.2.3 Organisation

L'agent dans un système organisationnel aura au moins un rôle : une responsabilité définie dans le contexte général du système. L'agent accomplit son rôle au sein d'une organisation grâce aux interactions qu'il a avec d'autres agents ou l'environnement.

Ces interactions sont identifiées et définies dans le rôle et en rapport à la place de l'agent dans l'organisation. L'approche organisationnelle caractérise l'architecture générale du SMA.

Chaque agent est une unité de contrôle séparée totalement responsable de son rôle (Zambonelli, Jennings et Wooldridge, 2001). Le rôle définit ce qui est attendu de l'agent au sein de l'organisation. Quatre attributs définissent le rôle : responsabilités, permissions, activités et protocoles. Les responsabilités déterminent la fonctionnalité du rôle. Les permissions sont les droits associés à un rôle, ils identifient les ressources disponibles pour assurer sa fonctionnalité. Les activités du rôle sont les opérations dont celui-ci est capable, sans interagir avec d'autres agents. Les interactions avec les autres agents sont supportées par des protocoles de communication (Wooldridge, Jennings et Kinny, 2000). Dans le cas d'agent capteurs et effecteurs, le rôle déterminera aussi ce que l'agent peut détecter et sur quelles portions d'environnement il peut agir (Zambonelli, Jennings et Wooldridge, 2001). Un groupe d'agents définit une organisation lorsqu'il exhibe un comportement spécifique adapté à la réalisation d'un sous-objectif dans l'architecture générale du SMA ou lorsque ce groupe a une activité qui nécessite peu d'interactions avec d'autres agents du système, ou qu'il repose sur des compétences qui ne sont pas nécessaires aux autres parties du système.

La structure organisationnelle par le biais de règles organisationnelles définit des patrons d'organisations dans le système (un peu similaire aux patrons de conception dans la programmation logicielle), ces patrons définiront comment les rôles interagissent (Zambonelli, Jennings et Wooldridge, 2001). Les règles organisationnelles définissent les modalités d'entrée des différents agents au sein des organisations et la position qu'ils occuperont au sein de cette organisation ainsi que les comportements encouragés ou inhibés au sein de l'organisation. Les structures organisationnelles définissent la topologie des patrons d'interactions et du régime de contrôle des activités organisationnelles (Zambonelli, Jennings et Wooldridge, 2001).

Les rôles qui définissent la structure du SMA ainsi que les protocoles qui régissent l'interaction des différents rôles impliqués dans la structure, la division du système en sous-organisations qui interagissent, simplifieront la gestion d'un système conçu à partir du Framework tripartite de Stanovich, (section 2.2). C'est pour cela que nous avons choisi une approche organisationnelle (Ferber, Gutknecht et Michel, 2004 ; Wooldridge, Jennings et Kinny, 2000 ; Zambonelli, Jennings et Wooldridge, 2001).

Il existe plusieurs modèles organisationnels. On peut notamment citer le système MOISE (Hannoun *et al.*, 2000). Les agents et interactions entre agents y sont définis grâce à des rôles, groupes et missions qui accordent des propriétés déontiques aux différentes organisations; ou encore, AGR (Ferber, Gutknecht et Michel, 2004) qui se définit grâce aux notions d'agent, groupe et rôle. Une certaine souplesse y est permise quant aux propriétés fonctionnelles assignées aux agents qui jouent un rôle abstrait au sein d'un ou plusieurs groupes et communiquent au sein d'un même groupe. Nous avons retenu le modèle AGR pour la conception de notre architecture, pour l'approche organisationnelle qu'il implémente, mais aussi pour des raisons plus pragmatiques, la version de cette architecture SMA (MadKit) était disponible de manière libre en ligne, stable, fréquemment mise à jour, et bien documentée.

4.3 Architecture

Nous détaillons dans cette section la conception de notre architecture selon le modèle organisationnel que nous avons choisi : AGR (Ferber, Gutknecht et Michel, 2004). Nous insistons sur l'identification et la gestion des relations entre les différents composants de l'architecture et la manière dont ils peuvent coopérer pour la réalisation d'une fonctionnalité. L'analyse du Framework tripartite de Stanovich fait ressortir trois groupes d'agents : le groupe réactif (ou organisation réactive), le groupe algorithmique (ou organisation algorithmique), le groupe réflexif (ou organisation réflexive). Dans les sections qui suivent, nous allons décrire les rôles qui appartiennent à ces différents groupes, et les interactions qui les régissent. Les rôles

groupes et agents sont visibles sur la figure 4.1. Les lettres entre parenthèses dans les sections qui suivent réfèrent aux figures 4.1 et 4.2.

4.3.1 Echanges de messages entre agents

Dans le système, le traitement se produit grâce au passage de messages entre agents. Les messages sont échangés entre groupe d'agents à l'intérieur de chacune des organisations, et entre organisations grâce aux agents intermédiaires, qui appartiennent aux deux organisations et transmettent des informations entre organisations (message d'inhibition ou d'excitation par exemple). Les messages sont échangés à intervalles réguliers (prédéfinis), les intervalles variant de groupe en groupe. Par exemple, les agents de buts envoient l'objectif futur du système à intervalles réguliers, les agents de contrôle envoient eux aussi des messages de régulation à intervalles réguliers à des agents du niveau réactif, mais, cet intervalle est inférieur à celui utilisé par les agents de but, les agents du niveau réactif (hors capteurs et effecteurs) sont des agents réactifs qui transmettent des messages aux agents auxquels ils sont connectés sur réception de messages entrants (le nombre de messages qu'ils envoient dépend du nombre de messages qu'ils ont reçus – leur activation) (voir tableau 4.1). Ces temps étaient les temps nécessaires pour que notre système applique un objectif.

Tableau 4.1 Intervalles d'envoi de messages

Goal	GoalSet	RequestStatus	Control	Sensor
1000ms	150ms	500ms	500ms	250ms

En agissant sur ces fréquences d'envoi, on agit sur les capacités des différents modules (capacités d'inhiber des agents de contrôle, capacité de mise à jour des objectifs). On peut par exemple diminuer la capacité d'inhibition des agents de contrôle du niveau algorithmique par rapport aux agents du niveau réactif rendant le système ainsi plus impulsif et moins prompt à maintenir un objectif reproduisant ainsi certains des comportements observés dans les déficits de contrôle cognitif. Nous opérons ici un parallèle similaire à ceux des travaux initiaux (Cohen et Servan-Schreiber, 1992) en réseaux neuronaux où l'affaiblissement des canaux de propagation d'activation simulait les déficits de fonctions cognitives.

Les neuromodulations que nous décrivons dans la section 4.3.2 agissent sur la fréquence d'envoi de ces messages ou sur l'activation de l'agent s'il n'y a pas de fréquence d'envoi. Les neuromodulations sont ainsi des signaux diffus qui contrôlent l'état global de notre système. Les parallèles entre les différents agents et les régions cérébrales humaines qu'ils représentent sont présentés dans la section 4.3.2.4 Neuromodulations.

4.3.2 Organisations supportant le comportement dual (voir annexe A)

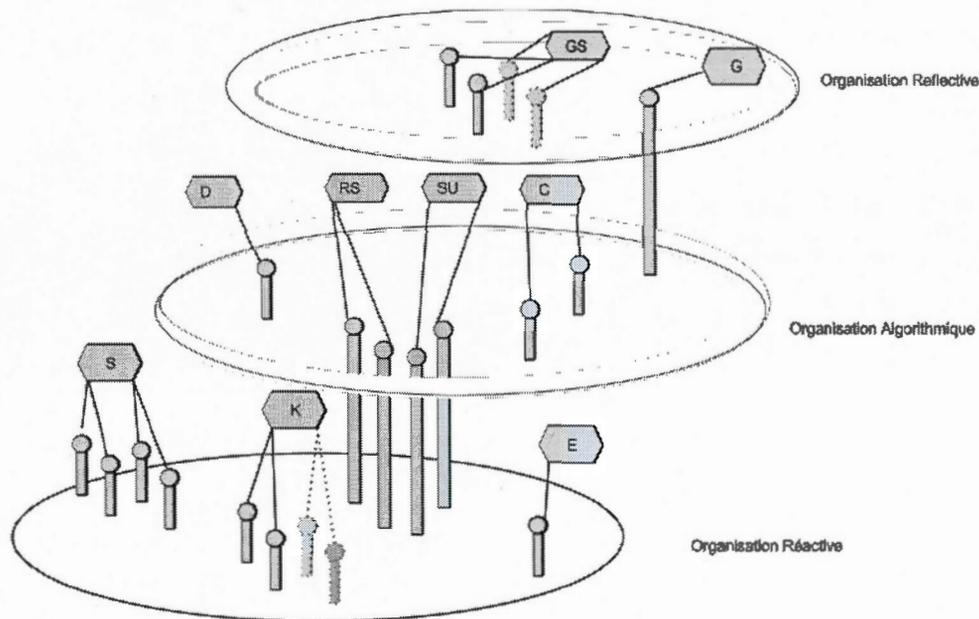


Figure 4.1 Description des organisations notation Cheeseboard. Les ovales représentent les organisations. Les hexagones et liens les rôles attribués aux agents. Les quilles représentent des agents. Un grand nombre de quilles sera signifié par ces formes en pointillés.

4.3.2.1 L'organisation réactive

L'organisation réactive dans notre architecture correspond chez Stanovich à l'esprit autonome. L'organisation est nommée « réactive », car son activité est soutenue par le groupe réactif constitué d'agents réactifs. Les principaux rôles assignés aux agents au sein de cette organisation sont « capteurs » (S^8), « effecteurs » (E) et *Knowledge* (K). Les agents *Knowledge* (agents qui ont le rôle « *Knowledge* ») sont initialisés grâce à une carte conceptuelle et reliés à d'autres agents *Knowledge* en fonction des

⁸ Les lettres entre parenthèse dans ces sections réfèrent aux figures 4.1 et 4.2

liens sémantiques de la carte (e.g, « Rouge » et « Vert » sont deux connaissances liés à « Pomme »).

Lors de la réception d'un message (message = « activ : ») d'un agent « senseur » (décrit ci-dessous) ou d'un autre agent *Knowledge*, les agents *Knowledge* envoient des messages aux agents *Knowledge* auxquels ils sont connectés. L'activation se propage ainsi au travers du réseau dans un processus similaire à celui impliqué dans la mémoire sémantique) (Anderson, 1983). Le nombre de messages envoyés est une fonction du niveau d'activation de l'agent. Nous définissons la longueur du lien entre deux agents à un instant t comme le nombre de messages qu'ils ont échangés pendant cette période (0 à t) à cet instant. Nous désignons ce nombre comme le statut de l'agent.

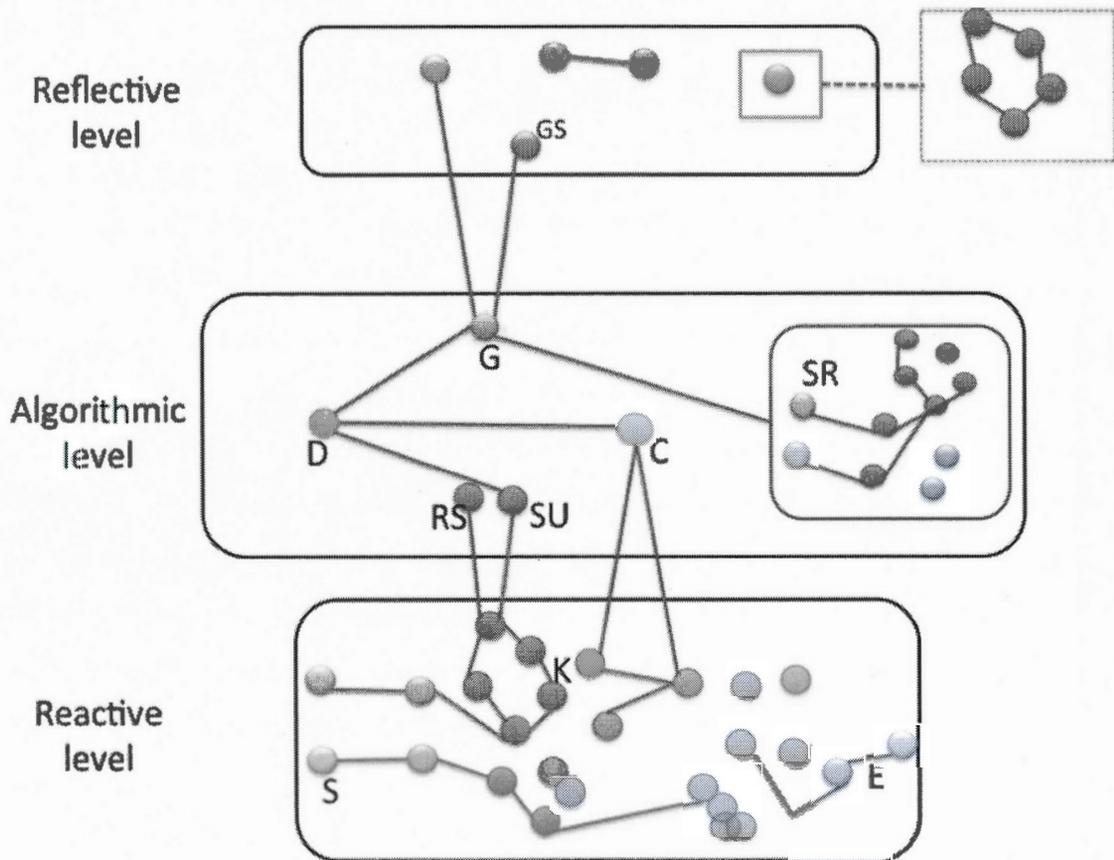


Figure 4.2 Architecture de l'agent. Toutes les lettres renvoient à un type d'agent : K = Knowledge, S = Sensor, E = Effector, C = Control, RS = RequestStatus, SU = StatusUpdate, D = Delta, G = Goal, SR = SecondaryRepresentation, GS = GoalSet. Les liens signalent l'envoi de messages entre ces agents.

L'environnement du système est une version réduite de l'environnement (objets stimulant le système). Par exemple, pour une tâche de Stroop, l'environnement du système est composé d'images de cartes similaires aux cartes présentées aux humains. Les agents capteurs sont sensibles chacun à un type particulier d'informations : couleurs, textes, etc. Leur rôle est de reconnaître ces informations et ils portent donc dans le système un nom associé à cette fonction (e.g., « OCR », « Color »). Si le type d'information auquel ils sont sensibles est présent dans l'environnement, les agents capteurs l'extraient (à courts intervalles) et envoient des messages aux agents *Knowledge* qui ont un rôle associé à ces capteurs (e.g. « read »

pour les agents *Knowledge* connectés aux agents capteurs « OCR », « recognizeColor » pour les agents connectés aux agents capteurs « color »).

L'activation dans le réseau dépend (entre autres) à chaque instant du nombre de messages envoyés par les agents capteurs et l'activation des agents *Knowledge*. Le sous-système perceptuel du système est implémenté par la structure et l'activité des agents capteurs. Cette perception est complètement située puisque les capacités perceptuelles du système sont toujours une fonction de la capacité d'extraction des agents capteurs à cet instant (leur fréquence d'extraction des informations à cet instant) et les agents *Knowledge* actifs dans le système à ce moment-là. En effet, l'activation des agents *Knowledge* sera influencée par ce qui est présent dans l'environnement par l'entremise des capteurs, mais les capteurs (plus particulièrement leur fréquence d'extraction des informations) seront eux-mêmes aussi influencés par les agents connaissances activés dans le système. Si un agent *Knowledge* porte une connaissance présente dans l'objectif court terme du système et qu'il est connecté à un senseur, alors il enverra des messages à celui-ci, et sa fréquence d'extraction sera augmentée.

Les agents « Effecteurs » travaillent similairement : les agents *Knowledge* dont le rôle est associé à la fonction des effecteurs (e.g. « DireBleu » et « DireRouge » envoient des messages à l'agent effecteur « dire »). Un agent « Effecteur » qui a reçu, dans une période de temps donné, un nombre suffisant de messages d'un agent *Knowledge* donné (couramment, 150 % de messages en plus de cet agent) agira alors sur l'environnement (e. g « dire » écrira « Rouge » dans un fichier). Ensemble, « Effecteurs », « Senseurs » et *Knowledge* implémentent la boucle d'action du système. L'activité dans le système est alors une fonction des capacités du système, des capacités des capteurs et effecteurs et des agents *Knowledge* activés dans le système en rapport à l'état actuel de son environnement. L'action dans le système est parfaitement située. En outre, puisque les systèmes perceptuels et

d'action partagent les mêmes agents *Knowledge*, perception et action sont intégrées dans un système sensorimoteur guidé par les connaissances qui peut agir de manière significative (guidé par le sens) sur l'environnement.

4.3.2.2 L'organisation algorithmique

Correspondant à l'esprit algorithmique de Stanovich, ce groupe est responsable du contrôle dans le système. Les agents de l'organisation algorithmique constituent le système attentionnel du système : ils activent les éléments dans la mémoire sémantique par rapport à l'objectif actuel du système. Tout comme la mémoire déclarative et à long terme du système est constituée d'agents *Knowledge* et de leurs liens (dans l'organisation réactive), la mémoire de travail du système à un moment donné est constituée d'agents *Knowledge* qui sont activés dans l'organisation réactive à ce moment. Cette implémentation de la mémoire de travail est compatible avec le travail de Engle (2010), dans lequel la mémoire de travail est considérée comme un ensemble de représentations activées temporairement dans la mémoire à long terme.

Tous les agents *Knowledge* du groupe réactif sont reliés les uns aux autres par des liens dont la longueur (à l'instant t) est une fonction de l'activité de l'agent (à cet instant t), l'état d'activation du système à cet instant correspond à une forme (un polygone complexe, dont les sommets sont les agents *Knowledge* et les arêtes sont les liens entre les agents). La forme décrite par les agents *Knowledge* est représentée dans le système comme une matrice de distance qui décrit le passage de messages entre les agents *Knowledge* à cet instant. Cette forme est donc en constante évolution lorsque le système est actif. Nous avons vu que la perception et l'action dans le système sont déterminées par le niveau d'activation des agents *Knowledge*. En conséquence, perception et action peuvent être contrôlées en régulant l'activité des agents *Knowledge* puisque cela changera la forme du système. En contrôlant cette forme, les agents *Knowledge* et le système sensori-moteur seront influencés pour atteindre les objectifs.

Pour agir sur ce système de connaissances sensori-moteur, nous avons introduit un certain nombre de nouveaux types d'agents qui sont (1) spécifiques à l'organisation algorithmique ou (2) mixte, c'est à dire commun à d'autres organisations (Réactif ou réflexif). Les agents *RequestStatus* (RS) appartiennent aux organisations réactive et algorithmique. À intervalles réguliers, ils interrogent les agents *Knowledge* leur demandant leurs états et envoient ces informations à des agents *StatusUpdate* (SU), qui construisent une matrice de distance représentant l'activité du système (forme) à ce moment. Les agents *StatusUpdate* calculent également une représentation réduite de l'activité afin de l'envoyer au niveau réflexif. L'organisation algorithmique contient les objectifs à court terme du système sous la forme d'un graphe d'agents *Goalset* (GS) envoyés par le niveau réflexif. Chaque agent *Goalset* dans le graphe a comme rôle, une matrice de distance qui spécifie la forme que le système doit avoir (qui dépend du nombre de messages échangés par les agents *Knowledge* et le patron que ces échanges forment) pour atteindre cet objectif. Le graphe des objectifs à court terme dans notre architecture, correspond à la cognition associative séquentielle de Stanovich. Les agents Delta (D) calculent la différence entre la matrice fournie par les agents *StatusUpdate* et celle fournie par les agents *Goalset*. La matrice de différence résultante est fournie aux agents de contrôle (C), qui à leur tour envoient des messages de régulation aux agents *Knowledge* afin d'augmenter ou diminuer leur niveau d'activation. L'état d'activation à venir du système correspond plus étroitement à la forme décrivant le système actuel et son objectif à court terme. En bref, le contrôle du système est réalisé en comparant la forme actuelle du système à celle de son objectif actuel et en envoyant des messages de régulation aux agents *Knowledge* afin que la prochaine forme du système s'approche petit à petit de celle de l'objectif actuel. En utilisant la forme comme moyen de contrôle du système, nous utilisons ici une approche de contrôle de SMA par la morphologie proche de celle décrite dans les travaux de Cardon (2005).

Tout comme dans le Framework tripartite de Stanovich, certaines décisions dans le système se font grâce à un raisonnement sur des situations hypothétiques (mondes possibles). C'est ce que Stanovich appelle le « découplage ». Lorsque deux (ou plusieurs) agents *Goalset* sont proches de la représentation réduite envoyée par l'agent *StatusUpdate*, les deux seront sélectionnés. D'un point de vue cognitif, cela signifie que le système envisage deux (ou plus) de stratégies comportementales possibles. Dans ce cas, l'agent de but (G), qui appartient à la fois aux organisations algorithmiques et à l'organisation de plus haut niveau, l'organisation réflexive, déclenche une opération de découplage. Sur la base des informations contenues dans la représentation réduite, un monde possible composé d'un petit nombre d'agents de *SecondaryRepresentation* est créé. Chaque agent de *SecondaryRepresentation* a une structure semblable à celle d'un agent *Knowledge* dans le groupe réactif. Au cours du découplage, le système fonctionne donc avec deux représentations du monde : la représentation du monde réel basée sur l'activité des agents *Knowledge* et celle basée sur la représentation réduite, un monde possible représenté par l'activité des agents de *SecondaryRepresentation*. Quand ils reçoivent la commande de simuler (message = « simulation »), les agents de contrôle de niveau algorithmique déroutent leurs messages de leurs destinataires habituels (les agents *Knowledge*) à ceux du monde possible. Les agents *Knowledge* sont donc temporairement sans objectif court terme (même s'ils sont toujours indirectement sous l'influence des objectifs antérieurs présents de manière résiduelle dans la dynamique des agents de niveau réactifs pour un certain temps, à moins que des stimuli dans l'environnement interrompent cette activité (par exemple des stimuli associés au danger). Lors d'un découplage, le traitement dans le système est ainsi modifié pour mettre l'accent sur un certain nombre d'informations indépendamment du monde extérieur (raisonnement hors ligne). Le découplage a cependant un coût : les processus cognitifs (sélection de but et inhibition) sont effectués par des agents de contrôle, les agents *Delta*, et les agents de l'organisation réflexive et ceux-ci ne seront plus disponibles pour guider la dynamique dans l'organisation réactive, puisqu'ils seront occupés à réguler les

SecondaryRepresentation du niveau algorithmique. A la suite de l'opération de découplage, de nouveaux agents *Goalset* seront activés. Cependant, puisque les représentations réduites du niveau réactif continuent à intervalles réguliers à influencer sur les agents *Goalset*, la nouvelle stratégie comportementale qui sera envoyée à la cognition séquentielle pour exécution sera sélectionnée à la fois sous l'influence du niveau réactif et du monde possible.

4.3.2.3 L'organisation réflexive

Le groupe réflexif, correspond à l'esprit réflexif chez Stanovich. Il met en œuvre les compétences logiques et analytiques du système. Chaque agent dans l'organisation réflexive contient une forme (une matrice de distance) qui représente l'état d'activation que les agents *Knowledge* du système devront reproduire pour atteindre un objectif simple. Les agents *Goalset* (GS) sont organisés dans un graphe orienté complexe qui contient de nombreux chemins. Chaque chemin est une séquence d'objectifs simples et représente donc un plan ou une stratégie qui peuvent être appliqués pour obtenir un comportement complexe (en atteignant successivement chacun des objectifs dans la trajectoire). Comme nous l'avons vu ci-dessus, une séquence d'objectifs simples (un chemin dans le graphe complexe) sera envoyée au niveau algorithmique, qui se chargera de son exécution. Les représentations réduites sont calculées et fournies par le niveau algorithmique (les agents *Status*) sur la base des états fournis par le niveau réactif. Sur la base de la représentation réduite qui est transmise aux *GoalSet* agents, le choix du chemin ou de la stratégie comportementale à utiliser sera fait.

Les représentations réduites sont envoyées à chaque agent *GoalSet* par des agents *StatusUpdate*. Si un agent *GoalSet* se reconnaît dans cette matrice de distance (e.g., si les distances entre des connaissances dans leur propre matrice et les connaissances comprises dans la dite matrice sont proches), il se signalera à l'agent *Goal*, en lui envoyant un message. La fréquence d'envoi de ces messages sera proportionnelle au

degré de similarité entre la matrice de distance du *GoalSet* agent et la matrice de distance reçue.

L'agent « *Goal* » choisira l'agent *Goalset* qui aura envoyé le plus de messages sur une période donnée. Une fois choisi, ce *GoalSet* agent propagera son activation aux agents qui le suivent dans le graphe orienté des objectifs. Le dernier agent du chemin envoie le chemin obtenu au niveau algorithmique. Ainsi, le chemin le plus court et le plus actif (celui où il y aura eu une fréquence de messages plus élevée) sera le premier à être envoyé au niveau algorithmique. De cette manière, le chemin le plus court (par exemple, le plan le plus simple) ou le chemin le plus actif (i.e, le plan le plus récent ou le plus souvent utilisé) l'emporte sur les autres chemins dans le graphe orienté. La cognition associative séquentielle du niveau algorithmique va exécuter ce chemin étape par étape. C'est cette exécution étape par étape par la cognition associative séquentielle qui fournit au système sa nature séquentielle. La nature séquentielle est nécessaire pour atteindre des objectifs complexes (qui se décomposent en objectifs simples). Le système ne perd toutefois pas son caractère dynamique. Les représentations réduites sont envoyées sur une base régulière aux agents *Goalset*, ce qui signifie que l'organisation réflexive peut à tout moment interrompre la cognition associative séquentielle en déclenchant un nouvel objectif (dans le même chemin du graphe ou dans un tout autre chemin). Un nouveau plan pourra alors être envoyé pour exécution au niveau algorithmique. La prise de décision au niveau réflexif est donc dynamique puisqu'influencée à la fois par le plan actuel (séquentiel, orienté par l'objectif) et par l'état de l'environnement (caractère situé et réactif).

4.3.2.4 Plausibilité neurologique

Nous ne pouvons pas prétendre à la plausibilité neurologique ou biologique d'une architecture comme SPAUN (Eliasmith, 2013). Toutefois nous pouvons dresser des parallèles entre l'activité dynamique mésoscopique et les propriétés structurelles de

notre architecture et du cerveau humain. La plausibilité neurologique des théories des processus duaux a largement été étudiée (Goel, 2009 ; Lieberman, 2009). Le Framework tripartite de Stanovich, en lui-même est supporté par des données neurologiques (Stanovich, 2011).

Puisque notre architecture est basée sur ce modèle, elle hérite de sa plausibilité neurologique. Les tâches cognitives dont la réalisation dépend (et mènent à l'activation) du cortex cingulaire antérieur (ACC) sont réalisées dans notre architecture par l'esprit algorithmique. Le découplage cognitif, qui est réalisé dans notre architecture par les agents *SecondaryRepresentation*, semble réalisé chez le sujet humain par le cortex dorsolatéral préfrontal (DLPFC)(Stanovich, 2011).

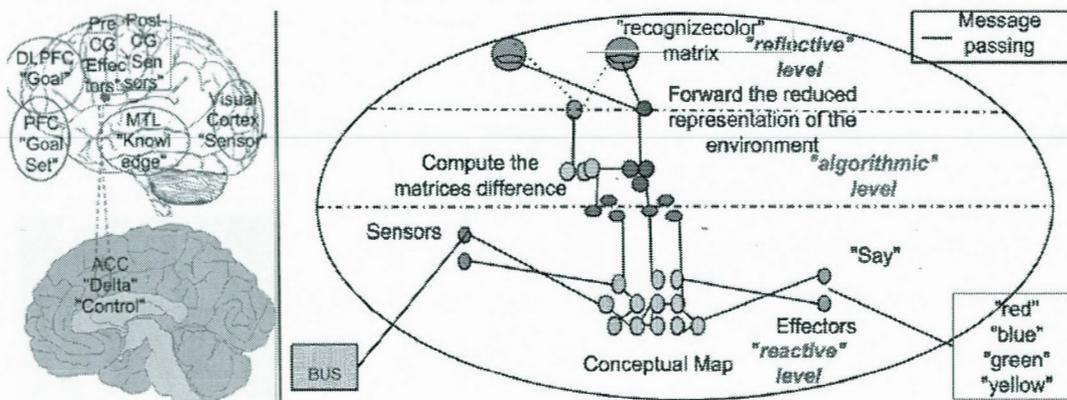


Figure 4.3 Correspondances fonctionnelles

De plus, les différents rôles attribués aux agents de l'architecture correspondent à des rôles fonctionnels qui ont été associés à des structures anatomiques spécifiques (Figure 4.3). L'ACC, notamment, a été identifié comme le système responsable de la surveillance des réponses contradictoires (*response conflict monitoring system*) (Botvinick *et al.*, 2001a) dans le cerveau humain : il déterminerait l'implication du

contrôle cognitif. Dans notre système, la gestion des conflits est réalisée par la collaboration entre les agents *Delta*, qui détectent le conflit en faisant la différence entre activation souhaitée et activation actuelle du système, et les agents de contrôle qui rectifie l'activation (en l'inhibant ou l'encourageant) dans le système en rapport à l'objectif. L'action sur les régions cérébrales postérieures se fait par l'envoi de messages de régulation envoyés par les agents de contrôle aux agents du groupe réactif. Le DLPFC, qui soutient le comportement orienté objectif est mis en œuvre dans notre système grâce aux agents *Goal* et *GoalSet*. Les agents *Knowledge* sont liés à des agents capteurs reproduisant le lobe médio-temporal (MTL dans la figure 4.3) connu pour son support à la mémoire sensorielle. Le lobe médio temporal est également identifié fonctionnellement comme le lieu de la mémoire sémantique. Les agents « Effecteur » et « Senseur » sont associés à des rôles distincts dans le groupe réactif puisque situé fonctionnellement dans des structures anatomiques distinctes (Gyrus precentral, gyrus postcentral et cortex visuel dans la figure 4.3). Au travers de cycles sensorimoteurs et cognitifs imbriqués, nous sommes capable d'implémenter une architecture à la fois sensible aux stimuli extérieurs et orientée objectif.

4.3.3 Modulateurs des différents profils au sein de l'architecture : modèle émotionnel

Comme nous l'avons expliqué précédemment, afin de rendre compte du caractère conceptuel et du caractère neurobiologique des émotions, nous avons combiné deux approches théoriques : une approche situationniste et une approche neurobiologique. L'approche situationniste de Lindquist (2012) rend compte du lien entre stimulus, émotion puis comportement cognitif grâce à quatre opérations : le core affect, la conceptualisation située, l'ancrage linguistique et l'attention exécutive. Un modèle neurobiologique dans notre architecture fournit le substrat biologique nécessaire au core affect. Dans la section qui suit, nous allons expliquer comment à l'aide d'agent *Knowledge* et d'agents neuromodulateurs nous avons transposé le modèle de Lindquist (2012).

4.3.3.1 Core Affect

Le *core affect* chez Lindquist (voir section 3.1.4) désigne les informations sensorielles ainsi que corporelles (informations viscérales et motrices). Dans notre implémentation, le *core affect* est réalisé grâce aux neuromodulateurs. Les agents neuromodulateurs façonnent la dynamique interne du système de régulation des différentes fonctions cognitives : la sensibilité des capteurs aux stimuli, l'attention exécutive, et la sélection d'objectifs.

Nous considérerons la neuromodulation comme une implémentation des aspects viscéraux du *core affect* décrits par Lindquist. Nous supposons que l'état du système reflète les informations provenant des viscères. Les aspects viscéraux de base sont aussi contenus dans les liens entre les mots de l'émotion et les agents « positif » et « négatif » (voir ci-dessous). Le *core affect* est réalisé dans notre système par la liaison bidirectionnelle de certains agents de Neuromodulation (sérotonine et dopamine) avec des agents *Knowledge* qui portent comme rôle un concept terme émotionnel (« sadness », « fear », etc.). Ainsi, il existe un premier lien implicite entre les émotions et les états internes (viscérales) du système (résultant d'actions ou expériences antérieures du système). Ce lien entre neuromodulation et émotion est bidirectionnel. Ainsi, un état viscéral peut également modifier la façon dont l'information sensorielle sera située à l'avenir : de faibles niveaux de sérotonine dans le système (dépression) biaiseront celui-ci dans une interprétation « déprimée » de l'information sensorielle.

4.3.3.2 Conceptualisation située

La conceptualisation située chez Lindquist est le mécanisme par lequel les expériences antérieures sont utilisées pour donner un sens, en contexte, aux sensations. Elle lie l'émotion à un événement, un objet. Les concepts dans notre système ne sont pas simplement les mots attribués à des agents *Knowledge*. Les agents *Knowledge* représentent la mémoire sémantique du système et la

conceptualisation se produit lors des interactions dynamiques au niveau réactif lorsque le système se trouve en situation. L'activation des agents *Knowledge* à l'instant t dépend de l'activation courante qu'ils reçoivent des capteurs et de l'activation qu'ils reçoivent d'autres agents *Knowledge*. L'activation des agents *Knowledge* est elle-même le résultat des stimulations sensorielles précédentes, des activations suivant les liens sémantiques entre les agents *Knowledge* et de l'activation résultante des actions précédemment effectuées par le système. Cependant, cette activation des agents *Knowledge* à t influencera également l'activation des agents capteurs à $t+1$ et par la suite, dans une interaction dynamique qui situe en contexte tous les concepts émergents dans le système. Par ce mécanisme, le système donne un sens, ou conceptualise, l'information sensorielle extéroceptive (informations fournies par les agents capteurs). Le processus de conceptualisation de nos agents *Knowledge* est donc situé.

4.3.3.3 Ancrage linguistique

L'ancrage linguistique est l'ancrage de l'événement dans une catégorie émotionnelle. L'ancrage linguistique se fera par l'ajout de liens entre nos agents *Knowledge* et des agents *Knowledge* de termes émotionnels qui représenteront la charge émotionnelle sémantique d'un mot. Le lexique des émotions du NRC (National Research Council Canada) (Mohammad et Turney, 2010) est utilisé pour ajouter cette valence émotionnelle (liens vers des mots de l'émotion dans notre système) aux mots de notre base de connaissances initiale extraite de ConceptNet (Havasi, Speer et Alonso, 2007).

4.3.3.4 Attention exécutive

Une caractéristique importante de la théorie de Lindquist est son inclusion des processus cognitifs, et en particulier l'attention exécutive, comme étant des aspects importants de l'émergence d'un état émotionnel. L'attention exécutive pourra notamment diriger

les processus psychologiques pour décider quelles représentations seront mises en avant et lesquelles seront supprimées, et ainsi ce qui sera conscient. Dans notre système, l'aspect cognitif des émotions est important, car l'activation des agents qui constituent la carte conceptuelle du système est le résultat d'interactions entre les processus à différents niveaux (entre les organisations et au sein des organisations). La même chose est vraie pour les concepts émotionnels. Ils seront traités en rapport à d'autres concepts : le concept émotionnel émerge des interactions (passage de messages) entre les agents, ceux-ci détermineront son activation. Les agents de niveau algorithmique, qui dirigent l'attention du système, vont encourager ou inhiber des agents spécifiques du niveau réactif en fonction de l'objectif en provenance du niveau réflexif (qui, comme nous l'avons vu, est lui-même influencé par une représentation de l'activité au niveau réactif extrait par des agents du niveau algorithmique).

Cependant, contrairement à d'autres mots dans le système, les mots émotionnels (ie, les agents *Knowledge* dont le rôle est un terme émotionnel) sont directement liés à des neuromodulateurs par l'influence mutuelle des agents émotionnels et des agents neuromodulateurs. Nous nous éloignons ici un peu de l'approche de Lindquist en « codant en dur » certains aspects des émotions, quelque chose qui est caractéristique de la perspective biologique des émotions, par opposition à la perspective « constructiviste » (voir chapitre III). Nous voyons donc la neuromodulation comme une signature chimique dynamique des émotions et comme une composante essentielle qui influence les processus psychologiques basiques impliqués dans l'émergence émotionnelle. L'activation d'une émotion va donc dépendre de plusieurs facteurs : 1) la carte conceptuelle du système, 2) la réaction à l'environnement des agents qui appartiennent au groupe réactif, 3) l'influence de neuromodulation sur les différentes fonctions de l'architecture (comme décrit dans la section précédente), et 4) l'influence bidirectionnelle entre agents émotionnels et neuromodulateurs. En bref, l'activation de liens entre les agents *Knowledge* (y compris les agents émotionnels)

dépend de ce qui a été extrait de l'environnement par les capteurs, et est régulée par des agents du niveau algorithmique (dont les différentes activités sont également régulées par les neuromodulateurs). Les états émotionnels émergent alors de la dynamique du système puisque chaque état émotionnel est un modèle dynamique de l'interaction entre ces éléments. Et, puisque cet état peut impliquer plusieurs agents émotionnels sémantiquement compatibles, l'émergence d'émotions complexes (ie, « surprise », qui est liée à la fois à la « joie » et « la peur ») est possible.

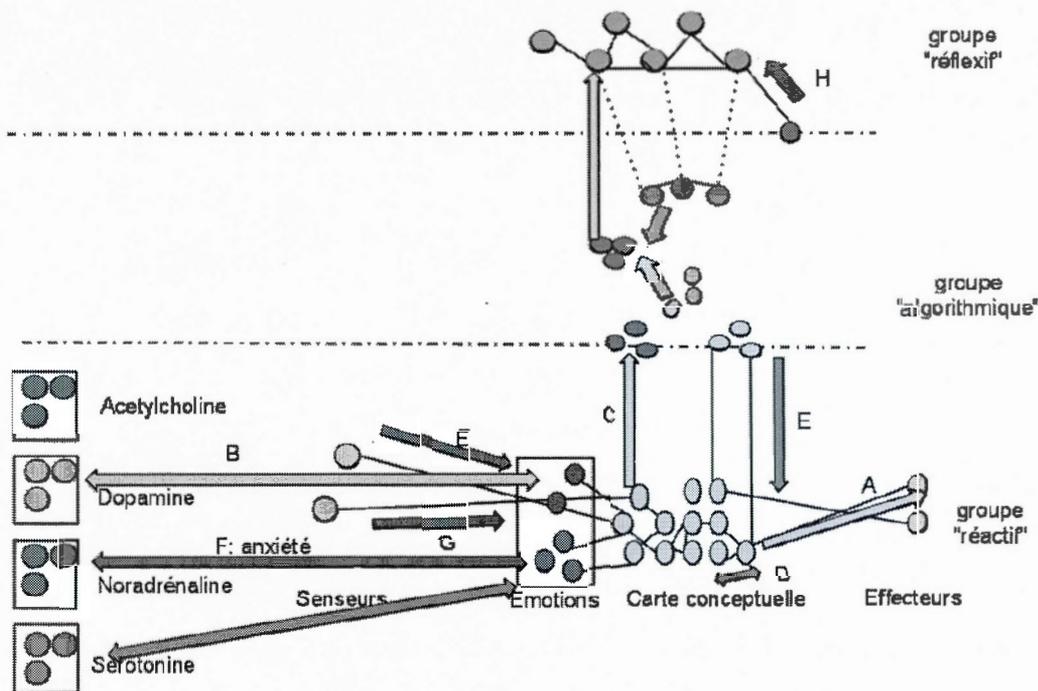


Figure 4.4 Emotions et neuromodulation

4.3.3.5 Neuromodulations

Les neuromodulations sont vues comme des signaux de contrôle diffus qui contrôlent l'état général du système. Elles agissent sur la fréquence de réception et l'envoi des messages entre organisations et au sein des organisations. Les agents du système (des

trois organisations) lors de la réception de ces messages, compte le nombre de messages d'activation reçu sur un intervalle, et calcule l'intervalle «modulé» d'envoi de messages que l'agent va maintenant utiliser.

4 systèmes sont reproduits (Bear *et al.*, 2007 ; Hobson, 2002) (Figure 4.4) :

- Noradrénaline : vigilance, attention
- Dopamine : motricité, processus cognitif, émotion, motivation
- Sérotonine : éveil/sommeil
- Acétylcholine : apprentissage, mémoire

Dopamine. La voie mésolimbique basée dans le mésencéphale projette vers le système limbique en passant par l'amygdale et l'hippocampe. Elle est représentée par le renforcement de l'activation des agents d'émotions positives (B⁹). L'effet de récompense et motivation s'effectue par le renforcement des modèles (chemin d'agents) du niveau réflexif dont l'application s'est soldée par un succès. La voie mésocorticale (lobe frontal et cortex préfrontal) impliquée dans la mise à jour de la mémoire de travail sera représentée chez nous par les échanges de messages de mise à jour des statistiques sur l'état du système entre les agents réactifs et les agents d'analyse du groupe algorithmique (C). La voie nigrostriatale (ganglions de la base) est impliquée dans la production motrice (A) représentée dans le système par les messages envoyés aux agents effecteurs.

Sérotonine. Nous reproduisons la voie qui projette du raphea nuclei jusqu'au thalamus, subthalamus, système limbique et cortex cérébral et plus particulièrement son rôle dans la mémoire à long terme et le contrôle exécutif. L'influence sur la mémoire à long terme se fait par la modulation des messages échangés entre les agents au rôle *Knowledge* (D). L'influence sur le contrôle exécutif sera reproduite par

⁹ Les lettres dans cette sections réfèrent à la Figure 4.4

la modulation des messages de régulation de l'état du système entre les agents de contrôle et les agents réactifs du groupe algorithmique (E).

Norépinephrine. (Système noradrénergique) Elle agit sur la voie qui projette du nucleus locus coeruleus au thalamus, subtalamus, système limbique et cortex cérébral et semble affecter la sensibilité aux stimuli sensoriels (E) et l'anxiété (F). Elle est représentée par la modulation des messages envoyés aux agents sensoriels et aux agents émotionnels (E) liés à l'anxiété (F).

Acétylcholine. Le complexe cholinergique pontomésencéphalotegmental influence le thalamus dorsal pour la régulation des relais sensoriels spécifiques en accord avec le système noradrénergique. Dans notre modélisation, il module les messages envoyés aux agents sensoriels (G). Le complexe du cerveau antérieur basal composé par les noyaux médians du septum qui projettent vers l'hippocampe, et le noyau basal de Meynert qui projette vers le cortex semble impliqué dans les fonctions d'apprentissage et mémorisation en participant à la régulation de l'excitabilité du cerveau. Nous reproduisons cette influence en favorisant la fusion des modèles (chemin d'agents) du niveau réflexif et des représentations réduites de l'état du système pour la réalisation d'actions (mise à jour des modèles avec l'expérience du système) (H).

Les neuromodulateurs qui influencent directement les agents émotionnels sont la sérotonine, l'acétylcholine et la dopamine. En retour, certaines émotions renforcent des neuromodulateurs (Figure 4.4).

4.4 Implémentation

Pour réaliser cette architecture, nous avons besoin d'une plateforme qui permette d'implémenter des agents à complexités diverses et de faire fonctionner un grand nombre d'agents en parallèle. Après avoir étudié différentes architectures qui ne mettaient en jeu que des agents complexes, par exemple SimAgents (Sloman et

Logan, 1999), dont l'usage était adapté à un domaine d'application spécifique, par exemple Mason (Balan *et al.*, 2003), ou dont les mécanismes de communications entre agents étaient plus complexes que souhaité; notre choix s'est arrêté sur Madkit (Gutknecht et Ferber, 2000) un SMA orienté organisation. Madkit est très flexible et n'impose pas de contraintes quant à la structure des agents (support des agents cognitifs et réactifs) et les protocoles de communications. Un grand nombre d'agents peut agir en parallèle dans cette architecture (support des agents réactifs). De plus, le modèle AGR (agent groupe rôle), à la base de cette plateforme, nous semblait particulièrement intéressant pour l'implémentation des trois niveaux de cognitions distincts. Dans le modèle AGR (Ferber, Gutknecht et Michel, 2003) :

- Un agent est une entité active et communicante qui joue un ou des rôles au sein d'un ou des groupes. Aucune contrainte quant à la complexité de l'agent n'est donnée.
- Un groupe est un ensemble d'agents partageant des caractéristiques communes (définition d'un patron d'activité). Il définit la structure organisationnelle du système.
- Un rôle est une représentation abstraite de la fonction de l'agent au sein d'un groupe.

Groupes et rôles définissent les organisations.

Ces notions sont régies par les propriétés suivantes :

- Un agent peut avoir plusieurs rôles et appartenir à plusieurs groupes. Les communications entre agents ne se font qu'au sein d'un groupe.
- Un groupe est constitué de plusieurs agents qui peuvent avoir plusieurs rôles.

Un rôle ne peut pas exister dans deux groupes, mais des agents mixtes peuvent être créés : ils possèdent les rôles de deux groupes différents et appartiennent à deux

groupes. Dans l'implémentation que nous avons choisie, chaque agent occupe une thread.

Les agents *Knowledge* sont initialisés en utilisant la base de connaissances du système. Il y a actuellement 750 agents *Knowledge* dans le groupe réactif. Nous utilisons actuellement une partie du réseau sémantique ConceptNet (Havasi, Speer et Alonso, 2007). Nous avons combiné celle-ci avec le lexique émotionnel NRC (National Research Council of Canada) (Mohammad et Turney, 2010). ConceptNet est un réseau sémantique (Collins et Quillian, 1969), où les informations provenant de la base de données OMCS (Open Mind Common Sense) sont représentées à l'aide d'un graphe conceptuel orienté où les nœuds sont des concepts et les arêtes, la relation « de sens commun » entre ces concepts. Nous avons décidé d'alléger ce réseau et d'en faire un réseau sémantique faible en remplaçant les valeurs sémantiques des arêtes par des valeurs numériques (la longueur de l'arête) représentant la distance sémantique entre ces deux concepts.

La distance entre les concepts (la longueur des arêtes) est établie sur la base des scores de pertinence de ConceptNet, scores obtenus par externalisation ouverte (crowdsourcing). Le réseau résultant d'agents *Knowledge* constitue la mémoire déclarative ou sémantique du système, nous associons celle-ci à sa mémoire à long terme. Les agents *Knowledge* ont un niveau d'activation qui, en première instance, est une fonction du nombre de messages qu'ils reçoivent des agents auxquels ils sont connectés. Par la suite, leur niveau d'activation sera également fonction des messages de régulation envoyés par le niveau supérieur (algorithmique).

Le lexique des émotions du NRC (National Research Council Canada) (Mohammad et Turney, 2010) est utilisé pour ajouter des valeurs affectives (liens vers des mots de l'émotion dans notre système) aux mots de notre base de connaissances initiale extraite de ConceptNet (Havasi, Speer et Alonso, 2007). Les agents neuromodulateurs appartiennent à un groupe, ces agents envoient des messages de

réductions ou d'augmentation à l'ensemble des agents du groupe. Ce sont des agents mixtes (appartenant à un groupe neuromodulation et au groupe des agents qu'ils doivent moduler.

CHAPITRE V

VALIDATION

5.1 Cadre de validation

La plupart des architectures cognitives existantes ont été conçues avec l'intention de reproduire l'architecture cognitive humaine, l'esprit humain, soit à un niveau biologique en reproduisant le détail des structures neuronales connues du cerveau (Eliasmith, 2013) soit à un niveau fonctionnel reproduisant différentes capacités cognitives humaines (ACT-R, CLARION, SOAR). Comme nous l'avons précédemment exposé, la reproduction des différentes capacités humaines passe pour nous par la prise en compte de la dualité de l'esprit humain ; dualité qui a d'ailleurs été étudiée dans de nombreux domaines, en psychologie (psychologie du raisonnement, psychologie morale, psychologie sociale, etc. (voir Evans 2008 pour une revue) et en neurosciences cognitives (Goel, 2007 ; Lieberman, 2007). D'une part, l'esprit est dynamique et réactif, et peut ainsi répondre efficacement aux différents stimuli présents dans l'environnement. D'autre part, l'esprit est séquentiel et par l'application de stratégies explicites il peut résoudre des problèmes complexes.

Framework tripartite de Stanovich

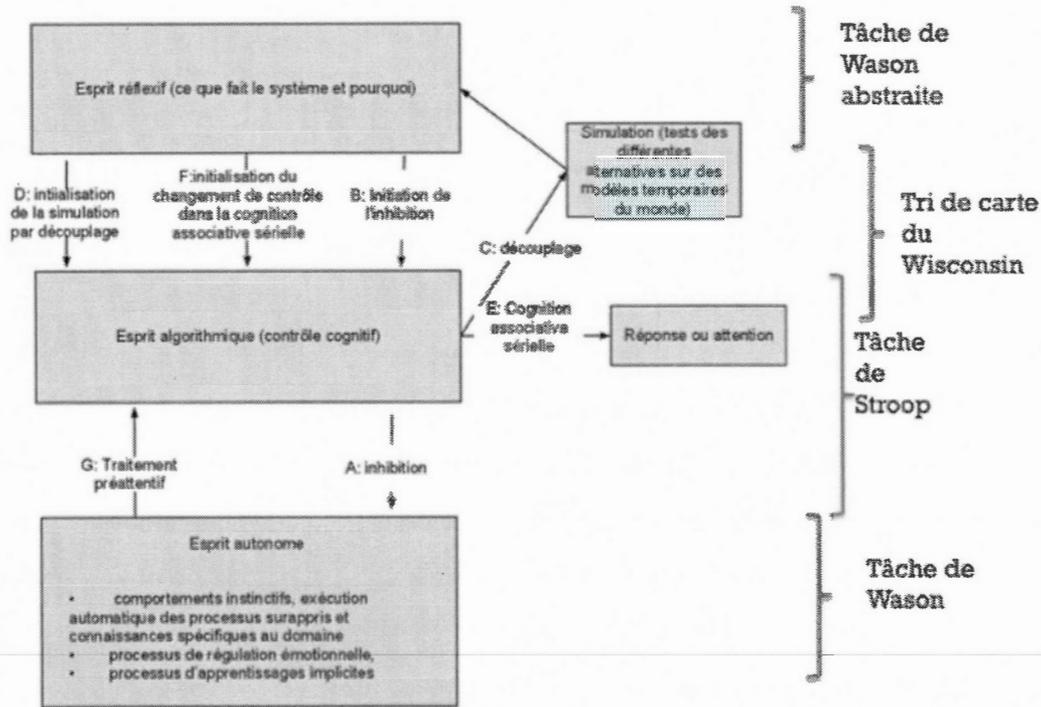


Figure 5.1 Framework tripartite de Stanovich et tâches psychologiques

Ces différents comportements et les différentes théories les expliquant ont pu être mis à l'épreuve grâce à une panoplie de tests d'évaluation des performances cognitives développés par les psychologues cognitifs et les neuropsychologues : la tâche de Stroop (attention), la tâche de tri du Wisconsin (Wisconsin Card Selection Task — flexibilité cognitive), la tâche de sélection de Wason (raisonnement), la tâche de pari de l'Iowa (Iowa Gambling task), et d'autres. Ces tâches testent différents aspects de la cognition du sujet humain. Pour notre validation pratique, nous utiliserons ces tâches d'évaluation des fonctions cognitives. Nous comparerons nos résultats aux résultats humains et quand cela est possible aux résultats d'autres architectures cognitives. En ce qui concerne la tâche de Wason, cette comparaison ne sera pas possible, puisque

nous sommes la seule architecture à reproduire certains résultats humains à cette tâche. Nous ne cherchons pas à répliquer parfaitement les résultats humains ou les résultats de ces architectures. En effet, alors que l'objectif des recherches auxquelles nous nous comparons était de reproduire une théorie spécifique (de l'attention par exemple), ce n'est pas l'objectif de cette thèse. Notre objectif est plutôt d'évaluer la capacité générale de notre architecture à être utilisable pour reproduire les résultats qualitatifs observés dans différentes tâches (généricité). Dans le futur, nous n'excluons toutefois pas de reproduire des résultats spécifiques (théorie de l'attention par exemple).

Pour valider notre système en tant qu'outil de simulation cognitive, nous le soumettrons donc à ces différentes tâches (Figure 5.1 et Tableau 5.1): tâche de Stroop (classique, émotionnel et sémantique) (section 5.2.1 et section 5.2.4), tâche de tri du Wisconsin (section 5.2.2), tâche de Wason (abstraite) (section 5.2.3). Les tâches de pari de l'Iowa (section 5.2.5) et les tâches de Stroop émotionnelle testent plus particulièrement le modèle émotionnel (Tableau 5.1). Le même dispositif servira à la simulation de toutes ces tâches.

Tableau 5.1 Correspondance entre tâches psychologiques et fonctionnalités de l'architecture

Tâches	Fonctions
Tâche de Stroop classique et sémantique	Niveau algorithmique (contrôle cognitif) et du niveau réactif (mémoire sémantique)
Tâche de tri du Wisconsin	Interaction du niveau réflexif et du niveau algorithmique pour la mise en place et l'interruption de la cognition associative séquentielle
Tâche de Wason	Niveau réflexif
Tâche de Stroop émotionnelle Tâche de pari de l'Iowa	Dynamique interniveaux guidée par les émotions et les neuromodulations

Différents travaux (Langley, Laird et Rogers, 2009 ; Newell, 1990 ; Sun, 2004) ont été effectués afin de déterminer les caractéristiques nécessaires à une architecture cognitive. Nous en avons présenté une synthèse dans le tableau 1.1 et dans la section 1.3. Ce sont ces critères que nous utiliserons comme validation théorique afin d'évaluer les forces et faiblesses de notre architecture

5.2 Validation pratique

Dans l'ensemble des expériences présentées, le temps de réaction du système est le temps qui sépare la présentation d'un stimulus au système (création du fichier dans

l'environnement) et le temps où l'effecteur du système écrit sa réponse dans un fichier.

5.2.1 Contrôle cognitif et tâche de Stroop

5.2.1.1 Hypothèses générales

- La tâche de Stroop est une tâche qui permet de mesurer les capacités et les limites attentionnelles humaines. La capacité de contrôle dans notre système est réalisée par les agents *Control*, sur la base des informations fournies par les agents *RequestStatus* et *StatusUpdate*, du niveau algorithmique. Inspiré par le niveau du même nom dans le modèle tripartite de Stanovich et différents modèles neuropsychologiques de l'attention, ce niveau devrait aide notre système à se comporter qualitativement de la même manière que le sujet humain et d'autres architectures cognitives à cette tâche.
- La variante sémantique de cette tâche met en évidence une interférence sémantique avec le contrôle cognitif. Les agents *Knowledge* du groupe réactif, qui constituent la mémoire sémantique du système, devraient être capables de reproduire ces mêmes interférences.

5.2.1.2 La tâche

La tâche de Stroop (1935) est fréquemment utilisée pour tester l'attention et le contrôle inhibiteur. Le principe de cette tâche est de présenter au sujet un matériel qui normalement le mène à une réponse habituelle automatisée dans une situation où cette réponse habituelle est invalide. La version la plus étudiée de cette tâche est celle de l'interférence « Couleur-Mot ». Un ensemble de planches est présenté au sujet, une planche à la fois. Dans cet ensemble se trouvent des planches au contenu congruent (le mot « vert » écrit en vert) et des cartes au contenu non congruent (le mot « rouge » écrit en vert). Les sujets sont invités à nommer la couleur (vert, rouge, ..) dans laquelle le mot de couleur (« vert », « rouge », etc.) est écrit. L'interférence

de la lecture sur la dénomination de la couleur a lieu lorsque les sujets sont face à une planche au contenu non congruent. Elle tend à augmenter avec la proportion de planches au contenu congruent que contient l'ensemble de planches. En effet, la capacité à maintenir un objectif est affectée par le contexte de congruence : les contenus congruents nuisent au contrôle cognitif (Ionescu, Blanchet et Gaonac'h, 2006). L'effet de Stroop se traduit au niveau des résultats par une réponse erronée ou un temps de réponse accru.

L'accès à la signification des mots écrits lors de la lecture est un processus fortement automatisé chez l'adulte : c'est ce qui crée cette interférence « Couleur-Mot ». Chez les enfants, l'effet est plus faible. Il augmente au fur et à mesure que l'enfant progresse dans l'apprentissage de la lecture (Strauss, Sherman et Spreen, 2006). L'interférence naît de la nécessité de remplacer cette réponse habituelle (l'accès à la signification du mot) par celle moins habituelle, mais qui respecte la consigne donnée (nommer la couleur de l'encre) (Ionescu, Blanchet et Gaonac'h, 2006). L'interférence est l'effet combiné de mécanismes attentionnels et de mémoire (Kane et Engle, 2003). Les différences individuelles de mémoire de travail déterminent la performance à la tâche de Stroop. Les personnes ayant un empan mnésique¹⁰ plus grand réussissent mieux à inhiber la réponse habituelle. Pour Kane et Engle (2003), nous pouvons identifier deux mécanismes dans la tâche de Stroop: le maintien de l'objectif et la résolution de conflit entre deux réponses en concurrence. C'est ce deuxième qui provoque des déficits chez les individus à faible empan mnésique⁴. La difficulté à résoudre un conflit est responsable du temps de réponse plus élevé que la moyenne face à une planche non congruente, alors que l'échec du maintien de l'objectif est responsable des réponses erronées.

¹⁰ L'empan mnésique est la capacité (en quantité d'unités d'informations) de rappel d'éléments d'un individu dans une situation qui implique également un traitement. L'empan mnésique dépend notamment de l'organisation des éléments dans la mémoire à long terme Ionescu, Blanchet et Gaonac'h, *Psychologie cognitive et bases neurophysiologiques du fonctionnement cognitif*.

Le cortex cingulaire antérieur (ACC) et le cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC) sont actifs au cours de cette tâche (Botvinick *et al.*, 2001b). Pour Botvinick *et al.* (2001), un système de surveillance des conflits dans les réponses (*response conflict monitoring system* — RCMS) serait situé dans le ACC et un système de contrôle cognitif serait situé dans le DLPFC. Le RCMS détecterait les conflits dus à des interférences entre processus. Le système de contrôle cognitif quant à lui régulerait le traitement de l'information dans les régions postérieures afin de réduire les conflits.

D'autres interférences peuvent être testées avec des variantes de cette tâche: les interférences sémantiques et les interférences émotionnelles. La tâche de Stroop sémantique (Klein, 1964), consiste à mesurer l'effet de la distance sémantique sur la dénomination de la couleur. Plus la distance sémantique est grande, plus l'effet d'interférence est réduit (par ex., l'effet est plus fort pour le mot « ciel » écrit en vert que pour un mot rare sans lien avec la couleur bleue écrit en vert) (Roelofs, 2003). Dans le cadre de la tâche de Stroop émotionnel, c'est le temps de réponse de l'individu qui est mesuré, et ce, dans une tâche de dénomination de couleurs de mots émotionnellement négatifs (« feu », « mort ») et de mots émotionnellement neutre (Ionescu, Blanchet et Gaonac'h, 2006). La tâche de Stroop et ses variantes ont été utilisées pour étudier les troubles du contrôle cognitif et de la mémoire dans les psychopathologies comme la schizophrénie et le trouble obsessionnel compulsif (TOC). Dans les contextes à congruence élevée, les schizophrènes montrent notamment le même style d'erreurs que les personnes à faible empan mnésique.

5.2.1.3 Simulations informatiques

Dehaene *et al.* (Dehaene, Kerszberg et Changeux, 1998) simulent la tâche de Stroop dans un réseau de neurones qui est une transposition simplifiée du modèle de l'espace de travail neuronal global développé par Dehaene et Changeux (1998). Les travaux de Dehaene et Changeux développent l'hypothèse neurale anatomique de la théorie de l'espace de travail global (Baars, 1989). Dans l'espace de travail neuronal global, les

traitements cognitifs coûteux sont pris en charge par deux espaces computationnels, l'espace global et les processeurs spécialisés, modulaires, encapsulés et automatiques pour le traitement perceptuel et moteur. Ils agissent en parallèle. Le réseau de neurones artificiel de Deahene et *al.* met l'accent sur la dynamique de cette théorie. Dans le RNA, l'état de l'environnement est fourni à l'espace de travail global par une unité spécialisée dans la perception des mots (elle représente la zone de Wernicke — compréhension des mots) et une unité spécialisée dans la perception des couleurs. Les circuits moteurs, unités de réponse, produisent le comportement du système : ils nomment la couleur reproduisant ainsi le comportement de l'aire de Broca (production de la parole). Dans la théorie, les circuits de la mémoire à long terme fournissent à l'espace de travail un accès aux percepts et événements; ce travail est effectué par les régions de l'hippocampe et du parahippocampe qui permettent d'accéder aux informations emmagasinées dans le cortex. Dans le RNA, il est représenté par les unités de vigilance et les signaux de récompense. Le mécanisme de récompense est une spécificité de cette simulation : la correction d'erreur sera associée à une réactivation intense de l'espace de travail. Le RNA de Deahene et *al.* illustre plus particulièrement la baisse de vigilance après une série de correction sur des essais consécutifs. Au cours d'un phénomène de routinisation, l'activité se déplace de l'espace de travail vers le réseau des unités spécialisées reproduisant ainsi la baisse d'activité dans le ACC. À échelle réduite, ce modèle reproduit l'organisation de base et les connexions neuronales de son modèle humain.

Le RNA développé par Gilbert et Shallice (Gilbert et Shallice, 2002) est une implémentation du système superviseur attentionnel (SSA) (Norman et Shallice, 1980). Dans ce modèle, le comportement est contrôlé par les « schemata ». Ces *schemata* peuvent être sélectionnés de deux manières : (i) l'attention exogène grâce aux entrées environnementales (sélection du schéma le plus actif pour la réalisation d'une action de routine), ou (ii) l'attention endogène par le contrôle top-down fourni par le SSA (qui a accès à une représentation de l'environnement et aux intentions de

l'organisme). Cette dernière méthode inhibera un *schéma* préexistant lorsque requis ou lorsqu'une action de routine ne peut être sélectionnée. Dans le RNA, l'attention endogène est réalisée par les unités de « demande de tâche ». En ce qui concerne l'attention exogène, le déclenchement de *schéma* par l'environnement se fait par l'activation de connexions entre unités perceptuelles. Le travail du SSA est accompli par la régulation top-down amorcée par les unités de « demande de tâche » (sur les voies « couleur lue » et « couleur vue »). La différence d'action du SSA entre action de routine et non-routine n'est pas développée dans ce RNA, son action reste constante. Ici, ce sont les effets d'amorçage et l'importance des essais précédents (répétition) qui sont étudiés.

Les réseaux de neurones présentés ci-dessus visent à simuler un fonctionnement cognitif normal au cours d'une tâche de Stroop. Afin de reproduire des déficits cognitifs connus, des simulations ont aussi été réalisées dans des réseaux aux facultés affaiblies (afin de reproduire les conditions de certaines pathologies psychiques). C'est le cas du réseau de Servan-Schreiber et Cohen (1998) où des réseaux de neurones récurrents sont utilisés pour simuler la tâche de Stroop et les effets simulés de la dopamine sur certains des composants du modèle (reproduisant les effets supposés de la dopamine sur le cortex préfrontal).

Plusieurs simulations de tâche de Stroop ont été réalisées dans ACT-R. « NJAMOS » (Lovett, 2002) est l'une de ces simulations de tâche de Stroop. Un ensemble de règles de production spécifie les connaissances requises pour accomplir la tâche, et des mécanismes de ACT-R aident le système à choisir les règles de production. Les éléments symboliques dans les simulations de NJAMOS ont des quantités sous symboliques associées (exemple : activation) qui détermineront leur disponibilité dans le comportement du modèle, ce qui confère au système une forme de dynamisme. La sélection d'une règle par la suite force une certaine séquentialité dans la simulation puisque les règles sont soit focalisées sur le mot soit sur la couleur: la

règle de couleur précèdera la règle de lecture ou l'inverse, mais ce ne sont pas réellement deux processus en concurrence.

Weaver++ (Roelofs, 2003), conçu pour les études en psycholinguistique, offre une simulation de tâche de Stroop sémantique et simule deux aspects de l'attention sélective : l'« ensemble des stimuli » (la sélection sur un attribut perceptuel), et « l'ensemble des réponses » (une sélection sur les réponses admissibles). Le réseau sémantique fonctionne par propagation d'activation et est développé pour contenir plus d'informations sémantiques. Grâce à lui, Weaver++ peut faire des expériences intéressantes concernant l'implication des relations sémantiques dans les tâches cognitives (la tâche de Stroop sémantique). Des implémentations de différentes variations de la tâche de Stroop ont été réalisées dans ce système. L'architecture que nous proposons possède le même style d'implémentation de la mémoire sémantique. Notre système diffère en revanche de Weaver++ dans l'application de la règle. Dans notre système, la règle appliquée sera très fortement influencée, et pourra même être modifiée, par l'état de l'environnement à un moment, ce qui n'est pas le cas dans Weaver++.

5.2.1.4 Expériences

Hypothèses :

De la manière que chez le sujet humain :

- notre système devrait enregistrer plus d'interférences pour la dénomination de couleur sur les cartes non congruentes que pour la dénomination de la couleur sur les cartes congruentes.
- cette tendance devrait être accrue dans les conditions où plus de cartes congruentes sont présentées au sujet et au fur et à mesure du déroulement de la tâche.

Procédure expérimentale A (dégradation de la performance avec le temps). Deux expériences de Stroop classique ont été conduites. Dans chacune de ces expériences, 4 blocs de 100 cartes sont montrés au système, une carte à la fois, par l'intermédiaire d'un script. Sur chacune de ces cartes figure un mot (un nom de couleur) écrit dans une couleur d'encre. La carte est dite congruente lorsque la couleur qui se trouve sur cette carte est la même que celle de l'encre dans laquelle elle est écrite. Dans la première expérience, 25% des cartes étaient congruentes, dans la deuxième expérience, 50%.

Les agents capteurs « Couleur » analysent les images qui leur sont présentées dans l'environnement. Nous avons deux types de capteurs différents. Les agents capteurs « Couleur » utilisent l'utilitaire ppmhist (NetBPM, 1988) pour créer des histogrammes de couleurs des images. Les agents capteurs « OCR » utilisent la bibliothèque OCRopus : Tesseract (Smith, 2007). Les agents capteurs extraient l'information à une fréquence prédéfinie qui peut être modifiée par la suite par les neuromodulateurs.

Ils sont reliés à des agents Knowledge de transition, et la distance entre eux dépend de l'activité globale au niveau réactif : une distance est initialement attribuée, celle-ci sera modifiée par les activations subséquentes (les messages échangés dans le système). En fonction de la distance attribuée à cette liaison, l'information sensorielle sera plus ou moins prédominante dans le système. Les agents Senseurs transmettent le résultat de l'analyse d'image (OCR et couleurs) aux agents Knowledge transitoires auxquels ils sont liés. Les agents Knowledge transitoires sont eux-mêmes reliés à des agents Knowledge ayant pour rôle les informations qui seront extraites (« rouge », « bleu », « vert », « jaune »). Pour représenter la prédominance de la voie « couleur lue-nom » sur la voie « couleur vue-nom », nous avons initialisé le système avec un nombre plus élevé d'agents Knowledge de transition pour l'OCR (voie « couleur lue-nom »).

En utilisant ces agents capteurs (« recognizecolor » et « read »), le système reçoit des informations sur son environnement (le système traite tous les stimuli en parallèle).

Procédure expérimentale B (Différence des temps de réponse stimuli congruents, non congruents et neutres et comparaison à ACT-R et LEABRA). Nous avons reproduit deux expériences ayant été conduites dans les architectures ACT-R (Juvina, 2007) et LEABRA (Herd, Banich et O'reilly, 2006) de manière à pouvoir comparer notre performance à la leur. Les paramètres de configuration que nous avons utilisés dans l'expérience précédente sont conservés (mêmes effecteurs, même fréquence d'envoi de message pour les agents).

En revanche, le déroulement de l'expérience n'est pas le même. Dans l'expérience précédente (celle qui nous servira pour comparaison avec ACT-R), 150 cartes sont présentées aléatoirement au sujet, 50 cartes par condition – incongruent, congruent et neutre.

Dans la deuxième expérience (celle qui nous servira pour comparaison avec LEABRA), 60 cartes sont aléatoirement présentées au sujet, 20 cartes par condition — incongruent, congruent et neutre. La tâche est effectuée dans deux conditions. Dans la première condition, comme c'est le cas habituellement, il est demandé au sujet de nommer la couleur dans laquelle est écrite le mot. Dans la deuxième condition, il est demandé au sujet de nommer le mot.

Procédure expérimentale C (tâche de Stroop sémantique). Une tâche de Stroop sémantique est conduite où 10 blocs de 15 cartes sont présentés au système. Chaque bloc est constitué de 5 cartes non congruentes, 5 cartes congruentes et 5 cartes sémantiquement non congruentes (avec les mots « sky » écrit en rouge, « lip » écrit en bleu, etc.). Une pause est faite entre chaque bloc, période pendant laquelle le système ne sera stimulé par aucune carte.

5.2.1.5 Résultats

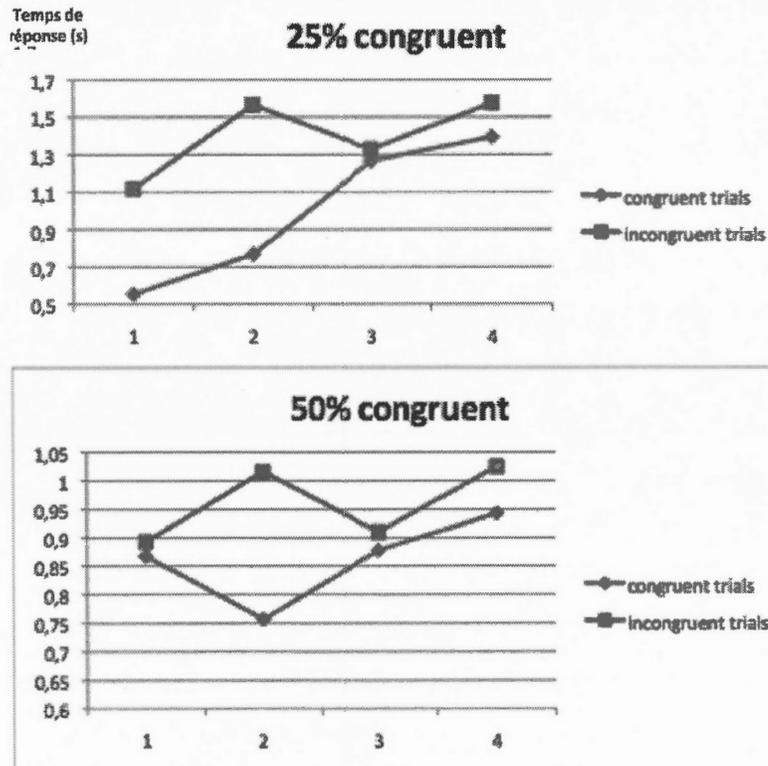


Figure 5.2 Temps de réponse moyen par blocs pour essais congruents, incongruents dans les conditions 25% congruentes et 50% incongruentes. (Larue, Poirier et Nkambou, 2012)

Expérience A (dégradation de la performance avec le temps). Dans un premier temps, l'agent de la connaissance qui correspond au stimulus externe est activé (par exemple, l'agent *Knowledge* qui porte le rôle « Rouge » sera activé si les agents sensoriels détectent du rouge dans l'environnement). De ce fait, il y a une prédominance des agents «Flead», une tendance similaire à celle de la prédominance de la capacité de lecture chez le sujet humain adulte normal. Après cette phase initiale, les agents de contrôle, guidés par les informations fournies par les agents d'observation de l'état du système (*RequestStatus*, *StatusUpdate*) selon l'objectif actuel du système, peuvent modifier l'activité de passage de message entre agents (en augmentant l'activité des agents « recognizecolor »).

Dans cette condition, le temps moyen de réponse sur l'ensemble des blocs du système est plus grand dans les contextes incongruents que dans les contextes congruents (1396 ms dans la condition 50% congruente contre 960 ms dans la condition 25% congruente), un résultat que l'on observe aussi chez les sujets humains.

Les agents de contrôle doivent envoyer des messages de régulation aux agents « recognizecolor » pour compenser la répartition initiale des agents (prépondérance des agents « read ») pour atteindre l'objectif, une fois une certaine stabilité atteinte (une fois qu'il y a une différence d'activité suffisante entre deux réponses contradictoires du système sur plusieurs cycles), le système fournit une réponse. Lors des essais incongruents, cette stabilité est plus lente et difficile à obtenir.

Les temps de réponse moyens sont plus faibles dans la condition 50% congruente. Ce résultat peut sembler a priori incohérent, mais il convient de noter que le taux d'erreur est plus élevé dans cet état (0,55 de taux d'erreur pour les cartes non congruentes dans la condition congruente à 50%) que dans la condition congruente à 25% (0,04). Ne réussissant pas à maintenir un contrôle suffisant, le système fournit une réponse plus rapide, mais fautive (l'effet d'interférence de Stroop se traduit dans des temps de réponse élevés, mais aussi dans des erreurs). Dans la condition 50% congruente, les agents de contrôle ne sont pas sollicités autant que dans la condition 25% congruente, le système se comporte alors de deux manières distinctes :

- Il n'existe pas de concurrence entre les deux réponses (la lecture domine). Le système est donc stable et une réponse est donnée : rapide, mais fautive.
- Il existe une concurrence entre les deux réponses, mais les agents de contrôle ont peu été sollicités au cours de la tâche, plus de temps est nécessaire pour obtenir une réponse. Le système fournit une réponse, potentiellement la bonne, mais avec un temps de réponse plus élevé que dans la condition 25% congruente (une condition où les agents de contrôle ont renforcé l'activation des unités « recognizecolor »).

Le premier de ces deux comportements possibles est celui que nous avons le plus observé. L'augmentation proportionnelle du temps de réponse (figure 5.2) à travers le temps dans les deux conditions montre l'augmentation de la charge de la mémoire de travail du système pour chaque bloc, fournissant ainsi une simulation cohérente des erreurs rencontrées chez les sujets humains. En effet, petit à petit au cours de la tâche, les agents connectés aux agents sensoriels (« rouge », « vert » etc.) sont devenus activés. Il y a donc plus d'informations envoyées aux agents qui gèrent le statut, augmentant ainsi la complexité du traitement. Le travail des agents de contrôle devient de ce fait plus compliqué puisqu'ils ont plus d'activité à surveiller et à réguler.

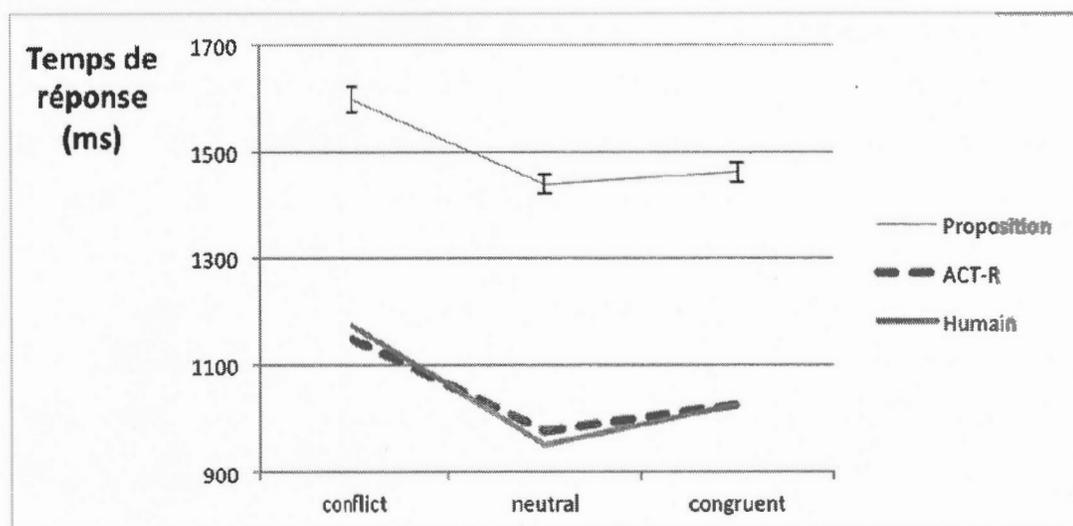


Figure 5.3 Résultats à la tâche de Stroop classique de ACT-R et l'humain (Juvina, 2007), et notre proposition avec barre d'erreurs (SEM – erreur standard de la moyenne) pour 50 simulations

Expérience B (différence des temps de réponse stimuli congruents, incongruents et neutres et comparaison à ACT-R et LEABRA). La figure 5.3 montre les temps produits par ACT-R (Juvina, 2007), des sujets humains et notre architecture. Nous pouvons constater que notre architecture reproduit des variations de temps de réponse semblables à ACT-R et au sujet humain. Les temps de réponse sont plus élevés dans

la condition incongruente que dans la condition congruente, la différence étant statistiquement très significative ($p < 0.0001$, *Student t test* pour $N = 50$). Ces temps de réponse illustrent le deuxième cas présenté dans l'expérience précédente (concurrence entre les deux réponses, mais dans la mesure où les agents de contrôle ont peu été sollicités au cours de la tâche, plus de temps est nécessaire pour obtenir une réponse). Cela peut notamment s'expliquer par le fait que cette tâche est plus courte que la tâche effectuée dans l'expérience précédente, 150 essais une fois, au lieu de 100 essais 4 fois (le système plus prompt aux erreurs dans les tâches plus longues), et aussi du fait qu'aucun essai neutre n'était présent pour réduire le biais du système.

Toutefois, notre système a des temps de réponse plus longs que le système ACT-R et le sujet humain. Alors qu'ACT-R respecte le critère de temps réel, notre architecture n'en est pas capable. Nous pouvons notamment expliquer la différence de temps entre ACT-R et notre système par le fait que notre système pour l'ensemble des tâches était équipé d'une base de connaissances contextuelle large (non limités aux connaissances uniquement nécessaires à cette tâche). Le système met donc plus de temps à être stable, sa stabilité dépendant de plus d'agents Knowledge (que de chunks dans cette simulation ACT-R). Nous pensons toutefois qu'il serait possible d'améliorer la détection de la stabilité dans le système par les effecteurs, et d'optimiser le code des différents agents et la communication entre ceux-ci pour rendre ceux-ci plus performants.

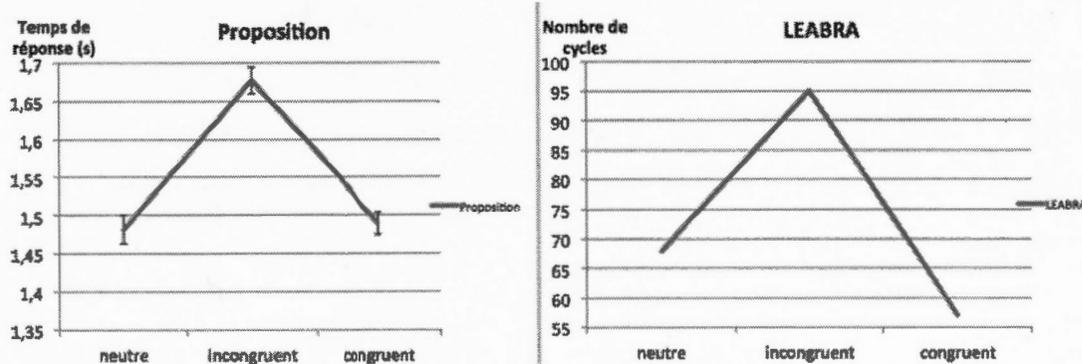


Figure 5.4 Résultats à la tâche de Stroop classique de LEABRA (Herd, Banich et O'reilly, 2006) et notre proposition avec barre d'erreurs (SEM – erreur standard de la moyenne) pour 50 simulations

En ce qui concerne la deuxième expérience, tout comme LEABRA (Herd, Banich et O'reilly, 2006) (Figure 5.4) et les différentes expériences sur les sujets humains nous avons reproduit la différence de temps de réponse pour les essais congruents et incongruents (statistiquement très significatif $p < 0.0001$, *Student t test* pour $N= 50$). En revanche, tout comme dans l'expérience précédente, la différence entre temps de réponse pour essais neutres et congruents n'est pas significative : cette différence est significative dans la simulation dans LEABRA et dans les résultats humains.

Expérience C (Stroop sémantique). Pour la tâche de Stroop sémantique, les temps de réponse étaient plus élevés pour les essais non congruents que pour les essais congruents et sémantiquement non congruents (Figure 5.5). Pour la tâche de Stroop sémantique, les temps de réponse étaient plus grands pour les essais sémantiquement non congruents que les essais congruents. Ces résultats reflètent les résultats obtenus chez le sujet humain et dans une autre architecture, Weaver ++ (Roelofs, 2003). Dans le système, quand une connaissance sémantique est activée (par exemple si « ciel » est lu par l'un des capteurs), les connaissances qui sont sémantiquement liées à « ciel » sont également activées, ce qui signifie que la couleur « bleue » sera activée,

mais dans une moindre mesure que si elle avait été directement activée par le senseur : c'est ce qui crée l'interférence sémantique observée (ce qui explique le temps de réponse plus élevé), toutefois puisque le but du système est de nommer la couleur, le temps de réponse est inférieur au temps de réponse dans les essais incongruents.

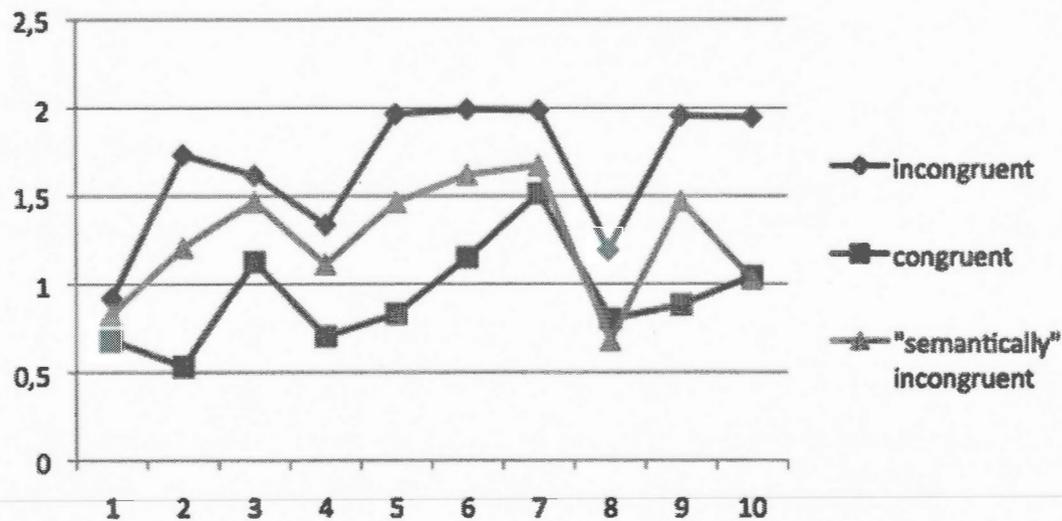


Figure 5.5 Temps de réponse moyen (s) par bloc pour les congruents, incongruents et sémantiquement incongruents (Larue, Poirier et Nkambou, 2012).

5.2.1.6 Discussion et conclusion

Conformément à nos hypothèses, notre système a été capable de reproduire le même type d'interférence que chez le sujet humain (temps de réponse et erreur sur les essais de type incongruent). Sa performance s'est aussi dégradée avec le temps tout comme chez le sujet humain. Nous ne reproduisons pas les résultats humains aussi bien que les architectures LEABRA et ACT-R, toutefois, il est à noter que les modèles testés dans ces architectures ont été spécifiquement développés pour rendre compte des résultats aux tâches de Stroop alors que notre architecture vise à simuler *sans reprogrammation ou entraînement* une variété de capacités cognitives faisant appel à

des combinaisons distinctes de processus cognitifs de base. LEABRA notamment a été entraîné avant simulation avec un ensemble de données humaines.

Sur la base de ces résultats, nous pouvons évaluer le système en rapport à plusieurs critères de la section 1.3. Le système que nous avons n'est pas parfaitement robuste puisqu'il échoue parfois à la tâche, mais son taux d'erreur reste faible et ses erreurs sont comparables aux erreurs humaines. En ce qui concerne l'efficacité et plus particulièrement la capacité à opérer en temps réel, notre système comme illustré par les expériences de Stroop (section 5.2.1) est comparable qualitativement, mais pas quantitativement aux temps humains et aux temps de l'architecture ACT-R et cycles de l'architecture LEABRA. En ce qui concerne un dernier critère, la mémoire, nous avons confirmé que nous sommes capables de reproduire des résultats similaires qualitativement aux résultats humains en ce qui concerne le rapport de la mémoire de travail à la mémoire à long terme. En effet, notre modèle reproduit un modèle de mémoire compatible théoriquement avec celui de Engle où la mémoire de travail est vue comme un ensemble de représentations temporairement activées dans la mémoire à long terme (Engle, 2010). Dans la tâche de Stroop, les agents Knowledge couleur activés au fur et à mesure de la tâche constituent la mémoire de travail du système et l'ensemble des agents Knowledge sa mémoire à long terme. Au fur et à mesure que la tâche progresse, de plus en plus d'agents de couleur sont activés, ce qui explique la surcharge de la mémoire de travail du système d'une manière similaire à celle de l'humain. En ce qui concerne la robustesse et la réactivité de notre architecture, cette tâche évalue justement l'aptitude que l'architecture aura à s'ajuster à une demande (la dénomination de couleur) malgré les demandes habituelles de son environnement (l'aptitude à inhiber la réponse habituelle).

5.2.2 Flexibilité cognitive : test de tri du Wisconsin (Wisconsin Card Sorting Task)

Les tâches de Stroop (classique et sémantique) reposaient sur les deux niveaux inférieurs de notre architecture (réactif et algorithmique). Avec le test de tri du

Winsconsin, nous touchons à des fonctions plus complexes de l'architecture : la coopération « flexible » des niveaux algorithmique et réflexif, et la simulation cognitive interne ou découplage cognitif pour le test d'hypothèses.

5.2.2.1 Hypothèses générales

- La capacité de contrôle que nous avons précédemment testée permet la réalisation d'un objectif à court terme. C'est au niveau supérieur (niveau réflexif) que l'objectif est choisi. Cette tâche implique le choix d'un objectif (règle de tri) et le changement d'objectif au cours de la tâche. Notre hypothèse est que l'architecture en trois niveaux fournira la flexibilité nécessaire à cette tâche.
- De plus, nous pensons que la fonction de découplage cognitif telle que proposée par Stanovich améliorera la performance de notre système puisqu'il pourra ainsi tester différentes hypothèses au cours de la tâche.

5.2.2.2 La tâche

Le test de tri de cartes du Wisconsin (Grant et Berg, 1948) est une autre tâche très utilisée pour tester le fonctionnement exécutif, plus particulièrement la flexibilité cognitive et le raisonnement abstrait.

Énoncé: trier les nouvelles cartes en les plaçant sur l'une des piles en fonction de la dimension cible (forme, nombre, couleur)

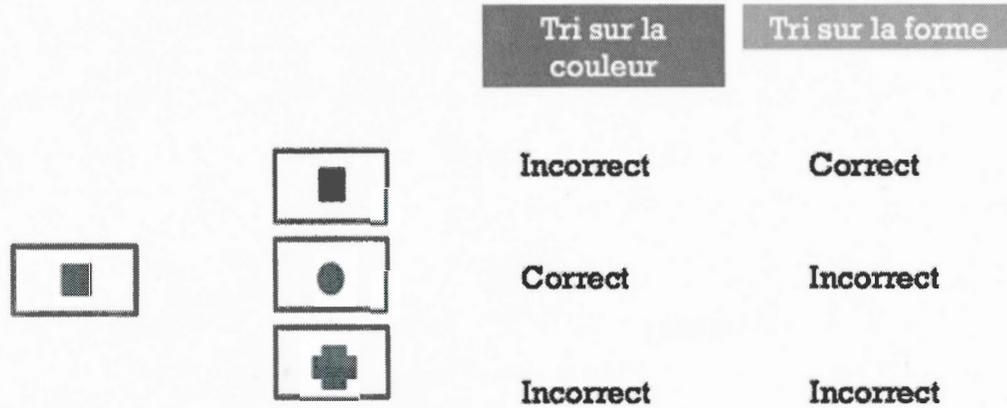


Figure 5.6 Tâche de tri du Wisconsin

Un ensemble de planches cibles est présenté au sujet. Les figures qui se trouvent sur ces planches varient en forme, nombre et couleur. De nouvelles planches sont présentées au sujet, une à une, et il lui est demandé de les classer sur l'une des planches cibles. Le sujet n'est pas informé de ce qu'est la règle de tri, il doit la découvrir; il reçoit toutefois une rétroaction négative lorsqu'il se trompe dans sa classification (voir Figure 5.6). La règle change au cours de la tâche sans que le sujet soit prévenu. Après avoir découvert la nouvelle règle, le sujet éprouve alors des difficultés à inhiber la règle précédente, il n'arrive pas à désengager son attention d'un stimulus visuel complexe pour la réengager (*set shifting*) dans un autre. Lorsque le sujet continue à utiliser la règle précédente, on parle d'erreurs de persévération (Nyhus et Barcelo, 2009).

Les erreurs de persévération sont plus fréquentes chez les patients avec des lésions aux lobes frontaux et augmentent avec le vieillissement du sujet. La sélection de la réponse est réalisée grâce à deux mécanismes : l'*attentional set shift* et le *reversal*

shift. Ils seraient situés dans deux structures neuronales anatomiquement distinctes du PFC (Nagahama *et al.*, 2005). Le *reversal shift*, réalisé par l'intermédiaire de la région postérieure du PFC, réorganise les associations entre module de réponse et stimuli; c'est un mécanisme similaire à celui qui inhibe la réponse habituelle invalide à la faveur de la réponse valide dans la tâche de Stroop. L'*attentional set shift*, associé aux ganglions de la base (Ashby et Isen, 1999), désigne l'adoption par le contrôle cognitif de la nouvelle règle, c'est un mécanisme cognitif de plus haut niveau que le *reversal shift*. Il s'apparente à certains mécanismes de haut niveau qui sont, chez Evans, représentés par le système analytique (Evans, 2006b).

Cette tâche a été utilisée pour étudier les troubles du contrôle cognitif dans des pathologies comme la schizophrénie, les troubles obsessionnels compulsifs, la dépression et la maladie de Parkinson.

5.2.2.3 Simulations

Des simulations informatiques de cette tâche ont été réalisées principalement avec des approches connexionnistes (Dehaene et Changeux, 1991 ; Kaplan *et al.*, 2006) (Rougier et O'Reilly, 2002), mais aussi avec des approches symboliques (Kimberg et Farah, 1993a).

La simulation de Dehaene et Changeux (1991) met l'accent sur l'aspect fonctionnel par la modélisation explicite de six différentes stratégies de résolution. Ils incluent dans leur réseau de neurones les trois composants qu'ils jugent critiques pour l'accomplissement de la tâche : la capacité à changer de règles quand une punition arrive, la capacité à mémoriser des règles précédemment testées et la possibilité de rejeter des règles (sur la base d'un raisonnement qui se serait produit avant la pioche). Ces trois composants sont réalisés par le biais de structures hiérarchiques : une boucle sensorimotrice, la mémoire épisodique du système (où la règle en cours sera encodée puis remplacée en cas de récompense négative), une boucle d'auto-évaluation

endogène permettant le test interne de la règle. Cette structure est compatible avec l'organisation et la spécialisation des aires corticales.

Pour simuler la distinction entre la génération d'hypothèses et l'exécution, Kaplan *et al.* (2006) ont connecté deux sous-systèmes distincts (un générateur d'hypothèses et un réseau de Hopfield) qui leur ont permis d'étudier la persévérance et la distraction en conditions normales et en condition répliquant des lésions dans le cortex préfrontal. Le réseau de Hopfield agit comme la mémoire de travail du système. Le générateur d'hypothèse contient un réseau de Hamming qui, à la réception d'une réponse négative, déclenchera la génération d'un nouveau vecteur de règles. Un mécanisme sur la base de la distance de Hamming fournie (le plus grand la distance, le plus le vecteur généré sera basé sur un critère différent) et du vecteur, c'est-à-dire le vecteur actuellement sélectionné, pourra dériver un nouveau vecteur de règles. 14 vecteurs peuvent être sélectionnés (sélection sur les différentes dimensions et sélections ambiguës).

Rougier et O'Reilly (2002) proposent une simulation de la tâche de Wisconsin dans LEABRA. Cette simulation explique comment avec des mécanismes neurobiologiques du cortex préfrontal, le réseau peut apprendre des représentations (règles abstraites) qu'il utilisera au cours de la tâche de Wisconsin. Une alternative aux règles symboliques directement intégrées dans l'architecture est ici proposée. Par l'intermédiaire des règles abstraites apprises, la dimension choisie dans le reste du réseau sera encouragée. Un autre mécanisme assurera l'inhibition de ces règles en cas de retour de l'environnement dans ce sens. Alors que la représentation interne des règles est apprise dans la simulation de Rougier et al., Kimberg et Farah (1993b) représentent explicitement (dans une architecture ACT-R) le comportement de tri du système et étudient l'implication de la mémoire de travail dans la tâche. Les associations au niveau de la mémoire de travail sont affaiblies afin de modéliser les effets de dommages au lobe frontal chez les humains.

Enfin, Bishara *et al.* (2010) proposent des modèles mathématiques pour expliquer les erreurs dans la tâche de Wisconsin. L'attention du système est représentée par un vecteur de poids. Dans ce vecteur, chaque poids est associé à une dimension de la tâche (couleur, forme, nombre). Ces poids sont modifiés pour refléter la dimension sur laquelle est portée l'attention. Les changements d'attention sont représentés par une moyenne de ce vecteur avec un vecteur qui représente la rétroaction de l'environnement. Le modèle prend aussi en compte des mécanismes de récompense et punition, qui modifient l'influence des différentes informations dans la prise de décision.

En tant qu'approche hybride, et puisque notre architecture présente des parallèles structurels avec le cerveau humain, on peut observer des similitudes entre les architectures précédemment présentées et la nôtre. La boucle d'auto-évaluation endogène de Dehaene et Changeux, qui teste en interne une règle, peut être comparée fonctionnellement à la capacité de découplage dans notre architecture. En revanche dans notre architecture, le comportement émerge à travers l'interaction des différents niveaux, au lieu d'être strictement contrôlé par une structure de niveau supérieur. Nous partageons aussi des propriétés avec les différentes approches connexionnistes puisque la mémoire des règles correctes et incorrectes précédentes est conservée dans le degré d'activation des connaissances (au niveau réactif) et des objectifs (au niveau réflexif). Nous partageons certaines propriétés des aspects avec les approches symboliques puisque les connaissances et les objectifs de notre système sont aussi représentés par des symboles. Chacune de ces simulations permet d'étudier l'implication d'un composant spécifique dans l'exécution de la tâche. Notre simulation vise à étudier les interactions entre les composants de notre modèle pour l'accomplissement de cette tâche.

5.2.2.4 Expériences

Hypothèses

De la même manière que chez le sujet humain :

- notre système devrait reproduire le même type d'erreur que les sujets humains (erreurs de persévérances) et arriver à terminer la tâche comme le sujet humain (découvrir 6 règles de classification).
- La variation de la sensibilité au découplage cognitif dans notre architecture devrait faire varier le nombre d'essais nécessaires pour découvrir les six règles de classification : le moins il y aura de découplages, le plus il devrait y avoir d'essais pour découvrir les règles.

Procédure expérimentale

Dans notre expérience, nous utilisons une procédure similaire à Heaton (1993) représentant l'effet de contexte des quatre cartes cibles en ajoutant les liens suivants dans la carte conceptuelle du système : Rouge - triangle - un, vert - étoiles - deux, jaune - carré - trois, bleu - cercle - quatre. Nous avons également lié les connaissances « shape », « color » et « number » qui étaient déjà présentes dans ConceptNet aux capteurs responsables de leurs détections. Un script fournit au système la série de cartes qu'il devra classer, ce script évaluera aussi la réponse du système. La règle de catégorisation est modifiée après six succès consécutifs. Le script tente de faire deviner au système six règles de catégorisation ([« forme », « couleur », « nombre »] fois deux) sur les 128 cartes. Comme dans le cas de l'expérience sur sujets humains, aucun avertissement n'est envoyé avant un changement de règle : seule la réponse « non » est donnée au système lorsque sa réponse est incorrecte. La disposition de pensée (section 4.1.2) illustrée dans ce système est la pensée opposée. Dans cette disposition de pensée, le système simule l'application d'une règle puis sa négation

(simulation d'un retour négatif de la part de l'instructeur). De ce fait dans la simulation cognitive, une nouvelle règle de catégorisation pourra émerger (la seconde règle la plus appropriée, si la première règle devait être niée par l'instructeur).

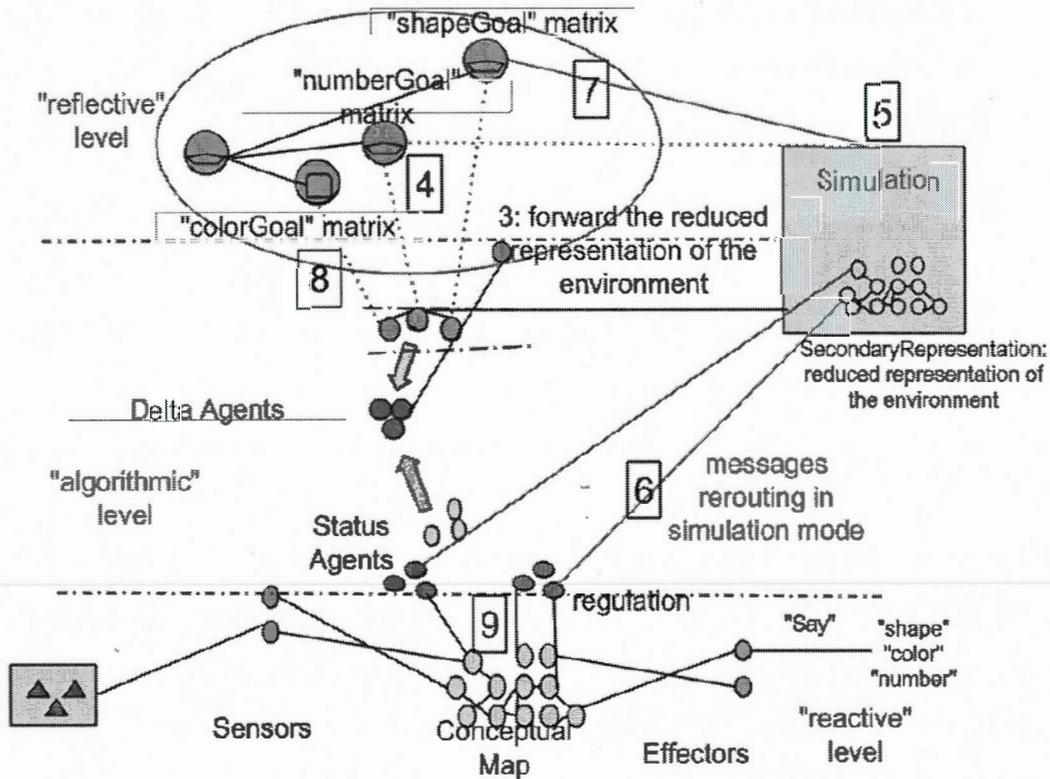


Figure 5.7 Déroulement d'une tâche de tri du Wisconsin dans le système avec découplage

Dans le système, le découplage se produit lorsque deux réponses concurrentes sont observées (lorsque deux réponses ont un niveau d'activation proche). Nous avons attribué un degré de sensibilité variable à l'agent Goal qui lance les opérations de découplage : le degré de sensibilité détermine quel doit être le degré de proximité des deux réponses contradictoires pour lancer un découplage cognitif. Dans le cas du degré 1/6, l'agent Goal devra lancer une simulation lorsque l'écart entre les deux réponses contradictoires est inférieur à 1/6 de la valeur d'activation la plus forte.

5.2.2.5 Résultats

Notre système n'est pas séquentiel par nature. Les organisations travaillent en parallèle et les agents qui les constituent aussi : le comportement global du système émerge de l'interaction de tous les agents du système). Cependant, nous décrivons ci-dessous le traitement qui émerge de l'interaction des agents et grâce auquel nous réalisons dans notre système une tâche de Wisconsin (sous la forme d'une séquence d'étapes). Il faut, en regardant cette séquence d'étapes, se souvenir qu'elle émerge du fonctionnement global du système où les différents agents agissent en parallèle. Les chiffres associés à chaque étape sont visibles sur la figure 5.7:

1. Lorsqu'une nouvelle carte apparaît dans l'environnement, des capteurs (pour la couleur, la forme et le nombre) extraient les propriétés pertinentes et transmettent cette information aux agents *Knowledge* dans le groupe réactif où la propagation d'activation se fait selon les liens de la carte conceptuelle.
2. Les agents d'état transmettent cette information (activation) au niveau algorithmique.
3. Une représentation réduite de l'environnement est produite par les agents Delta et transmise aux agents du groupe réflexif.
4. La représentation réduite reçue conduit à l'activation de règles concurrentes (par *pattern matching* entre l'objectif actuel du système et l'information de la représentation réduite). Les étapes 5 à 7 incluses sont conditionnelles au fait qu'il y ait eu plus d'un agent GoalSet gagnant, sinon l'étape 8 est appliquée directement.
5. Quand il y a plus d'un agent GoalSet gagnant (ce qui signifie que plus d'une règle est applicable - puisque la mémoire de travail du système est surchargée avec des informations contextuelles contradictoires), une simulation est

lancée. Un minimonde, miroir du niveau réactif, est ainsi créé : les agents de ce minimonde sont initialisés sur la base des informations contenues dans la représentation réduite du monde envoyée à l'étape 4.

6. Les messages de régulation (*Control*) et de mise à jour de l'état (*RequestStatus* et *StatusUpdate*) sont déroutés pour agir sur le minimonde au lieu du niveau réactif.
7. Les règles qui émergent de la simulation/découplage sont envoyées au niveau réflexif (avec différentes activations).
8. La matrice correspondante (celle que l'agent *GoalSet* transporte) est envoyée au niveau algorithmique.
9. Les agents du groupe algorithmique, plus particulièrement les agents de régulation du groupe réactif, modifient l'activation au niveau réactif pour réaliser l'objectif (encouragement de l'activité des agents – capteurs compris – du niveau réactif selon l'objectif actuel du système).

Pour illustrer l'interaction entre le niveau algorithmique et le niveau réflexif et l'opération de découplage cognitif, nous nous concentrons ici sur les cas où plus d'un processus de découplage s'est produit. Le Tableau 5.2 présente des logs de simulation à la tâche pour un degré de 1/8.

Tableau 5.2 Extrait de log d'une simulation au degré de sensibilité 1/8

Série	Essai	Réponse	Simulation
Couleur	1	Correct	
	2	Correct	
	3	correct	1- couleur 2- forme
	4	Incorrect : forme	
	5	correct	
...			
Forme	1	Incorrect : couleur	1- forme 2- nombre
	2	Incorrect : couleur	1- forme 2- nombre
	3	Incorrect : couleur	
	4	Incorrect : couleur, nombre	1- nombre 2- forme
	5	Correct	1- forme 2- nombre
...			

Les deux premières réponses (essais 1 et 2 du Tableau 5.2 de la série « Couleur ») sont correctes et sont obtenues sans découplage cognitif. Dans le troisième essai de la série « couleur », un découplage cognitif a lieu pour départager deux réponses concurrentes (« couleur » et « forme »). Le système crée une simulation d'un monde possible où la règle de catégorisation « couleur » est activée et est observée comme menant à une mauvaise réponse. Dans ce monde possible, la deuxième règle à émerger est la règle de catégorisation « forme ». Dans le premier et le second essai de la série « Forme » (voir Tableau 5.2), après qu'une première mauvaise réponse, « couleur », a été sélectionnée, un découplage cognitif a lieu où « forme » est la règle de catégorisation sélectionnée en premier. Le monde possible est à l'image du monde perçu par le système avant le début du processus de découplage. « Couleur » y a été signalé comme une mauvaise réponse (l'agent « couleur » a donc été inhibé). L'agent « nombre », est donc le plus actif, et c'est donc la réponse qui lui correspond (« nombre ») qui sera fournie par le découplage cognitif, son application échouera. Dans le troisième essai de la série « forme », après une première mauvaise réponse (« couleur »), un premier découplage cognitif a lieu où la première règle activée est la règle de catégorisation « nombre », et la seconde est la « forme », menant à une deuxième erreur. Puisque le découplage avait permis l'activation de la règle de catégorisation « forme » comme deuxième règle, la bonne réponse sera produite à long terme.

Tableau 5.3 Performance du système (nombre d'essais moyen pour terminer la tâche) en fonction du degré de sensibilité

Degrés de sensibilité	1/6	1/8	1/10
Nombre d'essais	89.1	120.41	126.6

Le Tableau 5.4 présente la performance du système en fonction du degré de sensibilité de l'agent Goal. Plus le degré de sensibilité est élevé, plus faible sera le nombre d'essais requis pour effectuer la tâche. Faire varier le degré nous a permis de faire adopter différents profils au système (du profil à faible tendance au découplage cognitif à celui à forte tendance au découplage cognitif). Pour le degré « 1/6 », la performance du système était meilleure que pour les sujets humains. Le degré « 1/8 » était celui où nous obtenions des résultats les plus proches de l'humain, c'est celui que nous avons conservé pour les comparaisons à la tendance humaine. Nous avons utilisé les résultats pour les trois premiers facteurs à ceux des sujets humains. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.4. Plus le degré de sensibilité était élevé, plus la sensibilité du système (sa tendance à lancer une simulation) était élevée, donc, plus il y avait de simulation, plus le système était performant à la tâche (voir Tableau 5.3).

Tableau 5.4 Résultats moyen pour le degré de sensibilité 1/8

	Catégorie s complété es	Erreurs de persévérations	Nb essai
Échec de maintien	0,23	6	8,111111111
			120.41

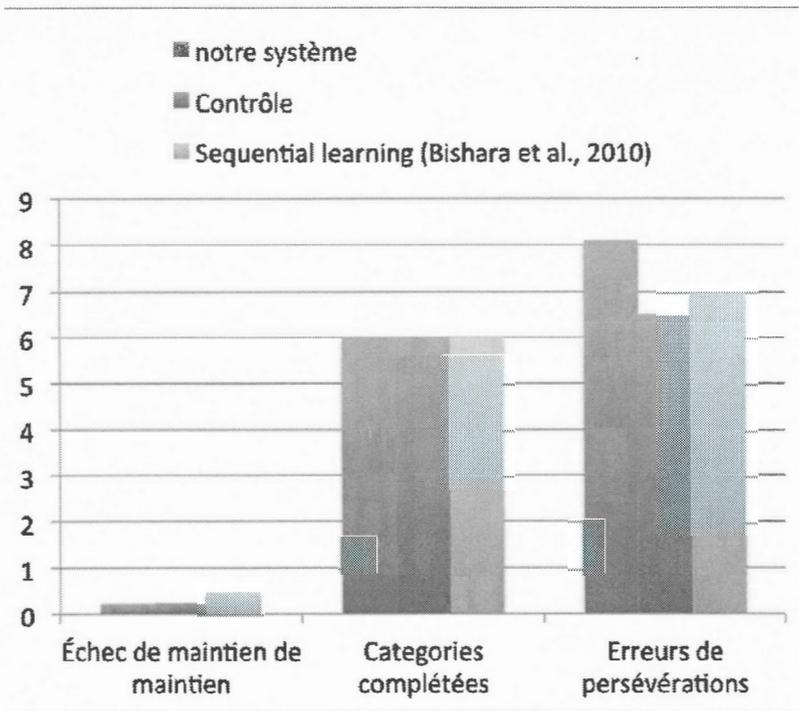


Figure 5.8 Résultats à la tâche de WCST – comparaison de notre simulation au degrés de sensibilité 1/8 et des résultats humains et d'un modèle de la tâche chez Bischara et al. (2010)

Nous avons concentré notre analyse sur quatre facteurs (voir Figure 5.8 et tableau 5.4):

- Nombre d'échecs dans le maintien de la règle après un certain nombre d'essais corrects consécutifs. La règle sera considérée comme assimilée après 10 réponses correctes consécutives.
- Nombre d'erreurs de persévération : le sujet continue à utiliser la règle de catégorisation précédente après un changement de règle.
- Nombre de catégories terminées : nombre moyen de catégories complétées.
- Nombre d'essais moyen pour compléter six catégories.

Au cours des simulations, nous avons pu observer deux types de mauvaises réponses : celles dues à une défaillance au stade de la découverte de la règle (niveau réflexif - l'échec au niveau du test d'hypothèses) et celles dues à une défaillance de l'inhibition (inhibition du niveau réactif par le niveau algorithmique - échec de la mémoire de travail chez le sujet humain). Le quatrième facteur, le nombre moyen d'essais pour mener à bien la tâche dans notre système était de 120.41 contre 101.12 chez des sujets humains sans pratique (Basso, Bornstein et Lang, 1999). Le nombre maximum de règles que le système a été en mesure d'appliquer pour ses 128 essais varie entre cinq et six (nombre moyen de 5,33), ce nombre est de six chez les sujets humains.

Notre système était capable de reproduire les mêmes tendances que chez les sujets humains, bien que la tendance à la persévération soit pire que chez le sujet humain. Nous pensons que ce résultat reflète un échec de l'inhibition au niveau des agents de contrôle, montrant un déficit au niveau algorithmique : un échec pour inhiber l'activité routinière qui a été établie par des expériences antérieures au niveau réactif. D'autre part, la faible valeur du facteur «défaut de maintenir la règle de catégorisation» montre une bonne flexibilité du système pour la sélection de nouvelles règles, validant son fonctionnement réflexif.

5.2.2.6 Discussion et conclusion

Nous avons été capables de confirmer nos hypothèses en partie. Comme nous l'avons écrit ci-dessus, l'erreur de persévération chez notre système sain est plus forte que chez le sujet sain humain. Cela peut notamment s'expliquer du fait d'un défaut d'inhibition de l'activité routinière, empêchant de totalement appliquer une rétroaction négative. Nous avons toutefois réussi à fournir des résultats proches de ceux observés chez le sujet humain ainsi que dans un autre modèle de cette tâche. Ces résultats ont été rendus possible dans notre architecture par une fonction qui n'a pas à notre connaissance était reproduite dans aucune autre architecture : le découplage cognitif, soit la capacité à simuler différentes stratégies dans un mini monde interne.

De plus, en faisant varier le degré auquel cette capacité est utilisée, nous avons pu reproduire différents profils de performance à cette tâche et rendre le système plus performant, augmentant aussi son optimalité (un critère important dans la section 1.3).

La simulation de la tâche de Wisconsin est une démonstration concrète de la façon dont les trois niveaux peuvent interagir pour produire un comportement complexe et flexible. Grâce à la WCST, nous étudions l'interaction entre les niveaux algorithmique et réflexif, et plus particulièrement, le lancement du découplage cognitif. Le découplage est un processus clé de cette simulation puisqu'il soutient le comportement délibératif par la génération et le test d'hypothèses. En cela, elle fournit un moyen d'évaluer les critères de séquentialité et réactivité, et la manière dont ceux-ci peuvent être combinés. La cognition réactive s'observe dans la réaction initiale (réactivité) du système à des stimuli. Grâce à la cognition algorithmique, le système s'adapte (adaptation essais-erreurs essentielle au critère d'adaptabilité présenté dans la section 1.3.1). Sur demande du niveau réflexif, la cognition algorithmique permet aussi de tester différentes hypothèses (découplage cognitif), et de cette opération émergera la séquence d'action (séquentialité) à exécuter par le système (l'action la plus probable et l'action à exécuter en cas d'échec à la suite de cette première action).

5.2.3 Raisonnement logique et tâche de Wason

Par le biais de la tâche de Wason, nous cherchons à démontrer les capacités de raisonnement hypothétique de notre architecture cognitive. C'est la tâche la plus complexe que nous avons réalisée dans le système (reposant sur le plus d'interactions et de fonctionnalités du système).

5.2.3.1 Hypothèses générales

- Par le biais de 4 profils cognitifs différents (fortement réactif, purement exécutif, faiblement réflexif, purement réflexif), nous serons capables de

reproduire l'éventail d'erreurs logiques et de succès observé chez l'humain pour cette tâche

- La simulation réussie de cette tâche utilisera la totalité des fonctionnalités décrite dans le Framework tripartite de Stanovich : niveau réactif, niveau algorithmique (contrôle cognitif et découplage cognitif), niveau réflexif (choix d'objectif et dispositions de pensées)

5.2.3.2 La tâche

La tâche de Wason est l'un des tests les plus connus en psychologie du raisonnement.

Un ensemble de cartes comportant une lettre capitale sur une face et un nombre à un seul chiffre sur l'autre est présenté au sujet. L'expérimentateur cache alors les cartes et en sélectionne quatre qui sont placées sur la table. Le sujet peut voir les quatre faces comme suit :

A D 3 7

Le sujet se voit alors informé que la règle suivante peut ou non s'appliquer à ces quatre cartes :

Si un A se trouve sur l'une des faces de la carte, alors il se trouve un 3 sur l'autre face de la carte.

On demande alors au sujet lesquelles des quatre cartes devraient être tournées pour décider si la règle s'applique ou non aux cartes présentées.

Logiquement, les sujets devraient choisir comme réponse « A » et « 7 » puisque la règle ne devient fausse que si une carte est trouvée qui a un « A » d'un côté et n'a pas de « 3 » de l'autre côté. Pourtant, la performance est assez faible : seulement 10%. Beaucoup de sujets commettent l'erreur de ne pas sélectionner la carte « 7 ». Or, si un « A » se trouvait derrière le « 7 », la règle « Si un "A" se trouve sur l'une des faces de la carte, alors il se trouve un "3" sur l'autre face de la carte » se révélerait fausse et ne

s'appliquerait pas. D'autres sujets commettent en revanche l'erreur de sélectionner la carte « 3 », or si autre chose qu'un « A » se trouvait à l'envers de cette carte, la règle « Si un A se trouve sur l'une des faces de la carte, alors il se trouve un 3 sur l'autre face de la carte » ne serait pour autant pas fausse. On a donc ici deux styles d'erreurs logiques : la sélection de la carte non nécessaire « 3 » et l'absence de sélection de la carte nécessaire « 7 ». Les sujets appliquent le Modus Ponens (implication), mais échouent dans l'application du Modus Tollens (contrapposition). Pour Evans et Lynch (1973), cette tâche met en évidence le biais dit d'appariement (*matching bias*) : les sujets commettent une erreur, car ils essaient d'apparier leur réponse aux termes qui sont utilisés pour formuler l'énoncé. Le pourcentage de réponses positives des sujets ayant répondu le plus lentement est plus élevé que le pourcentage de réponses positives des gens ayant répondu le plus rapidement.

Cet effet est considérablement réduit par l'introduction d'un contenu déontique familier. Nous nous référerons à cette tâche comme tâche déontique de Wason. En voici un exemple (Noveck *et al.*, 2007a) :

Imaginez que vous êtes agent de police. Votre mission consiste à vous assurer que vos concitoyens respectent certaines règles. Les quatre cartes ci-dessous vous donnent des informations sur des personnes consommant une boisson dans un bar. Sur une des deux faces, figure l'âge de la personne et sur l'autre la boisson qu'elle consomme.

« Boire une bière » « Boire un coca » « 16 ans » « 22 ans »

Règle : Si une personne boit de l'alcool alors elle doit avoir plus de 18 ans.

Laquelle ou lesquelles de ces quatre cartes est-il nécessaire de retourner pour décider si la règle est ou non violée?

Les réponses fournies par la plupart des sujets sont correctes, alors que la logique de l'énoncé est la même que lors de la tâche abstraite : le biais d'appariement disparaît. Des effets de facilitation ont aussi été observés entre différentes tâches déontiques,

lorsque celles-ci étaient précédées par la tâche déontique présentée ci-dessus (Cox et Griggs, 1982), ou encore dans le cas où l'énoncé met en jeu la violation d'un contrat social (Cosmides, 1989). D'une manière générale, la réalisation par le sujet d'une tâche « facilitée » et ensuite d'une tâche abstraite, n'améliore pas les résultats à la tâche abstraite. Il n'y a pas de transfert de facilitation (Evans, Newstead et Byrne, 1993).

5.2.3.3 Deux explications : Modèles mentaux et théories des processus duaux

Les théories des processus duaux, et en particulier la théorie heuristique-analytique (Evans, 1989), rendent compte de tous ces effets. La théorie d'Evans s'articule autour de trois principes (Evans, 1998) : le principe de singularité, le principe de pertinence, le principe de « satisfaisance ». Le principe de singularité (imposé par la capacité limitée de notre système cognitif) désigne la construction d'un modèle mental unique représentant la situation hypothétique. Le principe de pertinence (heuristique) est représenté par le fait que ce modèle est conçu pragmatiquement par rapport au contexte. Différents aspects du problème sont représentés de manière sélective sur la base des informations pertinentes trouvées en mémoire. La pertinence est jugée grâce à des principes de crédibilité et probabilité. Ces représentations sont soumises au système d'évaluation analytique d'après le principe de « satisfaisance » : le système fonctionnera avec la représentation initiale peut-être biaisée tant qu'il ne se heurtera pas à une raison de l'abandonner. Les biais se produisent aussi quand le sujet a la capacité logique de résoudre le problème puisque l'information logique peut être jugée non pertinente au stade heuristique.

Ainsi, dans la tâche abstraite, deux facteurs linguistiques déclenchent des heuristiques : la négation (heuristique « not ») et le conditionnel « si » (heuristique « if »). Ces deux heuristiques dirigent l'attention du sujet sur les propositions qu'elles caractérisent. Evans suggère que, dans la tâche de Wason abstraite, seule la phase heuristique est concernée. En revanche, dans la tâche déontique, la manière de

déterminer la pertinence n'est plus basée sur des facteurs linguistiques, mais plutôt sur des sources pragmatiques de pertinence, ce qui explique la disparition du biais d'appariement (Evans, 2006b).

Globalement en accord avec l'explication heuristique-analytique d'Evans des résultats de la tâche Wason, Stanovich, s'appuyant sur les résultats de plusieurs sujets dans une version verbalisée de la tâche (Stanovich, 2009), souligne toutefois le fait que, même lorsque le traitement de la tâche est pris en charge par les processus de type 2, les sujets peuvent encore échouer à la tâche. Plutôt que de simuler un monde possible complet, ils ne considèrent que l'antécédent et le conséquent spécifiés dans l'énoncé et ne font ainsi qu'appliquer la règle « p implique q » n'utilisant ainsi que la cognition associative séquentielle pure. Prendre en compte explicitement le principe de falsifiabilité, principe par lequel on cherche à déterminer dans quelles conditions, ou dans quel monde possible, une déclaration est fausse, aurait permis d'éviter ce type d'erreur, puisque la règle « non Q implique non P » aurait été considérée et peut-être simulée.

La notion de *Mindware* est importante pour Stanovich pour expliquer les différents types d'erreur rencontrés dans les processus de type 2. Les *mindwares* sont les règles, connaissances, procédures et stratégies sur lesquelles un sujet peut s'appuyer pour faciliter la prise de décision (Perkins, 1995). Pour Stanovich tous les *mindwares* ne sont pas déclaratifs. Les dispositions de pensée (*thinking dispositions*) qui sont « des stratégies et la disposition à traiter l'information d'une certaine manière » (Stanovich 2009, p 31) en sont un exemple. La tendance à collecter des informations avant de prendre une décision, à prendre en compte différents points de vue, la pensée contrefactuelle, la pensée catégorique et le dogmatisme sont des exemples de ces dispositions. Le sujet peut ainsi organiser ses objectifs ou établir une hiérarchie d'objectifs. Certaines personnes tout en ayant instancié la *mindware* de pensée

alternative pourraient avoir omis de considérer la négation de la règle ou omis d'intégrer d'autres informations que celles directement liées à la première hypothèse.

La théorie des modèles mentaux est une autre théorie expliquant ces résultats. Pour construire leurs modèles mentaux (Johnson-Laird, 1995), les gens s'appuieraient sur les capacités (limitées) de leur mémoire de travail et représenteraient donc ce qui est vrai et non ce qui est faux (principe d'économie). Ainsi lorsque les individus raisonnent, ils n'auraient au départ qu'une représentation initiale limitée, mais cette représentation est adaptative : par son enrichissement, ils pourraient éviter les erreurs. Le raisonnement se déroule ici en 3 étapes (Noveck *et al.*, 2007b) :

- Représentation : construction des modèles mentaux des prémisses
- Production de la conclusion : recherche de modèles compatibles avec l'ensemble des modèles construits
- Évaluation : tester la validité en construisant des modèles susceptibles de la réfuter

La difficulté d'une tâche s'évalue de la manière suivante : plus on a besoin de construire de modèles, plus la tâche est difficile. L'erreur de logique rencontrée dans la tâche de Wason est aussi explicable selon cette théorie : le Modus Tollens aura besoin de plus de modèles que le modus Ponens pour être réalisé. Cette théorie défend un aspect sémantique du raisonnement où les représentations internes préserveraient les relations spatiales (propriétés structurelles du monde plutôt que propriétés structurelles de la phrase uniquement). Le sujet a une connaissance du sens lié aux termes logiques (« tout », « une partie », « et » etc.) et il utilise ces notions pour construire des scénarios. Selon cette théorie, les structures neurales anatomiquement liées au traitement visuospatial seraient utilisées dans le raisonnement logique (qui requerrait de la manipulation spatiale). Dans la théorie des modèles mentaux, on ne postule pas l'utilisation de mécanismes cognitifs distincts en fonction de l'inférence.

5.2.3.4 Les simulations de la tâche

La tâche de Wason a souvent été utilisée en psychologie du raisonnement pour mettre en évidence les différents styles de raisonnement utilisés par un sujet humain dans la résolution d'un problème complexe (Evans, 2006a). Elle a toutefois moins été utilisée pour l'évaluation des capacités de raisonnement dans le domaine des architectures cognitives. La tâche de Wason a été utilisée précédemment pour illustrer la capacité d'une architecture à généraliser et pour illustrer la possibilité d'apprendre et de réaliser un raisonnement sensible au contexte en utilisant des mécanismes généraux, non spécifiques au domaine (dans SPAUN). Spécifiquement, dans SPAUN, elle est utilisée pour illustrer la généralisation sur différents contextes dans les versions pragmatiques de la tâche (Eliasmith, 2013), en utilisant les différents mécanismes que nous avons présentés dans la section 1.2.2. Nous avons précédemment reproduit la version déontique de cette tâche dans une autre architecture multi-agents (CAAS) (Larue, 2011). Dans ce système, le réseau réactif fonctionnait différemment et il n'existait pas de niveau réflexif. Les agents appartenaient là aussi à un réseau d'accointances, les agents équivalant aux agents de contrôle dans ce système ne faisaient pas varier directement les distances entre agents. Utilisant un réseau de connaissances similaires, la réalisation de cette tâche reposait alors essentiellement sur le niveau réactif. Ce système échouait dans les versions abstraites de la tâche et réussissait dans la version déontique. Ce sont les résultats faibles de l'architecture CAAS à cette version de la tâche et l'impossibilité de reproduire celle-ci dans une autre architecture cognitive qui nous ont fait prendre conscience de la nécessité de la prise en compte des processus duaux dans la conception d'une architecture cognitive.

Dans la mesure où la variété de résultats humains à la tâche abstraite nous semblait plus intéressante pour évaluer la rationalité de cette architecture, nous n'avons reproduit que cette expérience ici.

5.2.3.5 Expérience

Hypothèses

Il est possible dans notre système de rendre compte de l'étendue de ces résultats (réponse complète, incomplète et fausse) grâce à quatre profils :

- Les trois premiers profils rendront compte de la proportion de 90% sujets humains qui fournissent des réponses qui ne sont pas acceptables selon les normes logiques.
- Le profil fortement réactif rendra compte de manière plausible dont les sujets fournissent une réponse logiquement incorrecte. Le niveau réactif sera impliqué dans la sélection de la réponse.
- Les deux autres profils (purement exécutif et faiblement réflexif) obtiendront une réponse correcte, mais incomplète. Dans ces profils, le découplage cognitif sera impliqué. Les niveaux réactif et algorithmique seront impliqués dans la sélection de la réponse. Le profil faiblement réflexif réalisera un découplage cognitif incomplet.
- Le quatrième profil, suite à un traitement plus long, fournit une réponse complète. Dans ce profil, niveaux réactif, algorithmique et réflexif participeront à la sélection de la réponse. Les dispositions de pensées influenceront le découplage cognitif.

Procédure expérimentale

De nouveaux agents, les agents *ThinkingDispositions*, sont utilisés au niveau réflexif pour moduler la manière dont le découplage cognitif est réalisé au niveau algorithmique, ainsi que la manière dont la collecte de l'information est réalisée par les agents *RequestStatus*. Ces agents interagissent directement avec les agents du niveau algorithmique pour déterminer la manière dont le découplage cognitif sera réalisé. Ils font ceci en déterminant: 1) quelle information sera récupérée afin de

construire la représentation secondaire, 2) la manière dont le découplage cognitif sera réalisé. Ici, nous introduisons deux dispositions de pensées: l'agent *TDNo* et l'agent *TDThinkExtensively*. L'agent *TdNo* n'a actuellement qu'une seule action : induire l'activation des agents *Knowledge* qui sont connectés à la connaissance « No ». L'agent *TDThinkExtensively* agit de deux manières : 1) en guidant les agents *RequestStatus* dans la collecte de plus d'informations que celles initialement contenues dans la représentation réduite (un degré additionnel de connexion dans le réseau sémantique); 2) en forçant le découplage cognitif à traiter l'information fournie par les capteurs un à un (en stimulant l'envoi de messages d'activation aux capteurs un par un).

Les rôles *RequestStatus*, *StatusUpdate*, et *Control* étaient portés chacun par deux agents.

Le système a été testé par le biais d'un script dans ces quatre différentes conditions :

- Fortement réactive : Dans cette condition, la période de temps écoulée entre chaque message envoyé par les agents de contrôle est 1s (une fréquence de message passant de un message par seconde), ce qui mène à un système réactif plus fort (un qui n'est pas contrôlé comme un système normal où la période est de 500 ms).
- Purement exécutif : Dans cette condition, le temps qui s'écoule entre chaque message envoyé par les agents de Contrôle est de 500 ms. Le temps de réponse minimum des effecteurs est de 1200 ms.
- Faiblement réflexif : Dans cette condition, l'agent *TDThinkExtensively* est activé. Ceci a l'effet d'augmenter la tendance au découplage cognitif dans le système, en réduisant le nombre de cycles sans sélection d'un objectif avant que le système ne lance une opération de découplage cognitif.
- Purement réflexif : La même condition que précédemment avec l'activation additionnelle d'agent *TDNo*. Cela rend le système plus enclin à inclure des informations niées ou contrefactuelles dans la représentation du monde utilisée pour le découplage cognitif.

Par le biais de ces quatre conditions, nous sommes capables de reproduire les différentes manières dont on peut échouer cognitivement à une tâche de Wason, et les différents styles cognitifs qui y participent. Pour reproduire l'heuristique linguistique que nous avons précédemment décrite (voir section 5.2.3), nous avons lié les connaissances A et 3 respectivement aux connaissances P et Q. et ajouté au niveau réactif un lien entre P et Q pour retranscrire la règle « P implique Q » (avec donc le lien dans le sens $P \rightarrow Q$) : cette modification retranscrit dans le système que la règle logique qui correspond au *Modus Ponens* est sur-apprise (voire ici innée). Ainsi : « Si il y a un A d'un coté de la carte alors il y a un trois de l'autre coté » est retranscrite par le lien entre A et 3 et, respectivement, P et Q qui sont eux-mêmes liés entre eux. De plus, pour reproduire les capacités logiques de plus haut niveau, nous avons initialisé dans notre niveau réflexif des agents *Goal* avec à la fois les règles $P \rightarrow Q$ et $\text{not}Q \rightarrow \text{not}P$. Les cartes « A », « D », « 3 » et « 7 » sont présentes dans l'environnement du système sous la forme de fichiers textes que les capteurs du système sont équipés pour lire (grâce à Tesseract, voir ci-dessus).

«modusponens»			«modustollens»		
	p	q		notQ	notP
p	0	1	notQ	0	1
q	0	0	notP	0	0

Figure 5.9 matrices « modusponens » et « modus tollens »

5.2.3.6 Résultats

Les quatre conditions suivantes illustrent quatre degrés (progressivement croissants) de réflexivité mis en œuvre dans notre système :

- Fortement réactif
- Purement exécutif
- Faiblement réflexif
- Purement réflexif

Les conditions fortement réactives, purement exécutives et faiblement réflexives rendent compte de la proportion de 90% de réponses fausses ou incomplètes, alors que les purement réflexifs rendent compte des 10% de réponses correctes et complètes.

Fortement réactif :

Les agents capteurs transmettent le contenu de la carte aux agents *Knowledge* auxquels ils sont liés qui se chargeront d'activer les agents *Knowledge* « A », « 3 », « D » et « 7 ». De plus, puisque « A » et « 3 » sont aussi présents dans l'énoncé, comme la règle à être vérifiée, « A » et « 3 » sont des connaissances qui se retrouvent naturellement plus activées que les connaissances correspondant aux deux autres cartes. Ainsi, « A » et « 3 » sont fortement actifs et il n'y a pas suffisamment de temps pour que le niveau supérieur (algorithmique) soit significativement impliqué dans la production d'une réponse (notamment par une inhibition ou une excitation de certains éléments du niveau réactif) (voir Figure 5.10, temps de réponse moyen de 1400 ms). Le système fournit alors la réponse de « A » et « 3 ». Pour cette version de la tâche, le système adopte une stratégie fortement réactive et fournit ainsi la mauvaise réponse. Ce système fortement réactif est l'équivalent d'un humain dont la réponse à la tâche reposerait uniquement sur les processus de type 1.

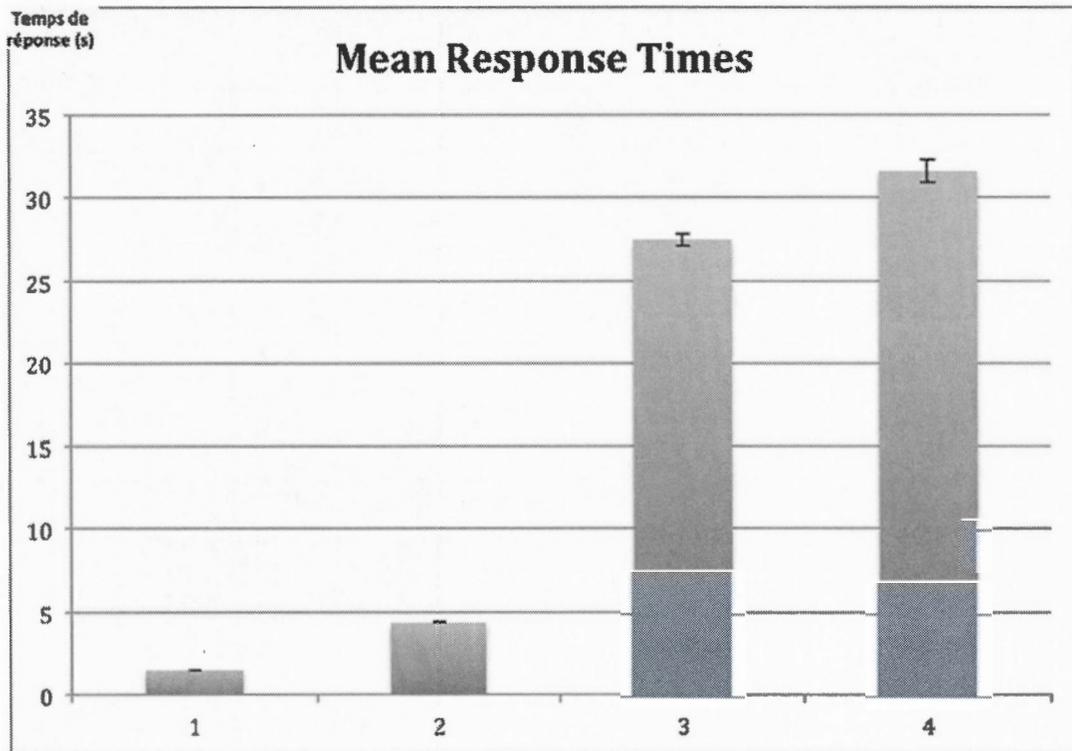


Figure 5.10 Temps de réponse moyens (en secondes) et barre d'erreurs (SEM – erreur standard de la moyenne) pour quatre conditions 1= fortement réactif, 2=purement exécutif, 3 = faiblement réflexif, 4= Purement réflexif (Larue, Poirier et Nkambou, 2013b).

Purement exécutif :

L'activation dans le système est d'abord similaire à celle de la première condition. Toutefois, les agents *RequestStatus* du niveau algorithmique ont une fréquence d'envoi de message plus élevée que les agents réactifs. Le statut des agents *Knowledge* peut alors être utilisé pour calculer une représentation réduite qui est envoyée aux agents *Goal*. Étant donné que cette représentation réduite contient des éléments qui correspondent au contenu de la matrice qu'il porte, l'agent *Goal*, qui contient la matrice de l'objectif « modusponens », est activé (Figure 5.9). Malheureusement, les informations se trouvant dans la représentation réduite ne sont

pas suffisantes pour déclencher l'activation de la règle « $-Q \rightarrow -P$ ». Cette solution est donc incomplète, mais mène tout de même à une meilleure réponse du système. Le système est capable d'inhiber la connaissance « 3 » : en effet, la règle lorsqu'elle est déclenchée renforce la carte qui a permis son activation, donc P, soit « A ». En revanche, puisque dans cette matrice la valeur de zéro est assignée à la distance de Q à P, soit $Q \rightarrow P$ mènera à des messages d'inhibition envoyés à « Q », notamment, parce que la matrice d'objectif de « modusponens » rend compte du fait que « $P \rightarrow Q$ » n'est pas équivalent à « $Q \rightarrow P$ » (figure 5.9). Puisque 3 est lié à Q, son activation diminuera aussi. Ce résultat a été reproduit sur 97 des 100 essais réalisés dans cette condition. Le temps de réponse est plus élevé puisque le niveau algorithmique est impliqué dans la sélection de la réponse. Cet exemple illustre la manière dont une réponse incomplète peut encore être obtenue même si les processus de type 2 sont impliqués dans le choix de la réponse.

Faiblement réflexif :

Le temps préalable au lancement d'une opération de découplage cognitif est diminué : moins de cycles sans sélection d'une action (le recrutement d'un agent *Goal*) sont nécessaires pour lancer le découplage cognitif. Malgré le lancement d'une opération de découplage cognitif, le système échoue. En effet, les agents *SecondaryRepresentation* qui constituent le monde possible simulé ne contiennent que les agents *Knowledge* qui étaient actifs au niveau réactif en lien avec la règle $P \rightarrow Q$. L'énoncé fait en effet davantage état des cartes « A » et « 3 », que des autres cartes. Ceci mène à un biais focal dans le système qui ne considère que les informations liées à ces deux cartes.

De ce fait, l'opération de découplage cognitif n'active que la règle $P \rightarrow Q$ au niveau réflexif, puisqu'aucune des informations contrefactuelles n'est active au niveau réactif. Comme précédemment le système a échoué à la tâche : il ne fournit que la

réponse incomplète « A ». Alors que cette stratégie ne peut pas résoudre de tâches logiques complexes, elle résout des tâches moins complexes telles que la tâche de tri du Wisconsin (voir section 5.2.2). Nous avons reproduit ce résultat 92 fois sur les 100 fois où le script a été lancé.

Purement réflexif :

Deux dispositions de pensée ont été ajoutées au niveau réflexif. Ces agents modifient le traitement de l'information à différents niveaux dans le système. L'agent *TDThinkExtensively* modifie le fonctionnement des agents *RequestStatus* pour que, en plus du statut des agents *Knowledge* (le nombre de messages envoyés par cet agent durant une période), ils demandent aussi leur « in status », c'est-à-dire à quels agents ils sont connectés et le nombre de messages qu'ils ont reçus de ceux-ci (même si ce nombre est bas ou zéro). En utilisant cette information additionnelle, les agents *StatusUpdate* sont capables de calculer une représentation réduite plus complète qui inclue aussi les liens non visités dans le réseau d'agents *Knowledge*. Dans de futures situations, le système considérera ainsi certaines situations qui n'ont pas été précédemment considérées. Les agents *StatusUpdate* ont en revanche plus de messages de statut à traiter, et cela prend plus de temps pour recruter des agents *Goal*. Utiliser ce type de dispositions de pensée rend du coup le système moins réactif et plus lent, mais l'opération de découplage cognitif lancée dans de telles conditions rend le système capable de considérer plus d'hypothèses que celles qui résultent du biais focal initial induit par l'énoncé.

L'agent *TDThinkExtensively* modifie aussi le traitement du découplage cognitif en le forçant à considérer les informations en provenance des capteurs une par une (i.e. chaque carte présentée au sujet). Ces actions ne sont toutefois pas suffisantes pour mener le système à la bonne solution. Il faut encore que le système considère la règle $\text{not}Q \rightarrow \text{not}P$.

Grâce aux agents *TDNo agent*, le découplage cognitif peut considérer les informations contrefactuelles (« notQ » et « notP ») puisque les agents *Knowledge* correspondants (représentant les connaissances « notQ » et « notP ») sont liés à l'agent *Knowledge* « No » (qui représente la négation dans le système). L'activation des agents correspondants sera ainsi visible dans la représentation qui est envoyée aux agents *Goal* pour activation. Le « modustollens » sera ainsi activé. De la même manière que lors de la WCST, lorsque le découplage cognitif est terminé, l'activation résiduelle des agents *Goal* « modusponens » et « modustollens » augmentera alternativement l'activation des agents *Knowledge* pour que leur activation petit à petit se rapproche de la matrice d'objectif, menant ainsi à l'activation de « A » et « 7 ». Nous avons été capables de reproduire ce résultat dans cette condition dans 87 des 100 essais. Les temps de réponse étaient significativement plus grands (voir figure 5.10) puisqu'à la fois les niveaux algorithmique et réflexif (pour un découplage cognitif complet) intervenaient dans la sélection de la réponse. Ce résultat correspond au résultat psychologique produit par les 10% de sujets capables de fournir la bonne réponse. L'ensemble des étapes précédemment décrites est présenté par condition dans la figure 5.11.

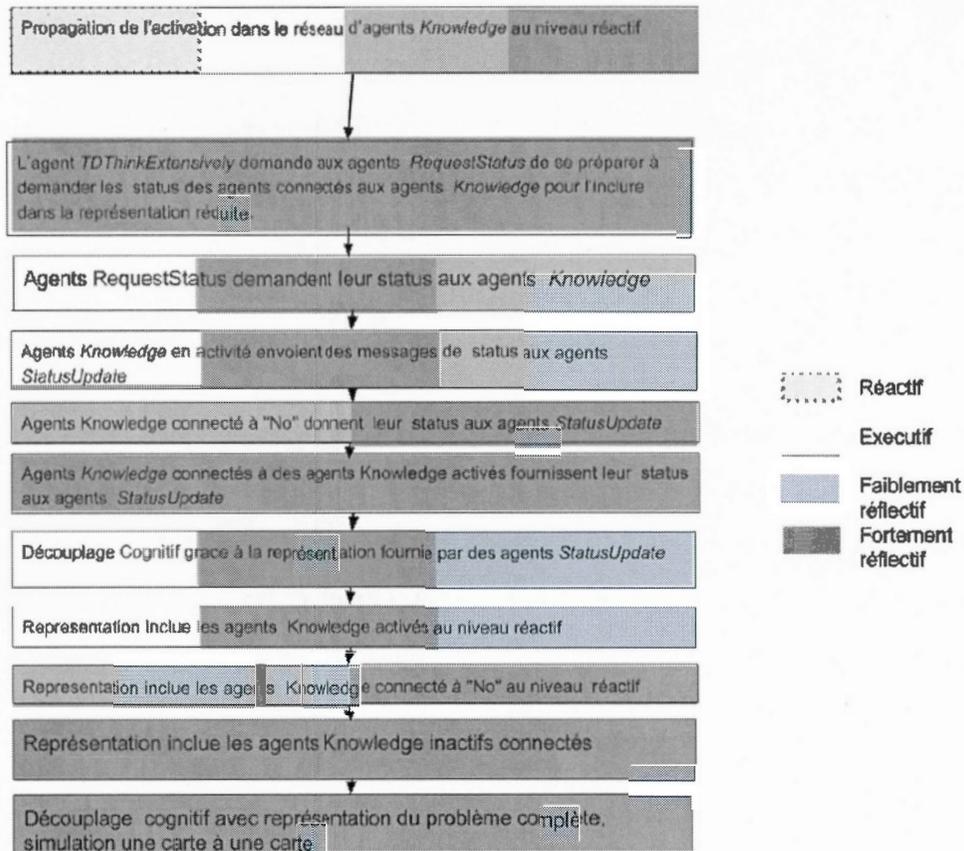


Figure 5.11 Étapes de résolution de la tâche en fonction des 4 conditions

5.2.3.7 Discussion et conclusion

Cette simulation est à notre connaissance la première simulation détaillée basée sur une implémentation des théories des processus duaux qui rend compte de l'ensemble des comportements observés à la tâche abstraite de Wason. En prenant comme théorie de la cognition pour cette architecture le Framework tripartite de Stanovich, en particulier le niveau réflexif et son action de contrôle sur le découplage cognitif par l'entremise des dispositions de pensées, nous avons réussi à reproduire la variété de réponses rencontrées (complète, incomplète ou erronée) à une tâche de Wason. Bien que cette implémentation soit basée sur une explication duale de la cognition, les résultats que nous avons obtenus sont aussi compatibles avec la théorie des modèles

mentaux. Le modèle mental utilisé pour résoudre la tâche serait construit grâce aux interactions des différents composants de notre modèle. Les modèles construits pour résoudre la tâche dépendraient des différents profils cognitifs que nous avons simulés. Un profil purement réactif, par exemple, ne construirait pas un modèle mental complet pour réaliser la tâche, et ce modèle mental incomplet serait responsable de l'échec. De plus, le biais focal sur l'énoncé serait aussi compatible avec l'explication du biais d'appariement dans la construction des modèles mentaux.

Le profil fortement réactif fournit une explication plausible de la manière dont l'humain peut fournir une réponse logiquement fautive au problème. Cette réponse est la moins coûteuse cognitivement (et, parfois la plus adaptée dans un contexte réel). Par le biais des profils purement exécutifs et faiblement réflexifs, nous avons pu rendre compte d'une erreur moins expliquée dans la littérature, la manière dont le sujet peut fournir une réponse correcte, mais incomplète à la question. Ces erreurs d'après Stanovich ont lieu même lorsque le système a pourtant utilisé ses capacités analytiques (au niveau algorithmique et réflexif) pour deux raisons :

- Le manque d'une disposition de pensée favorisant le raisonnement contrefactuel ;
- Le manque d'une disposition de pensée menant le système à penser extensivement à un problème.

Le profil purement réflexif doté de ces deux dispositions de pensée a été le seul à mener à une réponse correcte et complète. Toutefois, le système purement exécutif, bien que ne fournissant pas une réponse complète, est celui qui est capable de fournir une réponse partielle correcte tout en utilisant le moins de ressources computationnelles (et donc le moins de temps).

Plus généralement, par l'utilisation du découplage cognitif et des dispositions de pensée, nous avons introduit un moyen de corriger la tendance naturelle de notre

système au biais focal du traitement de l'information, cela fournit donc un moyen d'améliorer le potentiel réflexif du système dans des situations où le temps est disponible. Ces deux propriétés nous ont permis de démontrer comment notre architecture peut reproduire le type de rationalité que l'on retrouve chez l'humain.

5.2.4 Émotions et neuromodulation : tâche de Stroop émotionnelle

Nous utilisons ici la neuromodulation et les émotions pour moduler le comportement de notre système. Nous pensons que l'aspect neurobiologique est primordial dans un modèle des émotions. Nous présentons ainsi une approche intégrée dans laquelle les aspects conceptuels et biologiques des émotions sont mis en œuvre et où les effets émotionnels ne sont pas prédéfinis (par exemple, une fonction spécifique pour chaque émotion). Les émotions agissent sur le niveau fonctionnel du système et émergent de multiples interactions autant sur le plan conceptuel que sur le plan biologique. Comme une autre approche dynamique des émotions actuellement poursuivie (Treur, 2013), nous considérons les émotions comme faisant « partie d'un certain nombre de cycles d'adaptation et de régulation interconnectés » (Treur 2013 p2). Cependant, nous nous concentrons plus dans notre travail sur les effets bidirectionnels, des substrats biologiques aux aspects fonctionnels de l'architecture (contrôle cognitif notamment), plutôt que les fonctions de plus haut niveau influencées par les émotions (contagion sociale, et ainsi de suite). La tâche de Stroop émotionnelle met en jeu à la fois les aspects conceptuels et biologiques de l'émotion.

5.2.4.1 Hypothèses générales

- Nous sommes capables de simuler les émotions à la fois sémantiquement et cognitivement.
 - L'aspect sémantique sera rendu possible grâce à la carte conceptuelle du système qui contient des mots émotionnels qui sont liés aux autres

mots (la distance entre ces derniers dépendant de la valence émotionnelle des mots).

- En ce qui concerne l'aspect cognitif, la neuromodulation intègre dans le système la composante physiologique des émotions et ainsi d'affecter la dynamique de traitement des différentes opérations dans l'architecture.
- Plus particulièrement, grâce aux neuromodulateurs nous pensons que nous pouvons implémenter ce que Lindquist nomme le *core affect*, une opération qui dans notre système permet de réaliser la conceptualisation située des émotions en assimilant physiologiquement celle-ci à un patron dynamique de modulation émotionnelle. Les émotions qui en résultent seront des patrons d'activité pour le « message passing » où la neuromodulation pourra augmenter la sensibilité des agents aux aspects émotionnellement saillants de l'environnement et porter l'attention du système sur ces aspects.

Nous étudierons les émotions qui en résultent à l'aide d'une tâche de Stroop émotionnelle. Elle met en évidence les aspects sémantiques et cognitifs de l'émotion.

5.2.4.2 La tâche de Stroop émotionnelle

Tout comme la tâche de Stroop sémantique, la tâche de Stroop émotionnelle est une variation de la tâche de Stroop classique (1935). Dans la tâche de Stroop classique, il était demandé au sujet de réaliser un objectif, nommer la couleur dans laquelle était écrit un mot, ce mot étant lui même une couleur, en opposition avec sa réponse habituelle, lire le mot de couleur. Dans la tâche de Stroop émotionnelle, le sujet doit nommer la couleur dans laquelle est écrit un mot émotionnel. Le contenu émotionnel entre en compétition avec l'objectif et détourne l'attention. On est donc ici plus dans le cas d'une intrusion émotionnelle que dans l'interférence d'un processus avec un autre.

La procédure expérimentale est similaire à la tâche de Stroop classique (interférence mot lu/couleur vue) et à la tâche de Stroop sémantique (interférence sémantique) : on présente au sujet des cartes où un mot émotionnel ou neutre est écrit dans une couleur et on lui demande de nommer cette couleur. Cette tâche a été très utilisée dans le cadre de pathologies « émotionnelles », notamment la dépression (Gotlib et McCann, 1984), voir Williams, Mathews et MacLeod (1996) pour une revue complète. La primauté de *schemata* négatifs chez les sujets dépressifs expliquerait leur latence de réponse lorsqu'ils sont confrontés à des stimuli (mots) négatifs. Les *schemata* une fois invoqués interféreraient avec la tâche de dénomination de couleur lorsque le mot écrit possède un contenu négatif en ralentissant le traitement de l'information. La valence émotionnelle déterminerait l'interférence. Les mots à contenu neutre, quant à eux, ne produisent pas le même effet.

L'interférence proviendrait d'un mécanisme affectif préconscient quasi automatique (Bargh et Chartrand, 1999). Le modèle le plus général expliquant l'ensemble des résultats à cette tâche dans les différentes pathologies est celui de Mathews et MacLeod (1994). Ceux-ci, dans la lignée de Oatley et Johnson-Laird (1987), suggèrent que le rôle des émotions est de modifier le traitement de l'information pour faire face à des nouvelles situations nécessitant une intervention rapide. L'anxiété, notamment, mettrait le sujet humain en état d'hypervigilance de façon à ce qu'il observe son environnement et détecte tout stimuli menaçants. Dans cette condition, le sujet recourrait à un traitement automatique plutôt qu'à un traitement stratégique qui ferait un usage extensif de la mémoire et des stratégies passées. Or, le traitement automatique, dans la tâche de Stroop émotionnelle, interfère avec l'objectif de dénomination de la couleur des mots.

5.2.4.3 Simulation informatique

À l'inverse de la tâche de Stroop classique et de la tâche de Stroop sémantique (section 5.2.1), il n'y a pas actuellement de simulations de cette tâche de Stroop dans

des architectures cognitives. Williams, Matthews et MacLeod (1996) suggèrent toutefois une extension au modèle de Cohen et coll. (1990). La saillance émotionnelle s'y répercuterait sur des unités liées à l'expérience personnelle. Elle pourrait aussi être modélisée par un contrôle neuromodulateur de la sensibilité des unités ayant une histoire d'associations avec les éléments de peur ou de menace.

Ajouter des émotions à une architecture cognitive ou à un agent intelligent n'est en revanche pas une nouveauté. Divers modèles psychologiques des émotions ont été intégrés dans les architectures d'agents, pour jouer un rôle dans la sélection d'objectifs (Frijda and Swagerman, 1987), la génération de croyance (Marsella & Gratch, 2002), l'attention et l'apprentissage. Les effets émotionnels ont aussi été utilisés dans des architectures cognitives existantes pour modifier le comportement à plus grande échelle (c.-à-d., sur l'ensemble de l'architecture) : LIDA (Faghihi, Fournier-Viger et Nkambou, 2012), HCogAff (Sloman et Chrisley, 2003), SOAR (Chown, Jones et Henninger, 2002). Comme d'autres approches (Velasquez, 1998), nous pensons que les aspects neurobiologiques sont primordiaux dans une implémentation approfondie des émotions. Par le biais de cette tâche, nous souhaitons illustrer le fonctionnement d'une approche intégrée où les aspects neurobiologiques et conceptuels coexistent et interagissent. La fonction des émotions n'est pas prédéfinie (une fonction unique pour une émotion). Nous concevons les émotions comme des phénomènes qui agissent au niveau fonctionnel du système de différentes manières. L'émotion influence le système et en émerge.

5.2.4.4 Expérience

Hypothèses :

En condition normale : Lorsqu'un concept émotionnel est présenté au système, toutes les émotions devraient émerger dans le système (effet de la dopamine), ce qui devrait mener aussi à une activation des neuromodulateurs liés aux expériences négatives (sérotonine) au niveau réactif. Les agents de contrôle auront alors plus de travail à faire pour inhiber l'activité des agents Knowledge (liés aux mots à valence émotionnelle) qui ne sont pas compatibles avec l'objectif du système : nommer la couleur. De plus, lorsque le système est confronté à des émotions négatives, comme la peur ou la tristesse, l'activation de la sérotonine résultante change la dynamique du système : les agents de contrôle (contrôle cognitif du système) deviennent hypoactifs, résultant en un temps de réponse plus élevé pour les mots à connotation émotionnelle.

Condition à faible sérotonine et dopamine : Cette condition accentue l'effet décrit ci-dessus (agents de contrôle hypoactifs). De ce fait, les temps de réponse sont encore plus élevés. Le système est donc plus lent, « déprimé ».

Hypothèse 1 : Le temps de réponse sera plus élevé dans les deux conditions (« normales » et « déprimé ») pour les mots émotionnels;

Hypothèse 2 : Le temps de réponse sera plus élevé dans la condition « déprimé » à la fois pour les mots neutres et pour les mots émotionnels.

Procédure expérimentale

Nous utilisons ici une procédure similaire à celle de Gotlib et McCann (1984) en présentant un bloc de 160 cartes mélangeant 80 mots émotionnellement négatifs (« mort », « araignée », « cancer », etc.) et 80 mots neutres (« nature », « cannelle », « bus », etc.) au système. Ces mots sont écrits sur chaque carte dans l'une de quatre couleurs différentes (rouge, bleu, vert, jaune). Nous avons effectué la tâche dans deux

conditions, l'une avec des niveaux normaux¹¹ de dopamine et de sérotonine, et une avec de faibles niveaux de sérotonine et de dopamine (fréquences dans le tableau 5.5). Nous avons effectué 50 essais dans chacun de ses états.

	5HT- Control	Dopamine - Goal	ACh- RequestStatu s	ACh- Sensor Knowledg e	NE- Sensor	Dopam ine- Effecto r	StatusUpdat e-Dopamine
Déprimé	1/700	1/1700	1/333	1/1333	1/300	1/8	1/8
Non déprimé	1/500	1/1500	1/500	1/2000	1/500	1/10	1/10

Tableau 5.5 Les paramètres initiaux des agents neuromodulateurs: fréquence d'envoi en ms en condition Normal et Déprimé (Larue, Poirier et Nkambou, 2013a).

La tâche de Stroop émotionnelle repose sur deux aspects qui sont particulièrement bien pris en compte dans notre approche :

- conceptuelle : la carte conceptuelle qui contient les mots à valence émotionnelle guide l'émergence d'une émotion;
- fonctionnelle : l'impact sur la modulation des fonctions cognitives, en particulier les fonctions exécutives. Les mêmes agents capteurs que dans la tâche de Stroop classique sont utilisés.

¹¹ Le fonctionnement que nous considérons "normal" est celui où le système fonctionne comme un sujet humain normal dans le cadre d'une tâche de Stroop classique voir section 5.2.1 (Larue et al., 2012a).

5.2.4.5 Résultats

Nos prédictions ont été confirmées avec des temps de réponse plus grands pour les mots émotionnels dans la condition déprimée que dans la condition normale et une différence significative entre les deux ($p < 0.0001$, *Student t test*) (Figure 5.12). Les temps de réponse étaient aussi globalement plus lents que pour la tâche de Stroop classique (cf section 5.2.1), une différence qui s'explique par la modification effectuée sur les effecteurs (modulation du seuil auquel ils agissent). L'écart entre les états émotionnels et neutres à la fois pour la condition normale (173 ms) et la condition à faibles niveaux de sérotonine (214 ms) s'explique par deux facteurs. Tout d'abord, la dopamine (du fait de son lien direct aux concepts d'émotions) a augmenté l'état émotionnel du système. Ensuite, les deux derniers neuromodulateurs, acétylcholine et la noradrénaline, influencent le traitement cognitif et émotionnel du système. En effet, même si ces neuromodulateurs ne sont pas directement liés à des mots émotionnels, ils sont liés à d'autres neuromodulateurs, eux-mêmes liés aux émotions. L'acétylcholine agit au niveau algorithmique (de vigilance), et la noradrénaline, dont le niveau est en corrélation avec les taux de dopamine et de sérotonine, agit sur le traitement de l'information sensorielle.

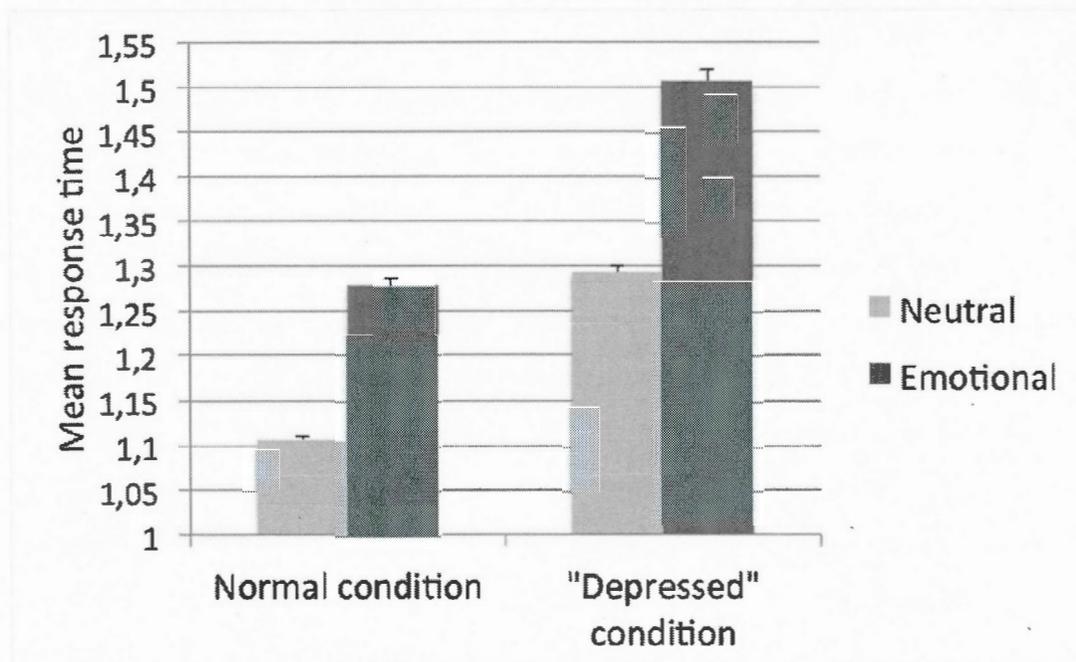


Figure 5.12 Temps de réponse moyens (seconde) pour les mots neutres et émotionnels dans des conditions normales et dans des conditions à faible taux de sérotonine et dopamine. Barres d'erreur : Standard Error of the Mean (N=50). (Larue, Poirier et Nkambou, 2013a)

Les temps de réponse élevés dans le système privé de dopamine et de sérotonine sont cohérents avec ce qui est attendu d'un système déprimé : un système globalement plus lent. Le traitement y est plus lent que chez des sujets non déprimés, car le contrôle cognitif y est insuffisant (agents *Control*), et la vigilance est en baisse (agents *RequestStatus*). L'activité motrice est elle aussi plus lente puisque le taux de dopamine est faible. Cette tendance est encore plus visible lorsque le système est exposé à des mots négatifs, liés à des émotions négatives, qui ont pour effet de diminuer la sécrétion de sérotonine. Dans la figure 5.12, on peut observer un écart de 214 ms entre les mots neutres et émotionnels dans cette condition.

La Figure 5.14 montre les activations des agents conceptuels « sadness », « fear », et « anger » lorsque le mot « Cancer » est montré au système. Cette figure illustre

parfaitement la manière dont notre système est capable de faire émerger des émotions complexes, composées de plusieurs émotions.

Les résultats obtenus dans notre système sont en accord avec les données comportementales humaines. Des temps de réponse plus élevés sont également observés pour les mots négatifs dans les sujets souffrant de Trouble dépressif majeur par rapport aux sujets normaux (Mitterschiffthaler *et al.*, 2008) ainsi qu'un temps de réponse plus élevé pour l'ensemble des mots (Gotlib et McCann, 1984).

Deux types de phénomènes neurologiques sont observés chez des sujets humains souffrant de trouble dépressif majeur :

- Un dysfonctionnement inhibiteur de l'attention chez les sujets déprimés; ce dysfonctionnement est observé dans les réponses neurophysiologiques (en particulier dans l'action de l'ACC dans l'inhibition de l'attention) (Dai et Feng, 2011).
- L'ACC rostrale gauche des patients souffrant de troubles dépressifs majeurs est plus active que les sujets contrôle (Mitterschiffthaler, Williams et al. 2008). L'ACC est impliqué dans la surveillance de l'apparition de conflits.

Ces résultats sont reproduits dans notre système par la participation de deux types distincts d'agents, l'agent de contrôle pour le premier phénomène, et les agents *RequestStatus* pour le second. Avec de faibles niveaux de sérotonine et de dopamine, les agents de contrôle ne parviennent pas à inhiber les processus de niveau réactif (premier phénomène). Dû à la dynamique de neuromodulation implémentée dans le système, un niveau de dopamine faible signifie un niveau d'acétylcholine élevé, ce qui se traduit par une activation plus élevée des agents *RequestStatus* (deuxième phénomène).

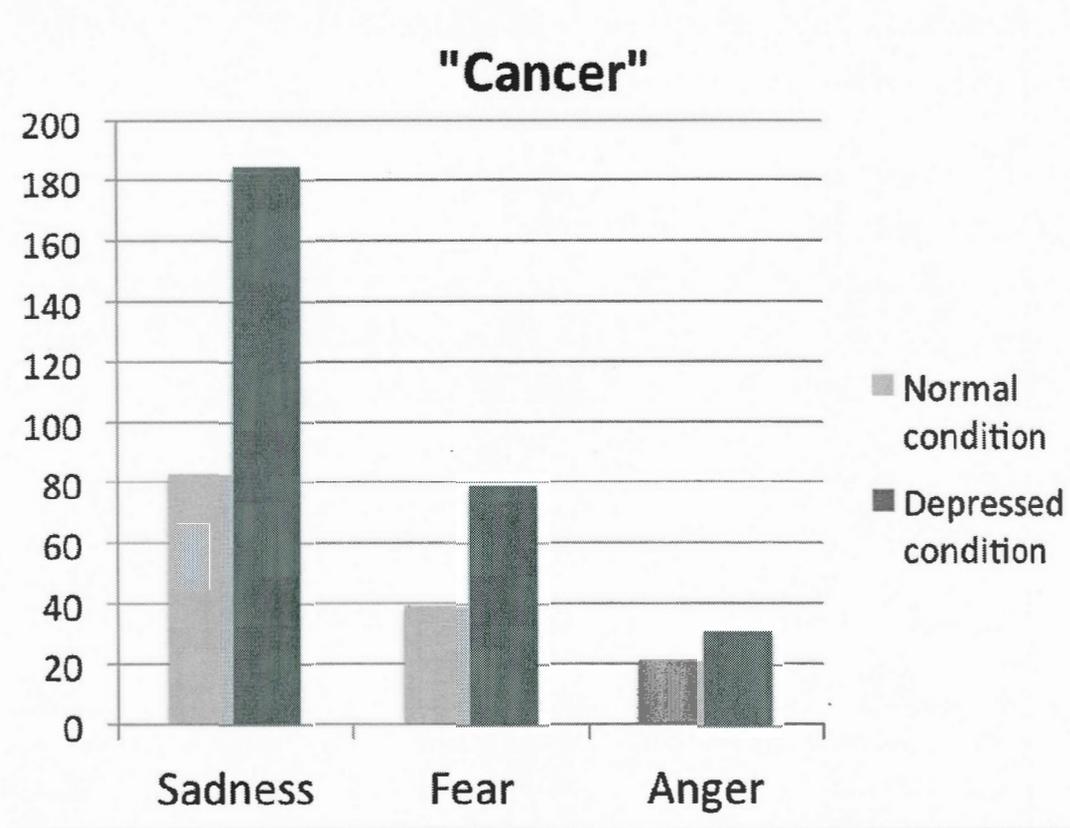


Figure 5.13 Activation des agents « sadness », « fear », et « anger » pour « Cancer » dans les conditions normal et « déprimé » dans le système pour une seule simulation lors de la présentation de la carte « Cancer ». (Larue, Poirier et Nkambou, 2013a)

5.2.4.6 Discussion et Conclusion

Dans cette expérience, nous exploitons le modèle émotionnel présenté dans la section 4.2.2. Ce modèle repose sur la combinaison de deux théories. La première, une théorie psychologique (Lindquist *et al.*, 2012), voit les émotions comme des « conceptualisations situées », construites quand les expériences antérieures donnent un sens aux entrées sensorielles. Leur émergence est supportée par des primitives psychologiques (opérations cognitives non spécifiques aux émotions). Nous avons dressé un parallèle entre ces primitives psychologiques (plus spécifiquement celles liées à la conceptualisation située) et certaines fonctions de notre architecture. La seconde théorie est biologique (Fellous 1999) et postule une base neurobiologique

aux émotions. Les émotions par le biais des neuromodulations modifieraient ainsi le comportement en modifiant la fonction des structures neurales. La sérotonine et la dopamine sont identifiées comme les deux principaux systèmes neuromodulateurs impliqués dans ce mécanisme. Dans notre architecture, quatre grands systèmes neuromodulateurs sont reproduits, ils interagissent avec des structures fonctionnelles de l'architecture et entre eux.

Par le biais d'une tâche de Stroop émotionnelle, une tâche qui mesure les variations de réaction d'un sujet face à des mots neutres ou émotionnels, nous avons pu valider notre modèle au niveau algorithmique. Nous avons ajouté quatre neuromodulateurs à notre système pour moduler le comportement du système : l'acétylcholine, la dopamine, la sérotonine et de la noradrénaline. En faisant varier les niveaux de ces neuromodulateurs, nous avons pu tester le système dans deux profils différents : normal et déprimés, et observer le comportement émergent des interactions des différentes parties du système, régulées par les neuromodulateurs, plus particulièrement le système sensori-moteur et le contrôle cognitif. Nous avons observé un temps de réponse plus élevé pour les mots émotionnels dans les deux conditions, et un temps de réponse global supérieur dans la condition déprimée, montrant ainsi la même variation de temps de réponse que chez les sujets humains (Mitterschiffhaller *et al.*, 2008).

5.2.5 Tâche de pari de l'Iowa (IGT) : anticipation du risque

Alors que la tâche précédente nous a permis d'étudier l'impact des émotions négatives sur le système, ce sont ici plus les bénéfices de l'augmentation émotionnelle de l'architecture qui sont étudiés au travers d'une tâche cognitive qui évalue la capacité à anticiper les risques.

5.2.5.1 Hypothèse générale

Le modèle émotionnel qui combine émotions et neuromodulations permettra au système de s'adapter en fonction des informations fournies par l'environnement et d'anticiper un risque de perte.

5.2.5.2 La tâche

La tâche d'Iowa est une tâche qui permet d'évaluer la performance d'un sujet dans sa prise de décision. On présente au sujet quatre piles de cartes (A, B, C, D). Chaque pile contient 50 cartes. Des récompenses et sanctions monétaires sont associées à chacune des piles. Bien que les récompenses y soient plus élevées, les piles A et B sont désavantageuses (espérance statistique de -25) puisque les sanctions s'y trouvent aussi être plus sévères. Les piles C et D (espérance statistique de 25) sont les plus avantageuses avec des récompenses et des sanctions comparativement plus petites. Le sujet n'est pas informé sur le montant des pertes/gains par piles (voir tableau 5.6).

Tableau 5.6 Déroulement d'une tâche d'Iowa

	Deck A	Deck B	Deck C	Deck D
1	100	100	50	50
2	100	100	50	50
3	-150	100	-25	50
4	100	100	50	50
5	-300	100	-75	50
6	100	100	50	50
7	-200	100	-25	50
8	100	100	50	50

9	-250	-1250	-75	50
10	-350	100	-50	-250
11	100	100	50	50
12	-350	100	-25	50
13	100	100	-75	50
14	-250	-1250	50	50
15	-200	100	50	-250
16	100	100	50	50
17	-300	100	-25	50
18	-150	100	-75	50
19	100	100	50	50
20	100	100	-50	50
21	100	-1250	50	-250
22	-300	100	50	50
23	100	100	50	50
24	-350	100	-50	50
25	100	100	-25	50
26	-200	100	-50	50
27	-250	100	50	50
28	-150	100	50	50
29	100	100	-75	50
30	100	100	-50	50

31	-350	100	50	50
32	-250	-1250	50	-250
33	-250	100	50	50
34	100	100	-25	50
35	100	100	-25	50
36	100	100	50	50
37	-150	100	-75	50
38	-300	100	50	50
39	100	100	-50	50
40	100	100	-25	50
41	100	-1250	-50	-250
42	-300	100	50	50
43	100	100	50	50
44	-350	100	-50	50
45	100	100	-25	50
46	-200	100	-50	50
47	-250	100	50	50
48	-150	100	50	50
49	100	100	-75	50
50	100	100	-50	50

Les sujets normaux commencent à piocher dans les différentes piles, puis, après une dizaine d'essais concentrent généralement leur choix sur les piles les plus avantageuses. Cette tâche a notamment été utilisée pour évaluer cette capacité chez

les patients présentant des dommages neurologiques au cortex préfrontal ventromédian (Bechara *et al.*, 1994).

Selon la théorie des marqueurs somatiques que nous présenterons plus en détail dans la prochaine section, les sujets ayant une faible performance à cette tâche ont les plus faibles indices physiologiques pour les guider dans des choix risqués. Les marqueurs somatiques qui sont pour Damasio associés aux émotions aident à réduire l'ensemble des décisions possibles par la modulation de l'utilité des différentes alternatives. Les patients avec des lésions au cortex préfrontal ventromédian seraient dépourvus de ceux-ci (Bechara Damasio, 1997), ce qui expliquerait leur moins bonne performance.

Les sujets normaux ont une conductivité de la peau (*skin conductance response*) plus élevée lorsqu'ils reçoivent des récompenses et des punitions et, par la suite génèrent celle-ci avant de choisir une pile. Les sujets avec des performances réduites du ACC n'ont pas de réponse de conductivité de la peau particulière en cas de punition ou récompense, les sujets avec des lésions au cortex préfrontal ventromédian ont une réaction plus faible que les sujets normaux et ne génèrent pas de réponse de conductivité de la peau particulière avant de piocher une carte. Les sujets présentant des dommages au cortex préfrontal ventromédian ont une performance normale à un certain nombre de tests neuropsychologiques standard et n'ont pas de problème de compréhension, d'attention, etc ... Pourtant, ils échouent à la tâche d'IGT et ont de la difficulté à faire l'expérience de certaines émotions dans des situations qui devraient normalement les éliciter, ainsi qu'à exprimer leurs émotions. Les difficultés se répercutent dans la prise de décision notamment dans la tâche d'IGT. Ces observations ont mené à l'établissement de l'hypothèse des marqueurs somatiques (Bechara *et al.*, 1994).

L'erreur à la tâche d'IGT proviendrait d'un déficit dans le mécanisme émotionnel qui signale rapidement les conséquences potentielles d'une action et par lequel la réponse la plus avantageuse est sélectionnée. Les sujets dépourvus de ce signal émotionnel se

reposent sur une analyse raisonnée des coûts et bénéfiques, mais cette analyse est plus longue et peut échouer. Pour Damasio, l'émotion est décrite comme une collection de changement corporel et d'états cérébraux déclenchés par un système cérébral dédié qui réagit aux stimuli perçus, actuels ou passés en rapport à une situation ou à un objet. Cet objet est marqué comme un stimulus « émotionnellement compétent ». Les réponses se font par une modification physiologique du système : une réponse viscérale que l'on peut apparenter au *core affect* décrit dans la section 3.1.4. Ces réponses mènent à la libération de certains neurotransmetteurs (dopamine, sérotonine, acétylcholine, noradrénaline) dans le système nerveux central et à une modification de la transmission des signaux du corps aux régions somatosensoriels.

Ces états somatiques peuvent être induits par :

- les inducteurs primaires : innés ou surappris, ils causent des états de plaisirs ou d'aversion. Ils sont automatiques.
- les inducteurs secondaires sont générés par le souvenir d'un événement émotionnel réel ou hypothétique, où l'inducteur primaire a été invoqué.

La conductivité de la peau observée dans les différentes étapes de la tâche est la suivante : pas de réponse de conductivité de la peau particulière chez les sujets avec des performances réduites du ACC en cas de récompense et punition, et, une réaction plus faible que chez les sujets normaux pour les sujets avec des lésions au cortex préfrontal ventromédian au niveau de la conductivité de la peau dans la période précédant la pioche d'une carte. S'appuyant sur ces résultats, Damasio attribue à l'ACC un rôle critique dans le déclenchement des inducteurs primaires. Le cortex préfrontal ventromédian serait lui impliqué dans le déclenchement des inducteurs secondaires, ces inducteurs primaires et secondaires pouvant se produire en même temps pour les mêmes stimuli.

L'induction d'états somatiques par les inducteurs primaires mène au développement de patrons d'états somatiques dans les noyaux du tronc cérébral (*brainstem nuclei*), et

dans le cortex somatosensoriel. Un patron se forme lorsqu'un état somatique a été déclenché de manière primaire et ressenti au moins une fois. Ainsi, la présentation d'un stimulus rappelant un évènement qui avait donné lieu à un inducteur primaire déclenchera un inducteur secondaire. Le développement d'inducteurs secondaires dépend du bon fonctionnement du circuit neuronal ventromédian. Lorsque le sujet choisit une pile, il ne sait pas exactement pourquoi, sa réaction est provoquée par les inducteurs secondaires. La conductivité de la peau (*skin conductance response*) est une manifestation physique de ces inducteurs émotionnels.

5.2.5.3 Simulations informatiques

Dans leur modèle, Fum et Stocco (2004) supposent que les sujets prennent une décision en s'aidant de leurs expériences passées et préfèrent une pile à une autre, car ils se souviennent des résultats précédents associés à chacune d'entre elles. Ils font aussi l'hypothèse que la mémoire déclarative est la plus importante.

Suivant cette hypothèse, leur implémentation dans ACT-R consiste à permettre aux *chunks* d'encoder l'information en rapport avec la valence émotionnelle des évènements, influençant ainsi la récupération future des informations associées à chacune des piles (punition en cas de perte, récompense en cas de gain). Une version classique de ACT-R est utilisée pour la simulation des patients ayant des dommages au cortex préfrontal ventromédian. Afin de simuler la performance des sujets normaux, un nouveau paramètre tenant compte de l'impact émotionnel de l'évènement a été introduit dans la composante contextuelle de l'équation d'activation. Ainsi, le résultat le plus actif associé à une pile sera considéré comme le résultat typique entraîné par la sélection de cette pile.

5.2.5.4 Expériences

Hypothèses

- Le système « avec neuromodulation » sera plus performant que le système « sans neuromodulation »
- Les performances du système seront semblables aux performances humaines quantitativement.
- Le système « avec émotions » grâce aux concepts de perte et de gain qui sont connectés aux agents *Knowledge* concepts émotionnels (« joy » connecté à « gain » et « sadness » connecté à « loss »), eux même indirectement connectés aux neuromodulateurs seront capable de mémoriser les piles qui ont menées à des pertes fortes et d'éviter de piocher dans celles-ci (dans la mesure où la perte n'est pas l'objectif).

Procédure expérimentale

L'expérience a été réalisée dans deux conditions « Avec émotion » et « Sans émotion ». Dans la condition « Sans émotion », les liens entre les émotions et les concepts représentés par les agents *Knowledge* ont été conservés. En revanche, les agents de neuromodulation (Sérotonine, Dopamine, Acetylcholine et Norépinephrine) ont été désactivés, supprimant ainsi la capacité du système à renforcer la positivité ou la négativité d'un évènement dans le réseau conceptuel du système (qui représente la mémoire à long terme du système). « Avec émotion » est le réglage classique de notre système : les agents de neuromodulations et agents émotionnels agissent dans le système. L'objectif reste en revanche la même dans les deux conditions : réaliser des gains.

Les piles de cartes sont représentées par 4 fichiers. Le système choisit au lieu d'une pile un fichier. À chaque fois que le système « pioche » un fichier, les fichiers sont

modifiés pour refléter le changement de cartes. Les piles utilisées sont semblables à celle utilisée originalement dans l'article de Bechara et al . (1994). Le fichier texte représentant la pile piochée est lu par les capteurs après la pioche. Les effecteurs sont eux responsables de signaler le choix du système au script qui gère l'expérience et remplacera le fichier lu par les capteurs par le fichier correspondant à la pile piochée. Lorsque les capteurs lisent les fichiers, ils traduisent leur contenu en message de gain ou perte.

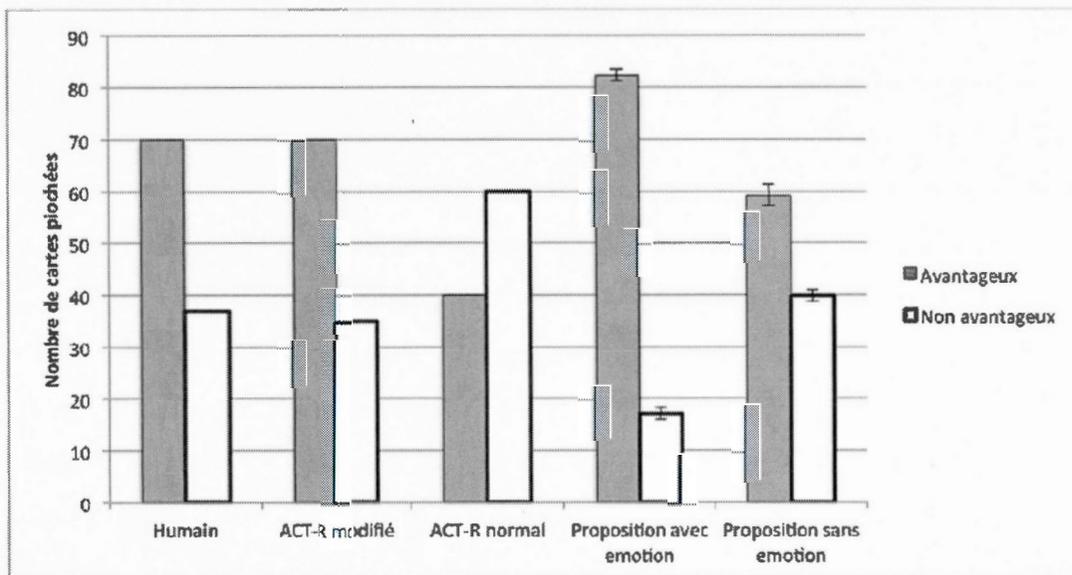


Figure 5.14 Résultats de ACT-R et résultats humains comparés aux résultats de notre proposition avec barre d'erreurs (SEM – erreur standard de la moyenne) pour 50 simulations

5.2.5.5 Résultats

Dans notre simulation, l'état neuromodulateur du système peut être associé aux marqueurs somatiques tels que théorisés par Damasio (voir section 5.2.5.2). Alors que chez le sujet humain, avec des lésions du cortex préfrontal ventromédian, la tendance à risquer est très forte, cette tendance s'est aussi traduite dans notre système, mais dans une moindre mesure (voir figure 5.1.4). Cela s'explique notamment par la présence résiduelle implicite d'émotions dans le réseau conceptuel du système (plus

spécifiquement dans la distance entre certains concepts). Les distances dans ce réseau contextuel sont déterminées par le crowdsourcing humain, et nous estimons que ceux-ci sont émotionnellement influencés lorsqu'ils estiment le lien entre un concept et un autre. Idéalement, pour réaliser une expérience sans émotion, nous aurions dû utiliser un réseau non contextuel (un simple lexique), toutefois dans la mesure où l'aspect contextuel rend notre système plus performant nous n'avons pas à utiliser un autre type de réseau contextuel.

L'écart entre les résultats du système avec et sans émotions était toutefois statistiquement très significatif pour la pioche de cartes avantageuses ($p < 0.0001$, *Student t test* pour $N = 50$). Le bénéfice de l'ajout d'émotions pour l'évaluation des risques dans le système était particulièrement visible puisque le système « sans émotions » obtenait des résultats des gains plus élevés, mais une perte également plus élevée. Notre système était dans cette mesure en condition normale mieux équilibré émotionnellement qu'ACT-R. Cette tendance est également apparue dans notre simulation, mais dans une moindre mesure. Néanmoins, le renforcement de la tendance à faire des choix plus sûrs grâce à la régulation des émotions était clair. Nous avons ainsi pu vérifier que les ajouts d'émotion et de neuromodulation à notre système lui ont bénéficié puisque cela a amélioré sa mémorisation des résultats positifs et négatifs.

5.2.5.6 Discussion et conclusion

La combinaison des émotions à la neuromodulation a rendu le système meilleur à cette tâche de deux manières :

- L'action de la dopamine renforce les objectifs qui ne mènent pas à un échec.
- Les émotions en lien à la perte ou au gain renforcent dans la mémoire du système le lien entre les pioches qui ont mené au succès et le gain ou la perte. Le but du système est le gain.

La modélisation fournie est de plus compatible avec la notion de marqueur somatique de Damasio. Les neuromodulateurs agissent avant la sélection d'une carte pour mener à la sélection de ce qui auparavant avait mené à un gain : lorsque le gain (objectif) est renforcé dans le système, l'émotion, et les neuromodulateurs qui y étaient associés, sont activés (puisque le lien entre émotion conceptuelle et neuromodulation est bidirectionnel dans notre système).

Nous avons ainsi confirmé nos hypothèses : l'utilisation du modèle émotionnel dans le cadre de cette tâche nous a permis d'améliorer sa capacité à anticiper les risques. Le système, dans les conditions où le modèle émotionnel est actif, a même été capable d'avoir de meilleurs résultats que les sujets humains (ce qui n'a pas permis de confirmer notre hypothèse sur cet aspect). Dans ces conditions, nous pouvons affirmer que l'ajout du modèle émotionnel améliore l'optimalité du système.

5.3 Validation théorique : critère d'évaluation des architectures cognitives

5.3.1 Comportement

5.3.1.1 Rationalité et optimalité

Le comportement rationnel de l'architecture est particulièrement bien illustré dans le cadre de la tâche de Wason. Nous y illustrons la performance de l'architecture dans une tâche de raisonnement logique. Par l'entremise de 4 profils: purement réactif, purement exécutif, faiblement réflexif et purement réflexif, nous sommes de plus capable de faire varier le degré d'optimalité dans l'architecture.

Le profil purement réflexif est celui qui mène au comportement le plus optimal. Ce comportement est soutenu par l'opération de découplage cognitif. Le découplage cognitif déroute les messages qui sont normalement envoyés au niveau réactif du système (pour une action directe) vers des agents de représentation secondaires (*Secondary Representations*) du niveau algorithmique. Guidées par des agents, les

dispositions de pensée qui modifieront la manière dont les informations sont récupérées et manipulées pour être incluses dans la simulation cognitive.

Le profil purement exécutif quant à lui ne fournit pas une réponse optimale (car incomplète) mais est le profil qui fournit la meilleure réponse possible avec le moins de ressources computationnelles.

5.3.1.2 Généralité, versatilité et généricité

Un principe de généralité a guidé la construction de cette architecture. La théorie de la cognition choisie explique une variété de comportements du réactif au réflexif. La réalisation de l'ensemble des tâches cognitives que nous avons présentées illustre le caractère général de l'architecture.

Pour les réaliser, nous n'avons pas eu à changer les connaissances du système ou à changer le code général de l'architecture, nous avons toutefois eu à assigner les objectifs à l'architecture en les ajoutant dans le code de l'architecture, et à ajouter des capteurs pour la tâche de Wisconsin (capteur de forme, capteur de nombre). Ces aspects empêchent notre architecture d'être parfaitement versatile et générique.

5.3.1.3 Réactivité

La réactivité du système est supportée par les agents réactifs qui sont en lien direct avec les capteurs et les effecteurs du système, il est donc possible d'avoir une action qui soit uniquement supportée par le niveau réactif. Cet aspect est particulièrement bien illustré dans les tâches de Stroop et Wason.

Dans la tâche de Stroop, le niveau réactif interfère avec le niveau algorithmique (contrôle cognitif) pour fournir la réponse habituelle, cette réponse n'est pas l'objectif requis pour cette tâche, mais c'est la réponse qui est habituellement la plus sollicitée.

Dans la tâche de Wason, de même, le niveau réactif fournit une réponse rapide et fautive, mais peut être réorienté pour obtenir une réponse rapide et partiellement

correcte sous l'influence du niveau algorithmique, qui garantit le maintien d'un objectif.

5.3.1.4 Robustesse

L'action et le contrôle du niveau réactif exercés par les agents du niveau algorithmique (maintien de l'objectif actuel) garantissent dans notre architecture la persistance et la robustesse.

Dans la tâche de Stroop, cette aptitude s'illustre par la capacité du système à fournir des réponses majoritairement correctes sur l'ensemble de la tâche. En effet, les agents du niveau algorithmique sur la base des informations de statut du niveau réactif corrigent (par inhibition ou excitation de l'activation) l'état du niveau réactif, afin que celui s'approche de l'état nécessaire à la réalisation de l'objectif.

Dans le cadre de la tâche de Wason, la réalisation de l'objectif passe par l'inhibition au niveau réactif de la réponse logiquement incorrecte (la carte « 3 »). Cette réponse avait été activée du fait de sa présence dans l'énoncé (présent dans l'environnement), le niveau algorithmique qui exécute les notions de logiques fournies par le niveau réflexif a permis son inhibition.

Lors de l'opération de découplage cognitif qui a lieu lors de la tâche de Wason et de la tâche de Wisconsin, les hypothèses sont testées hors ligne. Les objectifs seront réorganisés en conséquence pour fournir une réponse adéquate, rendant le système plus robuste. Bien que notre système puisse être rendu plus robuste, ce n'est pas sa qualité primaire. Sa particularité est justement de pouvoir adopter plusieurs profils plus (profil purement réflexif) ou moins (profil purement réactif) robustes.

5.3.1.5 Séquentialité et routine

Ces deux critères a priori opposés sont particulièrement bien réalisés dans notre système. Le niveau réactif est celui où les informations de routine sont retranscrites.

Les niveaux algorithmiques et réflexifs réalisent la séquentialité. Le niveau réflexif contient les séquences d'actions nécessaires à la réalisation d'un objectif. Ces actions seront envoyées une à une au niveau algorithmique à chaque fois que celui-ci signalera qu'il a terminé une action (lorsqu'il aura suffisamment corrigé l'état du niveau réactif pour que celui-ci correspondent à l'état souhaité pour la réalisation de son objectif que l'état correspondant à cette action a été au niveau réactif). Les tâches de Wisconsin et Wason mettent en jeu ces deux mécanismes.

5.3.1.6 Adaptabilité

Le système rend compte des erreurs passées dans les différents niveaux d'activation entre agents du niveau réactif et agents d'objectifs au niveau réflexif.

Au niveau réactif, cet aspect est illustré dans la tâche de Stroop. Les agents réactifs gardent une trace de leur réponse passée. Lors de la condition majoritairement congruente, la réponse habituelle est renforcée puisqu'il y a rarement conflit entre celle-ci et l'objectif. À l'inverse, dans la condition majoritairement incongruente, la réponse habituelle conflictuelle est inhibée.

Au niveau réflexif, c'est ce qui fait que dans la tâche de Wisconsin un objectif à court terme qui a mené à une erreur ne sera pas sélectionné à nouveau, puisque cet objectif aura été inhibé dans les cycles précédents. Le système anticipera les erreurs observées lors du découplage cognitif. La simulation interne obtiendra du groupe réflexif une deuxième réponse (objectif à court terme) qui pourra être directement sélectionnée en cas d'erreur. Cette tâche est une illustration parfaite de la capacité d'adaptation essai-erreur de notre système. Le système neuromodulateur et émotionnel est directement impliqué puisque c'est lui qui renforce les objectifs qui ont mené à un succès.

5.3.1.7 Efficacité et mise à l'échelle

Notre architecture est grandement affectée par la complexité de la tâche. Le temps requis pour réaliser une tâche de Wason est bien plus élevé lorsque le traitement

réalisé par le système est plus complexe (profil purement réflexif qui met en jeu toutes les opérations cognitives possibles dans le système). Notre système est aussi pour l'instant plus long à agir que d'autres architectures (c'est notamment le cas pour la simulation de ACT-R de la tâche de Stroop).

Des progrès pourraient être faits dans notre architecture pour la réalisation de la contrainte de temps réel. Elle n'est pas respectée par notre système au sens quantitatif, elle est réalisée au sens qualitatif : les variations de temps de réponse traduisent des variations de complexité de traitement de l'architecture, et sont similaires à ce qui est observé chez l'humain. Cet aspect est plus particulièrement observé dans les tâches de Stroop et Wason.

5.3.2 Cognition

5.3.2.1 Langage naturel

Il n'y a pas de module de langage naturel dans notre architecture.

5.3.2.2 Dichotomie des processus implicite et explicite

Nous avons des aspects implicites (niveau d'activation des différents liens entre agents) et explicites (concepts au niveau réactifs), représentation explicite des objectifs au niveau réflexif. En reproduisant deux types de processus, nous reproduisons cette dichotomie théoriquement sans aller jusqu'à implémenter physiquement les processus implicites (réseaux de neurones).

5.3.2.3 Apprentissage

Notre système n'a pas de module dédié à l'apprentissage. Le seul apprentissage ayant lieu dans notre système est une forme d'adaptation par renforcement. Au niveau réactif, les agents les plus souvent utilisés sont les plus actifs et sont ceux qui seront le plus directement utilisés par la suite. Au niveau réflexif, la dopamine a un rôle de

renforcement des objectifs à succès particulièrement bien illustré dans la tâche de Wisconsin.

5.3.2.4 Conscience

Nous n'implémentons pas explicitement de théorie de la conscience comme l'architecture cognitive LIDA. Toutefois, la reproduction d'une théorie de processus duaux qui traite d'aspects conscients et inconscients de la cognition nous permet de reproduire quelques aspects fonctionnels de la conscience comme l'attention par le biais du niveau algorithmique, ou encore le découplage cognitif et les dispositions de pensées qui manipulent des représentations internes du système.

5.3.2.5 Généralisation syntaxique

Nous n'avons pas cherché à reproduire cet aspect.

5.3.2.6 Modularité

Notre architecture est modulaire, c'est cet aspect qui nous a poussés à choisir une approche multi-agents pour sa réalisation. Les agents du système sont spécialisés fonctionnellement et leurs différentes fonctions ont été assignées de manière à séparer celles-ci et à pouvoir moduler leurs interactions dynamiquement. Par cette propriété, nous changeons le profil de l'architecture en faisant varier l'importance des différents modules dans le système. L'illustration de différents profils est notamment faite dans la tâche de Wason. Le profil purement exécutif est un profil où le module de découplage cognitif n'est pas utilisé, le fortement réflexif, en plus d'utiliser le module de découplage cognitif, utilise différents modules de dispositions de pensée.

5.3.2.7 Mémoire

Notre système tient compte du lien entre mémoire de travail et mémoire à long terme. Nous identifions les agents *Knowledge* du groupe réactif et les liens entre eux comme la mémoire à long terme. Les agents *Knowledge* en activité à un instant t dans le

système représentent sa mémoire de travail. Ces aspects sont particulièrement expliqués dans le cadre de la tâche de Stroop.

5.3.3 Réalismes

5.3.3.1 Réalisme cognitif

Notre architecture est cognitivement réaliste dans la mesure où la théorie sur laquelle nous nous basons est cognitivement réaliste. De plus, les tâches que nous avons réalisées nous ont permis de tester différentes caractéristiques essentielles de la cognition (contrôle cognitif et mémoire de travail, flexibilité cognitive, raisonnement logique). En revanche, une fonction essentielle nous manque : l'apprentissage.

5.3.3.2 Réalisme biologique

Nous pouvons faire des parallèles entre les différents agents et groupes d'agents de notre architecture et les structures cérébrales. C'est ce qui nous a notamment permis d'ajouter un sous-système inspiré de la neuromodulation humaine dans notre système. Nous ne pouvons en revanche pas prétendre à la réalité biologique de certains systèmes connexionnistes (SPA).

5.3.3.3 Réalisme évolutif

Le modèle tripartite de Stanovich, qui a servi de base à notre architecture, se situe dans la lignée des travaux sur les processus duaux qui identifient les processus de type 1 comme le plus évolutionnairement ancien, et les processus de type 2 comme les plus récents. La construction de l'architecture a d'ailleurs suivi ce modèle. Notre système reproduit le réalisme évolutif de la théorie sur laquelle il est basé.

5.3.3.4 Réalisme écologique

Le niveau réactif réagit directement à l'environnement, et les émotions et neuromodulations sont particulièrement impliquées dans sa réaction à l'environnement comme illustré dans la tâche de Stroop émotionnelle, et l'IGT. Nous

n'avons toutefois jamais testé notre système en environnement réel (pas des conditions de laboratoire).

5.3.4 Propriétés représentationnelles

L'aspect représentationnel est le plus faible de notre architecture. Et, comme la plupart des architectures à l'exception de SPA, nous ne sommes capables de rendre compte que des critères 1 et 2 de cette catégorie.

5.3.4.1 Bases de connaissances vastes

Notre architecture utilise une combinaison de deux bases de connaissances : ConceptNet et le NRC emotion lexicon. Cela représente 870 connaissances et 1498 liens entre ces connaissances.

5.3.4.2 Variétés des types de connaissances

La connaissance dans notre architecture est répartie sur deux types d'unités. Les agents *Knowledge* portent la connaissance explicite du système. Les liens entre ces agents (distances) s'allongent ou se raccourcissent en fonction de la distance sémantique entre concepts. Les font partie des connaissances implicites du système, plus difficilement accessible. Les règles combinent connaissances explicites (mots portés par l'agent *Knowledge*) et implicites (distances requises entre agents *Knowledge*). Les agents de représentations secondaires dans le découplage cognitif sont un autre type de connaissances manipulables créés à l'image des états internes du système.

5.3.5 Validité scientifique

5.3.5.1 Triangulation

La théorie que nous utilisons est plausible neurologiquement et cognitivement. Elle s'appuie sur différentes études, et est capable de rendre compte de différents résultats de psychologie cognitive et psychologie du raisonnement. Nous ne pouvons pas

toutefois rendre compte de résultats à un niveau biologique poussé comme le ferait une architecture comme SPA.

5.3.5.2 Simplicité

La théorie (Framework tripartite de Stanovich) socle de l'architecture rend compte d'une variété de phénomènes. Nous avons sacrifié à sa simplicité en y ajoutant des émotions qui ajoute de la granularité et du pouvoir explicatif à l'architecture.

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

CONCLUSION

L'objectif de la présente thèse était de proposer une architecture cognitive qui, située dans son environnement, soit capable de manifester un comportement séquentiel et réactif cohérent. Pour répondre à cette problématique, nous avons conçu un système capable de rendre compte de la dualité du comportement humain, un système où ces deux types de comportement coexisteraient et contribueraient au fonctionnement d'un système unifié méritant le statut d'architecture cognitive.

1 Sommaire des réalisations

1.1 Démarche

Alors que les premières architectures cognitives (ACT-R, SOAR) traitaient des aspects fonctionnels de la cognition humaine, d'autres concepteurs d'architectures (SPA, LEABRA) se sont intéressés aux aspects biologiques de la cognition. ACT-R et SOAR sont basées sur deux théories unifiées de la cognition, respectivement celle développée par Anderson (1983) et celle de Newell (1990), mais partagent certains aspects fonctionnels. Ces deux architectures sont implémentées par le biais d'un système de production, avec des règles explicites. Bien que le parallèle avec le cerveau humain ait été proposé par Newell comme critère pour une théorie unifiée de la cognition, cette avenue de recherche n'est plus poursuivie actuellement dans SOAR. En revanche, les concepteurs de l'architecture ACT-R ont ces dernières années cherché à associer les différents modules de l'architecture aux régions cérébrales qui montrent une activation lorsque ces fonctions sont réalisées chez

l'humain. Le parallèle est plus fort dans les architectures cognitives d'inspiration biologique SPA et LEABRA. Dans LEABRA, les mêmes ensembles de mécanismes neuronaux sont utilisés dans toute l'architecture. Le paramétrage des mécanismes microstructuraux spécialisera ces ensembles de neurones pour la réalisation d'une fonction précise de la cognition. Cette modélisation d'ordre biologique a permis de simuler l'importance des mécanismes neurobiologiques impliqués dans le contrôle cognitif ou encore l'apprentissage. Dans SPA, les pointeurs sémantiques sont des représentations neuronales auxquelles un contenu sémantique partiel est associé. Ils peuvent être combinés pour donner des structures représentationnelles plus complexes, et implémenter des fonctions cognitives de haut niveau.

Comme nous l'avons déclaré précédemment, le critère du parallèle cérébral a été proposé par Newell comme l'une des qualités dont une théorie unifiée de la cognition devrait être dotée. D'autres critères ont par la suite été développés par les différents auteurs d'architecture. Nous avons présenté ceux-ci dans cinq catégories: comportement, cognition, réalismes, propriétés représentationnelles et validité scientifique. La catégorie comportementale comporte deux critères qui se répètent dans les différents travaux de recherche : la réactivité et la séquentialité. La réactivité désigne la capacité à réagir immédiatement sans longs calculs ou représentations élaborées. La séquentialité traite au contraire des actions qui nécessitent plusieurs étapes pour être accomplies. Une troisième qualité est à notre avis associée à ces deux critères : la flexibilité. La flexibilité est l'aptitude à passer de l'un à l'autre de ces comportements au moment et dans la situation opportune. Cet aspect a d'ailleurs été identifié comme l'une des avenues de recherches ouvertes dans le domaine des architectures cognitives (Langley, Laird et Rogers, 2009). C'est précisément à ces aspects (la cohabitation de la séquentialité et la réactivité permise par un comportement flexible de l'architecture) que nous nous sommes intéressés dans cette thèse.

Notre architecture n'est pas la première à chercher à reproduire une forme de dualité. Nous avons ici distingué deux types de dualités : structurale et théorique. La dualité structurale se traduit dans un hybridisme des approches. CLARION (Sun, 2004) est une architecture connue où la dualité se situe dans la dichotomie entre implicite et explicite. CLARION combine processus et connaissances implicites et explicites. Dans SAL, deux architectures sont combinées, ACT-R (Anderson, 1996) et LEABRA (O'Reilly, 1996). LEABRA est utilisée pour l'activité perceptuelle, ACT-R pour les activités de plus haut niveau. Dans LIDA (Franklin et Patterson Jr, 2006), la dualité vient de la théorie de la cognition utilisée, la théorie de l'espace de travail global de Baars (Baars et Franklin, 2009), et porte sur les processus conscients et inconscients. Dans HCogAff (Sloman, 2001), on rend compte de la dualité réactif/délibératif par trois niveaux. Le niveau réactif rend compte du critère de réactivité. Le critère de séquentialité est réalisé par le niveau délibératif et un troisième niveau métacognitif. Enfin, dans DUAL, la distinction reproduite est celle entre cerveau A (esprit) et cerveau B (contrôle, interruption de boucles).

Ces différentes tentatives montrent comment faire émerger une certaine forme de dualité dans une architecture cognitive. HCogAff (Sloman, 2001) serait probablement la plus proche de ce que nous recherchons: la manifestation de la séquentialité et de la réactivité, et une certaine dose de flexibilité. Mais, son implémentation limite tout de même son degré de flexibilité.

Pour rendre compte d'un comportement plus flexible, nous nous sommes intéressés à la manière dont les humains sont eux-mêmes capables d'exhiber ce type de comportement. Les théories à processus duaux, des théories qui expliquent l'émergence du comportement rationnel par l'existence de types de processus, l'un au traitement réactif (processus de type 1), quasi automatique, l'autre au traitement plus lent et analytique (processus de type 2), rendent compte de cette dualité (réactif/séquentiel). Notre objectif dans cette thèse n'était toutefois pas uniquement de

reproduire la dualité du comportement, mais aussi d'exhiber ces deux comportements à différent degré. L'architecture adoptera ainsi différents profils cognitifs. Le Framework tripartite de Stanovich est particulièrement axé sur les différences individuelles, et rend bien compte des différents types d'erreurs cognitives et donc des différents profils cognitifs.

Cette théorie est donc particulièrement adaptée à notre problématique, puisqu'elle décrit la nature et la séparation des différentes fonctions cognitive au sein des deux systèmes, et accorde plus d'importance à la manière dont ces fonctions interagissent que la plupart des autres théories duales. Le comportement global émerge de l'interaction de trois niveaux cognitifs distincts (qu'il appelle les esprits). Le premier niveau, l'esprit autonome, est responsable des comportements rapides adaptés au contexte. Il comprend les processus instinctifs, les processus surappris, les connaissances spécifiques au domaine, la régulation émotionnelle et l'apprentissage implicite. Le second niveau, l'esprit algorithmique, responsable du contrôle cognitif, peut inhiber les processus mentaux de l'esprit autonome. Il prend aussi en charge l'opération de découplage cognitif ainsi que les processus associatifs séquentiels. Le troisième, l'esprit réflexif, est responsable du traitement délibératif et du comportement rationnel. Il peut aussi demander au niveau algorithmique d'inhiber les processus mentaux de l'esprit autonome, et déclencher ou supprimer le découplage et les processus associatifs séquentiels de l'esprit algorithmique.

Cette théorie identifie clairement le lieu des interactions entre les différents sous-systèmes. En revanche, elle explique moins ce qui régule les interactions et ce qui fait que l'architecture peut s'adapter aux stimuli présents dans son environnement en priorisant plutôt l'un des comportements que l'autre (par exemple, agir vite plutôt que de prendre le temps de réfléchir). Chez l'humain, la priorisation et l'adaptation sont souvent liées aux émotions. Diverses architectures cognitives intègrent d'ailleurs des modèles émotionnels pour servir ce rôle. Les théories de l'évaluation cognitive, et

plus particulièrement un modèle qui en est issu, le modèle OCC, sont celles qui ont été le plus appliquées dans le domaine des architectures cognitives. Pour moduler les interactions au sein de notre architecture et être capable de réagir aux stimuli symboliques dans l'environnement, nous avons besoin d'un modèle expliquant à la fois le rôle sous cognitif des émotions (neurobiologique) et le rôle de l'émotion au niveau conceptuel. Pour cela, nous avons décidé de choisir une théorie présentant ces deux aspects, le Conceptual Act de Lindquist. Dans ce modèle, les émotions sont des « conceptualisations situées » qui émergent lorsque les expériences antérieures servent à donner un sens à des entrées sensorielles. Les émotions émergent de l'interaction de quatre primitives psychologiques : le « core affect », la conceptualisation située, l'ancrage linguistique et l'attention exécutive. Le « core affect » désigne les informations sensorielles ainsi que corporelles (informations viscérales et motrices). La conceptualisation située est le mécanisme par lequel les expériences antérieures sont utilisées pour donner un sens, en contexte, aux sensations. Elle lie l'émotion à un événement, un objet. L'ancrage linguistique est l'ancrage de l'événement dans une catégorie émotionnelle. Enfin, l'attention exécutive pourra diriger les processus psychologiques pour décider quelles représentations seront mises en avant et lesquelles seront supprimées, et de ce fait, lesquelles seront conscientes. Nous avons fait le choix de combiner à cette théorie un modèle de neuromodulation pour mieux décrire le « core affect » et rendre compte de la modulation du comportement.

1.2 Architecture

Notre proposition prend la forme d'une architecture cognitive dont la théorie socle est le Framework tripartite de Stanovich et où les interactions entre fonctions cognitives sont régulées par le modèle émotionnel de Lindquist et un sous-niveau neuromodulateur. Nous avons choisi une approche multi-agents pour implémenter l'architecture. Cette architecture est composée de trois groupes d'agents : réactif,

algorithmique et réflexif. Le groupe réactif, qui correspond à l'esprit autonome, est un réseau d'agents réactifs liés entre eux. Ensemble, ils forment une carte conceptuelle, la mémoire à long terme du système. Ces agents sont directement liés à des agents effecteurs et capteurs. Dans un premier temps, l'activité dans ce réseau va dépendre de l'information fournie par le senseur. Le groupe algorithmique effectue les opérations de contrôle dans le système. Des agents sont chargés d'observer l'activité des agents du groupe réactif, ils compareront l'état du groupe réactif à un instant t avec l'état qu'il faudrait au niveau réactif pour réaliser l'objectif en cours. En fonction du résultat, ils encourageront ou inhiberont les agents du groupe réactif. Les agents du groupe algorithmique peuvent aussi sur demande des agents du groupe réflexif réaliser un découplage cognitif. Au cours de celui-ci, des agents, dont l'activité est une copie à l'instant t d'une partie des agents du niveau réactif, seront créés, et différentes alternatives (par exemple des objectifs concurrents) testées sur ces agents répliques du niveau réactif. Le système peut ainsi tester offline certaines stratégies. Enfin, les agents du groupe réflexif sont ceux qui contiennent les objectifs du système. Ils sont organisés en un graphe direct, qui contient les séquences d'objectifs, et seront recrutés sur la base de leur ressemblance à l'état actuel du système (statistiques d'état fournies par des agents du groupe algorithmique). Des agents de disposition de pensée peuvent, si initialisés, modifier la manière dont les agents d'objectifs sont recrutés. Le comportement global qui émerge est une fonction des messages échangés par les agents au sein des groupes et entre groupes. Un groupe d'agent supplémentaire, les agents neuromodulateurs modulent les interactions entre agents en agissant sur la fréquence à laquelle sont envoyés les messages. Ils pourront par exemple ainsi augmenter ou diminuer la fréquence d'action des agents de contrôle. Certains agents neuromodulateurs sont liés à des agents de catégories émotionnelles (« fear », « sadness ») présents dans le réseau conceptuel du niveau réactif. Ainsi, la détection de certaines informations liées à une catégorie émotionnelle mène à l'activation de son concept et les neuromodulateurs qui lui sont liés peuvent influencer le traitement dans l'architecture.

1.3 Validation

Nous proposons deux méthodes de validation pour notre architecture : théorique et pratique. La validation pratique se fait par l'intermédiaire de cinq tests d'évaluation des performances cognitives. Ces cinq tests nous ont permis d'évaluer plus particulièrement cinq différentes aptitudes : le contrôle cognitif (la tâche de Stroop), la flexibilité cognitive (tâche de tri du Wisconsin), le raisonnement (tâche de sélection de Wason), l'anticipation du risque (la tâche de pari de l'Iowa). Pour chacune d'entre elles, nous avons comparé les résultats de l'architecture aux résultats humains et lorsque cela était possible à d'autres simulations informatiques de ces tâches.

La tâche de Stroop nous a permis d'évaluer le fonctionnement des agents de contrôle. Cette tâche évalue l'aptitude du sujet à inhiber une réponse habituelle (quasi automatique) qui entre en conflit avec l'objectif de l'individu. Il s'agissait dans cette tâche de vérifier que notre système était capable de rendre compte des mêmes résultats que le sujet humain : des temps de réponse et un nombre d'erreurs plus élevés traduisant le travail d'inhibition de la réponse habituelle par l'architecture. Notre architecture a été capable de reproduire ce résultat ainsi que la dégradation de la performance avec le temps qui traduit chez le sujet humain une fatigue cognitive. Dans notre architecture, c'est l'activation de nombreux agents Knowledge associés à la réponse habituelle qui surcharge la mémoire de travail du système et rend le contrôle difficile à exercer pour les agents qui en sont responsables. Notre architecture n'a pas été parfaitement robuste dans cette tâche puisque, bien qu'elle reproduise les erreurs humaines, elle n'a exercé un degré de robustesse que comparable à l'humain et à celui de deux architectures (LEABRA et ACT-R). De plus, cette expérience nous a permis de respecter le critère de mémoire décrit par Eliasmith, puisque nous avons reproduit adéquatement le rapport entre mémoire de

travail (quelques agents Knowledge) et mémoire à long terme (l'ensemble des agents Knowledge). Une tâche de Stroop sémantique nous a aussi permis d'évaluer le bon fonctionnement de la mémoire sémantique par l'interférence d'un mot sémantiquement proche à la réponse habituelle avec l'objectif. En revanche, cette expérience a montré la faiblesse de notre architecture en ce qui concerne les temps de réponse : celle-ci était en effet plus lente que ACT-R.

La tâche de Wisconsin nous a permis d'évaluer l'aptitude de l'architecture à changer de stratégie en fonction des demandes de son environnement, sa flexibilité cognitive. Nous avons reproduit des résultats proches de ceux observés chez le sujet humain, aussi bien les erreurs que le nombre de stratégies adoptées avec succès, ainsi que ceux obtenus dans un autre modèle de cette tâche. C'est la capacité de découplage cognitif qui nous a permis de simuler différentes stratégies dans un mini monde interne, et d'anticiper leur échec. De plus, en faisant varier le degré auquel cette capacité est utilisée, nous avons pu reproduire différents profils de performance à cette tâche et rendre le système plus performant (plus performant que l'humain même dans un cas), augmentant ainsi son optimalité (un critère d'évaluation des architectures cognitives). Cette tâche fournit aussi un moyen d'évaluer les critères de séquentialité et de réactivité, et la manière dont ceux-ci peuvent être combinés. La cognition réactive s'observe dans la réaction initiale (réactivité) du système aux stimuli, la cognition algorithmique supporte l'adaptation du système lorsqu'un changement de stratégie est requis. Sur demande du niveau réflexif, la cognition algorithmique teste différentes hypothèses (découplage cognitif). C'est de cette opération qu'émergera la séquence d'action (séquentialité) à exécuter par le système. La séquence d'action contient une autre action à appliquer si la stratégie choisie en premier lieu n'est pas concluante.

La tâche de Wason est une tâche d'évaluation du raisonnement logique de l'individu. Notre simulation est la première simulation détaillée basée sur une implémentation

des théories des processus duaux qui rendent compte de l'ensemble des comportements observés dans la version abstraite de cette tâche (y compris la variété d'erreurs). Tous les éléments décrits dans le Framework tripartite de la tâche de Wason entrent en jeu dans cette tâche. Un élément qui n'avait pas été illustré dans les tâches précédentes est particulièrement bien illustré dans cette tâche : l'action de contrôle du niveau réflexif sur le découplage cognitif par l'entremise des dispositions de pensées. Nous avons initialisé l'architecture avec quatre profils dans cette tâche : fortement réactif, purement exécutif, faiblement réflexif et réflexif. Le profil fortement réactif explique la manière dont l'humain peut fournir une réponse logiquement fautive, mais moins coûteuse en ressources au problème. Les profils purement exécutifs et faiblement réflexifs rendent compte d'une erreur moins expliquée dans la littérature sur la modélisation de cette tâche, la manière dont le sujet peut fournir une réponse correcte, mais incomplète à la question. Le profil purement réflexif est le seul à avoir fourni une réponse complète, mais pour ce faire il doit avoir recours à l'ensemble des agents du système. Le système purement exécutif était capable de fournir une réponse partielle correcte en utilisant le moins de ressources computationnelles (et donc le moins de temps). Cette tâche est une particulièrement bonne illustration de la rationalité de notre architecture.

Enfin, deux tâches nous ont permis d'évaluer le fonctionnement émotionnel de notre architecture. Par la tâche de Stroop émotionnelle, proche de la tâche de Stroop classique, nous avons évalué l'interférence d'un contenu émotionnel sur une carte avec l'action de nommer une couleur. Cette tâche est une très bonne illustration du fonctionnement de notre modèle émotionnel, puisque l'émotion émerge du concept, qui lui-même renforce certains neuromodulateurs. En faisant varier les niveaux de neuromodulation, nous avons pu tester le système dans deux profils différents : normal et déprimé. Le comportement émerge alors des interactions des différents groupes modulés, en particulier les capteurs et effecteurs, et les agents de contrôle. Nous avons observé un temps de réponse plus élevé pour les mots émotionnels dans

les deux conditions, et un temps de réponse global supérieur dans la condition déprimée, montrant ainsi une variation de temps de réponse similaire aux sujets humains. Avec la tâche de tri de l'Iowa, nous avons évalué l'impact des émotions à un niveau cognitif plus élevé, l'anticipation du risque dans un jeu de pioche de cartes (avec des piles à gains ou pertes plus ou moins élevés). L'utilisation d'une combinaison de neuromodulation et d'émotions a permis de rendre le système meilleur par le renforcement de la stratégie à succès. Lorsque le gain (objectif) est renforcé dans le système, l'émotion, et les neuromodulateurs qui y sont associés, sont aussi plus activés, puisque le lien entre concept et neuromodulation est lui aussi renforcé. Dans cette tâche, l'architecture était plus performante que le sujet humain.

Cette validation pratique nous a aussi indirectement permis d'évaluer notre architecture en rapport aux différents critères d'évaluation théoriques. Notre architecture est assez forte sur les critères liés aux catégories de comportement, cognition, réalismes et validité scientifique. En revanche, elle est plus faible sur les aspects représentationnels ; c'est un aspect que nous avons en effet peu développé par rapport aux autres architectures cognitives. Nous rendons particulièrement bien compte des critères comportementaux de réactivité et de séquentialité qui nous intéressent dans cette recherche grâce à la théorie socle choisie, une théorie des processus duaux. Le niveau réactif agit. Les niveaux algorithmiques et réflexifs assurent la séquentialité. Le niveau réflexif notamment contient les séquences d'actions nécessaires à la réalisation d'un objectif. Son action en coopération avec le niveau algorithmique particulièrement bien illustré dans les tâches de Wisconsin et de Wason, adapte des plans complexes à l'environnement. Les actions qui composent une séquence sont envoyées une à une au niveau algorithmique et celui-ci signale au fur et à mesure de l'exécution des différentes actions son état au niveau réflexif modifiera l'orientation de celui-ci par l'emprunt d'un nouveau chemin d'action dans le graphe direct du niveau réflexif dépendamment du dernier état du niveau réactif observé. Cette séparation entre les trois niveaux assure aussi au niveau une certaine

robustesse : il ne changera pas de plan dès qu'un stimulus parviendra au niveau réactif, mais il pourra quand même en tenir compte dans son choix de plan. Le respect de ces deux critères séquentialité et réactivité est clairement lié dans notre architecture à l'interprétation que nous faisons du critère de rationalité, une rationalité réalisée par la dualité de l'esprit.

2 Contributions

D'un point de vue informatique, le caractère de notre architecture, son aptitude à emprunter différents profils de rationalité et différents profils émotionnels en fonction de son environnement la rend flexible. Plus particulièrement, sa flexibilité s'observe dans sa sensibilité aux changements de l'environnement et sa capacité à produire une réponse adaptée, non nécessairement optimale. Ces aptitudes sont importantes pour un système informatique prenant des décisions. Cette recherche représente une contribution significative puisqu'en proposant cette architecture d'agents à trois groupes, nous fournissons des pistes pour le développement de systèmes multi-agents plus efficaces et adaptés dans certains contextes applicatifs (par ex., adaptation temps réel du comportement d'une application à l'utilisateur). Ce système pourra aussi être utilisé dans des problématiques où les ressources attribuées à un système sont limitées et où il est tout de même nécessaire qu'il soit capable de fournir une réponse rapidement.

La modification de la dynamique du système grâce aux neuromodulations et émotions n'est pas utile qu'aux simulations psychologiques, elle peut aussi servir à définir le comportement d'un système : traitement rapide de l'information, système anxieux pour définir un comportement de fuite plus rapide du système (par ex. robot démineur). Le système de neuromodulations et émotions est un composant qui pourra être adapté à d'autres systèmes pour les faire gagner en granularité dans le contrôle.

Nous apportons aussi une contribution à certains des champs de recherches ouverts identifiés (Langley, Laird et Rogers, 2009) dans le domaine des architectures

cognitives : l'attention sensori-motrice, les capacités réflexives, l'hybridisme de comportement, le lien entre émotions et processus cognitifs. En ce qui concerne l'attention perceptuelle et les effecteurs, puisque les capteurs et effecteurs dans notre système sont liés à la carte conceptuelle du niveau réactif, ils sont déclenchés indirectement par l'attention (contrôle) du système. Le niveau réflexif et ses interactions avec le niveau algorithmique assurent les capacités réflexives du système. La modulation des fonctions de l'architecture par la modulation de leur fréquence d'envoi de messages rend le modèle émotionnel dans notre architecture particulièrement bien lié au fonctionnement général de l'architecture. L'émergence du comportement des interactions des trois groupes d'agents, dont deux sont spécialisés (l'un réactif et l'autre réflexif) et le troisième (l'algorithmique) assure la coopération, garantit l'hybridisme de l'architecture.

La contribution cognitive de notre architecture cognitive est claire. Nous fournissons le premier modèle computationnel du Framework tripartite de Stanovich et sa simulation informatique démontre la cohérence de cette théorie en tant que théorie unifiée la cognition. La simulation des tâches de Stroop Wisconsin et Wason démontre que cette théorie est capable de rendre compte adéquatement d'une variété de phénomènes cognitifs importants : l'attention, la flexibilité cognitive et stratégique, le raisonnement rationnel. Notre architecture est de plus un outil de simulation complet pour la reproduction d'un ensemble de tâches de tests des fonctions exécutives. Des simulations de tâches en conditions pathologiques pourront aussi être réalisées grâce à la présence des émotions et de la neuromodulation. Elle pourrait également être utilisée par différents chercheurs pour tester leurs modèles en modifiant ou remplaçant certains des agents de l'architecture. Nous pensons aussi que l'approche multi-agents facilitera le travail de chercheurs sur des modules isolés ou des fonctions cognitives spécifiques.

3 Limites et travaux futurs

Dans le futur, nous aimerions justement pouvoir profiter de la modularité de l'architecture qui la rend facilement modifiable. Pour parer aux faiblesses de l'architecture, nous aimerions tester l'implantation de différentes fonctionnalités qui nous semblaient intéressantes dans d'autres architectures. Par exemple, pour parer aux faiblesses représentationnelles de l'architecture, nous pourrions importer au niveau réactif les propriétés du réseau sémantique qui constitue la mémoire associative perceptuelle de LIDA et attribuer plus de propriétés aux différents nœuds qui le constituent, propriétés que nous ne sommes actuellement pas capables d'attribuer aux agents de notre carte conceptuelle (niveau réactif). Nous pourrions aussi au niveau réflexif nous inspirer du fonctionnement des codelets dans LIDA. Nous pourrions aussi intégrer grâce aux agents différents modules d'apprentissage présents dans d'autres architectures.

La flexibilité de comportement de l'architecture repose sur le fait de pouvoir réguler la dynamique des interactions par le biais des neuromodulations. Mais, nous avons finalement peu exploité les propriétés mathématiques du système dynamique qu'est notre architecture. Le système de neuromodulation, notamment, (et les interactions entre agents neuromodulateurs) aurait pu être augmenté de fonctions mathématiques qui orientent la manière dont le niveau d'un neuromodulateur est influencé par le niveau d'un autre neuromodulateur. Une meilleure exploitation des propriétés dynamiques de l'architecture aurait pu aussi améliorer ses performances (l'architecture est plus lente que ACT-R et l'humain). Notamment, au niveau réactif, les effecteurs auraient pu agir en comprenant mieux le moment auquel les agents réactifs tendaient vers la stabilité, les rendant ainsi plus rapides. Aussi, cela aurait permis d'améliorer le calibrage de l'architecture. De cette manière, l'inhibition d'activité routinière imparfaite (qui nous empêche de reproduire parfaitement le patron des résultats de sujets humains sains dans la tâche de Stroop et la tâche de Wisconsin) et, la régulation émotionnelle (qui nous empêchait de reproduire

parfaitement le patron de réponse à la tâche d'Iowa) auraient pu être reproduites en ayant la possibilité d'entraîner le système grâce à une série de résultats issus des données humaines.

Enfin, nous aimerions tester le fonctionnement de cette architecture dans des domaines autres que celui des simulations cognitives, notamment celui des systèmes tutoriels intelligents (STI). Dans différents systèmes tutoriels, des architectures cognitives ont été utilisées pour contrôler le comportement du STI. C'est notamment le cas de CELTS et CTS, où l'architecture LIDA était utilisée comme base du tuteur. Nous aimerions essayer de substituer dans différents tuteurs notre architecture à l'architecture utilisée. Nous pourrions ainsi évaluer la robustesse de cette architecture dans des tâches où les aspects de délibération sont complexes et où une stratégie doit être maintenue sur une période longue.

ANNEXE A

I. Niveau réactif

Knowledge

1. Réception d'un message d'activation
2. Si le message provient d'un agent Control :
 - a. Si le message est d'inhibition :
Diminution (d'un nombre prédéterminé) du nombre de messages à envoyer aux accointances
 - b. Si le message est d'excitation :
3. Augmentation (d'un nombre prédéterminé) du nombre de messages à envoyer aux accointances
4. Si le message provient d'un autre agent *Knowledge* :
 - a. Augmentation du nombre de messages envoyés à l'ensemble des accointances de l'agent

Sensor

(A intervalle régulier fixe)

1. Récupération de l'information dans l'environnement
2. Envoi d'un message aux agents *Knowledge* qui correspondent à cette information

Effector

1. L'effecteur compte les messages reçus des différents agents *Knowledge* leur étant connectés depuis leur dernière réponse

2. Si : $AgActFort - AgActMoinsFort > AgActFort / 2$

ou $AgActFort$ = agent dont l'effecteur a reçu le plus de messages

et $AgActMoinsFort$ = deuxième agent dont l'effecteur a reçu le plus de messages

a. Une réponse est écrite dans l'environnement

À réception d'un nouveau message, retour à l'étape 1

II. Niveau Algorithmique

RequestStatus et *StatusUpdate*

(À intervalle régulier)

1. Si le système est en mode normal (et non en découplage cognitif)
 - a. Récupération du statut des agents *Knowledge* (RS)
Sinon :
 - b. Récupération du statut des agents *SecondaryRepresentations* (RS)
2. Construction de la matrice de distance de l'activité du système à cet instant (SU)
3. Construction d'une représentation réduite de l'activité du système à cet instant (SU)
4. Envoi de la représentation réduite aux agents du groupe réflexif (SU)
5. Envoi de la matrice aux agents de *Control* (SU)

Control et Delta

1. Réception des deux matrices de distance (état courant en provenance de *StatusUpdate* et état souhaité en provenance du niveau réflexif) (*Diff*)
2. La différence entre les deux matrices de distance est calculée (*Diff*)
3. Si la différence est presque nulle, envoi d'un message de completion de l'agent *Goal*
4. Si on est en mode normal
 - a. Un nombre de messages proportionnel à cette différence (indiquant une inhibition ou une excitation) est envoyé à chaque agent correspondant au niveau réactif (*Control*)

Sinon :

- a. Un nombre de messages proportionnel à cette différence est envoyé à chaque agent *SecondaryRepresentation* correspondant (*Control*)

À réception d'un nouveau message, retour à l'étape 1

III - Niveau réflexif

GoalSet

(Tous les agents *GoalSet* actifs travaillent en parallèle)

1. Si un message arrive en provenance d'autres agents *GoalSet*
 - a. Augmentation de l'activation (*activ*) de cet agent
2. Envoi d'autant de messages d'activation à l'agent qui suit dans le chemin

3. Si réception de messages en provenance d'une représentation réduite :

a. augmentation de l'activation correspondant au concept de manière à ce que l'augmentation d'activation finale soit :

$$\text{activ} = \text{activ} + 2 * \sum_{0n} (\text{dCour}_n \text{ dObj}_n)$$

où :

n = nombre de membre distances contenues dans la matrice de distance

dObj_n = distance requise entre ces deux concepts dans la matrice d'objectif de cet agent

dCour_n = distance requise entre ces deux concepts dans la représentation courante de l'état du système

4. Si l'agent *GoalSet* est le dernier du chemin dans le graphe:

a. envoie le chemin parcouru à l'agent *Goal*

Envoi de message : période : (pause/activ)

À réception d'un nouveau message, retour à l'étape 1

Goal

1. Si *Goal* est interpellé par plusieurs agents *GoalSet* sur une période et que seul un agent l'emporte (la différence entre les agents les plus actifs est au-dessus d'un seuil prédéfini (degré de sensibilité))

- a. celui qui aura envoyé le plus de messages sur une période gagne (soft-winner-take all en mode normal, winner-take-all dans le cas d'un découplage cognitif)

Succès du premier agent à envoyer sa réponse (le chemin le plus court (par exemple, le plan le plus simple) ou le chemin le plus actif (i.e, le plan le plus récent ou le plus souvent utilisé))

Sinon (dans le cas où plus d'un agent l'emporterait):

- b. lancement d'un découplage cognitif par l'envoi d'un message à *SimAct*

2. Si Goal reçoit un message de complétion d'objectif de Control, ++ dans le chemin d'objectif.

À réception d'un nouveau message, retour à l'étape 1

IV- Découplage cognitif

SimAct, Goal et SecondaryRepresentation

1. Si un découplage cognitif est initié et que des dispositions de pensées visant à récupérer des informations avant celle-ci sont activées (exemple *TDthinkExtensively*)
2. Le niveau algorithmique est contacté et les agents *RequestStatus* et *StatusUpdate* récupèrent ses informations (voir section II)
3. *RequestStatus* et *StatusUpdate* agissent maintenant sur les agents *SecondaryRepresentation*

4. Les *SecondaryRepresentation* s'initient chacun avec un concept de la représentation réduite, ils se comportent ensuite comme des agents *Knowledge* (section I)

5. Les dispositions de pensée agissent sur les activations des différentes connaissances de la représentation secondaires (exemple : *TDNo*)

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, J. R. (1983). «A spreading activation theory of memory». *Journal of verbal learning and verbal behavior*, vol. 3, no 22, 261-295.
- Anderson, J. R. (1996). «ACT: A simple theory of complex cognition. ». *American Psychologist*, vol. 51, no 4.
- Anderson, J. R. (2007). «Using brain imaging to guide the development of a cognitive architecture». In *Integrated Models of Cognitive Systems* W.D. Gray, (p. 49-62). New York, NY: Oxford University Press.
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., & Qin, Y. . (2004). «An integrated theory of the mind». *Psychological Review*, vol. 111, no 4, 1036-1060.
- Anderson, J. R., et Lebiere, C. (2003). «The Newell test for a theory of cognition». *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 26, no 05, 587-601.
- Arbib, M. A., et Fellous, J. M. (2004). «Emotions: from brain to robot». *Trends in cognitive sciences*, vol. 8, no 12, 554-561.
- Ashby, F. G., et Isen, A. M. (1999). «A neuropsychological theory of positive affect and its influence on cognition». *Psychological Review*, vol. 106, no 3, 529.
- Ashby, F. G., et Waldron, E. M. (2000). «The neuropsychological bases of category learning». *Current Directions in Psychological Science*, vol. 9, no 1, 10-14.

Baars, B. J. (1989). *A cognitive theory of consciousness*: Cambridge University Press.

Baars, B. J., et Franklin, S. (2009). «Consciousness is computational: The LIDA model of global workspace theory». *International Journal of Machine Consciousness*, vol. 1, no 01, 23-32.

Baddeley, A., Logie, R., Bressi, S., Sala, S. D., & Spinnler, H. . (1986). «Dementia and working memory». *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 38, no 4, 603-618.

Balan, G., Cioffi-Revilla, C., Luke, S., Panait, L. et Paus, S. (2003). *MASON: A Java Multi-Agent Simulation Library: Proceedings of the Agent 2003 Conference*.

Baratgin, J. (2002). «Le jugement probabiliste». *G. Politzer, Le raisonnement humain*, 241-270.

Bargh, J. A., et Chartrand, T. L. (1999). «The unbearable automaticity of being». *American Psychologist*, vol. 54, no 7, 462.

Barrett, L. F. (2006). «Are emotions natural kinds?». *Perspectives on Psychological Science*, vol. 1, no 1, 28-58.

Barsalou, L. W. (1999). «Perceptual symbol systems». *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 22, 577-660.

Basso, M. R., Bornstein, R. A. et Lang, J. M. (1999). «Practice effects on commonly used measures of executive function across twelve months». *The Clinical Neuropsychologist*, vol. 13, no 3, 283-292.

Bear, M. F., Connors, B. W., Nieoullon, A. et Paradiso, M. A. (2007). *Neurosciences*: Éditions Pradel.

Bear, M. F., Connors, B. W. et Paradiso, M. A. (2007). *Neuroscience*. Lippincott Williams & Wilkins.

- Bechara, A., Damasio, A. R., Damasio, H. et Anderson, S. W. (1994). «Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex». *Cognition*, vol. 50, no 1, 7-15.
- Berridge, K. C. (2003). «Pleasures of the brain». *Brain and cognition*, vol. 52, no 1, 106-128.
- Bishara, A. J., Kruschke, J. K., Stout, J. C., Bechara, A., McCabe, D. P. et Busemeyer, J. R. (2010). «Sequential learning models for the Wisconsin card sort task: Assessing processes in substance dependent individuals». *Journal of mathematical psychology*, vol. 54, no 1, 5-13.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S. et Cohen, J. D. (2001a). «Conflict monitoring and cognitive control». *Psychological Review*, vol. 108, no 3, 624.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S. et Cohen, J. D. (2001b). «Conflict monitoring and cognitive control». *Psychol Rev*, vol. 108, no 3, 624-652.
- Briand, L. A., Gritton, H., Howe, W. M., Young, D. A. et Sarter, M. (2007). «Modulators in concert for cognition: modulator interactions in the prefrontal cortex». *Progress in neurobiology*, vol. 83, no 2, 69-91.
- Brooks, R. A. (1991). «Intelligence Without Representation». *Artificial intelligence*, vol. 47, 139-159.
- Campagne, J. C. (2005). «Morphologie et système multi-agent (Morphology and multi-agent system. ». PARIS, Computer science, Université Pierre et Marie Curie.
- Camus, M. (2007). « Un système auto-adaptatif générique pour le contrôle de robots et d'entités logicielles ». PARIS, Computer Science, Université Pierre et Marie Curie.

- Cardon, A. (2005). *La complexité organisée : systèmes adaptatifs et champ organisationnel*. Paris: Hermès Science Publications.
- Chown, E., Jones, R. M. et Henninger, A. E. (2002). *An architecture for emotional decision-making agents: Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1*. ACM, 352-353.
- Clore, G. L., et Ortony, A. (1988). «The Semantics of the affective lexicon». In *Cognitive perspectives on emotion and motivation*, (p. 367-397): Springer.
- Cohen, J. D., Dunbar, K. et McClelland, J. L. (1990). «On the control of automatic processes: a parallel distributed processing account of the Stroop effect». *Psychological Review*, vol. 97, no 3, 332-341.
- Cohen, J. D., et Servan-Schreiber, D. (1992). «Context, cortex, and dopamine: a connectionist approach to behavior and biology in schizophrenia». *Psychological Review*, vol. 99, no 1, 45-57.
- Collins, A. M., et Quillian, M. R. (1969). «Retrieval time from semantic memory». *Journal of verbal learning and verbal behavior*, vol. 8, no 2, 240-247.
- Cosmides, L. (1989). «The logic of social exchange: has natural selection shaped how humans reason? Studies with the Wason selection task». *Cognition*, vol. 31, no 3, 187-276.
- Cosmides, L., et Tooby, J. (2000). «Consider the source: The evolution of adaptations for decoupling and metarepresentation». *Metarepresentations: A multidisciplinary perspective*, 53-115.
- Cox, J. R., et Griggs, R. A. (1982). «The effects of experience on performance in Wason's selection task». *Mem Cognit*, vol. 10, no 5, 496-502.

- Dai, Q., et Feng, Z. (2011). «Deficient interference inhibition for negative stimuli in depression: An event-related potential study». *Clinical Neurophysiology*, vol. 122, no 1, 52-61.
- Damasio, A. (2005). *Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain*: Penguin. com.
- Damasio, A. R., Tranel, D. et Damasio, H. (1991). «Somatic markers and the guidance of behavior: Theory and preliminary testing». *Frontal lobe function and dysfunction*, 217-229.
- De Neys, W. (2006). «Automatic–heuristic and executive–analytic processing during reasoning: Chronometric and dual-task considerations». *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 59, no 6, 1070-1100.
- De Neys, W., Vartanian, O. et Goel, V. (2008). «Smarter Than We Think When Our Brains Detect That We Are Biased». *Psychological Science*, vol. 19, no 5, 483-489.
- De Sousa, R. (1990). *The rationality of emotion*: Mit Press.
- Dehaene, S., et Changeux, J.-P. (1991). «The Wisconsin Card Sorting Test: theoretical analysis and modeling in a neuronal network». *Cerebral cortex*, vol. 1, no 1, 62-79.
- Dehaene, S., Kerszberg, M. et Changeux, J.-P. (1998). «A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks». In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, (p. 14529–14534).
- Ekman, P. (1992). «An argument for basic emotions». *Cognition and Emotion*, vol. 6, 169-200.
- Ekman, P., Cordaro, D. . (2011). «What is meant by calling emotions basic ». *Emotion Review*, vol. 3, 364–370.

- Eliasmith, C. (2013). *How to build a brain: A neural architecture for biological cognition*: Oxford University Press.
- Engle, R. W. (2010). «Role of Working Memory capacity in Cognitive Control». *Current Anthropology*, vol. 51, no 1, 17-26.
- Evans, J. (2006a). *Dual system theories of cognition: Some issues. Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. 202-207.
- Evans, J. S. B. (2008). «Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition». *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 59, 255-278.
- Evans, J. S. B., Handley, S. J., Neilens, H. et Over, D. (2010). «The influence of cognitive ability and instructional set on causal conditional inference». *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 63, no 5, 892-909.
- Evans, J. S. B., et Stanovich, K. E. (2013). «Dual-process theories of higher cognition advancing the debate». *Perspectives on Psychological Science*, vol. 8, no 3, 223-241.
- Evans, J. S. B. T. (1989). *Bias in Human Reasoning: Causes and Consequences*. New York: Erlbaum.
- Evans, J. S. B. T. (1998). «Matching Bias in Conditional Reasoning: Do We Understand it After 25 Years?». *Thinking & Reasoning*, vol. 4, no 1, 45-110.
- Evans, J. S. B. T. (2006b). «The heuristic-analytic theory of reasoning: extension and evaluation». *Psychon Bull Rev*, vol. 13, no 3, 378-395.
- Evans, J. S. B. T., et Lynch, J. (1973). « Matching bias in the selection task». *British Journal of Psychology*, vol. 64, 391-397.

- Evans, J. S. B. T., Newstead, S. E. et Byrne, R. M. J. (1993). *Human reasoning : the psychology of deduction*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates.
- Faghihi, U., Fournier-Viger, P. et Nkambou, R. (2012). «A computational model for causal learning in cognitive agents». *Knowledge-Based Systems*, vol. 30, 48-56.
- Fellous, J.-M. (1999). «Neuromodulatory basis of emotion». *The neuroscientist*, vol. 5, no 5, 283-294.
- Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents vers une intelligence collective*. Coll. «Informatique, intelligence artificielle». Paris: InterÉditions.
- Ferber, J., Gutknecht, O. et Michel, F. (2003). «From Agents to Organizations : an Organizational View of MultiAgent Systems». Dans *Agent-Oriented Software Engineering (AOSE) IV* (Melbourne), sous la dir. de Jörg Müller P. Giorgini, James Odell, , 214-230. Melbourne.
- Ferber, J., Gutknecht, O. et Michel, F. (2004). «From agents to organizations: an organizational view of multi-agent systems». In *Agent-Oriented Software Engineering IV*, (p. 214-230): Springer.
- Fodor, J. A., et Pylyshyn, Z. W. (1988). «Connectionism and cognitive architecture: A critical analysis». *Cognition*, vol. 28, no 1, 3-71.
- Fontaine, J. R., Scherer, K. R., Roesch, E. B. et Ellsworth, P. C. (2007). «The world of emotions is not two-dimensional». *Psychological Science*, vol. 18, no 12, 1050-1057.
- Frank, M. J., Loughry, B., O'Reilly, R.C. (2001). «Interactions between the frontal cortex and basal ganglia in working memory: A computational model». *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 137-160.

- Frankish, K., et Evans, J. S. B. T. (2009). «The duality of mind: a historical perspective». In *In two minds: Dual processes and beyond*, K. Frankish et J. S. Evans, (p. 1-29). Oxford: Oxford University Press.
- Franklin, S., et Patterson Jr, F. (2006). «The LIDA architecture: Adding new modes of learning to an intelligent, autonomous, software agent». *pat*, vol. 703, 764-1004.
- Franklin, S., Ramamurthy, U., D'Mello, S., McCauley, L., Negatu, A., R., S. et Datla, V. (2007). «LIDA: A computational model of global workspace theory and developmental learning. ». In *AAAI Fall Symposium on AI and Consciousness: Theoretical Foundations and Current Approaches*, (p. Arlington.
- Fum, D., et Stocco, A. (2004). *Memory, Emotion, and Rationality: An ACT-R interpretation for Gambling Task results: ICCM*. 106-111.
- Gigerenzer, G., et Gaissmaier, W. (2011). «Heuristic decision making». *Annual review of psychology*, vol. 62, 451-482.
- Gigerenzer, G., et Selten, R. (2002). *Bounded rationality: The adaptive toolbox*. Massachusetts: Mit Press.
- Gilbert, S. J., et Shallice, T. (2002). «Task switching: a PDP model». *Cogn Psychol*, vol. 44, no 3, 297-337.
- Goel, V. (2007). «Anatomy of deductive reasoning». *Trends in cognitive sciences*, vol. 11, no 10, 435-441.
- Goel, V. (2009). «Cognitive Neuroscience of Thinking». In *Handbook of Neuroscience for the Behavioral Sciences*, G. Berntson et J. Cacioppo, (p. 15-25). New York: Wiley.

- Gotlib, I. H., et McCann, C. D. (1984). «Construct accessibility and depression: An examination of cognitive and affective factors». *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 47, no 2, 427.
- Graesser, A. C., et Franklin, S. P. (1990). «QUEST: A cognitive model of question answering». *Discourse processes*, vol. 13, no 3, 279-303.
- Grant, D. A., et Berg, E. A. (1948). «A behavioural analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem». *Journal of experimental psychology*, vol. 38, 404-411.
- Gratch, J., et Marsella, S. (2001). *Tears and fears: Modeling emotions and emotional behaviors in synthetic agents: Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*. ACM, 278-285.
- Gratch, J., et Marsella, S. (2004). «A domain-independent framework for modeling emotion». *Cognitive Systems Research*, vol. 5, no 4, 269-306.
- Greene, J. D., Nystrom, L. E., Engell, A. D., Darley, J. M. et Cohen, J. D. (2004). «The neural bases of cognitive conflict and control in moral judgment». *Neuron*, vol. 44, no 2, 389-400.
- Guessoum, Z., Briot, J.-P., Faci, N. et Marin, O. (2004). «Vers des systèmes multi-agents tolérants aux pannes.». Dans *JFSMA'04* (Paris.), sous la dir. de, 135-150. Paris.
- Gutknecht, O., et Ferber, J. (2000). «MadKit: a generic multi-agent platform». Dans *Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents* (Barcelona, Spain), sous la dir. de, 78-79. Barcelona, Spain: ACM.
- Hannoun, M., Boissier, O., Sichman, J. S. et Sayettat, C. (2000). «MOISE: An organizational model for multi-agent systems». In *Advances in Artificial Intelligence*, (p. 156-165): Springer.

- Harnad, S. (1990). «The symbol grounding problem». *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 42, no 1-3.
- Havasi, C., Speer, R. et Alonso, J. (2007). «Conceptnet: A lexical resource for common sense knowledge». *Recent advances in natural language processing V: selected papers from RANLP*, vol. 309, 269.
- Hazy, T. E., Frank, M. J. et O'Reilly, R. C. (2007). «Towards an executive without a homunculus: computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 362, no 1485, 1601-1613.
- Heaton, R. K. (1993). «Wisconsin card sorting test: computer version 2». *Odessa: Psychological Assessment Resources*.
- Hebb, D. O. (2005). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*: Psychology Press.
- Hélie, S., et Sun, R. (2010). «Incubation, insight, and creative problem solving: a unified theory and a connectionist model». *Psychological Review*, vol. 117, no 3, 983-994.
- Herd, S. A., Banich, M. T. et O'Reilly, R. C. (2006). «Neural mechanisms of cognitive control: An integrative model of Stroop task performance and fMRI data». *Journal of cognitive neuroscience*, vol. 18, no 1, 22-32.
- Hobson, J. A. (2002). *The Dream Drugstore: Chemically Altered States of Consciousness*: MIT Press.
- Ionescu, S., Blanchet, A. et Gaonac'h, D. (2006). *Psychologie cognitive et bases neurophysiologiques du fonctionnement cognitif*, 1re éd. Coll. «Nouveau cours de psychologie». Paris: Presses universitaires de France.
- Izard, C. E. (2011). «Forms and functions of emotions: Matters of emotion-cognition interactions.». *Emotion Review*, vol. 3,, 371-378.

- Jennings, N. R. (2000). «On agent-based software engineering». *Artificial intelligence*, vol. 117, no 2, 277-296.
- Jilk, D. J., Lebiere, C., O'Reilly, R. C. et Anderson, J. R. (2008). «SAL: An explicitly pluralistic cognitive architecture». *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 20, no 3, 197-218.
- Johnson-Laird, P. N. (1995). «Mental models, deductive reasoning, and the brain». *The cognitive neurosciences*, 999-1008.
- Juvina, I., Taatgen, N.A., Dickison, D. . (2007). *Cognitive Control as Alternation of Activation and Suppression in the Stroop Task. Annual Conference of the Cognitive Science Society* (Nashville, TN, USA).
- Kahneman, D. (2003). «Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics». *The American economic review*, vol. 93, no 5, 1449-1475.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. New York: Macmillan.
- Kane, M. J., et Engle, R. W. (2003). «Working-memory capacity and the control of attention: the contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference». *J Exp Psychol Gen*, vol. 132, no 1, 47-70.
- Kaplan, G. B., Şengör, N. S., Gürvit, H., Genç, İ. et Güzeliş, C. (2006). «A composite neural network model for perseveration and distractibility in the Wisconsin card sorting test». *Neural Networks*, vol. 19, no 4, 375-387.
- Kennedy, W. G., et Patterson, R. E. (2012). *Modeling intuitive decision making in ACT-R: Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Modeling*. 1-6.

- Keren, G., et Schul, Y. (2009). «Two Is Not Always Better Than One A Critical Evaluation of Two-System Theories». *Perspectives on Psychological Science*, vol. 4, no 6, 533-550.
- Kimberg, D. Y., et Farah, M. J. (1993a). «A unified account of cognitive impairments following frontal lobe damage: the role of working memory in complex, organized behavior». *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 122, no 4, 411.
- Kimberg, D. Y., et Farah, M. J. (1993b). «A unified account of cognitive impairments following frontal lobe damage: the role of working memory in complex, organized behavior». *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 122, no 4, 403-411.
- Klein, G. S. (1964). «Semantic Power Measured through the Interference of Words with Color-Naming». *Am J Psychol*, vol. 77, 576-588.
- Klein, S. B., et Loftus, J. (1990). «Rethinking the role of organization in person memory: An independent trace storage model». *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 59, no 3, 400.
- Laird, J. E. (2012). *The Soar Cognitive Architecture*. Cambridge, MA. : MIT Press.
- Langley, P., Laird, J. E. et Rogers, S. (2009). «Cognitive architectures: Research issues and challenges». *Cognitive Systems Research*, vol. 10, no 2, 141-160.
- Larue, O., Camus, M. et Poirier, P. (2010). «Testing the Attention Capacities of a Complex Auto- Adaptive System: A Stroop Task Simulation». Dans *Florida Artificial Intelligence Research Society - FLAIRS 2010* (Daytona), sous la dir. de Daytona.
- Larue, O., Poirier, P. et Camus, M. (in press). «Testing variation of attention capacities in a complex auto-adaptive system». *Journal of Experiment and Theoretical Artificial Intelligence*.

- Larue, O., Poirier, P. et Nkambou, R. (2012). «A three-level cognitive architecture for the simulation of human behaviour». In *Advances in Artificial Intelligence*, (p. 337-342): Springer.
- Larue, O., Poirier, P. et Nkambou, R. (2013a). «The emergence of (artificial) emotions from cognitive and neurological processes». *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, vol. 4, 54-68.
- Larue, O., Poirier, P. et Nkambou, R. (2013b). «Hypothetical-thinking based on cognitive decoupling and thinking dispositions in a dual cognitive agent». *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, vol. 6, 67-75.
- Larue, O. P., P.; Camus, M.; . (2011). *Simulating cognitive phenomena with a symbolic dynamical system: Behaviour Representation in Modeling and Simulation* (Sundance (Utah)).
- Lazarus, R. S. (1991). *Emotion and adaptation*. Oxford: Oxford University Press.
- Lazarus, R. S., Averill, J. R. et Opton, E. M. (1970). «Towards a cognitive theory of emotion». *Feelings and emotions*, 207-232.
- Lemaire, P. (2006). *Abrégé de psychologie cognitive*. Paris: De Boeck Supérieur.
- Levenson, R. W. (2011). «Basic emotion questions». *Emotion Review*, vol. 3, 379-386.
- Lieberman, M. (2009). «What zombies can't do : a social cognitive neuroscience approach to the irreducibility of reflective consciousness». In *In two minds: Dual processes and beyond*, K. Frankish et J. S. Evans, (p. 293-316). Oxford: Oxford University Press.
- Lieberman, M. D. (2007). «Social cognitive neuroscience: a review of core processes». *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 58, 259-289.

- Lindquist, K. A. (2013). «Emotions emerge from more basic psychological ingredients: A modern psychological constructionist model». *Emotion Review*, vol. 5, no 4, 356-368.
- Lindquist, K. A., Wager, T. D., Kober, H., Bliss-Moreau, E. et Barrett, L. F. (2012). «The brain basis of emotion: a meta-analytic review». *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 35, no 03, 121-143.
- Lovett, M. C. (2002). «Modeling selective attention: Not just another model of Stroop (NJAMOS)». *Cognitive Systems Research*, vol. 3, no 1, 67-76.
- Lövheim, H. (2012). «A new three-dimensional model for emotions and monoamine neurotransmitters». *Medical hypotheses*, vol. 78, no 2, 341-348.
- Marinier III, R. P., et Laird, J. E. (2004). *Toward a Comprehensive Computational Model of Emotions and Feelings: ICCM*. 172-177.
- Marsella, S. C. a. G., Jonathan. (2009). «EMA: A process model of appraisal dynamics». *Journal of Cognitive Systems Research*, vol. 10, 70-90.
- Mathews, A., et MacLeod, C. (1994). «Cognitive approaches to emotion and emotional disorders». *Annual review of psychology*, vol. 45, no 1, 25-50.
- McClure, S. M., Laibson, D. I., Loewenstein, G. et Cohen, J. D. (2004). «Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards». *Science*, vol. 306, no 5695, 503-507.
- Middleton, F., Strick, P. (2000). «Basal ganglia output and cognition: evidence from anatomical, behavioral, and clinical studies». *Brain and cognition*, vol. 42, no 2, 183-200.
- Milner, B. (1963). «Effects of different brain lesions on card sorting: The role of the frontal lobes». *Archives of Neurology*, vol. 9, no 1, 90.

- Minsky, M. L. (1986). *The society of mind*. New York, N.Y.: Simon and Schuster.
- Mitterschiffthaler, M., Williams, S., Walsh, N., Cleare, A., Donaldson, C., Scott, J. et Fu, C. (2008). «Neural basis of the emotional Stroop interference effect in major depression». *Psychological Medicine*, vol. 38, no 02, 247-256.
- Mohammad, S. M., et Turney, P. D. (2010). *Emotions evoked by common words and phrases: Using Mechanical Turk to create an emotion lexicon: Proceedings of the NAACL HLT 2010 Workshop on Computational Approaches to Analysis and Generation of Emotion in Text*. Association for Computational Linguistics, 26-34.
- Moors, A., Ellsworth, P. C., Scherer, K. R. et Frijda, N. H. (2013). «Appraisal theories of emotion: State of the art and future development». *Emotion Review*, vol. 5, no 2, 119-124.
- Moors, A., Ellsworth, P., Scherer, K. R., Frijda, N. H. (2013). «Appraisal theories of emotion: State of the art and future development». *Emotion Review*, vol. 5, 119-124.
- Müller, J. P. (1996). «The agent architecture interrapp». *The Design of Intelligent Agents: A Layered Approach*, 45-123.
- Nagahama, Y., Okina, T., Suzuki, N., Nabatame, H. et Matsuda, M. (2005). «The cerebral correlates of different types of perseveration in the Wisconsin Card Sorting Test». *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 76, no 2, 169-175.
- Naqvi, N., Shiv, B. et Bechara, A. (2006). «The role of emotion in decision making a cognitive neuroscience perspective». *Current Directions in Psychological Science*, vol. 15, no 5, 260-264.
- Newell, A. (1980). «Physical symbol systems». *Cognitive Science*, vol. 4, no 2, 135-183.

- Newell, A. (1990). *Unified theories of cognition*. Coll. «William James lectures 1987». Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Newell, A. S., H. . (1972). *Human Problem Solving*.: Englewood Cliffs.
- Nichols, S., et Stich, S. P. (2003). *Mindreading: An integrated account of pretence, self-awareness, and understanding other minds*: Clarendon Press/Oxford University Press.
- Norman, D. A., et Shallice, T. (1980). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour, University of California San Diego CHIP Report 99..
- Noveck, I., Mercier, H., Rossi, S. et Van der Henst, J.-B. (2007a). « Psychologie cognitive et raisonnement.». In *Psychologies du raisonnement*, S. Rossi et J-B Van der Henst, (p. 39-76): Deboeck.
- Noveck, I., Van der Henst, J., Rossi, S. et Mercier, H. (2007b). «Psychologie cognitive et raisonnement». *Psychologies du raisonnement*. Bruxelles: DeBoeck.
- Nyhus, E., et Barcelo, F. (2009). «The Wisconsin Card Sorting Test and the cognitive assessment of prefrontal executive functions: a critical update». *Brain Cogn*, vol. 71, no 3, 437-451.
- O'Reilly, R. C. (1996). «The Leabra Model of Neural Interactions and Learning in the Neocortex». Pittsburgh, PA, Carnegie Mellon University.
- O'Reilly, R. C., Hazy, T. E. et Herd, S. A. (2012). *The Leabra Cognitive Architecture: How to Play 20 Principles with Nature and Win!*, The Oxford Handbook of Cognitive Science. Oxford: Oxford University Press
- O'Reilly, R. C., Herd, S. A. et Pauli, W. M. (2010). «Computational models of cognitive control». *Current opinion in neurobiology*, vol. 20, no 2, 257-261.

- O'Reilly, R. C., et Munakata, Y. (2000). *Computational explorations in cognitive neuroscience: Understanding the mind by simulating the brain*: MIT press.
- O'Reilly, R. C. (1996). «The Leabra model of neural interactions and learning in the neocortex». Carnegie Mellon University.
- Oatley, K., et Johnson-Laird, P. N. (1987). «Towards a cognitive theory of emotions». *Cognition and Emotion*, vol. 1, no 1, 29-50.
- Panksepp, J., et Biven, L. (2012). *The Archaeology of Mind: Neuroevolutionary Origins of Human Emotions (Norton Series on Interpersonal Neurobiology)*: WW Norton & Company.
- Panksepp, J., Watt, D. . (2011). «What is basic about basic emotions? Lasting lessons from affective neuroscience». *Emotion Review*, vol. 3, 387-396.
- Perkins, D. N. (1995). *Outsmarting Intelligence Quotient*: Simon and Schuster.
- Petrov, A., et Kokinov, B. (1999). «Processing symbols at variable speed in DUAL: Connectionist activation as power supply». In *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (p. 846-851).
- Plate, T. (2003). *Holographic reduced representations*, Stanford: CSLI.
- Roberts, M. J., et Newton, E. J. (2001). «Inspection times, the change task, and the rapid-response selection task». *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, vol. 54, no 4, 1031-1048.
- Roelofs, A. (2003). «Goal-referenced selection of verbal action: modeling attentional control in the Stroop task». *Psychological Review*, vol. 110, no 1, 88-125.
- Rougier, N. P., et O'Reilly, R. C. (2002). «Learning representations in a gated prefrontal cortex model of dynamic task switching». *Cognitive Science*, vol. 26, no 4, 503-520.

- Rumelhart, D. E., et McClelland, J. L. (1986). «On learning the past tenses of English verbs». In *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition. Volume 2: Psychological and biological models*, J.L. and Rumelhart D. E. McClelland, (p. 216–271). Cambridge, MA: MIT Press.
- Russell, J. (2009). «Emotion, core affect, and psychological construction». *Cognition and Emotion*, vol. 23, no 7, 1259-1283.
- Russell, J. A. (2003). «Core affect and the psychological construction of emotion». *Psychological Review*, vol. 110, no 1, 132-145.
- Sander, D., et Scherer, K. (2009). *Traité de psychologie des émotions*. Paris: Dunod.
- Scherer, K. R. (2001). «Appraisal considered as a process of multi-level sequential checking». In *Appraisal processes in emotion: Theory, Methods, Research*, A. Schorr K. R. Scherer, & T. Johnstone, (p. 92–120): New York and Oxford: Oxford University Press.
- Simon, H. A. (1955). «A behavioral model of rational choice». *The quarterly journal of economics*, vol. 69, no 1, 99-118.
- Sloman, A. (2001). *Varieties of affect and the cogaff architecture schema: Proceedings of the AISB'01 symposium on emotions, cognition, and affective computing. The Society for the Study of Artificial Intelligence and the Simulation of Behaviour*.
- Sloman, A. (2004). *What Are Emotion Theories About?* 128-134.
- Sloman, A., et Chrisley, R. L. (2003). «Virtual machines and consciousness». *Journal of Consciousness Studies*, vol. 10, no 4-5, 133-172.

- Sloman, A., et Logan, B. (1999). «Building cognitively rich agents using the Sim agent toolkit». *Communications of the Association of Computing Machinery*, vol. 42, 71--77.
- Stanovich, K. (2011). *Rationality and the reflective mind*. Oxford: Oxford University Press.
- Stanovich, K. E. (2009). *What intelligence tests miss: The psychology of rational thought*. Yale University Press.
- Stanovich, K. E., West, R. F. et Toplak, M. E. (2010). «17 Individual differences as essential components of heuristics and biases research». *The Science of Reason: A Festschrift for Jonathan St BT Evans*, 355.
- Strauss, E., Sherman, E. M. S. et Spreen, O. U. (2006). *A compendium of neuropsychological tests: administration, norms, and commentary*. Oxford: Oxford University Press.
- Stroop, J. R. (1935). «Studies of interference in serial verbal reactions». *Journal of experimental psychology*, vol. 18, no 6, 632-643.
- Sun, R. (2004). «Desiderata for cognitive architectures». *Philosophical Psychology*, vol. 17, no 3, 341-373.
- Sun, R., Lane, S. et Matthews, R. (2009). «The two systems of learning». In *In two minds: Dual processes and beyond*, K. Frankish et J. S. Evans, (p.: Oxford University Press.
- Sun, R., et Naveh, I. (2007). «Social institution, cognition, and survival: a cognitive-social simulation». *Mind & Society*, vol. 6, no 2, 115-142.
- Thagard, P., & Schröder, T. . (2013). «Emotions as semantic pointers: Constructive neural mechanisms». In *The psychological construction of emotions.*, L.F & Russell Barrett, J. A., (p. New York: Guilford.: Guilford.

- Tomkins, S. S. (1984). «Affect theory». In *Approaches to emotion* K. R. Scherer & P. Ekman, (p. 163-196): Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Treur, J. (2013). «An integrative dynamical systems perspective on emotions». *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, vol. 4, 27-40.
- Tsujii, T., et Watanabe, S. (2010). «Neural correlates of belief-bias reasoning under time pressure: a near-infrared spectroscopy study». *Neuroimage*, vol. 50, no 3, 1320-1326.
- Tversky, A., et Kahneman, D. (1974). «Judgment under uncertainty: Heuristics and biases». *Science*, vol. 185, no 4157, 1124-1131.
- Tversky, A., et Kahneman, D. (1983). «Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment». *Psychological Review*, vol. 90, no 4, 281-293.
- Valdez, P., et Mehrabian, A. (1994). «Effects of color on emotions». *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 123, no 4, 375-394.
- Velasquez, J. (1998). «Modeling emotion-based decision-making». *Emotional and intelligent: The tangled knot of cognition*, 164-169.
- Villejoubert, G. (2009). *Are representativeness judgments automatic and rapid? The effect of time pressure on the conjunction fallacy: Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science society.* 2980-2985.
- Vinokurov, Y., Lebiere, C., Szabados, A., Herd, S. et O'Reilly, R. (2013). «Integrating top-down expectations with bottom-up perceptual processing in a hybrid neural-symbolic architecture». *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, vol. 6, 140-146.
- Wagner, A. D., Paré-Blagoev, E. J., Clark, J. et Poldrack, R. A. (2001). «Recovering meaning: left prefrontal cortex guides controlled semantic retrieval». *Neuron*, vol. 31, no 2, 329-338.

- Wason, P. (1966). *Reasoning*. Coll. «New horizons in psychology». Harmondsworth: Penguin.
- Williams, J. M. G., Mathews, A. et MacLeod, C. (1996). «The emotional Stroop task and psychopathology». *Psychological bulletin*, vol. 120, no 1, 3-14.
- Wooldridge, M., Jennings, N. R. et Kinny, D. (2000). «The Gaia methodology for agent-oriented analysis and design». *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 3, no 3, 285-312.
- Wooldridge, M. J. (2009). *An introduction to multiagent systems*, 2nd. Chichester: Wiley.
- Zambonelli, F., Jennings, N. R. et Wooldridge, M. (2001). *Organisational abstractions for the analysis and design of multi-agent systems: Agent-Oriented Software Engineering*. Springer, 235-251.