Coordination implicite d'interactions sensorimotrices comme fondement de la cognition

Jean-Charles Quinton

▶ **To cite this version:**

Jean-Charles Quinton. Coordination implicite d'interactions sensorimotrices comme fondement de la cognition. Intelligence artificielle [cs.AI]. Institut National Polytechnique (Toulouse), 2008. Français. NNT : 2008INPT034H . tel-00361431v2

HAL Id: tel-00361431

https://theses.hal.science/tel-00361431v2

Submitted on 17 Feb 2009

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

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

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National Polytechnique de Toulouse*
Discipline ou spécialité : *Intelligence Artificielle*

Présentée et soutenue par *Jean-Charles Quinton*
Le *14/11/2008*

Titre :
Coordination implicite
d'interactions sensorimotrices
comme fondement de la cognition

JURY

Olivier Gapenne	*(Rapporteur)*	*UTC*	*Compiègne*
Olivier Sigaud	*(Rapporteur)*	*UPMC-Paris6*	*Paris*
Mark Bickhard	*(Examinateur)*	*Lehigh University*	*Bethlehem*
John Stewart	*(Examinateur)*	*UTC*	*Compiègne*
Pier Giorgio Zanone	*(Examinateur)*	*UPS*	*Toulouse*
Jean-Luc Basille	*(Examinateur)*	*INPT-ENSEEIHT*	*Toulouse*
Jean-Christophe Buisson	*(Directeur)*	*INPT-ENSEEIHT*	*Toulouse*

Ecole doctorale : *Mathématiques-Informatique-Télécommunications de Toulouse*
Unité de recherche : *Institut de Recherche en Informatique de Toulouse*
Directeur de Thèse : *Jean-Christophe Buisson*

Remerciements

Merci tout d'abord à tous les collègues, amis et proches qui ont su m'accompagner et m'ont permis de m'épanouir durant ces années de thèse. Je ne citerai pas de nom pour ne pas faire de jaloux, mais chacun pourra s'y reconnaître, tant mon contexte de travail et de vie a été agréable. Merci aussi à Michel Daydé, directeur du laboratoire IRIT-ENSEEIHT, pour avoir facilité mon départ au Japon durant ma deuxième année. Je rends aussi hommage à tous les chercheurs qui m'ont ébloui par leurs travaux dont Mark Bickhard, Ezequiel Di Paolo, John Stewart ou encore Rodney Brooks pour leurs présentations orales qui m'ont inspiré et motivé.

Rien n'aurait été réalisable sans la présence continue de Jean-Christophe Buisson, qui m'a non seulement mis en contact avec les théories piagétiennes et interactivistes que j'ai depuis adoptées, mais m'a également dirigé et encadré de façon aussi professionnelle qu'amicale depuis plus de quatre ans, avant même que je commence mon année de Master. Même si Jean-Christophe a aussi été à l'origine de quantité d'idées reprises dans ce manuscrit, les interactions régulières que j'ai pu avoir avec Jean-Luc Basille, Christophe Duverger, Filipo Perotto ou encore Tetsunari Inamura (qui m'a suivi et encadré lors de mon stage au Japon) m'ont énormément apporté.

J'en profite également pour remercier les rapporteurs et membres du jury pour les critiques qu'ils ont émises et les erreurs qu'ils ont relevées. La rédaction de ce manuscrit et la préparation de la soutenance ont été l'occasion d'échanges qui m'ont permis non seulement d'enrichir mes connaissances mais également de mettre à nouveau en perspective mon travail dans un contexte international. Je regrette de n'avoir pu apporter toutes les modifications que j'aurais souhaitées dans le manuscrit final, par simple manque de temps. Je pense en particulier à la refonte complète de la première partie qui aborde et survole trop de choses sans pouvoir convaincre le lecteur averti.

Enfin merci au lecteur qui, en se penchant sur ce manuscrit, témoigne peut-être déjà un intérêt pour les théories qui y sont développées et me passionnent désormais.

A Jean-Christophe,
chercheur passionné et rêveur.

A mes parents,
pour m'avoir donné le goût des sciences.

Table des matières

Introduction **1**

I Contexte théorique **5**

1 Théories **7**

1.1 Courants philosophiques . . . 8
1.1.1 Interactivisme . . . 8
1.1.2 Énaction . . . 9
1.1.3 Phénoménologie . . . 10
1.2 Psychologie et apprentissage . . . 10
1.2.1 Constructivisme sensori-moteur . . . 10
1.2.2 Contingences sensori-motrices . . . 12
1.2.3 Affordances et approche écologique . . . 12
1.2.4 Relation à l'environnement et à la société . . . 13
1.3 Systèmes en tous genres . . . 14
1.3.1 Théories de l'évolution . . . 15
1.3.2 Cybernétique et systémique . . . 16
1.3.3 Systèmes dynamiques et systèmes complexes . . . 17
1.3.4 Théorie du chaos . . . 18

2 Modèles **21**

2.1 Approches intégratives et modulaires . . . 23
2.1.1 IDA et LIDA . . . 24
2.1.2 NCE . . . 25
2.1.3 ACT-R . . . 26
2.1.4 MicroPsi . . . 27
2.2 Approches réparties et hybrides . . . 28
2.2.1 Architecture de subsomption . . . 28

2.2.2 Systèmes multi-agents . . . 29
2.2.3 Polyscheme . . . 30
2.2.4 Modèles internes . . . 31
2.3 Approches réparties et unifiées . . . 31
2.3.1 Réseaux de neurones artificiels . . . 32
2.3.2 Réseaux bayésiens dynamiques . . . 33
2.3.3 Mémoire hiérarchique temporelle . . . 33
2.3.4 Schémas piagétiens . . . 34

3 Conflit substance/processus 37
3.1 D'un perpétuel problème à un perpétuel conflit . . . 38
3.1.1 Problèmes inhérents aux substances et symboles . . . 38
3.1.2 Dualité et évolution des sciences . . . 40
3.2 Théories à base de processus . . . 41
3.2.1 Émergence et auto-organisation . . . 41
3.2.2 Normativité . . . 41
3.2.3 Continuité et relativité . . . 43
3.2.4 Relation aux systèmes dynamiques . . . 44

4 Évolution de la complexité des systèmes vivants 45
4.1 Systèmes dynamiques . . . 46
4.2 Égarement loin de l'équilibre thermodynamique . . . 49
4.3 Auto-maintien loin de l'équilibre . . . 50
4.4 Récursivité et reproduction . . . 52
4.5 Spéciation progressive des cellules . . . 53
4.6 Anticipation . . . 55
4.7 Un problème de choix : la multiplication des comportements . . . 57
4.8 Imprédictibilité génétique et apprentissage . . . 59
4.9 Réflexivité des processus réflexifs . . . 60
4.10 Génétique, expérience et culture intriquées . . . 61

II Modèle proposé et mise en œuvre 63

1 Principes retenus 65
1.1 Interactions . . . 66
1.1.1 Activité permanente . . . 67
1.1.2 Parallélisme . . . 67

1.1.3 Symétrie action/perception . . . 68
1.1.4 Environnement . . . 68
1.2 Régulation . . . 70
1.2.1 Différentes formes de régulation . . . 70
1.2.2 Contrôle réparti à tous niveaux . . . 71
1.2.3 Cas limites . . . 72
1.3 Temporalité et anticipation . . . 72
1.3.1 Temporalité et rythmicité . . . 72
1.3.2 Anticipation . . . 73
1.3.3 Expérience et apprentissage . . . 75

2 Structure du modèle mathématique 77
2.1 Espace d'interaction . . . 78
2.1.1 Dimensions . . . 78
2.1.2 Éléments de l'espace . . . 79
2.1.3 Mesure de similarité . . . 80
2.2 Champ d'activité . . . 81
2.2.1 Diffusion d'activité . . . 82
2.2.2 Réduction des potentialités en une valeur unique . . . 83
2.3 Anticipation . . . 84
2.3.1 Tunnels d'activité . . . 84

3 Propriétés du modèle et coordination généralisée 87
3.1 Propriétés du champ d'activité . . . 88
3.1.1 Continuité . . . 88
3.1.2 Activité bornée . . . 89
3.2 Coordination . . . 90
3.2.1 Attracteurs . . . 90
3.2.2 Régulation . . . 91
3.2.3 Alternance et dynamique d'attracteurs . . . 94
3.3 Rythmes et hiérarchie . . . 95
3.3.1 Différenciation de sous-espaces . . . 95
3.3.2 Couches optionnelles . . . 95
3.3.3 Coordination temporelle et spatiale multi-échelle . . . 97

4 Modèle informatique 101
4.1 Introduction . . . 101
4.2 Historique des versions . . . 102

4.2.1 Reconnaissance de rythmes . . . 103
4.2.2 *Remplissage d'un récipient* . . . 103
4.2.3 *Synchronisation d'oscillateurs* . . . 104
4.2.4 *Librairie de vision "naturelle"* . . . 104
4.2.5 Stabilisation de pendule . . . 105
4.2.6 Navigation spatiale . . . 105
4.2.7 Coordination de fonctions physiologiques . . . 105
4.3 Structure . . . 106
4.3.1 Dim & Vect . . . 106
4.3.2 Interaction & Anticipation . . . 108
4.3.3 Space . . . 108
4.3.4 World . . . 109
4.3.5 Monitor & Commands & Renderer & 110
4.3.6 Main . . . 111
4.4 Boucle d'interaction . . . 111

5 Applications et démonstrations 113
5.1 Reconnaissance de rythmes . . . 113
5.1.1 But et fonctionnement général . . . 113
5.1.2 Algorithme original . . . 115
5.1.3 Extension robuste et décomposition des rythmes . . . 116
5.1.4 Extension continue avec relativité absolue . . . 118
5.2 Stabilisation de pendule et interaction homme-machine . . . 120
5.2.1 Système mécanique simulé . . . 121
5.2.2 Modèle d'interaction et interpolation . . . 123
5.2.3 Apprentissage . . . 125
5.2.4 Enseignement et exploration . . . 125
5.2.5 Résultats . . . 128
5.2.6 Problème du pendule inverse . . . 129
5.3 Navigation spatiale . . . 130
5.3.1 Architecture 1 couche . . . 132
5.3.2 Architecture 2 couches . . . 133
5.3.3 Dynamique des buts . . . 134
5.4 Coordination de fonctions physiologiques . . . 136
5.4.1 Modèle . . . 138
5.4.2 Synchronisation des cycles . . . 139

III Extensions et perspectives **143**

1 Apprentissage **145**
1.1 Nouvelles anticipations . . . 146
1.1.1 Mémorisation immédiate . . . 146
1.1.2 Différenciation et sélection . . . 147
1.1.3 Génération aléatoire et sélection . . . 148
1.2 Confiance et renforcement . . . 149
1.2.1 Confiance dans les anticipations . . . 150
1.2.2 Incompréhension, découverte, exploration et maîtrise . . . 151
1.3 Manques actuels . . . 154

2 Optimisations **157**
2.1 Passage à l'échelle et optimisations . . . 157
2.2 Structure adaptée de l'espace . . . 158
2.2.1 Structure arborescente et partitionnement . . . 159
2.2.2 Cas de dimensions non définies . . . 160
2.3 Algorithmes de manipulation de l'espace . . . 161
2.3.1 Ajout de nouveaux éléments . . . 161
2.3.2 Recherche et sélection d'interactions . . . 164
2.3.3 Intégration optimisée . . . 165

3 Parallélisation **167**
3.1 Cadre général . . . 167
3.1.1 Contexte et architectures existantes . . . 167
3.1.2 Domaines d'application . . . 169
3.1.3 Avantages additionnels . . . 171
3.2 Librairie de traitements visuels sur GPU . . . 171
3.2.1 État de l'art . . . 171
3.2.2 Contraintes théoriques . . . 173
3.3 Implémentation des processus visuels . . . 174
3.3.1 Filtre/processus individuel . . . 174
3.3.2 Multitude de processus . . . 176
3.3.3 Ordonnancement PERT . . . 178
3.4 Performances . . . 179
3.4.1 Comparaison des implémentations . . . 180
3.4.2 Complexité . . . 180

4 Limitations et perspectives **183**
4.1 Paramètres et propriétés du modèle . . . 184
4.1.1 Évaluation . . . 184
4.1.2 Paramètres . . . 184
4.1.3 Inhibition . . . 186
4.1.4 Temporalité . . . 186
4.2 Relations à d'autres formalismes . . . 187
4.2.1 Réseaux de neurones . . . 187
4.2.2 Algorithmes de recherche ordonnée . . . 187
4.2.3 Logique floue . . . 188
4.3 Validation expérimentale . . . 188
4.3.1 Neurosciences . . . 188
4.3.2 Physiologie et biomécanique . . . 189
4.3.3 Psychologie . . . 189
4.4 Application à la conduite automobile . . . 190
4.4.1 Intérêt . . . 190
4.4.2 Architecture proposée et travail réalisé . . . 191

Conclusion **193**

Annexes **197**

A Oscillateurs couplés et synchronisation **199**
A.1 Expérience originale et littérature . . . 199
A.2 Simulation et résultats empiriques . . . 201
A.3 Mathématiques sous-jacentes . . . 202
A.4 Paramètres et dynamiques émergentes . . . 203

B Surfaces d'interpolation **205**
B.1 Approximation d'une fonction . . . 205
B.2 Découverte de la dynamique . . . 206

C Dynamique d'attracteurs et d'activité **209**
C.1 Cycle stable avec alternance . . . 209
C.1.1 Couche de navigation . . . 209
C.1.2 Couche motrice . . . 209
C.2 Cycle stable sans alternance . . . 212

C.2.1 Couche de navigation 212
C.2.2 Couche motrice 212

D Code Java et JOGL de parallélisation sur GPU **215**

E Organisation du travail durant la thèse **221**

Bibliographie **223**

Table des figures

1.1 Enaction de l'environnement par l'organisme . . . 9
1.2 Assimilation sensori-motrice . . . 11
1.3 Contingence tactilo-motrice . . . 13
1.4 Paysage épigénétique de Waddington . . . 16
1.5 Boucle fermée et rétroaction en cybernétique . . . 17
1.6 Attracteur étrange de Lorenz . . . 19
1.7 Valeurs limites de la suite logistique . . . 19

2.1 Approches top-down, bottom-up et intermédiaires . . . 22
2.2 Comparaison des différents modèles . . . 23
2.3 Différents types d'architectures . . . 24
2.4 Architecture de IDA . . . 26
2.5 Architecture de Novamente . . . 26
2.6 Architecture de ACT-R . . . 27
2.7 Architecture de MicroPsi . . . 27
2.8 Architecture de subsomption . . . 29
2.9 Réseau de neurones artificiel . . . 33
2.10 Mémoire hiérarchique temporelle . . . 34

3.1 Décomposition de la matière . . . 39
3.2 Oscillateurs couplés et émergence . . . 42
3.3 Normativité des anticipations . . . 43
3.4 Approximation du continu et du discret . . . 43
3.5 Constance relative à l'échelle . . . 44

4.1 Évolution des processus dynamiques . . . 47
4.2 Stabilité et chaos relatifs . . . 48
4.3 Supernova 1987A et propagation annulaire . . . 50
4.4 Cycle de combustion d'une bougie avec autocatalyse . . . 51
4.5 Automate de tessélation . . . 52
4.6 Modes de différenciation des systèmes . . . 55
4.7 Cycle de l'arbre/environnement . . . 56
4.8 "Swimming and tumbling" de la bactérie . . . 58
4.9 Processus couplés et conscience . . . 61

1.1 Extension du corps par un outil . . . 69
1.2 Dynamique et couplage avec l'environnement . . . 70
1.3 Anticipation ou réactivité face à un obstacle . . . 74

2.1 Interactions temporelles et instantanées . . . 78
2.2 Interactions multidimensionnelles . . . 80
2.3 Similarité entre interactions . . . 81
2.4 Diffusion locale d'activité . . . 82
2.5 Réduction des potentialités . . . 84
2.6 Anticipations et interactions . . . 85

3.1 Coordination implicite et algorithme de recherche ordonnée . . . 88
3.2 Trajectoires possibles et réelle . . . 90
3.3 Déviation globale des attracteurs locaux . . . 91
3.4 Attracteurs et dynamique des anticipations . . . 92
3.5 Convergence globale et variabilité locale . . . 93
3.6 Uniformité versus modularité . . . 96
3.7 Couches et abstractions . . . 97

4.1 Principes utilisés dans les applications . . . 103
4.2 Remplissage contrôlé d'un récipient . . . 104
4.3 Diagramme UML global du modèle . . . 106
4.4 Précisions utilisées à différentes échelles . . . 107
4.5 Algorithmes de mise à jour de l'activité . . . 109
4.6 Boucle d'interaction du processus Java . . . 112

5.1 Programme TamTam original . . . 114
5.2 Schémas dans la première version du TamTam . . . 115
5.3 Trace de l'algorithme immunitaire . . . 116
5.4 Composants de la deuxième version du TamTam . . . 117
5.5 Courbe relative à la confiance . . . 118
5.6 Synchronisation robuste dans le TamTam 2 . . . 119
5.7 Composants de la troisième version du TamTam . . . 119
5.8 Continuité dans le TamTam 3 . . . 120
5.9 Simulation du système pendule/charriot . . . 121
5.10 Forces internes et externes au système . . . 122
5.11 Sensations et actions sur le système . . . 123
5.12 Projection 2D des points de référence . . . 126
5.13 Interactions homme/robot . . . 126
5.14 Interface textuelle de l'application . . . 127
5.15 Temps moyens de stabilisation . . . 129
5.16 Comparaison des performances humain/robot . . . 129
5.17 Orientation (in)directe vers les buts . . . 130
5.18 Navigation et vols aériens . . . 131
5.19 Application de navigation 1 couche . . . 133
5.20 Application de navigation 2 couches . . . 135
5.21 Cycle d'avalement et de respiration . . . 137
5.22 Couches d'anticipations pour l'avalement/respiration . . . 140
5.23 Modulations et anticipations pour l'avalement/respiration . . . 141

1.1 Formes d'apprentissage envisagées . . . 149
1.2 De l'incompréhension à la maîtrise . . . 153

2.1 Optimisation et parallélisation . . . 158
2.2 Espace 2D et arbre BSP équivalent . . . 160
2.3 Ajout d'interaction dans l'arbre BSP . . . 162
2.4 Performances en fonction de NB_MAX . . . 163
2.5 Cas de partitionnement non judicieux . . . 163
2.6 Recherche itérative de frontière . . . 166
2.7 Performances en fonction du nombre de points . . . 166

3.1 Comparaison des architectures parallèles . . . 168
3.2 Architecture du Cell Broadband Engine . . . 169
3.3 Traitements parallèles selon la tâche . . . 170
3.4 Cellule corticale MT . . . 174
3.5 Combinaison de textures par un pixel shader . . . 175
3.6 Effet simulant les bâtonnets . . . 176
3.7 Effet de flou récursif . . . 176
3.8 Effet des cellules ganglionnaires . . . 176
3.9 Effet de simulation de la perception rétinienne . . . 177
3.10 Effet des cellules corticales MT . . . 177
3.11 Algorithmes multi-passes pour le flou . . . 178
3.12 Ordonnancement PERT des effets . . . 179
3.13 Performances comparée des implémentations . . . 181
3.14 Performances : nombre d'effets et taille des textures . . . 181

A.1 Programme de synchronisation d'horloges . . . 200
A.2 Synchronisations mixte et pure . . . 201
A.3 Distribution des phases sur une période . . . 203
A.4 Coordination et vitesse de propagation . . . 204

B.1 Approximation et convergence . . . 205
B.2 Découverte de la dynamique . . . 206
B.3 Découverte de la dynamique (suite) . . . 207

C.1 Cycle stable avec alternance . . . 211
C.2 Cycle stable sans alternance . . . 213

E.1 Planning synthétique du travail de thèse . . . 222

Introduction

"De l'antiquité à nos jours, l'homme a toujours cherché à comprendre son propre fonctionnement, ..." Un peu banal comme début, vous ne trouvez pas ? Mais en tant que lecteur de cette thèse, vous vous attendiez néanmoins à ce que la première phrase de l'introduction soit de cette nature. A ce point de votre interaction avec cette thèse, vous étiez dans un contexte où vous anticipiez une phrase très générale sur le sujet qui nous occupe, et la discussion qu'amorce ce paragraphe n'échappe d'ailleurs pas à la règle ! Cette anticipation est le résultat d'un processus complexe qui intègre des éléments de contexte aussi variés que votre expérience générale de lecteur, le titre présent sur la couverture, etc. Tous ces éléments associés ont créé votre attente d'une introduction standard incluant un contexte historique et une courte présentation du sujet de recherche.

C'est sur cet aspect prédictif ainsi que d'autres propriétés de nos comportements que ce manuscrit va se focaliser. Le problème n'est pas ici de questionner leur existence ni d'étudier ces aspects dans un domaine spécifique de la cognition ou pour une espèce donnée. En effet, que l'anticipation soit liée à l'attention pour la perception ou nommée prédiction pour le langage, elle est présente dans la plupart des champs d'étude des sciences cognitives. Qu'il s'agisse de régulation, d'anticipation ou de rythmicité, et contrairement à de nombreuses théories qui considèrent davantage la majorité de ces principes comme des épiphénomènes, cette thèse les place au cœur et à l'origine de notre intelligence.

Les termes même d'intelligence ou de cognition renvoient à quantité de notions qui varient grandement selon l'interlocuteur. Vu la difficulté éprouvée à définir l'intelligence ou à la fragmenter, afin de déterminer qui ou quoi peut en avoir la qualité, seuls quelques principes les plus universels sont étudiés ici. Autant la variabilité des définitions dans les dictionnaires, au fil des années et des avancées scientifiques, reflète notre incertitude, autant certaines caractéristiques sont inévitablement présentes. Si l'on s'intéresse aux systèmes vivants et que l'on adopte une approche évolutionniste à la manière de Daniel Dennett [Dennett, 1996], l'intelligence est apparue progressivement et de manière continue, bien que marquée par certains paliers.

Ainsi, même si les développements présents dans cette thèse n'auront apparemment qu'un lien bien distant avec une quelconque intelligence humaine pour la majorité des lecteurs, ils sont potentiellement à l'origine de nombreuses performances animales et humaines avec lesquelles peu de machines modernes peuvent rivaliser. Pour simple exemple, je tiens la capacité de tout insecte, aussi petit et simple puisse-t-il paraître, de se maintenir dynamiquement sur ses pattes quel que soit son environnement ou ses faiblesses. Il y a une vingtaine d'années, Rodney A. Brooks [Brooks, 1999] faisait de ce comportement un but pour la robotique. Et bien que la communauté scientifique s'en approche, il n'a encore jamais été totalement réalisé ni généralisé.

Comment se fait-il que des ordinateurs ou robots capables de battre des champions aux échecs, ou de fabriquer des pièces mécaniques avec une précision inférieure au micron, soient incapables d'atteindre des performances humaines sur des tâches qui nous semblent si triviales ?

La réponse à cette question dans la littérature fait généralement intervenir les mathématiques ou la logique qui se cachent derrière ces activités. Il est indéniable qu'un ordinateur est à l'heure actuelle bien plus adapté qu'un être vivant pour effectuer des calculs, stocker des résultats sans erreur ni perte, et il est par là même bien plus adapté à certaines classes de problèmes. En revanche les êtres vivants, et l'homme en particulier, ont la capacité merveilleuse d'être adaptés à la variabilité et imprévisibilité de leur environnement, généralisant et apprenant au travers de l'expérience. Pour mieux répondre à la question posée par Celeste Biever du journal New Scientist lors de la conférence AGI'08 sur l'intérêt d'une intelligence artificielle générale, je dirais aujourd'hui qu'elle est nécessaire si l'on souhaite qu'une entité artificielle, quelle que soit sa forme, puisse être autonome dans un monde complexe, ne serait-ce que pour coordonner et combiner des systèmes artificiels classiques. Par monde complexe je n'entends pas un univers physique multidimensionnel, dont toutes les lois ont besoin d'être maîtrisées pour y évoluer, mais simplement un environnement qui s'adapte et évolue dynamiquement en même temps que l'entité qui l'habite, que ce soit positivement ou négativement relativement à elle.

Cette thèse traite beaucoup d'adaptation sous toutes ses formes, et j'espère sincèrement que chacun trouvera un contenu adapté à ses intérêts dans l'un des chapitres qui suivent. Cette thèse reprend des apports de très nombreux domaines, dans lesquels il n'est fort heureusement pas nécessaire d'être expert pour comprendre les principes sous-jacents. C'est pourquoi, dans une volonté pédagogique et pour faciliter une compréhension globale de ce manuscrit, certaines expériences ou termes complexes ont été vulgarisés, afin que seule reste l'essence des diverses pensées et idées convergentes qui ont émergées à travers le temps.

Bien que certaines hypothèses défendues dans cette thèse soient soutenues depuis des siècles, elles ne sont pas prouvées et en aucun cas infaillibles, de même que celles d'autres théories concurrentes. Ezequiel Di Paolo rappelait lors d'une école d'été du CNRS [Di Paolo, 2006] que l'expérimentation permet uniquement de prouver qu'un modèle est faux en infirmant des prédictions. Je tente donc ici de montrer qu'un cadre philosophique appliqué à l'informatique donne des résultats cohérents et qu'il semble intéressant de l'explorer davantage. Cela ne signifie évidemment pas qu'il serait potentiellement le seul correct, fonctionnel ou biologiquement plausible.

La première partie de cet ouvrage va introduire un ensemble de théories plus ou moins liées dans des domaines variés, puis détailler les implications d'une approche basée sur des processus plutôt que des états ou substances. Le dernier chapitre présentera une succession d'étapes cruciales et plausibles dans l'évolution des espèces, très fortement inspirée des travaux de Mark H. Bickhard dans le cadre interactiviste.

La deuxième partie traitera plus en détails de certains principes de l'état de l'art et les intégrera dans un modèle mathématique. Bien que les théories présentées en début du mémoire soient extrêmement riches, seul un sous-ensemble de principes a été retenu afin de proposer une infrastructure bas niveau cohérente sous-tendant les processus comportementaux et cognitifs. Le rasoir d'Occam, aussi connu sous le nom de principe de parcimonie ou d'économie, permet dans cette thèse non seulement de limiter les notions invoquées pour expliquer les phénomènes fondamentaux régissant la pensée, mais évite aussi une dispersion de la recherche.

La suite du mémoire détaille l'implémentation réalisée d'une telle infrastructure, ainsi que diverses applications et démonstrations développées à partir de celle-ci. Elle constitue la principale contribution de cette thèse, en particulier par la coordination implicite et la modélisation naturelle des phénomènes d'assimilation et de régulation qu'elle permet. L'historique des programmes illustre les évolutions permanentes qu'on connut le modèle durant toute la thèse, ainsi que la quantité de domaines potentiels d'application.

Une dernière partie réunit les limitations actuelles du modèle, les extensions partiellement réalisées ainsi que les nombreux problèmes soulevés ou revisités lorsqu'ils étaient classiques mais qui n'ont malheureusement pas eu le temps d'être explorés en profondeur. Je souhaite vivement entreprendre ces travaux dans les années à venir, tellement les théories dans lesquelles cette thèse s'intègre m'ont convaincu.

Première partie

Contexte théorique

1

Théories

Sommaire

1.1 Courants philosophiques 8
1.1.1 Interactivisme 8
1.1.2 Énaction 9
1.1.3 Phénoménologie 10
1.2 Psychologie et apprentissage 10
1.2.1 Constructivisme sensori-moteur 10
1.2.2 Contingences sensori-motrices 12
1.2.3 Affordances et approche écologique 12
1.2.4 Relation à l'environnement et à la société 13
1.3 Systèmes en tous genres 14
1.3.1 Théories de l'évolution 15
1.3.2 Cybernétique et systémique 16
1.3.3 Systèmes dynamiques et systèmes complexes 17
1.3.4 Théorie du chaos 18

Introduction

Cette thèse s'inscrit dans un cadre théorique très large couvrant la majorité des domaines des sciences cognitives. Elle a pour but de tester empiriquement certains principes fondamentaux, supposés gouverner la cognition et le comportement adapté des êtres vivants dans un environnement dynamique et complexe. Elle vise aussi à explorer et développer certaines suggestions et idées proposées dans ce même cadre. Au vu de la quantité de sujets abordés par les grands mouvements théoriques qui motivent cet ouvrage et le temps qui a été nécessaire pour les assimiler, il est impossible de faire une revue de tous leurs aspects dans un état de l'art exhaustif. De la même façon, je ne dispose probablement pas du recul nécessaire pour parfaitement saisir certaines nuances subtiles qui différencient les écoles de pensée, et je tenterai donc simplement de ne pas excessivement déformer les idées directrices.

Seul un sous-ensemble de théories proches ou convergentes est donc présenté, afin de focaliser l'état de l'art sur les approches dynamiques, évolutionnistes et incarnées de la cognition. La distinction introduite dans le plan entre philosophie, psychologie et les autres domaines est discutable, tant la pensée de certains auteurs transcende des frontières somme toute arbitraires. Néanmoins celle-ci a été maintenue afin de structurer l'argumentation qui suivra et faciliter la

lecture. Bien que certaines divergences ou problèmes soient soulignés dans ce mémoire afin de justifier l'approche choisie, on pourra se référer à Varela [Varela, 1996] et Shanon [Shanon, 1993] pour un aperçu des points forts et faiblesses des approches non développées.

Moins formellement, cette thèse espère aussi convaincre le lecteur de la plausibilité de ces théories au vu de leur admirable intégration à l'état actuel des connaissances sur notre monde physique aussi bien que psychologique. Une fois acceptés les changements radicaux de formalisme qu'imposent le passage à un cadre d'étude nouveau, les principes ont un côté intuitif et naturel qu'on peut retrouver dans la vie quotidienne. Ceci ne prouve en rien la validité des concepts avancés, mais comme la plupart des théories restent vraies tant qu'elles n'ont pas été réfutées, cela suffit largement à motiver et impliquer toujours plus le doctorant ou le chercheur convaincu. Il est bien sûr possible que cette croyance devienne aveugle et que ces théories soient totalement invalidées tôt ou tard. Elles en reste néanmoins attirantes et peu contrariées aujourd'hui, nécessitant davantage d'efforts et de recherches pour savoir si oui ou non, elles synthétisent correctement les fondements de la vie et de l'intelligence.

L'approche présentée et développée dans ce mémoire peut être considérée comme scientifiquement divergente ou en marge. Il n'en a pas toujours été ainsi et elle n'en reste pas moins souvent compatible avec les théories dominantes des sciences cognitives. Il n'est en aucun cas question de discréditer ou concurrencer ces dernières qui ont fait leurs preuves, en particulier durant les cinquante dernières années au travers d'applications en médecine ou intelligence artificielle. Les différences sont parfois profondes, sur la nature même des concepts manipulés, mais se limitent souvent à des points de vue proches décrits en des termes contradictoires selon l'historicité des domaines concernés. Le but de l'axe de recherche dans lequel nous sommes impliqués est simplement d'intégrer environnement, corps et esprit dans un cadre naturaliste (dans son acception philosophique originale [Forrest, 2000]) unique et cohérent.

1.1 Courants philosophiques

1.1.1 Interactivisme

Cette brève présentation est inspirée du manifeste écrit par Mark H. Bickhard, fondateur et principal contributeur du cadre interactiviste [Bickhard, 1993; Bickhard and Terveen, 1995; Bickhard, 1996b; Bickhard, 1999; Bickhard and Christensen, 2002; Bickhard, 1996a]. L'interactivisme est un système théorique et philosophique principalement axé sur l'esprit et la personne. Il diffère fondamentalement de la majorité des approches dominantes actuelles des sciences de l'esprit au niveau même de ses assomptions initiales. Ainsi et en accord avec les évolutions qu'ont connues de nombreux domaines scientifiques, il s'agit d'une approche naturaliste fondée sur une métaphysique de processus, compatible avec l'émergence de phénomènes nouveaux.

Grossièrement, toute représentation pour un agent (naturel comme artificiel) émerge des présuppositions de processus anticipatifs et interactifs. Le cadre partage ainsi le constructivisme et la primauté de l'action de la théorie de l'intelligence du psychologue Jean Piaget [Piaget, 1952]. Néanmoins, l'interactivisme étend celles-ci en s'intéressant entre autres à la normativité des fonctions biologiques, au langage ou aux émotions. Il trouve des implications et applications du niveau biologique au niveau social, par une exploration à la fois horizontale afin d'unifier les domaines et verticale pour plonger dans les spécificités de chaque esprit.

De nombreuses notions héritées du cadre interactiviste seront abordées tout au long de ce

manuscrit et ne sont donc pas développées plus en détails ici. A ce titre on peut citer la définition d'un concept comme un réseau fermé ou fortement connexe d'interactions ou la multiplicité des rythmes et échelles temporelles nécessaires à la cognition.

1.1.2 Énaction

La perspective de l'énaction défend une forme de cognition incarnée, afin d'éviter le piège des représentations internes souvent négligé par les approches cognitivistes [Maturana and Varela, 1987; Varela *et al.*, 1991]. L'individu est ainsi défini par la relation qu'il entretient avec l'environnement, par ses perceptions et actions (figure 1.1). Le paradigme a été développé par le biologiste, neurologue et philosophe chilien Francisco Varela, afin de trouver un juste milieu entre les théories proclamant un monde totalement subjectif et celles défendant l'existence d'un monde totalement objectif. Pour sortir de cette impasse, Varela considère le coavènement de l'organisme et de son environnement (ou monde propre) à travers leur histoire. De même que le corps et l'environnement sont indissociables dans l'évolution des espèces, le corps et l'esprit sont intrinsèquement liés lors de la vie.

L'approche énactive entend aussi réconcilier science et expérience humaine, s'inspirant pour cela de la phénoménologie et intégrant de nombreux principes des méditations orientales. Bien que nous soyons tous attachés à l'existence d'un Moi stable formé de propriétés et de caractéristiques, les réflexions poussées sur la conscience et la cognition dans le cadre énactif indiquent clairement une absence de fondements dans l'esprit humain, sans aucune forme de scepticisme ou de nihilisme (voir conclusion de [Varela *et al.*, 1991]).

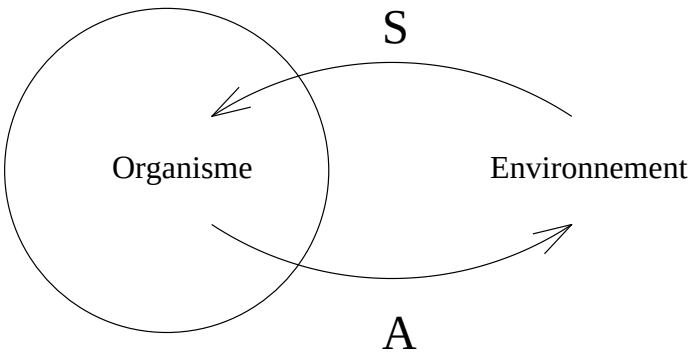


FIGURE 1.1 – Interactions entre un organisme et sa niche écologique. Les interprétations de ce schéma, souvent repris dans de nombreuses théories incarnées, contrastent avec sa simplicité apparente. Bien que le coavènement de l'organisme et de l'individu ait lieu durant l'évolution, c'est par le mécanisme de l'autopoïèse (développé dans le chapitre 3) que le maintien actif de l'organisation de l'individu s'opère. Les actions A ne sont pas indépendantes ni simplement déduites des sensations S. Les actions modifient l'environnement tel qu'il est perçu par l'organisme, et les sensations sont les conséquences des actions prises. Le monde environnant dépend dont des actions possibles et sans action, il n'y a aucune perception. (reproduction vectorielle d'un schéma tiré de Enaction and Engineering [Stewart *et al.*, 2004])

1.1.3 Phénoménologie

Bien que la phénoménologie recouvre de nombreuses autres acceptions [1], cette section se focalise sur la phénoménologie transcendantale développée par Edmund Husserl. Se reposant sur l'Ego Cogito de René Descartes comme fondement absolu, Husserl recherche l'essence derrière les expériences communes [Husserl, 1929]. La méthode d'analyse introduite pour appréhender le monde est fondée sur l'étude des phénomènes tels qu'ils sont vécus. La phénoménologie place donc la conscience au cœur de ses préoccupations, et intègre totalement la subjectivité du philosophe dans son étude des essences objectives. Edmund Husserl reprend également le concept d'intentionnalité de son maître penseur Franz Bretano pour qualifier le caractère orienté de la conscience : c'est la conscience qui vise les objets et donne le sens.

Cette approche sera approfondie dans ses aspects anticipatifs et régulateurs par Maurice Merleau-Ponty dans une analyse fine de l'expérience quotidienne [Merleau-Ponty, 1942]. De même que son prédécesseur, ne présupposant pas de monde extérieur objectif et de représentation interne comme copie, il se concentre sur la perception et sa dimension active souvent négligée. Il étudie ainsi en profondeur la relation de l'être à son environnement et la construction du Soi. En intégrant quantité de données expérimentales du milieu du siècle et contrairement à Husserl, il ne préjuge pas d'un "quelque chose" que ciblerait la conscience, mais ramène toute conscience au primat de la perception, comme seule ouverture possible sur le monde vécu [Merleau-Ponty, 1945].

1.2 Psychologie et apprentissage

1.2.1 Constructivisme sensori-moteur

Inspiré par une formation initiale en biologie, Jean Piaget a étudié la psychologie de l'intelligence de l'enfant et développé l'épistémologie génétique [Piaget and Inhelder, 1969; Piaget, 1971; Pia, 1977; Ducret *et al.*, 2001]. Durant toute sa vie, il considérera l'activité du sujet comme centrale et nécessaire au développement. Cette thèse s'intéresse à ses travaux précoces sur la période dite sensori-motrice, antérieure à l'apparition du langage, s'étalant sur les 18 premiers mois de la vie [Piaget, 1952]. Cette première période permet non seulement de structurer le réel, mais serait nécessaire à l'apparition ultérieure de l'intelligence adulte. Rapidement, Piaget introduit le concept de schéma sensori-moteur comme succession d'actions et d'anticipations pour modéliser la cognition.

Chaque schéma est fondamentalement actif et tente à chaque instant d'assimiler la situation, c'est-à-dire d'appliquer ses actions afin de tester ses anticipations. Ce mécanisme d'assimilation, tiré des travaux de James Baldwin, a comme principal avantage de définir une notion d'adaptation continue, selon que les anticipations sont plus ou moins satisfaites (figure 1.2). Afin de prendre en compte la dynamique du développement, Piaget reprend également la notion complémentaire d'accommodation. Cet autre mécanisme est la tendance qu'à un schéma à se transformer pour maximiser son assimilation. Il peut s'agir d'un simple ajustement au niveau du rythme des interactions, mais aussi de modifications plus profondes de la structure du schéma. Supposant l'existence de structures innées très générales, de nouveaux schémas peuvent être appris durant la vie de l'individu par différenciation, généralisation ou assimilation réciproque de structures antérieures. Alors que l'assimilation est un processus conservateur qui cherche à

1. On pense en particulier à la phénoménologie dialectique de Hegel ou à la phénoménologie existentielle d'Heidegger

mettre le nouveau dans de l'ancien, l'accommodation est une force de changement. De leur équilibre dépend donc l'adaptation du sujet au monde réel. Des schémas ni trop généraux, ni trop spécifiques à la situation présente doivent être construits. Un excès d'assimilation et l'organisme ne sera pas capable de survivre à des changements importants de son environnement ; trop d'accommodation et l'organisme n'exploitera pas son expérience et les comportements antérieurs qui ont fait leurs preuves.

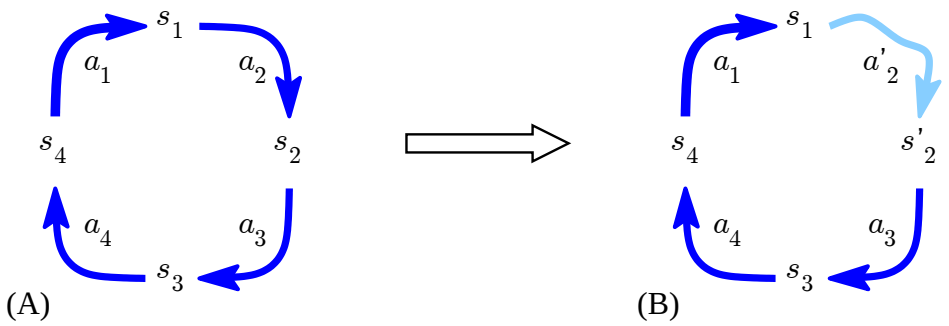


FIGURE 1.2 – Un schéma sensori-moteur est parfaitement adapté à la situation (A), si les anticipations (s_1, s_2, s_3, s_4) sont satisfaites pour chaque action effectuée (a_1, a_2, a_3, a_4). Dans la situation voisine (B), le degré d'assimilation est moindre car l'agent n'a pu réaliser qu'une action a'_2 (proche de a_2), qui a donné lieu à une sensation s'_2 (proche de s_2). L'assimilation est alors partielle mais peut se poursuivre. (inspiré du schéma-équation explicatif de l'assimilation dans Naissance de l'Intelligence chez l'Enfant)

Au cours du développement sensori-moteur de l'enfant, Piaget a dégagé plusieurs stades. Bien que ceux-ci se chevauchent, chacun correspond à un comportement novateur construit à partir des précédents, mécanisme ayant donné son nom au constructivisme. Les voici brièvement résumés :

1. Activités spontanées de l'organisme qui se développent en réels schémas fonctionnels par leur exercice répété, les différenciant ainsi de purs réflexes.
2. Premières habitudes, des actions et anticipations répondant à un besoin, sans pour autant différencier les moyens et les buts.
3. Réactions circulaires étendues, pouvant coordonner plusieurs sens (en particulier la vision et le toucher via la préhension)
4. Les moyens intégrés à des schémas d'assimilation antérieurs sont essayés pour répondre à des situations nouvelles (tirer par exemple un coussin et découvrir le jouet caché dessous).
5. Coordination des moyens et des buts via la "conduite du support" avec différenciation volontaire de moyens connus (l'enfant tire à lui un tapis sur lequel se trouve l'objet convoité).
6. Début d'intériorisation caractérisé par la "conduite du bâton" [2]. Les moyens nouveaux ne sont plus obtenus uniquement par tâtonnements et la compréhension semble soudaine.

La structuration progressive de l'environnement permet alors l'émergence de la notion d'objet pour l'enfant puis de sa permanence, malgré les occlusions, rotations et autres transformations

2. C'est-à-dire l'utilisation d'un outil (le bâton) pour agir sur des objets distants (attirer ou faire bouger un jouet).

qu'ils peuvent subir [Piaget, 1947; Piaget, 1954]. Piaget a en effet été le premier à montrer que cette notion n'était pas innée et il a montré dans le détail comment elle se construisait.

1.2.2 Contingences sensori-motrices

Bien que cette partie du texte et la précédente auraient pu être réunies, celle-ci insiste sur certains aspects des comportements sensori-moteurs, repris et approfondis après que Piaget s'y soit intéressé. Ils seront ainsi plus facilement contrastés ensuite avec l'approche écologique de James J. Gibson.

Les comportements sensori-moteurs sont par nature cycliques, et la théorie originale traite d'ailleurs de réactions circulaires, c'est-à-dire de la répétition de comportements tant que l'environnement le permet, maintenue par l'activité assimilatrice de l'enfant. On retrouve par exemple cet aspect dans les mouvements oculaires, en particulier les déplacements rapides que sont les saccades. Kevin O'Regan et Alva Noë l'ont intégré dans leur théorie de la perception visuelle [O'Regan, 1992; O'Regan *et al.*, 1999; O'Regan and Noë, 2001a; O'Regan and Noë, 2001b] en réponse à leur interrogation majeure : comment la vision peut-elle nous sembler si claire avec un appareil visuel si parasité et imparfait ? Voir n'est pas une contemplation passive d'une représentation interne du monde qui aurait des propriétés métriques telle une photo, mais un processus actif qui consiste à sonder l'environnement extérieur comme s'il s'agissait d'une mémoire externe continuellement disponible. La richesse de l'environnement est alors une illusion, provenant de la disponibilité immédiate de l'information. C'est pourquoi des cycles de saccades limités à quelques points de fixation nous fournissent un contact suffisant avec l'environnement pour y agir avec assurance.

La direction et l'amplitude des saccades ne sont pas aléatoires, mais associées à l'anticipation des conséquences sensorielles sur la rétine une fois le mouvement effectué. L'anticipation se retrouve déjà dans l'analogie tactile proposée par David MacKay, à l'origine de la notion de contingences sensori-motrices [MacKay, 1967; MacKay, 1973]. L'expérience consiste à fermer les yeux et à saisir une bouteille dans la main, les doigts étant écartés. La perception de la bouteille est fournie par son exploration, c'est-à-dire par la séquence de changements sensitifs induits par le mouvement des doigts à sa surface, par la relation entre la dynamique des changements perçus et la connaissance que l'on a des bouteilles (par exemple l'anticipation de l'extrémité haute de la bouteille lorsque les doigts se resserrent au niveau du goulot, voir figure 1.3).

1.2.3 Affordances et approche écologique

Se démarquant du behaviorisme et rejetant le cognitivisme, James J. Gibson a développé l'approche écologique de la perception [Gibson, 1950; Gibson, 1979]. Selon sa théorie, les êtres sont dans le monde et vivent à travers leur relation à l'environnement. Ainsi expliquer comment le flux optique est transformé en signal nerveux est biologiquement intéressant, mais n'apporte rien quant à la perception vécu subjectivement par l'individu. Au lieu d'utiliser des représentations intermédiaires, Gibson introduit la notion d'affordance pour laquelle l'environnement est toujours relatif à la perception qu'en a l'animal. Il est ici question d'animal (dont l'homme), car l'approche écologique se place à un niveau de description intermédiaire entre la physique (pour laquelle les lois physiques s'appliquent que le système soit vivant ou non) et la psychologie (centrée sur l'homme).

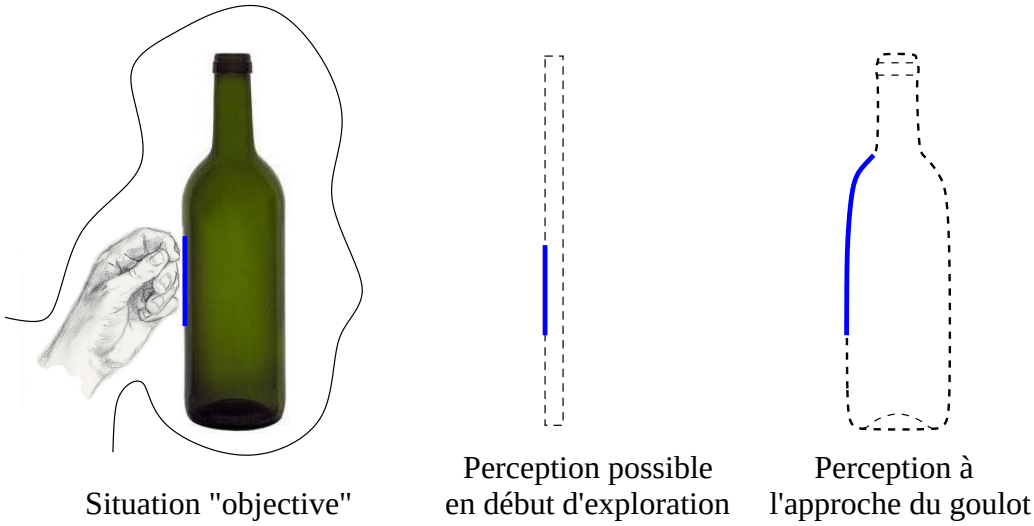


FIGURE 1.3 – On suppose ici que le sujet ne voit pas la bouteille, par exemple cachée à l'intérieur d'un sac (*gauche*), mais l'explore tactilement (*trait épais bleu*). Il est fort probable qu'il ne la reconnaîtra pas sans bouger les doigts à sa surface, il pourrait aussi bien s'agir d'une plaque de verre (*milieu*). Néanmoins, il se rendra vite compte par ses actions que sa surface est courbe, et à proximité du goulot il n'aura plus de doute. Il pourra anticiper son rétrécissement et son extrémité supérieure (*droite*). (schéma inspiré d'une présentation d'O'Regan et Noë à ASSC'2000 et de l'expérience mentale de MacKay)

Une affordance est une potentialité offerte par l'environnement ou une partie de l'environnement. Une chaise apparaît pour l'homme comme un objet sur lequel il peut s'asseoir sans avoir à réellement s'asseoir dessus. La même chaise sera néanmoins perçue différemment par un animal, qui la percevra comme un élément sur lequel il peut sauter s'il s'agit d'un chat ou qu'il peut escalader s'il s'agit d'un insecte. Gibson s'étant focalisé sur la perception visuelle, celle-ci consiste en l'extraction de la structure du champ optique ambiant, dont l'existence découle des régularités que possède l'environnement et des lois qui le régissent.

L'approche écologique défend ainsi une perception active, insiste sur les relations et les interactions entre l'individu et l'environnement, et elle est de plus fondée sur des invariants perceptifs. Néanmoins et malgré les critiques de Jerry Fodor et Zenon Pylyshyn sur l'imprécision de Gibson concernant les invariants écologiques [Fodor and Pylyshyn, 1981], une chose les distingue fondamentalement des invariants sensori-moteurs. Pour la perception écologique, les régularités sensorielles existent dans l'environnement et doivent simplement y être trouvées. Celle-ci ne fait donc pas de différence entre le mouvement induit d'un objet devant les yeux d'un individu et le mouvement volontaire et opposé de ceux-ci. Bien que les motifs sensoriels produits soient identiques, les séquences sensori-motrices sont bel et bien de nature différente [Mossio, 2006].

1.2.4 Relation à l'environnement et à la société

Les travaux cités ici pointent les relations existant entre les différents niveaux d'émergence. Même si la thèse se concentre sur la cognition bas niveau, les recherches bibliographiques concernant la cognition sociale et la cognition en société ont permis de ne pas limiter la réflexion au

niveau sensori-moteur. Piaget a traité bon nombre de ces questions dans ses recherches, mais nous nous intéressons ici à d'autres auteurs.

Parmi les précurseurs de l'apprentissage, on se doit de citer le physiologiste Ivan Pavlov. Malgré les critiques ultérieures, il a profondément modifié le paysage de la recherche par son étude des "sécrétions psychiques", par exemple de salive par anticipation du repas approchant [Pavlov, 1927]. De même et malgré là aussi les limitations de sa pensée, les réflexes conditionnés incluent des formes avancées de régulation des perceptions et des actions. Il étudia extensivement les relations aussi bien spatiales que temporelles qui lient les stimuli et les réactions, introduisant par la même occasion des notions de distances fines. Ainsi, une variation dans la zone de stimulation tactile ou dans la fréquence d'un tintement de cloche entraîne des réactions légèrement différentes chez le sujet ayant associé un tel signal à l'annonce du repas. Chez l'animal et via des interactions ponctuelles simples, il a ainsi introduit des principes qui sont encore sous-jacents aujourd'hui dans les modèles de la cognition humaine.

A un tout autre niveau d'étude, Lev Vygotsky introduisit la notion de médiation pédagogique[3]. L'anticipation n'est pas directement physiologique dans la majorité des situations que connaît un enfant ou un adulte, il ne s'agit souvent pas de satisfaire un besoin vital tel que la soif. Les attentes touchent aux valeurs que l'on peut vouloir développer ou conserver, à des émotions secondaires que l'on aime ressentir. Vygotsky a étudié les phénomènes conduisant à l'apparition de telles attentes, tels que l'usage d'outils pour interagir avec des objets, puis de signes avec d'autres humains et enfin l'apprentissage du langage. Dans le domaine de l'apprentissage, il a aussi intégré les différences dans les mondes perceptifs de l'enseignant et de l'élève, ainsi que les capacités assimilatrices et exploratoires de ce dernier qui doivent être favorisées et exploitées dans la dite zone de développement proximal [Vygotsky, 1930].

Plus récemment, et pour revenir sur l'usage des outils et la médiation de la cognition par l'environnement, Edwin Hutchins a étudié l'influence des objets et de nos interactions via l'environnement sur nos propres capacités cognitives [Hutchins, 1995; Hutchins, 2006]. Les objets culturels que l'on pense totalement extérieurs à notre raisonnement y contribuent souvent, à tel point que certains objets techniques deviennent nécessaires au déroulement correct de nos comportements. On retrouve aussi ce lien entre sensori-moteur et abstraction à travers l'observation chez des scientifiques et experts de mouvements des mains indissociables de certaines descriptions complexes, même lorsqu'elles ne font pas intervenir l'espace.

1.3 Systèmes en tous genres

Bien que son contenu soit assez hétérogène, cette section synthétise certains travaux réalisés dans des domaines très différents qui ont pour point commun l'étude de systèmes. Tous ont eu un impact considérable sur les développements de la thèse et seront repris ou cités dans la suite du manuscrit. Il peut s'agir aussi bien de systèmes vivants, informatiques que mathématiques. Certaines théories sont transversales et applicables à la majorité des domaines scientifiques, telles les théories des systèmes dynamiques ou du chaos.

3. Le terme anglais de "cultural mediation" reflète à mon sens mieux la généralité du concept, qui peut s'appliquer sans qu'aucune relation élève/enseignant n'existe.

1.3.1 Théories de l'évolution

Sans revenir sur les travaux du visionnaire Charles Darwin synthétisé dans son livre "L'Origine des Espèces", on s'intéresse aux variations et adaptations qu'a connues sa théorie au cours du XX^{ème} siècle. Un chapitre entier de cette thèse est consacré à l'évolution des espèces et leur spéciation, mais des principes plus généraux qui ont également inspiré les algorithmes développés plus tard sont introduits ici. Les théories qui nous intéressent ne sont pas celles qui sélectionnent et modèlent un individu relativement à un environnement statique, mais celles qui intègrent le développement conjoint des individus et du monde dans lequel ils évoluent. Ainsi la dynamique globale du système est prise en compte, même si un élément semble dominer ou diriger l'autre.

Stephen Jay Gould a introduit la notion d'équilibre ponctué [Gould and Eldredge, 1977; Gould, 1991]. Contrairement à l'idée préconçue d'une évolution graduelle, linéaire et toujours dirigée vers un but ultime, la conception d'un être parfait, la vie sur Terre semble avoir été bercée par des explosions de différenciations et de longues stagnations. De telles variations dans la dynamique des gènes seraient corrélées avec l'apparition de nouvelles niches dans l'environnement, soit par l'action des individus qui le peuplent et l'affectent, soit par des facteurs extérieurs. L'apparition de la vie pluricellulaire a par exemple ouvert de nouveaux horizons aux espèces jusqu'alors limitées dans leurs modes de déplacement et métabolismes. De fortes bouffées d'évolution ont de même suivi la fin du Permien (-250 Ma) marquée par la disparition de 95% des espèces marines et 70% des espèces terrestres. L'extinction des dinosaures à la fin du Crétacé (-65 Ma) est un événement similaire quoique relativement "mineur".

De plus, la présence de quantité de gènes silencieux [4] dans les organismes modernes est un indice allant contre la téléologie de l'individu idéal. De manière générale, la complexité des organismes actuels n'est pas une nécessité mais résulte de l'histoire du couplage dynamique entre les espèces et leur environnement.

Dans le même ordre d'idée, Leigh Van Valen a montré que la probabilité d'extinction d'une espèce restait constante quelle que soit la durée de son existence passée [van Valen, 1973]. L'amélioration d'une espèce, si tant est qu'elle existe, n'était donc jamais absolue mais relative à celle des autres espèces. Il développa ainsi la théorie de la Reine Rouge où une course à l'armement s'engage entre des espèces concurrentes, que ce soit par prédation directe ou par le biais de ressources dans leur environnement commun.

Pour étendre davantage le réseau des influences sur les gènes, William D. Hamilton développa le principe de la sélection de parentèle [Hamilton, 1964]. Il décrit comment des individus peuvent participer à la sélection des gènes sans participer à la reproduction. De même que l'environnement impacte sur les gènes par les interactions que l'espèce entretient avec lui, la coopération chez les insectes sociaux peut avoir un effet similaire. Il fournit ainsi une explication plausible de la génération de classes d'individus stériles, œuvrant exclusivement pour le bien d'une communauté.

Afin de formaliser l'effet de l'environnement sur les gènes durant l'ontogenèse et plus particulièrement l'embryogenèse, Conrad Hal Waddington introduisit la notion de paysage épigénétique [Waddington, 1957] (figure 1.4). Non seulement quantité d'aspects du phénotype sont causés par

4. Il s'agit des gènes présents dans le génotype mais qui ne sont pas exprimés dans le phénotype. Ils n'ont en principe aucune influence sur la vie des individus et semblent inutiles. Ne pouvant être sélectionnés pour leur intérêt immédiat, ils n'en demeurent pas moins utiles en cas de retour en arrière des conditions environnementales.

une multitude de gènes mais leurs interactions et effets dépendent de facteurs tels que l'instant où ils s'expriment ou la température du milieu ambiant. Pour des développements et réflexions plus récentes, on peut se référer à Stewart [Stewart, 2004] et Goldberg et al. [Goldberg *et al.*, 2007].

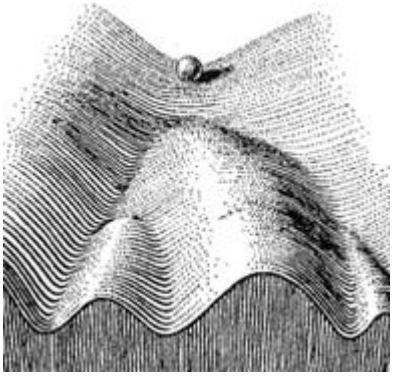


FIGURE 1.4 – Paysage épigénétique de Waddington. Les œufs présents en haut de la figure vont descendre les vallées de ce "paysage épigénétique" (chréodes) durant l'embryogenèse. Bien que ce paysage soit fondamentalement structuré par l'interaction des gènes, l'individu résultant du processus de développement dépend fortement de facteurs environnementaux qui influencent le chemin suivi lors de l'ontogenèse. Ainsi des échanges chimiques avec le parent, des changements de température ou des chocs mécaniques peuvent provoquer des bifurcations pouvant par exemple conduire à l'apparition de membres supplémentaires.

1.3.2 Cybernétique et systémique

Bien que les sciences aient depuis longtemps utilisé des principes de régulation pour produire des systèmes robustes, c'est seulement dans les années 1940 que Nobert Wiener fonde et formalise la cybernétique [Rosenblueth *et al.*, 1943]. Prenant ses racines dans la physiologie et la thermodynamique, le premier mouvement cybernétique a permis de modéliser des systèmes complexes par des boîtes noires reliées entre elles par des flux d'informations. Cette description, quoiqu'un peu caricaturale, traduit bien l'existence de sous-systèmes interconnectés et souvent eux-mêmes non trivialement modélisables. Par le biais de rétroactions, récepteurs et émetteurs, de tels systèmes peuvent réaliser l'homéostasie de certaines variables [5], c'est-à-dire le maintien de celles-ci autour d'une valeur cible ou dans un intervalle donné, et ce dans un environnement dynamique et imprévisible. Une boucle de rétroaction, telle que représentée sur la figure 1.5 permet de réguler l'action du système sur l'environnement, en comparant l'information fournie par un récepteur avec une valeur cible. De tels buts peuvent éventuellement être hiérarchisés par l'imbrication ou l'interconnexion de systèmes cybernétiques.

Le deuxième mouvement cybernétique apparu par la suite étend la portée de la cybernétique originelle aux systèmes loin de l'équilibre thermodynamique, dont les systèmes vivants. William Ross Ashby reprend et synthétise ainsi les principes de départ en rendant la théorie compatible avec l'auto-organisation [Ashby, 1952; Ashby, 1956], inspiré par les structures dissipatives de Ilya

5. Une homéostasie est définie par le maintien d'une variable autour d'une certaine valeur ou dans un certain intervalle, telle une concentration chimique dans le sang. Malgré la présence d'hystérésis, elle évite des variations extrêmes incompatibles avec la survie d'un organisme.

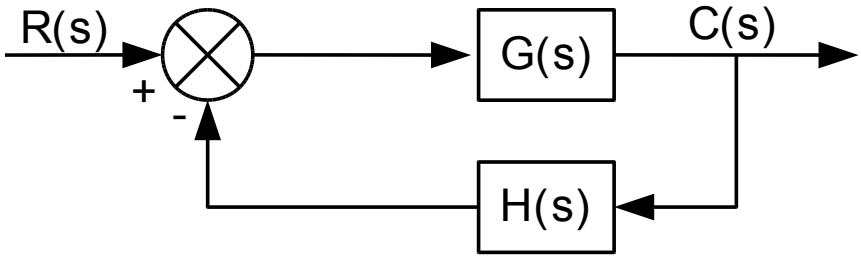


FIGURE 1.5 – Schéma de synthèse d'un système cybernétique, pouvant par exemple modéliser le fonctionnement d'un thermostat. A l'intérieur de la boucle de rétroaction, la température mesurée R est comparée à une valeur cible, et une commande C est alors calculée (G) pour l'augmenter ou la réduire en conséquence, en tenant compte de la dynamique actuelle du système (H).

Prigogine en chimie. De leur côté et de manière relativement similaire malgré une terminologie différente, Humberto Maturana et Francisco Varela développent la théorie de l'autopoïèse pour modéliser le vivant par la régénération permanente de son organisation [Varela *et al.*, 1974; Maturana and Varela, 1980]. Parallèlement, et même si les deux branches se différencieront progressivement, la systémique issue de la théorie des systèmes se développe [von Bertalanffy, 1993]. Un système y est définit en termes de structure (éléments constitutifs, relations, frontière, stocks) et de fonction (flux, rétroaction, homéostasie, décision) et la théorie distingue alors les systèmes ouverts et fermés. Autant la cybernétique que la systémique ont ainsi fourni un cadre solide pour la modélisation de systèmes en interaction avec leur environnement et des outils de conception appliqués en mécanique, électronique ou informatique.

1.3.3 Systèmes dynamiques et systèmes complexes

Plutôt que de se concentrer exclusivement sur les états d'équilibre, les systèmes dynamiques suivent l'évolution de processus dans le temps. Bien qu'un état stable puisse résulter d'un équilibre entre plusieurs processus en interaction, aucune dynamique ne peut être émulée par des états statiques. En cela, les systèmes dynamiques incluent les systèmes classiques purs et fournissent donc un cadre d'étude plus large. Inutiles pour certains problèmes classiques, ils permettent néanmoins de revisiter et étendre certaines théories supposées abouties.

De plus, les outils fournis par la théorie des systèmes dynamiques est particulièrement utile et parfois nécessaire pour étudier les systèmes complexes. Ceux-ci sont constitués d'un grand nombre d'entités en interactions locales et simultanées. La difficulté vient du fait que chaque paramètre du système a potentiellement une influence non négligeable sur le comportement global. A cause de cette intrication, il est généralement impossible de les résoudre sous forme d'équations et souvent nécessaire d'observer ou simuler leur évolution. La terminologie dynamique et ses notions d'attracteur, cycle limite, stabilité, bifurcation, hystérésis, portrait de phase, transition de phase ou encore trajectoire permet alors de mieux saisir, décomposer et analyser le comportement global du système. En ce qui nous concernent et outre la dynamique inhérente de la cognition, de tels systèmes sont souvent associés aux phénomènes d'auto-organisation et aux brisures de symétrie permettant l'émergence locale de spécificité.

Esther Thelen en psychologie s'intéresse par exemple à l'émergence de comportements stables et communs au sein de la population durant le développement de l'enfant [Thelen and Smith,

1994]. Elle insiste sur la symétrie entre les différents facteurs impliqués dans le développement, et la non primauté des uns sur les autres. Une telle approche dynamique permet de réconcilier exploration et exploitation dont la distinction est rejetée ici au même titre que toute autre forme courante de dualisme (inné et acquis, corps et esprit, ...).

A une échelle temporelle différente, les travaux de Scott Kelso en psychologie et biologie se focalisent entre autres sur la synchronisation au sein de systèmes complexes et le lien entre les dynamiques cérébrale et sensorimotrice [Kelso, 1995]. Que l'on s'intéresse à la dynamique propre d'un seul individu, de deux sujets ou d'une assemblée d'être vivants, que leur couplage soit visuel, tactile, ou se fasse via toute autre moyen de communication, les sous-systèmes considérés finissent irrémédiablement en phase ou antiphase [6] avec de potentielles transitions ou relaxations selon l'évolution des paramètres.

Pour indiquer la portée et l'intérêt des systèmes complexes dans une perspective philosophique, on peut considérer les notions de hasard et de déterminisme pour le système global et ses sous-systèmes. Comme indiqué plus haut, le système dans son ensemble est à tout instant déterministe, ce qui signifie que son état peut être déduit de son histoire et que le hasard n'a pas sa place. Néanmoins un sous-système local, par exemple un homme dans le système complexe que constituerait l'univers, n'a pas la possibilité de tout observer à tout instant. Le hasard et le choix sont donc relatifs à notre monde propre et notre condition d'êtres non omniscients. Nous n'avons en effet jamais accès au déterminisme de l'univers dans son ensemble et ne pouvons jamais prévoir nos actions sans modifier ce qui a généré cette prédiction. Même si elle est loin d'être universellement reconnue ou acceptée, j'adhère à la réflexion de Max Planck, pour lequel le simple fait d'envisager une alternative et de se décider modifie l'état de notre esprit et nous amène donc dans une situation nouvelle où nous avons connaissance de cette décision [7].

> *Nous pouvons dire par conséquent : vue du dehors, la volonté est causalement déterminée. Vue du dedans, elle est libre. Ce qui résout la question du libre arbitre, question qui s'est seulement posée parce qu'on n'a pas assez pris soin de spécifier explicitement le point de vue de l'observation, ni de s'y maintenir avec conséquence.* [Planck, 1948]

1.3.4 Théorie du chaos

De nombreux systèmes dynamiques que l'on rencontre dans la nature sont de plus chaotiques. Contrairement à la croyance commune, de tels systèmes ne sont pas aléatoires et restent totalement déterministes. Le chaos comme propriété mathématique d'une fonction ou d'un système est caractérisé par une grande sensibilité à de petites variations dans les paramètres, souvent associée à la non-linéarité et aux rétroactions [Gribbin, 2005]. Ainsi un phénomène naturel apparemment stable peut être profondément modifié suite à un changement minime dans l'environnement qui se retrouve amplifié par le biais d'interactions et de rétroactions. Du fait des retombées économiques importantes qu'elle implique, la théorie du chaos est particulièrement utilisée en météorologie ou pour la modélisation de turbulences [8]. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si la métaphore la plus connue qui traduit de tels phénomènes fait référence au climat :

6. On parle généralement de synchronisation et syncopation selon que les actions soient respectivement synchrones avec les stimulations ou s'intercalent entre elles

7. On évite ainsi des polémiques telle que celle de l'activation des cortex préfrontal et pariétal reflétant une décision avant que celle-ci soit consciente [Soon *et al.*, 2008]. Le libre arbitre et le choix n'existent que s'ils sont conscients.

8. Les turbulences aérodynamiques sont particulièrement visées puisqu'il est nécessaire de les minimiser pour améliorer les performances de vol, éviter la détection dans un contexte militaire, ou bien limiter les risques de

"le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas ?" [Lorenz, 1996].

Dans notre contexte d'étude, les systèmes chaotiques peuvent expliquer l'apparition de motifs stables et discrets malgré une dynamique sous-jacente continue et complexe. Ils permettent ainsi de réconcilier les abstractions qui nous semblent si naturelles telles que les objets de notre environnement avec une physique qu'on considère comme fondamentalement continue, tout du moins à l'échelle macroscopique. Des concepts propres aux systèmes dynamiques et particulièrement adaptés à la théorie du chaos tels que les bifurcations et changements de phase sont une potentielle source d'explications de nos changements d'idées permanents ou prises de décisions brutales.

L'intérêt de quantité de systèmes vient de leur maintien à la frontière entre une trop grande stabilité, si grande qu'elle interdit toute émergence de nouveauté, et un chaos absolu qui ne permet à aucun système d'interagir de manière cohérente avec son environnement. Des systèmes en apparence simplistes autorisent alors l'émergence d'organisations complexes, affichant une régularité certaine tout en restant uniques. Des réactions autocatalytiques et des phénomènes de diffusion expliquent la génération de tout motif de pelage dans le règne animal, de même que l'équation logistique (figure 1.7) modélise approximativement certaines propriétés de l'évolution des populations d'espèces vivantes.

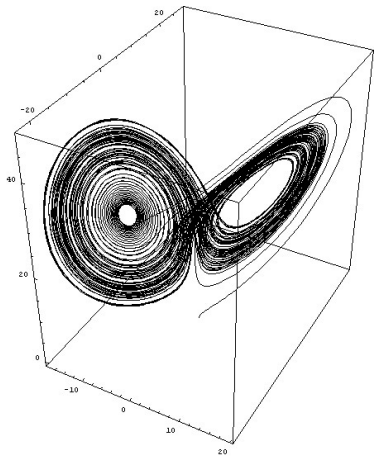


FIGURE 1.6 – Exemple de trajectoire de l'attracteur étrange de Lorenz. Ce "papillon" illustre parfaitement la dynamique complexe pouvant résulter d'un système chaotique relativement simple (3 variables). Bien que chaque "aile" soit relativement stable, chacune constituant un sous-attracteur, de petites variations dans les paramètres initiaux conduisent à des transitions erratiques de l'une vers l'autre.

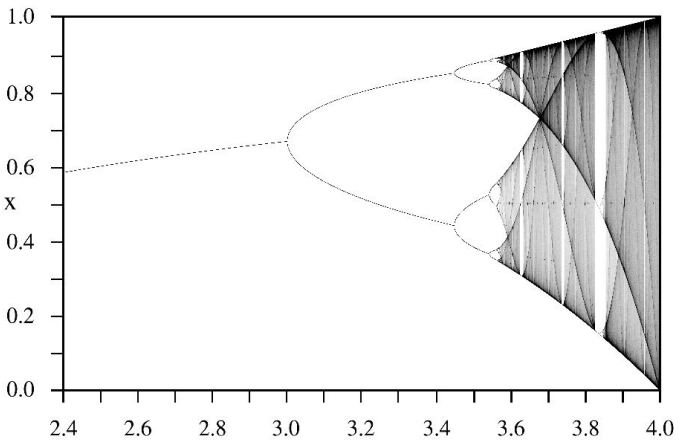


FIGURE 1.7 – Ce diagramme de bifurcation fournit les valeurs limites atteignables de x_n en fonction du paramètre μ quand $n \to +\infty$ dans la suite logistique $x_{n+1} = \mu x_n(1 - x_n)$. Une relation simple mais non linéaire peut ainsi conduire à des systèmes dynamiques (discret ici) aux comportements très variables. On remarque l'importance du paramètre μ relativement au nombre de valeurs possibles. On note que l'on a la première bifurcation pour $\mu \simeq 3$ et que le chaos total s'installe lorsque $\mu \to 4$.

dégradation de matériel. Des turbulences non contrôlées peuvent par exemple mener à la combustion interne des turbines d'un avion [Staffelbach *et al.*,]

2

Modèles

Sommaire

2.1 Approches intégratives et modulaires 23
2.1.1 IDA et LIDA 24
2.1.2 NCE 25
2.1.3 ACT-R 26
2.1.4 MicroPsi 27
2.2 Approches réparties et hybrides 28
2.2.1 Architecture de subsomption 28
2.2.2 Systèmes multi-agents 29
2.2.3 Polyscheme 30
2.2.4 Modèles internes 31
2.3 Approches réparties et unifiées 31
2.3.1 Réseaux de neurones artificiels 32
2.3.2 Réseaux bayésiens dynamiques 33
2.3.3 Mémoire hiérarchique temporelle 33
2.3.4 Schémas piagétiens 34

Introduction

Comme pour les théories précédemment décrites, seule une faible portion des modèles existants est présentée ici. Bien que j'ai tenté de choisir des exemplaires significatifs de diverses approches, les modèles trop distants de nos théories ne sont pas traités, tels ceux purement cognitivistes ou fondés exclusivement sur la logique. Pour une plus large revue des modèles existants, on peut se plonger dans le livre "Artificial Minds" de Stan Franklin [Franklin, 1995]. Ainsi la majorité des architectures présentées sont incarnées et utilisent des boucles fermées d'interactions. Ce dernier aspect se développe d'ailleurs rapidement de nos jours avec l'apparition des systèmes intelligents [9].

Pour mieux appréhender ce chapitre, il est important de noter une distinction commune entre les approches. Bien que cette catégorisation ne soit pas utilisée directement dans le plan

9. On parle ici des "smart systems" qui sont intégrés dans des constructions et des objets du quotidien pour les rendre plus robustes ou adaptés à l'utilisateur. Avec l'avènement des nanotechnologies, les matériaux eux-mêmes sont dits intelligents.

de ce chapitre, on distingue des traitements "top-down" et "bottom-up". Une transformation d'un ordre dans un langage naturel en un plan à exécuter puis en actions va clairement d'un niveau d'abstraction élevé à un niveau concret bas-niveau. A l'inverse, des filtres appliqués au flux optique suivis d'une extraction de contours et d'une segmentation d'objets vont d'un niveau perceptif bas à celui de concepts. Évidemment, la plupart des modèles adoptent une combinaison des deux approches, puisque tout interaction avec l'environnement l'impose, mais sa forme diffère. Les deux solutions extrêmes sont représentées sur la figure 2.1, mais ne sont pratiquement jamais mises en œuvre en pratique. L'approche retenue dans cette thèse est elle aussi intermédiaire, mais bien plus proche de (b) que de (a) sur la figure.

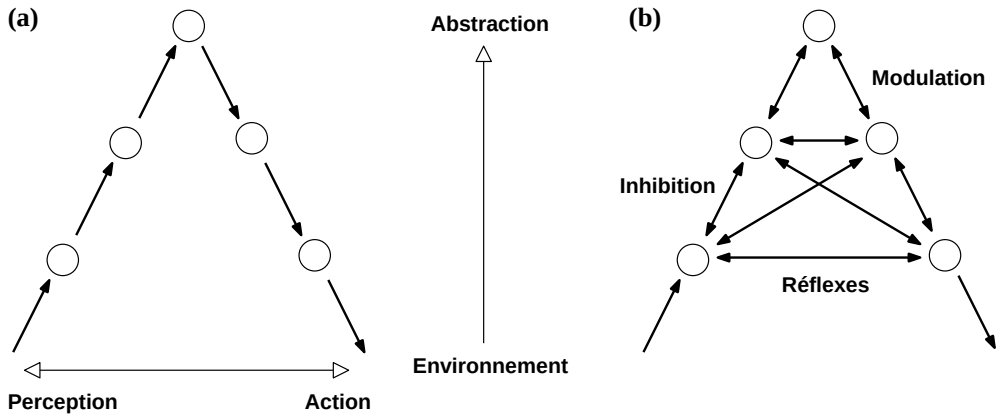


FIGURE 2.1 – Formes extrêmes de relations à l'environnement. (a) Approche intégralement bottom-up puis top-down. (b) Interactions à tous les niveaux et entre tous les niveaux.

En introduisant un contraste similaire entre les modèles manipulant des abstractions (c'est souvent le cas des approches décrites dans la première section ci-dessous) et ceux n'utilisant que des niveaux d'activité propagés tels les réseaux de neurones, notre approche se situe là-aussi à un niveau intermédiaire. Ceci permet d'avoir une compréhension et un contrôle suffisants sur les éléments de base, tout en conservant un degré d'abstraction compatible avec les comportements sensori-moteurs modélisés.

Voici un tableau de synthèse reprenant certaines propriétés des modèles présentés dans ce chapitre (tableau 2.2). Celles-ci ont toute un sens pour cette thèse et correspondent à leur interprétation dans cette thèse, le tableau n'est donc pas à prendre comme un classement ou une comparaison des capacités et possibles performances des architectures. Le choix des propriétés est volontairement biaisé puisqu'elles sont toutes représentées par notre approche et quantité de phénomènes naturels reproduits par les architectures les plus avancées ne sont simplement pas inclus ou étudiés. Le but de ce tableau est donc de permettre des recoupements dans les esprits et de naviguer rapidement dans ce chapitre s'il est plus tard nécessaire de s'y référer. Il permet aussi de réaliser à quel point certains principes sont communs à un grand nombre d'approches en apparence très différentes, et se plonger dans leur littérature permet d'obtenir davantage d'informations sur les raisons de les prendre en compte. Le fait de trancher sur certaines propriétés afin d'obtenir un tableau booléen est discutable, mais j'ai tenté de faire au mieux en me basant sur des documents de conception afin de distinguer les points fortement représentés par chaque modèle. Chacun inclut faiblement la majorité des propriétés, mais celles-ci sont souvent

simplifiées ou absentes du cœur du modèle.

	IDA	Nov	A'R	μPsi	Sub	SMA	Poly	I.M	ANN	Bay	Mar	HTM	Pia
Structure	M	M	M	M	H	H	H	H	U	U	U	U	U
Environnement	V	V	V	V	R	V	VR	R	VR	VR	VR	V	VR
Émergence		✓				✓			✓			✓	
Probabilités		✓								✓	✓	✓	✓
Propagation									✓			✓	
Anticipation		✓		✓				✓			✓	✓	✓
Régulation					✓	✓		✓	✓				
Coordination	S	DE		DE	S	DEI	DE						

FIGURE 2.2 – Comparaison des différents modèles (M=modulaire, H=hybride, U=unifiée, V=environnement virtuel, R=réel/robotique, E=explicite, I=implicite, D=dynamique, S=statique).

On remarque de fortes corrélations entre la structure de l'architecture et l'environnement avec lequel elle interagit, principalement à cause de la difficulté d'incarner des approches à orientation cognitiviste. De même les approches basées sur la propagation (généralement d'activité) sont souvent unifiées. On notera surtout qu'à part certaines variantes des systèmes multi-agents, aucune n'implémente une coordination dynamique et implicite, permettant entre autres de coordonner plusieurs processus précédemment acquis en temps réel sans construction explicite d'un plan. J'essaierai de montrer par la suite que l'infrastructure cognitive présentée dans cette thèse le permet.

La structure de ce chapitre est également discutable, mais a l'avantage de fournir une première catégorisation. Elle reprend la première propriété du tableau 2.2. Les approches unifiées sont celles qui utilisent une forme de représentation homogène, quel que soit l'aspect de la cognition modélisé. Ainsi les réseaux de neurones artificiels seront exclusivement constitués, comme leur nom l'indique, de neurones artificiels. Les approches intitulées hybrides sont celles dont les représentations sont de nature variable, donc opposées en cela aux unifiées. L'acception est donc plus générale que celle trouvée régulièrement dans la littérature de combinaison de modules connexionnistes et symboliques.

La dénomination "répartie" dans ce chapitre indique une approche hybride dans laquelle tous les composants ou modules spécialisés occupent des rôles symétriques. Par exemple, les agents des systèmes multi-agents communiquent tous localement et de leur échanges et adaptations émergent la fonction globale du système. A l'inverse, les composants des approches intégratives sont généralement hiérarchisés de manière statique et le contrôle global du système est réalisé de façon centralisée.

2.1 Approches intégratives et modulaires

Les approches intégratives modélisent la cognition comme une combinaison ou hiérarchie de modules relativement indépendants, spécialisés dans des domaines particuliers. Elles sont jusqu'à présent les seules proposant des modèles complets ou quasi-complets de la cognition humaine,

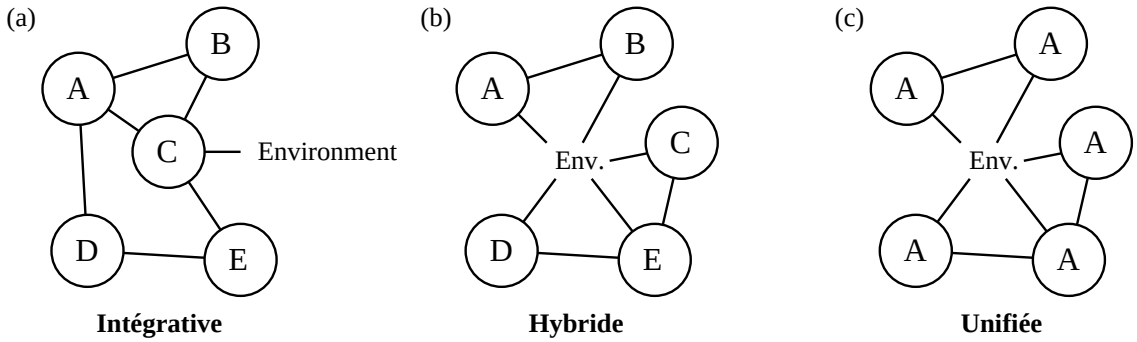


FIGURE 2.3 – Différents types d'architectures modulaires dans lesquelles la nature des composants et la topologie des relations entre les éléments et avec l'environnement varient.

mais cela n'est théoriquement pas une nécessité [10]. Une grande partie des architectures associées utilisent d'ailleurs au sein de leurs modules des réseaux de neurones ou des modèles probabilistes unifiés.

On retrouve donc un découpage somme toute intuitif et naturel en modules sensoriels, moteurs, mnésiques... D'autres reproduisent des fonctions cognitives considérées comme avancées telles que l'attention, la planification ou la manipulation de concepts abstraits généralement sous forme symbolique. Comme dit précédemment, les approches décrites dans cette section sont donc nécessairement hybrides, vu la variabilité des algorithmes et techniques employées. Cette décomposition des phénomènes complexe en modules issue de la révolution théorique des années 50 se retrouve en neurosciences, où l'équivalence aire/fonction était reine encore récemment.

Nous présentons ici 4 instances d'approches intégratives couvrant la majorité des caractéristiques de cette catégorie d'approches, bien que de nombreuses autres existent, telles les architectures H-CogAff, CLARION (Connectionist Learning with Adaptive Rule Induction ON-line) ou Soar (pour State, Operator And Result à l'origine). Elles sont toutes inclues dans le courant de l'intelligence artificielle générale (AGI ou Artificial General Intelligence). Contrairement aux recherches en intelligence artificielle dite classique des cinquante dernières années qui ont pu se concentrer sur un domaine particulier d'application, le but est ici de modéliser les capacités de généralisation et d'adaptation des individus à des problèmes nouveaux. Cette notion est donc à rapprocher du facteur-g utilisé en psychologie [Goertzel and Wang, 2007].

2.1.1 IDA et LIDA

Le projet IDA (Intelligent Distribution Agent) a été dirigé depuis son origine par Stan Franklin et développé à l'université de Memphis [Franklin *et al.*, 1998]. La théorie sur laquelle repose l'architecture et celle du "Global Workspace" introduite par Bernard J. Baars [Baars, 1988]. Celle-ci intègre la conscience au cœur de la cognition, tel un spot qui éclairerait la scène de la mémoire de travail. Cette mémoire est quant à elle remplie par quantité de processus incons-

10. On peut lire à ce sujet les nombreuses discussions scientifiques qui ont suivies la publication de "Society of Mind" [Minsky, 1986]

cients relatifs au contexte (dont les interactions directe avec l'environnement). Cette théorie traite de phénomènes complexes ayant tous un lien fort avec le conscient et l'inconscient, tels que l'activation subliminale, l'attention ou l'acquisition d'automatismes par la pratique.

IDA est définie selon ses créateurs comme une théorie complète de la cognition, émulant par exemple tous les aspects de la mémoire (sensorimotrice, procédurale, épisodique, court-terme et long-terme...). La boucle principale de mise à jour du modèle est classique dans le sens où s'enchaînent perception (bottom-up), cognition et action (top-down) [11], mais cette décomposition peut être raffinée :

- **Perception bas niveau** : Chaque cycle cognitif procède à une phase d'acquisition de données depuis l'environnement et à son interprétation. Tout d'abord, les principales caractéristiques du flux sensitif sont extraites (telles les textures, formes ou mouvements pour la vision).
- **Perception haut niveau** : Les objets sont ensuite reconnus et les personnes identifiées. Ceux-ci sont catégorisés et on leur associe des sentiments, des actions ou encore des relations... Cette étape combine les modules de mémoire sensorielle et mémoire associative perceptive pour modifier la mémoire de travail.
- **Accès en mémoire épisodique** (memory retrieval) : Le "où", le "quand" et le "quoi" de la situation sont extraits des mémoires épisodiques à court et long terme. A partir des indices contextuels présents dans la mémoire de travail, de nouveaux éléments y sont amenés, tel un nom associé à un visage.
- **Diffusion consciente** (conscious broadcast) : Des micros processus (codelets) rentre alors en compétition pour l'accès à la conscience, chacun utilisant des éléments différents présents en mémoire de travail. Une fois la victoire emportée, l'information est largement diffusée à d'autres modules du modèle.
- **Action** : La mémoire procédurale sous l'influence de la conscience permet alors de sélectionner un schéma procédural, à son tour transféré à un module gérant les différents comportements possibles. Des automatismes sensorimoteurs (à la Piaget) permettent alors d'interagir avec l'environnement à un rythme bien supérieur à celui du cycle cognitif complet.

Bien que cette architecture n'inclue pas non plus d'apprentissage, celui-ci a été rajouté dans une extension nommée LIDA (Learning-IDA). Comme dans la majorité des modèles, l'apprentissage apparaît comme une surcouche permettant de rendre le système plus autonome et d'améliorer ses performances.

2.1.2 NCE

Le Novamente Cognition Engine (NCE) proposé par la société Novamente est un système cognitif complet récemment développé aux États-Unis [Looks *et al.*, 2004]. Bien que ses créateurs prônent une forme de représentation unifiée, ce système est testé dans un monde virtuel tridimensionnel nommé AGISim qui distingue d'office des interactions textuelles et sensorielles. Le principal avantage d'une telle approche est la possibilité d'interagir avec quantité d'utilisateurs humains de l'environnement de simulation, et ainsi intégrer toutes les interactions dans un

11. De nombreuses influences mutuelles entre les modules existent pour rendre compte de processus plus complexes, mais ne sont pas détaillées ici.

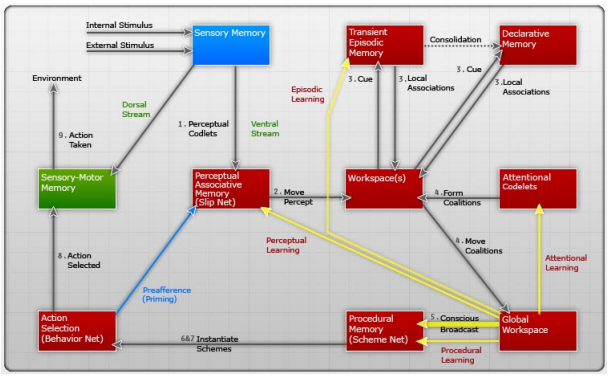


FIGURE 2.4 – Architecture de IDA

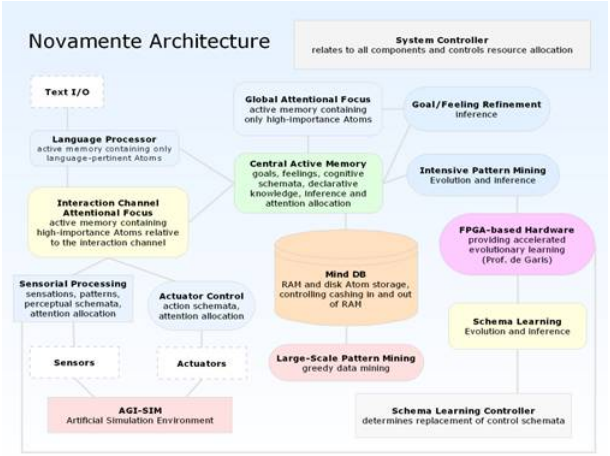


FIGURE 2.5 – Architecture proposée par Novamente

unique esprit qui généralise et apprend plus vite [12]. L'architecture est donc fondamentalement conçue pour être distribuée sur un large réseau autorisant le passage à l'échelle. L'hypothèse théorique sous-jacente est que la cognition (humaine) n'est possible que dans un système apte à se comprendre lui même. La réflexivité est nécessaire à l'auto-amélioration des performances et il doit donc être capable de raisonnements complexes et d'apprentissage. Les directeurs du projet annoncent que le moteur cognitif a passé les stades sensori-moteurs piagétiens, mais les abstractions typiquement humaines d'ordre supérieur n'ont pas encore émergé.

La structure est principalement inspirée des travaux de Ben Goertzel, mais l'architecture intègre quantité d'algorithmes de pointe en intelligence artificielle, calcul distribué ou même économie. Ainsi sont utilisés des réseaux logiques probabilistes, le moteur d'apprentissage évolutionniste et probabiliste MOSES, un algorithme d'allocation de l'attention "économe", des hypergraphes décorés ou encore un langage fonctionnel nommé Combo codant les programmes en mémoire procédurale. De la coordination de tous les modules associés devrait à terme émerger une cognition abstraite.

2.1.3 ACT-R

Le modèle théorique et l'environnement de programmation ACT-R (Adaptive Control of Thought - Rational) supposent que la cognition est réalisée par un système à temps discret à base de règles de production. Celui-ci se fonde sur des recherches en psychologie cognitive et en imagerie cérébrale, en particulier sur celles d'Allen Newell. Développé principalement par John Robert Anderson à l'université de Carnegie Mellon [Anderson, 1976; Anderson and Lebiere, 1998], l'architecture d'ACT-R a pour but de modéliser le flot d'information et ses transformations dans le cerveau, du cortex aux ganglions de la base et inversement. Celui-ci a d'ailleurs connu de récents développements permettant de prédire quantitativement les séquences temporelles d'activation des aires cérébrales.

12. De nombreuses équipes de recherche utilisent d'ailleurs l'environnement de Second Life©pour interagir avec des personnes réelles ou étudier leurs comportements via Internet

Pour chaque tâche cognitive, un programme ACT-R doit être spécifiquement conçu et il n'y a donc pas d'apprentissage à proprement parler dans la version originale. L'exécution consiste en une série de cycles, chacun réalisant une opération atomique, tels un accès à la mémoire ou une transformation du flux optique. Chaque cycle dans le programme comprend une étape de filtrage par motif (pattern matching) afin de sélectionner les modules les plus adaptés à la situation (et permettant de s'approcher d'un but défini à priori) ainsi que l'exécution des règles de production associées. Chaque module communique avec ses voisins ou l'environnement par l'intermédiaire de tampons (buffers) qui sont modifiés par l'application des règles, à la manière d'une architecture à tableau noir où les tampons représenteraient les connaissances communes. L'architecture distingue différents types de modules :

- Perceptivo-moteurs : ils interagissent avec l'environnement. Même si l'environnement d'ACT-R autorise le développement d'autres modules, seuls la vision et le toucher sont généralement représentés et traités séparément.
- Mnésiques déclaratifs : ils contiennent les connaissances de l'agent sur l'environnement.
- Mnésiques procéduraux : ils modifient les tampons des autres modules et font ainsi évoluer la situation. Ils sont le cœur de la dynamique d'ACT-R.

Tous les modules sont actifs à tout instant et leur mise à jour parallèle est simulée par l'environnement. ACT-R n'est pas à proprement parler symbolique même s'il exploite des représentations internes (les tampons). Ceux-ci sont en effet constamment modifiés à la manière de l'activité dans les réseaux de neurones.

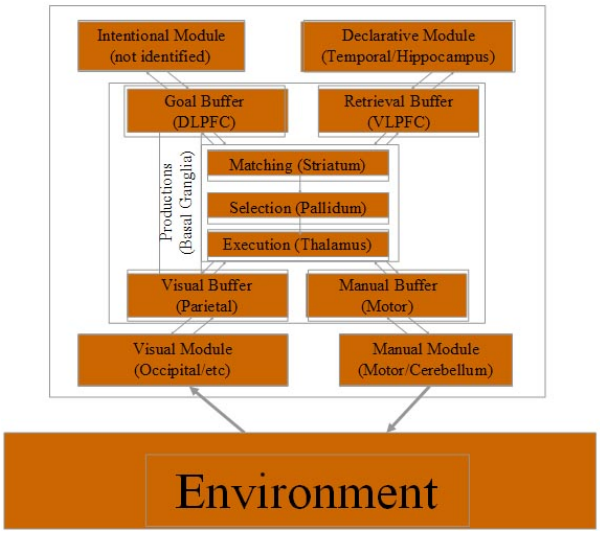


FIGURE 2.6 – Architecture de ACT-R

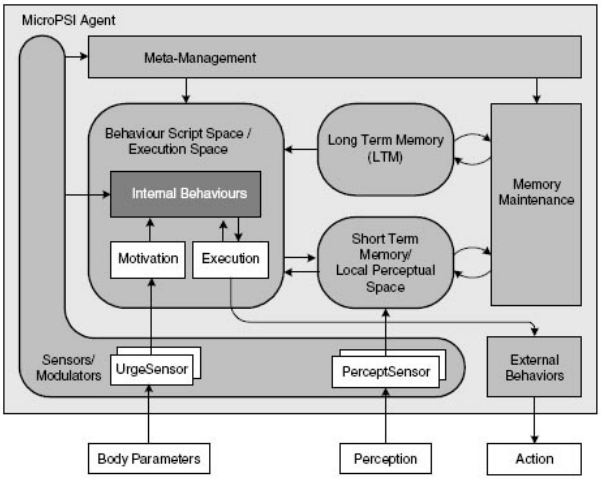


FIGURE 2.7 – Architecture de MicroPsi

2.1.4 MicroPsi

Cette architecture se fonde sur la théorie Psi de Dietrich Dörner. Un Psi est un agent qui régule ces actions et comportements en fonction de ses besoins et émotions. Le projet MicroPsi, dirigé par Joscha Bach, permet de tester ces principes par la synthèse et l'observation d'un agent dans un environnement virtuel [Bach, 2003]. Il s'agit en cela d'une formalisation et abstraction de la théorie psychologique originale, utilisant des graphes hiérarchiques pour modéliser la majorité des phénomènes cognitifs, de la mémoire aux boucles sensori-motrices.

Les nœuds sont les constituants fondamentaux de toute connaissance. Ils peuvent aussi bien représenter des éléments sensoriels basiques (tel qu'un segment orienté) que permettre la construction de concepts plus abstraits (une forme géométrique). La combinaison des nœuds est réalisée via des relations logiques, spatiales ou temporelles, autorisant par exemple la génération dynamique de nouvelles représentations internes, de souvenirs ou de plan à exécuter. Bien que les représentations soient relativement unifiées, la nature des briques de base et de leurs relations varie. De plus, l'architecture distingue la mémoire à long-terme et la mémoire de travail, isole les entrées émotionnelles non sensorielles de même que les besoins vitaux, et fait agir ces différents éléments à différents niveaux de l'architecture. Elle dispose enfin de phases de planification, de sélection de comportement adéquats ou d'une gestion d'événements critiques (comme un besoin urgent à assouvir). Elle semble par conséquent pouvoir être classée dans les approches intégratives.

2.2 Approches réparties et hybrides

La spécificité des modules qui composent toutes les approches hybrides hérite de l'argument de modularité introduit par Jerry Fofor [Fodor, 1983] : l'intellect doit être composé de modules hautement spécialisés qui fonctionnent en temps réel et communiquent par l'intermédiaire d'entrées/sorties [13]. Qu'ils soient désignés par les termes d'agents, d'experts, de spécialistes, de codelets, les composants doivent disposer d'interfaces similaires mais peuvent être de natures foncièrement différentes. La communication peut être directe et explicite via des protocoles parfois complexes ou bien implicite via l'environnement ou la diffusion de signaux non ciblés.

2.2.1 Architecture de subsomption

L'architecture de subsomption, développée par Rodney Allen Brooks au Massachusetts Institute of Technology, suppose un lien direct entre perception et action quel que soit le comportement envisagé [Brooks, 1991b; Brooks, 1991a]. Cette hypothèse a longuement été testée à travers des séries de robots interagissant avec des environnements réels. La force principale du modèle est en effet la réalisation de robots au fonctionnement robuste malgré les imperfections et aléas du monde réel, Brooks étant d'ailleurs un fervent défenseur de la cognition incarnée.

L'intelligence que l'humain prête aux robots créés repose sur un ensemble de modules fonctionnant en temps réels, réalisant chacun une fonction bien spécifique (figure 2.8b). Rien de bien nouveau si ce n'est que les modules sont interconnectés de manière hiérarchique afin de contourner la nécessité d'une boîte décisionnelle centrale (une "computational box" fournissant un contrôle centralisé) (figure 2.8a). La hiérarchie provient de la capacité de chaque module d'inhiber des fonctions inférieures, tout en étant lui aussi sujet à une inhibition similaire de la part de modules supérieurs. Brooks a donc opté pour un développement incrémental de ses robots, dans une optique constructiviste d'ajout de comportements et non de capacités abstraites. Le comportement global émergent est donc facilement déterminé : seules les actions correspondant

13. Dans la majorité des théories cognitivistes, les fonctions cognitives élevées étaient considérées comme modulaires et inférentielles alors que les aspects bas-niveau étaient interprétés en termes behavioristes. Fodor souligna néanmoins que des illusions perceptives telles que celles de Müller Lyer étaient stables dans le temps et non influençables par des croyances conscientes. La conception modulaire et l'encapsulation devaient donc toucher tous les niveaux de la cognition.

aux comportements les plus prioritaires dans le contexte actuel s'exécutent.

Malgré une simplicité déconcertante force est de constater l'efficacité de la technique. Cette simplicité est en réalité trompeuse, car c'est dans la recherche et l'étude de la hiérarchie que repose l'intelligence qui permet la coordination complexe de comportements. Cela rend la conception bien plus ardue lorsque l'on souhaite modéliser des tâches complexes, comme dans les développements plus récents de l'équipe du MIT [Brooks *et al.*, 1999; Brooks, 2001].

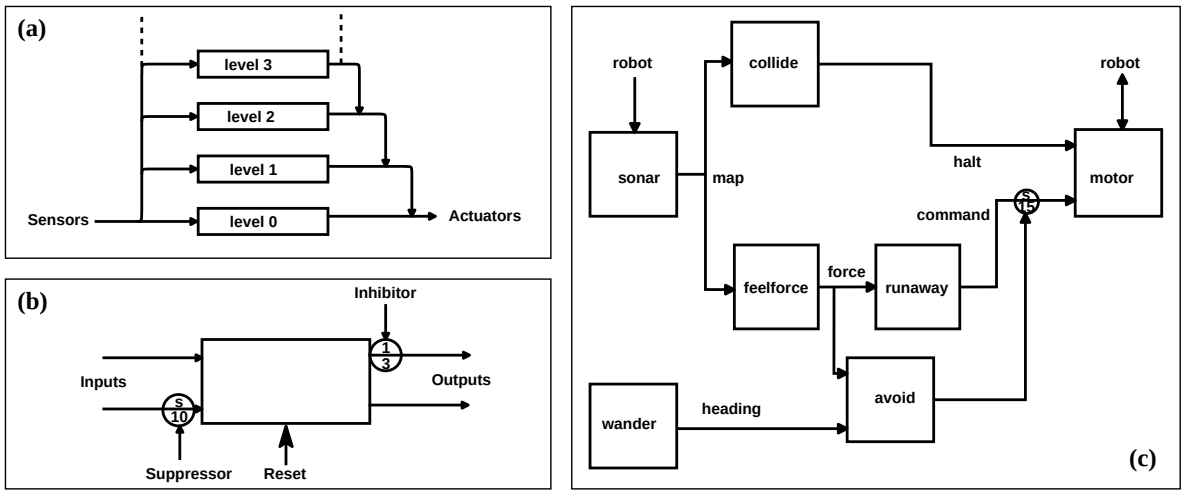


FIGURE 2.8 – (*a*) Aperçu de la hiérarchisation initiale de l'architecture de subsomption. Chaque niveau interagit directement avec l'environnement et "subsume" la couche inférieure. (*b*) Module de l'architecture potentiellement inhibé et influençant d'autres modules. (*c*) Exemple d'organisation pour un robot explorant un environnement inconnu mais devant en priorité éviter les obstacles.

2.2.2 Systèmes multi-agents

Les systèmes multi-agents s'intéressent autant à des processus abstraits qu'à des robots ou des humains, se plaçant ainsi à un niveau d'étude et d'analyse très général [Wooldridge, 2002]. Les caractéristiques communes de tous les agents sont leur autonomie, tout du moins partielle, leur perception locale de l'environnement. S'insérant dans le cadre général de l'intelligence artificielle distribuée, ils permettent de modéliser des systèmes biologiques ou mécaniques, de même que des sociétés humaines ou animales (dont ils s'inspirent) en l'absence de tout contrôle centralisé.

De tels systèmes tentent de répondre à diverses problématiques dont la coordination des actions dans un environnement partagé. L'architecture générique d'un agent peut se décomposer de la manière suivante :

- **Interaction** : Chaque agent dispose de capacités et de fonctionnalités propres grâce auxquelles il peut interagir avec son environnement subjectif.
- **Fonction** : Il cherche constamment à réaliser une fonction qui peut être considérée comme sa raison de vivre. Il est donc un processus actif et intentionnel [14]. Il comporte donc

14. Quoique rares, certains applications et implémentations utilisent néanmoins des agents réactifs ou pulsion-

souvent un modèle cognitif explicite, par exemple fondé sur la théorie des BDI (Belief Desire Intention).
- **Communication** : Afin d'atteindre ses objectifs, l'agent doit communiquer avec les autres agents présents dans l'environnement, qui ont potentiellement des buts et représentations internes très différents. Cette communication doit être utile et contribuer à l'évolution du système.
- **Coopération** : Quoique optionnelle, de nombreux systèmes multi-agents tentent d'éviter ou résoudre les conflits afin de satisfaire leurs propres buts plus efficacement. Cela implique néanmoins une forme de théorie de l'esprit [15] relativement aux autres agents, leur permettant de faire des concessions et des négociations.

Comparée aux approches intégratives ou aux approches unifiées décrites à la section suivante, cette architecture propose théoriquement une coordination dynamique bien plus souple. En pratique, la mise en oeuvre de protocoles de communication complexes pour parvenir à des situations coopératives contraint néanmoins énormément la dynamique du système global.

2.2.3 Polyscheme

L'architecture Polyscheme a été initiée par Nicholas Cassimatis durant son doctorat sous la direction de Marvin Minski [Cassimatis, 2005]. Le constat à l'origine de Polyscheme est qu'à chaque problème auquel doit faire face un individu intelligent correspond une manière optimale spécifique de le résoudre. Ainsi des spécialistes variés ("specialist" en version originale), employant différents types de représentations, de logiques et d'inférences, peuvent produire les solutions les plus adaptées et efficaces. Chaque spécialiste s'attache ainsi à modéliser certains aspects de l'environnement et résoudre certaines classes de problèmes.

De même que dans les systèmes multi-agents, chaque spécialiste doit communiquer avec les autres afin de déterminer lequel est le plus compétent et possède une connaissance suffisante de la situation. Dans ce but, Cassimatis a introduit la notion de focus attentionnel dans son modèle, afin que plusieurs composants puissent choisir un problème commun et se synchroniser dessus. De plus, un spécialiste réflexif peut prendre un rôle légèrement dissymétrique afin de guider le focus sur des aspects préférentiels de la situation. A nouveau et en accord avec le principe général de l'architecture, différents schèmes d'inférences peuvent être utilisés pour guider l'action, tels un filtrage de scripts, une recherche systématique depuis les buts, une simulation stochastique et d'autres raisonnements fondés sur diverses logiques.

Une telle architecture permet la prédiction d'événements non directement perçus (telle que l'apparition d'objet occultés souvent testée en psychologie du développement) ou le suivi robuste d'objets. Dans de telles applications, les spécialistes peuvent gérer des aspects tels que l'identité des objets, le temps, les relations spatiales, la causalité ou la coordination des actions. Elle a été appliqué aussi bien en robotique qu'à travers des simulations.

nels, agissant exclusivement sur la base de besoin internes immédiats ou de stimulus extérieurs.

15. L'expression est bien entendue à prendre dans son acception cognitive (de prédiction de ses propres actions ainsi que celles des autres) plutôt qu'épistémologique.

2.2.4 Modèles internes

Contrastant avec beaucoup de travaux en neurosciences, recherchant essentiellement la possible localisation de certaines fonctions, Mitsuo Kawato (directeur du Computational Neuroscience Laboratory de Kyoto) a dédié de nombreuses années à la recherche du type de traitements opérés par le cerveau et des représentations associées [Kawato, 1999]. Afin de comprendre le fonctionnement humain, il a choisi de modéliser computationnellement certains processus du cerveau en exploitant des "modèles internes", nécessaires à quantité de tâches cognitives. Au niveau sensori-moteur, Daniel Wolpert (directeur du Sensorimotor Control Group de l'université de Cambridge) a expérimenté diverses approches du contrôle moteur humain et a collaboré avec Kawato sur l'apprentissage et la décomposition modulaire d'une telle fonction [Wolpert and Kawato, 1998; Haruno *et al.*, 2003].

Les modèles internes imitent une dynamique externe au cerveau, prédisent ainsi les mouvements résultant de commandes motrices et régulent donc plus finement les comportements. La théorie de Kawato est que les fibres afférentes dans le cervelet codent l'erreur commise au niveau des coordonnées motrices relativement aux commandes émises. Le cervelet acquiert alors des modèles couplés direct et inverse de la cinématique du mouvement. Vu la quantité d'interactions sensori-motrices possibles, l'autre hypothèse est que le cerveau utilise une méthode du type diviser pour régner afin de générer et réguler des comportements complexes. Il disposerait d'un large répertoire de modèles internes correspondant à des sous-tâches simples.

La principale limitation en termes de régulation vient de la relative indépendance des modèles internes. En effet, bien que chacun adapte parfaitement sa dynamique aux contraintes extérieures et à la situation unique du moment, il est souvent nécessaire de faire un choix pour déterminer quel modèle peut seul interagir avec l'environnement. Des recouvrements sont donc souvent nécessaires, les transitions difficiles et leur coordination passe par des inférences pas toujours possibles vu l'hétérogénéité des modèles internes.

2.3 Approches réparties et unifiées

Cette dernière classe d'approches a un avantage certain en termes de coordination et de communication. En effet, les représentations étant homogènes et souvent diluées dans une masse de processus en interaction, on se passe de protocoles de communication et d'algorithmes complexes liés à l'interprétation et à la compréhension intermodulaire. Les représentations et signaux échangés étant généralement de très bas niveau, on peut les appliquer facilement à quantité de champs d'application différents sans modifier la nature du système. C'est une des raisons pour lesquelles ils sont souvent intégrés au sein d'approches hybrides car facilement interfaçables avec d'autres modules.

Néanmoins, il faut souvent spécifier et développer des algorithmes d'apprentissage travaillant simultanément sur des ensembles de processus. Il est ainsi difficile de passer à l'échelle pour modéliser des systèmes complexes, car l'émergence de fonctions cognitives supérieures n'est ni triviale ni automatique. Que ce soit à cause de l'absence de certains principes fondamentaux rendant la tentative inutile ou de la difficulté de contrôler et faire évoluer positivement un système homogène constitué d'une myriade de composants en interaction, la plupart des approches cognitives actuelles les utilisent localement et pour des tâches restreintes.

Les algorithmes génétiques peuvent être considérés comme une forme d'approche unifiée ou chaque individu rentre en compétition avec les autres et doit donc être le plus adapté possible afin de se reproduire en mutant. Néanmoins la problématique de la sélection des gènes, de la fonction d'évaluation ou des paramètres de différenciation ayant des homologues dans d'autres approches telles que les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques ne seront pas davantage décrits ici.

De même, les modèles de Markov cachés, les processus décisionnels de Markov et les processus de décision markoviens partiellement observables (qu'on peut se représenter comme une combinaison des deux précédents) ne seront pas détaillés. Quoique par nature anticipatifs, probabilistes, ils demeurent purement séquentiels s'ils ne sont pas enrichis, et les algorithmes permettant de les faire converger sont rarement applicables dans des environnements temps-réel. La section sur la mémoire hiérarchique temporelle servira de substitut car modélisant également des séquences d'observations et des représentations stochastiques.

2.3.1 Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels s'il est besoin de les introduire de façon générale font partie du paradigme très générale du PDP (Parallel Distributed Processing) et sont les représentants majoritaires de la sous-classe des approches connexionnistes. Certainement les outils de modélisation non-linéaires les plus utilisés, ils peuvent en théorie approximer n'importe quelle fonction continue en modifiant leur structure durant une phase d'apprentissage. Leur pouvoir de modélisation devient quasiment infini s'ils sont de plus récursifs et temporels mais ils deviennent alors très complexes à gérer [Tani, 1996; Tani, 2003]. Leur couplage avec des algorithmes génétiques permet néanmoins de voir émerger des comportements adaptés et complexes en robotique [Di Paolo, 2003; Harvey *et al.*, 2005].

Même avec les architectures de réseaux plus conventionnelles avec de simples propagations unidirectionnelles, d'une couche d'entrée à une couche de sortie en passant par des couches cachées, le comportement du réseau dépend de plusieurs paramètres :

- **Topologie du réseau** : La structure du réseau, l'emplacement de ses connexions ou bien le nombre de couches influencent les capacités du réseau (figure 2.9a). Ainsi le perceptron (avec 1 seul neurone de sortie) ne pourra pas modéliser une fonction "ou exclusif" quelle que soit la durée ou la base d'apprentissage [16].
- **Fonction d'agrégation** : Il peut s'agir d'une somme pondérée, d'une distance ou de toute autre fonction permettant d'agréger l'ensemble des valeurs d'entrées (figure 2.9b). C'est majoritairement sur le poids associé à chaque entrée que s'effectue l'apprentissage.
- **Fonction d'activation** : Cette fonction introduit généralement une composante non-linéaire dans le système, bien que ce ne soit pas toujours le cas. Il peut s'agir par exemple d'une fonction sigmoïde ou seuil (si on désire obtenir des sorties booléennes).
- **Fonction de coût** : Quel que soit le type d'apprentissage (supervisé, non supervisé ou par renforcement), une fonction de coût est nécessaire pour évaluer la performance instantanée du réseau et doit être minimisée lors de l'apprentissage. Le choix de cette fonction est généralement critique. Si l'apprentissage ne s'effectue pas par renforcement, il faut aussi choisir une base d'apprentissage et s'il est supervisé, il faut de plus connaître a priori le résultat du réseau sur la base.

16. Plus généralement, les réseaux de neurones standards sont bons pour catégoriser des ensembles convexes du fait de leur capacité de généralisation relativement simples, ce qui n'est pas le cas du XOR.

Les structures réduites ou fortement contraintes ont souvent des capacités limitées. Vu la quantité de paramètres à choisir, évaluer et faire évoluer, rares sont les travaux de recherches qui reposent uniquement sur les réseaux de neurones pour modéliser directement la cognition. Néanmoins avec la dynamique actuelle du marché de l'électronique, on voit apparaître des projets d'émulation de cerveaux humains dans des cartes programmables tels que China Brain [de Garis *et al.*, 2008].

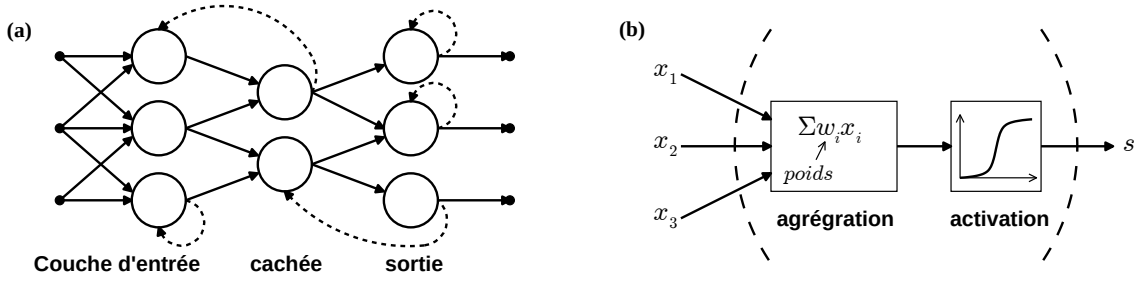


FIGURE 2.9 – (*a*) Réseau de neurone artificiel. La majorité des connexions sont unidirectionnelles (*flèches continues*), mais de potentielles connexions récurrentes sont représentées (*en pointillés*). (*b*) Zoom sur un neurone (atome du système) intégrant les entrées par sa fonction d'agrégation (ici une somme pondérée) avant d'appliquer une fonction d'activation pour obtenir la sortie.

2.3.2 Réseaux bayésiens dynamiques

Les réseaux bayésiens sont des graphes orientés acycliques dont les arcs représentent les dépendantes conditionnelles entre variables. Les paramètres associés aux nœuds sont des tables de probabilités conditionnellement aux causes envisagées. A la différence des approches statistiques pures, une probabilité est alors une traduction numérique d'un état de connaissance du système, par exemple le degré de confiance qu'on accorde à une hypothèse.

L'intérêt majeur d'une telle approche est l'existence de nombreux algorithmes d'apprentissage et de révision des connaissances. Ils sont ainsi devenus très courants dans le domaine de la fouille de données. Le modèle de l'environnement n'est pas nécessairement connu a priori et les relations peuvent être construites progressivement. L'inférence bayésienne permet également d'utiliser le réseau comme mémoire associative entre des événements corrélés.

Afin d'appliquer de tels réseaux dans un environnement dynamique, les réseaux bayésiens dynamiques ont été introduits comme extension prenant en compte des séquences de variables. Ils restent néanmoins discrets et reposent sur de grands jeux de données pour converger vers une structure raisonnablement simple et acceptable.

2.3.3 Mémoire hiérarchique temporelle

Développée par la compagnie américaine Numenta, ce modèle est basé sur la théorie de prédiction-mémoire de Jeff Hawkins [Hawkins and Blakeslee, 2004]. Jetant un pont entre réseaux bayésiens, réseaux de neurones et chaînes markoviennes, il est constitué d'une hiérarchie de séquences anticipatives imitant la structure et le fonctionnement du néocortex humain. Reconnaissant une relative symétrie entre toutes les modalités sensorielles et motrices, la mémoire

hiérarchique temporelle (HTM en anglais) construit des concepts de plus en plus abstraits et globaux par combinaison de régularités locales (figure 2.10). Elle permet ainsi un apprentissage et une exploitation simultanés et continus des connaissances dans une optique constructiviste.

Des propriétés de généralisation, de résistance au bruit, d'anticipation, d'attention, de mémorisation ou encore de stabilité croissante des concepts résultent de principes pourtant simples et d'une structure fractale. Dans une dynamique d'ingénierie et de diffusion rapide des recherches, l'approche a jusqu'à présent été essentiellement appliquée à la reconnaissance via la librairie NuPIC. De nombreux algorithmes d'optimisation ont également été introduits pour autoriser un fonctionnement temps réel. Bien que l'activité de l'agent soit encore peu représentée et que des applications interactives ne sont pas immédiatement envisageables, le développement de ce modèle semble très prometteur.

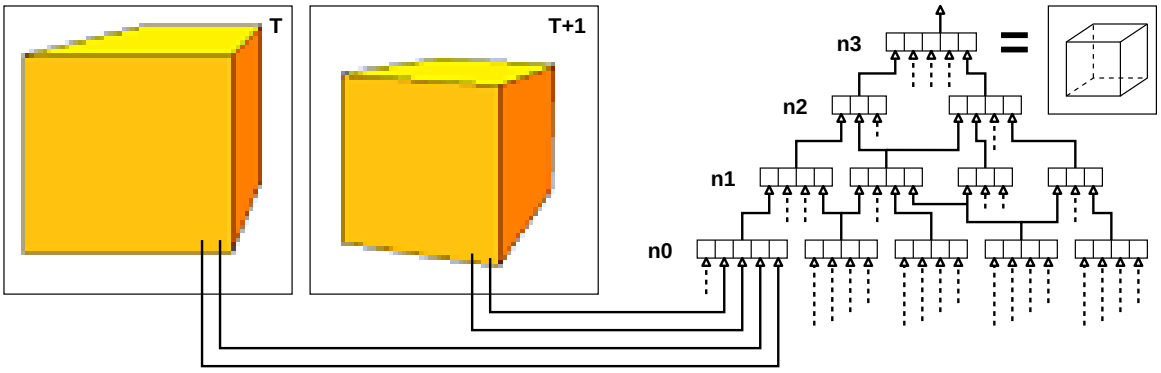


FIGURE 2.10 – De régularités locales très simples, le modèle de mémoire hiérarchique temporelle construit des abstractions graduelles. Ainsi des éléments colorés se déplaçant de pixel en pixel sur une image fournie en entrée (*niveau 0*) peuvent être agrégés en contours souples (*n1*), formes géométriques tridimensionnelles (*n2*) et finalement en concept d'objet stable malgré les rotations et autres déformations (*n3*).

2.3.4 Schémas piagétiens

Pour finir cette revue des différents types d'approches de modélisation de la cognition, les schémas sensori-moteurs piagétiens, déjà inclus ou cités dans les principales approches intégratives pour l'apprentissage bas-niveau et les interactions directes avec l'environnement, ont eux aussi eu droit à plusieurs implémentations.

Celle de Gary L. Drescher a certainement le plus marqué les esprits [Drescher, 1991]. On retrouve dans son travail de nombreux phénomènes décrits par Piaget tels que la structuration de l'espace durant le développement, l'assimilation réciproque ou le chaînage progressif de différents schémas pour atteindre des buts. La fin de son ouvrage fournit des ouvertures sur une possible version électronique de ses programmes bien plus performante, mais sa thèse n'a malheureusement pas connue de suite directe. L'environnement est donc resté très simpliste, les symboles omniprésents et l'anticipation une propriété annexe.

Malgré tout, même occultés par d'autres techniques d'intelligence artificielle en vogue, les modèles piagétiens sont toujours présents sur la scène scientifique. Ainsi Georgi Stojanov a développé une plateforme nommée Petitagé [Stojanov, 2001], hiérarchisant les schémas sensorimoteurs et mettant en relief l'émergence de concepts. Filipo Studzinski Perotto avec qui j'ai eu l'occasion de travailler durant ma thèse a également conçu et implémenté CALM (Constructivist Anticipatory Learning Mechanism), permettant à un agent de structurer et comprendre les régularités d'un environnement inconnu relativement à ses propres senseurs et actuateurs, tout en satisfaisant ses besoins pour se maintenir en vie [Perotto *et al.*, 2007]. Dans son modèle, l'activité pousse l'agent à toujours davantage explorer et par là même spécialiser ou généraliser ses connaissances (interactives et anticipatives).

3

Conflit substance/processus

Sommaire

3.1 D'un perpétuel problème à un perpétuel conflit 38
3.1.1 Problèmes inhérents aux substances et symboles 38
3.1.2 Dualité et évolution des sciences 40
3.2 Théories à base de processus 41
3.2.1 Émergence et auto-organisation 41
3.2.2 Normativité 41
3.2.3 Continuité et relativité 43
3.2.4 Relation aux systèmes dynamiques 44

Introduction

Avant de rentrer davantage dans les détails, il semble primordial d'insister sur le cadre très large dans lequel s'insère cette thèse. Si les sections suivantes traitent de processus, d'interactions et de dynamique, celle-ci s'attache à synthétiser les oppositions fondamentales qui existent entre substances et processus. Il ne s'agit pas ici d'un souci de modélisation ou de simplicité, mais d'une réelle question de fond qui peut entraver la compréhension de la thèse. Le piège revient régulièrement et demeure très tentant, notre vie quotidienne étant faite d'objets discrets, de catégories et d'actions/lieux différenciés. S'attacher à un arbre comme entité isolée peut néanmoins nous cacher la forêt, en masquant tout l'écosystème qui régit sa croissance et apporte les nutriments nécessaires à son existence. L'arbre est somme toute partiellement définit par son environnement et les relations qu'il y entretient.

L'approche adoptée ici est naturaliste. Le terme est à prendre ici dans son acception philosophique originale, c'est-à-dire un monisme excluant le surnaturel et le non causal. En pratique et moins formellement, c'est une plongée infinie pour tenter d'expliquer tous les phénomènes. Un tel travail n'est certainement jamais achevé, s'accomplit au cours de milliers d'années de recherche scientifique, mais ne doit jamais être limité par des barrières culturelles ou sociales. Cette plongée est bidirectionnelle, autant vers l'infiniment grand que l'infiniment petit, aussi bien temporelle que spatiale ; elle pousse à aller toujours plus loin, fractionner les atomes en nucléons, décomposer les baryons en quarks, étudier la nucléosynthèse suivant le Big-Bang. Plus généralement, elle conduit à l'étude de phénomènes qui échappent à notre perception directe, et

surtout rejette les a priori ou évidences qui retiennent l'investigation et nous facilitent pourtant tellement la vie quelques fois. Cette approche est similaire à la volonté initiale de la majorité des philosophies, tel l'exprime Maurice Merleau-Ponty : "La difficulté n'était pas seulement de détruire le préjugé de l'extérieur, comme toutes les philosophies invitent le commençant à le faire" [Merleau-Ponty, 1945] p.84.

Les paragraphes ci-dessous tirent quantité d'exemples de la physique, car non seulement c'est un des domaines les plus cités quand il s'agit de dynamique et de substance, mais aussi parce qu'il illustre parfaitement et visuellement la plupart des problèmes abordés. C'est aussi un domaine qui a connu maintes tensions et oppositions au cours de l'histoire des sciences et sur lequel on dispose d'une trace assez précise des courants de pensée remontant à l'Antiquité.

3.1 D'un perpétuel problème à un perpétuel conflit

3.1.1 Problèmes inhérents aux substances et symboles

Pour poursuivre la métaphore de l'introduction et développer un exemple précis, l'arbre seulement décrit comme un amas de molécules est défini comme un simple agencement spatial d'éléments plus primitifs. Pour que cet éclatement soit moins violent on pourra le considérer de façon intermédiaire comme la composition organisée de fleurs, de feuilles, de branches, d'un tronc, de racines... Si l'on remonte à l'époque des Grecs et des théories d'Empédocle, la matière devait être formée de quatre éléments primitifs : l'eau, l'air, la terre et le feu. L'arbre sortant du sol et poussant au soleil devait comporter de la terre et du feu. Lors d'un incendie, le feu était libéré et les cendres correspondaient à la terre résiduelle. Malgré des efforts intelligents pour expliquer quantité de phénomènes physiques, tel que la flottaison du bois sur l'eau ou bien la combustion en termes de proportions et de propriétés des éléments constitutifs, des incohérences apparaissaient vite vu la faible liberté offerte par une base réduite à quatre éléments [Bickhard, 2003].

Par la suite, la matière fut décomposée en atomes, grains indivisibles, pour là aussi autoriser la stabilité et conservation à travers le temps de propriétés. Ce fut initialement une simple intuition défendue par des philosophes grecs tels que Leucippe, Démocrite ou Epicure, mais dont l'apparente réalité s'est confirmée au fil des siècles. Néanmoins en 1897, un physicien anglais du nom de Thomson découvre l'électron et décompose pour la première fois l'atome en éléments fondamentaux plus petits. L'atome n'était donc plus indivisible comme le laisse supposer sa définition et étymologie. Cette course à l'infiniment petit se poursuit jusqu'à maintenant, par exemple lors de l'introduction des fermions. Dans tous les cas, il reste nécessaire d'inclure des forces d'interaction pour que ces atomes fassent quelque chose. Ainsi la gravitation ou l'électromagnétisme sont désormais expliqués dans le modèle dit standard de la théorie quantique des champs par la présence de particules de champ, communément appelées bosons. Certaines de ces particules sont d'ailleurs surnommées médiateurs à cause de leur rôle relationnel extrêmement bref. Il subsiste de nombreux problèmes et quantité de paramètres, et les modèles théoriques continueront de se développer [17].

Le point essentiel de ce paragraphe est qu'à aucun moment les substances primitives n'expliquent fondamentalement un quelconque phénomène ou ne permettent l'apparition de nou-

17. D'autres théories telles la théorie des cordes tentent en contrepartie d'introduire les notions d'interaction et d'espace aux niveaux les plus profonds, évitant ainsi le paradoxe de l'apparition de notions spatiales dans un monde ponctuel [Greene, 2000]

veauté. Les propriétés de la matière dérivent de celles de ses composantes. Même lorsqu'il s'agit de relations spatiales, celles-ci restent à expliquer en termes de propriétés ou d'éléments particuliers spécifiquement créés pour jouer ce rôle de liant : les gravitons pour l'attraction gravitationnelle ou bien les photons pour les forces électromagnétiques. Les problèmes inhérents aux intuitions grecques restent entiers, même si les modèles discrets actuels modélisent l'essentiel des phénomènes physiques, rien n'a réellement changé sur le fond si on reste avec un modèle strict de substances.

Ces barrières théoriques peuvent se généraliser à toute description fondée sur une liste de propriétés. En effet, il faut toujours un homoncule pour interpréter le système et faire agir les éléments entre eux. Les substances sont par définition inertes sans les forces qui les unissent, qu'elles soient physiques ou issues de l'esprit d'un concepteur humain ou même divin. Les interactions dans le système peuvent bien sûr être décrites : si c'est dynamiquement et que l'importance des processus devient première, les substances deviennent marginales et somme toute inutiles. Si à l'inverse on les décrit avec de nouveaux atomes constitutifs, le problème est juste repoussé à un niveau d'organisation inférieur. L'histoire des sciences montre aussi qu'une phase de découverte massive de nouveaux éléments constitutifs (tels les atomes de la table périodique de Mendeleiev) est souvent suivie d'une réduction de la diversité par des propriétés plus fondamentales (couches électroniques et phénomènes d'interférence entre électrons).

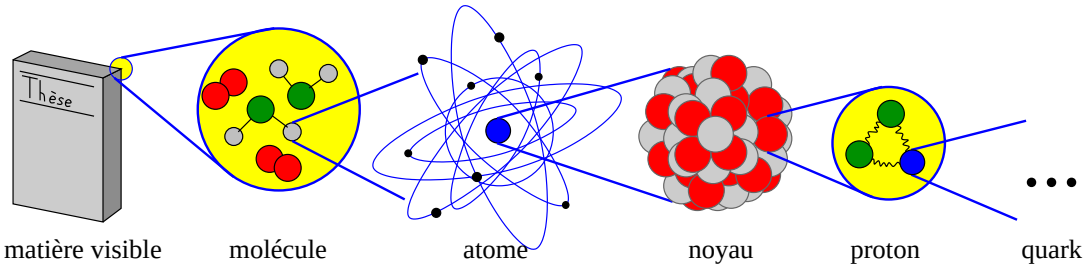


FIGURE 3.1 – Décomposition de la matière, faite de molécules composées d'atomes. Chaque atome comporte des électrons et un noyau, lui même composé de protons et de neutrons. A son tour, le proton peut être découpé en up et down quarks. Présentée de manière synthétique, cette descente vers l'infiniment petit semble interminable...

De plus, la liste de traits à produire pour un objet donné doit être exhaustive, provenant directement d'une combinaison des traits de ses constituants. Hélas, les propriétés à prendre en compte dépendent du contexte dans lequel cet objet doit évoluer. Ce qui suppose qu'aucune réelle nouveauté ne peut être rencontrée, sans quoi la situation ne pourrait être exprimée dans le lexique limité des propriétés existantes. Pour donner un aperçu de cette irréductibilité hors de la physique, voici une citation du biologiste chilien Humberto Maturana, reprise d'un article de John Stewart [Stewart, 2005] :

> *"Je pouvais énumérer des traits des systèmes vivants, tels que la reproduction, l'hérédité, l'irritabilité, la croissance, et ainsi de suite ; mais jusqu'où devait-on continuer la liste ? Comment pourrait-on savoir si elle était complète ? Afin de savoir quand la liste serait complète il me fallait savoir ce qu'était un organisme vivant, ce qui me ramenait à la même question qui avait motivé l'élaboration de la liste. Je pourrais parler de l'adaptation et de l'évolution, du développement et de la différenciation, et montrer comment tous ces phénomènes étaient interconnectés par le phénomène de la sélection naturelle ; mais la question "Quel est le trait invariant des systèmes*

vivants autour duquel la sélection naturelle opère ?" restait sans réponse. Chacune de ces tentatives me ramenait au point de départ".

De même dans le champ d'application du traitement automatique du langage naturel, les syntaxes avec structures de traits et unification, dans le cas d'une grammaire lexicale fonctionnelle par exemple, ne permettent pas de produire de nouvelles briques de base sans l'intervention d'un expert qui modifie la grammaire. Plus généralement et pour aborder un autre obstacle à l'apprentissage et à l'émergence, un symbole n'a aucune signification sans un interprète (le terme utilisé dans la littérature est homoncule). Les symboles ne se combinent à partir de règles formelles (telle que l'unification) qu'en fonction de leur forme/structure arbitraire. Leur articulation est donc syntaxique et non sémantique. Le gouffre entre les notions de représentant et représenté illustre bien le problème, et dans un tel cadre symboliste, il est difficile d'échapper au "Symbol grounding problem" comme formulé par Stevan Harnad en 1990 [Harnad, 1990]. L'argument est quasiment le même que celui que proposait Searle quelques années plus tôt avec l'expérience de pensée de la chambre chinoise [Searle, 1980].

3.1.2 Dualité et évolution des sciences

Pour illustrer davantage les évolutions qu'ont connues nombre de sciences en termes de substances et processus, ces paragraphes présentent quelques unes des tensions, parfois millénaires, qui ont vu le jour en physique. Leurs équivalents en philosophie, dont la dualité du corps et de l'esprit, de la matière et de l'ether, de même qu'en psychologie ou biologie ne sont pas repris ici car déjà vaguement abordées dans le premier chapitre.

Trop d'incohérences lors de la fusion de deux systèmes scientifiques ont souvent amené une hypothèse de dualité. Dans cette optique, les systèmes sont supposés de nature fondamentalement différente, il n'y a donc pas de lien possible entre eux et la recherche de toute explication quand aux origines d'une telle distinction devient inutile, sauf en invoquant une génération spontanée ou une différenciation immédiate. Des exemples de dualité parsèment l'histoire de la physique, mais les plus connues restent la dualité entre les natures ondulatoire et corpusculaire de la lumière, et celle entre la matière et l'énergie.

Nous avons déjà eu un premier aperçu des substances invoquées du temps de la Grèce ancienne. Le feu était au départ considéré comme un élément fondamental de la matière, et cette croyance/théorie était encore reconnue par les alchimistes et chimistes jusqu'au XVII$^{\text{ème}}$ siècle [18]. A cette époque, Johann Joachim Becher introduisit 2 formes additionnelles de Terre en remplacement de l'air et du feu. L'une des deux, la terra pinguis, plus tard nommée phlogiston, devait expliquer les propriétés des matériaux inflammables. Plus tard, Antoine Laurent Lavoisier développa la théorie du calorique, substance sensée expliquer la chaleur. Le feu comme substance disparu alors mais le problème fut transféré à la chaleur jusqu'à ce que les travaux cumulés du comte de Rumford [Thomson, 1798], de James Prescott Joule et de Rudolf Clausius permirent d'intégrer la chaleur comme simple énergie cinétique des molécules dans la thermodynamique moderne. La substance initiale fut donc progressivement expliquée en termes d'énergie et d'interactions entre d'autres éléments constitutifs de la matière.

Les lois de la physique liant la matière et l'énergie ont plus généralement été étendues et unifiées. Pour Aristote, le comportement des objets dépend du contexte, plaçant ainsi une barrière

18. Les deux "domaines" étaient relativement confondus jusqu'à la publication de "The Sceptical Chymist or Chymico-Physical Doubts & Paradoxes" par Robert Boyle en 1661

entre des lieux proches, alors que la loi universelle de la gravitation d'Isaac Newton s'applique partout. Là où la relativité restreinte impose une invariance des lois relativement à la vitesse, la relativité générale introduit une invariance selon l'accélération. Encore aujourd'hui, de nombreux chercheurs tentent de dissoudre l'incompatibilité des lois quantiques avec la relativité générale. De tout temps, l'introduction d'une substance ou d'une valeur absolue ne résultant pas d'interactions a tôt ou tard conduit à un conflit et une réfutation. Bien qu'elles restent pratiques et nécessaires pour modéliser les phénomènes à une échelle donnée, les substances ne doivent jamais être conçues comme une réduction définitive. Le modèle de Bohr permet ainsi d'expliquer bien des phénomènes, mais la petite boule en rotation autour du noyau est très éloignée de l'onde électronique introduite par Shrödinger ou des modèles quantiques probabilistes actuels.

3.2 Théories à base de processus

Une substance pouvant être modélisée par un processus en équilibre, on n'a rien à perdre à basculer vers une théorie à base de processus. Si ce n'est pour avoir la joie de changer de paradigme, voyons ce que l'on a néanmoins à y gagner.

3.2.1 Émergence et auto-organisation

Contrairement à des atomes statiques, des processus peuvent s'influencer mutuellement et en être profondément modifiés. Quoique la nature de leurs interactions puisse être simple, le phénomène résultant de leur couplage peut être stable et novateur, on parle alors d'émergence. On parle d'auto-organisation si les processus entretiennent alors des relations structurées. Il n'est jamais besoin ni possible de connaître les propriétés émergentes au niveau des processus composants, car ceux-ci ne peuvent qu'interagir localement et n'ont pas la vue globale sur le système que peut avoir un observateur au niveau émergent.

Dans ce cadre, Christiaan Huygens étudia le couplage de 2 pendules apparemment indépendants après avoir observé la synchronisation d'horloges suspendues à un même mur en 1665 [Bennett *et al.*, 2001]. Alors qu'un simple choc est transmis par le mur lorsqu'un pendule atteint une position extrême, celui-ci suffit à quasi-irrémédiablement conduire à la synchronisation des horloges. Celle-ci peut se faire en phase ou en antiphase (par une évolution similaire à celle décrite dans la section systèmes dynamiques du chapitre sur les théories), mais les deux horloges adoptent de plus la fréquence moyenne de leurs fréquences propres (si elles ne sont pas trop différentes). De telles propriétés émergent du couplage et ne sont en aucun cas inscrites dans la mécanique de l'un ou de l'autre, ni dans les lois de propagation d'une onde dans un solide. Davantage de détails sur le couplage d'oscillateurs sont fournis dans l'annexe dédiée nommée *Oscillateurs couplés et synchronisation.*

3.2.2 Normativité

La normativité, c'est-à-dire dans le cas qui nous intéresse la capacité du système à détecter ses propres erreurs, ne découle pas directement d'une métaphysique de processus. Néanmoins si on ajoute aux processus temporels la notion d'anticipation, ceux-ci peuvent facilement acquérir cette propriété intéressante. En effet si un individu a la capacité d'interagir avec son environnement en y effectuant des actions et en en prédisant les conséquences, trois situations extrêmes peuvent se produire :

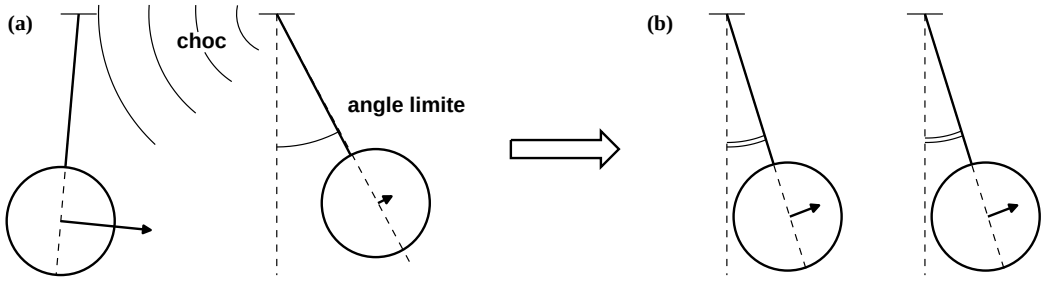


FIGURE 3.2 – Les deux oscillateurs représentés (ici des pendules d'horloge) sont couplés par les chocs transmis via le mur qui les supporte. Au départ asynchrones (a), les deux pendules finissent en phase (b) ou antiphase (*non représenté*). Les deux pendules ont ici les mêmes dimensions et donc la même période propre, mais le même phénomène se produit si les pendules ont une longueur légèrement différente.

- Si les actions sont effectuées et que l'anticipation est satisfaite, le comportement de l'agent était adapté à l'environnement et sa connaissance [19] est vérifiée.
- Si les actions sont effectuées mais que l'anticipation est contrariée, c'est qu'un élément quelconque participant dans la dynamique n'était pas adapté. L'infirmation ne permet pas de savoir lequel, mais la connaissance s'est avérée incorrecte et doit être révisée.
- Enfin si le contexte ou la dynamique interne de l'agent font que les actions ne peuvent pas être effectuées, quelle que soit la situation résultante, l'anticipation ne pourra pas être considérée comme vérifiée, mais ne remettra pas en question la connaissance de l'individu.

Une supervision ou un observateur humain ne sont donc pas nécessaires pour fournir les clés du problème ou interpréter les résultats, les interactions permettent un contact épistémique direct avec la situation. La validation des connaissances de l'agent par interactions avec l'environnement évitent ainsi le dramatique mais néanmoins classique "frame problem" [McCarthy and Hayes, 1969]. En effet, l'environnement (la "frame") n'est pas supposé immuable et indépendant mais dynamique et couplé à la dynamique de l'agent.

Pour fournir une analogie dans des domaines opposés, le code d'un programme informatique ne fait rien en soi. Malgré toute l'intelligence requise pour produire la série de caractères qui le composent, seul le flot d'instructions exécuté par l'ordinateur effectue quelque chose au sein d'un processus interactif. De façon extrême, lorsqu'une interface homme-machine est lancée, l'adaptation du programme dépend de la présence d'êtres humains, que le programme soit bogué ou non. Seule l'exécution ou l'interprétation permettent donc le contact avec l'environnement. Alors qu'on pourrait l'imaginer aux antipodes d'un code informatique, le code génétique repose lui aussi sur une interprétation. Sans la présence d'ARN pour la transcrire en protéines actives dans le milieu interne de l'individu, l'ADN n'est qu'une chaîne passive de molécules, aussi passionnante qu'une ligne de code gravée dans la pierre.

19. Étant donné que l'agent construit ses prédictions et comportements par interactions avec son environnement et sans formalisation aucune, on devrait plutôt parler de croyance.

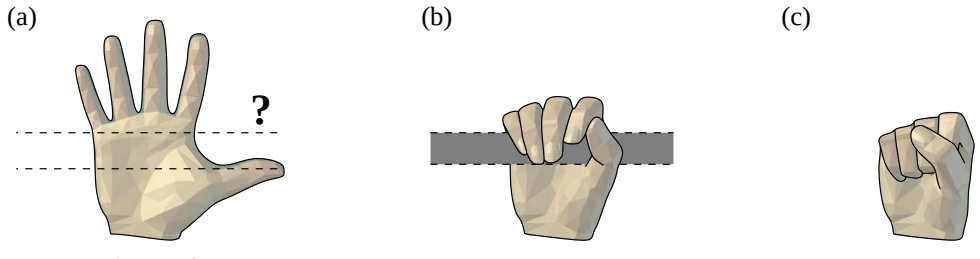


FIGURE 3.3 – Ce schéma illustre la normativité des interactions par un comportement de préhension. Si la main est initialement ouverte (a) et l'objet présent, on atteint tôt ou tard la situation (b) et l'anticipation du contact et de la résistance de l'objet est vérifiée. Si la main était initialement vide (a), l'objet ne sera pas rencontré (malgré une possible illusion visuelle de l'objet) (c) : l'interaction était erronée. Enfin si la main était déjà totalement fermée (c), la serrer davantage pour attraper un objet est tout simplement inadapté.

3.2.3 Continuité et relativité

Comme l'indiquait déjà les réflexions de Hume dans sa théorie des agrégats [20], il semble impossible de produire du continu à partir du discret. En effet, si la construction mathématique de $\mathbb{R}$ (ensemble des réels) se fait à partir de $\mathbb{N}$ (ensemble des entiers naturels), c'est que ce dernier porte déjà en lui la notion d'infinité (par sa propre construction et son cardinal $\aleph_0$). En revanche, pour un substrat physique constitué d'un nombre fini de particules élémentaires, le nombre de combinaisons et donc de représentations possibles avec une complexité maximale donnée est donc limité. A l'inverse, le discret peut être facilement approximé par le continu (figure 3.4).

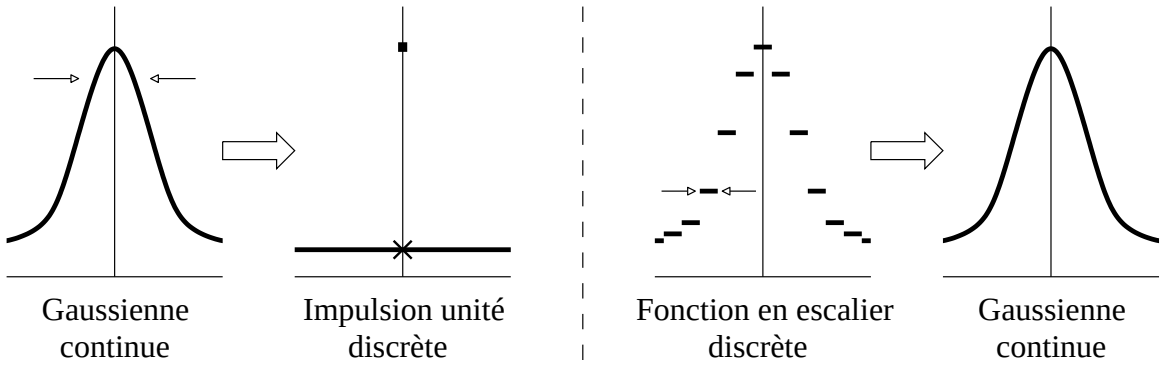


FIGURE 3.4 – (a) L'impulsion unité δ_0 (symbole de Kronecker dans $\mathbb{N}$) est la limite d'une série de gaussiennes, dont on fait simplement varier un paramètre. (b) On peut de même approximer une gaussienne par une fonction en escalier discrète, mais une précision supérieure requiert un nombre croissant d'éléments discrets. Ce schéma ne répond bien sûr pas à la question de savoir si du continu ou du discret, l'un est une illusion, ni lequel.

20. Selon Hume, les objets sont fondamentalement formés d'agrégats de propriétés, sans présence d'une substance sous-jacente.

Même si la question de savoir si l'univers est fondamentalement continu ou discret est plus que jamais à l'ordre du jour, les notions relatives de distances, de précisions et d'échelles sont encore plus cruciales dans ce manuscrit. Ainsi de variations locales continues peut émerger une constante, telle la stabilité apparente des objets macroscopiques, malgré des oscillations dites "quantiques" mais s'étendant sur des distances non négligeables. Une moyenne statistique opérée sur des milliards de particules suffit en effet à l'expliquer.

D'une manière générale qui s'applique parfaitement à notre modèle, les processus rapides sont souvent locaux et ont une influence réduite aussi bien temporellement que spatialement. Des processus bien plus lents auront donc une influence relative bien plus stable, et ceux-ci apparaîtront comme des paramètres constants pour les échelles inférieures. Les notions d'objets, de catégories, de constance, de stabilité [21], sont relatives au système considéré.

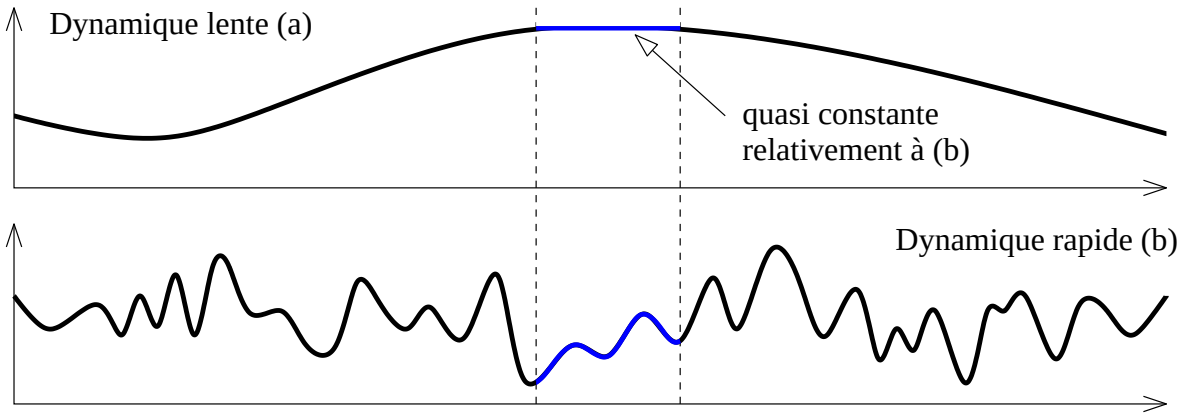


FIGURE 3.5 – Bien qu'aucune des deux fonctions ne soit constante, elles suivent des dynamiques très différentes. Aucune référence ou unité n'est fournie, puisque seule leur échelle relative compte. Pour un processus suivant la dynamique (b), l'influence d'un processus suivant la dynamique (a) est localement comparable à un paramètre constant.

3.2.4 Relation aux systèmes dynamiques

Dernier aspect mais non des moindres si le lecteur a été convaincu par la nature dynamique de la majorité des phénomènes physiques et psychologiques, comment modéliser un phénomène qui évolue dans le temps avec des substances purement statiques, sans avoir recours à des processus par définition dynamiques ! ? Le plus simple reste me semble-t-il d'utiliser des modèles dynamiques et de ponctuellement les affaiblir ou justifier d'un équilibre pour approximer les substances.

21. Et même d'intelligence si on en croit Dennett qui souligne que notre perception de celle-ci est fortement conditionnée par la compatibilité à l'échelle humaine et à sa dynamique [Dennett, 1996]

4

Évolution de la complexité des systèmes vivants

Sommaire

4.1 Systèmes dynamiques 46
4.2 Égarement loin de l'équilibre thermodynamique 49
4.3 Auto-maintien loin de l'équilibre 50
4.4 Récursivité et reproduction 52
4.5 Spéciation progressive des cellules 53
4.6 Anticipation 55
4.7 Un problème de choix : la multiplication des comportements . 57
4.8 Imprédictibilité génétique et apprentissage 59
4.9 Réflexivité des processus réflexifs 60
4.10 Génétique, expérience et culture intriquées 61

Introduction

Cette section aurait tout aussi bien pu être intitulée "du feu à l'homme, il n'y a qu'un pas", bien que ce pas de géant se soit étalé sur plusieurs milliards d'années. Est proposée ici une épopée à travers les âges et les différents niveaux d'organisation que l'on peut rencontrer dans l'évolution de la vie sur Terre. Ce travail est fortement inspiré des recherches de Mark H. Bickhard, tout du moins pour les premières étapes et malgré quelques légères divergences ou compléments intégrant des réflexions personnelles et des aspects extérieurs au cadre interactiviste. Outre le simple intérêt culturel, ce chapitre fournit les fondements sur lesquels reposent les programmes développés par la suite et les raisons d'espérer que cet axe de recherche puisse aboutir sur des applications novatrices et une meilleure compréhension du fonctionnement cognitif des êtres vivants.

Cette thèse ne porte pas sur la génétique ou la phylogenèse des espèces terrestres. Néanmoins, il semble important de préciser l'origine des principes énoncés par la suite pour mieux en saisir la stabilité et l'universalité dans le domaine du vivant. Il ne s'agit en effet pas de faire un compte-rendu exhaustif des propriétés organisatrices des êtres vivants ou de recenser les variations et points communs entre ceux-ci (si seulement c'était donné à quiconque, tant une infime variation peut provoquer des changements dramatiques de comportement). Il est plutôt

question de souligner les phénomènes que l'on retrouve aussi bien à l'échelle de l'espèce que de l'individu. Certains de ces éléments, bien qu'ils se retrouvent sous des formes profondément différentes, affichent une étonnante constance dans les différentes branches de l'évolution et à travers les âges. On insistera donc sur les principes communs malgré des modes de fonctionnement et d'organisation bien différenciés, et non sur des distinctions évidentes telle qu'une opposition microscopique/macroscopique.

Bien que les schismes entre certains domaines soient justifiés par les insurmontables différences d'échelle et d'influence qu'ont les phénomènes étudiés, cette section tente de dégager les principes communs plutôt que d'insister sur les différences néanmoins flagrantes. A travers les différents champs d'étude et même si les descriptions et lexiques utilisés n'ont rien à voir, de nombreux paradigmes s'accordent sur leurs principes fondamentaux. Ceux-ci sont tantôt explicitement analysés, supposés ou carrément éludés. Malgré la complexité apparente et les formes variées que peuvent prendre ces principes, leur action continue se retrouve du simple équilibre physique aux psychés et sociétés humaines.

Les sections suivantes présentent les principales étapes qui peuvent expliquer l'apparition et l'évolution de la vie. Le problème de l'origine de la vie sur Terre ou non n'est pas abordé, car les premiers principes très généraux et basculements décrits se retrouvent partout dans l'univers. Ils ne sont que peu contraints par les conditions idéales qui ont pu régner sur Terre ou la différenciation climatique progressive de l'environnement qui a permis le coavènement de quantité de niches écologiques et la spéciation des espèces. Néanmoins ces circonstances ont très certainement favorisé les bouffées d'évolutions qui se sont produites par la suite.

La progression suit la chronologie bien que certains êtres vivants aient pu arrêter leur évolution à certaines des étapes décrites ci-dessous. En effet on retrouve encore aujourd'hui l'intégralité des organisations et fonctionnalités décrites. Il n'empêche que chaque pas dans cette spécialisation croissante présuppose et requiert les précédents. Le terme spécialisation est utilisé bien qu'inadéquat car il est difficile de parler de complexification ou d'adaptation, les archaea (archéobactéries) ou requins ne peuvent être considérés comme inadaptés à leur environnement propre alors que leur évolution a quasiment cessé bien avant que notre famille fasse son apparition sur Terre.

Bien que les sections du texte soient discrètes par nature, il faut insister sur la continuité entre les étapes introduites. Sans entrer dans les débats du déterminisme ou de l'aléatoire dans l'évolution néodarwinienne et quelle que soit l'approche choisie, un être humain actuel n'a pu apparaître sans ADN, mais chaque composant des êtres vivants ont pu continuer à évoluer en continu. Dans l'optique où la Terre aurait connu des équilibres ponctués séparés par des bouffées de spéciation et d'extinction comme le postule Stephen J. Gould [Gould and Eldredge, 1977], l'évolution individuelle n'en resterait pas moins continue. D'ailleurs si l'on en croit Jean Piaget ou Esther Thelen, ces deux aspects de continuité peuvent se mettre en perspective de la même manière pour le développement cognitif d'un enfant, qui semble s'effectuer par paliers stables et incrémentaux si on l'observe de loin, mais devient beaucoup plus chaotique si on s'intéresse au processus individuels. Il faut donc garder à l'esprit que les frontières entre les sections suivantes sont floues et ne marquent qu'arbitrairement des transitions majeures.

4.1 Systèmes dynamiques

Bien que la notion de système couvre bien des domaines et a des sens très variables (confère la partie théorique), on la prendra ici comme un ensemble des processus précédemment décrits qui

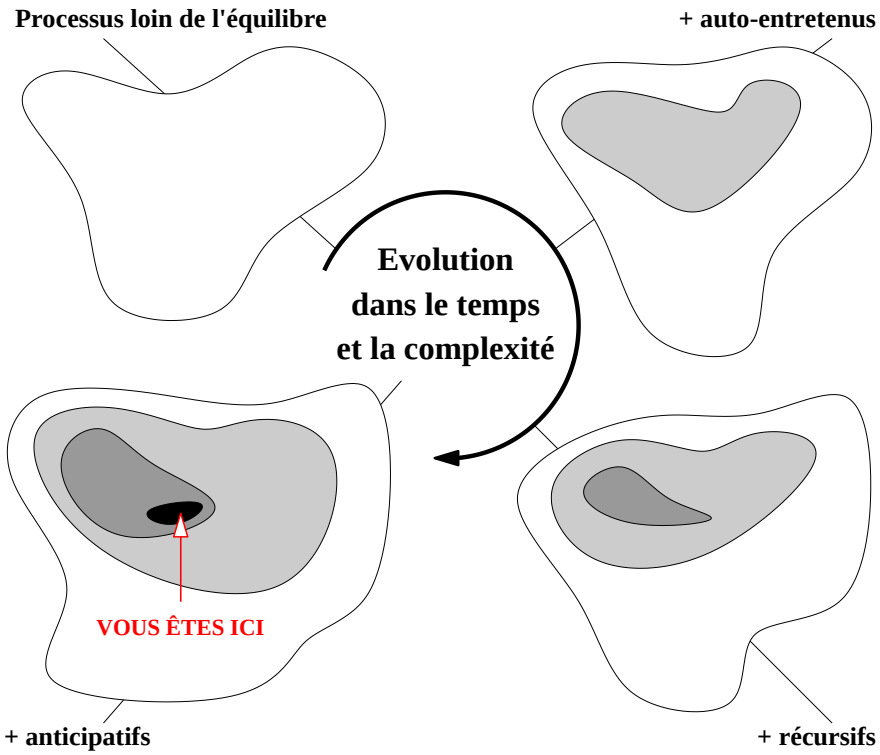


FIGURE 4.1 – Quelques étapes principales de l'évolution dans le cadre interactiviste. L'espace de la feuille représente l'ensemble des processus dynamique. Chaque sous-ensemble peut s'étendre puisqu'il correspond davantage à des combinaisons, possibilités ou évolutions qu'à une quantité de matière donnée ou un volume particulier. 1) Comme tous processus, ceux-ci peuvent apparaître et disparaître, et leur passage loin de l'équilibre peut être plus ou moins long. 2) Ces processus maintiennent une fonction non spontanée par leurs interactions avec l'environnement. 3) Ceux-ci peuvent se répliquer avec ou sans différenciation. 4) Les processus peuvent progressivement anticiper l'évolution de leur environnement pour un meilleur maintien de leurs "fonctions vitales". En particulier, on peut considérer que l'humanité comme ensemble d'êtres vivants et pensants est incluse dans ce sous-ensemble.

forment une unité. Cette unité est généralement fonctionnelle et peut aller du simple phénomène physique à une société humaine en passant par la plante. Il n'y a donc pas de contrainte sur la complexité ou les dimensions de ce système.

Les étendues temporelles et spatiales du système sont corrélées, un atome de l'ordre de l'angström présente des oscillations de très hautes fréquences alors que les principaux cycles climatiques de la planète (ponctués par des aires glaciaires) s'étudient sur des millénaires. De même dans le règne animal, pour un même schéma de fonctionnement si on considère les mammifères, les espèces de petite taille ont généralement un cœur qui bat plus vite, une durée de vie plus courte et des mouvements plus rapides.

Selon l'échelle utilisée pour étudier un système donné, aussi bien temporelle que spatiale, celui-ci peut se présenter de manière totalement différente. Dans la théorie des systèmes complexes, des chercheurs tels que Scott Kelso recommandent néanmoins de se concentrer sur un niveau d'analyse particulier afin de ne pas noyer les principes généraux que l'on cherche à prou-

ver dans une marée de variations locales qui n'affectent que très peu le phénomène global : on parle alors de couplage faible entre ces différents niveaux [Kelso, 2006; Moreno, 2000]. Jeff Hawkins dans son projet de modélisation du neo-cortex comme HTM (Hierarchical Temporal Memory) indique que les séquences correspondant à des concepts de haut niveau, constitués à partir de motifs plus localisés des niveaux inférieurs affichent aussi une plus grande stabilité. Ainsi une perturbation perceptive dans les niveaux les plus bas affectera rarement les niveaux abstraits [Hawkins and Blakeslee, 2004]. Des variations locales ne sont donc pas incompatibles avec l'émergence de propriétés stables, telles que le nombre de membres pour une espèce donnée lors de l'embryogenèse ou les capacités de base d'un adulte dans le développement cognitif [Thelen and Smith, 1994].

Ce découpage en niveaux est loin d'être trivial et malheureusement souvent nécessaire. En particulier si le phénomène étudié est émergent, ses fonctionnalités et propriétés dérivent indirectement des processus constitutifs. Elles ne peuvent être intuitivement déduites et il est souvent nécessaire de modéliser ceux-ci pour reproduire et comprendre le phénomène en question. C'est pourquoi si on désire étudier un système hautement complexe et inconnu tel que l'esprit humain, le modéliser par quelques propriétés s'avère insuffisant et il est difficile de savoir ou s'arrêter lors de la descente à travers les niveaux d'émergence. L'exemple d'un tel dilemme, relativement polémique, est celui de la conscience. Bien que celle-ci ait été évincée des recherches en sciences cognitives pendant des années, on s'y intéresse désormais de plus en plus [Colombetti, 2008]. Lorsqu'on cherche à la localiser, et même si de nombreuses théories l'imaginent plus comme un phénomène émergent que comme une substance ou propriété, elle s'étend des paquets d'ondes quantiques au niveau subatomique [Penrose, 1989] aux aires cérébrales contenant des millions de neurones [Prinz, 2005a; Prinz, 2005b]. Quand bien même, elle pourrait aussi partiellement provenir d'interactions dans une société ou un écosystème.

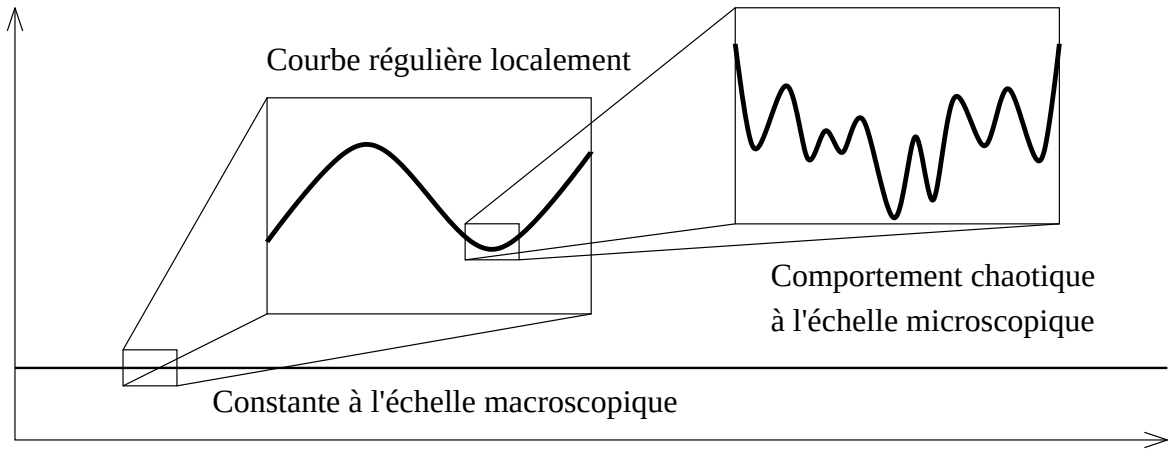


FIGURE 4.2 – Les courbes représentées pouvant aussi bien concerner des phénomènes spatio-temporels que purement spatiaux, la nature des axes n'est pas indiquée sur la figure. On remarque que des phénomènes stables au niveau macroscopique, deviennent variables puis chaotiques à des échelles plus petites. La succession régulière des ères glacières relativement aux variations locales de climat suivent de telles dynamiques, de même que la majorité des lois physiques. Il est donc primordial de choisir un niveau d'étude adapté au phénomène étudié.

Dans tous les cas, tous les processus étudiés ont une certaine étendue et sont inscrits dans

un environnement qui leur est propre. Même en supposant la réalité et l'unicité de l'environnement [22], il n'empêche qu'un individu n'interagit que localement avec le monde qu'il perçoit et n'en a qu'une perception subjective. La constitution et l'intégration d'un être vivant dans un écosystème passent par un couplage fort avec son environnement. En adoptant une approche énactive de la vie et de la cognition, il y a coavènement de l'individu et de son environnement relatif à travers un processus temporel plus ou moins long. Cela signifie que l'individu ne peut être défini isolément par des propriétés qui lui seraient exclusivement caractéristiques, de même que l'environnement qu'il perçoit comme objectif dépend fortement de sa propre nature. On peut dresser un parallèle avec l'assimilation réciproque de Piaget, où deux schémas sensori-moteurs s'assimilent l'un l'autre tout en s'influençant continuellement. De même, tant que les systèmes dynamiques concernés sont de natures similaires, on remarque une tendance au couplage via des influences mutuelles, quelle que soit la nature de l'interaction. En particulier et comme il en a été discuté dans le chapitre sur les processus, on observe une synchronisation des processus temporels, que l'on parle d'oscillations d'atomes, de décharges de neurones [Engel and König, 1993; Engel *et al.*, 2001; Tomabechi and Kitano, 1989; Dehaene *et al.*, 2006], de mouvement des membres ou de physiologie des êtres vivants [Kelso, 1995]

4.2 Égarement loin de l'équilibre thermodynamique

Malgré leur nom barbare, les systèmes dynamiques loin de l'équilibre thermodynamique sont loin d'être anecdotiques. Ils sont omniprésents dans notre univers, de notre environnement macroscopique quotidien jusqu'au vide intersidéral potentiellement au niveau quantique. Pour rendre la discussion plus concrète, on peut imaginer une explosion qui, associée à une combustion, provoque une augmentation de température autour de sa source par une agitation moléculaire élevée et entraîne une propagation rapide de chaleur. En utilisant la métaphore d'un être vivant, on peut considérer que l'explosion est adaptée à son environnement tant que les nutriments sont présents là où les réactions prennent place. Ces nutriments incluent par exemple un matériau à l'origine de l'explosion ou l'air nécessaire à la combustion.

Néanmoins la métaphore est difficile à tenir tant les échelles de durée sont différentes des processus habituels de vie et de morts des êtres vivants qui nous entourent. Même si la raison profonde de cette différence sera expliquée dans la section suivante, on remarque qu'une caractéristique essentielle d'un tel phénomène est sa brièveté. En effet, qu'il s'agisse d'une explosion de pétard ou d'une supernova, un tel processus reste éphémère relativement aux dimensions du système. Le système n'entretient pas de relation stable et durable avec son environnement, consommant à chaque instant par des réactions en chaîne le maximum des apports disponibles. De plus, le système s'étend spatialement sans pour autant conserver une unité (figure 4.3).

Sans entrer dans les fondements physiques qui régissent la dynamique de l'univers, on peut simplement statuer que la nature est très juste pour répartir l'énergie. Ainsi tout système ouvert, c'est-à-dire pour lequel on définit une frontière à travers laquelle s'opèrent des interactions avec un environnement, échange aussi de l'énergie avec celui-ci. Si l'on considère un pendule oscillant, les échanges avec l'air se font par friction et conduisent à la stabilisation progressive du pendule en position verticale. On atteint ainsi un "état" ou l'énergie est équilibrée entre le pendule et son

22. On évite de rentrer dans les méandres du scepticisme récurrent à travers les époques, de Pyrrhon d'Élis à nos jours.

environnement, alors que l'énergie et donc l'activité n'ont pas variées si on considère le système constitué par le pendule et son environnement. Encore une fois, tout est donc question d'échelle et de limites du système considéré.

Par d'incessants échanges d'énergie, et par les principes des systèmes chaotiques présentés aux chapitres précédents, une instabilité ou perturbation locale peut malgré tout entraîner temporairement un déséquilibre massif. Celui-ci est néanmoins généralement et rapidement atténué à plus grande échelle, une fois les interactions moyennées sur un grand nombre de processus. C'est ainsi que la mousse quantique [23] demeure insoupçonnée au niveau macroscopique et qu'on observe uniquement des lois stables et régulières résultant de l'interaction de myriades de particules, ces lois étant pourtant constamment violées à l'échelle subatomique.

Cette hétérogénéité à l'origine de toute activité "intéressante" dans cet univers est à rapprocher du processus d'individuation physique tel que définit par Gilbert Simondon [Simondon, 1989], aussi bien applicable en sociologie, psychologie qu'embryologie. Un système dynamique se différenciant localement de l'homogénéité environnante par son activité propre, même instable et éphémère, affiche déjà une forme archaïque d'individualisation. Ce processus peut évidemment se poursuivre afin d'atteindre les organisations plus spécifiques et contraintes décrites dans les sections suivantes.

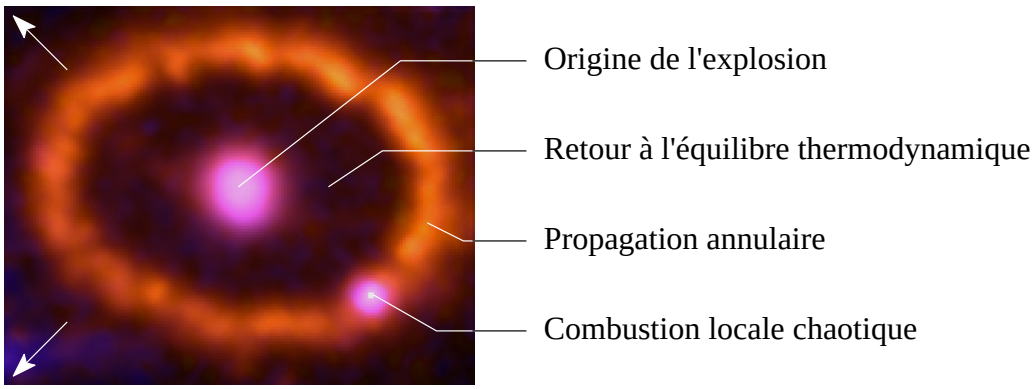


FIGURE 4.3 – Photo de la supernova 1987A distribuée par la NASA et datée du 24 septembre 1994. Celle-ci est annotée afin de mettre en évidence la propagation de l'explosion sous forme d'anneau, ainsi que le retour à l'équilibre qui s'opère à l'intérieur. Le processus perd rapidement sa structure et son unité.

4.3 Auto-maintien loin de l'équilibre

Un tel système peut être artificiellement maintenu en activité loin de l'équilibre thermodynamique par l'apport continu de réactifs et la conservation de conditions idéales. Mais seul un opérateur extérieur peut permettre une telle forme de stabilisation. En revanche la flamme d'une bougie, hormis la lenteur relative de sa combustion qui n'apporte aucun élément théorique nouveau, dispose d'un atout supplémentaire : l'autocatalyse. Grâce à la chaleur dégagée, la cire se liquéfie et monte dans la mèche par capillarité pour être consumée lentement à son sommet. Une partie de la cire absorbée part ainsi en fumée, et la combustion entretient simultanément

23. traduction littérale du terme anglais "quantum foam" introduit par John Wheeler en 1955

la fonte de la paraffine à la base de la mèche. Si la mèche devient trop longue, le combustible ne parvient plus à son sommet et la mèche est finalement brûlée. L'activité de la bougie est donc auto-entretenue, car certains de ses produits (chaleur et cire fondue), sont nécessaires à son propre fonctionnement.

De plus, et pour indiquer à quel point un système physique qui semble si primitif peut générer des régulations complexes avec son environnement, on notera que les gaz chauds produits par la flamme s'élèvent et permettent à un phénomène de convection de se mettre en place, apportant du dioxygène au niveau de la mèche en continu. La flamme peut donc être considérée comme adaptée à la "vie" sur Terre, puisqu'elle profite de lois telles que la poussée d'Archimède [24].

Le DaisyWorld est un exemple similaire de régulations complexes avec autocatalyse conduisant à une structure et dynamique stables malgré des phénomènes locaux chaotiques. Ce modèle introduit par James Lovelock et Andrew Watson [Watson and Lovelock, 1983] illustre les théories Gaïa via la simulation d'un monde hypothétique peuplé exclusivement de plantes. Plusieurs types de pâquerettes interagissent avec l'environnement, et bien qu'elles ne soient nullement conscientes d'un quelconque but à atteindre, leur population s'autorégule par un subtil jeu de rétroactions via l'environnement. L'absence de plantes entraîne un réchauffement de la surface terrestre, permettant à certaines espèces de proliférer, alors que l'abondance de plantes entraîne une absorption excessive des rayons lumineux et un refroidissement de la planète. Bien qu'il existe de nombreuses versions de ce modèle selon le nombre d'espèces et les paramètres contrôlant la dynamique de l'environnement, la température finit toujours par osciller par homéostasie entre deux valeurs extrêmes autorisant la vie des pâquerettes qui s'auto-organisent spatialement à la surface de la planète.

Le point de controverse de l'hypothèse Gaïa est la considération ou non du système global comme un système vivant. On atteint bel et bien là un stade proche de l'individuation biologique et une forme simple d'autonomie, où le système est relativement stable malgré une dépendance aux ressources de son environnement, ce qui est évidemment le cas pour n'importe quelle es-

24. La vie d'une bougie est d'ailleurs bien plus courte en apesanteur, du fait de "l'annulation" de la gravité et de certains phénomènes de mécanique des fluides

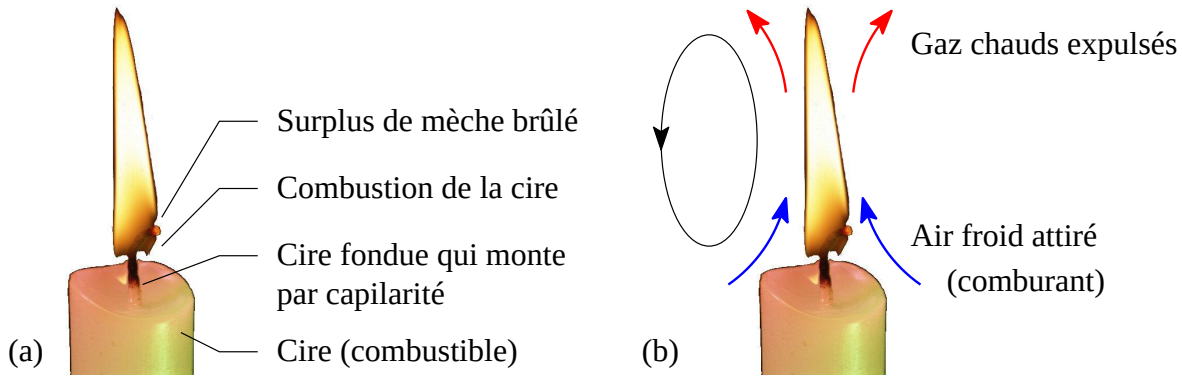


FIGURE 4.4 – Plusieurs cycles avec autocatalyse permettent d'entretenir la combustion lente de la cire. (a) Différents composants intervenant dans la dynamique de la bougie sont représentés. (b) Convection des gaz chauds produits par la bougie et de l'air frais nécessaire à la combustion de la cire fondue présente sur l'extrémité de la mèche.

pèce vivante. Nous avons également besoin de respirer, de manger et d'évoluer dans un monde "tempéré", et des variations trop brutales dans la dynamique de notre environnement nous sont généralement fatales. Cette adaptation d'un processus à un environnement reste néanmoins situationnelle et ne peut être aisément transmise ou modulée d'un système à l'autre.

4.4 Récursivité et reproduction

L'étape suivante dans notre évolution constructiviste est l'intégration des phénomènes de reproduction. Bien que cette étape soit en pratique fortement associée à la suivante, il a été choisi de la présenter en premier car elle en reste néanmoins préalable. Les phénomènes précédents peuvent éventuellement se propager ou se scinder (tel un feu de forêt), mais ne possèdent pas une organisation qu'ils peuvent transmettre (dans le cas d'objets artificiels, la structure est souvent présente, mais les bougies ne prolifèrent fort heureusement pas encore dans nos résidences). Il leur faut en effet une frontière avec l'environnement afin de délimiter le système comme une unité. Ce point est je l'avoue discutable, mais la notion même d'individu nécessite dans l'acception courante qu'on puisse le percevoir comme isolable de son environnement, même si un couplage fort reste nécessaire à sa survie.

De même que la peau fait office de frontière à l'échelle de l'organisme humain, la membrane délimite les milieux internes et externes de la cellule vivante. Afin de simplifier considérablement le problème rencontré lorsqu'on étudie une cellule réelle, même en considérant une simple membrane à phospholipides, un modèle irréductible traduisant les phénomènes de régulation et reproduction accomplis a été introduit par Varela et al. [Varela *et al.*, 1974; McMullin and Varela, 1997]. Dans la théorie de l'autopoïèse, cette cellule hypothétique et primitive, maintenant sa fonction et son organisation par la régénération de ses composants, a été nommée automate de tessélation 4.5.

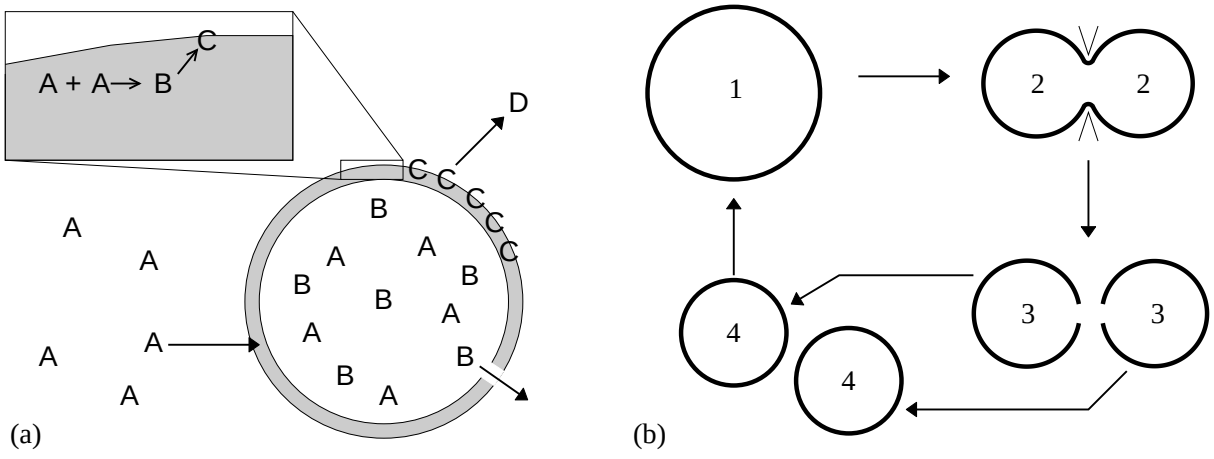


FIGURE 4.5 – (a) Ce schéma représente le principe de fonctionnement de l'automate de tessélation proposé dans [Bourgine and Stewart, 2004]. Il a simplement été reproduit et vectorisé le plus fidèlement possible afin d'améliorer l'impression. (b) Cycle de division d'un tel automate. Même si le partage doit être initié par des contraintes extérieures, la réparation de la membrane et le retour à l'équilibre sont réalisés de manière autonome.

Le fonctionnement d'un tel automate est le suivant : le nutriment A présent dans l'environnement est absorbé par la cellule en traversant sa membrane. Ce mouvement n'est pas réversible

et limité par la concentration de A dans le milieu interne. Celui-ci se transforme en B par une simple réaction qui a lieu à l'intérieur de la cellule sous des conditions particulières. Les B ainsi produits peuvent se transforment en C au contact de la membrane (il peut éventuellement s'agir d'une simple reconfiguration spatiale ou lien entre molécules). Les C sont les constituants de ladite membrane et sont donc partiellement en contact avec l'environnement qui peut potentiellement les agresser ou les arracher (passage à l'état D). Malgré un fonctionnement apparemment simpliste, des propriétés remarquables émergent :

1. La quantité de constituants A, B et C est régulée en permanence pour satisfaire des contraintes physiques. Ces contraintes, qu'il s'agissent de lois physiques [25] ou de propriétés de l'environnement local, ne sont nullement connues du système qui ne pourrait souvent exister sans elles. Le système s'est simplement développé en adéquation avec elles et régule implicitement et en permanence sa fonction ou structure pour les satisfaire.
2. Une érosion continue ou un dégât minime sur la membrane est compensé rapidement. En effet, qu'une déchirure de la membrane soit directement causée par l'environnement ou résulte d'un déséquilibre de pression local, les composants B vont être évacués vers la zone de fuite. De même que les plaquettes pour le sang, ceux-ci vont se lié à la membrane restante pour cicatriser la cellule. Néanmoins, si la blessure est trop importante, l'action des B ne sera pas assez rapide pour maintenir le fonctionnement de la cellule. Des verbes d'actions sont utilisés ici, mais il va sans dire que ces régulations ne sont pas la volonté d'un être intelligent tel qu'on l'entend communément.
3. Enfin si la cellule est pincée, celle-ci va augmenter la surface de sa membrane pour retrouver un équilibre avec son environnement d'après 1). Si on opère alors une scission, les deux déchirures résultantes vont être réparées d'après 2). On obtient ainsi deux cellules identiques entretenant la même fonction et possédant les mêmes dimensions.

Même s'il nécessite ici une intervention extérieure pour se diviser et se reproduire, ce système dispose implicitement d'un mécanisme pour produire de l'ordre dans un environnement autrement chaotique ou uniforme. Bien qu'ils affichent la plupart du temps une complexité immense, beaucoup de processus actuels de reproduction reposent sur les mêmes principes [26]. Ainsi la duplication du noyau ou la transmission de gènes lors de la mitose ou méiose chez les eucaryotes impliquent souvent une différenciation de sous-fonctions à l'intérieur même d'une seule cellule (telle l'interprétation des gènes pour produire des protéines), mais le principe fondamental de division reste le même. Ces phénomènes de composition, intégration et spécialisation des fonctions va être maintenant développée.

4.5 Spéciation progressive des cellules

Cette étape est détaillée non seulement pour introduire les origines potentielles des organismes multicellulaires mais également pour expliquer comment des processus avec des substrats et niveau d'organisation très variables peuvent interagir de façon quasi-transparente. Si l'on prend pour exemple un corps humain, les organes ou neurones communiquent par des propagations chimiques et électriques qui ne partagent pas les mêmes dynamiques. Il est alors difficile de comprendre comment des échanges parfois très complexes pourraient dériver de principes

25. On peut citer l'équilibre des pressions, réalisé par exemple via la pression osmotique chez les êtres vivants. Elle doit être finement régulée pour éviter l'implosion ou l'explosion de la cellule

26. Il peut même s'agir de la reproduction de processus mentaux, qui suit des principes similaires. Cette différenciation sans contrainte physique immédiate sera discutée dans les chapitres traitant d'apprentissage

physiques précédemment décrits.

Afin d'expliquer certains phénomènes de spécialisation et éventuellement celui de la spéciation, nous allons brièvement étudier deux classes de configurations spatiales qui conduisent à des organisations de natures différentes. Le premier cas est celui d'une proximité spatiale entre plusieurs systèmes. Les ressources de l'environnement étant limitées, les systèmes rentrent en concurrence si tous n'y ont pas un accès immédiat. La dynamique de chacun des systèmes est alors différenciée par le simple fait que les interactions avec l'environnement ne sont plus homogènes. Si les contraintes de l'environnement deviennent trop fortes, le système peut éventuellement disparaître [27]. Dans le cas contraire, soit à cause de la pression de l'environnement, soit par une adaptation de sa propre fonction ou structure, sa dynamique sera modifiée. Il devient alors adapté à un nouvel environnement qui intègre à part entière les autres individus et constitue par la même une forme archaïque de communication par interaction avec les systèmes proches. Des exemples de telles spécialisations via l'environnement apparaissent constamment durant le développement, transformant progressivement des cellules souches en cellules extrêmement spécialisées. Le phénomène d'apoptose ou mort programmée des cellules permet de même par des contraintes spatiales sur la diffusion de messages chimiques de séparer les doigts au départ palmés de l'embryon. Que ce soit au niveau cellulaire ou à celui de l'embryon, l'évolution ontogénétique reflète et fournit une trace sinon une preuve de la différenciation phylogénétique [28].

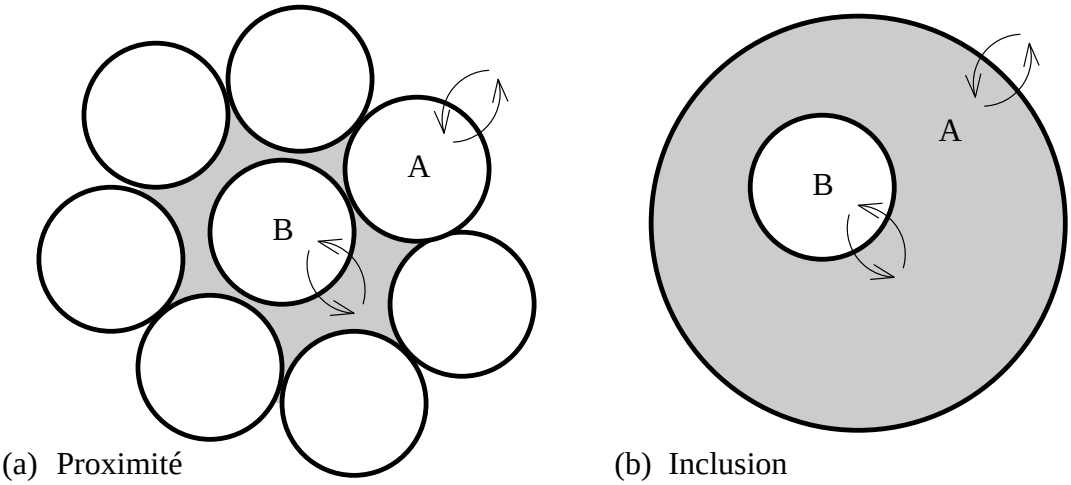
Une autre source potentielle d'organisation est le phagocytage d'un système par l'autre. L'environnement du système intérieur est alors le milieu interne du système enveloppant. Ce type d'inclusion se retrouve à l'échelle des cellules avec les mitochondries mais aussi à plus grande échelle, avec la présence de bactéries provenant de l'extérieur du corps dans le système digestif. Les anticorps produits par le système immunitaire de l'organisme ne sont pas si différents des antigènes (virus, bactéries, parasites, ...) contre lesquels ils luttent ("Vos anticorps appartiennent à votre club, voilà tout" [Dennett, 1996] p.42). Simplement pour les anticorps, tout ce qui reconnu comme extérieur donc potentiellement ennemi doit être éliminé. De même une théorie probable de l'origine des cellules modernes est l'assimilation d'ARNs (sorte de virus primitifs) et leur différenciation au sein du milieu interne de la cellule conduisant à un contrôle progressif des fonctions de la cellule, en particulier la production de protéines [29].

Quel que soit le mode de spéciation choisi, une organisation ou hiérarchie implicite en résulte. Ces organisations résultant d'interactions et de différenciations se retrouvent également au niveau des sociétés. Chez les insectes sociaux, chaque individu dont l'œuf est initialement indifférencié prend un rôle particulier selon son alimentation ou place dans la colonie. Bien que l'intelligence émergente ("swarming intelligence" en anglais) concurrence parfois la notre, aucun individu ne définit le groupe. La dissymétrie entre les systèmes permet une modulation des uns par les autres, bien que les relations soient souvent réciproques. On ne contestera pas que le cerveau a une place à part dans l'organisation et le fonctionnement du corps, ne serait-ce que comme

27. On observe alors une régulation du nombre des individus relativement aux ressources disponibles. Si on couple cette régulation à la reproduction, on obtient une dynamique similaire à celle des populations animales dans une niche écologique donnée. Ce point sera repris plus en détails dans le chapitre traitant des principes retenus dans le modèle implémenté.

28. La formulation originale de Ernst Haeckel, "ontogeny recapitulates phylogeny", n'est pas défendue telle quelle ici. L'embryon humain à un stade donné ne correspond pas à la version adulte d'une autre espèce, la différenciation entre les espèces est simplement progressive durant l'embryogenèse.

29. L'ARN en tant qu'agent actif serait d'ailleurs antérieur à l'ADN dans l'évolution des organismes vivants.



(a) Proximité (b) Inclusion

FIGURE 4.6 – Sur chaque schéma, chaque cellule ou système produit une dynamique différente en fonction de son environnement *(fond blanc ou gris)*. (a) De par la barrière formée par les cellules environnantes, la cellule ne peut communiquer avec le milieu extérieur et interagit seulement avec les produits des autres cellules. (b) L'environnement de la cellule phagocytée est le milieu interne de la cellule enveloppante. Cette dernière peut donc moduler l'activité de la cellule qu'elle englobe.

le siège apparent de nos pensées réflexives et comme précurseur de nos actions volontaires. Néanmoins, des sous-systèmes du corps humain spécialisés pour accomplir certaines fonctions peuvent contrôler certains aspects de nos comportements sur lesquels le cerveau n'a aucune influence. L'illusion d'un contrôle absolu provenant de notre mental (ou de notre conscience vocalisée) est démentie à travers certaines expérimentations. Ainsi les arcs réflexes passant par la moelle épinière ne peuvent être fort heureusement pas contrôlés dans la majorité des cas afin de garantir notre survie. De même l'illusion d'optique de Müller-Lyer persiste même conscientisée. Plus impressionnants, les problèmes de conflits internes chez les patients split-brain (dont les deux hémisphères deviennent quasi-indépendants par ablation du corps calleux) remettent en question l'unicité du pouvoir de décision ou même de la conscience, puisque chaque hémisphère cérébral semble pouvoir prendre le contrôle des muscles pour effectuer des comportements contradictoires.

Afin de faire la transition avec la section suivante, on remarquera pour finir que la différenciation des moyens de communication dans l'organisme suit les mêmes principes. Même avec l'apparition des premières cellules nerveuses puis celle des interneurones, la propagation de signaux chimiques telle que les hormones reste présente et primordiale. Qu'il s'agisse d'une diffusion par le sang, la lymphe ou le système nerveux, les signaux interagissent et se modulent dans des organes qui peuvent eux-mêmes être décomposés en sous-systèmes en interaction tels les cerveaux reptilien, limbique et cortical.

4.6 Anticipation

Il y a une raison profonde à l'accélération des communications entre les systèmes via l'apparition de systèmes sanguin, lymphatique ou nerveux pour certains animaux ou les canaux de sève chez certaines plantes. En effet si un stimulus nécessite une réaction rapide mais que

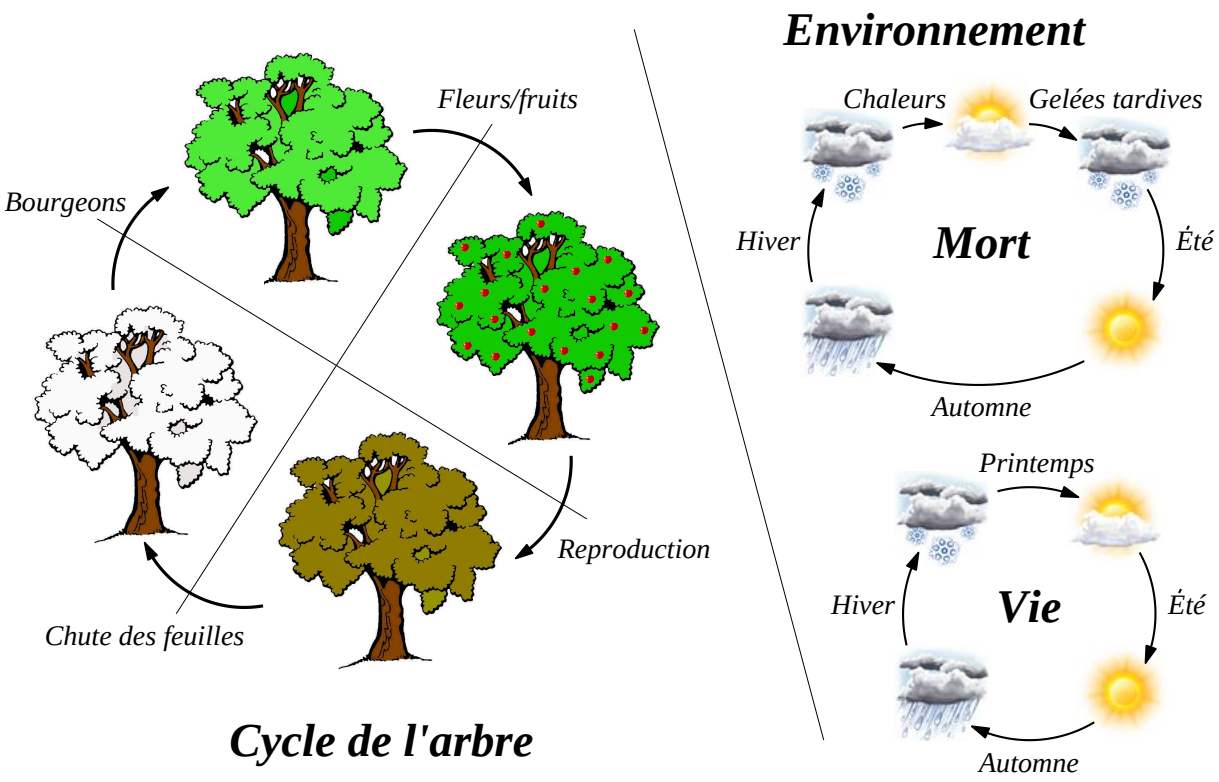


FIGURE 4.7 – Le cycle de l'arbre *(à gauche)* montre la séquence naturelle suivie par le métabolisme de l'arbre. Naturelle signifie ici adaptée et synchronisée sur le cycle des saisons le plus probable dans l'environnement *(Vie à droite)*. Néanmoins, le climat suivant des évolutions et lois chaotiques, d'autres dynamiques peuvent apparaître et fortement impacter sur la survie de l'arbre *(Mort à droite)*.

la diffusion chimique est trop lente relativement aux dimensions de l'être vivant, celui-ci peut potentiellement en mourir s'il est confronté à un prédateur ou toute autre contrainte environnementale forte. Malgré une transmission de signaux plus rapide et efficace, tout danger n'est pas écarté si la dynamique des actions de l'individu est trop lente : il est fort peu utile à un escargot de voir approcher votre pied s'il ne peut s'écarter de votre trajectoire suffisamment vite pour ne pas être écrasé. Le titre sobre de cette section renvoie à la solution trouvée par l'évolution et à une des clés de la cognition. Même si des éléments anticipatifs peuvent être trouvés dans la majorité des systèmes et ce quelles que soient leurs dimensions, l'anticipation devient nécessaire avec des dynamiques plus lentes où un comportement réactif est souvent létal.

L'anticipation peut être masquée par la génétique et l'évolution à travers laquelle elle est apparue progressivement. Comme détaillé sur la figure 4.7, certains types d'arbres vont par exemple produire des bourgeons lorsque la température environnante sera devenu favorable à la fin de l'hiver, ou feront tomber leurs feuilles au début de l'automne avant qu'ils ne puissent plus réguler leur propre température et maintenir leur feuillage à l'approche de l'hiver. Or dans tous les cas, le signal exploité par la plante pour survivre durablement n'est pas celui d'un danger ou avantage immédiat, mais lui laisse le temps d'engager une transformation profonde de son métabolisme afin d'être prêt au moment opportun. Cette anticipation est exclusivement pos-

sible du fait de la cyclicité et donc de la prévisibilité de quantité de phénomènes physiques, telle qu'elle apparaît spontanément dans de nombreux systèmes chaotiques et complexes [30]. Même si des gelées tardives peuvent conduire à la perte de tous les bourgeons et éventuellement à la mort de l'arbre, celui-ci a évolué pendant des millénaires dans un environnement où se succèdent régulièrement les saisons que nous connaissons tous. Le comportement anticipatif acquis durant la phylogenèse d'un système donné est donc adapté à un environnement donné, tous deux ayant évolués conjointement malgré des dynamiques temporelles souvent différentes.

On remarque que l'action et la perception n'ont jamais été distinguées dans l'évolution présentée. Il n'y a non seulement aucune raison fondamentale de les séparer, mais cette union permet aussi d'intégrer les délais et les adaptations à des systèmes biologiques et un environnement physique qui présentent une forte variabilité malgré certaines régularités sous-jacentes. Daniel Dennett va plus loin en soulignant que l'anticipation, l'intériorisation de certaines propriétés dynamiques de l'environnement, de même que la planification des actions pour atteindre des buts sont apparus progressivement, et que toute intentionnalité philosophique est dérivative. En particulier pour des populations animales en concurrence via des comportements de prédation et de fuite (éventuellement étendus aux plantes carnivores), l'anticipation des mouvements de l'autre, l'adaptation à sa perception pour le tromper et anticiper sur ses réactions n'ont pas besoin d'être conscientisées ou conçues en termes d'émotions, sentiments, abstractions et raisonnements humains [Dennett, 1996] (p.59). Par exemple, le leurre présent sur la tête de la baudroie lui permet d'attirer sa proie et exprime une forme d'intention génétique mais n'implique en aucun cas que le prédateur intériorise la perception qu'aura sa proie. Tous deux vivent dans des mondes perceptifs différents et anticipent différents aspects de leur environnement subjectif.

4.7 Un problème de choix : la multiplication des comportements

Bien que les comportements précédemment décrits soient déjà relativement souples et adaptables à l'environnement, il n'est encore souvent pas possible de revenir en arrière pour compenser des erreurs passées. J'entends par là qu'une assimilation incorrecte résultant en un déphasage entre la dynamique de l'individu et de l'environnement n'est pas toujours réparable. Il n'existe par exemple qu'un cycle normal adapté au fil des saisons et de nombreuses espèces de plantes ne peuvent régénérer à volonté leurs bourgeons en fonction des caprices du climat. Pour simplifier, on peut considérer qu'il n'existe pour elles qu'un comportement, qu'une séquence unique d'interactions viables.

Or, si l'être vivant peut se mouvoir dans son environnement [31], la complexité et l'imprévisibilité de celui-ci augmente rapidement. De tels êtres vivants constituent et explorent ainsi de nouvelles niches écologiques moins concurrentielles, ainsi favorisés par l'évolution, mais doivent faire face à une imprévisibilité grandissante de leur environnement. La dynamique de ce dernier étant grandement modifiée par leurs propres actions, ils doivent alors développer et adopter plusieurs modes d'interaction.

Pour illustrer cette transition, voici l'exemple du comportement d'une bactérie lors de son

30. On peut par exemple penser aux horloges chimiques qui émergent d'interactions, autocatalyses et rétroactions entre plusieurs composants d'une solution [Zhabotinsky, 1964]

31. On note que la capacité de se déplacer est la caractéristique essentielle qui permet de différencier les animaux des plantes parmi les eucaryotes pluricellulaires

déplacement dans un gradient de sucre. Il est souvent détaillé par Mark H. Bickhard dans ses présentations car synthétise parfaitement l'idée tout en présentant un organisme qui nous semble extraordinairement simple. En effet, on peut même considérer un simple procaryote, absorbant le sucre à travers les parois de sa cellule, composé d'un corps cellulaire et d'un ou plusieurs flagelles qui lui permettent de se déplacer dans une substance liquide. Pour chaque flagelle, des anneaux internes en mouvement de rotation par rapport à des anneaux externes entraînent le mouvement de la protéine constituant le filament (à la manière d'un moteur comportant un rotor et stator) (figure 4.8). La dynamique du mouvement de plusieurs de ces flagelles est chaotique et terriblement complexe ; en effet, si les lois de la mécanique des fluides ne suffisaient pas, ils peuvent éventuellement s'emmêler pour rajouter davantage de perturbations au mouvement. Si j'insiste tant sur ces points, c'est que la bactérie ne maîtrise pas cette dynamique, mais se contente de deux comportements de base entre lesquels alterner. Ces comportements sont peut-être simples et réactifs, mais le point clé ici, c'est leur multiplicité et le choix qui s'offre pour l'individu à chaque instant.

De façon continue, la bactérie perçoit la quantité de sucre dans son environnement proche et peut ainsi adapter ses actions relativement au gradient local [32]. Si un gradient négatif est rencontré (4.8.2), les conséquences des deux comportements seront très différentes : une progression linéaire entraînera probablement la mort de l'individu (4.8.3_b et 4.8.4_b), alors qu'une rotation aléatoire augmentera ses chances de survie (4.8.3_a et 4.8.4_a). J'insiste sur le côté aléatoire de cette rotation, qui se répétera aussi longtemps que nécessaire puisque qu'aucune anticipation n'est possible hors du champ perceptif de la bactérie. La sélection via l'évolution a simplement favorisé le deuxième comportement dans une telle situation. On obtient ainsi une forme de régulation étendue à la manière d'un "tant que" pour un programme informatique, même si une telle métaphore est une insulte à la bactérie.

Jakob von Uexküll décrit un "programme" similaire dans son étude approfondie du compor-

32. Bien que ce comportement puisse être conçu comme totalement mécanique par des biologistes, on se ramène à la discussion sur la relation entre choix et déterminisme subjectifs développée au chapitre 1 et qui ne sera donc pas reprise ici.

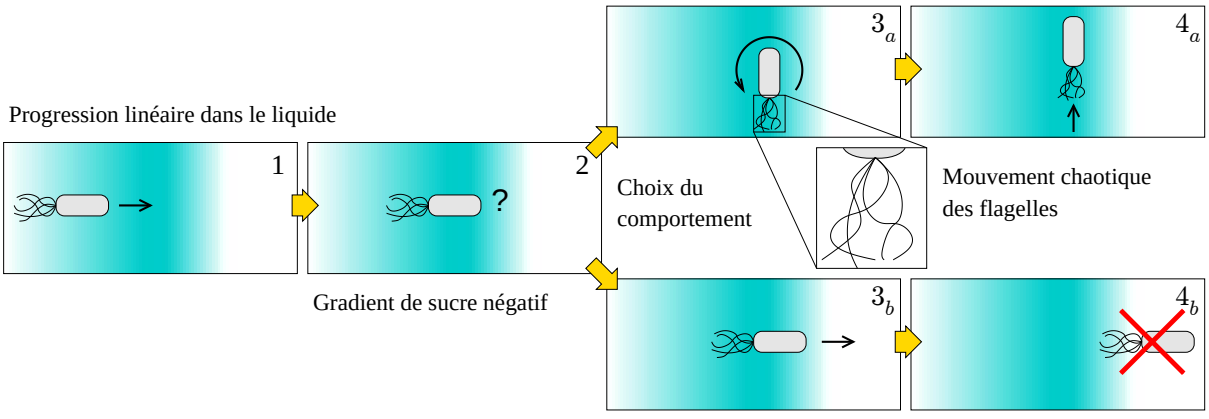


FIGURE 4.8 – Lors de sa progression dans un gradient négatif de sucre (*dégradé bleu*), la bactérie peut, soit continuer tout droit au risque non conscient de mourir *(b)*, soit tourner aléatoirement sur elle même avant de continuer *(a)*. Ce choix comme adaptation génétique à un environnement changeant, est lui aussi aléatoire mais biaisé pour forcer un changement d'orientation si le gradient est trop important.

tement de la tique femelle fécondée [von Uexküll, 1956] :

1. La femelle fécondée grimpe sur une branche.
2. Si elle sent l'odeur de glandes animales, elle se laisse tomber. Sinon, elle attend.
3. Si elle est tombée sur l'animal, elle bouge sur sa peau. Sinon, elle recommence (1).
4. Si elle atteint une zone sans poil, elle plante sa tête. Sinon, elle se déplace (3).
5. Si elle est gorgée de sang, elle tombe, pond ses œufs et meurt. Sinon, elle continue (4).

L'homme associe plus facilement à la tique qu'à la bactérie une intention. En effet il pourra dramatiser cet enchaînement pour y voir un animal tapi dans l'ombre qui attend vicieusement que sa pauvre victime s'approche pour l'attaquer. Suite à des déplacements discrets afin de ne pas éveiller l'attention de la victime, elle prendra finalement le risque de piquer. Somme toute, l'animal aura sacrifié sa vie pour donner naissance à ses enfants, rendant sa cause beaucoup plus noble. Si le lecteur me pardonnera cet élan lyrique, celui-ci avait pour simple but de mettre en évidence la projection des émotions humaines qui est chez nous si spontanée. Je ne souhaite pas ici entamer un débat sur les émotions animales ou l'éthique, mais l'espèce concernée n'a simplement pas le même monde perceptif que nous, ni notre culture, ni certainement les mêmes capacités d'apprentissage et de mémorisation. Encore une fois, on ne peut que constater et admirer la continuité des comportements rencontrés tout au long de l'évolution.

4.8 Imprédictibilité génétique et apprentissage

Les comportements de la section précédente n'ont pas à être appris durant la vie de l'individu. En effet ceux-ci ont pu être sélectionnés et renforcés durant l'évolution de l'espèce et codés dans les gènes. Néanmoins, lorsque l'individu gagne des degrés de liberté, c'est-à-dire que ses interactions sont plus variées, la richesse des comportements potentiels qu'il peut entretenir avec son environnement augmente exponentiellement. Le simple fait qu'il puisse percevoir des objets distants ou se déplacer en trois dimensions transforme totalement son monde propre. Que le monde soit gigantesque, bruité ou qu'il intègre quantité d'autres éléments à la dynamique imprévisible n'a qu'un faible impact sur le sujet si celui-ci ne perçoit pas cette complexité.

En revanche, passé un certain cap de complexité de l'individu, quel qu'il soit, la génétique ou toute autre information transmise à travers la phylogenèse ne peut plus représenter intégralement le monde énacté pendant la vie. Une telle reproduction interne de l'environnement n'est pas uniquement coûteuse ou impossible. En effet, si la dynamique de l'environnement est chaotique et complexe, le modéliser de manière statique est également très risqué : rien n'assure que tout au long de la vie de l'individu, la dynamique ne changera pas suffisamment pour que l'individu n'y soit plus du tout adapté. Certaines propriétés sont évidemment très stables à travers les âges, telles la gravité ou la présence régulière du soleil dans le ciel. D'autres en revanche dépendent clairement de la vie même de l'individu, de ses rencontres et de ses réactions, ou plus précisément, de son expérience unique d'individu unique.

Quelle solution est alors envisageable ? Plutôt que de fournir directement les interactions optimales permettant la survie, il est tout aussi simple de permettre à chacun d'énacter son propre monde, de construire ses propres anticipations. Cette forme d'apprentissage n'est en fait pas si différente de l'apprentissage réalisé durant l'évolution par l'espèce entière, mais se déroule sur une période bien plus brève et à l'échelle d'un individu. Bien sûr, toute organisation biologique ne le permet pas, mais le cerveau et ses évolutions "récentes" (telles que le cortex ou néocortex)

semblent avoir cet avantage.

L'opposition commune entre l'inné et l'acquis ou la recherche désespérée d'une frontière nette entre les deux n'a aucune raison d'être dans notre approche [33]. Il y a donc continuité entre phylogenèse et ontogenèse, de plus la frontière qui les sépare est particulièrement floue. Pour s'en convaincre, en plus de tout les phénomènes épigénétiques étudiées aujourd'hui, on peut noter que l'interprétation des gènes codés dans l'ADN (sélectionnés à travers l'évolution) est effectuée par une cellule déjà vivante (donc issue de ces mêmes gènes) [Stewart, 2004]. Or sans interprète, de même qu'un code informatique sans machine pour l'exécuter, l'ADN n'a aucun pouvoir propre.

On note enfin que l'expérience individuelle influence autant la transmission des gènes que les gènes agissent sur le développement. Il suffit d'un facteur nouveau et global durant une période très limitée pour qu'une espèce entière disparaisse, que ce soit les effets d'une météorite qui annihile les dinosaures ou la main de l'homme qui fait disparaître les dodos de l'Île Maurice. Séparer la phylogenèse de l'ontogenèse revient donc un peu à vouloir résoudre le problème de la poule et de l'œuf.

4.9 Réflexivité des processus réflexifs

Ce titre pourrait passer pour une lapalissade, mais l'on oublie trop souvent l'origine et le sens du mot réflexion pour la pensée. Ce concept, qu'il soit utilisé pour l'analyse de ses propres démarches scientifiques ou dans son rapport avec la conscience de soi et l'introspection, renvoie toujours à la capacité pour un système de se percevoir lui-même. Même si avec l'apparition de la psychologie ou de la neurobiologie, les conceptions ont quelque peu changé passant de l'âme comme rapport à soi pour René Descartes à la conscience comme capacité de se représenter ses propres états, l'idée centrale est restée. De nombreuses bases ont été posées par Hegel en philosophie, suivies par les développements de Bertrand Russel et sa théorie des classes, les travaux de Kurt Gödel sur les niveaux d'analyse, l'introduction de l'épochè avec mise entre parenthèses de l'expérience par Edmund Husserl ou encore la théorie des systèmes de Niklas Luhmann sur l'observation interne et externe d'un système.

Bien que ses conditions exactes d'apparition durant l'évolution ou l'utilité pour l'espèce de différents niveaux de conscience soient encore discutées de nos jours, il est certain que la réflexivité augmente le pouvoir explicatif d'un système. Dans des débats similaires en psychologie du développement, l'émergence de la conscience et des souvenirs chez l'enfant n'est communément plus seulement associée à une maturation du cerveau, mais aussi à des modifications profondes dans la musculature ou la relation à l'environnement de l'enfant [Thelen and Smith, 1994]. Quelle que soit la nature réelle de la conscience et son potentiel substrat physique [34], on va considérer ici qu'elle est constituée d'un ensemble de processus réflexifs. Ces processus sont eux mêmes couplés avec quantité d'autres participant à la définition de l'individu mais sur lesquels on n'a que peu de contrôle. Le couplage plus ou moins fort avec l'environnement

33. Je fais ici allusion à toutes les recherches effectuées afin de déterminer les gènes responsables de phénomènes psychologiques ou de pathologies que l'on rencontre chez l'être humain. Quelle que soit la part de génétique, une combinaison d'un nombre fini de gènes en isolement complet de l'environnement ne pourra jamais coder l'infinité des dynamiques possibles.

34. Sans rentrer dans une revue complète de la littérature, on peut simplement citer ici les hypothèses sur les boucles thalamo-corticales ou sur les aires de la zone frontale permettant en particulier de se focaliser et rejouer certains événements.

définit alors le niveau d'abstraction. Ainsi, les régulations au cœur de nos cellules échappent totalement à notre conscience, l'état de nos organes est en général vaguement et indirectement ressenti, nos émotions sont également ressenties sans qu'on puisse toujours en évaluer l'origine, notre environnement est perçu à travers les récepteurs sensoriels de notre corps, alors que nos raisonnements abstraits ou valeurs morales sont trivialement considérées comme faisant partie intégrante de notre être.

Ces couches ou catégories de processus ne sont pas nécessairement figées. L'apprentissage rend par exemple certaines tâches intuitives et mécaniques et il devient alors parfois impossible de les décomposer ou de les expliquer. Seuls les processus abstraits modulant des comportements rythmiques et relativement autonomes nous restent alors accessibles. A l'inverse, certaines techniques méditatives ont été longuement étudiées pour évaluer le contrôle sur les processus profonds que l'on peut éventuellement développer par un entraînement régulier.

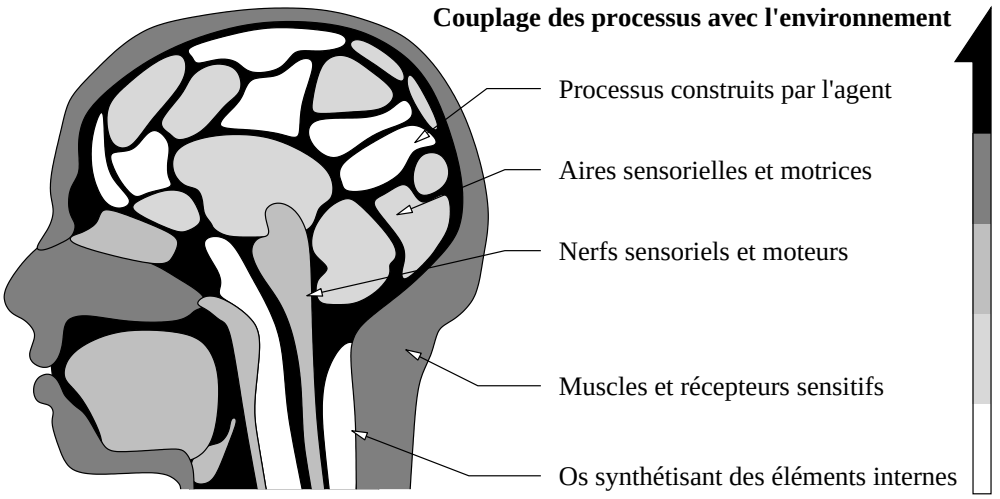


FIGURE 4.9 – Bien qu'il s'agisse d'une grossière caricature ne respectant que très peu la biologie et la neurobiologie, ce schéma représente les processus couplés au sein de l'organisme et avec l'environnement d'un être humain (*niveaux de gris*). Seul le niveau de couplage différencie fondamentalement ce qui est ressenti comme faisant partie de soi et l'environnement extérieur.

4.10 Génétique, expérience et culture intriquées

Enfin, pour clore ce chapitre et étendre les aspects soulevés à d'autres pans de l'expérience humaine, nos sociétés et cultures ont aussi un rôle non négligeable dans la cognition. Elles sont si intimement liées à notre expérience quotidienne et à notre perception de l'environnement qu'il ne peut en être fait abstraction dans nos raisonnements. De manière générale, on ne peut donner la primauté absolue à aucun facteur dans le développement d'un système dynamique comme Esther Thelen le rappelle au début de son ouvrage (p.xviii [Thelen and Smith, 1994]). La génétique, l'épigénétique et l'apprentissage dans un contexte et à des moments donnés, la culture ou encore l'environnement ont tous une influence sur le comportement et la perception de la situation. Selon le domaine, le comportement considéré, la civilisation, l'époque et les avancées scientifiques, certains facteurs sont sous-estimés et d'autres surestimés.

Daniel Dennett invoque l'enchaînement des créatures darwiniennes, skinnériennes, poppériennes puis grégoriennes pour expliquer l'apparition progressive de l'intelligence humaine [Dennett, 1996]. Ainsi, le lien entre un individu et ses parents via l'éducation lui permet d'éviter des erreurs qui peuvent le conduire à la mort. La mort d'hypothèses et d'anticipations durant la vie remplace ainsi avantageusement la mort d'un individu dans un long processus de sélection naturelle. On a ainsi une transition progressive d'un héritage génétique à un héritage culturel par le partage et la transmission de connaissances acquises. De même que les limites de la sélection tout au long de la phylogenèse sont transcendées par l'apprentissage durant l'ontogenèse, les limites individuelles en termes de durée de vie et de capacités d'exploration sont transcendées par la culture.

Le terme de culture inclus ici sans s'y limiter tout moyen de transmission durable apparu pendant l'histoire ou la préhistoire, qu'il s'agisse de communication orale, de trace écrite ou d'outils. Comme le prouve les travaux de Edwin Hutchins sur la cognition distribuée, les objets du quotidien et nos interactions avec eux ne sont pas si étrangers ou indépendants de nos propres facultés mentales [Hutchins, 1995]. De même, nos expressions langagières fondées sur l'espace ou nos mouvements tels qu'un hochement de tête sont parfois indissociables de nos pensées.

Cette culture, apparue tardivement dans l'évolution, est à mon sens le fruit de l'interaction entre les individus d'un groupe (ultérieurement une société), de même que la cognition individuelle émerge de l'interaction de quantité de processus. On retrouve d'ailleurs en elle la majorité des principes énoncés dans ce chapitre, mais bien sûr sous une forme différente. Les membres d'une société communiquent et interagissent avec un nombre restreint d'individus constituant leur entourage, ils forment des groupes accordés sur certains comportements et s'associent dynamiquement en fonction du contexte, de leurs intérêts personnels ou de leur passé, entretenant ainsi des relations et hiérarchies implicites. La majorité s'adapte aux lois et règles qui permettent à la société de se maintenir, et des régulations locales comme globales s'opèrent. Pour étendre encore cette réflexion fractale, toute société dans son ensemble évolue à travers le temps, se transforme avec ses composantes et interagit avec d'autres sociétés, mais cette discussion dépasse très largement le cadre de cette thèse.

Deuxième partie

Modèle proposé et mise en œuvre

1

Principes retenus

Sommaire

1.1 Interactions 66
1.1.1 Activité permanente 67
1.1.2 Parallélisme 67
1.1.3 Symétrie action/perception 68
1.1.4 Environnement 68
1.2 Régulation 70
1.2.1 Différentes formes de régulation 70
1.2.2 Contrôle réparti à tous niveaux 71
1.2.3 Cas limites 72
1.3 Temporalité et anticipation 72
1.3.1 Temporalité et rythmicité 72
1.3.2 Anticipation 73
1.3.3 Expérience et apprentissage 75

Introduction

Relativement aux théories présentées en première partie, notre approche s'inscrit clairement dans le cadre interactiviste et les systèmes complexes. L'infrastructure cognitive proposée est constituée de processus parallèles interagissant chacun avec un environnement local. Bien que le contexte et la fonction des processus puisse varier, tous exploitent les mêmes principes et une structure fondamentale unifiée.

Afin de nous situer dans la littérature, voici une brève comparaison avec les modèles les plus proches :

- **Réseaux de neurones** : Que ce soit par leur nombre, la propagation et diffusion d'activité, leur aspect intégratif et les fonctions d'activation non linéaires utilisées, les composants de notre modèle se rapprochent des neurones artificiels. Néanmoins, ils intègrent de nombreux principes absents des réseaux de neurones artificiels, tels que l'anticipation.
- **Schémas sensori-moteur** : Bien que l'aspect anticipateur soit partagé, les schémas sensori-moteur sont souvent considérés comme des séquences statiques et indivisibles d'actions et de perceptions. A l'inverse, la formation de chaînes est ici implicite, résultant de la coordination locale et dynamique d'interactions. Notre approche se focalise de plus sur

une parfaite symétrie entre perception et action, fusionnant les deux dans des interactions ponctuelles.
- **Mémoire hiérarchique temporelle** : Même remarque pour les atomes de cette architecture quoiqu'elle autorise d'office la construction d'abstractions par combinaison de séquences anticipatives de plus bas niveau. A l'inverse de la hiérarchie statique ainsi produite, nos représentations sont fondées sur la dynamique de l'activité et non sur un encodage uniquement structurel.

Notre modèle se situe en fait à mi-chemin entre des approches de plus haut niveau, dont les systèmes multi-agents, et les approches très bas niveau comme les réseaux de neurones. Il n'y a donc ici point de résolution de conflit, de protocoles de communication, de construction explicite de plan, ou de contrôle centralisé. Malgré tout, chaque processus constituant possède déjà des caractéristiques lui permettant d'interagir et de s'adapter à la dynamique de son environnement.

Notre but avoué est la modélisation de comportements sensori-moteurs et nous avons donc tenter de choisir un niveau de complexité adapté au problème. Il s'agit toujours d'un compromis, mais une fois fixé un niveau d'étude d'un système complexe, il faut s'y tenir sans vouloir expliquer l'intégralité des phénomènes où introduire des notions ad hoc, comme aime à le préciser Scott Kelso d'après sa propre expérience [Kelso, 2006]. Ce n'est pas une raison pour les ignorer, et afin de produire une théorie cohérente s'intégrant dans l'enchevêtrement des domaines scientifiques, il peut être bon se s'en inspirer. De même l'étude de l'évolution des systèmes vivants présentée précédemment permet de mieux saisir la cohérence temporelle entre les principes retenus.

Ces principes déjà décrits en fin de première partie vont être repris sous une perspective différente, tels qu'on les retrouve aujourd'hui chez l'homme et à travers ce qu'ils apportent à la cognition. Par une sélection qui peut sembler drastique, seuls quelques principes subsistent ; ceux qui, quelle que soit leur forme, semblent incontournables dans les systèmes biologiques actuels. Je ne demande en aucun cas que cette vision soit partagée, mais il semblait nécessaire de trancher pour permettre le passage du théorique à l'applicatif durant ces quelques années de thèse. Que ce choix soit judicieux ou nécessaire, le lecteur en sera seul juge.

J'insiste à nouveau sur le fait qu'ils ne sont potentiellement pas nécessaires à la création d'une intelligence artificielle (même générale), mais l'approche choisie consiste à s'inspirer des êtres vivants pour mieux comprendre notre comportement et éventuellement le reproduire. A ce propos, chaque début de sous-section dans ce chapitre décrira en italique un aspect différent d'un comportement humain commun, si commun qu'il a semblé trivial aux chercheurs qui souhaitaient reproduire l'intelligence humaine dans les années cinquante. Et pourtant, plus d'un demi-siècle plus tard, il mobilise encore des équipes entières pour tenter de le comprendre et l'approximer. Il s'agit du simple mouvement consistant à étendre un membre pour atteindre un objet (éventuellement suivi de sa préhension). Contrairement aux règles typographiques standards, le paragraphe introductif de chaque section n'est pas une citation, mais une réflexion personnelle mise en italique pour la dissocier du reste du texte.

1.1 Interactions

Les interactions constituent la forme fondamentale de représentation dans notre modèle. Elles sont justifiées et caractérisées par les propriétés décrites ci-dessous. Ainsi comme l'affirmait déjà John Dewey au XIX$^{\text{ème}}$ siècle, la perception et l'action ne doivent jamais être considérées comme

disjointes car toujours coordonnées [Dewey, 1896].

1.1.1 Activité permanente

> *Même lorsque notre bras semble statique, notre corps réalise quantité d'actions qui l'influence, ne serait-ce que la respiration ou le maintien de la posture. Sauf allongé et totalement décontracté, nos membres participent de manière continue aux régulations globales de notre organisme. La dynamique de notre environnement et métabolisme font que les forces internes comme externes qui s'appliquent sur nos extrémités varient en permanence et nécessitent de fines régulations.*

Tous les processus doivent être fondamentalement actifs dans le cadre interactiviste et dans la théorie de l'autopoïèse, afin de se maintenir adaptés loin de l'équilibre thermodynamique. Il n'est donc aucune raison de supposer que les processus mentaux en interaction avec un milieu interne et un environnement dynamique soient de nature différente.

Cette thèse opte donc pour une approche graduelle de l'activité. Chaque processus peut être plus ou moins adapté, mais reste continûment actif, tentant à chaque instant de réguler sa dynamique et d'influencer son environnement direct. Il n'y a donc pas d'interrupteur on-off sur chaque processus que l'on pourrait recruter et démarrer sur le champ comme ce peut être le cas dans les architectures computationnelles (l'ordinateur en tête). Ils peuvent en revanche être modulés, leurs actions partiellement inhibées, compensées ou masquées par des processus plus adaptés.

1.1.2 Parallélisme

> *Un mouvement d'extension qui peut nous sembler atomique fait déjà intervenir des dizaines de muscles. Chaque muscle possède quantité de faisceaux musculaires, eux-mêmes composés de myriades de fibres musculaires. A chaque instant, le mouvement nécessite le fonctionnement parallèle de tous ces "organes" [Bioulac et al., 2005].*

De même qu'on ne peut concevoir d'intelligence artificielle générale en cumulant des experts indépendants sans aucun moyen de les faire coopérer ou interagir, tout comportement émergent et potentiellement novateur requiert la coordination de plusieurs processus. Reposant sur leur activité permanente, tous les processus influencent simultanément mais à des degrés variables le comportement global. Des interactions entre processus dynamiques et parallèles naissent des synchronisations et adaptations réciproques. Ainsi les doigts se synchronisent en phase/anti-phase et fréquence dans les expériences de Scott Kelso et le mille-pattes adopte différents modes de locomotion selon le nombre de pattes dont il dispose (chaque paire étant contrôlée par un oscillateur autonome).

En plus de permettre l'émergence, le parallélisme favorise la redondance. Dans un système de processus en interaction, seul un processus unique qui est le seul à pouvoir maintenir une fonction est d'une nécessité absolue. Dans les organismes multicellulaires et ce quelle que soit l'échelle, ce cas ne se présente que rarement. En effet, la redondance est reine : que ce soit au niveau des membres, des organes ou des assemblées de neurones, tout est fait pour qu'une lésion locale n'entraîne pas le système à sa perte. Ce principe de robustesse est loin d'être représentatif des systèmes artificiels actuels, de nombreux algorithmes sont mêmes consacrés à l'élimination des redondances. Alors que la mort d'un neurone ou une lésion cérébrale légère passera inaperçue chez l'homme, des codes correcteurs d'erreurs sont nécessaires pour le stockage de programmes

informatiques, afin d'éviter toute erreur aussi minime soit elle qui serait irrémédiable et fatale pour le système[35].

1.1.3 Symétrie action/perception

> *Outre les symétries que l'on observe dans les structures corticales, la reconnaissance d'un mouvement et la génération de celui-ci sont fondamentalement liées. Pourquoi serait-il nécessaire de totalement différencier perception et action, alors que la perception des erreurs commises dans le mouvement peut permettre de le corriger et le réguler ?*

L'étude des neurones miroirs nous apprend entre autres que la perception d'un mouvement réalisé par autrui (avec des paramètres dynamiques potentiellement très différents) entraîne l'activation des aires pré-motrices associées chez le sujet [Rizzolatti *et al.*, 1996]. Des phénomènes similaires se retrouvent même avec la présence d'occlusions durant l'observation de comportements complexes, le système miroir semble donc s'étendre aux fonctions cognitives supérieures [Rizzolatti *et al.*, 2001]. Cela ne concerne pas que l'inné et se retrouve dans la reconnaissance de l'écriture. Seule la perception de lettres entraîne l'activation d'aires motrices uniquement si le sujet a appris à les produire [Longcamp *et al.*, 2003].

Les symétries ne se limitent pas au mouvement, mais sont aussi présentes dans les autres modalités sensorielles et fonctions cérébrales. Voir un objet connu et se l'imaginer activent les mêmes zones lorsque étudiés en neuroimagerie [Lamm *et al.*, 2001; Ganis *et al.*, 2004]. Plus généralement, percevoir et agir sont les deux facettes d'un même processus, de même que percevoir et se souvenir sont intimement liés. Cet entrelacement est tel qu'il est parfois impossible de différencier ce qui résulte d'une activité "interne" ou de phénomènes "externes", comme on l'observe avec les rêves, illusions ou hallucinations [Shanon, 2003; Nelson *et al.*, 2007]. En réalité, nous observons uniquement la dynamique résultant du couplage des diverses composantes de notre monde énacté, bien que l'esprit, le corps et l'environnement puissent nous paraître indépendants dans notre expérience quotidienne. Toute perception, aussi objective puisse-t-elle nous apparaître, comprend toujours une part d'anticipation et de projection du sujet. Selon Rodolfo Llinas [Llinás and Paré, 1991], la perception serait un rêve modulé par les sens. A mon sens, la seule chose qui permet de différencier la situation présente du chaos des pensées est sa cohérence et omniprésence. L'environnement riche stimule continuellement l'intégralité de nos sens et contraint nos processus internes sinon laissés libres à leurs "rêveries".

1.1.4 Environnement

> *Le bras qui nous permet d'atteindre un objet lointain est typiquement conçu comme appartenant à notre être, car toujours présent et contrôlable. L'objet est en revanche considéré comme extérieur à la cognition. Pourtant, une prothèse ou un outil que l'on manipule prend un statut intermédiaire, momentanément attaché et contrôlable par notre corps bien qu'amovible à long terme. C'est l'outil et la cible que l'on coordonne et non plus la main et l'objet.*

La notion de corporéité et d'intégration dans l'environnement est souvent reprise mais malheureusement affaiblie. Cette thèse soutient que l'environnement est non seulement nécessaire

35. On notera quand même que la tendance est aux systèmes robustes et aux techniques de "hot-swapping". On stocke désormais les données critiques en miroir sur plusieurs disques durs (RAID par exemple), on transfère et reproduit à la volée des processus/contextes d'une machine à l'autre sur les serveurs web.

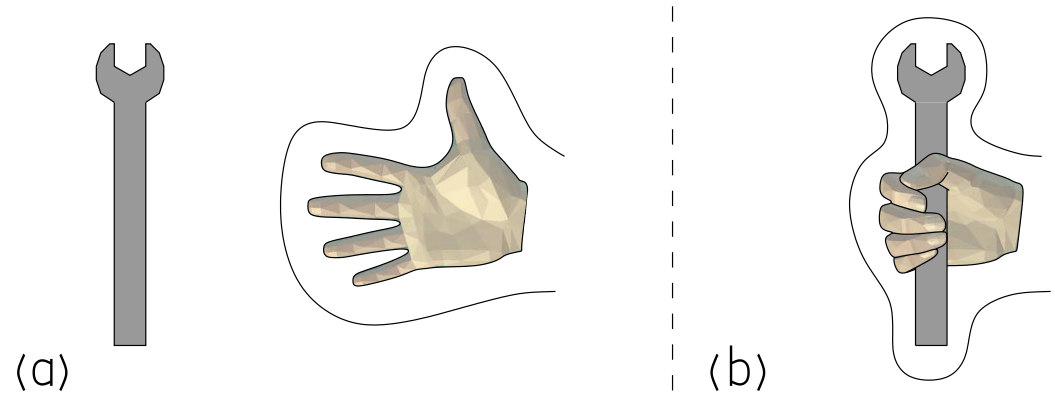


FIGURE 1.1 – Un outil faisant initialement partie de l'environnement (a) devient une extension du corps et participe à sa dynamique une fois en main (b). Il intègre ainsi l'interface entre le corps et l'environnement "extérieur" (*trait continu*).

à la cognition, mais en fait fondamentalement partie : le couplage ne peut exister si l'une des deux dynamiques est absente. Le terme d'environnement tel qu'il est employé ici n'est pas limité au monde à l'extérieur du corps, mais à tout environnement relatif à chaque processus. En effet, définir les limites cognitives du corps n'est pas aisé. Ainsi une prothèse ou un outil ne sont pas tellement différents d'un membre humain, on apprend à interagir avec eux et on les contrôle partiellement à travers une cascade de régulations et d'environnements imbriqués[36]. Cette réflexion est à rapprocher des travaux d'Edwin Hutchins présentés en première partie, de même que des recherches sur la suppléance perceptive qui montrent à quel point notre cognition peut être souple dans sa relation à l'environnement [Bach-y-Rita *et al.*, 2003; Gapenne *et al.*, 2003].

Quel que soit l'environnement considéré, interagir est une forme de communication. Agir consiste à poser une question fondée sur ses propres connaissances et l'anticipation des réactions de l'environnement. Percevoir c'est alors écouter la réponse de l'environnement et réviser ses connaissances afin de toujours mieux interagir en retour. Sans ce va-et-vient et une cohérence dans la communication, aucune cognition n'est certainement possible. Même dans le cadre symbolique des modèles informatiques ACL (Agent Communication Language) reposant sur la théorie des actes de langage (Searle, 1960, puis Winograd), cet aspect était considéré comme un prérequis aux comportements intelligents. Le mode de représentation interactiviste apporte ainsi une unification dans la représentation des relations avec les objets, les outils et les personnes. Dans une telle perspective unifiée, ce qui différencie le corps de l'environnement est la dynamique relatives des interactions, catégorisée dans le tableau 1.2. L'identité est alors dérivée des dynamiques lentes, stables (ou régulières), généralement indépendantes de nos actions immédiates mais qui en revanche les influencent.

36. Pour un exemple frappant et commun de régulation complexe via des outils, il suffit de considérer le système pointeur/souris d'un ordinateur. Bien que la souris soit hors du champ de vision, que les repères spatiaux du tapis de souris et de l'écran soient différents, que le pointeur et la main se déplacent à des vitesses différentes, on suit exclusivement le pointeur sur l'écran. Après un bref apprentissage, la mécanique complexe mise en jeu devient même transparente et naturelle.

	Fort	Faible
Rapide	perception	pensée
Lente	corps	valeur

FIGURE 1.2 – Dynamique et couplage avec l'environnement. Cette catégorisation caricaturale concerne seulement les situations extrêmes : un couplage fort et une dynamique rapide caractérisent par exemple la perception visuelle et la variabilité du flux optique, totalement transformé par une simple rotation de la tête. De la même façon, les valeurs morales sont des abstractions internes relativement stables dans le temps. Enfin, les pensées s'enchaînent rapidement dans notre esprit alors que notre corps nous accompagne toute notre vie bien qu'étant à l'interface avec l'environnement.

L'environnement est souvent nécessaire pour maintenir et renforcer certains comportements intériorisés. Chaque action, de part le retour perceptif qu'elle induit, entretient indirectement l'activité interne qui la produit. Cette forme d'auto-renforcement (ou autocatalyse par l'activité) se retrouve lorsqu'on hume une chanson pour se souvenir de la suite, réactivant par ce biais des souvenirs trop faibles pour être spontanément remémorés. Réciter une leçon, répéter en boucle un discours, copier 100 fois ou toute autre utilisation d'un support externe que l'on maîtrise bien permet non seulement de mieux retenir, mais aussi de mieux comprendre et réfléchir. L'utilisation du support papier, de diagrammes et de notes, permet ainsi de laisser reposer une part de la cognition dans l'environnement.

1.2 Régulation

1.2.1 Différentes formes de régulation

> *Chaque mouvement est unique. Bien qu'il soit assimilé à des mouvements antérieurs similaires, le chaos qui régit notre monde complexe provoque systématiquement des variations dans son exécution. De la contraction des fibres musculaires à la position perçue des articulations à déplacer, tout doit être continuellement régulé. Atteindre un objet qui se trouve derrière soi fait intervenir la quasi-totalité des muscles du corps et nécessite de connaître vaguement la position de l'objet, alors que le même objet situé devant notre main sera facilement saisissable. Ces deux mouvements en apparence si différents semblent pourtant être des variantes d'un même comportement.*

Les processus d'assimilation ou d'accommodation décrits par Piaget peuvent être exprimés en termes de régulations, selon qu'elles agissent localement ou influent durablement sur la structure des représentations. Selon son contexte d'étude, le terme de régulation couvre de nombreux phénomènes. La régulation d'un simple paramètre suffit à réaliser une homéostasie [37], déjà assimilée aux systèmes intentionnels par Daniel Dennett. La régulation du rythme permet la synchronisation. Une forme de régulation implicite résultant du couplage d'accumulateurs physicochimiques permet par exemple à des populations de lucioles de synchroniser leur scintillement, de même que la régulation physique réciproque de pendules leur permet d'osciller en phase ou antiphase (comme décrit en première partie).

37. Une homéostasie est définie par le maintien d'une variable autour d'une certaine valeur ou dans un certain intervalle, telle une concentration chimique dans le sang. Malgré la présence d'hystérésis, elle évite des variations extrêmes incompatibles avec la survie d'un organisme.

D'autres formes de régulations plus complexes, moins symétriques et faisant intervenir plus de composantes peuvent aussi expliquer des phénomènes complexes de coordination, comme on en retrouve chez les insectes sociaux. Maurice Merleau-Ponty a aussi décrit en détail les régulations complexes dont l'homme était capable dont l'exemple du début de cette section s'inspire [Merleau-Ponty, 1942]. Plus généralement, plusieurs membres ou mêmes modalités peuvent être utilisés pour réaliser une même fonction. Malgré la complexité d'une telle transition faisant intervenir des substrats physiques aux propriétés variables et des aires cérébrales différentes, celle-ci nous semble évidente. La régulation touche ainsi toutes les dimensions de la cognition à s'applique à tous les niveaux d'abstraction.

1.2.2 Contrôle réparti à tous niveaux

> *Bien que l'initiation du mouvement soit consciente et que la trajectoire du membre puisse être influencée, on ne régule pas consciemment tous les aspects du mouvement. Selon la configuration initiale des articulations et la position à atteindre, différents mouvements seront mis en œuvre et différents muscles recrutés. Selon le milieu dans lequel se fait le mouvement (dans l'air ou dans l'eau, avec ou sans vent, sur Terre ou dans l'espace), selon la fatigue du sujet, selon les nutriments disponibles, la dynamique des muscles sera affectée. Tous ces aléas ne sont pas prévisibles ou niveau global et doivent donc être régulés localement.*

De même qu'en physique quantique la dimension de la particule effectuant la mesure doit être choisie en fonction du phénomène à mesurer, chaque processus ne peut réguler que les interactions à sa propre échelle dans notre approche. En effet, il est impossible d'anticiper l'évolution exacte de l'ensemble d'un système complexe, mais on peut en évaluer grossièrement la trajectoire globale. Réciproquement, un processus local (tel une fibre musculaire) n'est pas "conscient" de la dynamique globale (le mouvement dans son ensemble). Chaque processus ne peut interagir qu'en fonction des événements qu'il peut percevoir et des actions qu'il peut effectuer. Son rayon d'influence aussi bien spatial que temporel est donc généralement proportionnel à ses propres dimensions. Les processus sont ainsi spécialisés selon leur environnement immédiat et des processus très distants à une échelle donnée communiquent rarement directement. C'est de cette relative indépendance et structure qu'émerge une hiérarchie apparente entre composants.

Bien que cette considération soit rejetée ici, cette hiérarchie est souvent associée à un contrôle centralisé. Les processus à la tête de la hiérarchie distribuent dans ce cas des ordres à des processus inférieurs et dominés, ce qui est à bien différencier de modulations sur des processus relativement autonomes.

Les régulations distribuées sont saillantes dans le domaine des illusions d'optique, de la vision aveugle ou des techniques d'amorçage (priming). Les études montrent que des processus locaux interagissent directement au niveau subliminal, malgré l'absence de perception consciente. Dans le domaine pathologique, les patients "split-brain", dont les hémisphères cérébraux ont été chirurgicalement déconnectés à l'âge adulte, montrent des signes de conflits dans le contrôle moteur [Barbeau, 2007]. L'hémisphère contrôlant la volition est intuitivement associé à la conscience et à la volonté, mais ne coopère plus avec l'autre. Malgré l'absence apparente d'une conscience partagée, chaque moitié du corps s'engage dans des comportements cohérents et complexes, mais malheureusement pas toujours compatibles et coopératifs (les deux bras peuvent ainsi littéralement se battre pour saisir un stylo).

1.2.3 Cas limites

> *Si la fatigue est trop grande, le bras trop handicapé ou la distance à la cible trop importante, une régulation de plus grande envergure est nécessaire. Les processus initialement impliqués ne se révèlent plus suffisants, et il faudra faire usage d'un outil ou se lever pour atteindre l'objet. Les régulations plus globales ou moins habituelles à mettre en œuvre passent alors souvent le seuil de la conscience.*

Chaque processus assimile la dynamique de son environnement autant que possible, mais les régulations impliquées ont leurs propres limites. La spirale assimilatrice de Piaget explique comment on passe progressivement de schémas généraux s'appliquant à toute une gamme de situations à des schémas spécifiques à une tâche précise. Le phénomène inverse existe également en cas d'inadaptation croissante des processus les plus spécifiques. A partir d'un certain point, cette remontée vers la généralité a des effets non négligeables sur l'ensemble des comportements dans lesquels l'individu est engagé. Les contraintes imposées par un plâtre sur une jambe ne peuvent être par exemple compensées au niveau de celle-ci et l'ensemble des processus maintenant l'équilibre ou permettant la marche doivent donc être profondément réorganisés.

C'est seulement quand des régulations conscientes sont mises en jeu que les déficiences ou manques sont perçus. La myopie n'est conscientisée que lorsque les accommodations du cristallin n'autorisent plus une perception normale, le seuil de détection est donc relatif à l'activité du sujet. Un individu habitué à lire sur un tableau distant sera plus rapidement gêné qu'un autre naviguant dans un paysage désertique. De même à l'intérieur de notre corps, les variations dans le métabolisme et les réactions du système immunitaire restent quasiment imperceptibles tant que le fonctionnement global de l'organisme n'est pas affecté. Un cancer à évolution très lente peut ainsi rester invisible durant toute la vie du sujet, tant que l'organe touché reste suffisamment fonctionnel. Similairement, l'embryogenèse est d'autant plus robuste que l'épigénétique régule la formation des organes et compense de possibles mutations génétiques "négatives" (voir le cas du rein détaillé par John Stewart [Stewart, 2004]).

1.3 Temporalité et anticipation

1.3.1 Temporalité et rythmicité

> *Si l'on prend en considération l'aspect dynamique de notre environnement, il est très probable que l'objet que l'on cherche à saisir soit en mouvement. Il peut par exemple s'agir d'une balle à intercepter sur sa trajectoire, comme c'est le cas dans de nombreux sports. Il est alors nécessaire d'intégrer cette dimension temporelle pour avoir un comportement adapté, car le moindre mouvement ou la moindre contraction ne sont pas instantanés.*

Avant d'évaluer la place du temps dans nos comportements, celui-ci doit être défini. Or il accepte de nombreuses définitions selon le cadre dans lequel on se place. Souvent considéré comme une dimension à part entière en physique, elle est la seule que l'on parcourt de façon irréversible. La théorie du chaos considère de son côté le temps comme une pure construction, résultant des tendances statistiques du monde physique[38]. Cette conception est plus proche d'un temps

38. Les lois de la thermodynamique étant par exemple réversibles, rien n'empêcherait l'air d'une pièce de spontanément se concentrer au plafond. Néanmoins, la probabilité d'une répartition homogène des atomes d'un gaz est bien plus forte du fait des interactions locales entre ceux-ci. De manière générale, l'entropie/désordre

subjectif mais encore loin de notre ressenti quotidien. Le temps physique absolu, qualifiant par exemple la propagation des signaux nerveux, doit en effet être différencié du temps psychologique.

En ergonomie ou psychologie, le programme de recherche du cours d'action de Jacques Theureau [Theureau, 2003] ou plus anciennement les théories de Jakob von Uexküll introduisent un temps discret relatif aux actions du sujet [39]. Les comportements y sont découpés en phases ou sous-comportements dont l'enchaînement détermine les temps forts de l'activité du sujet. L'engouement du sujet pour l'activité peut alors être dérivé du tempo et rythme de celle-ci. L'intérêt d'un phénomène perçu ou l'intelligence d'un animal observé sont subjectivement évalués relativement à notre échelle et à notre rythme.

Si tout est statique, une machine de Turing avec des temps de transition d'un état à un autre potentiellement infinis ne pose pas de problème, mais ce n'est malheureusement pas le cas dans la majorité des comportements interactifs. L'environnement possède un rythme résultant des lois physiques et l'on doit se synchroniser sur lui car on ne peut pas toujours l'influencer à notre guise (alternance jour/nuit par exemple). Des rythmes intrinsèques nécessaires à une bonne synchronisation se retrouvent dans les populations animales régies par les équations de Lotka-Volterra [Volterra, 1931], les populations de neurones, dans les oscillateurs contrôlant le mouvement au niveau de la moelle épinière, mais aussi dans la dynamique de réactions chimiques telles que celle de Belousov-Zhabotinsky [Zhabotinsky, 1964]. Des oscillations spontanées et régulières résultant de réactions chimiques sont retracées jusqu'à ladite "horloge moléculaire", datée à environ -2,7 milliards d'années et potentiellement à l'origine de la vie.

Pour faire le lien avec la section sur la relation à l'environnement, les contraintes imposées par celui-ci (dont temporelles) sont néanmoins réduites lorsqu'on pense ou que l'on dort ou rêve. Le mode de représentation interactif n'est pas changé, mais le couplage entre les processus internes et la dynamique externe est affaibli. Même si le rythme et l'espace préférentiel restent ceux du monde réel [Lin *et al.*, 2006], il est possible de faire des sauts dans le temps ou d'imaginer des objets aux dimensions improbables. Cet aspect de la cognition, loin d'être anodin, doit être intégré à tout modèle souhaitant rendre compte de l'imagination, de la créativité, de l'art [Merleau-Ponty, 1961] ou du jeu [Di Paolo, 2006].

1.3.2 Anticipation

> *Si un obstacle est présent entre la main et l'objet, il est naturel et utile de l'éviter, que ce soit pour dépenser moins d'énergie, atteindre plus vite la cible ou ne pas se faire mal en le heurtant. Il ne faut alors pas attendre de ressentir son contact pour réagir, mais modifier sa trajectoire pour l'éviter au plus tôt et ainsi anticiper.*

La réaction à des signaux bien choisis dans l'environnement permet l'expression de certains comportements adaptés, mais n'est pas toujours suffisante. La propagation des informations perceptives et motrices à travers le corps introduit des délais et une synchronisation parfaite avec l'environnement n'est pas possible sans les prendre en compte. Seule la prise en compte de la stabilité temporelle des boucles sensori-motrices permet par exemple de taper du pied en rythme, chose impossible si un son perçu devait être analysé, une commande motrice envoyée

augmente... en moyenne. La flèche du temps est alors définie par cette tendance vers l'équilibre thermodynamique. Pour d'autres réflexions similaire, voir les livres de vulgarisation de John Gribbin [Gribbin, 2005].

39. Cette étude discrète est considérée comme admissible et non comme irréductible dans le cours d'action, plus ou moins imposée par l'étude du langage et de la transcription/narration des activités passées.

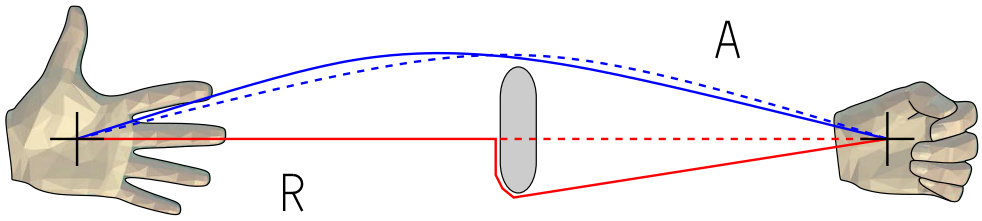


FIGURE 1.3 – Là où une approche réactive impose un trajet plus long et de potentiels dégâts lors du contact avec l'obstacle (R), l'anticipation de celui-ci autorise une trajectoire optimale (A). Dans les deux cas, la trajectoire initiale supposée (*pointillés*) n'est pas parfaitement reproduite dans les interactions avec l'environnement (*trait continu*).

au pied et les muscles contractés de façon réactive [Buisson and Quinton, 2008]. Des expériences de neurophysiologie ont également montré qu'une stimulation directe sur le cortex perturbe les interactions sensori-motrices en comparaison d'une stimulation naturelle sur un membre distant. Cela paraît contradictoire dans une approche réactive puisque le délai introduit par la propagation du signal via le nerf sensitif est ainsi éliminé, mais ce délai fait en réalité partie intégrante du processus perceptif et n'est donc pas une gêne à éliminer.

De manière générale, la richesse du monde peut être conçue non pas comme une gêne qui doit être impérativement réduite, mais comme un moyen de différencier ou classifier en exploitant un minimum d'informations bien distinctes. Cette règle économe de différenciation minimale est exploitée en vision artificielle dans le logiciel SpikeNet [Delorme and Thorpe, 2003; Perrinet *et al.*, 2004] où les premières cellules visuelles qui déchargent suffisent à renseigner précisément sur la nature des objets dans la scène.

L'anticipation permet justement de s'abstraire des "défauts" et de la variabilité de l'environnement. Dans le domaine de la vision, l'occlusion partielle d'un objet perturbe sa perception, mais de nombreuses anticipations sont néanmoins satisfaites là où l'objet reste visible. Sans revenir en détail sur la normativité des processus anticipatifs déjà développée précédemment, la correspondance entre ce qui est anticipé et perçu valide l'adéquation des dynamiques internes et externes. Pour un comportement donné, la différenciation des représentations ne requiert que la différenciation de régularités utiles, toute précision excessive est donc superflue. La perception de la couleur n'aurait certainement jamais était transmise de génération en génération si elle ne permettait pas de différencier certains éléments nécessaires à la survie dans l'environnement, tels que les plantes. A un niveau pratique, l'anticipation permet donc de limiter les traitements : seules les anticipations les plus fortes doivent être testées, et une segmentation globale du champ perceptif n'est pas nécessaire.

Si un processus interactif exploitant des représentations anticipatives n'est pas adapté à l'environnement, d'autres processus peuvent prendre le dessus. Le choix d'un comportement adapté se ramène ainsi à un problème de régulation entre des processus concurrents ou concordants.

1.3.3 Expérience et apprentissage

Si trop d'anticipations au cours du mouvement ne sont pas vérifiées, c'est le signe que le comportement actuel n'est pas adapté. Le choc avec un obstacle inconnu sur la trajectoire introduit une incohérence dans les anticipations passées ("je contracte un muscle mais le bras ne bouge pas"), permettant l'exploration et l'apprentissage de nouvelles trajectoires, mieux adaptées à la situation. L'expérience permet ainsi de découvrir et reproduire des pointages d'objets plus efficaces ou d'éviter les blocages articulaires.

Le premier constat nécessaire pour aborder l'apprentissage concerne le déterminisme de notre environnement, pourtant complexe et chaotique. Certains aspects sont peut-être non déterministes relativement à l'échelle humaine, mais la majorité des phénomènes perçus ou compatibles avec nos capacités perceptives le sont. Certaines situations peuvent nécessiter localement l'utilisation de variables cachées, mais la prise en compte d'un historique plus large permet généralement de dissoudre le non déterminisme momentané apparent. Les régularités spatio-temporelles de notre environnement permettent la structuration progressive du monde par l'individu.

Que l'apprentissage se fasse par la génétique sur une population entière ou durant la vie d'un individu particulier, la mémorisation d'événements et de régularités peut influencer le cours des interactions à venir. Comme détaillé au chapitre sur l'évolution, les gènes ne peuvent rendre compte de la variabilité locale de l'environnement passé un certain degré de complexité du système vivant. De nombreuses régularités, ne serait-ce que les limites physiques de notre corps, évoluent durant la vie et sont influencées par quantité de facteurs eux aussi dynamiques. De même qu'une action appliquée au bon moment sur l'embryon peut profondément impacter son développement (voir les bifurcations du paysage de Waddington pour une analogie graphique), les interactions d'un individu avec son environnement durant toute sa vie peuvent affecter son comportement. Plutôt que de modéliser intérieurement tous les paramètres qui peuvent affecter notre dynamique, il paraît plus aisé de réviser continûment nos connaissances.

Les types d'interactions avec l'environnement et leur influence sur notre comportement et notre équilibre sont décrits ci-dessous. Toutes les caractéristiques introduites peuvent aussi bien concerner des interactions physiques que sociales :

- **Force** : L'influence de l'environnement sur l'individu peut être plus ou moins forte. Une amputation ou la perte d'un proche sont vécus comme des chocs et nécessitent une refonte profonde de l'organisation des processus physiques et/ou mentaux pour retrouver un équilibre. Des expériences moins déstabilisantes peuvent devenir de simples souvenirs ou être tout simplement négligées.
- **Dynamique** : Des interactions répétées ou prolongées constituent des régularités et les comportements adaptés sont progressivement renforcés. A l'inverse, un phénomène éphémère et unique n'aura qu'une faible influence sur l'individu, noyé dans la variabilité de l'environnement. Sans rentrer dans la controverse du conditionnement subliminal, on notera simplement que des interactions ont généralement d'autant plus d'influence qu'elles sont étendues ou répétées.
- **Source** : Selon que les variations dans les interactions viennent principalement de la dynamique interne ou externe, l'apprentissage sera respectivement actif ou passif. On différencie ainsi l'exploration ou la curiosité, toutes deux de nature intrinsèque [Oudeyer and Kaplan, 2004; Oudeyer *et al.*, 2007], de contraintes purement extérieures.

Les modifications structurelles et fonctionnelles qui résultent de ces interactions dépendent de notre apprentissage passé :

- **Assimilation** : Malgré l'unicité de chaque instant, une situation très bien assimilée par un individu n'entraîne pas de changement structurel et la dynamique en est faiblement affectée. Les interactions habituelles sont ainsi maintenues et la situation est connue, même si elle n'est pas forcément maîtrisée. Cet état d'assimilation est le but de tout processus (et celui du méta-processus d'apprentissage).
- **Incompréhension** : Si la dynamique externe est totalement inassimilable, l'environnement et l'individu ne sont pas en phase et un comportement adapté ne peut être généré spontanément [40]. L'individu est alors perdu et ne peut maintenir son équilibre.
- **Accommodation** : Entre les deux extrêmes précédents, la structure de l'individu peut être légèrement modifiée pour s'adapter durablement et permettre l'adoption d'une dynamique compatible avec l'environnement. L'apprentissage permet ainsi à l'individu d'acquérir progressivement de nouvelles compétences. Bien que l'environnement soit objectivement de plus en plus complexe, il reste toujours majoritairement assimilable.

On doit noter que certains aspects de la situation peuvent être parfaitement assimilés alors que d'autres sont nouveaux et déstabilisants. Ainsi un adulte ne sera totalement perdu que dans des situations extrêmes puisqu'il a déjà connu de nombreuses variations dans sa vie. Le processus d'apprentissage doit donc combiner généralisation et spécialisation ; la mémorisation des particularités de situations passées permet de fournir des réponses adaptées et spécifiques, alors qu'une assimilation vague ou partielle permet de s'adapter aux situations nouvelles et à la variabilité permanente de l'environnement.

Si l'on considère des représentations exclusivement fondées sur des processus anticipateurs et interactifs comme précédemment décrits, l'apprentissage consiste en la création ou l'altération de ces mêmes processus. Si de plus la plupart des fonctions cognitives résultent des interactions entre divers processus en l'absence de tout contrôle centralisé, il est impossible au niveau global de déterminer quel élément doit être modifié en cas de mauvaise assimilation de la situation. L'approche choisie ici combine apprentissage par renforcement pour les processus existants et variation/sélection pour la génération de nouveaux processus. Le renforcement permet de stabiliser les processus fonctionnels, à la manière de la règle de Hebb [Hebb, 1949] pour les synapses. De son côté, une population de processus régie par un algorithme de type génétique permet de limiter l'explosion du nombre de processus en favorisant la disparition des processus les moins adaptés, mais aussi de rendre redondants et robustes les processus les plus actifs. De nombreux détails supplémentaires seront fournis dans le chapitre apprentissage.

40. Il s'agit là d'un clin d'œil et parallèle avec l'hétérogénie soutenue par Jean-Baptiste de Lamarck au XIX$^{\text{ème}}$siècle, c'est-à-dire la génération spontanée d'êtres vivants sans présence préalable d'un organisme similaire ou moins mature.

2

Structure du modèle mathématique

Sommaire

2.1 Espace d'interaction 78
2.1.1 Dimensions 78
2.1.2 Éléments de l'espace 79
2.1.3 Mesure de similarité 80
2.2 Champ d'activité 81
2.2.1 Diffusion d'activité 82
2.2.2 Réduction des potentialités en une valeur unique 83
2.3 Anticipation 84
2.3.1 Tunnels d'activité 84

Introduction

Ce chapitre introduit un modèle mathématique rendant compte des principes précédemment décrits. Il jette ainsi un pont entre les concepts de haut niveau manipulés en philosophie et l'implémentation informatique réalisée dans cette thèse. Les concepts sont fortement simplifiés mais leur essence a été préservée afin de reproduire les propriétés des processus naturels qui nous semblaient les plus importantes dans une optique d'applications en robotique et informatique.

La plupart des modèles présentés en première partie ont été développés dans une approche différente. A l'origine, les réseaux de neurones ou algorithmes génétiques reproduisent un seul aspect des systèmes naturels, et à une échelle donnée. A l'inverse, certaines approches visent la modélisation immédiate des capacités humaines, invoquant pour cela des modules de haut niveau assez hétérogènes. Ici, l'architecture est fractale, dans le sens où le système dans son ensemble de même que chaque processus individuel intègre les mêmes principes fondamentaux. Ceux-ci ont été combinés au niveau le plus bas pour produire une forme de représentation homogène, permettant par la suite l'émergence de comportements complexes. Néanmoins, on reste au niveau sensori-moteur, le système n'a en effet pas été conçu pour être passé à l'échelle et modéliser l'intelligence humaine, mais comme simple plateforme de test des principes avancés.

Le modèle, initialement dérivé d'un programme de reconnaissance de rythmes développé par Jean-Christophe Buisson [Buisson, 2004], a ainsi connu de nombreuses versions. Chaque limitation rencontrée dans les applications nous a forcés à revisiter les fondements du modèle, chercher

les principes manquants ou repenser leurs relations. Il n'est présenté ici que la dernière version en date, même si un bref historique des améliorations peut se retrouver dans les applications décrites en 3ème partie.

2.1 Espace d'interaction

Pour un système donné, tout ce qui est perçu ou traité est représenté dans un espace mathématique d'interaction. Le système considéré peut lui même être constitué de sous-systèmes, faire partie d'un plus grand ensemble, ou interagir avec d'autres systèmes. Néanmoins l'aspect primordial est que chaque système a son espace propre. Ainsi pour deux systèmes en interaction dans un environnement physique commun, chacun aura son environnement subjectif propre, à la manière de l'Umwelt de Jakob von Uexküll.

Cet espace est dit interactif car chaque élément de cet espace est considéré comme une interaction. On parle bien ici d'éléments de l'espace car ils ne se limitent pas à des points, cet aspect étant traité dans la sous-section du même nom ci-dessous. La définition commune d'une interaction faisant intervenir le temps, il faut bien souligner ici que les interactions sont instantanées (figure 2.1). Seule une séquence temporelle d'interactions et d'anticipations permettra de modéliser un comportement.

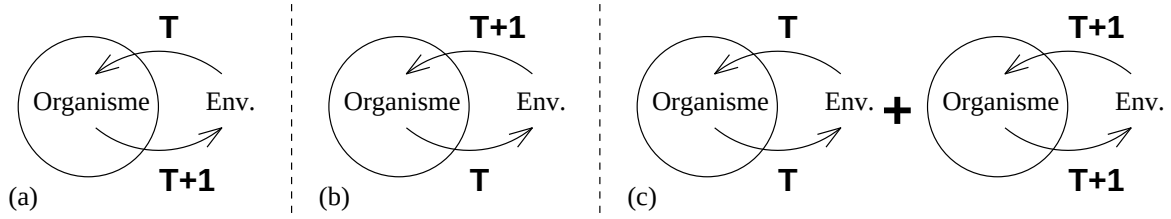


FIGURE 2.1 – Les interactions incluent classiquement la notion de temps. Si le système est purement réactif (a), une sensation à l'instant T déclenche une action au temps $T+1$. S'il est purement anticipatif (b), il prédit une sensation à l'instant $T+1$ résultant d'une action effectuée à T. Notre approche combine ces deux extrêmes en proposant des interactions instantanées où les deux systèmes (environnement et organisme) agissent l'un sur l'autre à chaque instant (c).

2.1.1 Dimensions

Même si le terme d'état est souvent associé aux substances et à la stabilité, on peut considérer que les interactions décrivent ici l'état du système à un moment donné. Cet état ne se limite pas aux informations sensorielles, mais comprend aussi les actions :

- **Sensations** : Ce sont les signaux en provenance de l'extérieur du système. Encore une fois, la notion d'intérieur et d'extérieur sont relatives au système considéré. Ainsi, relativement au cerveau biologique, il peut s'agir de sensations internes au corps, telles que la proprioception ou les influx nerveux en provenance des cellules nerveuses de la rétine (en quelque sorte détachées du cerveau).
- **Actions** : Ce sont les signaux qui sont émis de l'intérieur du système. Là aussi, une commande motrice envoyée par le cerveau n'aura pas une action immédiate sur l'environnement, mais sera relayée par d'autres centres de contrôle répartis. De même, certaines

actions servent uniquement à moduler d'autres systèmes relativement autonomes mais internes à l'organisme.

Les applications se sont jusqu'à présent limitées à un faible nombre de dimensions (<50), mais leur nombre peut potentiellement être gigantesque. Si l'on considère le système visuel, le cerveau reçoit des signaux de quantités de cellules ganglionnaires depuis la rétine (10^6 axones). Ces cellules sont elles-mêmes liées à des cellules bipolaires, amacrines ou horizontales via leurs champs récepteurs étendus. Même si tous ne sont pas en interaction directe, on dénombre environ 10^8 photorécepteurs (cônes et bâtonnets) sur la rétine. Le modèle présenté dans ce chapitre peut théoriquement permettre de représenter un tel système dans son ensemble, mais on peut questionner à juste titre l'utilisation d'un espace avec des millions de dimensions dans de tels cas.

L'espace mathématique abstrait présenté n'a pas réellement d'unités (au sens unités du système international) puisque chaque dimension peut porter une variable réelle quelconque. La question de la précision des valeurs relativement à la grandeur encodée, non contrainte dans le modèle mathématique, ne sera abordée que dans l'implémentation informatique (au chapitre suivant).

2.1.2 Éléments de l'espace

Supposons un espace à 3 dimensions représentant 2 sensations (X, Y) et 1 action (Z). L'observation simultanée de X et Y alors que l'agent effectue l'action Z correspond à l'interaction codée par le triplet (x, y, z), x étant la valeur de la variable X (idem pour les autres). Il s'agit donc d'un point de l'espace des interactions.

Néanmoins si une sensation (Y) est totalement décorrélée des autres variables, il ne sera peut-être pas intéressant de l'observer. Elle peut sembler totalement aléatoire ou à l'inverse trop stable. Si l'on étudie par exemple les interactions oculomotrices chez l'homme, la proprioception en provenance du petit doigt de la main n'aura pas grande importance (sauf si celui-ci se trouve bien entendu au milieu du champ visuel). Dans un tel cas, une des variables peut prendre une valeur quelconque, et on représente l'interaction par $(x, -, z)$ ou dans une notation abrégée (x, z). Sa représentation graphique n'est plus un point, mais une ligne de l'espace 3D. On prendra bien garde de toujours utiliser les mêmes lettres pour les mêmes dimensions. Ainsi les doublets (x, y) et (y', z') n'ont que 2 variables instanciées chacun et correspondent aux triplets $(x, y, -)$ et $(-, y', z')$ dans l'espace des trois dimensions X,Y et Z.

Si de plus l'action (Z) n'a aucune influence sur la sensation, on peut de même l'éliminer. C'est par exemple le cas si on observe la chute d'un objet distant et que l'action considérée est la flexion du coude. On n'a alors plus qu'une variable et un "singleton" (x), représenté par un plan. Ces différents cas sont représentés sur la figure 2.2. Enfin le cas où l'on n'observe rien n'a en soit aucun intérêt, mais serait représenté par l'espace dans son intégralité.

Afin de faire d'ores et déjà le lien avec les théories piagétiennes et interactivistes, on notera qu'une interaction possédant moins de dimensions définies est plus générale que les autres. En effet, puisque certaines variables peuvent prendre des valeurs quelconques sans affecter l'interaction, celle dernière s'applique à un plus grand nombre de situations. A l'inverse, plus le nombre de dimensions définies est grand, plus elle est spécifique.

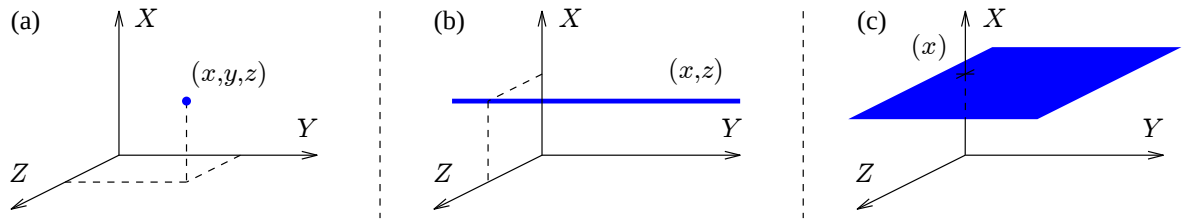


FIGURE 2.2 – Selon le nombre de dimensions définies, les interactions sont représentées par un point (a), une ligne (b) ou une surface (c) dans l'espace des 3 dimensions X, Y et Z.

2.1.3 Mesure de similarité

Une mesure de similarité peut alors être introduite entre les interactions. Pour rendre le calcul plus concret, celui-ci va s'appuyer sur un exemple, la similarité entre (x, y, z) et (y', z', t') dans un espace à 4 dimensions (X,Y,Z,T). La première étape consiste à projeter chaque interaction sur le sous-espace des dimensions communes : le plan (YZ). On obtient ainsi 2 nouvelles interactions avec 2 dimensions définies : (y, z) et (y', z'). On calcule alors le vecteur des distances sur chaque dimension commune. On obtient ainsi le vecteur $(dy, dz) = (|y' - y|, |z' - z|)$.

Sur chaque dimension de valeur dv est alors appliquée une sigmoïde afin de normaliser l'intervalle des images :

$$dvn = 1 - \frac{1}{1 + e^{-k\left(\frac{dv}{m} - 1\right)}} \tag{2.1}$$

où le facteur k est un paramètre peu sensible et arbitraire, déterminant partiellement la pente de la sigmoïde et la valeur maximale de similarité atteignable (il est pris égal à 5 dans toutes les implémentations). Le paramètre m détermine l'abscisse pour laquelle l'image vaut 0.5 (lorsque $dv = m$, $dvn = 1 - \frac{1}{1+e^0} = \frac{1}{2}$). Ce paramètre sera détaillé dans les sections suivantes et dans le chapitre suivant concernant la coordination, mais n'a pas grande importance pour l'instant.

Les composantes du vecteur résultant (dyn, dzn) sont alors sommées. On obtient ainsi une mesure $s = dyn + dzn$ d'autant plus grande que les interactions sont similaires. On remarque aussi que les interactions spécifiques seront favorisées si elles ont un grand nombre de dimensions en commun, puisque le nombre de composantes du vecteur des dvn sera plus grand. Ce qui nous donne l'expression de similarité suivante :

$$s(I, I') = \sum_{(v,v')} 1 - \frac{1}{1 + e^{-k\left(\frac{1}{m}|v'-v| - 1\right)}} \tag{2.2}$$

où v et v' sont les composantes correspondant à une même dimension dans les interactions I et I'.

Si l'on considère que l'une des deux interactions dont on évalue la similarité correspond à l'ensemble des sensations et actions à un instant donné (c'est-à-dire à la situation telle que subjectivement perçue), on introduit de cette façon une notion d'assimilation. Une interaction assimilera d'autant mieux la situation que la mesure de similarité sera grande. De plus et d'après la remarque précédente sur le nombre de dimensions communes, une interaction assimilera mieux la situation si elle est spécifique et adaptée, comparée à une interaction générale s'appliquant couramment.

Il ne s'agit pas de l'inverse d'une distance au sens mathématique du terme, puisque les ensembles de départ de l'application sont de nature différente : $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$. De plus, les

propriétés (inversées) d'une distance ne sont vérifiées que sur l'espace des dimensions communes et non sur les objets de départ :

- Symétrie : trivialement vérifiée
- Séparation : la mesure de similarité est maximale ($nb_{dim} \times \left(1 - \frac{1}{1+e^k}\right)$) si et seulement si le nombre de dimensions communes est maximal et que les valeurs sont toutes égales, c'est-à-dire si et seulement si les deux interactions sont identiques.
- Inégalité triangulaire (inverse) : pas toujours vérifiée. Le fait que certaines dimensions disparaissent lors de l'étape d'intersection des dimensions conduit à des relations contradictoires. En effet pour $I = (x)$, $I' = (x, y)$ et $I'' = (y)$, $s(I, I'') < s(I, I') + s(I', I'')$, alors que pour $I = (x)$, $I' = (y)$ et $I'' = (x)$, $s(I, I'') > s(I, I') + s(I', I'')$.

Une fonction sigmoïde additionnelle est finalement appliquée sur la valeur résultante afin de maintenir la sortie dans l'intervalle $[0; 1]$:

$$sim(I, I') = \frac{1}{1 + e^{-k\left(\frac{1}{m'} s(I,I') - 1\right)}} \tag{2.3}$$

où k a la même signification et valeur qu'à l'expression 2.1 et m' est peu sensible et proportionnel au nombre total de dimensions (pris égal à $0.2 \times nb_{dim}$ dans l'implémentation actuelle).

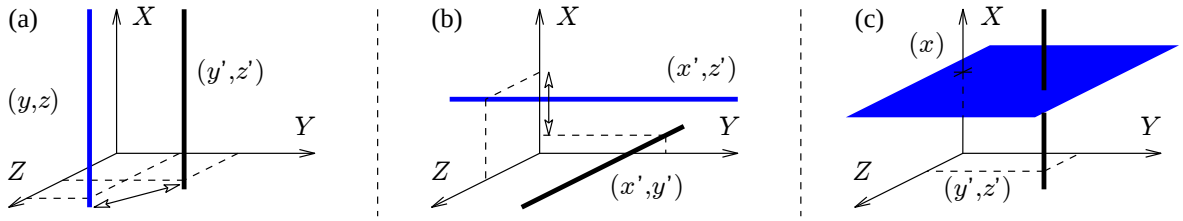


FIGURE 2.3 – (a) Les deux interactions sont parallèles, elles ont toutes leurs dimensions en commun, on peut donc calculer la similarité dans le plan YZ. (b) La mesure de similarité ne peut être calculée que sur la dimension commune X. (c) Les deux interactions sont orthogonales, elles n'ont aucune dimension en commun et leur similarité est nulle.

2.2 Champ d'activité

Les interactions et l'espace décrits jusqu'à présent sont totalement passifs. Afin d'introduire une dynamique dans cet espace, on lui associe un champ d'activité, c'est-à-dire une fonction dynamique qui fait correspondre à chaque point de l'espace ($\in \mathbb{R}^n$) un degré d'activité ($\in \mathbb{R}$). On introduit à ce niveau le couplage avec l'environnement : la situation "ressentie" formée de l'ensemble des sensations et actions à un instant donné influence l'activité au point correspondant de l'espace. Il faut insister ici sur le fait qu'il s'agit simplement d'une influence et non d'une définition, car d'autres éléments introduits plus loin dans le texte peuvent également affecter le champ d'activité.

Ce champ d'activité est dynamique car mis à jour au sein de la boucle sensori-motrice qui permet au système et à l'environnement d'interagir en continu. Chaque cycle sensori-moteur modifie l'ensemble des sensations et actions et affecte ainsi le champ d'activité interne à l'agent.

2.2.1 Diffusion d'activité

Si une interaction I dans l'espace d'interaction assimile la situation courante à un degré a_I élevé, il est légitime de considérer qu'un voisin immédiat I' dans cet espace l'assimile bien également. En faisant cette hypothèse, on exploite la topologie de l'espace d'interaction et l'activité est diffusée localement et instantanément. La localité est ici déterminée par une fonction d'atténuation et limite la zone d'effet de chaque interaction sur le champ d'activité. Bien qu'une gaussienne, une IDW (Inverse Distance Weight) ou une sigmoïde soient fonctionnelles dans ce modèle (toutes 3 ont été testées dans différentes applications présentes en troisième partie de ce manuscrit), la sigmoïde a semblé la plus facile à paramétrer. L'équation 2.1 est bien sûr utilisée pour régir cette diffusion, puisque choisie justement pour modéliser l'assimilation. Et c'est ici que le paramètre m prend son importance : il détermine la portée de la diffusion (figure 2.4). La propagation d'une activité entre 2 interactions est définie par :

$$p(I, I') = a_I \times sim(I, I') \tag{2.4}$$

où sim est la mesure de similarité introduite à l'équation 2.3. La définition de la mesure de similarité garantit que $p(I, I') < a_I$ quelles que soient les interactions considérées. On a donc une propagation avec atténuation de l'activité source. En un point s donné de l'espace, le degré d'activité sera influencé par l'activité diffusée $p(I, s)$ issue de chacune des interactions voisines I. Ces influences seront combinées entre elles, avec d'autres éléments de nature anticipative, selon un calcul d'intégration qui sera décrit plus loin.

Cette diffusion locale est à rapprocher de phénomènes similaires présents dans la majorité des systèmes vivants (hormones, neurohormones, neurotransmetteurs) ou même physiques (ondes). Les diffusions chimiques ont de plus précédé l'apparition des connexions nerveuses, qui ne les ont pas pour autant supplantées dans les organismes actuels. Ces diffusions ne sont généralement pas instantanées mais s'opèrent parfois à des rythmes bien plus rapides que celui des processus que ces substances affectent.

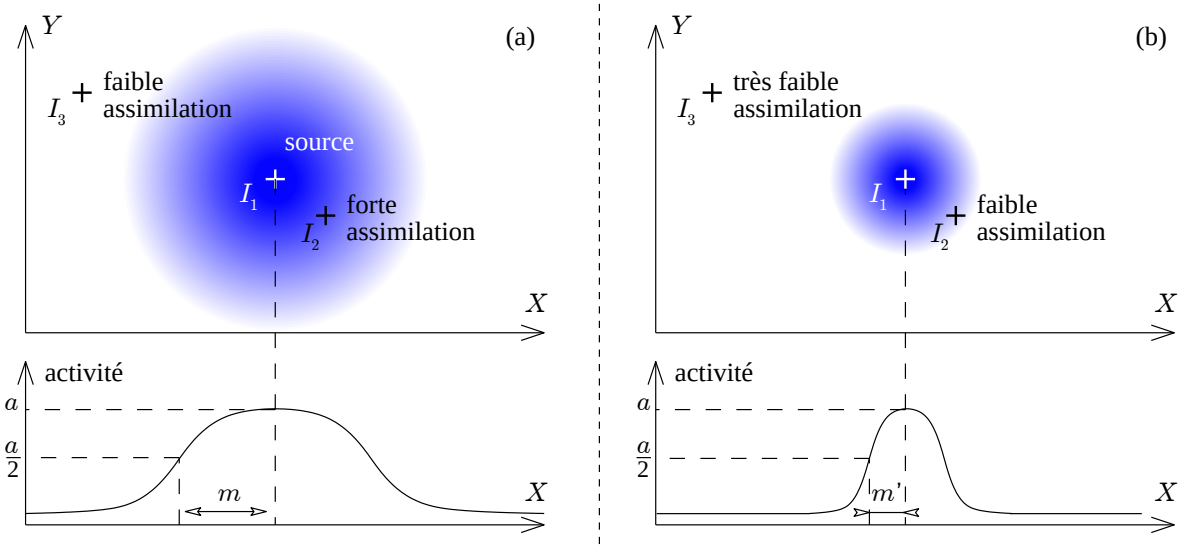


FIGURE 2.4 – (*a*) Pour le paramètre m de la sigmoïde symétrisée, l'interaction I_2 assimile bien la "situation" I_1 alors que I_3 l'assimile mal. (*b*) Avec la valeur m', les deux interactions sont peu similaires à la situation. Néanmoins, quelle que soit la valeur du paramètre, la relation d'ordre entre les assimilations reste la même.

2.2.2 Réduction des potentialités en une valeur unique

Cette réduction est effectuée pour chaque variable à la fin de la boucle sensori-motrice, afin de déterminer les actions à effectuer par l'agent sur son environnement. La réduction sur les variables correspondant aux sensations n'est pas exploitée, mais permet au concepteur d'observer les perceptions et croyances de l'agent (qui peuvent différer des sensations réelles).

En accord avec les remarques sur la concurrence (ou redondance) possible des processus parallèles, de nombreuses zones de l'espace d'interaction peuvent être actives en parallèle. Même si tous les éléments du modèle ne sont pas encore introduits, on peut déjà indiquer que l'activité dans le réseau évoque une potentialité. Si on considère qu'une dimension code par exemple la position d'un signal lumineux dans le champ visuel, de nombreuses entrées sensorielles en provenance de diverses zones réduites de la rétine peuvent lui être associées (figure 2.5). La perception résulte alors de l'activité exogène en provenance de la rétine mais aussi de l'activité endogène de l'espace des interactions [41]. Néanmoins lorsqu'une action doit être prise dans le monde réel (tout du moins en robotique), il faut pouvoir déterminer une valeur unique encodant un mouvement à effectuer ou une force à appliquer. Ainsi lorsque la dimension de l'espace d'interaction concerne une action, l'ensemble des potentialités évoquées par l'activité doit être réduit à une valeur unique. Pour une analogie avec la physique, on peut penser à la fonction de réduction du paquet d'onde en physique quantique lorsqu'une mesure est effectuée.

Afin de réaliser la réduction, une moyenne des valeurs pondérée par l'activité est effectuée. On obtient ainsi une valeur unique v_red (pour v *réduite*). Pour le formuler autrement, on calcule le barycentre de toutes les interactions pour lesquelles la dimension considérée est définie, les coefficients étant déterminés par l'activité associée aux interactions :

$$v_{red} = \frac{1}{\sum_{I \in \mathcal{I}} a_I^p} \sum_{I \in \mathcal{I}} a_I^p v_I \tag{2.5}$$

où $\mathcal{I}$ est l'ensemble des interactions pour lesquelles la dimension V est définie. v_I est la valeur de la variable V (la dimension considérée) pour l'interaction I, a_I l'activité de l'interaction I et v_{red} le résultat de la réduction. Le paramètre p permet d'écarter les valeurs et limiter l'influence d'une masse d'activités mineures. En pratique, la valeur résultante s'éloigne peu de celle des interactions les plus actives, celles dans lesquelles l'agent croit le plus.

Loin d'être parfaite, l'utilisation d'une moyenne pondérée et d'une fonction puissance pour les coefficients à l'avantage d'être rapide. Le principal problème reste que, quelle que soit la valeur du paramètre p et la faiblesse des activités parasites relativement à une activité forte, un nombre d'interactions suffisant annulera l'avantage fourni à l'activité forte par la fonction puissance. Plus formellement :

$$\begin{aligned} &\forall (v_{max}, a_{max}) \in \mathbb{R}^2, \forall p, \exists N \in \mathbb{N}, \exists (v_i, a_i) \in \mathbb{R}^{2^N} \text{ tels que} \\ &\quad \forall i \in [1; N], a_i \ll a_{max} \text{ et } |v_{red} - \overline{v}| > |v_{red} - v_{max}| \end{aligned} \tag{2.6}$$

où v_{red} est défini d'après l'équation 2.5 et $\overline{v}$ est la moyenne de toutes les valeurs $(v_i)_{i \in [1;N]} \bigcap \{v_{max}\}$.

Même si la valeur réduite ne correspond pas exactement à la "réalité" à cause de l'influence de l'ensemble des interactions, l'algorithme est relativement robuste au bruit perceptif. Si un

41. La distinction endogène/exogène est discutable puisque toute activité propagée en interne a tôt ou tard été influencée par une activité externe, même si on ne peut jamais réellement parler de causalité

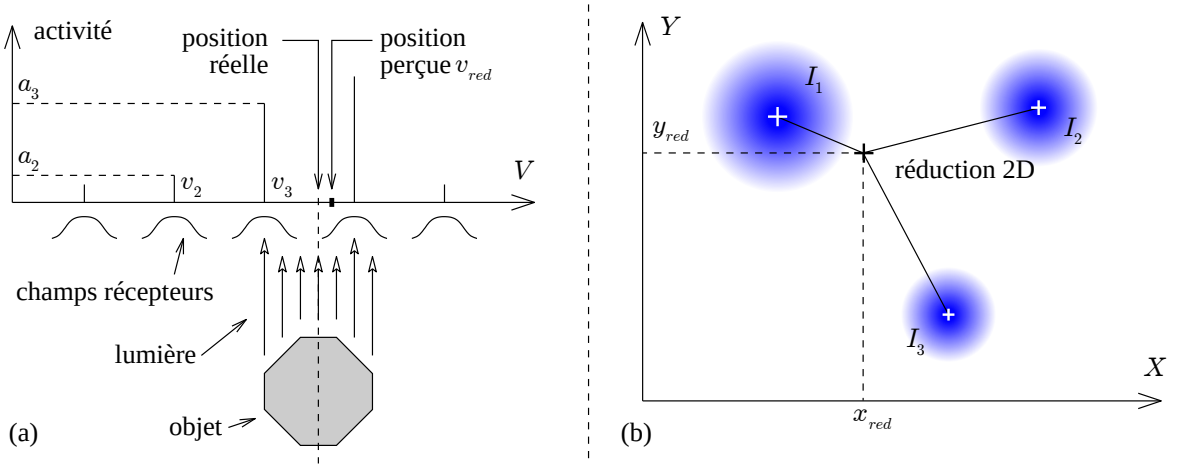


FIGURE 2.5 – (*a*) Différentes stimulations de la rétine dans des zones différentes peuvent conduire à une perception unique et continue quand elles sont combinées. (*b*) La réduction des potentialités (activités) en 2D permet de mieux percevoir l'aspect barycentrique de la fonction. Les interactions de plus forte activité constituent des attracteurs plus puissants.

capteur est dysfonctionnel ou qu'un obstacle cache une partie de l'objet de la figure 2.5a, la redondance des informations permet à l'algorithme de fonctionner tant bien que mal. De plus, le système étant intégré dans un environnement dynamique, de petites variations ou erreurs locales seront compensées par les interactions ultérieures. Les itérations de réduction permettent ainsi de stabiliser les décisions et actions.

D'autres fonctions ou algorithmes de réduction ont été envisagés. Mes travaux de Master m'ont par exemple permis de tester l'utilisation de nombres flous et de la théorie de la commande floue pour maximiser le recouvrement et choisir la valeur la plus adéquate [Quinton, 2005]. L'approximation par une gaussienne de la distribution d'activité en utilisant la méthode des moindres carrés ou l'application de régressions linéaires par morceaux ont également été tentées sans grand succès. Malgré des résultats potentiellement meilleurs, la lourdeur des calculs et la complexité des dynamiques étudiées (majoritairement non linéaires) rendent toutes ces approches incompatibles avec des applications temps-réel sur un grand nombre de dimensions.

2.3 Anticipation

2.3.1 Tunnels d'activité

L'espace jusqu'à présent décrit reste passif et soumis à la dynamique de l'environnement. La notion d'anticipation est donc introduite pour introduire un aspect prédictif dans le modèle. Une anticipation se présente ici comme un raccourci dans l'espace d'interaction qu'on peut s'imaginer comme un tunnel d'activité reliant deux interactions distantes. L'activité est ainsi propagée par l'anticipation sur des distances inatteignables par une diffusion simple. Dans les schémas à venir, les interactions se limiteront à des points pour faciliter la représentation graphique et les anticipations seront représentées par des flèches reliant une interaction source à une interaction prédite (figure 2.6a).

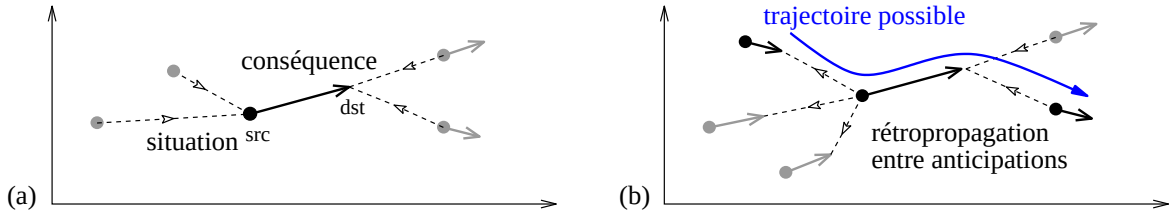


FIGURE 2.6 – (*a*) L'anticipation considérée (*flèche noire*) intègre l'activité d'autres interactions (*points gris*) à sa source (situation) et d'autres anticipations (*flèches grises*) à son autre extrémité (conséquence). (*b*) Un ensemble d'anticipations définit une classe de trajectoires (*courbe bleue*) dans l'espace des interactions parmi l'infinité des trajectoires possibles.

Dans la suite, les fonctions p_M et p_m, respectivement utilisées pour les interactions et les anticipations, correspondent à la fonction p (voir équation 2.4) paramétrée avec des valeurs différentes de m. La fonction à longue portée (p_M) sera réservée aux sensations et actions avec l'environnement, alors que la propagation à faible portée pour les anticipations (p_m) permettra de limiter la complexité du système et des mises à jour.

Pour une anticipation A définie par le couple (src, dst), où src et dst sont deux interactions distantes, l'activité a_A est le produit de l'ensemble des expressions ci-dessous. Tout d'abord, une anticipation intègre l'activité d'autres interactions à sa source src :

$$a_{src} = \max_{I \in \mathcal{I}} p_M(I, src) \tag{2.7}$$

où $\mathcal{I}$ est l'ensemble des interactions de l'espace. On recherche ici les anticipations qui s'assimilent mutuellement le mieux, relativement à la situation courante, d'où l'utilisation du max. Une somme pondérée par l'activité propagée pourrait convenir mais elle conduit à des biais négatifs trop importants dans l'activité intégrée résultante. Bien sûr, seules les interactions les plus similaires seront les plus influentes et on peut négliger l'effet de quantité d'interactions de l'espace hors d'un certain rayon.

Chaque anticipation intègre aussi l'activité d'autres anticipations qui la suivent au "point" dst :

$$a_{dst} = \max_{B \in \mathcal{A}} p_m(src_B, dst) \tag{2.8}$$

où $\mathcal{A}$ est l'ensemble des anticipations de l'espace et src_B est l'interaction source de l'anticipation $B = (src_B, dst_B)$.

Enfin l'anticipation combine les deux activités précédentes en une activité unique. On calcule cette fois-ci une somme pondérée des activités source et destination. En effet une anticipation n'est valable que si ce qu'elle prédit est intéressant et réalisable, et si elle même est adaptée à la situation, c'est-à-dire si les deux activités sont élevées :

$$a_A = (1 - \alpha) \times a_{src} + \alpha \times a_{dst} \tag{2.9}$$

où $\alpha \in [0; 1]$ détermine la part de réactivité et d'anticipation dans la dynamique du système. En effet pour $\alpha = 0$, les anticipations "futures" n'auront aucune influence sur le champ d'activité et le système sera purement réactif. A l'inverse, une valeur du paramètre *alpha* égale à 1 éliminera le premier terme de l'expression et l'espace d'interaction reposera intégralement sur son activité

interne, totalement coupé de son environnement.

Ce nouvel élément introduit est nommé anticipation car la propagation d'activité est orientée et brise ainsi la symétrie du système. L'aspect temporel associé au terme anticipation provient de l'exclusivité d'interactions distantes. Dans un univers déterministe, deux situations différentes ne seront jamais rencontrées simultanément. Ainsi, même si les interactions et anticipations sont toutes simultanément actives, elles n'évoquent que des potentialités ; l'évolution réelle de la situation résultant des interactions entre l'agent et son environnement suivra une trajectoire unique dans l'espace des interactions. Deux points distincts de cette trajectoire correspondront alors à deux instants distincts du comportement (figure 2.6b).

La généralité/spécificité des interactions introduites en section précédente peut être étendue aux anticipations. Les anticipations plus spécifiques (dont les interactions source et destination sont plus spécifiques) auront une activité supérieure aux anticipations générales, puisque la fonction de propagation utilise la mesure de similarité. Appliqué au mouvement corporel, la rotation d'un segment corporel autour d'une articulation est généralement possible et peut-être représentée par $(\alpha, f) \rightarrow (\alpha + \Delta\alpha)$ soit le couplet $((\alpha, f), (\alpha + \Delta\alpha))$ en suivant les notations précédentes (avec α l'angle entre deux segments successifs et f la force appliquée). Lorsque plusieurs articulations sont mises en jeu simultanément, le mouvement est davantage contraint par le couplage physique entre les segments et certaines positions ne sont plus atteignables. Pour fournir un exemple simple et facilement réalisable, croiser l'index et le majeur rend impossible la flexion complète de ces doigts (c'est du moins le cas pour moi). La position relative des doigts influence donc la flexion des articulations individuelles. Les "variables" traduisant l'entrelacement des doigts entrent donc en jeu dans des anticipations plus spécifiques et conditionnent la réalisabilité de la flexion normale. Les deux types d'anticipations considérées peuvent être exprimés de la façon suivante :

- Flexion normale : doigts tendus + contraction des muscles → doigts pliés
- Flexion croisée : doigts tendus + croisés + contraction des muscles → doigts tendus + contraintes exercées

3

Propriétés du modèle et coordination généralisée

Sommaire

3.1 Propriétés du champ d'activité 88
3.1.1 Continuité 88
3.1.2 Activité bornée 89
3.2 Coordination 90
3.2.1 Attracteurs 90
3.2.2 Régulation 91
3.2.3 Alternance et dynamique d'attracteurs 94
3.3 Rythmes et hiérarchie 95
3.3.1 Différenciation de sous-espaces 95
3.3.2 Couches optionnelles 95
3.3.3 Coordination temporelle et spatiale multi-échelle 97

Introduction

La coordination implicite induite par ce modèle est l'aspect réellement novateur de cette thèse, reposant sur les éléments introduits au chapitre précédent. A mon sens, à l'exception de certaines applications des systèmes multi-agents, nous sommes les seuls à proposer une coordination dynamique et implicite entre des processus spécialisés quoiqu'homogènes. Les rares approches présentées dans le chapitre traitant des modèles existants proposant une coordination dynamique le font en effet par échanges de messages ou application de règles d'inférence et d'unification. Les schémas, experts, codelets sont alors successivement appliqués et contrôlés de manière centralisée, que ce soit dans un module dit "attentionnel" ou usant de toute autre dénomination similaire. Les inférences alors réalisées sont peu adaptées à un environnement hautement dynamique et bruité, tel que peut l'être le monde réel.

De nombreux algorithmes existent en théorie des graphes pour rechercher des trajets optimaux dans des réseaux complexes. Il n'est pas question ici de concurrencer leur performance. Néanmoins, comparer la coordination implicite présentée ici aux algorithmes de recherche heuristiquement ordonnée peut faciliter la compréhension de ce chapitre. Une première différence

flagrante est que le modèle proposé ne dispose pas de connexions point à point entre les anticipations qui sont autonomes et peuvent être mises à jour dynamiquement. On peut néanmoins introduire artificiellement des arcs entre les conséquences et sources d'anticipations distinctes, auxquels on associe la mesure de similarité entre interactions comme poids (figure 3.1). On se ramène ainsi à un graphe classique à forte connexité. L'heuristique exploitée pour orienter la progression dans le graphe est ici la distribution du champ d'activité (on supposera pour l'instant qu'on s'approche d'un but lorsque le gradient d'activité est positif). La dynamique du modèle induit d'autres différences : l'ensemble du champ d'activité, de même que le nœud initial et le nœud final dans la recherche heuristique sont ici dynamiques et modifiés à chaque mise à jour. De plus, la moindre interaction avec l'environnement peut entraîner la création de nouvelles anticipations par apprentissage et modifier la topologie du graphe. C'est pourquoi, alors que les algorithmes de recherche ordonnée sont généralement utilisés pour générer un chemin complet unique, la coordination implicite présentée ici est appliquée en continu, au fil des interactions avec l'environnement.

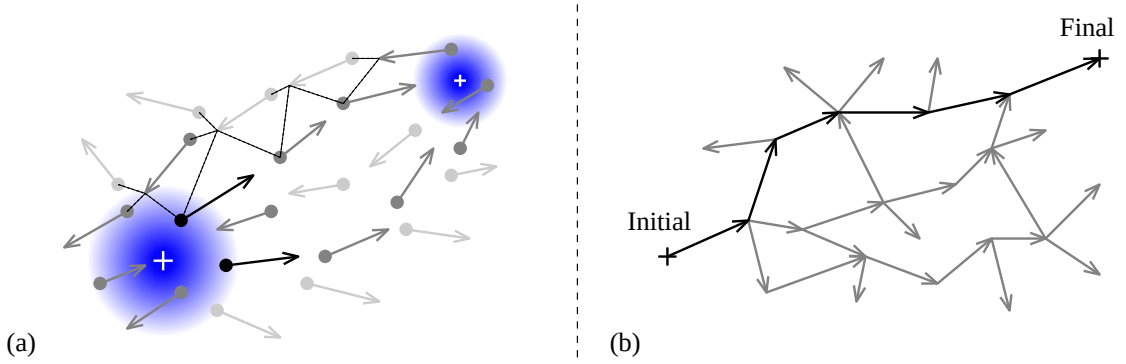


FIGURE 3.1 – Alors que les connexions sont explicites dans un graphe (b), elles résultent de propagations (*pointillés*) dans l'espace d'interaction (a). Alors que la coordination implicite de cette thèse met à jour un champ d'activité afin de décider de la prochaine décision à prendre en continu, les algorithmes de recherche ordonnée déterminent dans le graphe un chemin unique et discret. Alors que le graphe est plus ou moins statique, le champ d'activité est modifié en permanence. En particulier, les notions de début et de fin, ici grossièrement équivalentes aux interactions (*croix blanche et diffusion bleue*) sont dynamiques.

3.1 Propriétés du champ d'activité

3.1.1 Continuité

Si la dynamique de l'environnement est supposée continue et le champ d'activité initialement nul [42], le champ d'activité sera lui aussi continu aussi bien spatialement que temporellement car résultant de la composition de fonctions toutes continues. La continuité ne change en soi rien au modèle mais les propriétés de convergence et l'analyse du système en termes d'attracteurs dynamiques s'en trouvent fortement simplifiées.

42. Le champ initial d'activité peut avoir une répartition d'activité quelconque tant qu'elle reste continue, mais pour des raisons de simplicité, il sera toujours initialisé à 0.

Bien qu'un échantillonnage soit toujours requis en informatique et robotique pour interagir avec un environnement réel ou virtuel, on peut supposer la période d'échantillonnage aussi petite que nécessaire pour se ramener à la définition d'une fonction continue. La fonction f est continue en a si : $\forall \varepsilon > 0, \exists \eta, \forall x$ tel que $|x-a| \leq \eta, |f(x)-f(a)| \leq \varepsilon$ (où η dépend de la fréquence d'échantillonnage)

3.1.2 Activité bornée

Si l'on suppose que l'activité induite par l'environnement sur le champ d'activité est bornée dans l'intervalle $[0; M]$, et que l'activité initiale en tout point du champ d'activité est également comprise dans ce même intervalle (a fortiori si elle est nulle), l'activité restera bornée dans $[0; M]$ quelle que soit la configuration de l'espace en termes d'interactions et d'anticipations. Cette propriété ne garantit en aucun cas la convergence de l'activité, mais prouve que le système ne voit pas son activité diverger vers l'infini et son comportement devenir instable. Une preuve de convergence globale n'aurait d'ailleurs aucun intérêt puisque qu'on s'intéresse à la dynamique du champ d'activité.

Les interactions ne faisant que diffuser l'activité provenant de l'environnement, on a trivialement : $\forall t \in \mathbb{N}, \forall I \in \mathcal{I}, a_I(t) \in [0; M]$ où $a_I(t)$ est l'activité de l'interaction I à l'instant discret t.

La preuve pour les anticipations peut se faire par récurrence sur t. On veut montrer la propriété : $\forall t, \forall A \in \mathcal{A}, a_A(t) \in [0; M]$.

- Pour $t = 0$, on a supposé que le champ satisfaisant initialement la condition, donc $\forall A \in \mathcal{A}, a_A(0) \in [0; M]$.
- Soit $t \in \mathbb{N}$ tel que $\forall A \in \mathcal{A}, a_A(t) \in [0; M]$. Montrons que $\forall A \in \mathcal{A}, a_A(t+1) \in [0; M]$:

		$\forall (A, I) \in \mathcal{A} \times \mathcal{I}$:	
		$p_M(I, src_A)(t+1) = a_I(t+1) sim_M(I, src)$	d'après l'équation 2.3
$\Rightarrow$		$0 \leq p_M(I, src_A) \leq a_I(t+1)$	car sim_M sigmoïde
$\Rightarrow$	(1)	$p_M(I, src_A) \in [0; M]$	car $\forall t, \forall I, a_I(t) \in [0; M]$
		$\forall A \in \mathcal{A}$:	
		$a_{src_A}(t+1) = \max_{I \in \mathcal{I}} p_M(I, src_A)$	d'après l'équation 2.7
$\Rightarrow$	(2)	$a_{src_A}(t+1) \in [0; M]$	d'après (1)
		$\forall (A, A') \in \mathcal{A}^2$:	
		$p_m(src_{A'}, dst_A)(t+1) = a_{src_{A'}}(t) sim_m(src_{A'}, dst_A)$	d'après l'équation 2.2
$\Rightarrow$		$0 \leq p_m(src_{A'}, dst_A) \leq a_{src_{A'}}(t)$	car sim_m sigmoïde
$\Rightarrow$	(3)	$p_m(src_{A'}, dst_A) \in [0; M]$	hypothèse de récurrence
		$\forall A \in \mathcal{A}$:	
		$a_{dst_A}(t+1) = \max_{A' \in \mathcal{A}} p_m(src_{A'}, dst_A)$	d'après l'équation 2.8
$\Rightarrow$	(4)	$a_{dst_A}(t+1) \in [0; M]$	d'après (3)
		$\forall A \in \mathcal{A}$:	
		$a_A(t+1) = (1-\alpha) a_{src}(t+1) + \alpha a_{dst}(t+1)$	d'après l'équation 2.9
$\Rightarrow$		$(1-\alpha) \times 0 + \alpha \times 0 \leq a_A(t+1) \leq (1-\alpha) M + \alpha M$	d'après (2) et (4)
$\Rightarrow$		$a_A(t+1) \in [0; M]$	

- Donc $\forall t, \forall A \in \mathcal{A}, a_A(t) \in [0; M]$.

3.2 Coordination

Les processus interactifs décrits de manière théorique depuis le début de ce manuscrit résultent de la dynamique de l'activité des interactions et des anticipations. Chaque interaction peut être conçue comme une situation possible sur la trajectoire de la dynamique de l'agent. Une séquence d'anticipations peut ainsi déterminer une trajectoire orientée (figure 3.2). Cette trajectoire est le produit de la coordination des anticipations, permise par les propagations d'activités au sein de l'espace d'interaction.

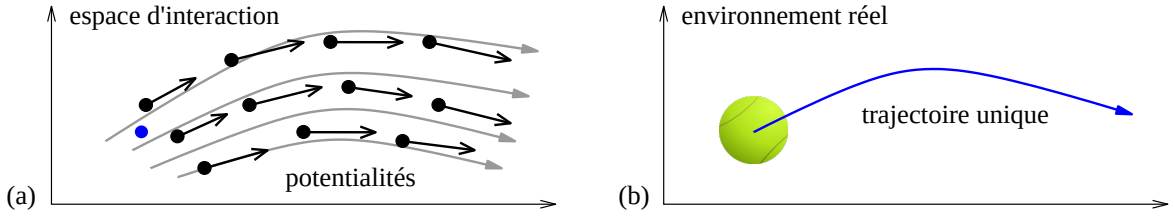


FIGURE 3.2 – (*a*) Dans l'espace des interactions, les anticipations déterminent une infinité de trajectoires possibles. Elles sont imaginées mais éventuellement irréalisables physiquement. (*b*) Seules les interactions avec l'environnement réduiront l'ensemble des possibles à une trajectoire unique.

3.2.1 Attracteurs

Toutes les anticipations du modèle étant simultanément actives, elles jouent toutes continûment le rôle d'attracteurs. La raison en est simple :

1. Chaque anticipation propage son activité aux anticipations qui la précèdent.
2. Chaque anticipation influe d'autant plus sur les actions de l'agent que son activité est élevée.

Donc plus une anticipation sera active, plus les anticipations qui la précèdent le seront, avec une atténuation spatiale suivant la topologie et la mesure de similarité de l'espace d'interaction. Les anticipations proches assimilant des situations similaires, elles auront un effet important sur les interactions avec l'environnement. Elles constituent ainsi des attracteurs locaux pour la dynamique de l'agent.

Néanmoins le système ne converge jamais vers des attracteurs statiques. L'activité des anticipations étant partiellement issue des interactions avec l'environnement, chaque sensation influe sur le paysage dynamique de l'activité. La zone de plus forte activité correspond ainsi généralement à la situation présente. Pour faire un parallèle avec la perception humaine, qu'est-ce qui rend la lecture de cette thèse plus réelle qu'une autre pensée ? Si on adhère aux idées développées dans ce manuscrit, ce n'est pas la nature même des processus mis en jeu, mais le simple fait que chaque interaction avec l'environnement, même le fait de détourner les yeux de la page, confirme des anticipations liées à la lecture de celle-ci. Des pensées peuvent momentanément prendre le dessus et entretenir leur propre activité, mais s'effacent rapidement et laissent place à d'autres pensées ou interactions en contact plus direct avec la réalité.

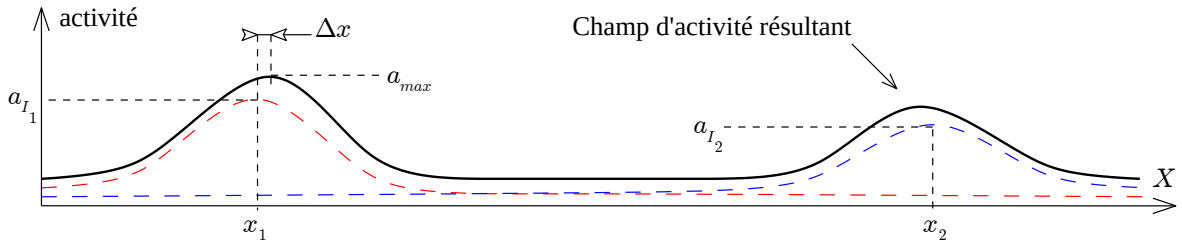


FIGURE 3.3 – Lorsque deux attracteurs locaux (*activité diffusée en pointillés*) sont combinées dans le champ d'activité global via la propagation par les anticipations (simplifiée par une addition ici), la zone autour de l'interaction d'activité a_1 demeure la plus attractive (maximum global de la *courbe continue*). L'effet faible mais non négligeable de l'autre source d'activité attire néanmoins à lui le maximum d'activité ($x_1 < x_{max} < x_2$). Cette légère déviation locale (Δx), influençant les actions et répétée à chaque cycle sensori-moteur, conduit irrémédiablement de la situation x_1 très présente à x_2 plus faiblement activée.

La dynamique du système formé par les anticipations n'en est pas pour autant réactive. Même si l'activité se concentre autour des sensations présentes, l'activité interne propagée affecte le champ d'activité (ne serait-ce qu'un peu, voir figure 3.3). Détail primordial sur lequel je n'ai pas encore insisté, la réduction des actions s'opère sur la conséquence des anticipations. Bien que la source des anticipations assimile la situation présente, les actions sont toujours tournées vers le futur, favorisant la transition vers les conséquences et l'enchaînement des anticipations. Le système est ainsi engagé dans une activité permanente, toute situation rencontrée augmentant le degré d'activité d'anticipations différentes et engendrant de nouvelles actions.

La tendance est ainsi à la convergence des attracteurs en un point unique (ceux-ci étant influencés par les actions et les changements de l'environnement). Cet "état" n'est malgré tout jamais atteint. Il faut rappeler à ce niveau qu'on s'intéresse en principe à des systèmes loin de l'équilibre thermodynamique. L'existence et stabilité d'un tel état signifierait qu'une situation satisferait simultanément tous nos intérêts, envies, désirs et besoins. Pire que ça, il devrait satisfaire toutes nos anticipations...

La notion de système dynamique loin de l'équilibre thermodynamique pour des systèmes mathématiques ou informatiques n'a pas été formellement introduite jusqu'à présent. Mon point de vue, loin d'être partagé par la communauté scientifique, est que n'importe quel agent/robot peut avoir des besoins, qu'ils soient introduits par une contrainte physique (énergie consommée, dégradation des pièces mécaniques, ...) ou artificiellement par le concepteur. Ceux-ci n'ont pas à être des variables explicites à maximiser, mais sont assimilés par des processus innés se coordonnant avec les autres pour être satisfaits. Il n'est pas nécessaire à un être humain de mourir de faim pour comprendre que manger satisfait le besoin qu'il ressent. L'évolution nous a pourvus de systèmes biologiques permettant d'anticiper sur le manque réel, et le signal chimique ou nerveux perçu ne porte pas en lui le concept de faim ou de nécessité.

3.2.2 Régulation

Les anticipations ne restent souvent que des potentialités, seules les anticipations dont l'activité est la plus forte influenceront suffisamment la dynamique de l'agent pour affecter ses interactions avec l'environnement. En effet, le comportement de l'agent est déterminé par l'activité

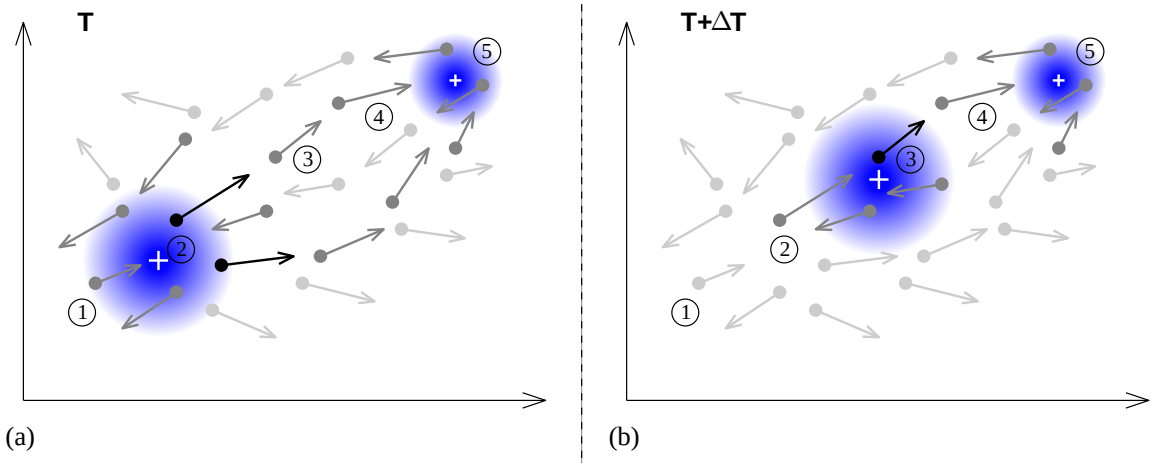


FIGURE 3.4 – (*a*) Les sensations en provenance de l'environnement déterminent la forme globale du champ d'activité (②,⑤), reflétant la situation réelle du moment. Les anticipations les plus actives (*flèches noires*) sont celles qui partent d'une interaction assimilant les sensations prépondérantes (②), et sont sur les trajectoires les plus courtes liant des attracteurs distants. (*b*) Les actions effectuées entre T et $T + \Delta T$, déterminées par les anticipations les plus actives, conduisent à une nouvelle situation (③,⑤) transformant l'intégralité du champ d'activité.

globale résultant de toutes les interactions et anticipations, comme décrit au chapitre précédent. Plusieurs anticipations fortement actives ne se limitant pas à l'observation et l'anticipation de la dynamique de l'environnement, c'est-à-dire proposant des actions, peuvent influer sur les actions de l'agent. De par la somme pondérée qui est utilisée pour réduire les actions (en somme prendre une décision), une forme simple de régulation est opérée sur toutes les dimensions, aussi bien sensorielles que motrices. La valeur résultant de la réduction est un compromis entre des anticipations concurrentes qui, puisqu'elles sont actives, sont de toute manière adaptées à la situation. Il y a là une forme de régulation, puisque la trajectoire des interactions de l'agent est automatiquement ramenée au voisinage d'une anticipation forte s'il lui arrivait de s'en écarter.

Une conséquence de cette micro-régulation continue entre anticipations est l'apparition de variabilité locale. Si l'on considère deux attracteurs principaux à la manière de la figure 3.4, des aspects non anticipés de la dynamique de l'environnement, du bruit dans la commande motrice ou des imperfections dans la perception peuvent modifier légèrement la trajectoire empruntée dans l'espace d'interaction. Tant que les attracteurs principaux ne changent pas (c'est-à-dire en l'absence de changement de phase), les interactions seront constamment régulées pour conduire aux buts implicites que définissent ces attracteurs.

La coordination décrite ci-dessus est relativement générale, on peut qualifier plus précisément les phénomènes émergents selon les types d'interactions et d'anticipations impliqués :

– On peut tout d'abord revenir sur l'exemple de préhension d'un objet pris au début de cette partie. Si des interactions simples et directes ne permettent pas d'atteindre l'objet, la trajectoire la plus courte dans l'espace d'interaction nécessitera peut-être de se tourner entièrement ou de se lever. Seuls des mouvements acquis (dont les conséquences sont anticipées) pourront participer à la trajectoire. Ainsi, il suffit parfois de peu de temps

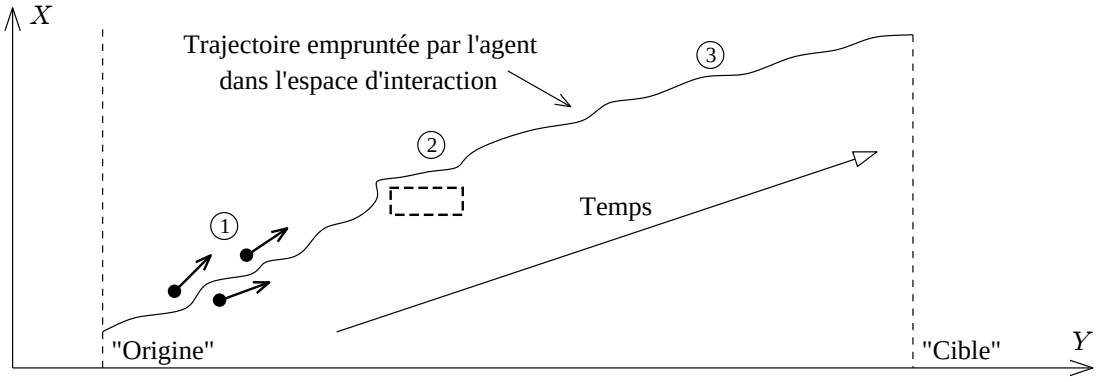


FIGURE 3.5 – Exemple de trace de convergence globale vers un "but implicite" résultant de la coordination des anticipations. Ont été surimposées des causes possibles de variabilité locale qui écarte la trajectoire réelle (*trait continu*) de la ligne droite optimale : ① Imprécision ou trop faible nombre d'anticipations. ② Contraintes non anticipées de l'environnement tel qu'un obstacle (*rectangle en pointillés*) empêchant le mouvement spontané de l'agent. ③ Émergence d'oscillations rapides provenant de la dynamique des propagations et des délais dans la boucle sensori-motrice.

pour apprendre à soulever une charge lourde sans se blesser, mais les bons mouvements sont rarement utilisés par le novice, qui sous-exploite certains membres ou se positionne mal.

- Si la trajectoire la plus simple intègre des interactions avec un outil, celui-ci sera utilisé dans le comportement global. Ainsi les limites du système ne se réduisent pas au corps physique de l'agent. Le concept d'outil peut ainsi être défini par l'ensemble des interactions qui le coordonne avec l'activité du sujet (le prendre, le manier, le poser). Il n'est ainsi ni une partie du corps (car seulement présent dans une petite partie de l'espace d'interaction) ni un objet quelconque (qui ne participe pas à d'autres activités).
- Si une sensation physique stable (telle la présence d'une neurohormone associée à la soif) active une partie de l'espace, l'agent ne pourra échapper à son pouvoir attracteur quelles que soient ses actions. Si le temps aidant, elle devient l'attracteur principal du système dynamique, toute l'activité de l'agent se concentrera sur la satisfaction du besoin. La satisfaction de besoin dits "vitaux" nécessite la plupart du temps la coordination du métabolisme (sur lequel on n'a que peu de contrôle) et d'interactions qui sont loin d'être innées ou immédiates (l'ouverture d'un réfrigérateur ou d'un robinet par exemple...).
- Même si le modèle actuel reste à un niveau sensori-moteur, toute planification s'exprime comme la coordination de moyens pour atteindre un but, quel que soit leur niveau d'abstraction. La majorité des comportements humains sont mêmes une combinaison d'abstractions et d'interactions physiques. On peut penser à la lecture d'instructions pour monter un meuble en kit ou ouvrir un emballage.
- Tout acte de langage peut-être également interprété dans les mêmes termes. La question "Pouvez-vous me passer le sel ?" est un des nombreux moyens d'obtenir le sel, et on n'a pas besoin d'en connaître la sémantique exacte pour l'utiliser. On pourrait tout aussi bien se lever pour aller le chercher, mais ce comportement est contraint par des règles de politesse et d'autres abstractions. L'action est ici verbale et effectuée sur un environnement composé d'individus humains dont la réaction est prédictible. On n'anticipe pas une réponse

verbale positive, mais une action physique.

Même si tous les comportements théoriquement couverts par ce modèle de coordination n'ont pas été testé, l'utilisation d'une coordination implicite basée sur l'activité pour déterminer les actions à effectuer permet de mêler dans une même dynamique des besoins ancestraux et des abstractions construites pendant la vie.

3.2.3 Alternance et dynamique d'attracteurs

Le poids des attracteurs dépend des dynamiques internes et externes de l'agent. Si les actions permettant d'atteindre deux attracteurs sont contradictoires, le sujet ne pourra en atteindre qu'un à la fois. Bien qu'un équilibre parfait et une situation d'indécision interminable soient théoriquement imaginables, la dynamique permanente de l'environnement et du champ d'activité entraînera tôt ou tard un changement de phase (la décision). Le moindre déséquilibre augmentera le niveau d'assimilation de la situation par certaines anticipations. L'accroissement de leur activité augmentera leur pouvoir attracteur et le déséquilibre sera amplifié.

La plupart des attracteurs "naturels" perdent de leur activité une fois approchés. Pour prendre un cas concret, l'avalement d'une gorgée d'eau entraîne quasi-immédiatement la diminution des neurohormones de la soif diffusées dans le cerveau, avant même que le moindre changement au niveau de la physiologie cellulaire n'ait pu avoir lieu. La soif disparaît alors avant que le besoin profond qui a conduit à l'apparition de l'hormone durant l'évolution ne soit réellement satisfait. Cela n'a pourtant rien de surprenant, la soif surgit de même avant que le besoin ne soit réel, sans quoi des millions de cellules mourraient avant que l'eau avalée ne puisse les sauver [43]. De ce point de vue, les buts peuvent être conçus comme des anticipations bloquées quoique partiellement activées, attirant à elles l'activité, les actions et donc le sujet pour être satisfaites. Une fois que l'attracteur de plus fort poids perd de son activité, il existe toujours un autre point de l'espace pour servir de nouvel attracteur, puisque seule compte l'activité relative des anticipations sans qu'aucun seuil ne soit introduit.

Un cas qui peut sembler critique est celui où deux attracteurs gagnent alternativement en puissance et luttent pour s'accaparer l'activité. L'agent n'ayant jamais le temps d'atteindre un attracteur, celui-ci pourrait osciller entre les deux alors que les deux attracteurs inondent l'espace d'une activité croissante. Mais, que ce soit parce que l'agent n'a pas appris à le faire ou parce qu'une contrainte physique l'empêche, toute interaction ne peut s'appliquer à n'importe quel instant. De nombreux comportements sont en effet cycliques, ou tout du moins, non symétriquement réversibles : c'est le cas de la plupart des mouvements corporels. Une fois une séquence d'interactions engagées, l'agent sera conforté dans ses anticipations et une bifurcation dans le comportement ne sera possible qu'en certaines zones de l'espace d'interaction (là où de nombreuses anticipations peuvent s'appliquer). Bien sûr, si la puissance de l'attracteur concurrent devient écrasante, tous les moyens seront bons pour "rebrousser chemin".

L'alternance des attracteurs et leur dynamique ne sera pas davantage détaillée ici, puisqu'une application développée en troisième partie a été dédiée à leur étude (voir le chapitre sur l'avalement et la respiration).

43. On est ramenés au problème abordé en première partie des dynamiques lentes impliquées par la taille et la complexité croissante des espèces dans l'évolution. Les signaux nerveux ne se seraient pas transmis de génération en génération si cette accélération des communications et anticipation précoce n'avait pas été nécessaires.

3.3 Rythmes et hiérarchie

3.3.1 Différenciation de sous-espaces

Le potentiel recouvrement de l'ensemble des dimensions par un ensemble de sous-espaces permet la modularité. Ce regroupement d'interactions par les dimensions qui les unissent n'a pas à être rigide ou explicite. A la manière de marqueurs chimiques ou de neurotransmetteurs ciblés, la propagation d'activité n'affecte que les interactions couplées via des dimensions communes. Ainsi, bien que l'ensemble des interactions puissent partager le même espace, leur communication n'est pas homogène.

Même si les dimensions décrites jusqu'à présent semblent limiter le système au niveau sensori-moteur, en contact direct avec l'environnement immédiat, il n'interdit pas la construction de nouvelles dimensions. De plus, une perception pour un système peut parfaitement être une action pour un autre. Ainsi plusieurs sous-systèmes dans des espaces différents peuvent interagir par leurs dimensions communes, et ces dimensions quoique indifférenciables des autres actions et sensations peuvent n'avoir qu'un rôle de médiateur, sans aucune relation directe avec une quelconque réalité physique.

Une anticipation, perdant sa dimension temporelle, peut lier deux interactions "spatialement" corrélées. Ces interactions peuvent par exemple concerner deux modalités perceptives différentes. La perception d'une pièce de monnaie tombant au sol peut moduler la perception du bruit que fait cette pièce en touchant le sol. On peut ainsi retrouver une forme de modularité chère à de nombreuses théories, les dits modules communicant par le biais d'anticipations réciproques. Mais il est aussi possible que les phénomènes soient si intimement liés qu'il devient impossible de les distinguer et qu'ils fassent partie d'un même espace d'interaction. La différence n'est alors pas dans la nature des connexions entre les diverses interactions, mais dans leur nombre. On peut considérer que le système global est représenté dans un espace unique disposant d'interactions aux connexions plus ou moins denses, ou bien qu'il est formé de modules reliés entre eux par quantité de connexions bidirectionnelles.

3.3.2 Couches optionnelles

Afin de faciliter la conceptualisation et la visualisation de notre modèle, la notion de couche est rajoutée à la structure du chapitre précédent. Les couches ont pour but la distinction intuitive et visuelle d'ensembles d'anticipations corrélées. De plus, cette structuration en couche simplifie l'abstraction des dimensions sensorimotrices. Une couche sera dite "haute" si elle représente un sous-espace d'interaction dont les dimensions sont faiblement couplées avec l'environnement. Ces couches restent néanmoins substituables par des dimensions supplémentaires dans un espace unique. En effet, la notion d'abstraction peut être considérée comme une variable séparant les interactions, chaque couche correspondant à une valeur différente de ladite variable. Les couches communiquent par leurs dimensions communes, comme c'est le cas pour toutes les anticipations.

Dans les applications sensori-motrices jusqu'à présent réalisées, cette notion d'abstraction se ramène au tempo des anticipations, c'est-à-dire au temps qui s'écoule entre l'assimilation de la situation source et l'assimilation de la conséquence anticipée. Une couche haute correspond ainsi à une dynamique lente (toujours relativement aux couches inférieures) et le passage d'une anticipation à la suivante se fait doucement, même si les mises à jour sont rapides [44]. La mo-

44. On retrouve ici la différenciation entre le temps physique qui régit les propagations dans le réseau et le

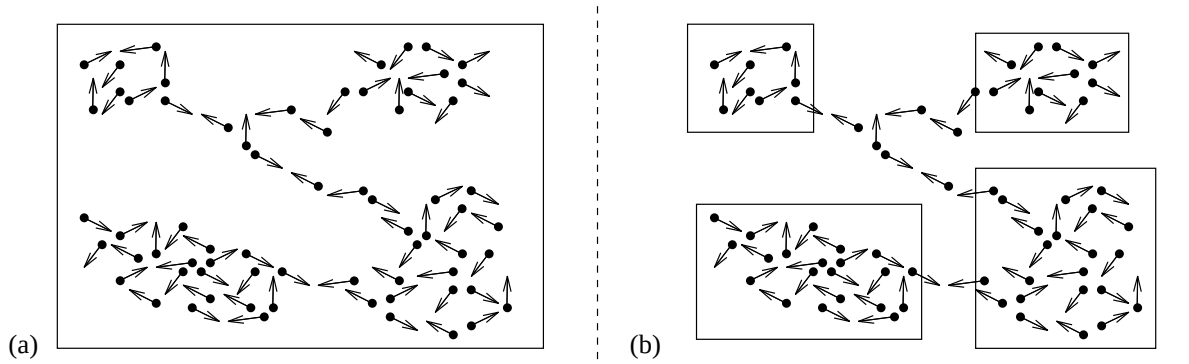


FIGURE 3.6 – (*a*) La représentation d'un système complexe dans un espace unique est très générale mais difficilement contrôlable. Le nombre de dimensions nécessaires pour le rendre souple et fonctionnellement modulaire peut aussi être très grand. (*b*) A l'inverse, l'utilisation de modules locaux rend le système plus facile à conceptualiser et analyser, mais quel critère fixer pour délimiter les composants sans gêner leurs interactions ? (on retrouve ce problème dans les sciences du cerveau où le découpage en aires permet une étude locale approfondie mais limite la prise en compte des interactions globales)

dularité émerge ainsi des couplages entre des couches aux rythmes différents (des couches de "planification" et des couches "sensori-motrices"), sans intervention de critères subjectifs biaisés par notre culture scientifique.

Au niveau des calculs, peu de choses changent mais le paramètre m de la relation de similarité (équation 2.2) est relatif à la couche considérée. Puisque les couches basses de tempo rapide (de période d'échantillonnage courte) sont associées à de petites échelles spatiales [45], le paramètre m (distance de propagation moyenne) sera petit. Sans autre modification, les couches resteraient indépendantes et auraient peu d'intérêt. Les actions d'une couche sont donc intégrées comme des sensations particulières dans les couches inférieures, et nommées modulations pour les différencier. Ces modulations sont intégrées au niveau de la conséquence des anticipations (confère équation 2.8), de même que toutes les autres activités rétro-propagées depuis d'autres anticipations (de la couche considérée ou de couches supérieures).

Lorsque la communication par l'activité n'est pas interne à une couche mais inter-couches, la cohérence veut que l'échelle utilisée soit celle du processus qui diffuse l'activité (c'est lui qui "agit"). L'équation 2.8 devient donc :

$$a_{dst} = max\left(\max_{B\in\mathcal{A}} p_m(src_B, dst), \max_{M\in\mathcal{M}} p_M(src_M, dst)\right) \tag{3.1}$$

où $\mathcal{A}$ reste l'ensemble des anticipations de la couche où se trouve l'anticipation et $\mathcal{M}$ est l'ensemble des modulations qui agissent sur cette couche. On remarque que les fonctions de propagation sont différentes, puisqu'associées à des couches différentes, avec $M > m$.

temps perçu relatif à la densité et portée des anticipations

45. La relation entre rythme et dimension a déjà été discuté en première partie. Néanmoins on peut l'illustrer en considérant la relation $v = d/t$. La dynamique des perceptions/actions est la même quelle que soit la couche, qui offrent simplement un point de vue plus ou moins local sur le comportement. La vitesse peut donc être supposée constante, et un court laps de temps t correspond donc à une petite distance d.

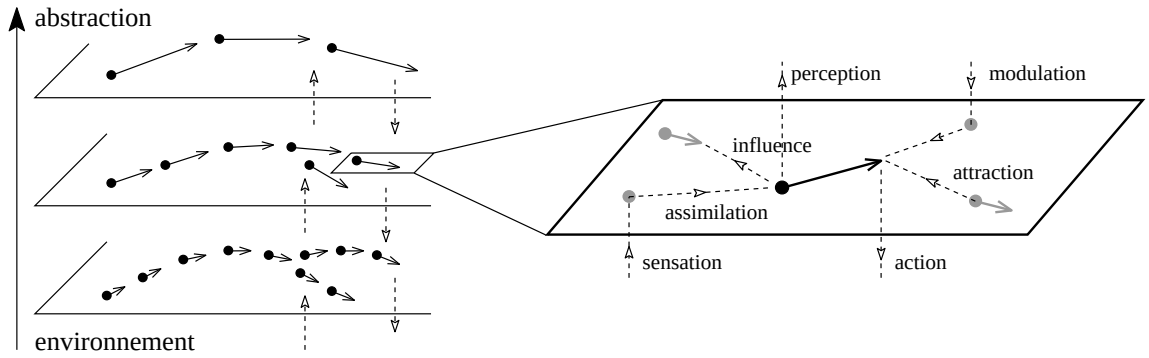


FIGURE 3.7 – (*gauche*) Les couches représentées diffèrent par la portée et le tempo des anticipations qui les peuplent. (*droite*) Chaque anticipation intègre toujours l'activité rétro-propagée des autres anticipations et assimile les sensations en provenance de l'environnement (ici les couches inférieures). Se rajoute simplement des modulations (en provenance des couches supérieures), similaires aux activités rétro-propagées mais avec une portée plus grande (celle de la couche supérieure).

3.3.3 Coordination temporelle et spatiale multi-échelle

D'après ce qui précède, l'activité des couches supérieures est plus stable, la transition d'une anticipation à une autre étant plus lente. Alors que les couches inférieures sont en contact direct avec l'environnement et sous l'influence de sa forte variabilité, les couches supérieures font abstraction des détails et sont moins sujettes à des changements de phase brusques. Les actions prises au sommet de la hiérarchie émergente constituent donc des décisions stables et paramétrisent les couches inférieures via la modulation. Le comportement de l'agent émerge à la confluence des dynamiques internes et externes, intégrant réactivité (signaux sensoriels bottom-up) et anticipation (rétro-propagation et modulation top-down). En plus de régulations dans l'assimilation et la coordination des anticipations, le modèle apporte également une régulation multi-résolution, résultant des interactions entre couches opérant à différentes échelles temporelles et spatiales.

Même si les chapitres applicatifs concernant la navigation et l'avalement/respiration reposent sur ces propriétés, on peut conclure ici en reprenant la coordination du mouvement déjà survolée dans le chapitre Principes retenus, combinée à la perception visuelle et la satisfaction d'un besoin. Bien que le comportement décrit ici soit abstrait, il est maintenant facile de l'interpréter comme le résultat de la coordination implicite décrite dans ce chapitre. Supposons qu'un homme assoiffé se tienne debout dans une pièce et que son regard se fixe sur une bouteille d'eau posée devant lui :

1. Les neurohormones associées à la soif activent toutes les anticipations permettant de la satisfaire, c'est-à-dire celles ayant pour conséquence la passage de liquide dans l'œsophage.
2. Cette activité est alors propagée à toutes les anticipations permettant au liquide d'entrer dans la bouche afin d'être avaler. On passe ainsi du niveau physiologique au niveau des interactions physiques contrôlables sur l'environnement.
3. Toutes les interactions apprises permettant à l'eau d'entrer dans la bouche sont à leur tour activées, dont le placement de la tête sous un robinet, la manipulation d'un récipient

contenant de l'eau ou même l'ouverture de la bouche vers le ciel un jour d'averse...

4. L'activité continue sa propagation à travers l'espace d'interaction, touchant des couches abstraites et quantité d'interactions liées à des situations imaginaires, mêmes incompatibles avec l'environnement actuel ou peu probables. Toute l'activité de l'être s'oriente vers la satisfaction de la soif, ne pouvant plus penser à rien d'autre. A l'intérieur d'un bâtiment, seule une inondation massive à un étage supérieur ou le déclenchement de dispositifs de lutte contre les incendies peut permettre à de l'eau de tomber du plafond. Les interactions concernant l'avalement d'eau tombant du ciel ne seront donc que très faiblement activées, n'étant confirmées par aucun élément contextuel.

5. Les chemins d'activité formés entre la bouteille d'eau visible et l'étanchement de la soif seront en revanche renforcés par l'environnement réel, intégrant sa préhension, son ouverture ou encore sa manipulation jusqu'à la bouche. La perception d'une bouteille d'eau est relativement abstraite et résulte d'un ensemble de processus complexes de moins bas niveau. Elle nécessite par exemple l'intégration de sa forme pour savoir s'il s'agit bien d'un objet préhensible ou des déformations qu'induit l'eau qu'elle contient sur la propagation de la lumière.

6. Les interactions les plus actives de l'espace sont alors celles conduisant à l'avalement de l'eau et compatibles avec la situation actuelle. Bien qu'il soit à ce moment possible de faire demi-tour, de chercher une autre bouteille des yeux ou même de chanter, seul les mouvements du corps permettant d'attraper la bouteille rapprocheront l'individu de son but temporaire. Il n'y a en effet pas encore de bouteille dans la main ou d'eau dans la bouche.

7. L'action est ainsi engagée simultanément à tous les niveaux d'abstraction, requérant par exemple le recrutement de fibres musculaires pour accomplir le mouvement, ou la coordination de nombreux segments corporels pour déplacer le bras et conserver l'équilibre.

8. A chaque instant, des mouvements (même imperceptibles) de la tête ou des variations dans la trajectoire du bras modifient les sensations et donc l'activité dans l'ensemble de l'espace d'interaction. Les attracteurs locaux peuvent alors changer, mais le but final qu'est la satisfaction de la soif subsiste, toujours stimulé par la présence des neurohormones.

9. Dans un mouvement continu et constamment régulé à tous niveaux, la bouteille est saisie, ouverte puis amenée à la bouche. Pour cela, la bouteille est certainement maintenue dans le champ visuel pendant un moment et les deux bras coordonnés tout au long du mouvement. L'eau coule ensuite dans la bouche et les réflexes de déglutition prennent finalement le relai avant que le métabolisme inhibe la production de neurohormone. Même s'ils ne sont pas contrôlables, le passage de l'eau dans la gorge est anticipé et l'apaisement de la soif également.

10. L'attracteur qui structura tout le champ d'activité disparaît enfin et l'homme peut reprendre ses autres activités les plus prioritaires (attractives je devrais dire). Elles n'avaient en aucun cas disparu durant tout ce temps, mais constituaient des attracteurs secondaires momentanément occultés.

Finalement, cette coordination permet non seulement de lier des processus de natures apparemment très différentes, mais les régulations émergentes permettent également de s'abstraire des imperfections dans l'environnement et dans les anticipations de l'agent. Pour un robot, le calibrage peut ainsi être réduit à sa plus simple expression et un échantillonnage parfaitement

régulier n'est plus nécessaire[46]. Une petite erreur commise à n'importe quel moment sera intégrée à la situation et la dynamique à l'instant suivant, autorisant une convergence globale vers les situations cibles. Ces aspects pratiques nous conduisent au chapitre suivant, qui détaille les implémentations réalisées du modèle.

46. La communication entre les programmes informatiques et les circuits électroniques d'un robot (commandes motrices et retour sensoriel) sont souvent effectuées au cœur d'un processus temps-réel, afin d'éviter les moindres variations dans la durée d'un cycle sensori-moteur.

4

Modèle informatique

Sommaire

4.1 Introduction 101
4.2 Historique des versions 102
4.2.1 Reconnaissance de rythmes 103
4.2.2 *Remplissage d'un récipient* 103
4.2.3 *Synchronisation d'oscillateurs* 104
4.2.4 *Librairie de vision "naturelle"* 104
4.2.5 Stabilisation de pendule 105
4.2.6 Navigation spatiale 105
4.2.7 Coordination de fonctions physiologiques 105
4.3 Structure 106
4.3.1 Dim & Vect 106
4.3.2 Interaction & Anticipation 108
4.3.3 Space 108
4.3.4 World 109
4.3.5 Monitor & Commands & Renderer & 110
4.3.6 Main 111
4.4 Boucle d'interaction 111

4.1 Introduction

L'informatique, même si parfois critiquée pour le mal qu'elle a pu faire à bon nombre de théories émergentes au milieu du XX$^{\text{ème}}$ siècle[47], reste un outil idéal pour la modélisation et la simulation de principes fondamentaux. De nombreuses applications ont été développées et seront présentées dans les chapitres à suivre afin d'illustrer certaines notions ou tester empiriquement certains principes. Des résultats qualitatifs les accompagnent souvent mais les performances quantitatives associées sont rarement à analyser telles qu'elles ou à comparer avec d'autres algorithmes, certainement plus performants. Sauf nécessité dans le cas de contraintes temps réel, peu d'optimisations ont été réalisées et les algorithmes implémentés ne bénéficient pas de décennies

47. C'est en particulier le cas de certaines théories présentées en première partie. En effet, l'ordinateur, initialement conçu comme une simplification de l'esprit humain, a finalement servi de modèle et de référence dans la pensée cognitiviste et computationnaliste. L'avènement de l'informatique a ainsi évincé de nombreux travaux scientifiques pourtant prometteurs.

de recherche. Le but avoué étant la compréhension des comportements des êtres vivants, ces programmes ouvriront peut-être des portes sur des applications jusque là considérées comme irréalisables mais ne se substitueront pas aux approches classiques pour des tâches qu'elles accomplissent efficacement.

4.2 Historique des versions

La version du modèle que détaille ce chapitre était la dernière en date lors de la rédaction du plan final de cette thèse. Même si d'autres améliorations ont été intégrées au modèle depuis, cette version est cohérente avec le modèle formel décrit en deuxième partie. Tous les ajouts réalisés depuis sont brièvement introduits dans les chapitres sur les perspectives et évolutions du modèle.

Néanmoins, les chapitres à suivre présentent différents programmes développés tout au long de la thèse. Ils n'utilisent donc pas tous la dernière version du modèle. Même si le développement a été relativement incrémental et que la version la plus récente permet de modéliser la plupart des phénomènes décrits, seules les deux applications sur la navigation et sur la coordination avalement/respiration l'exploitent. Malgré tout, il a semblé utile et pratique de décrire chaque application dans le contexte de sa conception tout en précisant quels principes théoriques elle devait valider. Dans un but pédagogique et constructiviste, les programmes développés sont classés par ordre d'ancienneté, du plus vieux ou plus récent. Il ne s'agit pas de classer leur potentiel, mais d'expliquer les limites rencontrées à chaque étape qui ont motivé la conception des applications ultérieures. A chaque fois, nous avons tenté de transférer les principes d'une version fonctionnelle vers un problème nouveau, pas forcément plus complexe mais touchant à des capacités en apparence différentes. Comme expliqué en début de manuscrit, le but est de dégager un ensemble minimal de principes fondamentaux communs à de nombreuses fonctions cognitives. La plupart du temps, le transfert échoue et une réflexion théorique est nécessaire. Celle-ci permet de dégager les points forts du modèle mais surtout de trouver ses limites.

Il s'agit alors de trouver d'où viennent les problèmes dans la version actuelle :

1. Le programme est simplement bogué. Le problème est alors de détecter ce type d'erreur et d'en trouver l'origine. On étudie des systèmes complexes, un comportement non anticipé du programme peut donc venir de quantité de facteurs intriqués.
2. Un des principes appliqué est mal appliqué ou sous une forme trop restreinte. Il faut alors trouver comment l'étendre ou mieux l'adapter à des programmes informatiques.
3. Il manque un principe fondamental pour expliquer le phénomène que l'on tente de modéliser. Malgré tous les efforts envisageables pour faire sans, il sera théoriquement impossible de s'en passer. Ceci-ci doit alors être trouvé et introduit dans le modèle.
4. Un principe précédemment introduit n'est pas nécessaire et masque la nature plus générale d'autres principes manquants. D'ici la fin du manuscrit, veuillez je vous prie supposer que ce n'était pas le cas...

Cela ne signifie pas que l'ensemble de principes fonctionnels est unique, ou qu'il est celui qui modélise naturellement les phénomènes étudiés. D'un point de vue personnel, j'apporte une grande importance au fait qu'ils recoupent des principes issus de la neurologie ou encore de la psychologie. Et le fait que ces mêmes principes se retrouvent dans tant de domaines n'est certainement pas le fruit du hasard.

Comme cela a été fait pour les modèles, voici une brève synthèse sous forme de tableau des principes utilisés dans les différentes applications développées (tableau 4.1). Même si chacune insiste sur un aspect bien particulier, ce tableau permet d'avoir une vue globale de l'évolution du modèle. On remarque ainsi que la régulation a toujours été présente [48] ou que l'action a été rapidement introduite afin d'interagir avec l'environnement et appliquer le modèle à la robotique. La coordination généraliste sur laquelle cette thèse insiste a été introduite en dernier, mais s'opère à une échelle donnée ou en multi-échelle selon l'application. Certaines caractéristiques sont absentes du tableau : tous les programmes sont par exemple fondés sur des processus parallèles et anticipatifs.

	Rythmes	Pendule	Navigation	Respiration
Régulation	✓	✓	✓	✓
Action		✓	✓	✓
Coordination			✓	✓
Apprentissage	✓	✓		
Temporalité	✓			

FIGURE 4.1 – Principes utilisés dans les applications développées. Certains principes ont été introduit progressivement alors que d'autres ont simplement été remaniés tout au long de la thèse.

Voici enfin un bref historique des applications avec leur logique dans la thèse. Les titres qui ne sont pas en italique correspondent aux applications auxquelles est consacré un chapitre. Les autres sont les chaînons manquants de l'évolution du modèle, qui, bien qu'ayant fortement contribué à son amélioration, sont restés majoritairement techniques et n'ont donc pas laissé de trace dans le corps du texte :

4.2.1 Reconnaissance de rythmes

Le travail a initialement dérivé du programme TamTam, dans lequel le programme reconnaît et apprend des rythmes de manière non supervisée alors qu'un utilisateur humain tape des rythmes de son choix au clavier [Buisson, 2004]. Pour rendre l'algorithme d'origine plus robuste et adapté à un environnement continu, chaque rythme a été décomposé en une séquence de "notes" associées à des processus atomiques interconnectés. La communication point à point entre les processus est produite par modulation d'activité.

4.2.2 *Remplissage d'un récipient*

En plus du parallélisme de concurrence entre les différents rythmes tentant d'assimiler, il apparaissait déjà clair que l'interaction entre plusieurs processus permet l'émergence de séquences d'activité et une plus grande robustesse. Néanmoins, l'action manquait cruellement dans l'application précédente et le développement d'une application test de versage d'un liquide dans un récipient a commencé. Le contrôleur de cette application, illustrée en figure 4.2, doit remplir un récipient sans le faire déborder alors que l'inertie du conteneur initial varie avec le temps. Différents type de régulations qu'on retrouve en automatisme ou cybernétique ont été expérimentés (homéostasie, régulations de second ordre...). Là aussi, la modulation d'un processus par un autre permet d'affecter indirectement les actions et d'orienter les comportements vers un but.

48. La régulation peut prendre plusieurs formes selon qu'elle s'opère au sein d'un processus, comme dans les modèles internes, ou également entre les processus.

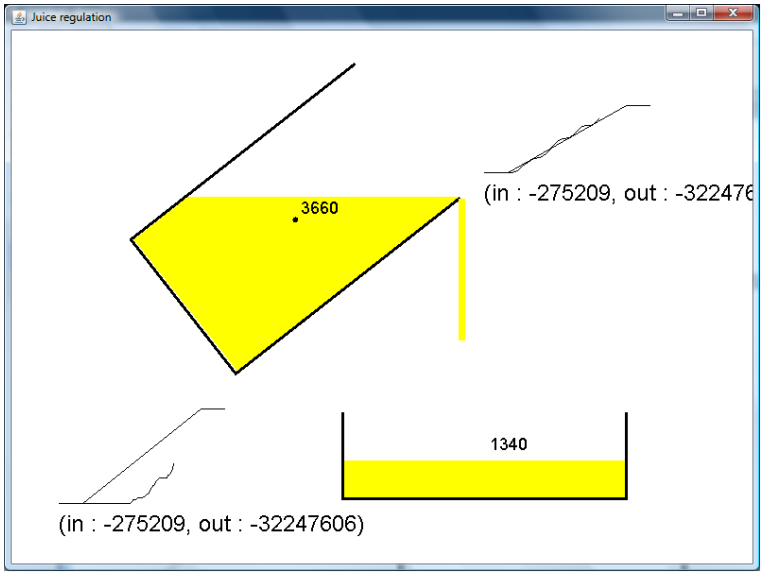


FIGURE 4.2 – Remplissage contrôlé d'un récipient résultant de la coordination par régulation réciproque de plusieurs processus spécialisés. En plus du modèle physique, la capture d'écran de l'application montre deux courbes correspondant à deux processus régulateurs. Chacun ne perçoit qu'une part de la situation et régule par homéostasie une variable donnée. L'un régule l'angle du verre en faisant varier la force appliquée alors que l'autre régule le niveau de liquide dans le récipient cible en agissant sur l'angle de rotation du conteneur d'origine.

4.2.3 *Synchronisation d'oscillateurs*

Afin de mieux comprendre la coordination résultant de modulations, je me suis attaché à modéliser les interactions entre des processus oscillatoires et à faire varier la dynamique des couplages. Là encore, cette application exploratoire s'est à l'origine inspirée d'un programme de test réalisé par Jean-Christophe Buisson, basé sur l'expérience originale de Huygens sur la synchronisation d'horloges. On peut retrouver la description de cette application et une partie des résultats dans l'annexe A.

4.2.4 *Librairie de vision "naturelle"*

D'après l'application précédente, la coordination et synchronisation semble s'effectuer d'autant mieux que le nombre de processus est grand. Afin de tester cette tendance et d'appliquer ce principe à des comportements du vivant, une librairie de vision par ordinateur fortement inspirée des processus rétiniens et corticaux a été développée. Celle-ci permet l'interaction dynamique de plusieurs filtres visuels mais surtout leur exécution en temps réel en utilisant la programmation directe de cartes graphiques (confère le chapitre des extensions intitulé *Parallélisation* pour plus d'informations sur cette librairie et la programmation GPGPU [49]).

49. GPGPU = General Purpose Graphical Processing Unit (c'est le nom donné au domaine consistant à utiliser des cartes graphiques modernes (pixel pipelines, shaders) afin d'effectuer des calculs quelconques, scientifiques par exemple)

4.2.5 Stabilisation de pendule

Mon stage au Japon en deuxième année de thèse m'a permis de manipuler directement des robots possédant de nombreux degrés de liberté et de réfléchir sur le choix des actions quand un grand répertoire de comportements est disponible. J'ai pu également me pencher sur des formes d'apprentissage online compatibles avec les régulations rapides que doivent effectuer les robots afin de rester stable et d'éviter des dommages. Ceci a conduit à la conception d'un nouveau modèle partiellement inspiré de mes travaux en France, malheureusement uniquement testé en simulation.

4.2.6 Navigation spatiale

Si le modèle précédent s'attaquait à la régulation généralisée entre comportements acquis et intégrait une forme simple d'orientation vers les buts, ces deux aspects restaient trop limités. La coordination implicite de la deuxième partie a été développée à ce niveau, afin de réaliser des régulations complexes (avec de nombreux niveaux de modulations) et permettre l'émergence de buts dynamiques. Quoi de mieux pour visualiser l'orientation vers les buts et la coordination spatiale qu'une application de navigation et d'évitement d'obstacles. Une fois de plus, une présentation en conférence de Jean-Christophe m'a ouvert les yeux et permis d'avancer sur le modèle [Buisson, 2007].

4.2.7 Coordination de fonctions physiologiques

Enfin, même si les buts apparaissaient sous la forme d'attracteurs dans le système dynamique des interactions entre l'agent et l'environnement, ceux-ci restaient ad hoc et fondamentalement dissociés de l'activité du sujet. Dans cette dernière application, les buts dérivent de sensations, elles mêmes associées à des besoins apparus durant une hypothétique évolution du corps de l'agent (afin de le sauvegarder). L'exemple pris montre comment les besoins en oxygène et en eau d'un corps peuvent conditionner les comportements de l'agent sans avoir pour autant le statut explicite de buts à atteindre impérativement.

4.3 Structure

La structure du modèle, implémentée en Java 6 dans sa dernière version, est décrite ici en termes d'objets (figure 4.3). Ceux-ci sont détaillés dans les sous-sections suivantes de manière ascendante, des briques de base à la classe principale permettant le lancement des applications.

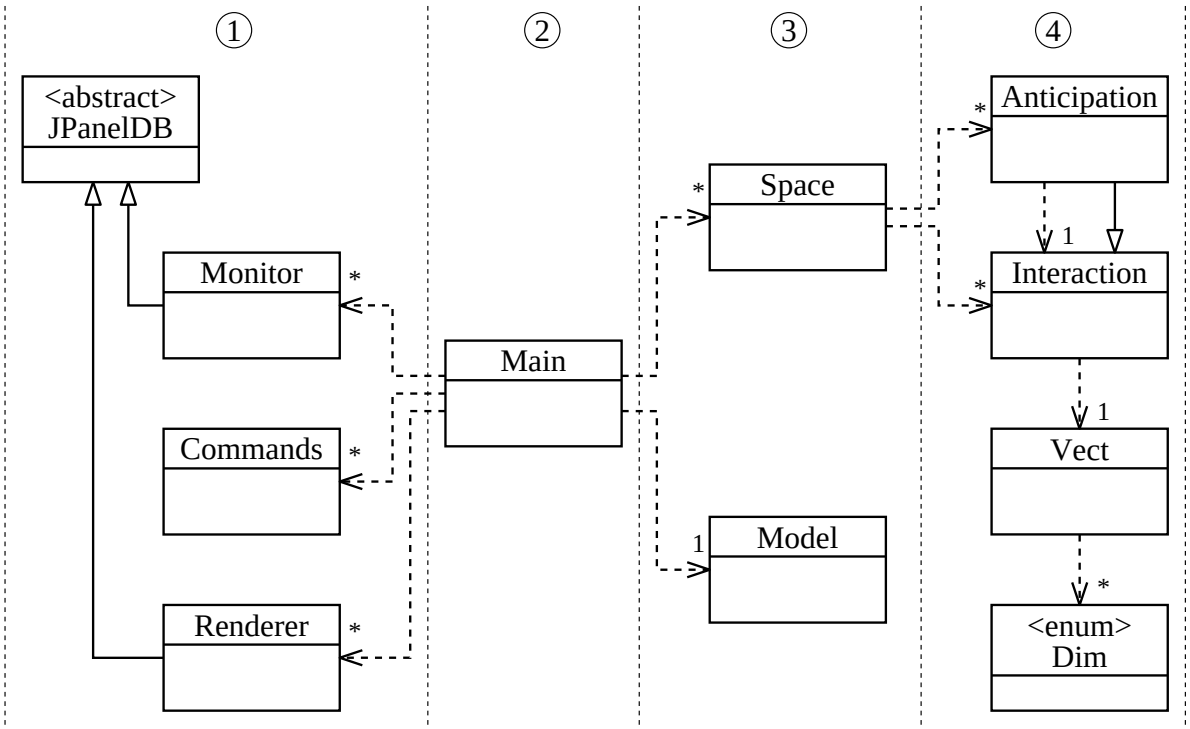


FIGURE 4.3 – Diagramme UML simplifié et global d'une application utilisant le modèle. Les versions récentes intègrent le modèle dynamique de cette thèse sous forme de package comprenant les classes simulant les différents éléments mais aussi un ensemble de classes utilitaires pour afficher et observer l'évolution du système. La partie ① du diagramme de classes UML correspond aux classes d'interactions avec l'utilisateur humain, qu'il soit utilisateur ou observateur. ② correspond à la classe principale permettant de lancer l'application (*Main*). ③ regroupe les classes modélisant les dynamiques à dominante interne (*Space*) et externe (*World*). Enfin ④ est l'ensemble des classes définissant les différentes briques composant le modèle.

4.3.1 Dim & Vect

Cette classe définit sous forme d'énumération les dimensions de l'espace d'interaction. Elle permet ainsi d'associer des labels reconnaissables à chaque dimension sensori-motrice. Une chaîne de texte (`"X"`) permet alors d'accéder rapidement à l'instance associée de l'énumération (`X`). Ces dimensions servent ensuite dans la plupart des classes, que ce soit pour accéder à une composante particulière d'un vecteur ou afficher des informations concernant une dimension particulière.

S'appuyant sur *Dim*, la classe *Vect* définit des vecteurs creux utilisables pour modéliser les interactions dans des sous-espaces de l'espace d'interaction complet. L'espace peut comprendre de nombreuses dimensions, même en négligeant les dimensions internes potentiellement créées par le modèle. Pourtant, chaque interaction ne fait généralement intervenir qu'une très faible

part des dimensions. Un vecteur creux n'est ici donc pas à composantes majoritairement nulles, mais il s'agit d'un vecteur dont la plupart des dimensions ne sont pas même définies.

Les vecteurs peuvent être instanciés par de nombreux constructeurs, dont certains fournissent une définition explicite et compréhensible par un humain. On peut ainsi facilement créer des vecteurs par les lignes de code suivantes :

Ligne de code	Vecteur	Description du constructeur
`v1 = new Vect();`	[]	Permet l'addition de dimensions
`dims = new Dim[]{Dim.X,Dim.Z};`		
`vals = new int[]{1,2};`		
`v2 = new Vect(dims,vals);`	$[x=1,z=2]$	Spécification des dimensions et valeurs
`v3 = new Vect("Y=1 X=2");`	$[x=2,y=1]$	A partir d'une chaîne de caractères
`v4 = new Vect(v3,9);`	$[x=9,y=9]$	Sous-espace existant et nouvelle valeur

Les coordonnées sont stockées dans une *EnumMap<Dim,Double>* garantissant un accès rapide aux éléments malgré le surcoût introduit par l'énumération. Des réels en double précision sont utilisés ici, mais cette précision n'est pas vraiment nécessaire. En effet, chaque interaction agit à une échelle donnée et on n'aura jamais de processus à la fois très localisé et très étendu requérant un codage avec un large spectre de puissances. Les couches intégrées au modèle ont aussi l'avantage d'associer une unité distincte pour chaque échelle. Une variation négligeable au niveau global sera certainement gigantesque pour les régulations locales (figure 4.4).

	XL	L	M	S
XXL	2^{10}	∞	∞	∞
XL	**1**	2^{10}	∞	∞
L	2^{-10}	**1**	2^{10}	∞
M	0	2^{-10}	**1**	2^{10}
S	0	0	2^{-10}	**1**
XS	0	0	0	2^{-10}

FIGURE 4.4 – Chaque échelle (*colonnes du tableau*) est plus ou moins adaptée aux valeurs (*lignes*). Une échelle donnée (L) ne pourra coder sans perte d'information que des valeurs de précisions compatibles (XL,***L***,M).

La classe dispose de nombreuses méthodes permettant de manipuler les vecteurs creux. Lorsque qu'il s'agit d'opérateurs binaires, il faut généralement calculer l'intersection ou l'union des ensembles de dimensions définies pour les deux vecteurs. Une simple combinaison linéaire de signature `public Vect linear(double coef1, Vect vect2, double coef2, int inex)` prendra donc un paramètre supplémentaire (`inex`) pour déterminer quelles sont les dimensions à conserver. Le comportement de l'appel `v1.linear(2,v2,-1,inex)` avec $v1 = [x = 1, y = 1]$ et $v2 = [x = 3, z = 1]$ dépendra donc de la valeur de `inex` :

Constante	`inex`	v_1v_2	Description	Vecteur résultant
INTER	0	`00`	Seulement les dimensions communes	$[x=-1]$
V1	1	`01`	Seules les dimensions de v1	$[x=-1,y=2]$
V2	2	`10`	Seules les dimensions de v1	$[x=-1,z=-1]$
MERGE	3	`11`	Toutes les dimensions définies	$[x=-1,y=2,z=-1]$

Enfin, la mesure de similarité dans l'espace d'interaction est reproduite par la fonction `public double similarity(double m)` où le paramètre est le m de l'équation 2.2 du modèle mathématique. Celle-ci ne prend qu'un paramètre car calculée relativement au vecteur nul dans le sous-espace du vecteur sur lequel elle s'applique. Plus formellement mais aussi plus clairement, $sim_m(I_1, I_2)$ est équivalent à `v2.linear(1,v1,-1,INTER).similarity(m)` si `v1` et `v2` représentent respectivement I_1 et I_2.

4.3.2 Interaction & Anticipation

Une interaction est simplement faite d'un vecteur creux enrichi de fonctions et paramètres pour propager l'activité. Il s'agit bien sûr de la variable représentant l'activité dynamique à la source de la diffusion locale (`double activity`) mais aussi de la portée moyenne de diffusion (paramètre m utilisé ensuite pour calculer la similarité). La méthode `public double getActivity(Vect situation)` permet alors d'obtenir l'activité propagée en un point distant de l'interaction (`situation`).

La classe *Anticipation* hérite d'*Interaction*, il s'agit en effet d'un centre de diffusion d'activité, mais son activité est cette fois mise à jour en interne. Un de ses attributs correspond donc à l'interaction distante dont l'anticipation propage l'activité. Une méthode `public void update(double src_activit` permet alors la mise à jour synchrone de l'activité (en suivant l'équation 2.9).

4.3.3 Space

La classe *Space* correspond à un espace ou sous-espace regroupant des interactions et anticipations. Elle permet également d'implémenter la notion de couche en limitant le nombre de dimensions définies et l'échelle des anticipations. Afin de permettre un accès générique et une itération rapide sur les éléments, ceux-ci sont stockés dans deux listes :

- `protected ArrayList<Interaction> interactions` : ensemble des interactions intégrant des activités externes à ce sous-espace (sensations/modulations).
- `protected ArrayList<Anticipation> anticipations` : ensemble des anticipations de cette couche/sous-espace

Ces listes peuvent évidemment être modifiées durant l'exécution pour ajouter de nouveaux éléments ou supprimer les moins adaptés. Bien que toute combinaison d'interactions soit possible dans ces listes, les interactions d'une même couche auront les mêmes paramètres de diffusion, à l'exception des modulations provenant d'autres couches.

D'un point de vue objet, l'intégration de l'ensemble des activités propagées ne peut se faire au niveau d'une simple anticipation, puisqu'elle celle-ci n'a pas une vue globale sur l'espace. En revanche la classe Space définit le champ d'activité et permet le calcul de l'activité propagée en chaque point. La fonction associée est `public double getActivity(Vect situation, int domain)` où `situation` est le "point" d'interaction où l'on souhaite intégrer les activités propagées et `domain` le type d'interaction que l'on souhaite prendre en compte. Ce type permet de différencier l'anticipation des conséquences et l'assimilation des sensations, c'est-à-dire les activités propagées et rétro-propagées (voir équations 2.7 et 3.1).

Deux types de mises à jour de l'activité via la méthode `void update()` ont été évaluées, mais aucune différence profonde de comportement n'a été relevée. La première est souvent appelée parallélisme simulé : l'ensemble des interactions est mis à jour en utilisant des variables temporaires afin de ne pas écraser les valeurs précédentes si elles peuvent encore servir. L'autre méthode, plus simple mais aussi plus approximative, consiste à négliger les variations dans chaque variable

entre deux pas successifs et mettre les interactions à jour une à une, ce qui correspond davantage à un fonctionnement asynchrone. Nos processus étant théoriquement couplés mais relativement indépendants, cette approche a été retenue et ne devrait pas troubler le comportement de l'agent si le modèle est correct. Une comparaison des deux algorithmes de mise à jour est présentée sur la figure 4.5.

Parallélisme simulé (a)

```
1 for (int i=0; i<anticipations.size; i++) {
2     a = anticipations.get(i);
3     src[i] = getActivity(a.getSrc(),SRC);
4     tgt[i] = getActivity(a.getTgt(),TGT);
5 }
6 for (int i=0; i<anticipations.size; i++) {
7     a.update(src[i],tgt[i]);
8 }
```

Mise à jour incrémentale (b)

```
1 for (int i=0; i<anticipations.size; i++) {
2     a = anticipations.get(i);
3     src = getActivity(a.getSrc(),SRC);
4     tgt = getActivity(a.getTgt(),TGT);
5     a.update(src,tgt);
6 }
```

FIGURE 4.5 – Alors que l'algorithme (*a*) simule une mise à jour simultanée de toutes les anticipations en utilisant des variables temporaires (src[i],tgt[i]), la version (*b*) modifie l'activité de l'anticipation à l'intérieur de la boucle (*ligne 5b*). Or l'intégration des activités dans l'ensemble de l'espace inclut l'activité des diverses anticipations (*lignes 3 et 4*). L'activité résultante du calcul s'en trouve donc affectée. Néanmoins ces perturbations restent minimes et acceptables dans nos applications.

Une fonction `public Vect getReduction(Vect situation)` permet enfin d'interpoler entres les valeurs définies par l'ensemble des interactions sur toutes les dimensions en un point donné de l'espace. Cette méthode permet ainsi la détermination des actions et des perceptions à chaque instant dans la dynamique émergente de la couche considérée. Cette fonction utilise l'équation de réduction 2.5 du chapitre précédent.

4.3.4 World

Du fait que différents modules peuvent interagir par le biais de l'activité, on peut considérer chaque objet instancié de la classe *Space* comme un agent à part entière. Contrairement à cette dernière qui détermine la dynamique interne mais reste sous l'influence de les sensations, *World* simule la dynamique externe de l'environnement perturbée par les actions de l'agent. Ces deux classes regroupées sur le diagramme UML sont donc les deux facettes d'un processus commun. Seule la forme de modélisation de la dynamique diffère : la classe *World* simule la physique de l'environnement ou sert d'interface avec le monde réel (via des commandes envoyées à un robot et des signaux reçus par exemple). L'application des principes de cette thèse et les hypothèses de notre modèle se portent donc uniquement sur la classe *Space*.

Dans le cas d'un environnement simulé, celui-ci est souvent régit par des équations différentielles complexes insolubles formellement. La dynamique est alors simplement simulée et approximée par la méthode de Runge-Kutta (à l'ordre 2 la majorité du temps). Par exemple, dans le cas de la dynamique du système pendule/chariot présenté dans la section *Stabilisation de pendule et interaction homme-machine* du chapitre suivant, les équations différentielles simplifiées sont :

$$\begin{aligned}(M+m)\ddot{x} &= mR\dot{a}^2\sin a - mR\ddot{a}\cos a - d\dot{x} + f \\ \frac{b}{R}\dot{a} + m\ddot{x}cos\theta + mR\ddot{a} + mg\sin a &= 0\end{aligned} \tag{4.1}$$

où M est la masse du chariot, m celle du pendule, R son rayon, f la force appliquée par l'agent sur le chariot, x la position du chariot et θ l'angle formé entre la verticale et le pendule.

Afin de pouvoir appliquer la méthode d'approximation de Runge-Kutta, ces équations sont transformées en :

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= v \\ \frac{da}{dt} &= w \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{mRw^2\sin a + mg\sin a\cos a + f - dv + \frac{b}{R}w\cos a}{M + m\sin^2 a} \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{-mRw^2\sin a\cos a - (m+M)g\sin a - f\cos a + dv\cos a - \left(1+\frac{M}{m}\right)\frac{b}{R}w}{R(M + m(\sin a)^2)}\end{aligned} \tag{4.2}$$

Les équations prennent donc la forme d'un système des variables et leurs dérivées :

$$u' = f(u) \tag{4.3}$$

où u est le vecteur des variables $[x, a, v, w]^T$ et u' le vecteur des dérivées $[v, w, \frac{dv}{dt}, \frac{dw}{dt}]^T$.

La méthode de Runge-Kutta permet alors d'approximer la valeur des variables à l'instant $t + h$ en fonction des valeurs à t par application des formules suivantes :

$$\begin{aligned}a &= f(u_t) \\ b &= f(u_t + \frac{h}{2}a) \\ c &= f(u_t + \frac{h}{2}b) \\ d &= f(u_t + hc) \\ x_{t+h} &= x_h + \frac{h}{6}(a + 2b + 2c + d)\end{aligned} \tag{4.4}$$

La méthode `void update()` effectue cette mise à jour sur toutes les variables du modèle. Celles-ci ne sont pas forcément accessibles par l'agent comme des sensations.

4.3.5 Monitor & Commands & Renderer & ...

Les différentes classes présentes dans la partie ① de la figure 4.3 permettent l'observation de la dynamiques du modèle, mais aussi l'interaction entre un utilisateur humain et le modèle. Ces deux catégories sont à bien distinguer : là où l'observation du modèle par le chercheur permet

de l'évaluer (par l'analyse statistique des trajectoires prises dans le système dynamique par exemple), les interactions s'opèrent quant à elle entre un utilisateur humain quelconque et l'agent et font partie intégrante de la dynamique du système agent/environnement. Celui-ci peut agir sur l'environnement (dont il fait alors partie) et influer indirectement sur la dynamique de l'agent, par le biais de périphériques (souris, clavier, ...) pour les simulations ou physiquement dans le cas d'un environnement réel. Les classes *Monitor* ou *Commands* permettent ainsi d'observer l'intérieur de l'agent alors que la classe *Renderer* et d'autres classes non présentées ici permettent de suivre l'évolution du système global comme le ferait un observateur.

4.3.6 Main

Cette dernière classe contient la fonction `main` permettant d'initialiser le programme et coordonne l'ensemble des autres classes. Elle dispose d'un processus léger gérant la mise à jour des modèles et des interfaces homme-machine. Les modèles comprennent l'ensemble des sous-espaces représentant la dynamique interne de l'agent et l'interface avec le monde physique ou virtuel.

Afin de faciliter la conception du système, et en déviant légèrement d'une conception MVC [50] majoritairement respectée, certaines des classes de représentation graphique combinent *vue* et *contrôle* partiel du modèle physique. Les classes *Space* et *World* sont quant à elles les *modèles* des dynamiques internes et externes. La classe *Main* demeure néanmoins la classe principale de *contrôle* puisqu'elle la majorité des mises à jour et modifications passent par elle.

4.4 Boucle d'interaction

La boucle sensori-motrice est réalisée par un processus léger attaché à la classe *Main*. Celui-ci tente d'effectuer les mises à jour de l'ensemble des éléments le plus régulièrement possible. Les éléments graphiques, la simulation ou l'interface avec le robot, de même que le modèle de la dynamique de l'agent peuvent néanmoins être mis à jour à des fréquences différentes. Selon le rythme intrinsèque des interactions, un échantillonnage rapide de l'environnement peut en effet ne pas être nécessaire. De plus, les couches les plus hautes correspondant à des interactions plus stables et moins denses, l'activité peut être propagée à un rythme inférieur. Les périodes seront prises non premières entre elles afin de faciliter le découpage de l'intervalle temporel représenté par chaque cycle. Chaque cycle sera composé au maximum de la mise à jour séquentielle des éléments suivants :

1x	Modulations, sensations, activité et réduction sur la couche x (les couches basses en premier)
2	Modèle de l'environnement ou interface avec celui-ci (application des actions)
3	Éléments graphiques Swing (généralement synchronisés via d'autres processus)

Chaque séquence se termine par une attente permettant de régulariser les cycles, calculée comme complément des autres étapes. Un exemple d'une telle séquence est représenté sur la figure 4.6.

50. MVC (Modèle/Vue/Contrôleur) = patron d'architecture permettant d'isoler et coordonner la logique de l'application, son interface et l'échange d'informations entre l'utilisateur et le modèle.

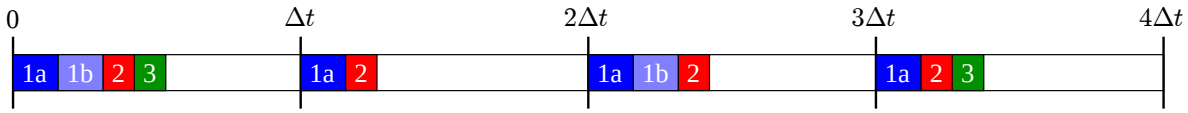


FIGURE 4.6 – Si on considère un modèle de l'agent constitué de deux couches a et b, de périodes respectives Δt et $2\Delta t$, si de plus les éléments graphiques sont rafraîchis tous les $3\Delta t$ et les interactions avec l'environnement tous les Δt, on obtient une telle séquence de mises à jour. L'axe horizontal correspond au temps, les chiffres se réfèrent aux étapes décrites dans le texte. $1a$ correspond ainsi à la mise à jour de la couche basse a.

5

Applications et démonstrations

Sommaire

5.1 Reconnaissance de rythmes 113
5.1.1 But et fonctionnement général 113
5.1.2 Algorithme original 115
5.1.3 Extension robuste et décomposition des rythmes 116
5.1.4 Extension continue avec relativité absolue 118
5.2 Stabilisation de pendule et interaction homme-machine 120
5.2.1 Système mécanique simulé 121
5.2.2 Modèle d'interaction et interpolation 123
5.2.3 Apprentissage 125
5.2.4 Enseignement et exploration 125
5.2.5 Résultats 128
5.2.6 Problème du pendule inverse 129
5.3 Navigation spatiale 130
5.3.1 Architecture 1 couche 132
5.3.2 Architecture 2 couches 133
5.3.3 Dynamique des buts 134
5.4 Coordination de fonctions physiologiques 136
5.4.1 Modèle 138
5.4.2 Synchronisation des cycles 139

5.1 Reconnaissance de rythmes

5.1.1 But et fonctionnement général

La reconnaissance de rythmes a été choisie car elle est le comportement qui semble le plus intuitivement rythmique et anticipatif. L'aspect temporel est indéniable et de par la relative lenteur de la boucle sensori-motrice liant les muscles du corps à la perception auditive, il est impossible d'expliquer comment on peut taper du pied en synchronie avec un rythme perçu sans anticipation. En neurobiologie, Edward Large étudie depuis longtemps les phénomènes de synchronisation et d'anticipation de rythmes musicaux dans le cerveau [Large, 1995; Large and Jones, 1999; Large and Palmer, 2002]. Même si la terminologie diffère, les paramètres et propriétés de nos

programmes se retrouvent dans ses travaux.

Même si elle reste la plus intuitive, la perception auditive n'est pas la seule concernée par les rythmes et l'anticipation. Tout influx nerveux peut être interpréter en termes de patterns temporels et le cerveau n'a pas de raison de dresser de séparation franche entre les diverses modalités perceptives. Ainsi l'influx provenant du nerf optique n'a pas de raison d'être traité différemment qu'un train d'impulsion déclenché par un contact sur la peau. Le cerveau y trouve simplement des motifs récurrents qui peuvent différer selon les sens. Bon nombre de travaux se développent autour de ces idées dans des domaines variés. On peut citer en particulier les travaux d'Emmanuel Daucé sur les réseaux de neurones récurrents [Guillot and Daucé, 2002]. En vision, les saccades oculaires permettent, en plus de modifier activement le champ perceptif, de séquencer les anticipations sur la rétine. L'aspect temporel se retrouve en vision dans l'utilisation dynamique d'Embedded HMM [Nefian and Hayes, 1999] ou dans les patterns du robot Cog développé au MIT [Brooks *et al.*, 1999] pour la reconnaissance de visage. De même pour le toucher, il a été souligné l'importance du mouvement pour la reconnaissance des formes et textures [O'Regan, 1992].

Le travail présenté dans cette section est fondé sur le programme de reconnaissance de rythmes TamTam, conçu par Jean-Christophe Buisson [Buisson, 2004]. Il est demandé à un utilisateur humain de frapper un rythme de son choix en utilisant une touche unique du clavier (figure 5.1). Les rythmes sont des successions de frappes. On peut donc considérer les entrées du programme comme une fonction binaire du temps, puisqu'il n'y a pas de hauteur comme pour des notes. Au départ, le programme ne reconnaît que le rythme binaire. Au fur et à mesure que l'utilisateur frappe des rythmes de complexité croissante, le programme apprend à s'y accommoder et les reconnaît. A chaque instant, celui-ci anticipe les frappes à venir d'après sa propre expérience. Dans une version plus récente qui ne sera pas détaillé ici, les frappes au clavier ont été remplacées par des frappes audio réelles dont l'acquisition passe par un microphone.

Ce qui distingue fondamentalement ce programme d'autres applications en apparence similaires est qu'aucune forme de pattern matching entre les frappes de l'utilisateur et des rythmes

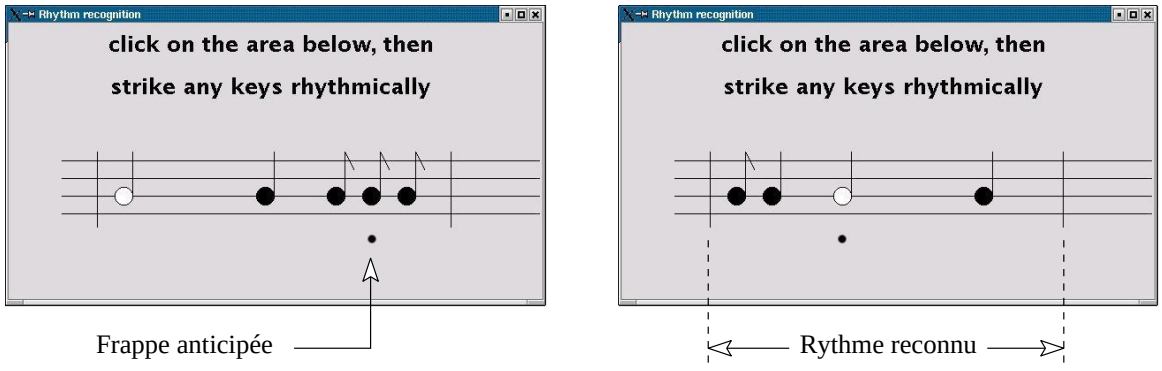


FIGURE 5.1 – Captures d'écran du programme TamTam original. Alors que l'utilisateur frappe un rythme de son choix sans regarder ou tenir compte des rythmes affichés à l'écran, le programme tente de se synchroniser avec le flux sensitif fourni par l'utilisateur. A chaque instant, le programme anticipe la frappe qui suit et l'affiche à l'écran ainsi que le rythme reconnu associé.

mémorisés n'est effectuée. La reconnaissance s'effectue en temps réel et repose exclusivement sur la dynamique de processus actifs et le couplage avec l'utilisateur via l'interface graphique. L'apprentissage y est par conséquent non supervisé.

5.1.2 Algorithme original

Dans la version originale, les rythmes sont les objets atomiques du programme. En pratique, chaque rythme appelé SMS (pour Sensory-Motor Scheme) est modélisé par un objet de la classe Thread en Java, c'est-à-dire un processus léger. A chaque SMS sont associés une séquence de durées relatives définissant le rythme, un tempo (proportionnel à la période) et un état dans le cycle (la phase) (figure 5.2). Ces processus sont constamment actifs et régulent les paramètres de fréquence et de phase en fonction de la dynamique de l'environnement (ici les frappes sur le clavier). Un processus au départ non synchronisé accélère pour se mettre en phase avec le flux des frappes. Il régule alors sa fréquence pour adopter le tempo de l'utilisateur. S'il n'y parvient, il accélère à nouveau pour se mettre en phase au niveau de la frappe suivante, et ainsi de suite. Alors qu'un schéma adapté au rythme de l'utilisateur se synchronisera rapidement, un schéma qui ne peut assimiler le rythme frappé n'y parviendra jamais totalement. A chaque schéma est associé une activité pour déterminer lequel assimile le mieux le rythme :

$$activite = \begin{cases} 1 - \frac{|t-t_a|}{tempo} & \text{si } |t-t_a| < tempo \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{5.1}$$

où t est l'instant courant, t_a l'instant où la frappe est attendue et *tempo* la période du schéma. C'est ce même écart relatif $(t-t_a)/tempo$ qui détermine si l'on doit accélérer, ralentir ou si l'on doit tenter de synchroniser avec une phase totalement différente. Plus le schéma assimile l'intégralité des frappes, plus les écarts $t-t_a$ sont faibles et plus l'activité est proche de 1. N'ayant personnellement pas participé à la conception du programme original, de nombreuses subtilités ne sont pas décrites ici, mais on peut se reporter à [Buisson, 2004] pour avoir plus de détails explicatifs. On peut simplement noter que cet algorithme introduit une forme de régulation active

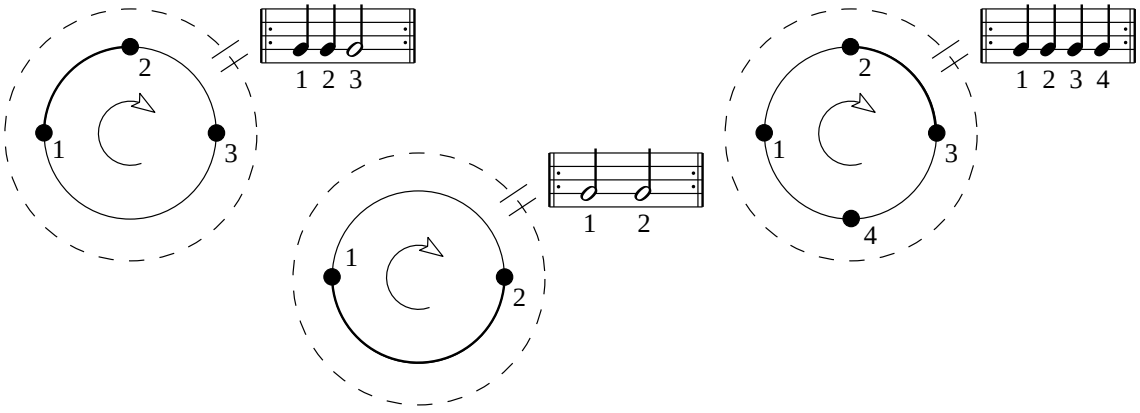


FIGURE 5.2 – Chaque schéma sensori-moteur (*cercle en pointillés*) est une séquence de frappes (*points noirs*) dans cette première version du TamTam. La succession des frappes forme une mesure continûment répétée par le schéma. Une seule frappe est anticipée à chaque instant avec un délai d'attente régulé (*trait épais*). Le schéma le plus actif parmi l'ensemble des schémas concurrents, c'est-à-dire celui qui se synchronise le mieux sur le flux de l'utilisateur, est considéré comme reconnu.

et anticipative unidimensionnelle qui est à la base des versions ultérieures du modèle.

Si l'utilisateur frappe un rythme légèrement différemment de ceux reconnus jusqu'alors, ceux-ci ne parviendront pas à l'assimiler parfaitement mais se multiplieront en subissant des mutations. Un processus de sélection est alors appliqué pour éliminer rapidement les mutants inadaptés tout en conservant les nouveaux rythmes qui se synchronisent mieux avec le flux perceptif. L'application de telles approches mimant le système immunitaire à des programmes informatiques est décrite dans [Forrest and Hofmeyr, 2000]. Ce processus de variation/sélection permet de se synchroniser à nouveau avec le rythme en un faible nombre de périodes (de l'ordre de 5). Le seul rythme inné fourni au programme à l'initialisation est le rythme binaire, à partir duquel n'importe quel autre rythme peut être construit par différenciations successives.

Le rythme de l'utilisateur doit néanmoins être similaire à des rythmes précédemment appris (une ou deux mutations doivent suffire), sans quoi l'algorithme immunitaire ne pourra explorer le gigantesque espace des rythmes possibles efficacement. Si le rythme est trop novateur, aucun rythme généré ne pourra se synchroniser correctement et tous seront éliminés. L'apprentissage doit donc être progressif. On remarque ainsi que le programme peut apprendre des rythmes très complexes par accommodations successives, mais que ces mêmes rythmes frappés dès l'initialisation du programme (c'est-à-dire sans aucune expérience ni apprentissage) ne seront jamais reconnus.

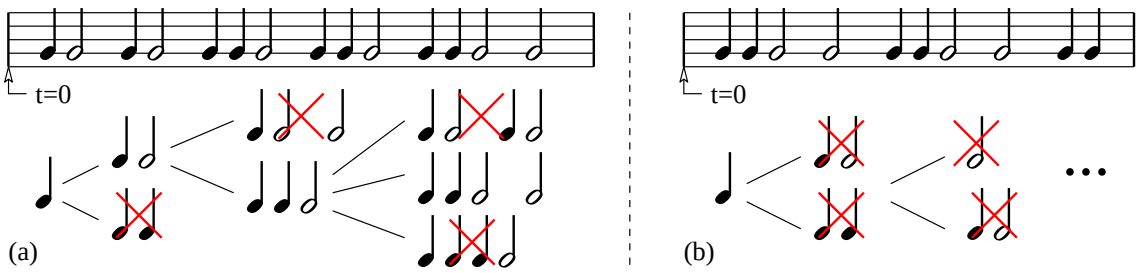


FIGURE 5.3 – (*a*) Le rythme binaire initial est progressivement différencié en de nouveaux schémas (*bas*) adaptés au flux des frappes de l'utilisateur humain (*haut*). L'apprentissage de même que la complexification des rythmes sont progressifs. (*b*) Le rythme final de la session d'interactions (*a*) est trop complexe s'il doit être directement appris dès l'initialisation du programme. Aucun mutant du rythme binaire n'assimile suffisamment les frappes pour être conservé.

5.1.3 Extension robuste et décomposition des rythmes

Cette deuxième version du TamTam a vu le jour en collaboration avec Christophe Duverger et grâce à son dynamisme alors qu'il effectuait dans notre équipe son stage de Master2 Recherche. Elle conserve la structure générale précédente : des rythmes concurrents tentent d'assimiler en permanence le flux des frappes. Néanmoins, l'algorithme de synchronisation de la première version, quoique parfaitement fonctionnel, nécessitait plusieurs cycles pour se caler en phase et fréquence sur des rythmes connus et n'était pas assez robuste aux changements de tempo. Deux transformations ont donc été opérées :

– Un schéma de n frappes n'est plus constitué d'une seule séquence mais de n séquences décalées en phase pour anticiper chacune des frappes différentes d'un même rythme. Ainsi lorsque la synchronisation est perdue, une des séquences (appelée *Groupe* dans le pro-

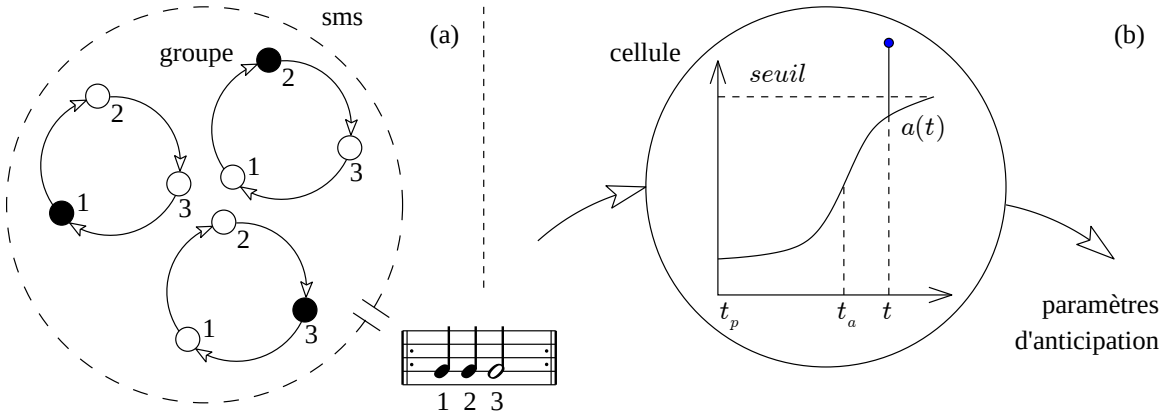


FIGURE 5.4 – (*a*) Dans cette deuxième version du TamTam, chaque schéma (*cercle en pointillés* comme sur la figure 5.2) est composé de *Groupes* déphasés. Chaque groupe est constitué de *Cellules* anticipant chaque frappe. (*b*) Chaque cellule, modélisée par une courbe paramétrée, reçoit des informations de synchronisation de la cellule précédente et en transmet à la suivante lorsque son anticipation est satisfaite ou que l'attente a été trop longue.

gramme) sera plus efficace que les autres, n'ayant que sa période à réguler.
- Les éléments sur lesquels s'opèrent les régulations sont en réalité les anticipations des frappes. Chaque séquence est donc ici décomposée en un réseau de *Cellules* interconnectées. Chaque cellule correspond à l'attente d'une seule frappe et transmet des informations de synchronisation à la cellule qui la suit. Les connaissances sont ainsi partiellement transcrites dans le réseau et non plus uniquement par les paramètres des composants.

Chaque cellule utilise la courbe représentée sur la figure 5.4b pour modéliser son anticipation. Cette courbe est caractérisée par les paramètres suivants :
- d : Durée d'attente de base pour cette frappe, définie pour un tempo de référence commun à toutes les cellules. Il peut ainsi s'agir d'une blanche, d'une noire, d'une croche, ou de toute durée intermédiaire. C'est le seul paramètre intrinsèque de la cellule.
- t_p : Instant de la frappe précédente, transmis par la cellule qui précède dans le cycle.
- *tempo* : Tempo anticipé du rythme.
- c : Confiance dans l'anticipation actuelle. Plus celle-ci est haute, plus la cellule sera sensible aux frappes de l'utilisateur. Le rythme associé à la cellule dont la confiance est la plus haute est considéré comme reconnu.

Le temps d'anticipation de la frappe suivante t_a est alors calculé par : $t_a = t_p + tempo * d$. Sans rentrer inutilement dans le détail des équations définissant la courbe, on peut considérer que chaque cellule agit comme un accumulateur d'activité. Une fois qu'elle est activée par la cellule précédente et selon les paramètres transmis, la cellule attend la frappe de l'utilisateur autour du temps t_a. A chaque instant, celle-ci teste la condition suivante :

$$a(t) + f > seuil \tag{5.2}$$

avec $a(t)$ l'ordonnée de la courbe paramétrée, *seuil* une valeur seuil arbitraire et $f > 0$ si une frappe est enregistrée. Si la condition est vérifiée, la cellule considère que son anticipation est satisfaite et active la cellule suivante avec de nouveaux paramètres de tempo et phase régulés à

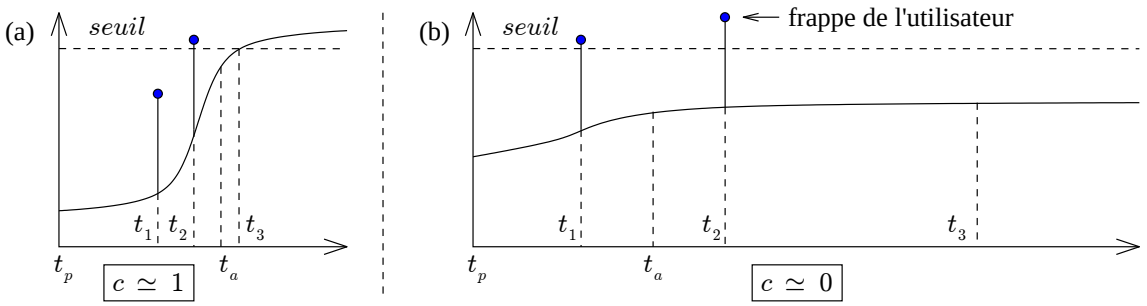


FIGURE 5.5 – (*a*) Si la confiance est élevée, une frappe arrivant trop tôt (t_1) sera ignorée, une frappe proche de l'instant anticipé (t_2) permettra la satisfaction de l'anticipation et le passage à la cellule suivante. La frappe sera supposé manquante et la transition sera spontanée peu après l'instant anticipé ($t > t_3$). (*b*) Si la confiance est faible, n'importe quelle frappe (t_1 ou t_2) entraînera le passage à la cellule suivante. Il n'y aura en revanche pas de transition spontanée et la cellule attendra indéfiniment la frappe de l'utilisateur (t_3).

la manière de la version 1 du TamTam. Si la confiance dans l'anticipation est forte, la transition pourra être spontanée, sans attendre la frappe de l'utilisateur (éventuellement absente ou bruitée). De même, avec une forte confiance, la cellule ignorera les frappes lui parvenant trop tôt. Les courbes extrêmes produites selon le paramètre c sont représentées sur la figure 5.5.

La confiance transmise à la cellule suivante est augmentée ou diminuée proportionnellement à l'écart entre le temps anticipé et le temps réel de la frappe. Ainsi après quelques frappes, les séquences qui ne sont pas en phase auront une confiance toujours faibles dans leurs anticipations et seront éliminées, ne laissant active qu'une séquence active si le rythme est assimilable. Si la synchronisation anticipative est perdue, les séquences seront toutes réactivées avec une confiance nulle (figure 5.5b) et adopteront un comportement réactif, attendant la prochaine frappe de l'utilisateur pour tenter de se synchroniser.

Ce nouveau modèle permet la synchronisation en un cycle maximum, toutes les phases étant envisagées simultanément. Il montre une grande résistance à la variabilité, au bruit additif ainsi qu'aux absences de frappes. L'adaptation à ses diverses perturbations ainsi qu'aux changements de tempo est illustrée par la figure 5.6. On peut se reporter à [Duverger, 2006; Quinton, 2006] pour davantage de résultats empiriques.

De par les processus atomiques plus simples, la propagation d'activité et la régulation entre ses composants, on note déjà une progression vers le modèle complet présenté dans les chapitres précédents.

5.1.4 Extension continue avec relativité absolue

Bien que la version précédente soit très performante et robuste, certains aspects de conception semblent problématiques ou tout du moins discutables :

– Pour chaque *Groupe*, une seule *Cellule* est active à chaque instant. De plus, lorsque la synchronisation se produit, $n-1$ séquences, codant les phases non adaptées (sur un total de n), deviennent inutiles et sont désactivées. Une telle redondance est-elle utile ? Est-elle biologique plausible, quel que soit le substrat ?

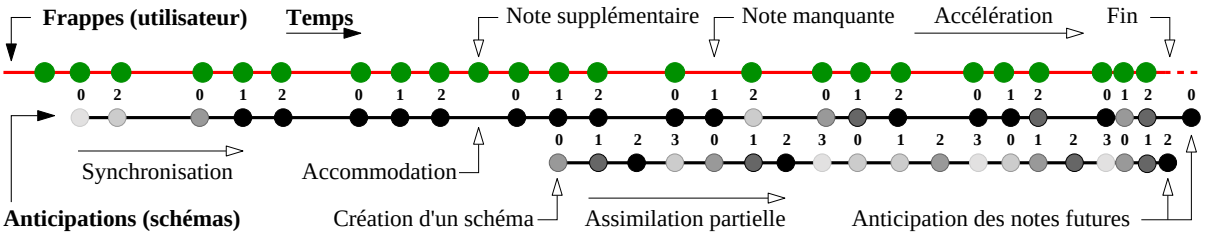


FIGURE 5.6 – Capture annoté du programme de TamTam dans sa deuxième version. Les chiffres indiqués au dessus de la ligne des anticipations correspondent au numéro de la cellule la plus active dans le rythme associé. Ici sont combinés le nouvel algorithme de synchronisation et l'apprentissage de rythmes nouveaux par variation/sélection. Cette visualisation à l'avantage de faire apparaître les futures notes anticipées au fur et à mesure de l'interaction avec l'utilisateur.

– Une frappe perçue avant le temps anticipé peut déclencher une transition irréversible vers la cellule suivante. Alors, une frappe parfaitement synchronisée avec l'anticipation précédente sera ignorée ou confondue avec la frappe suivante. La tendance est donc à l'accélération et entraîne une désynchronisation rapide.

Pour régler ces deux "problèmes" sans cette fois-ci viser une convergence plus rapide des paramètres vers leur valeur réelle, une nouvelle structure représentée sur la figure 5.7 est introduite. Il n'y a plus qu'une seule séquence de cellules, mais toutes restent actives en permanence. Il n'y a plus de seuil ou de transition, donc plus d'activation ou de désactivation. Seul compte le niveau d'activité relatif de chaque cellule. Selon l'instant où elles sont perçues, les frappes ne seront donc plus inhibées mais n'auront qu'une trop faible influence pour modifier la dynamique de l'activité des cellules.

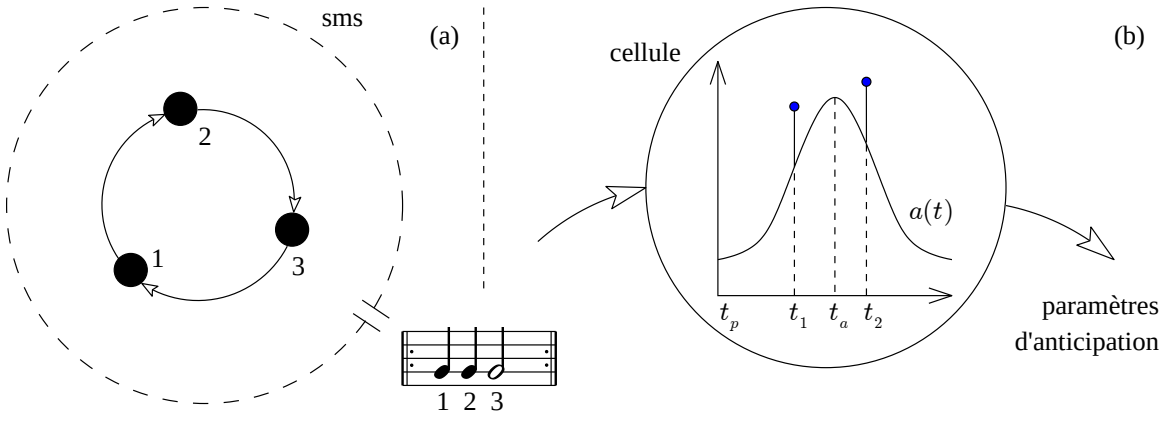


FIGURE 5.7 – (a) Dans cette troisième version du TamTam, chaque schéma (toujours le *cercle en pointillés* est simplement constitué d'une séquence de *Cellules*, mais toutes simultanément actives. (b) Chaque cellule adapte continûment sa courbe paramétrée (cette fois-ci une gaussienne) en fonction des informations de synchronisation qu'elle reçoit. Plus la confiance est grande, plus la gaussienne est étroite et de maximum élevé. Une frappe ne modifiera les paramètres émis à la cellule suivante que si elle permet d'atteindre d'augmenter le niveau maximal atteignable par la cellule à t_a. Ainsi la frappe à t_1 n'aura aucun effet, contrairement à celle de t_2.

Étant donné l'absence de redondance dans cette version, les différentes phases coexistent sous forme d'activité propagée dans une structure commune. Si le tempo diffère entre les différentes cellules, certaines cellules risquent d'écraser les paramètres des cellules suivantes avec les informations qu'elles transmettent. Comment garantir alors que seule la phase qui assimile le mieux les frappes se stabilise ? La solution trouvée est de ne mettre à jour les paramètres d'une cellule que si la confiance dans l'anticipation précédente est supérieure à celle de la cellule considérée. Comme précédemment, toute cellule bénéficie d'un bonus d'activité en cas de frappe synchronisée de la part de l'utilisateur.

Que ce soit au niveau du parallélisme des éléments, de la continuité des variables, de la relativité absolue entre les activités, de l'utilisation de maximum ou de l'intégration des sensations et des anticipations en chaque cellule, on retrouve déjà les éléments essentiels du modèle complet défendu dans cette thèse.

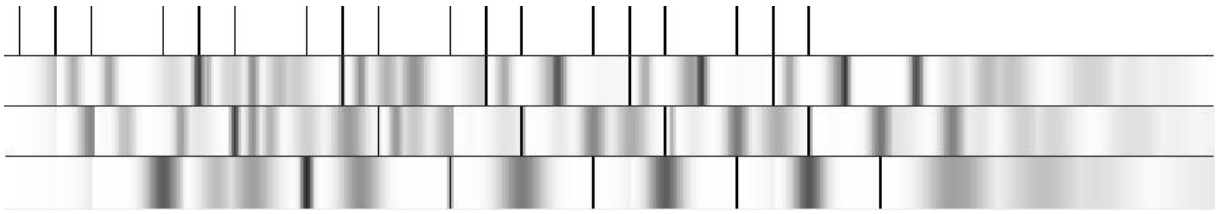


FIGURE 5.8 – Capture annotée du programme de TamTam dans sa troisième version. La première ligne correspond aux frappes de l'utilisateur. Les autres sont les anticipations continuelles des cellules formant un rythme. La couleur code le niveau d'activité de chaque cellule. Un trait est d'autant plus noir que l'anticipation d'une frappe est forte. On remarque que la synchronisation se produit par la réduction progressive des dégradés, traduisant un affinement progressif des gaussiennes, c'est-à-dire une augmentation de la confiance. Les 3 phases subsistent en tant que potentialités, à des niveaux d'activité différents, mais une unique phase est caractérisée par des traits noirs et fins.

5.2 Stabilisation de pendule et interaction homme-machine

Suite aux développements du TamTam, j'ai souhaité revenir sur la régulation des actions, déjà abordée durant mon stage de Master. En effet, aucune action dans le TamTam n'influence la dynamique de l'agent et de l'environnement. Les frappes de l'utilisateur ne sont pas modifiées si le programme les assimile mal et celui-ci peut toujours se synchroniser ultérieurement. A l'inverse, si un schéma sensori-moteur propose des actions, celles-ci influencent les sensations, qu'elles soient correctes ou non. Une légère erreur ou perturbation dans les commandes motrices peut faire dériver les sensations qui deviendront rapidement inassimilables par le schéma, d'autant plus que le nombre de degrés de liberté est grand [Quinton, 2005].

Bien que ce ne soit pas l'unique solution envisageable, il semble donc logique de réguler les actions au même titre que la période ou la phase dans le TamTam. Cela signifie qu'en fonction du niveau d'assimilation d'un schéma, il faut déterminer quelles actions doivent être corrigées et de quelle façon, dans quelle mesure... Même si l'on a accès à l'erreur commise pour chaque sensation anticipée, on se heurte à des résolutions complexes de cinématique inverse. On retrouve

des modèles inverses pour palier à ce problème dans les *Modèles internes* présentés en première partie. Il faut connaître ou générer un tel modèle, en supposant qu'il n'est pas sous-déterminé par l'ensemble des sensations.

Maîtriser formellement la dynamique de l'environnement en tenant compte de tous les facteurs et des interactions avec l'agent est impensable, même dans le cas d'un système physique relativement simple comme celui qui sera utilisé dans cette application. Trouver les équations qui déterminent l'état du système à chaque instant n'est déjà pas évident, les résoudre relève de l'impossible. On se contente donc généralement d'un modèle approximatif.

Un dernier point est à prendre en compte : lorsqu'on effectue une action et que l'on observe une dérive par rapport à la conséquence prévue, on ne peut plus corriger l'action précédente. Un laps de temps s'est écoulé, le système a évolué et la situation a changé. Il ne faut donc pas choisir l'action qui aurait permis de satisfaire l'anticipation un instant avant, mais celle qui permettra de corriger le tir. On génère donc une nouvelle prédiction, en tout point similaire à la précédente. La régulation consiste donc à choisir à chaque instant l'anticipation la plus adaptée relativement à la situation présente et au but à atteindre.

On dispose déjà d'un modèle où un ensemble de schémas sensori-moteurs rentrent en concurrence pour assimiler au mieux la dynamique. Si aucun des schémas connus n'assimile parfaitement la situation, pourquoi ne pas interpoler leurs actions pour qu'elles correspondent mieux à la situation, en attendant qu'un nouveau schéma plus adapté soit généré. Les dimensions perceptives et actives prennent alors des rôles symétriques, et l'interpolation peut être réalisée dans un espace commun : l'*espace d'interaction* est né. L'idée a germée et s'est développée lors de mon stage au NII à Tokyo, grâce à la bienveillance et aux conseils de Tetsunari Inamura, mon directeur sur place, qui m'a permis d'explorer cette piste [Quinton and Inamura, 2007].

5.2.1 Système mécanique simulé

Ce concept d'espace d'interaction a pu être testé sur un problème relativement simple mais néanmoins classique en robotique et en automatisme. Il s'agit du système physique formé d'un charriot, en mouvement horizontal sur un rail fixe, sur lequel est fixé un balancier (voir figure 5.9). L'agent peut affecter le système à chaque instant en appliquant une force longitudinale sur

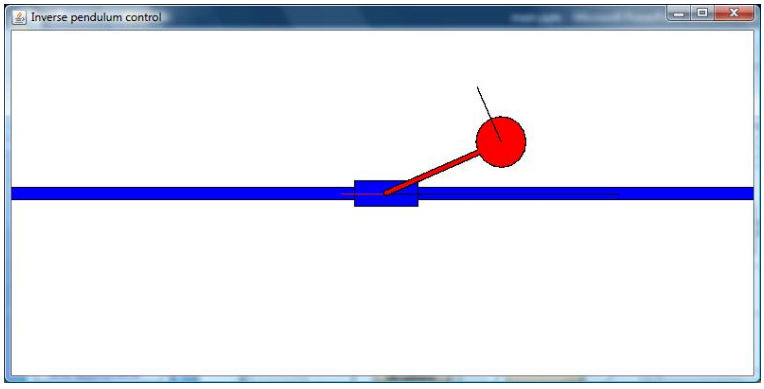


FIGURE 5.9 – Capture de la fenêtre de rendu de la simulation physique du système pendule/-charriot. On y retrouve le rail et le charriot (*en bleu*) ainsi que le pendule (*en rouge*). On peut aussi distinguer au niveau du pendule (*trait noir*) et au niveau du charriot (*trait rouge*) une représentation des vitesses angulaires et linéaires des deux éléments.

le charriot. Dans la simulation réalisée, cette force ne peut dépasser une valeur maximale (de même que la force appliquée par un robot ou un humain ne peut être infinie). Pour éviter que les choses ne soient trop faciles, ce maximum est gardé suffisamment bas pour que l'agent ne puisse directement faire retourner le pendule sans devoir patienter et utiliser le mouvement de balancier.

Les diverses forces considérées dans ce système sont les suivantes :
- Mg : force de pesanteur sur le charriot de masse M
- mg : force de pesanteur sur le pendule de masse m. On suppose que le centre de gravité peut être assimilé au centre du disque du balancier.
- Fc : friction sur le rail (paramétrée par d)
- Fp : friction du pendule dans l'air (paramétrée par b)
- T : tension du pendule (de longueur R)
- N : force de réaction normale du rail
- f : force appliquée par l'agent en interaction avec le système

Ces forces sont représentées sur la figure 5.10 (on retrouve les forces opposées F_p et $-F_p$ associées au couple résultant de la friction à l'extrémité du balancier, via la troisième loi de Newton). Elles conduisent aux équations suivantes déjà introduites dans le chapitre précédent, obtenues via le Lagrangien du système ou l'application du principe fondamental de la dynamique :

$$\begin{aligned}(M+m)\ddot{x} &= mR\dot{a}^2 \sin a - mR\ddot{a}\cos a - d\dot{x} + f \\ \frac{b}{R}\dot{a} + m\ddot{x}cos\theta + mR\ddot{a} + mg\sin a &= 0\end{aligned} \tag{5.3}$$

où x est la position du charriot sur le rail et a l'angle formé par le pendule et l'axe vertical (celui de la force de pesanteur).

On remarque que ces équations sont loin d'être simples, malgré la faible complexité apparente du système physique. L'agent va donc tenter de construire un modèle approximatif de la dynamique du système, on observant l'évolution des variables suivantes :
- v : la vitesse linéaire du charriot sur le rail
- a : l'angle formé par le pendule et l'axe vertical
- w : la vitesse angulaire du pendule

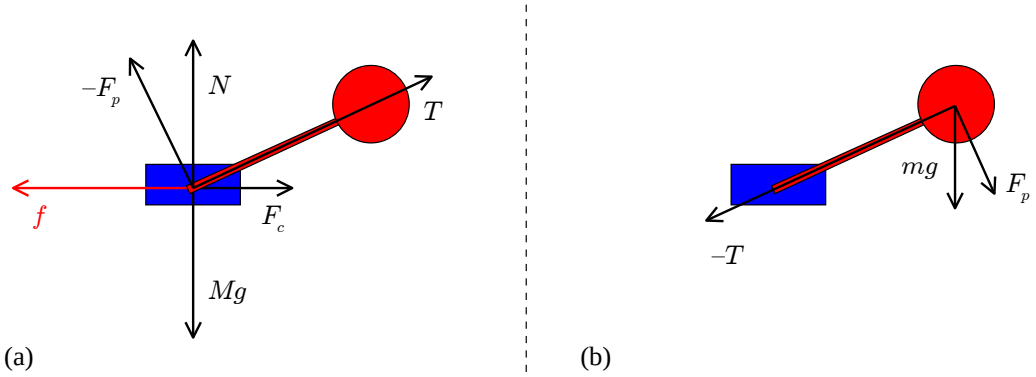


FIGURE 5.10 – Ensemble des forces internes et externes du système pendule/charriot. Le rail n'est pas représenté puisque celui-ci est fixe et ne fait pas partie du système dynamique avec lequel on interagit. (a) Forces s'appliquant sur le charriot. (b) Forces s'appliquant sur le pendule.

Le système possède une dynamique propre qui le ramène systématiquement aux point d'équilibre stable ($v = 0, a = 0, w = 0$), sauf s'il se trouve au point ($v = 0, a = \pi, w = 0$) instable. Le seul moyen que possède l'agent pour influencer cette dynamique pour par exemple maintenir le pendule en position haute est la force f qui constitue donc la seule action de l'agent (figure 5.11).

Le délai de mise à jour du modèle physique par la méthode de Runge-Kutta est de 20 millisecondes et les paramètres prennent les valeurs suivantes :

- g = 9,81 m.s^{-2} (gravité)
- M = 5 kg (masse du charriot)
- m = 0,2 kg (masse du pendule)
- R = 1 m (longueur du pendule)
- d = 1 kg.s^{-1} (coefficient de friction du charriot)
- b = 0,03 kg.s^{-1} (coefficient de friction du pendule)

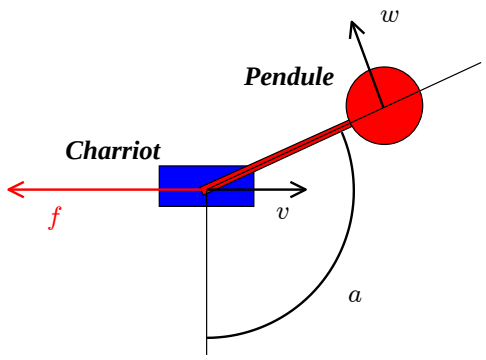


FIGURE 5.11 – L'agent ne perçoit que la vitesse du charriot v, l'angle entre la verticale et le pendule a et la vitesse angulaire de celui-ci w. Celui-ci ne peut agir que sur le charriot en appliquant une force f d'un côté ou de l'autre du charriot.

5.2.2 Modèle d'interaction et interpolation

Un des points qui a motivé le choix de ce système et que sa dynamique nécessite des interactions rapides. En effet, les oscillations permanentes du système entraînent des changements constants et violents dans les variables. Tout modèle nécessitant des calculs trop longs est donc éliminé si l'on compte agir en temps-réel. Il est même nécessaire d'anticiper sur la dynamique du système pour effectuer des actions adaptées, en prenant en compte les délais de transmission des commandes et leur exécution.

On suppose également que le modèle n'est pas connu a priori et on souhaite qu'apprentissage et exploitation des connaissances soient simultanés. L'algorithme d'apprentissage doit donc être appliqué online, sans qu'aucune pause ne soit nécessaire dans les interactions entre l'agent et le système. Le modèle doit bien sûr permettre une telle souplesse, tout en restant prédictif et interactif. L'approche retenue ici se différencie en cela de l'utilisation de contrôleurs très réactifs et efficaces mais dont la génération s'opère généralement par des approches itératives coûteuses (comme des algorithmes génétiques).

Comme dans la majorité des systèmes physiques réels, les variables sont continues. Dans la majorité des applications en robotique, les variables discrètes sont généralement confinées aux

niveaux plus abstraits de la cognition, afin par exemple de catégoriser des objets ou distinguer des concepts. Néanmoins, la boucle sensori-motrice des interactions avec un robot repose sur un timing discret, à cause de diverses contraintes informatiques et électroniques. On effectue donc un échantillonnage discret d'un signal continu.

L'apprentissage consiste ici en l'association du contexte et de l'action à l'instant t avec la situation à l'instant $t+1$. Par la suite on peut opérer une prédiction si on se retrouve dans le même contexte et qu'on décide d'appliquer la même action : $(v_t, a_t, w_t, f_t) \rightarrow (v_{t+1}, a_{t+1}, w_{t+1})$. L'anticipation sera vérifiée à l'imprécision des commandes et des mesures près puisque l'ensemble des variables choisies détermine l'évolution du système "perçu". A partir des seules variables v,a,w et f, on ne peut déterminer par exemple la position du charriot x, mais celle-ci ne fait pas partie des variables que l'agent peut évaluer, sa valeur n'a donc pas d'importance.

On définit donc une surface d'anticipation par variable sensitive (v, a et w) :

$$\begin{aligned} surf_v &: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R} \\ &\quad s_t = (v_t, a_t, w_t, f_t) \mapsto v_{t+1} \\ surf_a &: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R} \\ &\quad s_t \mapsto a_{t+1} \\ surf_w &: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R} \\ &\quad s_t \mapsto w_{t+1} \end{aligned} \tag{5.4}$$

On doit alors approximer ces fonctions grâce à l'expérience de l'agent. Chaque situation étant unique, elle conduira à des valeurs toujours légèrement différentes de chaque variable. Malgré cette variabilité permanente, effectuer des actions similaires dans des contextes similaires autorise des anticipations similaires. Afin d'exploiter ce phénomène, on réalise une interpolation des anticipations à partir d'un ensemble d'anticipations de référence. Ces points de références correspondent à des enchaînements de situations rencontrées par le passé et mémorisées par l'agent.

Rien ne garantit que ces références seront régulièrement espacées dans l'espace. Ainsi, l'interpolation multivariée utilisée doit être compatible avec une distribution quelconque de points. On n'a pas besoin d'une précision extrême, puisque chaque cycle sensori-moteur permet de réguler les actions et compenser les erreurs passées, on se contente donc ici d'une interpolation à base d'IDW (Inverse Distance Weighting). Les raffinements proposés par Shepard [Shepard, 1968] ou Liszka [Liszka, 1984] permettent d'obtenir des approximations plus correctes de la surface continue, mais sont aussi beaucoup plus lourdes à mettre en œuvre et donc inadaptées à notre approche.

Si on considère uniquement la fonction $surf_v$ à l'instant t, et qu'on suppose que l'on a retenu un ensemble de couples $(s_i, surf_v(s_i))$ (soit (s_i, v_{i+1})) avec $i \in i_1, ..., i_n$ et $i_n < t$, on peut alors appliquer en tout point la fonction suivante pour approximer la valeur de v à l'instant $t+1$:

$$\widetilde{surf_v}(s_t) = \frac{\sum_i w(s_i, s_t) * surf_v(s_i)}{\sum_i w(s_i, s_t)} \tag{5.5}$$

Il s'agit d'une simple somme pondérée où $w(s_i, s_t)$ est le poids associé à la référence $(s_i, surf_v s_i)$. Ce poids est inversement proportionnel à la distance entre le point d'interpolation et la référence considérée.

$$w(s_i, s_t) = \frac{1}{\|s_i - s_t\|_2} \tag{5.6}$$

La norme euclidienne utilisée ici est celle qui permet à chaque point d'être suffisamment influent localement sans pour autant introduire des pics sur la surface (on retrouve les résultats de l'étude de Shepard sur les fonctions de pondération).

5.2.3 Apprentissage

A chaque instant, l'agent tente d'exploiter ses connaissances en anticipant l'évolution du la situation. On compare alors la situation observée à l'instant t avec la prédiction produite à l'instant $t-1$ via l'équation 5.5. Pour cela, on calcule l'erreur relative commise :

$$\frac{v_t - \widetilde{surf_v}(s_{t-1})}{v_t} \tag{5.7}$$

Si on fixe un pourcentage d'erreur tolérée (seuil), deux cas sont évidemment envisageables :

- Si l'anticipation est jugée correcte, on peut estimer que l'état des connaissances est suffisant et on ne touche à rien.
- Dans le cas contraire, les connaissances doivent être révisées. Pour cela, on rajoute un nouveau point de référence, correspondant à l'évolution réelle de la situation : (s_{t-1}, v_t)

La figure 5.12 montre une projection 2D des points de référence créés lors de l'exécution de l'application. Pour voir plus en détail l'évolution d'une surface d'anticipation au fur et à mesure des interactions entre l'agent et l'environnement, on peut se reporter à l'annexe B. Celle-ci donne également une idée des performances atteintes en termes de nombre de points nécessaires à l'approximation correcte d'une surface arbitraire.

5.2.4 Enseignement et exploration

On peut parfaitement laisser cet agent observer le système mécanique et apprendre comment le système évolue en l'absence de force appliquée. De même il peut appliquer aléatoirement une force sur le charriot et en observer l'effet, apprenant progressivement ce qu'il peut faire dans chaque situation. Mais, malgré le faible nombre de degrés de liberté, l'espace est déjà gigantesque si on considère que chaque variable prend des valeurs réelles et parcourt un intervalle large. De plus certaines parties de l'espace ne peuvent être explorées que dans des conditions particulières. Ainsi la classique stabilisation du pendule en position inversée ($a = \pi$,$w = 0$) requiert une série d'interactions précises permettant à w d'atteindre temporairement des valeurs élevées.

Par essai/erreur, l'exploration et l'apprentissage de la dynamique peut donc être longue. Si une erreur est faite après une série d'interactions, il faudra souvent en reprendre une bonne partie pour revenir dans une situation similaire et essayer autre chose. Sans connaissance a priori, l'agent ne sait même pas si une série d'interactions conduit à quelque chose "d'intéressant" avant de l'avoir effectuée. La notion d'intérêt nécessite d'avoir une tâche à accomplir. L'agent ne disposant pas dans cette application de buts propres, c'est l'homme qui va lui fournir sous la forme d'un état du système physique à atteindre. A chaque cycle de la boucle sensori-motrice, l'agent choisit alors l'action qui permet de se rapprocher au maximum du but, d'après ses connaissances partielles (figure 5.17a).

Les interactions avec un autre agent (informatique ou humain), ne doivent pas nécessairement s'arrêter à la définition d'un but. L'homme peut par exemple montrer comment l'atteindre en agissant directement sur le système. Deux types de communication sont donc mises en place (voir la figure 5.13 en complément des paragraphes ci-dessous).

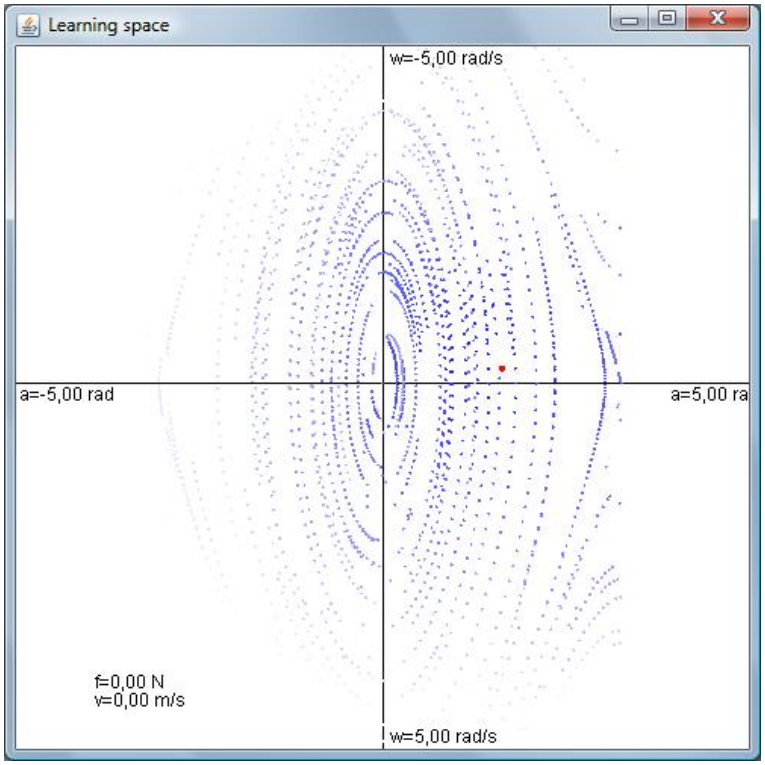


FIGURE 5.12 – Capture d'écran d'une fenêtre de suivi de la dynamique de l'agent et de ses anticipations pour une variable donnée. L'espace des interactions possédant 4 dimensions (v,a,w et f), on ne peut tout représenter sur un écran 2D. On considère seulement le plan (AW) et on projette les anticipations mémorisées (*points bleus*) sur celui-ci. Les points sont d'autant plus sombres que les valeurs des variables restantes (v et f) sont proches de celles de la situation présente (*point rouge*). Malgré la densité apparente des anticipations de référence, celle-ci est négligeable comparée au nombre d'interactions réalisées avec l'environnement.

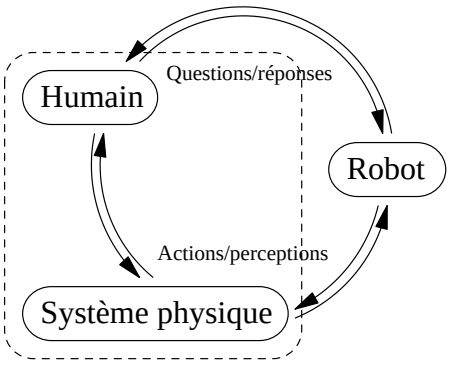


FIGURE 5.13 – Diagramme synthétisant les interactions entre l'agent et son environnement (humain + système physique). L'humain comme l'agent peuvent interagir avec la simulation physique en faisant varier la force f. L'homme et l'agent peuvent également communiquer entre eux via une interface textuelle.

Communication directe

De manière classique, l'homme et le robot échangent des messages (ici textuels) via une interface dédiée. Les êtres humains donnent ainsi souvent des ordres à un robot ou à un programme, lequel répond par des actes ou un message similaire. Le robot peut également demander de l'aide à l'homme, en lui demandant par exemple de montrer comment atteindre un certain état du système. L'humain, s'il est plus expert, peut alors faire une démonstration, réussie ou non. Dans les deux cas, l'agent restera passif pendant ce temps, observant uniquement les actions et la dynamique du système. Les moyens de réaliser une telle démonstration sont décrits dans *Communication indirecte*. Pour un aperçu de l'interface utilisée dans notre application intégrant de nombreuses commandes non développées ici, voir la figure 5.14.

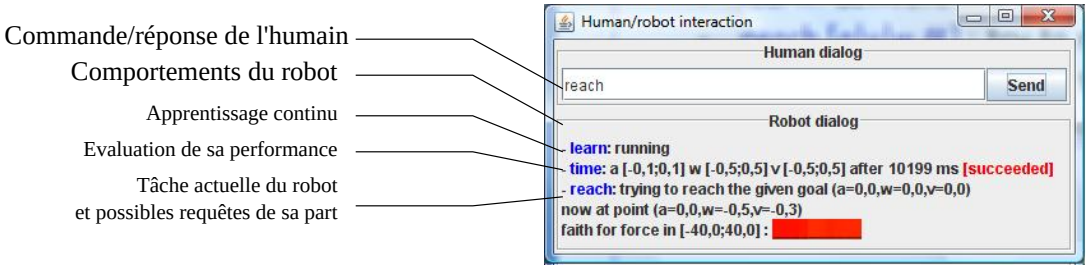


FIGURE 5.14 – Interface textuelle de l'application : l'humain peut y donner des ordres ou répondre à des questions, alors que l'agent y indique son état et ses comportements.

Communication indirecte

La communication peut aussi passer par l'environnement. L'être humain agit sur le système physique et l'agent informatique observe sa performance pour apprendre plus efficacement la dynamique. Cette interaction est réalisée via la fenêtre de rendu physique et avec la souris. L'utilisateur humain étant considéré comme l'enseignant, celui-ci est à tout instant prioritaire sur le robot et peut donc agir sur le système à sa guise. On peut aussi imaginer que plusieurs agents communiquent par ce biais ou qu'un agent puisse enseigner le moyen le plus efficace de réaliser une tâche à un humain, en inversant les rôles enseignant/élève. On peut aussi considérer que l'homme et l'agent coopèrent, chacun opérant dans les situations où il est le plus compétent.

L'homme peut donc appliquer lui aussi une force f sur le mobile en utilisant la souris. Plusieurs expressions mathématiques ont été testées, mais l'interaction ressentie comme la plus naturelle est déterminée par :

$$f_{humain} = min\left(f_{max}, k_1\left((c_t - x_t) - \frac{v_t}{k_2}\right)\right) \tag{5.8}$$

où x_t et v_t sont la position et vitesse du charriot, k_1 et k_2 deux paramètres réglables en fonction de l'utilisateur et f_{max} la force maximale applicable par l'utilisateur (la même que celle du robot). Enfin, c_t est une position cible à atteindre déterminée par la position de la souris de l'utilisateur sur la fenêtre de simulation physique.

L'agent ne disposant pas de neurones miroirs ou un quelconque moyen d'interpréter les actions de l'utilisateur afin de pouvoir les mimer par la suite, celui-ci enregistre directement

la force f appliquée sur le charriot par l'humain. Il observe alors la dynamique "comme si" il effectuait lui même les actions, à la seule différence qu'il ne décide pas de la force appliquée. Pour dresser un parallèle avec une forme d'enseignement réel, on peut penser à la main du maître qui guide celle de l'élève, que ce soit pour écrire ou dessiner.

5.2.5 Résultats

Il est important de remarquer ici que l'apprentissage est indépendant de la tâche. Pour montrer les implications d'un tel fonctionnement, on va prendre le cas particulier d'une série d'interactions :

1. L'humain demande à l'agent d'atteindre une situation particulière. Il peut par exemple d'agir de la stabilisation rapide du pendule en position basse : $v = 0$,$a = 0$,$w = 0$. Il s'agit du point d'équilibre stable du système, mais accélérer efficacement le ralentissement du pendule n'est pas trivial.
2. L'humain contrôle le pendule pour le placer loin de l'équilibre : $a = \pi$
3. Le robot tente de ralentir le pendule. S'il y parvient, il est inutile d'interagir davantage avec l'utilisateur. Sinon, c'est que l'agent ne maîtrise pas suffisamment la dynamique. L'évaluation de cette maîtrise par l'agent n'est pas détaillée ici car le chapitre *Apprentissage* des extensions en développera une version généralisée par l'introduction d'un degré de confiance dans les anticipations. On peut néanmoins en retrouver la description pour cette application dans [Quinton and Inamura, 2007].
4. Le robot demande à l'utilisateur de faire une démonstration de la tâche (ou de la partie de la tâche qu'il ne maîtrise pas)
5. L'humain agit et le robot observe. Même si l'utilisateur humain ne réalise pas une démonstration parfaite pour cette tâche, le robot apprend néanmoins une partie de la dynamique, ce qui ne peut qu'améliorer ses performances ultérieures. Même si l'utilisateur effectue une tâche totalement différente, cela ne perturbera pas l'apprentissage.
6. On retourne à l'étape 2, le robot aura alors plus de chances de parvenir à atteindre le but, ou redemandera une démonstration s'il ne peut apprendre seul à maîtriser la tâche.

En limitant plus ou moins les interactions entre l'humain, le robot et le système physique, on peut évaluer le gain de performance obtenu via cette forme d'enseignement. La tâche considérée est la stabilisation du pendule en position basse ($v = 0$,$a = 0$,$w = 0$) (confère la description précédente). La tâche est considérée comme réussie lorsque l'on s'approche suffisamment du but : $|a| < 0.1\ rad$, $|w| < 0.2\ rad.s^{-1}$, $|v| < 0.1\ m.s^{-1}$.

Les résultats sont synthétisés sur les figures 5.15 et 5.16 ci-dessous. On remarque que l'application d'une force aléatoire à chaque instant ne permet jamais d'atteindre le but, prouvant que le système est bien sensible à la force appliquée et que le hasard n'explique pas les résultats. Lorsque qu'aucune force n'est appliquée, le système physique converge vers le but, mais à un rythme très lent. L'application d'une force adéquate à des moments précis est en effet nécessaire pour améliorer la convergence vers le but. De nombreuses stratégies existent, dont certaines semblent plus évidentes pour l'homme, même si elles ne sont pas forcément les plus efficaces. On peut par exemple appliquer une force maximale dans une direction lorsque le pendule a une vitesse maximale pour réduire a par paliers, ou bien alterner des poussées réduites de chaque côté pour faire diminuer v.

Lorsque le robot apprend seul la dynamique à partir de rien, il effectue au départ des actions aléatoires et apprend très progressivement la dynamique, mais dégrade la convergence dans les premières tentatives au lieu de l'améliorer. Avec l'aide de l'humain, il apprend efficacement et atteint au final le but plus rapidement que son "maître". Celui-ci bénéficie de la précision d'une machine pour appliquer la force optimale à chaque instant, alors que l'humain continue à évaluer approximativement la situation et à agir à l'intuition.

Initial / Force	a	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$
	w	0	4	0	0	2
aucune (spontané)		26	30	18	18	22
aléatoire		∞	∞	∞	∞	∞
humain expert		4	6	3	3	2
robot novice		81	96	27	36	47
robot après 5 minutes		8	12	3	8	13

FIGURE 5.15 – Temps moyen de stabilisation du pendule selon le type d'interactions considérées (en secondes). L'angle et vitesse initiaux sont respectivement donnés en rad et rad/s. Le robot considéré ici apprend lorsque l'utilisateur expert effectue la tâche. On remarque ainsi que ses performances s'améliorent grandement entre le lancement du programme (*robot novice*) et après 5 minutes d'interactions.

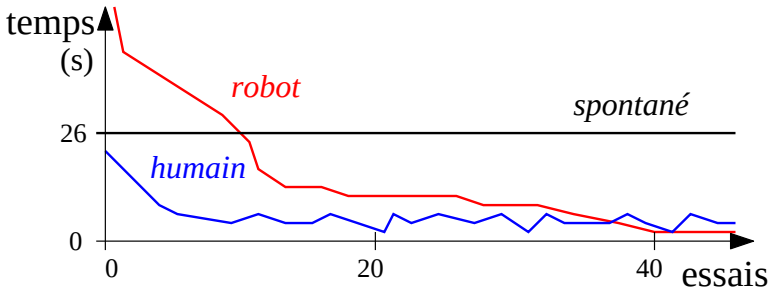


FIGURE 5.16 – Comparaison de l'apprentissage et des performances entre l'humain et le robot. L'évolution spontanée du système vers l'équilibre est donnée comme référence. L'humain est au départ plus performant, se servant de ses connaissances explicites comme implicites. Après quelques essais, le robot s'inspire de la performance de l'utilisateur humain et maîtrise de mieux en mieux la tâche de stabilisation, jusqu'à être plus régulier et efficace que l'homme.

5.2.6 Problème du pendule inverse

La tâche de stabilisation du pendule est correctement effectuée par le robot après apprentissage. L'apprentissage ne dépendant pas de la tâche, on pourrait imaginer que le robot peut remplir n'importe quelle mission concernant la dynamique du pendule moyennant un apprentissage adéquat. C'est sans compter sur un énorme problème de l'algorithme simpliste utilisé pour atteindre les buts. Comme précisé plus haut, le robot cherche à chaque instant à se rapprocher du but. Or de nombreux comportements impliquent de s'éloigner momentanément de la situation cible si on désire l'atteindre : c'est le cas de la stabilisation du pendule en position inverse, lorsque la force maximale applicable est réduite (figure 5.17).

De manière générale, toute coordination de plusieurs sous-tâches pose problème. Le but doit être directement atteignable pour que l'algorithme direct fonctionne, il n'y a pas de planification, pas d'évitement d'obstacle... Ce constat a motivé les mois de recherche qui ont suivi et ceux-ci ont conduit à l'application suivante.

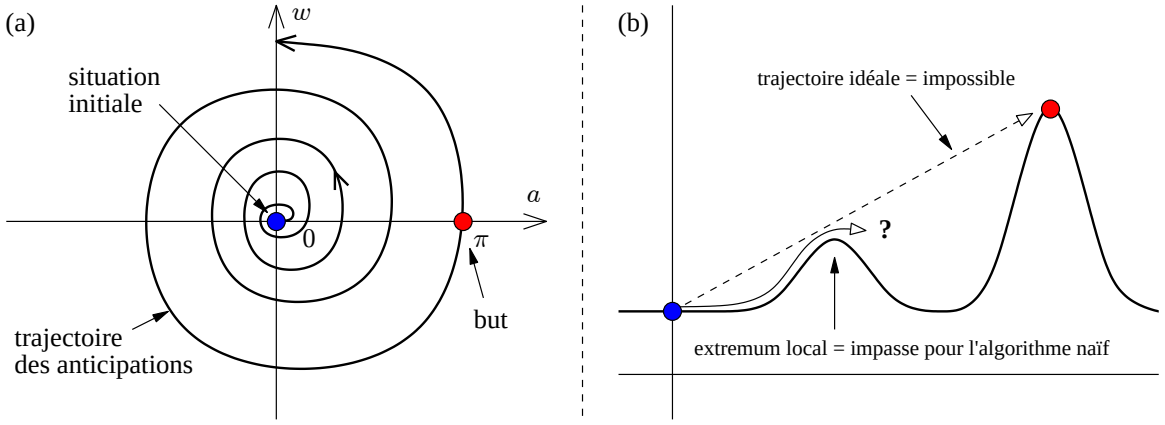


FIGURE 5.17 – Comportement orienté vers le but avec attraction directe. (*a*) Dans le cas du système physique de cette application, il faut appliquer les forces adéquates pour augmenter l'amplitude du balancement et renverser le pendule. Aller directement de l'état initial (*point bleu*) au but (*point rouge*) est impossible, la force maximale applicable f_max étant insuffisante. (*b*) De manière générale, tout but nécessitant le passage par un extremum local sera impossible à atteindre avec l'algorithme naïf. Il faut pouvoir anticiper à plus grande échelle et tolérer un éloignement temporaire de la valeur cible.

5.3 Navigation spatiale

L'atteinte de buts complexes doit se faire en trouvant un chemin dans l'ensemble des anticipations connues et non en régulant exclusivement les sensations. Il ne faut donc pas chercher à tracer une ligne droite potentiellement impossible à parcourir entre la situation et le but. Quoi de mieux pour illustrer la planification et la coordination qu'une application de navigation spatiale, où les buts sont explicites et les anticipations facilement interprétables visuellement.

Contrairement aux applications précédentes, celle-ci utilise le modèle complet présenté dans les chapitres précédents. Cette application emploie la métaphore de chemins physiques macroscopiques pour illustrer les propriétés de coordination dans un réseau d'anticipations. Si on considère les vols permettant de relier les grandes villes européennes, les trajets existants ne sont pas forcément les plus courts. Du fait que les vols soient plus nombreux, les billets moins chers ou les retards plus rares, il peut être avantageux d'aller de Toulouse à Zagreb en passant par Londres ou Francfort (voir la figure 5.18 pour suivre l'exemple). Si l'on se trouve à Toulouse et que l'on n'a pas connaissance des correspondances, savoir que de nombreux vols relient Toulouse à Londres n'a que peu d'intérêt. On s'acharnera à chercher un vol direct Toulouse-Zagreb inexistant. De plus, la topologie de l'Europe est telle que se hasarder à partir à Londres nous éloigne de notre destination croate. On a besoin d'une connaissance supplémentaire, qui nous informe de l'existence du vol Londres-Zagreb. En réunissant ces deux connaissances, il semble

évident pour les êtres humains qu'il est possible de partir à Zagreb en passant par Londres. Pour un programme, c'est moins naturel.

Les approches en logique ou théorie des graphes à ce problème construisent incrémentalement des chemins reliant les destinations en parcourant l'ensemble des vols existants. Si on n'a pas de contrôle centralisé permettant un accès à toutes les connaissances, il faut savoir quel vol nous rapproche du but, et ce en chaque point du réseau aérien. Supposons que dans chaque aéroport on dispose d'un tableau d'affichage personnalisé ordonnant les vols en tenant compte de la distance au but, du temps d'attente et d'autres facteurs utiles. Il suffit alors de prendre le vol le mieux classé, sans même connaître l'escale suivante. Comment construire une telle mesure qui résout nos problèmes de correspondances ? Au niveau de chaque aéroport, il suffit d'évaluer le coût de chaque vol, en intégrant sa durée et le coût minimum pour aller de la ville d'arrivée du vol à notre destination.

On peut construire récursivement un chemin menant de l'origine au but, mais celui-ci devra être refait intégralement au moindre changement dans la topologie, les horaires de vols ou la destination, en plus de nécessiter des calculs centralisés. Pourtant la plupart de ces changements n'affecteront qu'une partie du réseau. En effet on ne recherche que le chemin minimum en chaque nœud, et toute modification insuffisante pour modifier ce minimum ne sera pas propagée. L'approche choisie est donc de mettre à jour en chaque point du réseau un niveau d'activité, intégrant tous les aspects en une seule valeur réelle : à quel degré ce nœud est-il adapté à la tâche de nous conduire à destination.

Il suffit de maintenant remplacer les vols par des anticipations, les aéroports par des interactions et on retrouve le modèle de cette thèse. Si l'on considère de plus qu'il faut changer d'aéroport à Londres pour faire correspondre les vols Toulouse-Gatwick et Heathrow-Zagreb, on introduit la diffusion locale d'activité. Ici tout peut sembler discret, mais si on associe aux aéroports des coordonnées continues (latitude et longitude) on peut parfaitement raisonner en termes d'assimilation locale et de propagation distante d'activité.

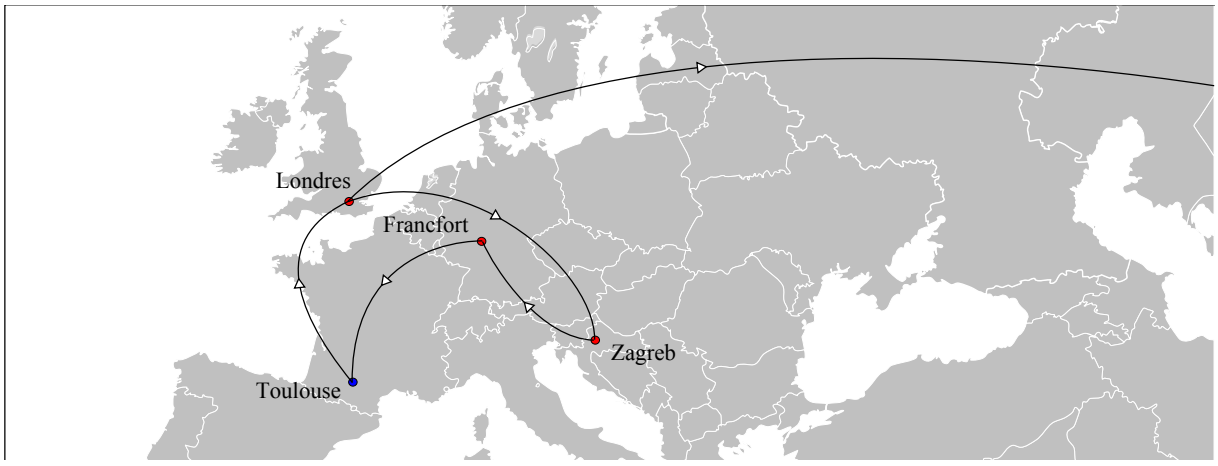


FIGURE 5.18 – Les correspondances dans les vols internationaux sont un bon exemple d'éloignement momentané nécessaire pour atteindre une destination. Ainsi, il peut être nécessaire de passer par Londres ou Francfort pour relier Toulouse à Zagreb, étapes qui sont loin de permettre des trajets en ligne droite.

Plusieurs algorithmes, efficaces aussi bien en temps qu'en utilisation de la mémoire, existent déjà pour trouver le chemin le plus court dans un graphe. On peut citer par exemple les algorithmes de Dijkstra ou de Ford-Bellman [Cormen *et al.*, 2001]. Ici nous ne cherchons pas à définir un algorithme de routage performant, mais un mécanisme plausible de coordination des comportements. Celui-ci doit donc être capable de s'adapter aux variations continues qui touchent aussi bien dans l'environnement que les représentations internes. Aucune heuristique utilisant les directions cardinales ou une métrique globale n'est utilisée, et le mécanisme n'exploite donc pas toutes les notions abstraites que l'homme emploie dans ses déplacements.

5.3.1 Architecture 1 couche

L'application est dérivée en deux versions. Cette première version montre les limitations d'un unique niveau de régulation et permet d'introduire progressivement les concepts. On considère un espace d'interaction à 4 dimensions : 2 dimensions sensitives et 2 dimensions actives. Les sensations correspondent à une position 2D, codée par les variables x et y. A chaque instant l'agent peut se déplacer via les commandes Δx et Δy. Les anticipations sont représentées sous la forme : $[x_1, y_1, \Delta x_1, \Delta y_1] \rightarrow [x_2, y_2, \Delta x_2, \Delta y_2]$. Les coordonnées sont ici cartésiennes et les dimensions sont donc irréalistes pour un organisme biologique, mais sont compatibles avec certains systèmes de repérage en robotique.

A tout instant, deux points sont particulièrement actifs dans le réseau : la situation présente et le but à atteindre. Dans cette section, on considère le but comme invariant durant toute la simulation. Au début de celle-ci, l'activité se stabilise rapidement par le biais des anticipations. Seuls quelques cycles sont nécessaires pour propager les activités à travers tout l'espace et former le paysage dynamique puisque les propagations/diffusions sont instantanées. Par la suite, seules les modifications des sensations dues aux actions prises par l'agent vont légèrement affecter le champ d'activité. Les actions réellement effectuées par l'agent sont elles-mêmes interpolées à partir des actions proposées par l'ensemble des anticipations, au prorata de leur activité. Cette activité est déterminée par la proximité au but et le degré d'assimilation de la situation présente (voir figure 5.19).

Ces anticipations à grande échelle ne sont pas très souples pour plusieurs raisons :

1. Leur portée ne leur permet que des régulations grossières. Même si ces régulations sont adaptées à leur échelle, les mouvements peuvent nécessiter des micro-régulations. L'ajout d'anticipations intermédiaires pour corriger ce problème aggraverait les problèmes 2 et 3 ci-dessous.
2. Chacune intègre ses propres sensations et actions alors que les déplacements peuvent potentiellement suivre des lois indépendantes de la position. On a donc une redondance excessive, dangereuse dans ce cas. En effet, une modification dans le couplage sensori-moteur devra être compensée pour l'ensemble des anticipations. Il peut s'agir d'une simple fatigue musculaire chez l'homme ou de la destruction d'un élément sur un robot (une roue par exemple).
3. Le type d'actions effectuées est figé, on ne peut exploiter une possible modularité de l'appareil moteur et opérer la même navigation haut niveau par le biais d'autres effecteurs.

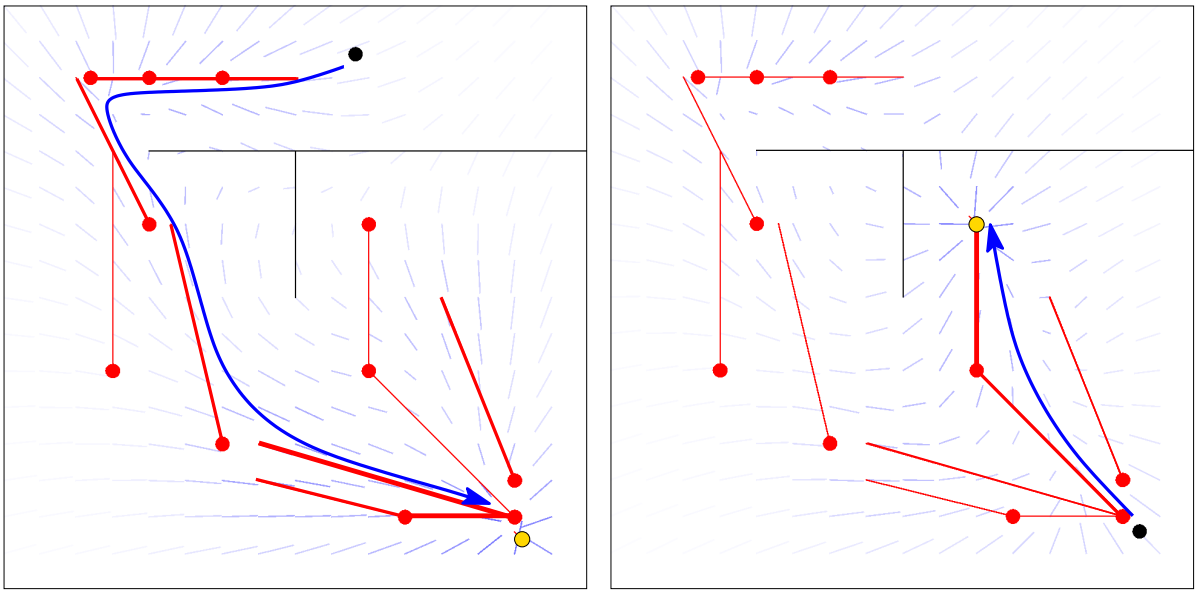


FIGURE 5.19 – Capture de la première application de navigation 2D. L'environnement réel non perçu par l'agent (*obstacles en trait noir*) et les représentations internes de l'agent (*anticipations en rouge*) y sont illustrés. On y trouve aussi la trajectoire suivi par l'agent durant la simulation (*flèche bleue*) entre sa position actuelle (*point noir*) et le but à la position cible (*point jaune*). Enfin on peut noter le champ de vecteur d'actions (*traits bleus*) variable selon la position du but à atteindre. Celui-ci est calculé par interpolation des actions de l'ensemble des anticipations en chaque point d'une grille régulière.

5.3.2 Architecture 2 couches

Pour comprendre les raisons de l'introduction de couches supplémentaires, on peut cette fois faire un parallèle avec les réseaux routiers. Au niveau d'un pays, la plupart des automobilistes ont connaissance des grands axes. On peut par exemple trouver des panneaux routiers nous indiquant le chemin des plus grandes villes et en particulier de Paris, même au cœur d'une ville située à l'autre bout de la France. On dispose de voies permettant de relier les grandes villes à grande vitesse, les nationales et les autoroutes, et de moyens pour les rejoindre rapidement. Si l'on désire se rendre chez un ami habitant à la capitale, on peut ainsi facilement savoir dans quelle direction partir. Au moment de notre départ, on ne sait pas exactement ce qu'il se produira durant le trajet, mais on anticipe déjà de passer par certaines étapes et avec un certain timing.

Une fois parti, on sera confronté à des panneaux routiers, des bifurcations, des feux rouges et beaucoup d'autres objets avec lesquels interagir bien qu'imprévisibles avant le départ, sauf connaître le trajet par cœur. Il faudra de même tourner, ralentir ou accélérer que ce soit pour prendre correctement les virages ou doubler un autre usager. Un automobiliste, quel qu'il soit, ne peut anticiper tous ces détails, car ceux-ci dépendent de trop nombreux facteurs dynamiques auxquels on n'a de toute manière pas accès a priori. L'état de l'ensemble du réseau routier est en effet régi par un système chaotique et complexe dont personne en particulier ne contrôle les paramètres.

Quand on planifie un déplacement, on le fait à grande échelle, en imaginant une trajectoire grossière dans l'ensemble de nos connaissances routières ou en utilisant une carte. Seules les interactions continues avec l'environnement confirmeront ou non nos anticipations et nous permettront de réguler notre comportement. Ces régulations, comme le contournement d'un embouteillage, l'évitement d'un obstacle sur la route, le passage à la station service la plus proche ou la prise en main d'une voiture inconnue, sont le fruit de comportements qui s'appliquent indépendamment du trajet à réaliser. Ils sont simultanément plus généraux car adaptés à toute situation de conduite et plus localisés aussi bien temporellement que spatialement. Au final, ils ne seront que les détails d'un comportement plus global, celui de se rendre de chez soi à la demeure de son ami.

Pour maintenant faire le rapprochement avec la coordination implicite et les couches du modèle, on peut concevoir ces différents comportements comme des réseaux d'interactions agissant dans des espaces différents et à des échelles différentes. Le déplacement global résulte d'une coordination spatiale indépendante des actions employées et d'une dynamique lente (on pourrait très bien prendre le train). A l'inverse, le comportement sensori-moteur de maintien de la voiture sur la route a une dynamique rapide et régule en continu les forces à appliquer sur le volant.

L'idée est donc de coupler plusieurs couches permettant chacune la régulation de certains aspects de la situation à une échelle donnée. On reprend donc les anticipations introduites dans la version 1-couche, tout en les abstrayant des effecteurs : $[x_1, y_1] \rightarrow [x_2, y_2]$. Celles-ci sont donc les briques d'une couche de navigation, indépendante des actions employées pour se déplacer mais déterminant la trajectoire grossière à suivre. La deuxième couche introduite, dite motrice, régule quant à elle la position de l'agent, indépendamment du trajet à suivre. Ses anticipations sont du type $[x_1, \Delta x_1] \rightarrow [x_2, \Delta x_2]$ ou $[y_1, \Delta y_1] \rightarrow [y_2, \Delta y_2]$.

Ces deux couches sont alors simplement couplées par une modulation. La couche de navigation propose ainsi une position à atteindre (c'est en quelque sorte son action sur son environnement) à la couche motrice (pour laquelle cette modulation agit comme un attracteur). La figure 5.20 donne un exemple d'une telle coordination à deux niveaux. La réduction des anticipations réalisée dans l'espace d'interaction de gauche constitue un but intermédiaire, qui module la couche motrice à droite (point vert). Seule cette couche dispose des connaissances sensori-motrices et de la finesse nécessaires à l'atteinte de ce sous-but. La réduction à ce niveau génère des actions adaptées, permettant de légèrement modifier la position de l'agent et faire progresser l'agent vers ses "deux" buts hiérarchiques.

5.3.3 Dynamique des buts

Le principal avantage de cette approche est la coordination implicite des anticipations au sein de chaque couche. Les deux couches voient les sensations se transformer à chaque instant et s'adaptent à la situation. Des buts dynamiques tels que la modulation propagée entre les deux couches ne posent donc pas problème. A chaque instant, la dynamique de la couche basse s'adapte à l'évolution de la dynamique globale dans la couche haute. Mais il peut en être de même pour la couche haute dont les attracteurs n'ont jusqu'à présent pas été abordés.

Ces attracteurs peuvent être à leur tour des modulations en provenance d'autres couches. Sur l'exemple représenté sur la figure 5.20, les modulations sur le panneau gauche de la figure ont un niveau d'activité variable. On peut les considérer comme deux sources de nutriments dont

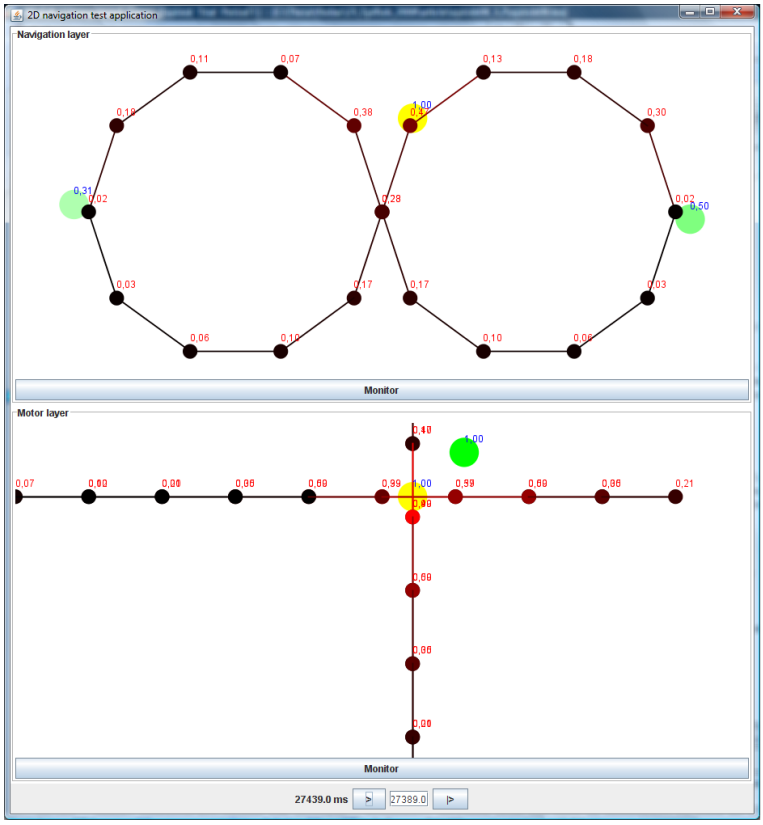


FIGURE 5.20 – Capture de la deuxième version de l'application. L'espace d'interactions possède un nombre réduit de dimensions mais toutes ne peuvent être représentées en 2D. Les anticipations sont donc projetées dans le plan des dimensions x et y. Les deux panneaux correspondent aux deux couches desquelles émergent coordination et régulation à des échelles différentes (navigation haut niveau *à gauche* et couche motrice bas niveau *à droite*). Les sensations c'est-à-dire la position de l'agent (*points jaunes*) et les modulations entre les couches (*points verts*) évoluent avec les interactions et influencent indirectement l'activité de chaque anticipation (*nombre en rouge*).

notre agent à besoin. Si ces nutriments sont différents, celui-ci doit se déplacer d'une source à l'autre : pour satisfaire sa faim et sa soif par exemple. S'il se situe loin d'une source, la modulation associée augmentera ; s'il passe à proximité de la source, celle-ci diminuera. Le réseau d'anticipations considéré a une forme de "8" et ne peut être parcouru que dans une direction, celle définie par la séquence d'anticipations. L'agent devra donc repasser systématiquement par le centre du réseau, suivant des trajectoires quasi-circulaires ou en forme de huit, similaire à celles de l'attracteur étrange de Lorenz.

Selon les dynamiques utilisées pour les modulations, différents comportements peuvent émerger. Ces dynamiques décrites ci-dessous sont illustrées dans l'annexe C :

- Si une des modulations reste toujours supérieure à l'autre, l'agent effectuera des cycles d'un seul côté du huit, celui de la modulation la plus forte.
- Si les deux dynamiques sont très proches et synchrones, l'agent "hésitera" au point d'intersection central, mais la moindre différence dans le pouvoir attracteur des modulations le conduira d'un côté où il satisfera un des besoins avant de poursuivre sur l'autre, intro-

duisant par la même occasion un déphasage.
– Si les dynamiques sont très différentes, un attracteur sera stable durant plusieurs cycles avant que l'autre n'ait atteint un niveau suffisant et entraîne une "transition de phase".

5.4 Coordination de fonctions physiologiques

Cette dernière application utilise également le modèle complet de cette thèse afin de montrer qu'il peut s'appliquer à d'autres types de coordination que celle permettant la navigation spatiale. On s'intéresse ici à la coordination de comportements permettant la satisfaction de besoins physiologiques. Les mécanismes complexes qui interviennent dans la régulation de la quantité d'eau dans le corps et son absorption sont de mieux en mieux connus. De la pression osmotique au niveau des cellules, aux homéostasies maintenant les niveaux de fluide et de sels dans le corps, jusqu'aux neurohormones agissant au cœur du cerveau, tout semble désormais connu sur la physiologie de l'eau chez l'homme [McKinley and Johnson, 2004]. Pourtant, il reste un gouffre dans la littérature : comment ces mécanismes apparus durant l'évolution peuvent-ils conduire à des comportements de préhension d'objets variés pour satisfaire le besoin ? Ces objets, qu'il s'agisse d'un verre, d'une bouteille d'eau ou d'un robinet, n'ont rien d'ancestraux mais leur manipulation se coordonne pourtant sans problème avec les réflexes d'avalement. Même à un niveau plus basique, qu'est-ce qui nous pousse à avaler l'eau déjà présente dans notre bouche ? Il arrive qu'on se rince simplement la bouche et qu'on la recrache, il ne s'agit donc pas seulement d'un réflexe... Enfin, l'avalement perturbe la respiration, nécessaire à notre survie immédiate. Comment ces deux comportements se coordonnent-ils pour que notre vie se poursuive, sans qu'on ait à y penser ?

Certains mécanismes déjà vaguement abordés à la fin du chapitre intitulé *Propriétés du modèle et coordination généralisée* sont détaillés ici. Tout d'abord, le manque d'eau dans les cellules n'est pas directement perceptible. Les seules informations dont on peut consciemment attester sont l'effet de la déshydratation sur le corps (dans les cas extrêmes) ou plus communément l'afflux d'angiotensine II dans le système nerveux central (sensation de soif). Dans le deuxième cas, il n'y a pas urgence, mais cette sensation guide néanmoins nos comportements. Dans notre modèle, il ne s'agit que d'une sensation commune mais continûment présente, stimulant les comportements qui l'impliquent. Chez l'humain, la soif semble en effet étanchée sitôt que l'eau passe dans la gorge. Or ce passage est la conséquence du réflexe permettant à l'eau de passer dans l'œsophage sans faire de fausse route. Celui-là même est déclenché par le mouvement volontaire de la langue autorisant le passage de l'eau à l'arrière de la cavité buccale. On se ramène ainsi à une chaîne d'interactions plus ou moins contrôlables, mais toutes anticipables.

La figure 5.21 illustre cette séquence, par le biais de captures d'écran de la simulation informatique réalisée. Le descriptif des étapes de la figure est le suivant :

1. La présence d'eau est ressentie à l'avant de la bouche (fermée ou obstruée par la langue). Le passage de la cavité buccale à la gorge est fermé par la langue en appui sur le palais mou.
2. La langue descend et laisse passer l'eau qui remplit la bouche sans pour autant couler dans la gorge.
3. La langue remonte une fois la bouche suffisamment pleine afin d'arrêter l'écoulement.
4. La langue avance et libère le passage vers la gorge. Ce mouvement est en réalité bien plus complexe, plus proche d'une ondulation d'avant en arrière le long du palais dur, en

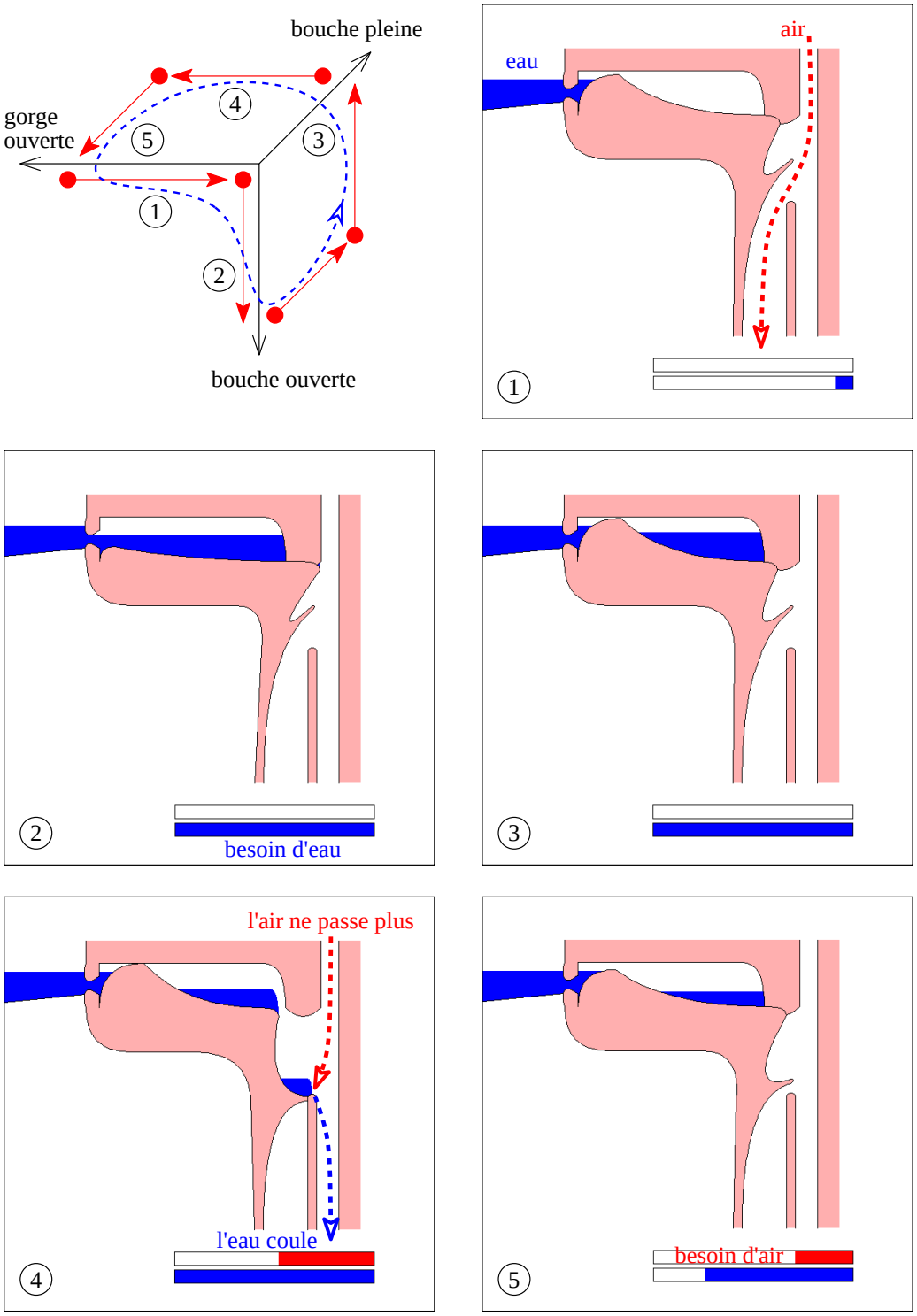


FIGURE 5.21 – Représentation de la trajectoire d'avalement dans un espace 3D et ses principales étapes (numérotées de ① à ⑤). Deux actions sont possibles (contracter la langue pour fermer la bouche et/ou la gorge), une perception seulement est visible (la quantité d'eau dans la bouche).

particulier lorsqu'il s'agit de faire passer un bolus alimentaire plus compact. L'eau s'écoule alors dans le pharynx (oropharynx pour être plus précis), et ferme l'épiglotte (action combinée d'un réflexe et de l'écoulement), évitant le passage du liquide dans le larynx.

5. La langue referme l'accès à la gorge et un peu de liquide reste éventuellement dans la bouche. L'oropharynx de nouveau isolé s'assèche et l'épiglotte remonte.

On va simplifier ici le problème complet de la coordination de comportements permettant de saisir un récipient contenant de l'eau, de le porter à la bouche et d'en boire le contenu. Les principes de propagation d'activité et d'assimilation restant toujours les mêmes, on ne va garder que l'essence du problème, une fois que l'eau est présente à l'entrée de la bouche et qu'il ne reste plus qu'à l'ingurgiter. On ne modélise donc "que" le processus décrit ci-dessus.

Néanmoins, ce processus cyclique en apparence simple n'est pas le seul à utiliser les voies du larynx. En effet, la respiration nécessite le passage de l'air par le larynx puis sous l'épiglotte pour atteindre pharynx, trachée et poumons. L'étape ④ est donc incompatible avec la respiration et l'inspiration ne doit donc pas chevaucher temporellement cette étape. Les actions impliquées dans la respiration ne seront pas intégrées dans cette application et la respiration sera considérée comme un processus passif, non influençable mais périodique.

5.4.1 Modèle

Afin de modéliser la coopération des deux processus (avalement et respiration), un modèle simplifié des voix respiratoires et digestives a été réalisé. Son rendu graphique a été utilisé pour les captures de la figure 5.21, même si l'eau y est mal représentée et traduit seulement la quantité de liquide. L'écoulement entre les différentes parties de la bouche et de la gorge est calculé par intégration du débit immédiat entre plusieurs segments arbitraires, en fonction de la configuration de la langue et de l'épiglotte. La langue est très simplement modélisée par deux muscles unidirectionnels, orthogonaux et indépendants : l'un permettant d'obstruer le passage de l'extérieur vers la bouche par application de la langue contre le palais dur, l'autre fermant le passage de la bouche vers la gorge par pression sur le palais mou.

Même si de nombreuses variables sont manipulées pour mettre à jour le modèle (approximer les écoulements, évaluer les besoins en eau et en air avec des délais temporels, la position des muscles en fonction des forces appliquées...), seules quelques dimensions sont accessibles à l'agent. L'espace d'interaction utilisé pour représenter le système est formé des dimensions suivantes :

- lv : position verticale de la langue permettant l'occlusion de la bouche (fermé = valeur haute)
- lh : position horizontale de la langue contrôlant l'ouverture du larynx (ouvert = valeur basse)
- e : quantité d'eau dans la bouche
- av : contraction verticale de la langue (repos en position basse = valeur faible)
- ah : contraction horizontale de la langue (contraction en arrière = valeur élevée)

Les anticipations associées sont représentées sur le repère 3D de la figure et sont synthétisées ici. Elles forment un cycle définissant le comportement d'avalement. On note $\underline{x}$ une valeur basse ou négative de la variable x et $\overline{x}$ une valeur élevée ou positive :

1. $[\overline{lv}, \overline{lh}, \underline{e}] \rightarrow [\underline{lv}, \overline{lh}, \underline{e}]$ (la bouche s'ouvre)

2. $[\underline{lv}, \overline{lh}, \underline{e}] \rightarrow [\underline{lv}, \overline{lh}, \overline{e}]$ (la bouche se remplit)
3. $[\underline{lv}, \overline{lh}, \overline{e}] \rightarrow [\overline{lv}, \overline{lh}, \overline{e}]$ (la bouche se ferme)
4. $[\overline{lv}, \overline{lh}, \overline{e}] \rightarrow [\overline{lv}, \underline{lh}, \overline{e}]$ (la gorge s'ouvre)
5. $[\overline{lv}, \underline{lh}, \overline{e}] \rightarrow [\overline{lv}, \underline{lh}, \underline{e}]$ (la bouche se vide)
6. $[\overline{lv}, \underline{lh}, \underline{e}] \rightarrow [\overline{lv}, \overline{lh}, \underline{e}]$ (la gorge se ferme)

La neurohormone de la soif peut agir de deux façons différentes :
- Soit elle agit comme une modulation sur la couche haute, augmentant le pouvoir attracteur de l'anticipation 5, la seule conduisant au passage de l'eau dans la gorge et à la baisse de l'hormone. Il peut très bien exister un processus inné assimilant le niveau d'hormone et tentant à chaque instant de le stabiliser à une valeur basse, ce processus influençant l'agent sans avoir été appris et faisant en quelque sorte partie de son environnement interne.
- Soit elle fait partie intégrante de l'anticipation de la baisse de l'hormone (nh) lors du passage d'eau dans la gorge associé à un capteur spécifique (eg) : $[\overline{nh}, \overline{eg}] \rightarrow [\underline{nh}]$ (c'est le cas sur la figure 5.22). Cette anticipation est alors plus fortement activée par la présence de la neurohormone (angiotensine 2), et par propagation de son activité, elle peut orienter les comportements pour sa satisfaction. Celle-ci peut ainsi être apprise, mais un tel apprentissage semble dangereux pour un être vivant naissant, susceptible de mourir de soif.

Quoiqu'il en soit, tous les éléments des processus n'ont pas à être maîtrisés, contrôlés ou même conscientisés. Il suffit à la coordination implicite de lier le métabolisme aux mouvements de la langue pour que le comportement d'avalement se fasse correctement et soit régulé.

Le déroulement même de l'avalement étant le fruit de régulations complexes et permanentes, on introduit une deuxième couche pour réguler les contractions des muscles et donc le déplacement de la langue. En effet, tout muscle est sujet à la fatigue, à des crampes et n'a pas une réponse linéaire. De même, l'écoulement du fluide selon les mouvements de la langue dépend de sa viscosité et de la quantité de liquide présent dans la bouche. C'est encore plus flagrant lorsque l'on considère la mastication de la nourriture, non modélisée car trop complexe. La gorge elle-même, en cas d'angine par exemple, ne se comportera pas de la façon habituelle, et on adaptera ou plutôt perturbera le comportement pour que la douleur soit minimale lors du passage des aliments ou liquides.

Cette couche de régulation fine est caractérisée, comme dans l'application précédente, par des anticipations spatialement et temporellement plus réduites. Pour une contraction de la langue vers le haut pour la coller au palais, on aura une anticipation du type : $[lv, av] \rightarrow [lv + \Delta lv, av]$, $\forall lv \in [\underline{lv}; \overline{lv}]$ avec un pas discret, $av = f(lv)$ et Δlv dépendants de la dynamique du système mécanique (musculaire). Cette dynamique peut être quelconque, puisque simplement approximée ici à la manière de la surface dans l'application du pendule/charriot. Rien n'interdit donc un couplage entre les contractions orthogonales.

5.4.2 Synchronisation des cycles

Un aperçu des résultats est fourni sur la figure 5.23). Ceux-ci sont très similaires à l'application précédente et ne sont donc pas détaillés sur plusieurs graphes, mais sont synthétisés au travers de cas communs ou extrêmes. L'évaluation est ainsi qualitative, mais permet de juger des capacités d'adaptation du comportement émergent, si ce n'est du réalisme apparent de celui-ci.

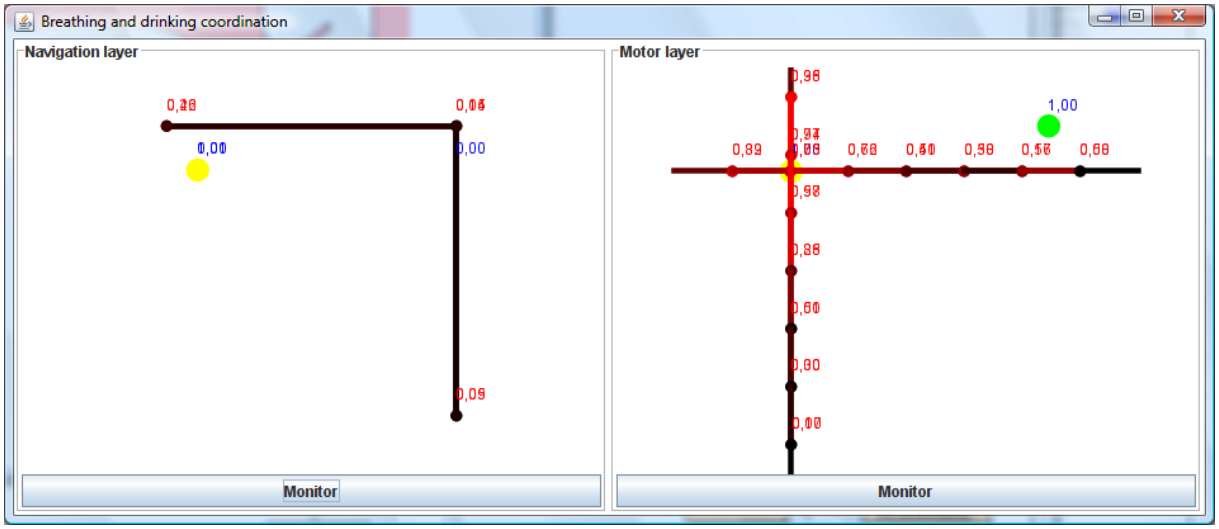


FIGURE 5.22 – Capture des couches d'anticipations du programme simulant la coordination de l'avalement et de la respiration. On y retrouve (*à gauche*) la couche définissant la trajectoire des interactions de l'avalement. Il s'agit de la projection dans le plan "ouverture de la bouche/ouverture de la gorge" de la trajectoire 3D de la figure 5.21. A *droite*, une couche bas niveau régule les contractions musculaires de la langue, dont la dynamique est grandement simplifiée.

Ces résultats sont à relativiser vu la simplicité du modèle physique considéré, mais fournissent un éventail de régulations assez large.

Un premier paramètre considéré est la fréquence respiratoire. L'alternance de la respiration et de l'avalement s'opère correctement tant que la période de rétention d'air dans les poumons est supérieure au temps nécessaire au passage de l'eau dans la gorge. Dans le cas contraire, la dynamique des muscles et de l'écoulement du fluide ne permet pas à l'avalement de se dérouler correctement, quelles que soient les actions de l'agent.

Le rythme et le tempo des comportements dépend non seulement des caractéristiques mécaniques du système, mais aussi de la dynamique des besoins. Ainsi, selon les besoins relatifs en eau et en oxygène (barres respectivement bleue et rouge sur la figure 5.21), on aura une ingurgitation continue d'eau entrecoupée de respirations, ou une respiration permanente ponctuée de rares apnées nécessaires à l'avalement. Bien sûr, si la période respiratoire est suffisante pour permettre un avalement par cycle, celui-ci se produira systématiquement, l'agent n'ayant à sa disposition que ces deux comportements dans ce modèle.

On peut simplement noter que le rythme et la dynamique des comportements émerge partiellement des propriétés physiques du système. Néanmoins, seule la coordination implicite permet la synchronisation et le blocage temporaire de l'avalement pour permettre l'inspiration. Cette modélisation, même simpliste, permet de comprendre comment des comportements peuvent se coordonner alors qu'ils s'attachent à des processus physiologiques différents. La régulation robuste et complexe que cette forme de coordination implique permet de comprendre comment on peut parler en mangeant sans avoir à planifier l'intégralité de nos actions, ou comment une perturbation trop forte peut entraîner des fausses routes, qu'elle résulte de facteurs non maîtrisés ou qu'elle soit consciente (volonté de parler trop vite par exemple).

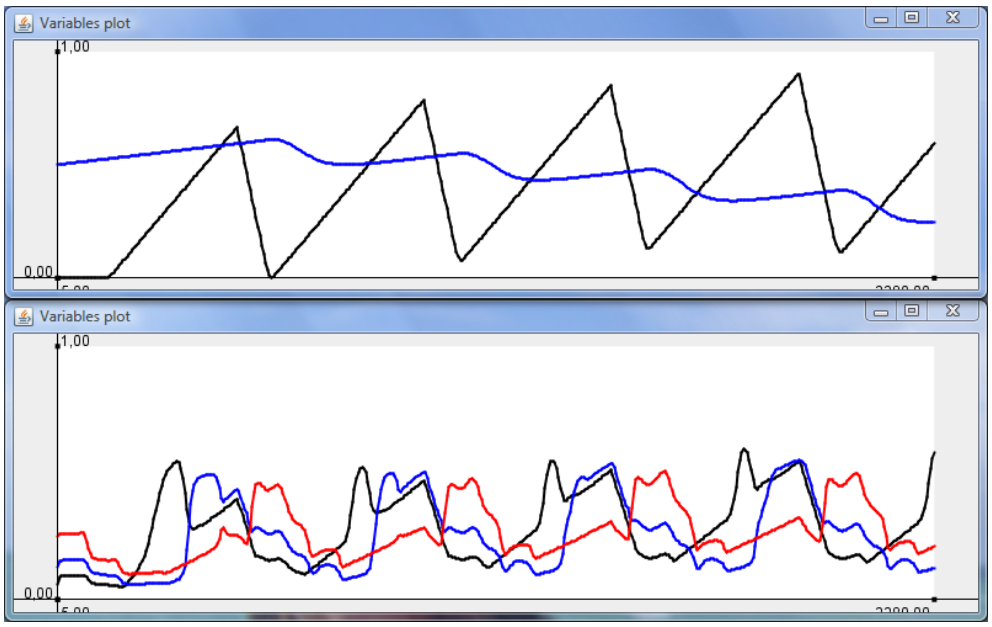


FIGURE 5.23 – Capture des traces lors de l'alternance régulière des 2 comportements d'avalement et de respiration. (*haut*) Les deux besoins aux dynamiques très différentes se synchronisent quasiment en antiphase. Cela permet à la soif (*bleu*) de décroître progressivement, alors que les besoins en oxygène continuent d'être assurés. (*bas*) Les anticipations de la couche haute se coordonnent et se succèdent en tant qu'attracteurs (la moitié des anticipations seulement sont représentées, soit 3/6).

Troisième partie

Extensions et perspectives

1

Apprentissage

Sommaire

1.1 Nouvelles anticipations 146
1.1.1 Mémorisation immédiate 146
1.1.2 Différenciation et sélection 147
1.1.3 Génération aléatoire et sélection 148
1.2 Confiance et renforcement 149
1.2.1 Confiance dans les anticipations 150
1.2.2 Incompréhension, découverte, exploration et maîtrise 151
1.3 Manques actuels 154

Introduction

Les programmes présentés dans le chapitre *Applications et démonstrations* s'appliquent généralement à des problèmes simples. On a ainsi pu se passer d'apprentissage dans la majorité des applications de par leur conceptualisation facile par un être humain. Celui-ci peut alors introduire des schémas adaptés permettant d'initier le comportement. Néanmoins, de nombreux comportements sensori-moteurs sont d'une grande complexité et une telle conception est impossible. Un apprentissage robuste est alors nécessaire.

L'apprentissage peut être considéré comme une surcouche du modèle et c'est une des raisons pour lesquelles il n'est pas introduit dans le chapitre *Structure du modèle mathématique*. L'autre raison majeure est que l'apprentissage n'a pas encore adopté une forme stable et que les différents algorithmes utilisés sont encore exploratoires relativement au modèle. Je vais donc présenter dans ce chapitre différentes approches compatibles avec le modèle et partiellement testées durant cette thèse.

On peut toutefois dégager certains principes communs. L'apprentissage repose dans tous les cas sur la redondance des interactions et anticipations. A la manière d'une spirale assimilatrice, plusieurs anticipations plus ou moins précises peuvent assimiler simultanément la dynamique de l'agent et de l'environnement afin de converger vers le comportement le plus adéquat. Les anticipations les plus générales s'appliquent plus facilement et les actions se spécialisent progressivement pour être de plus en plus adaptées à l'unicité de chaque situation. La corroboration d'une sensation ou anticipation par les autres ne peut donc avoir qu'un effet positif sur le champ

d'activité. Les actions s'en trouvent en effet renforcées et la dynamique de l'agent est plus robuste car moins sensible à des erreurs ou variations locales.

De plus, toutes les formes d'apprentissage envisagées sont une combinaison de deux classes d'apprentissage appliquées à des échelles temporelles et spatiales différentes :

Échelle temporelle	Classe d'apprentissage	Fonction
Rapide	Renforcement	Validation d'une anticipation correcte
Lente	Variation/sélection	Création/destruction d'anticipations

Alors que le renforcement s'applique au niveau d'une seule anticipation, les approches par variation/sélection s'appliquent sur une "population" d'anticipations. De manière générale, on adopte ici une position similaire au darwinisme neuronal de Gerald Edelman [Edelman, 1987]. Cette théorie considère que les gènes déterminent seulement la fixation des neurones dans le cerveau (par l'intermédiaire de molécules d'adhésion cellulaire - CAM, par exemple), permettant ainsi la création de myriades d'assemblées de neurones. Celles-ci rentrent ensuite en concurrence lors de la vie de l'agent : les réseaux de neurones les plus fonctionnels sont stabilisés sous la pression de l'environnement et dirigent le comportement de l'agent. Là où Edelman considère des réseaux de neurones dont la structure est vaguement déterminée génétiquement, on considère ici des anticipations et groupes d'anticipations.

1.1 Nouvelles anticipations

Pour mieux en saisir les limites et comprendre l'intérêt et la plausibilité des autres formes d'apprentissage, je commence ici par détailler l'apprentissage utilisé dans l'application du système pendule/charriot.

1.1.1 Mémorisation immédiate

Supposons que l'agent perçoive en permanence l'intégralité des sensations et puisse continûment changer ses actions. On peut alors considérer l'apprentissage comme une simple extraction de régularités sensori-motrices. Des actions dans un contexte donné conduisent à un ensemble de conséquences ; on retrouve la définition des anticipations. Dans l'application de stabilisation du pendule, cette extraction est très simple et se déroule de la manière suivante :

1. Anticipation de la situation à l'instant t (S_t) à partir de la situation à l'instant $t - \Delta t$ ($S_{t-\Delta t}$) et des actions que l'agent a prises ($A_{t-\Delta t}$) (quelle que soit la méthode choisie).
2. Mise à jour des sensations perçues par l'agent à l'instant t.
3. Comparaison de la situation anticipée avec la situation perçue à l'instant t. Si l'anticipation était incorrecte, on génère une nouvelle anticipation dans l'espace d'interaction : $(S_{t-\Delta t}, A_{t-\Delta t}) \rightarrow S_t$
4. Décision des actions à prendre (de quelque manière que ce soit).
5. Attente d'un pas de temps fixe Δt.

En bref, l'agent apprend toute trajectoire qu'il ne peut anticiper dans l'espace complet des interactions. Cette méthode est parfaitement fonctionnelle et efficace dans le cas du pendule/chariot où le système possède un très faible nombre de dimensions. De nombreuses anticipations sont

créées mais l'interpolation permet de les limiter et de progressivement maîtriser la dynamique sensori-motrice du système agent/environnement.

En revanche, pour des comportements plus complexes, les mots en gras dans le pseudo-algorithme ci-dessus font surgir immédiatement deux problèmes :

- Anticiper les conséquences de n'importe quelles actions après un laps de temps égal à Δt suppose que ce délai est universel et suffit à apprendre toutes les anticipations utiles pour un comportement donné. Et à supposer qu'un timing universel existe, comment en déterminer la période ? A l'inverse, sans aucun rythme dans les interactions, la dynamique est continue mais il devient impossible algorithmiquement d'y trouver des régularités.
- Les anticipations sont également excessivement spécialisées. Dans le cas du pendule/chariot, les dimensions n'ont pas été choisies au hasard, mais correspondent à un ensemble minimal de variables utiles pour la dynamique. On peut donc se permettre d'anticiper l'intégralité des dimensions sans faire usage d'algorithmes de "feature selection", ce qui n'est pas le cas lorsque le nombre de degrés de liberté augmente ou n'est plus contrôlé.

Lesdits algorithmes de "feature selection" en intelligence artificielle permettent de réduire le nombre de variables. Les algorithmes permettant d'obtenir l'ensemble optimal de dimensions sont "intractables" dans le cas d'une dimensionnalité élevée. Le trouver revient en effet à explorer exhaustivement l'ensemble des combinaisons de variables possibles, et appliquer un tel algorithme de complexité exponentielle en temps réel est impossible. Le même problème se pose pour déterminer le rythme adéquat pour chaque anticipation, celui-ci constituant en somme un paramètre qui multiplie le nombre d'anticipations à évaluer.

Néanmoins, de nombreux algorithmes existent pour déterminer des ensembles fonctionnels de variables. Dans notre modèle fondé sur l'adaptation relative des anticipations, cette classe d'algorithmes est parfaitement acceptable. Sans rentrer dans les détails, tous les algorithmes classiques (algorithmes gloutons d'optimisation, recuit simulé, élagage d'arbre de décision, algorithmes génétiques) sont plus ou moins affiliés avec des méthodes de variation/sélection, ce qui nous conduit aux paragraphes suivants.

1.1.2 Différenciation et sélection

Pour éviter le problème de "feature selection", l'apprentissage peut être réalisé par différenciation progressive à partir de connaissances antérieures. Ce mode est davantage compatible avec les théories piagétiennes et interactivistes, et aucune présupposition n'est nécessaire sur ce qui est important dans le flux des interactions avant même de l'avoir appris. Les algorithmes utilisés se rapprochent donc des algorithmes génétiques ou immunitaires. On peut d'ailleurs se référer au TamTam pour l'application de ce type d'apprentissage, dans lequel les schémas sont différenciés par ajout, retrait ou remplacement d'une note.

Ces algorithmes peuvent être exécutés de manière asynchrone, puisque les interactions de l'agent avec son environnement sont de toute manière continues. Ils se conforment tous aux étapes suivantes, à quelques variations près :

1. Les anticipations sont classées par degré de satisfaction, relativement à leur activité. En d'autres termes, elles sont mieux classées si elles assimilent bien la dynamique, c'est-à-dire si une activité élevée de l'anticipation conduit à l'application des actions associées et à la satisfaction de la conséquence après un certain délai temporel.
2. Les mieux classées suivant cette forme de "fonction de fitness" sont clonées et différenciées

par ajout d'une dimension, changement d'une valeur, ou toute autre altération mineure (de nombreuses stratégies pour lier adaptation et sélection existent).

3. Les anticipations ne luttent pas pour des ressources physiques limitées (nourriture ou espace), mais sont en concurrence pour le choix des actions adaptées. Même si on suppose que le nombre d'anticipations peut être illimité, une part des anticipations peut donc être éliminée pour éviter qu'elles perturbent l'étape de réduction.

On peut faire un parallèle avec l'évolution des populations animales dans un environnement dynamique possédant de multiples niches écologiques. De même que la notion d'adaptation dépend de la niche écologique et donc des conditions environnementales du moment, l'adaptation des anticipations dépend du comportement considéré et des conditions extérieures pour que ce comportement se réalise. De même que les individus de différentes générations sont mêlés dans la nature et peuvent influer mutuellement leur reproduction (par la protection du groupe ou l'éducation des jeunes), les anticipations sont interdépendantes et se succèdent.

De même qu'une population animale remplit une niche écologique, l'apprentissage de nouvelles anticipations permet de progressivement maîtriser un comportement. L'apprentissage se réalise donc par extension d'îlots d'anticipations qui grossissent, deviennent plus denses ou se scindent pour assimiler deux comportements distincts. Du fait de la proximité et la similitude des anticipations produites, ces algorithmes assurent l'assimilation vague des situations par les nouveaux individus, qui ne seront jamais totalement inadaptés.

Malgré de nombreux avantages, cette approche soulève plusieurs questions. Quel ensemble initial d'anticipations choisir ? Dans le cas du TamTam, il s'agissait du rythme binaire, mais de manière générale, comment déterminer un ensemble viable et suffisant de comportements innés faits d'anticipations ? Sans autre mécanisme, comment voir apparaître des couches hiérarchiques qui proposent des perspectives différentes sur le comportement à partir de légères variations spatiales et temporelles ? Enfin, si l'étape de différenciation s'effectue trop souvent ou que la satisfaction passée des anticipations n'est pas mémorisée ou intégrée, certaines anticipations parfaitement adaptées à une situation récente mais passée seront éliminées. Il semble dans tous les cas impossible de déterminer un instant unique de différenciation alors que les anticipations s'appliquent parfois successivement et à des échelles différentes.

1.1.3 Génération aléatoire et sélection

Une dernière possibilité envisagée est que les anticipations soient générées de manière aléatoire. Certaines sont valides, d'autres non, mais toutes tentent à chaque instant d'assimiler la situation. Tous les éléments initialement générés ne sont pas quelconques : ils ont tous une structure d'anticipation, à la manière des assemblées de neurones dans le darwinisme neuronal.

De même que les approches de variation/sélection ne nécessitent pas de contrôle centralisé, des ensembles denses d'anticipations peuvent être localement auto-organisés et ainsi limiter leur densité ou éliminer les éléments les moins adaptés. La redondance est naturelle dans un tel système distribué et permet une robustesse accrue.

Il se pourrait que cette approche et la précédente soient combinées, ou bien que la précédente soit juste l'apparence, et celle-ci la réalité. Comme l'illustre la figure 1.1, les deux évoluent de manière similaire, même si les principes sous-jacents sont différents. En effet, alors que la différenciation mène à une extension progressive des réseaux d'anticipations, la génération aléatoire

permet l'exploration massive mais risquée de l'intégralité de l'espace. Dans le deuxième cas, de nombreuses anticipations incapables de se coordonner avec des réseaux déjà fonctionnels seront créées. De par le calcul même de l'activité des anticipations, nécessitant à la fois assimilation de la situation et pouvoir attracteur des conséquences, celles-ci ne pourront pas atteindre un niveau d'activité élevé et seront donc initialement inutiles. Au final, les deux approches produiront des clusters denses et stables d'anticipations associés aux comportements les plus courants.

Un problème majeur subsiste lorsque l'on considère la différenciation ou la génération aléatoire : si le nombre d'anticipations incorrectes générées devient trop important, le choix des actions en sera perturbé. Les anticipations qui n'assimilent pas du tout la dynamique ne posent pas problème, puisque leur activité reste faible. En revanche, les anticipations incorrectes issues d'un contexte proche de la situation réelle et se coordonnant correctement avec d'autres anticipations actives voient leur degré d'activité s'élever, même si les actions qu'elles proposent ne permettront jamais de réaliser les conséquences. Il est donc préférable de favoriser les anticipations qui ont fait leurs preuves par le passé.

De plus, l'apprentissage comme le "désapprentissage" sont théoriquement possibles, mais là aussi, il faut un critère pour déterminer quelles anticipations doivent être éliminées. Éviter une prolifération excessive des anticipations permet aussi de limiter le coût computationnel de la mise à jour du champ d'activité. Selon leur niveau d'adaptation, les anticipations doivent donc pouvoir être renforcées ou éliminées, ce qui est le sujet de la section suivante.

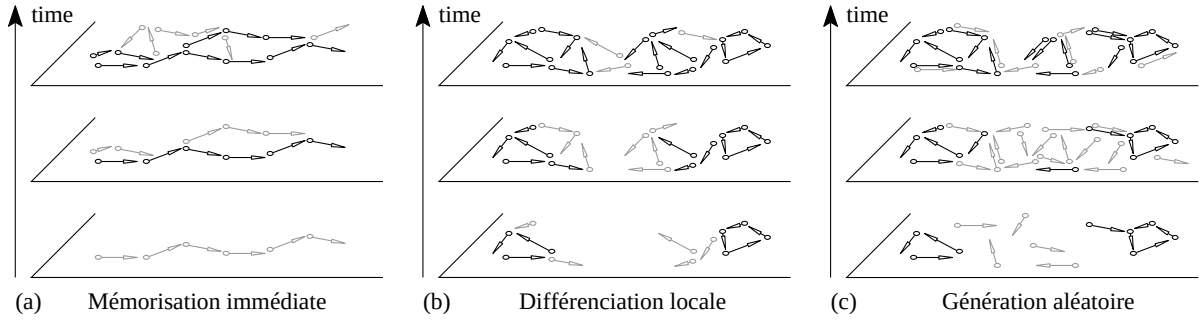


FIGURE 1.1 – Chaque schéma indique l'évolution probable de l'espace d'interaction alors que l'agent interagit avec son environnement, selon le type d'apprentissage envisagé. (a) L'agent apprend uniquement les trajectoires qu'il produit et ne connaît pas encore. (b) Les anticipations satisfaites sont différenciées et le comportement s'enrichit peu à peu. (c) Des anticipations aléatoires sont générées, mais seules celles qui sont adaptées aux dynamiques vécues sont stabilisées et actives.

1.2 Confiance et renforcement

Le renforcement est la clé permettant de résoudre la majorité des problèmes précédents. Donald Hebb l'avait postulé pour la neuropsychologie par sa loi de renforcement pour les neurones[51] [Hebb, 1949] et celle-ci a été confirmée en neurophysiologie par les différentes formes

51. Loi de renforcement de Hebb : si l'axone d'un neurone A est suffisamment proche d'une cellule B pour l'exciter durablement et répétitivement au point de participer effectivement à sa décharge, un changement métabolique

de potentialisations à long terme (LTP). Cette loi a depuis été raffinée, par la règle BCM par exemple [Bienenstock *et al.*, 1982], mais le principe reste le même. Ce principe est exploité ici pour les anticipations : si l'activité à la source d'une anticipation coïncide avec l'activité au niveau de la conséquence, à un délai près, on peut renforcer leur lien et donc considérer l'anticipation comme valable.

1.2.1 Confiance dans les anticipations

Cette force du lien au sein de l'anticipation peut être vue comme un indice de confiance dans la prédiction. Si celui-ci est faible, c'est que l'anticipation n'a jamais été vérifiée. A l'inverse, plus la confiance est grande, plus l'activité de cette anticipation peut être propagée aux autres, étant à peu près certain qu'elle pourra être satisfaite. Cette adaptation de la propagation transforme donc l'équation 2.4 du chapitre *Structure du modèle mathématique* :

$$p(I, I') = c_I \times a_I \times sim(I, I') \tag{1.1}$$

où $c_I \in [0; 1]$ est la confiance dans l'anticipation. Cette condition de propagation à long terme, relativement à la borne imposée par l'activité instantanée a_I, avait déjà été testée dans la troisième version de l'application TamTam. En effet l'écrasement des paramètres d'une "cellule rythmique" par la précédente n'était effectué que si la confiance dans les nouveaux paramètres était supérieure. L'effet est ici équivalent puisque l'intégration des activités passe par l'application d'un maximum, éliminant de fait l'influence des anticipations dans lesquelles la confiance est faible.

Les anticipations nouvellement créées sont donc initialisées avec une confiance faible pour éviter toute perturbation sur l'activité globale résultante. Même si elles n'interviennent ainsi pas activement dans la boucle sensori-motrice, elles assimilent la situation et leur confiance peut être mise à jour. On adopte ici les notations déjà employées : $\underline{x}$ = valeur faible de la variable x, $\overline{x}$ = valeur élevée, a_{src} = activité source, a_{dst} = activité de la conséquence. Δt représente le délai d'anticipation, commun aux anticipations d'une même couche. Les règles sont les suivantes :

- $\overline{a_{src}}(t - \Delta t) + \overline{a_{dst}}(t)$: renforcement de l'anticipation, sa confiance est augmentée.
- $\overline{a_{src}}(t - \Delta t) + \underline{a_{dst}}(t)$: l'anticipation est infirmée, sa confiance est donc diminuée.
- $\underline{a_{src}}(t)$: cette anticipation n'assimile pas la situation courante, on ne peut donc pas savoir si elle est correcte ou erronée, on ne change pas la confiance.

On remarque qu'il s'agit d'une forme d'implication logique mais adaptée au domaine continu puisque l'activité n'est pas booléenne mais continue dans l'intervalle $[0; 1]$. On retrouve également l'aspect normatif de l'anticipation, si chère à l'interactivisme : on ne peut déterminer la validité d'une connaissance sans interaction avec l'environnement.

Afin de ne favoriser que les anticipations les plus utiles, on peut introduire une diminution naturelle de la confiance. Lorsque cette diminution progressive de confiance est suffisamment lente, les anticipations régulièrement renforcées saturent rapidement leur niveau de confiance et entretiennent leur propre activité. A l'inverse, les anticipations qui ne sont plus adaptées voient leur effet progressivement atténué. Cette inadaptation peut provenir d'un changement d'environnement pour l'agent, d'une transformation physique de l'agent ou de l'acquisition de

se produit dans l'une, l'autre ou les deux cellules de telle manière que l'effet de A sur B s'en trouve amplifié.

comportements plus performants, entraînant une déviation systématique de la trajectoire dynamique des interactions.

L'introduction d'une dégénérescence des réseaux d'anticipations permet de modéliser les phénomènes de mémorisation et de perte de souvenirs. Par exemple, pour une baisse de confiance du type $\Delta c_t = k_1/{c_t}^{k_2}$ avec $k_1 \ll 1$ et $k_2 > 1$, une anticipation nouvelle et exceptionnellement renforcée rentrera en mémoire à court terme. Une anticipation dont la confiance est arrivée à saturation subira une baisse de confiance minime, traduisant un "passage progressif" en mémoire à long terme.

Un autre phénomène résultant de l'association de la confiance et du fonctionnement général du modèle est à souligner. Un ensemble d'anticipations anciennes ayant perdu leur niveau de confiance n'auront plus un pouvoir attracteur suffisant pour orienter spontanément un comportement. Mais si la dynamique de l'environnement permet de les satisfaire séquentiellement, celles-ci regagneront leur statut passé. Les mots que l'on a sur le bout de la langue ou les vieux souvenirs qui nous semblent flous en sont l'exemple idéal : le fait qu'ils soient prononcés ou décrits par quelqu'un d'autre nous les rappellent comme des évidences, alors qu'on était incapables de les exprimer l'instant d'avant. Cette forme de rappel est à rapprocher de certains gènes muets hérités de l'évolution, permettant par leur simple réactivation une réadaptation rapide en cas de retour à un environnement antérieur.

Si on couple cette dégénérescence des anticipations à l'élimination des anticipations dont la confiance tombe en dessous d'un certain seuil, on peut facilement limiter le nombre d'interactions tout en gardant les plus fonctionnelles. Cela permet à nouveau d'éviter les effets négatifs d'un grand nombre d'anticipations très faiblement actives sur le champ d'activité global.

1.2.2 Incompréhension, découverte, exploration et maîtrise

A un niveau plus global, la confiance moyenne dans une zone de l'espace d'interaction donne une indication quant à la maîtrise des comportements dans cette partie de l'espace. Cette notion de confiance sur un ensemble d'anticipations a été introduite dans l'application du système pendule/charriot. Du fait que cette application utilisait un apprentissage par mémorisation directe combiné avec une interpolation, la confiance était calculée comme le rapport entre le nombre d'anticipations satisfaites sur le nombre d'interactions de référence ajoutées. Pour la partition de l'espace utilisée, on peut se reporter au chapitre *Optimisations* et aux sections concernant les arbres BSP. Pour plus de détails sur le calcul, on peut également lire [Quinton and Inamura, 2007].

Celui-ci n'est pas détaillé ici parce qu'on s'intéresse davantage dans cette partie *Extensions et perspectives* aux modes d'apprentissage distribués qui semblent plus plausibles. Dans le cas d'un apprentissage par différenciation ou génération aléatoire, on peut associer à chaque anticipation le degré de confiance décrit précédemment et cette confiance affecte en conséquence le pouvoir attracteur des anticipations. Une zone de l'espace dense en anticipations qui auront été expérimentalement renforcées dirigera donc le comportement de l'agent lorsque la situation s'y prête (c'est-à-dire lorsqu'elle est assimilée par ces mêmes anticipations).

Afin de catégoriser les grandes classes de comportements de l'agent relativement à une partie des sensations, il est bon de rappeler que l'agent n'assimilera pas de manière uniforme la dynamique des interactions ; certains aspects seront peut-être parfaitement anticipés, alors que

d'autres seront considérés comme nouveaux, ou assimilés à un niveau moindre par d'autres réseaux d'anticipations. Pour mieux comprendre les distinctions présentées ci-dessous, on pourra se reporter à la figure 1.2 :

1. **Maîtrise** : Pour commencer avec les cas extrêmes, l'agent peut tout simplement maîtriser l'essentiel de la situation (*confiance élevée*). L'activité des buts lointains n'aura alors aucun mal à se propager à travers le réseau dense et à la confiance élevée. Il pourra ainsi se détourner totalement des sensations immédiates (même si certains éléments sont potentiellement nouveaux), anticipant par exemple la présence de son but derrière lui et se retournant pour l'atteindre. L'agent va dans ce cas droit au but, but qui est lui même défini par l'activité intense dans d'autres parties de l'espace d'interaction. Il n'y a pas d'hésitation, pas de curiosité, pas d'exploration.
2. **Incompréhension** : Si l'agent n'assimile qu'à un niveau très faible une situation inconnue (*confiance faible*), l'activité maximale dans l'espace d'interaction n'est pas garantie de se trouver à proximité d'interactions "objectivement" compatibles avec le contexte. L'agent agira donc comme s'il se trouvait dans une toute autre situation. Pour un agent dirigé par des buts physiologiques, celui-ci accomplira les actions les plus directes vers ses buts, indépendamment de la situation : ses comportements seront interprétables comme de la détresse ou de la folie. Un bébé se mettra à pleurer s'il a faim, indépendamment du contexte ou des moyens potentiels dont il pourrait ultérieurement user pour obtenir de la nourriture.
3. **Exploration** : Les buts jouent ici le rôle d'attracteurs distants et puissants, la situation est partiellement assimilée mais les anticipations se coordonnent correctement entre la situation et le but (*confiance moyenne*). L'agent va donc logiquement appliquer les actions pour lesquelles il anticipe l'atteinte du but... Mais s'il se trompe, et que la différence dans la situation est suffisante pour changer intégralement la dynamique des interactions ? Il va explorer des situations de plus en plus distantes de son contexte initial, tout en tentant d'atteindre son but. Il apprendra donc rapidement et se retrouver éventuellement dans la situation 1) ou 2) précédemment décrites.
4. **Découverte** : Cas relativement proche du précédent mais subtilement différent, les attracteurs distants ne sont pas suffisamment puissants relativement aux assimilations partielles locales (*confiance moyenne*). Si celles-ci se coordonnent entre elles, ces anticipations deviendront l'attracteur principal, et l'agent aura un comportement localement anticipatif mais globalement réactif. Il tentera ainsi d'appliquer toutes sortes d'actions liées à son focus du moment. Cet intérêt (ou curiosité) viendra à mourir si les buts distants regagnent un pouvoir attractif supérieur ou si l'apprentissage permet la coordination parfaite des anticipations locales. Dans ce dernier cas, les attracteurs seront localement fusionnés et entraîneront des actions orientées vers l'attracteur suivant le plus proche, transformant progressivement l'activité.

Ce niveau de maîtrise relatif ne sera jamais accessible à notre agent qui se contente d'appliquer au mieux ses connaissances. Au niveau sensori-moteur, les processus se transforment et s'adaptent pour assimiler au mieux la dynamique, et c'est tout ! Il faudra attendre qu'un niveau réflexif soit intégré au modèle pour que l'agent puisse constater que ses anticipations n'ont pas été satisfaites ou que le niveau d'assimilation de la situation n'est pas celui attendu : des anticipations plus abstraites portent alors sur l'activité même des anticipations sensori-motrices et non plus sur les sensations.

L'équilibre classique à trouver entre exploration et exploitation n'est pas ici une propriété ou un mécanisme fondamental de l'agent. Les anticipations ne sont pas curieuses, elles n'ont d'intérêt que dans leur satisfaction et le maintien de leur activité. Les notions de motivation, d'intérêt ou de curiosité sont ici des propriétés émergentes interprétées par l'homme lors de l'observation des comportements, qui ne sont que le produit d'un système complexe de processus distribués.

Bien sûr, le modèle de cette thèse n'explique pas tout, et ces développements théoriques

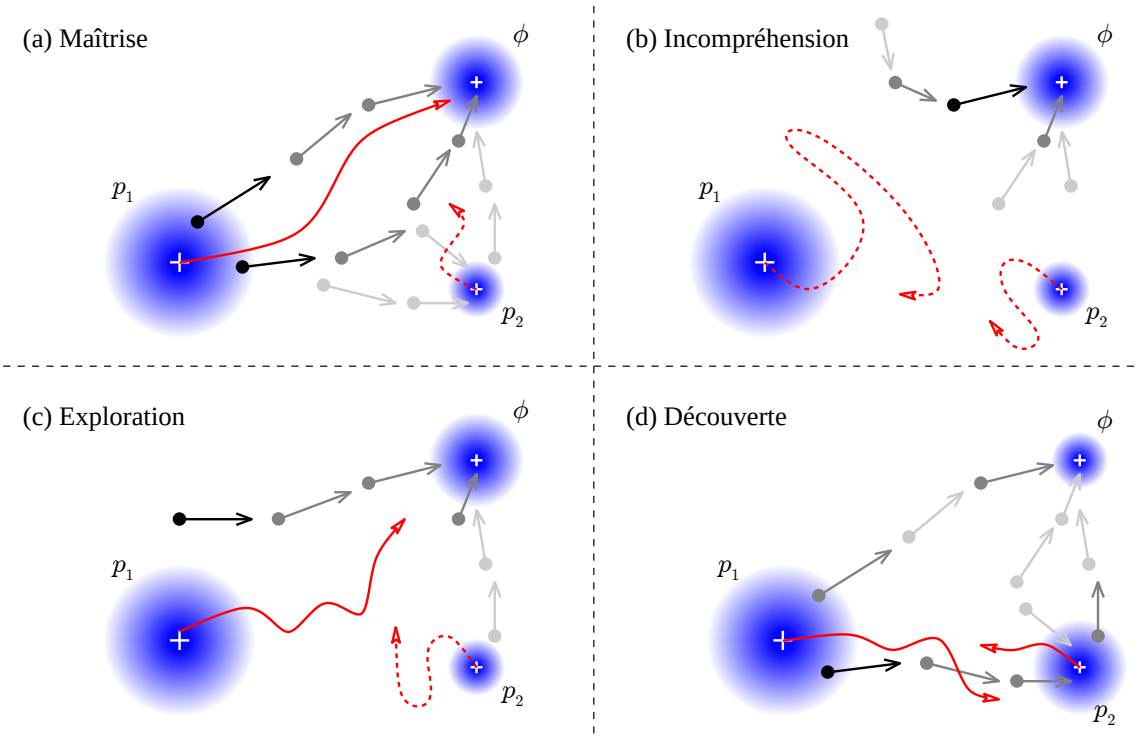


FIGURE 1.2 – Chaque schéma représente la projection 2D d'un espace d'interaction dans ces circonstances d'apprentissage et de contexte particulières. Les sensations principales, multiples car potentiellement projetées sous forme de modulations depuis d'autres couches, y apparaissent avec leur diffusion locale (*disque bleu*). On distingue deux perceptions éphémères mais puissantes issues de l'environnement de l'agent (p_1 et p_2), et une sensation physiologique interne stable (ϕ). Les sensations évoluent en fonction des actions de l'agent (*flèche rouge*), mais les sources d'activité peuvent potentiellement disparaître (*pointillés*). (a) La trajectoire d'activité maximale lie les sensations les plus présentes (p_1) et le but physiologique (ϕ). La perception d'autres objets de l'environnement (p_2) est négligée, et celui-ci risque de disparaître du champ perceptif. (b) Aucune anticipation n'assimile correctement les sensations immédiates, l'agent va donc appliquer les interactions connues les plus actives, permettant par exemple d'assouvir le besoin (ϕ) inconditionnellement. (c) Les anticipations les plus actives n'assimilent que partiellement les sensations (p_1). Tout ce passe comme si on se trouvait dans une situation similaire, mais l'évolution de la dynamique peut potentiellement conduire à des situations très différentes de celles anticipées. (d) Les centres d'activité les plus importants ne sont plus p_1 et ϕ mais p_1 et p_2, entraînant une exploration des interactions entre ces éléments, oubliant momentanément le but stable mais non prioritaire.

n'ont été que partiellement testés. De nombreux aspects de l'apprentissage et de l'exploration m'échappent certainement, mais les problèmes liés à l'attraction vers des parties inconnues de l'espace d'interaction ont déjà été soulevées [Stout *et al.*, 2005; Schmidhuber, 2006]. De manière très similaire à l'approche prise dans cette thèse, la notion de motivation intrinsèque développée par Oudeyer et Kaplan pousse l'agent vers les zones où il peut maximiser son apprentissage [Oudeyer and Kaplan, 2004; Oudeyer *et al.*, 2007]. Si l'on emploie la terminologie de ce manuscrit, n'est-ce pas en quelque sorte attirer l'agent vers les situations partiellement assimilables, afin qu'il les explore pour mieux les maîtriser ?

1.3 Manques actuels

Alors que la majorité des développements de ce chapitre constitue une extension fonctionnelle du modèle et permet l'apprentissage, les derniers paragraphes sont davantage des extrapolations et interprétations de phénomènes dynamiques observés mais non maîtrisés. On peut donc regretter que l'apprentissage ne soit pas encore stabilisé au cœur du modèle, et que je n'aie pas le recul nécessaire pour trancher sur de nombreuses questions de fond (comme la nature aléatoire ou dérivative des mécanismes). Ces algorithmes ont pourtant été testés sur diverses versions du modèle, mais pour des applications très différentes et sans comparaison aucune. Une étude approfondie de la littérature en la matière sera donc nécessaire pour déterminer les biais et limites des différentes approches de l'apprentissage.

On peut ensuite remarquer que l'apprentissage est basé sur un renforcement purement positif, il n'y a donc pas apprentissage des choses à ne pas faire, mais uniquement leur évitement par la non-attraction. Encore faut-il que l'agent ait connaissance de comportements de contournement adaptés et que ceux-ci soient plus attractifs, ce qui n'est pas évident. Néanmoins ce comportement qui peut sembler problématique peut aussi sembler naturel : comment juger du mal dans un comportement si on ne peut le comparer à d'autres en suivant une métrique donnée (la survie de l'individu par exemple). Comme toujours, les notions d'attraction, d'efficacité et de correction sont toutes relatives aux connaissances de l'agent. Plus de détails seront fournis dans le dernier chapitre *Perspectives et limitations*.

Un autre aspect lié au renforcement même s'il ne découle pas directement de l'apprentissage est l'absence de saturation ou de fatigue dans nos anticipations. Le pouvoir d'attraction dépend exclusivement de la situation et des propagations internes, indépendamment de la durée ou de la répétitivité des stimuli. Une notion d'habituation au stimulus serait donc peut-être nécessaire, et éventuellement à intégrer comme principe mêmes au cœur de tous nos processus. Peut-être l'habituation peut-elle dériver d'autres principes, mais elle conditionne dans tous les cas le comportement et l'apprentissage.

Pour terminer sur des remarques générales relatives à l'apprentissage, il faut noter que l'approche par renforcement, même appliquée aux comportements sensori-moteurs étendus dans le temps, nécessite la répétition. Est-il dans ce cas possible d'imaginer l'apprentissage "one-shot" d'un comportement marquant ou vital ? Est-il besoin de rajouter un système de rebouclage des entrées sensorielles pour renforcer les anticipations en rejouant les événements [52] ? On pense en particulier au cortex frontal chez l'homme, pour lequel cette forme de réflexivité a certainement

52. Le renforcement libre des connexions neuronales durant le sommeil permet également de rejouer les événements, une fois le flux sensoriel inhibé.

donné de nouvelles capacités.

Enfin, quelle que soit la méthode d'apprentissage utilisée, celle-ci s'applique au niveau sensori-moteur ; mais jusqu'où la différenciation progressive peut-elle mener sur l'échelle de l'abstraction ? Des parties de l'espace d'interactions peuvent se densifier et les réseaux d'interactions s'étendre, se généraliser, se modulariser ou fusionner. On peut penser à l'embryogenèse et au phénomène de mort programmée des cellules (en lieu et place des anticipations) pour voir les niveaux d'organisation variés générés par ce type de dynamiques. De telles transformations peuvent éventuellement conduire à la formation de réseaux stables se dissociant progressivement des sensations immédiates dont ils sont dérivés. Un réseau ayant ainsi perdu le couplage fort avec l'environnement de l'agent continuera d'interagir avec le système dans son ensemble. Peut-on imaginer que les abstractions et valeurs puissent se former de cette manière, par des anticipations toujours plus découplés des besoins de l'agent et des sensations immédiates ?

2

Optimisations

Sommaire

2.1 Passage à l'échelle et optimisations 157
2.2 Structure adaptée de l'espace 158
2.2.1 Structure arborescente et partitionnement 159
2.2.2 Cas de dimensions non définies 160
2.3 Algorithmes de manipulation de l'espace 161
2.3.1 Ajout de nouveaux éléments 161
2.3.2 Recherche et sélection d'interactions 164
2.3.3 Intégration optimisée 165

2.1 Passage à l'échelle et optimisations

Comme déjà souligné dans la section précédente, les applications restent des démonstrations du modèle plus que des solutions à des problèmes encore non résolus. Autant ces programmes permettent l'exploration des principes théoriques afin d'expliquer l'émergence des comportements, autant leur utilité restera très limitée au niveau ingénierie s'ils ne peuvent s'appliquer à des problèmes de plus grande envergure. Je reste pourtant convaincu que la structure homogène du modèle et les propagations locales d'activité sont facilement extensibles dans des espaces avec une grande densité d'interactions et d'anticipations. Le principal problème est alors computationnel, puisque chaque anticipation doit être mise à jour à chaque instant en intégrant l'activité de toutes les autres. Une telle complexité de l'ordre de n^2, avec n le nombre d'interactions, nécessite des optimisations pour une exécution temps réel.

Ajouté à ce parallélisme massif, l'apprentissage par différenciation nécessite la génération d'un grand nombre d'anticipations dérivées, la mise à jour de la confiance accentue encore davantage la complexité du système. Des optimisations sont donc requises et peuvent être introduites à deux niveaux :

- Au niveau de conception même du modèle, la sélection des interactions les plus adaptées ou un calcul optimisé des interpolations peuvent réduire les accès mémoire, les temps de calcul et la complexité algorithmique des fonctions.
- L'utilisation de matériel adapté à l'exécution parallèle de processus similaires apporte un gain cumulable. Ainsi, l'utilisation du GPU, de processeurs à jeu d'instruction SIMD, de

processeurs multi-cœur, de FPGA ou d'une grille de calcul scientifique peuvent considérablement accélérer les mises à jour du modèle.

Alors que le chapitre suivant va détailler l'utilisation de processeurs vectoriels pour paralléliser les calculs, celui-ci introduit quelques optimisations simples permettant de grandement limiter les calculs. Ce chapitre concerne donc des modifications à réaliser dans la conception ou l'implémentation du système, alors que le suivant touche principalement à l'exécution du code. Les algorithmes et structures introduits ici ont été utilisés pour le contrôle du système pendule/-chariot qui génère des quantités d'anticipations malgré sa simplicité apparente (de l'ordre de 10^4 à 10^5). Même si ces interactions sont simplistes et qu'il n'était pas encore question de propagation d'activité dans cette version du modèle, l'interpolation à elle seule ne peut s'exécuter en temps réel sur un processeur considéré comme relativement peu puissant en 2008 (Pentium M 1,6GHz).

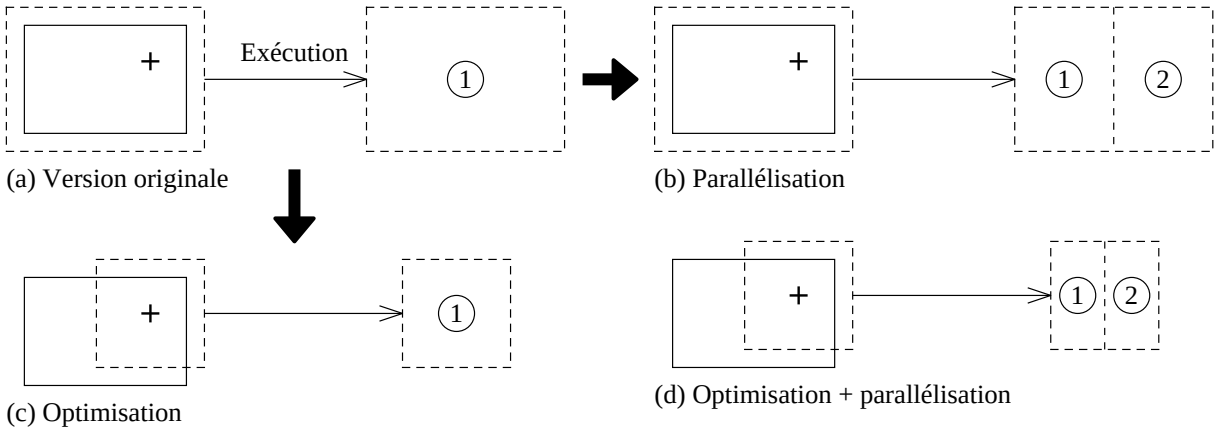


FIGURE 2.1 – (a) L'implémentation originale utilise la totalité (*rectangle en pointillés*) des interactions de l'espace (*rectangle en trait continu*) en un point donné (*croix*). (b) La parallélisation permet l'exécution parallèle de la fonction (intégration/interpolation) sur deux sous-ensembles par deux processeurs (① et ②). (c) L'optimisation au niveau du code source permet de ne sélectionner que les interactions les plus adaptées. (d) Avec l'optimisation et la parallélisation cumulées, on remarque que l'exécution parallèle s'opère sur des sous-ensembles restreints, le temps d'exécution en est donc doublement réduit.

2.2 Structure adaptée de l'espace

La réflexion qui suit est issue du constat suivant : le lourd coût d'exécution des fonctions d'interpolation et d'intégration vient de la prise en compte de l'intégralité des interactions de l'espace. Or la propagation d'activité est accompagnée d'une atténuation, c'est pourquoi seules les interactions les plus similaires au point de l'espace considéré propageront une activité significative. De plus, on a déjà noté précédemment qu'un grand nombre d'interactions faiblement assimilées peuvent affaiblir le pouvoir des attracteurs les plus adaptés. Ce phénomène n'est pas souhaitable, puisqu'il conduit à une perturbation dans l'interpolation et dans les actions résultantes.

Les structures et algorithmes décrits ici permettent non seulement de ne considérer que les interactions les plus proches mais également d'éviter la perte de pouvoir des attracteurs les plus adaptés dans un réseau trop dense. La structure initialement présentée dans la classe *Space* se réduit à de simples listes non triées d'interactions et anticipations. Celles-ci ne permettent pas un accès différencié à des zones arbitraires de l'espace, tout commence donc par une structuration plus fine.

2.2.1 Structure arborescente et partitionnement

La structure utilisée est un arbre BSP multidimensionnel décoré. Sous ce nom barbare se cache l'extension d'un type particulier d'arbres binaires. Initialement, les arbres BSP (Binary Space Partitioning) étaient utilisés pour optimiser l'affichage 2D de polygones représentés dans un espace 3D [Fuchs *et al.*, 1980; Chen and Gordon, 1991]. L'astuce consiste à ordonner les polygones selon qu'ils se trouvent d'un côté ou de l'autre d'un plan de séparation. Le parcours de l'arbre permet ainsi d'aller les polygones les plus lointains aux polygones les plus proches relativement à la caméra. Il peut même être inutile de parcourir certaines branches de polygones totalement occultés par d'autres lors du rendu 2D de la scène 3D. La mise à jour du tampon de profondeur [53] est ainsi accélérée puisqu'un simple parcours de l'arbre suffit sans qu'il soit nécessaire de tester l'ordre des polygones. Le BSP est relativement générique puisqu'il peut s'appliquer dans le même domaine à la division de polygones complexes en polygones plus simples afin d'appliquer l'algorithme du peintre [54].

Ici, on souhaite ordonner des interactions et non des polygones. Même si l'algorithme suit le même principe, notre espace possède de nombreuses dimensions. Il est choisi que chaque nœud divise l'espace en deux selon une seule dimension ; les partitions se font donc suivant des hyperplans orthogonaux. Cela permet de tester rapidement à quel sous arbre appartiennent les interactions, une seule comparaison suivant la dimension concernée étant nécessaire ($v \in [-inf; val]$ ou $v \in [val; +inf]$ avec v la valeur cherchée et val la valeur de la frontière). Seules les feuilles stockent les interactions, tous les autres nœuds permettent simplement la découpe de l'espace. On retrouve une représentation d'un espace d'interaction 2D et de l'arbre associé sur la figure 2.2.

Afin d'accélérer les opérations sur l'arbre et la recherche d'interactions dans celui-ci, chaque nœud est décoré avec des informations supplémentaires. Au niveau de nœuds quelconques de l'arbre, définis par la classe *Node*, on retrouve :

- `Vect min` : le vecteur des valeurs minimales sur chaque dimension dans cette branche.
- `Vect max` : le vecteur des valeurs maximales sur chaque dimension dans cette branche.
- `int nb` : nombre d'interactions stockées dans cette branche.
- `Vect mean` : moyenne sur chaque dimension, mais aussi activité moyenne, confiance moyenne et autres variables qui permettent une approximation de la propagation depuis une zone lointaine, en plus de leur utilité propre pour l'arbre.

En plus de ces informations, chaque nœud non terminal (tous sauf les feuilles) dispose d'attributs supplémentaires :

- `Dim dim` : la dimension suivant laquelle la partition doit être opérée.

53. Tampon de profondeur ou Z-Buffer = pseudo-image déterminant pour chaque pixel de l'écran la distance entre le point 3D le plus proche et le point 2D projeté.

54. L'algorithme du peintre est une version simplifiée du Z-Buffer pour lequel on considère directement les polygones plutôt que les pixels. Celui-ci ne fonctionne néanmoins pas dans le cas de chevauchements réciproques, d'où l'application d'un BSP pour fractionner les polygones.

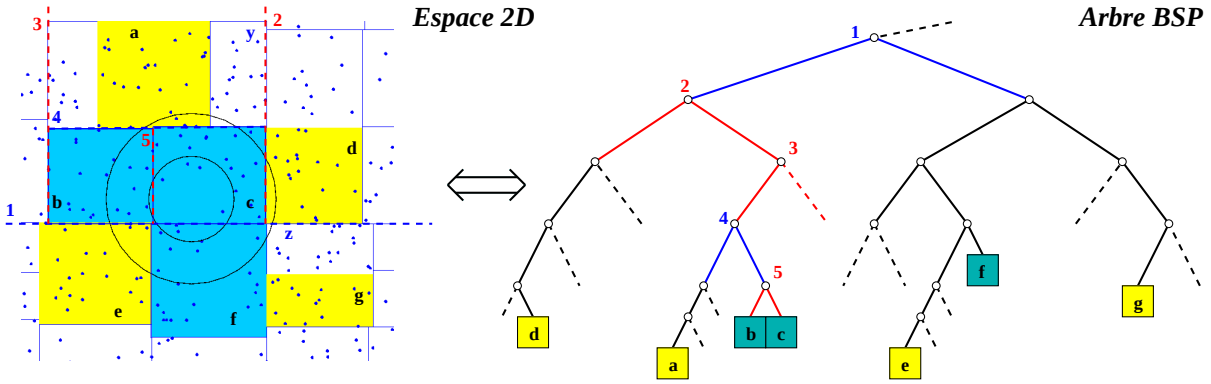


FIGURE 2.2 – L'espace 2D (*représenté à gauche*) est partitionné par les *traits pointillés*. A chaque division suivant une dimension correspond un nœud dans l'arbre BSP (*à droite*). Chaque feuille de l'arbre liste alors les interactions présentes dans la zone correspondante de l'espace. Les zones/feuilles *bleues* contiennent l'ensemble des interactions à l'intérieur du petit cercle de l'espace 2D, alors que l'ensemble *bleu* ∩ *jaune* correspond au grand cercle. Le choix d'un sous-ensemble de feuilles permet ainsi de sélectionner un ensemble réduit d'interactions.

- `double val` : la valeur limite sur la dimension `dim` définissant deux sous-ensembles.
- `Node lower` : sous-arbre gauche des interactions dont la valeur selon `dim` est inférieure à `val`.
- `Node upper` : sous-arbre gauche des interactions dont la valeur selon `dim` est supérieure à `val`.

Les feuilles stockent quant à elles les interactions :

- `ArrayList<Interaction> inters` : ensemble des interactions présentes dans la zone de l'espace correspondant à cette feuille.

2.2.2 Cas de dimensions non définies

Cette structure a été conçue alors que les vecteurs d'interaction étaient pleins. Dans le cas des vecteurs creux des versions plus récentes du modèle, il faut donc envisager le cas où la dimension de partitionnement (`dim`) n'est pas définie pour certaines interactions. Tout d'abord, les vecteurs d'interaction se trouvent dans des espaces différents, il ne s'agit pas de vecteurs majoritairement nuls tels que les vecteurs utilisés en algèbre linéaire creuse. Les techniques standards de manipulation de vecteurs creux ne peuvent donc s'appliquer. Pour néanmoins palier au problème, les solutions suivantes ont été envisagées :

1. Utiliser de multiples arbres qui n'acceptent des divisions que selon un nombre limité de dimensions : cette solution est proche de la séparation en couches, mais impose une croissance exponentielle du nombre d'arbres si les interactions sont fortement corrélées.
2. Dupliquer les interactions : si la dimension de partitionnement n'est pas définie, on place le vecteur dans les 2 sous-arbres. On est ainsi sûr de les sélectionner, quelles que soient les contraintes sur la dimension non définie.
3. On rajoute un fils à chaque nœud pour tous les vecteurs dont la dimension n'est pas définie. On obtient un arbre ternaire, les fils formant trois classes d'interactions selon que la dimension `dim` est définie supérieure à `val`, définie inférieure à `val` ou indéfinie.

Même si ces solutions se sont toutes avérées fonctionnelles lors de tests préliminaires, certaines doivent être évincées de par leur coût computationnel élevé ou l'espace mémoire requis (1 et 2). La solution 3 semble donc la plus efficace et cohérente. De plus, elle consiste simplement en l'ajout d'un attribut `Node undef` pour les nœuds non terminaux.

2.3 Algorithmes de manipulation de l'espace

Plutôt que d'utiliser une liste standard (*ArrayList<Interaction>*) dans la classe *Space* effectuant les intégrations et interpolations, il suffit alors d'utiliser un objet *Node* (racine de l'arbre). Afin de limiter au maximum les calculs, cette classe dispose de méthodes de recherche spécifiques.

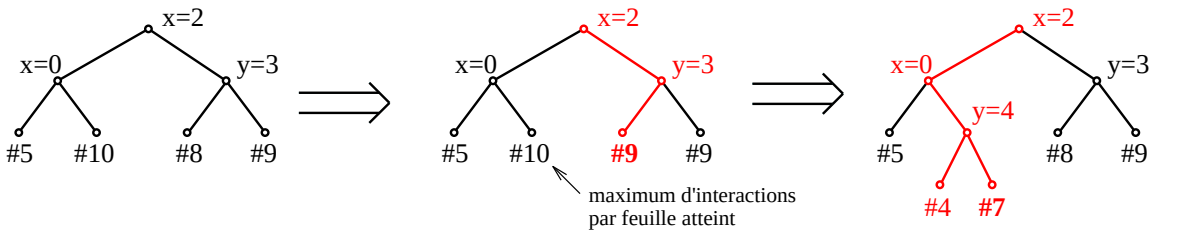
2.3.1 Ajout de nouveaux éléments

Pour mieux comprendre comment exploiter les propriétés de l'arbre BSP, il est préférable de commencer par expliquer sa construction. L'ajout d'un nouvel élément consiste à parcourir l'arbre pour trouver sa place. Cela se fait à la manière d'une insertion dans un arbre binaire de recherche, à la seule différence que plusieurs dimensions sont mises en jeu. Voici un algorithme d'insertion simplifié puisque l'on ajoute directement un vecteur alors qu'il s'agit en réalité de l'interaction qui lui est associée.

```
1  public void add(Vect v) {   v est le vecteur/interaction à insérer
2    min.min(pt.src);          Mise à jour du minimum
3    max.max(pt.src);          Mise à jour du maximum
4    nb++;                     Un élément de plus
5    updateMean(v);            Mise à jour des différentes moyennes
6    if (inters==null) {       Ce nœud n'est pas une feuille
7      if (v.get(dim)<val)     Dans quel fils ajouter le vecteur ?
8        lower.add(v);
9      else
10       upper.add(v);
11   } else {                  Il s'agit d'une feuille
12     inters.add(v);          Ajout à la liste d'interactions
13     split();                Partage de la feuille si nécessaire
14   }
15 }
```

La méthode `void updateMean(Vect v)` n'est pas détaillée ici car non directement utilisée pour la manipulation de l'arbre. Elle peut intégrer la mise à jour de la confiance, des valeurs moyennes pour l'ensemble des interactions de cette branche, ainsi que de variables intermédiaires permettant d'accélérer les intégrations et interpolations.

La méthode `void split()` permettant de diviser un nœud terminal en deux branches si nécessaire est détaillée ci-dessous. La combinaison des deux fonctions et l'effet sur l'arbre de l'insertion d'un élément sont représentés sur la figure 2.3.



(a) Arbre avant insertion (b) après insertion de (x=3,y=1) (c) après insertion de (x=1,y=5)

FIGURE 2.3 – (a) L'arbre de départ partitionne l'espace suivant les dimensions x et y. On remarque que des partages suivant la même dimension peuvent se suivre. (b) L'interaction $(x = 3, y = 1)$ s'insère dans la branche *rouge*. Le maximum d'interaction dans la feuille sélectionnée n'est pas maximal, seule la liste des interactions et les moyennes pour cette feuille sont donc modifiées. (c) L'interaction $(x = 1, y = 4)$ se place quant à elle dans une feuille déjà saturée (si on fixe le maximum d'interactions par feuille à 10), celle-ci doit donc être transformée en nœud. Le partage se fait suivant la dimension y, celle pour laquelle les valeurs sont les plus étendues, et autour de la valeur 4. On remarque que la distribution des interactions n'est pas homogène, mais évite des calculs plus complexes pour déterminer la médiane.

```
1   public void split() {
2     if (inters.size()<=NB_MAX)     Est-il nécessaire de diviser la feuille ?
3       return;                      Non, on s'arrête là.
4     dim = getHighestDim();         Dimension où [min; max] est le plus étendu
5     val = (min.get(dim)            Frontière comme valeur médiane de l'intervalle
5'          +max.get(dim))/2;
6     lower = new Node();            Création des deux fils, par défaut des feuilles
7     upper = new Node();
8     for (Vect v : inters) {        Répartition des vecteurs (on triche ici sur le type)
9       if (v.get(dim)<val)          Dans quel fils ajouter le vecteur ?
10        lower.add(v);
11      else
12        upper.add(v);
13    }
14    inters = null;                 On transforme cette feuille en nœud
15  }
```

On remarque que les nœuds et les feuilles sont codées par une même classe. Cette approche augmente les performances et simplifie les algorithmes, quoique particulièrement peu élégante ou orientée objet. La variable `inters` détermine alors si l'instance est une feuille ou un nœud quelconque, puisque seules les feuilles stockent une liste d'interactions.

`NB_MAX` est un paramètre arbitraire déterminant le nombre maximal d'interaction par feuille. Les performances moyennes de recherche selon ce paramètre sont représentées sur la figure 2.4, bien qu'elles dépendent de l'homogénéité de la distribution des interactions et donc de l'application considérée.

Enfin, l'algorithme est conçu pour une exécution rapide mais n'a pas un comportement souhaitable si la valeur ajoutée est très distante des autres suivant une dimension. Néanmoins,

les divisions suivantes seront fonctionnelles puisque l'algorithme utilisent les valeurs maximales et minimales réelles sur chaque dimension, non influencées par toute interaction appartenant à une autre branche 2.5.

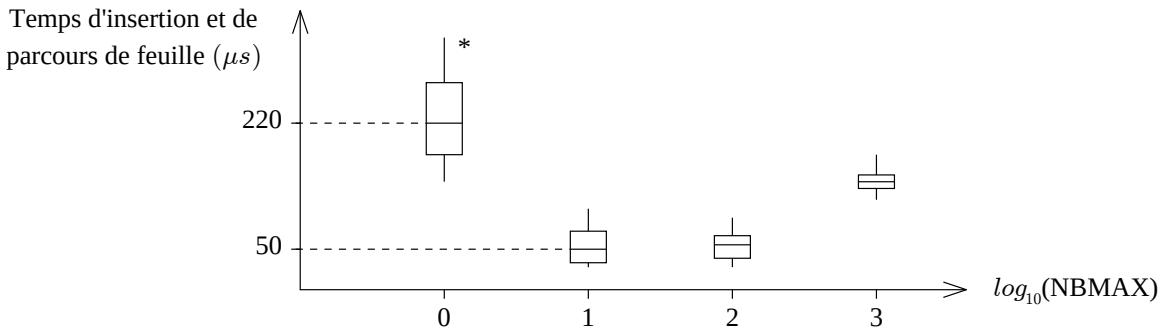


FIGURE 2.4 – Ces boîtes à moustaches modélisent la distribution statistique des temps cumulés d'insertion dans l'arbre et de parcours des feuilles. On y retrouve deux tendances qui s'opposent. Plus NB_MAX est petit, plus l'étape de partage des feuilles est fréquente lors de l'insertion (l'astérisque sur le diagramme indique que la machine virtuelle n'a plus pu maintenir l'arbre après environ 10^4 insertions pour NB_MAX=1). A l'inverse, le parcours des feuilles est d'autant plus rapide que le nombre d'interactions stockées est faible, même si le nombre de feuilles à prendre en compte et plus grand. C'est pourquoi les meilleurs résultats sont obtenus pour une valeur moyenne de NB_MAX $\in [10; 100]$. Cette fourchette optimale est toutefois relative à la répartition des interactions dans l'espace et à leur densité (ici pour l'application du pendule/chariot). Elle n'est donc pas à prendre comme une valeur quantitative absolue.

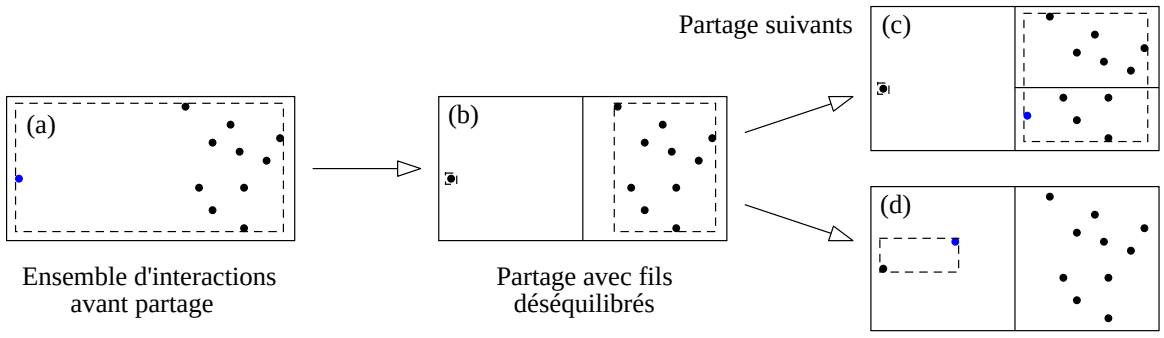


FIGURE 2.5 – (*a*) On considère une feuille qui possédait déjà NB_MAX interactions. L'ajout d'une nouvelle interaction (*point bleu*) conduit à l'appel de la méthode split sur cet ensemble. (*b*) L'algorithme du choix de la dimension de coupe et de la valeur frontière à partir de la boîte englobante (*rectangle en pointillés*) produit une partition déséquilibrée. Néanmoins, les appels suivants n'en souffriront pas, et le déséquilibre restera momentané, permettant par la même occasion d'exclure les valeurs extrêmes perturbant les moyennes. (*c*) L'ajout d'une interaction en partie gauche ne produit pas de nouvelles coupes. (*d*) On a de nouveau un nombre excessif d'interactions suite à un ajout en partie droite, mais les dimensions de la boîte englobante diminuent **au pire** de façon logarithmique.

2.3.2 Recherche et sélection d'interactions

La sélection d'interactions dans cet espace s'effectue par intersection d'un domaine passé en paramètre avec les boîtes englobantes des nœuds. Si à un moment donné du parcours de l'arbre, une boîte englobante n'intersecte pas le domaine de recherche, il est inutile de parcourir les nœuds fils. La structure permet donc un parcours plus efficace comparée à une simple liste, mais l'utilisation des boîtes englobantes à la place des frontières est encore plus économique et n'introduit qu'un faible surcoût.

Afin de rendre la fonction de recherche plus souple, celle-ci est proposée dans une version incrémentale. Il est ainsi possible de passer en paramètre une liste de feuilles déjà sélectionnées lors d'une recherche précédente. Si le domaine de recherche du nouvel appel inclut le précédent, la fonction exclut les feuilles déjà rencontrées du résultat. Cette amélioration évite de recalculer l'intégralité des distances et poids lors de l'interpolation, si celle-ci s'effectue en plusieurs temps (confère sous-section suivante). Voici ci-dessous le code simplifié de la fonction de recherche incrémentale. Certains cas ne sont pas pris en compte dans les tests et expressions, certaines lignes sont non optimisées, mais la récursivité est terminale et évite de nombreuses fusions de listes.

```
 1  public ArrayList<Node> intersect(Vect smin, Vect smax,
1'                                    ArrayList<Node> prev) {
 2    ArrayList<Node> res = new ArrayList<Node>();
 3    intersect(smin,smax,prev,res);
 4    return res;
 5  }
```

```
 1  public void intersect(Vect smin, Vect smax,
1'                        ArrayList<Node> prev, ArrayList<Node> res) {
 2    boolean cut = true;
 3    for (Dim d : smin.getDims())
 4      cut &= min.get(d)<smax.get(d) && max.get(d)>smin.get(d);
 5    if (!cut) return;
 6    if (inters==null) {
 7      lower.intersect(min,max,prev,res);
 8      upper.intersect(min,max,prev,res);
 9    } else {
10      if (prev.contains(this)) return;
11      else {
12        prev.add(this);
13        res.add(this);
14  }
```

En adoptant une notation valable uniquement en 1 dimension, les lignes 2 à 5 déterminent si le domaine de recherche [smin ;smax] et la boîte englobante du nœud [min ;max] s'intersectent. Si c'est le cas et que le nœud considéré n'est pas une feuille, il faut poursuivre la recherche sur les fils (lignes 7 et 8) et renvoyer l'union des deux listes retournées. Si le nœud est une feuille, il suffit d'ajouter celle-ci à la liste.

2.3.3 Intégration optimisée

Si l'on souhaite intégrer les activités en un point de l'espace, il suffit de centrer le domaine de recherche autour de celui-ci. Reste à fixer un rayon dans lequel prendre en compte les interactions, afin de négliger celles qui sont trop lointaines et ne peuvent suffisamment propager leur activité jusqu'au centre. Un problème subsiste : la structure étant générique et les interactions pouvant être réparties de manière totalement arbitraire, comment fixer les dimensions du domaine de recherche ? Dans d'autres termes, que signifie ce "trop lointain" et "suffisamment" dans un espace d'interaction ou seule les distances et activités relatives comptent ? Quelle que soit la distance limite fixée, une interaction juste au delà de la frontière sera négligée alors qu'une interaction légèrement plus proche sera prise en compte.

Dans l'application du pendule/chariot qui a vu le développement de ces optimisations, une interpolation d'anticipations (différente de celle des actions dans la dernière version du modèle) était réalisée en chaque point de l'espace. La figure 2.7 reprend les performances dans la recherche et l'interpolation obtenues après optimisation. Le cas le pire était évidemment celui où deux anticipations contradictoires se retrouvaient séparées par la frontière. Dans les dernières versions du modèle néanmoins, un problème similaire se pose pour l'intégration de l'activité des anticipations. On doit s'assurer que les interactions à l'extérieur d'un domaine de recherche donné ne pourront jamais propager une activité supérieure au maximum des activités intégrées à l'intérieur de celui-ci. De manière formelle, pour un point d'intégration C et un rayon de recherche r (en utilisant la norme ∞), on doit avoir :

$$\forall I \in \mathcal{I} \text{ tel que } \|I - C\|_\infty > r,\ \forall I' \in \mathcal{I} \text{ tel que } \|I' - C\|_\infty \leq r,\ p(I, C) \leq p(I', C) \tag{2.1}$$

en utilisant les notations du chapitre *Structure du modèle mathématique*, soit $\mathcal{I}$ l'ensemble des interactions de l'espace et $p(I, C)$ l'activité de I propagée en C. Un cas de mauvais choix de rayon et donc de frontière est représenté sur la figure 2.6a.

La solution choisie est de rechercher itérativement une frontière correcte. Pour cela, on commence par choisir arbitrairement un rayon minimal. Celui-ci doit simplement permettre à la première recherche de se faire rapidement, par exemple sur un domaine réduit de rayon r_1 inversement proportionnel à la densité moyenne des interactions (densité facilement calculable à la racine de l'arbre). On évalue ainsi le maximum local $p(I, C)$ des activités propagées dans le domaine de recherche. On peut alors déterminer un rayon r_2 tel qu'aucune interaction I' en dehors du domaine de rayon r_2 ne pourra jamais propager une activité telle que $p(I', C) > p(I, C)$ quel que soit son niveau d'activité propre (figure 2.6b).

Un dernier raffinement non détaillé ici consiste à considérer les feuilles et nœuds les plus distants par leurs moyennes plutôt que par la liste exhaustive des activités qu'ils contiennent. On économise ainsi de nombreuses opérations et les calculs de moyennes effectués lors de l'insertion des interactions dans leur branche fournissent une approximation acceptable. Cette amélioration a également le mérite de limiter les discontinuités du champ d'activité générées par les optimisations précédentes.

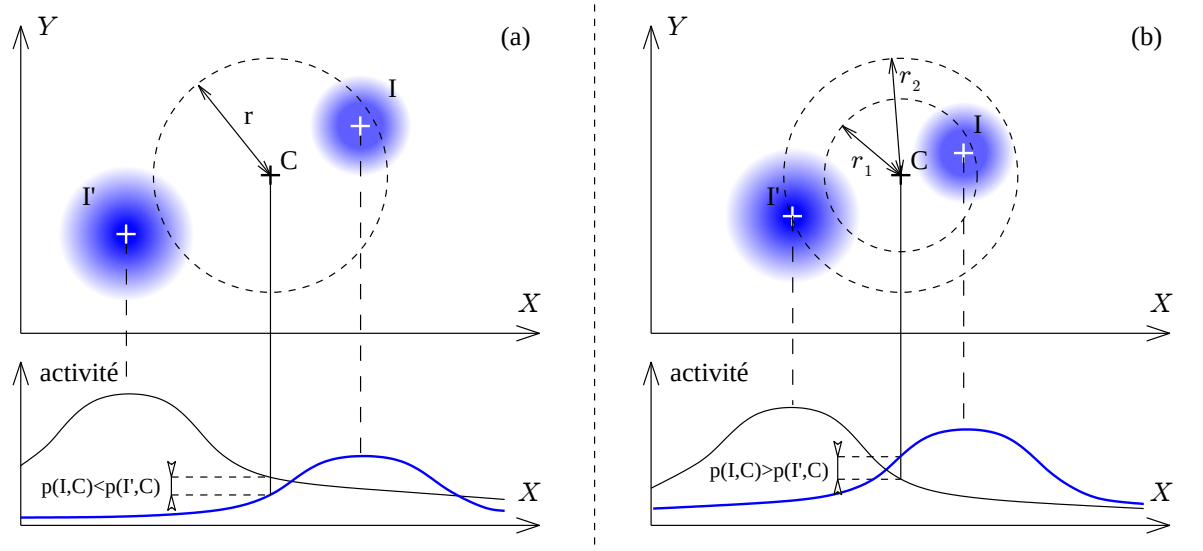


FIGURE 2.6 – (*a*) Avec un choix arbitraire de domaine de recherche (*disque de rayon r*), il est probable qu'une interaction non prise en compte (*I'*) propage une activité supérieure au maximum des activités propagées dans le domaine (*p(I,C)*). (*b*) En augmentant itérativement le rayon de recherche (r_2), on peut s'assurer qu'aucune interaction non prise en compte n'est prédominante.

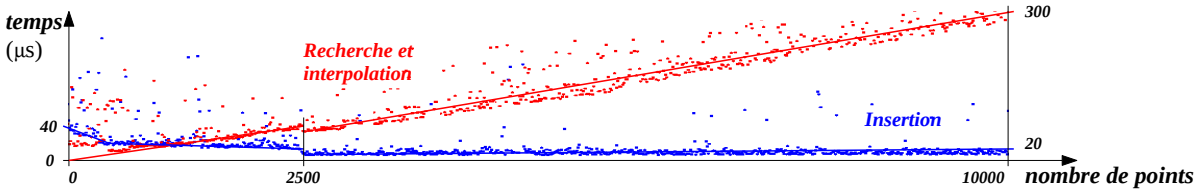


FIGURE 2.7 – Temps d'accès et d'insertion de nouveaux points dans le graphe BSP de l'application du pendule/chariot (*bleu*) et temps nécessaire à la sélection des feuilles et à l'interpolation en un point de l'espace (*rouge*). Les deux sont représentés ici en fonction du nombre d'anticipations dans l'espace. La variabilité de distribution des points dans l'espace provoquent des variations, mais les régressions linéaires montrent que le coût d'insertion de nouveaux points devient quasi-constant (les partages de feuilles sont de moins en moins fréquents) alors que le temps d'interpolation croît avec un facteur de proportionnalité très faible.

3

Parallélisation

Sommaire

3.1 Cadre général 167
3.1.1 Contexte et architectures existantes 167
3.1.2 Domaines d'application 169
3.1.3 Avantages additionnels 171
3.2 Librairie de traitements visuels sur GPU 171
3.2.1 État de l'art 171
3.2.2 Contraintes théoriques 173
3.3 Implémentation des processus visuels 174
3.3.1 Filtre/processus individuel 174
3.3.2 Multitude de processus 176
3.3.3 Ordonnancement PERT 178
3.4 Performances 179
3.4.1 Comparaison des implémentations 180
3.4.2 Complexité 180

3.1 Cadre général

3.1.1 Contexte et architectures existantes

Comme précisé dans l'introduction du chapitre précédent, on a tout intérêt à gagner du temps d'exécution en s'attaquant à différents maillons de la chaîne de développement. En plus de l'optimisation des algorithmes précédemment considérée, on s'intéresse ici à la parallélisation du code. L'idée même d'architecture parallèle n'est pas nouvelle et depuis longtemps sont conçues des architectures dédiées. Néanmoins, que ce soit à cause des limites physiques au cœur des processeurs standards, d'une volonté de profiter de la puissance inexploitée des processeurs du monde entier ou de toute autre raison qui ne nous concerne pas ici, le parallélisme connaît un engouement récent. On peut citer aujourd'hui les grilles de calculs, les processeurs multi-cœurs, les FPGA (Field-Programmable Gate Arrays), les GPU (processeurs de cartes graphiques), ou les processeurs de consoles de salon (triple cœur PowerPC pour la XBox360 ou Cell Broadband Engine pour la Playstation3 par exemple). L'invasion du marché par de telles architectures les rend désormais accessibles à n'importe quel utilisateur. Encore faut-il pouvoir exploiter leur potentiel...

Certains algorithmes sont fondamentalement séquentiels et donc difficiles à paralléliser, auquel cas l'intervention de spécialistes capables de transformer les problèmes et les algorithmes est nécessaire. D'autres algorithmes, tels que ceux présentés dans ce manuscrit, sont clairement conçus pour fonctionner en parallèle. Exploiter le matériel disponible relève alors du domaine technique. C'est sur ces aspects techniques que l'évolution et la diffusion des architectures parallèles a eu le plus grand impact. Alors qu'il fallait se débrouiller aussi bien en électronique qu'en informatique, parfois apprendre un langage d'assemblage et maîtriser des commandes complexes pour utiliser des architectures parallèles dédiées à une classe de problèmes, les supports matériels et les suites/bibliothèques logicielles qui les accompagnent sont désormais bien plus flexibles et pratiques.

Ce chapitre va s'intéresser plus particulièrement à trois architectures parallèles (GPU, Cell BE et grille de calcul) dont les caractéristiques sont synthétisées dans le tableau ci-dessous. Celles-ci ont été sélectionnées pour leur coût réduit, leur facilité d'accès et l'utilisation de langages et environnement standards pour les manipuler. Une grille peut en effet reposer sur un ensemble de machines au sein d'un réseau quelconque, les GPU sont présents dans tout ordinateur moderne et le Cell Broadband Engine des derniers serveurs Blade d'IBM est disponible à prix réduit car également intégré à la PS3. De plus, il existe aujourd'hui des librairies pour communiquer avec les GPU (en C ou en Java par exemple via OpenGL) et il est possible d'installer sur la PS3 un système d'exploitation Linux spécifiquement adapté à son architecture.

Architecture	**GPU**	**Cell BE**	**Grille**
Type de composants	Pipeline prog.	PowerPC/SPE	Calculateur
Nombre maximal de composants	Élevé	Faible	Élevé
Puissance des composants	Faible	Moyenne	Variable
Bande passante avec la mémoire	Élevée	Élevée	Réduite
Bande passante entre composants	Nulle	Élevée	Réduite
Quantité de mémoire locale	Quasi-nulle	Réduite	Élevée

FIGURE 3.1 – Comparaison d'architectures parallèles variées : processeur graphique (GPU), Cell Broadband Engine, Grille de calcul.

En observant ce tableau, on remarque que les trois architectures couvrent un large spectre de possibilités. Le GPU et la grille de calcul constituent les extrêmes en termes de souplesse et de capacités computationnelles, alors que le Cell BE se positionne comme intermédiaire (figure 3.2). Même si la grille de calcul est plus souple, potentiellement bien plus puissante et plus robuste, la communication entre ses composants passe par un réseau de type Ethernet ou pire, Internet. Ce réseau est sujet à des ralentissements et son débit est loin de valoir celui des bus internes aux ordinateurs. Ces défauts s'effacent lorsqu'on considère les derniers supercalculateurs tels que le RoadRunner d'IBM, premier à avoir passé la barrière du pétaflop, constitué de 12960 IBM PowerXCell 8i (version améliorée du Cell BE) et 6480 AMD Opteron double cœur reliés sur de courtes distances par un réseau très haut débit et privé. Ces chiffres sont donnés pour montrer que les limites décrites plus haut n'existent pas en théorie, mais qu'en pratique, peu de laboratoires peuvent se payer une telle infrastructure.

L'utilisation de FPGA, combinée avec des techniques de co-design permettant de spécifier simultanément les aspects matériels et logiciels, peut sembler plus attractive. De plus, quantité de travaux se focalisent sur la parallélisation automatique du code et son implémentation matérielle,

il ne serait donc pas étonnant que ces approches deviennent dominantes à l'avenir, même si pas encore suffisamment accessibles pour être étudiées dans cette thèse.

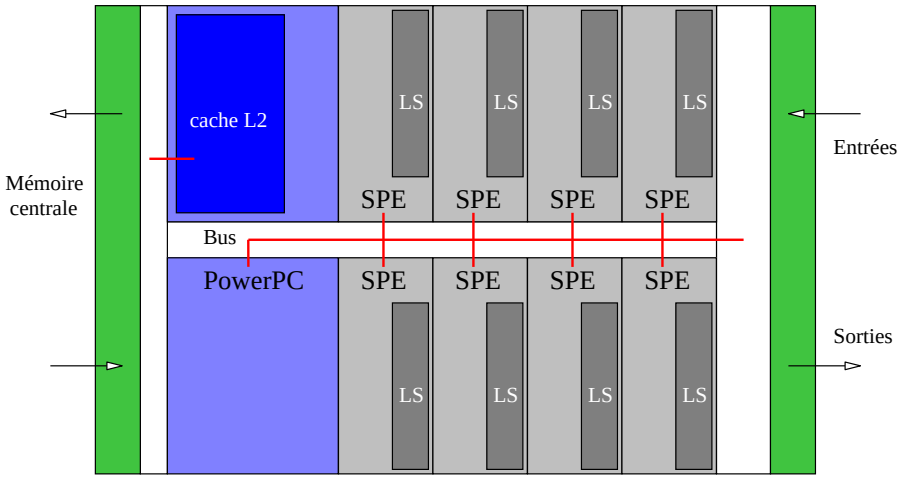


FIGURE 3.2 – Architecture du Cell Broadband Engine développé par STI (Sony/Toshiba/IBM). Cette représentation reflète l'organisation spatiale du circuit où un bus d'interconnexion permet à tous les éléments de communiquer entre eux. On est ainsi proche d'une architecture réseau où chaque SPE (Synergistic Processing Element = processeur vectoriel) et le PPE (PowerPC) peuvent échanger des messages. Néanmoins, seul le PPE a accès à la mémoire centrale via son cache L2 alors que les SPE doivent se contenter d'un Local Store de faible capacité.

3.1.2 Domaines d'application

Quoiqu'il en soit de leur possible évolution au cours des années qui viennent, l'hétérogénéité des architectures les rend adaptées à des applications différentes. En ce qui nous concerne ici, les processus décrits dans cette thèse sont tous concurrents même quand ils agissent à des niveaux d'émergence différents. Le comportement de l'agent résulte de la propagation parallèle d'activité provenant de l'ensemble des interactions et anticipations. Les calculs de maxima pour l'intégration de l'activité et les sommes pondérées pour le choix des actions sont trivialement parallélisables en utilisant des méthodes du type diviser pour régner. Ainsi, non seulement la mise à jour de chaque anticipation peut être effectuée en parallèle, mais chaque unité de calcul peut aussi être dédiée à la mise à jour d'un sous ensemble d'anticipations.

Selon la densité de l'espace d'interaction et le nombre de dimensions, certaines méthodes de décomposition des données et certaines architectures sont plus judicieuses que d'autres. Si l'on considère deux tâches spécifiques réalisées à des niveaux d'émergence différents (vision bas niveau et mise à jour d'un espace d'interaction abstrait), on peut comparer leurs caractéristiques comme on l'avait fait pour les architectures :

– Dans le cas de l'utilisation de données visuelles, les couches basses du modèle manipulent un très grand nombre de dimensions (de l'ordre du nombre de pixels de l'image multiplié par le nombre de composantes par pixel). Néanmoins chaque sensation n'affecte que très localement l'activité : les informations des cônes et bâtonnets sont par exemple intégrées dans des champs récepteurs locaux sur la rétine. Il est donc préférable qu'une unité de calcul gère la **mise à jour de tous les processus qui manipulent une dimension**.

Les sous-espaces plus abstraits du modèle sont de dimensionnalité plus faible. Chaque anticipation intègre en revanche un grand nombre d'activités propagées. Il est dans ce cas plutôt préférable que chaque unité de calcul gère la **mise à jour d'un ou plusieurs processus en prenant en compte toutes leurs dimensions**.

Pour des raisons de dynamique et de volume des données manipulées ainsi que de lourdeur des calculs impliqués (voir figure 3.3), l'utilisation du GPU est plus adaptée à la vision alors que les grilles de calcul peuvent accélérer de manière conséquente les interpolations et intégrations. L'utilisation des processeurs de cartes graphiques pour les traitements visuels semble assez logique puisqu'ils sont conçus pour appliquer toutes sortes de transformations sur des images (et autres objets graphiques). En effet, les GPU peuvent traiter une grande quantité de données entrantes, disposent d'une large bande passante avec la mémoire, mais sont limités par le minimalisme de leurs unités de traitement (pas de prédiction dans l'exécution du code, peu de registres ...). A l'inverse, les grilles de calcul autorisent des traitements complexes et gourmands en mémoire, mais la bande passante limitée entre les nœuds du réseau impose des restrictions sur la quantité de données transmises (il n'est par exemple pas question de faire circuler un flux vidéo entre les composants).

Même si les architectures introduites plus haut ont toutes trois été partiellement testées durant la thèse, seule l'utilisation des GPU va être développée dans la suite de ce chapitre. Les aspects techniques sont pourtant très différents selon l'architecture et la tâche choisie, mais le but est davantage de montrer la facilité avec laquelle la parallélisation peut-être effectuée. Je souhaite ainsi convaincre le lecteur que l'optimisation du code combinée à la parallélisation à tous les niveaux du modèle permet de l'appliquer sur des problèmes complexes.

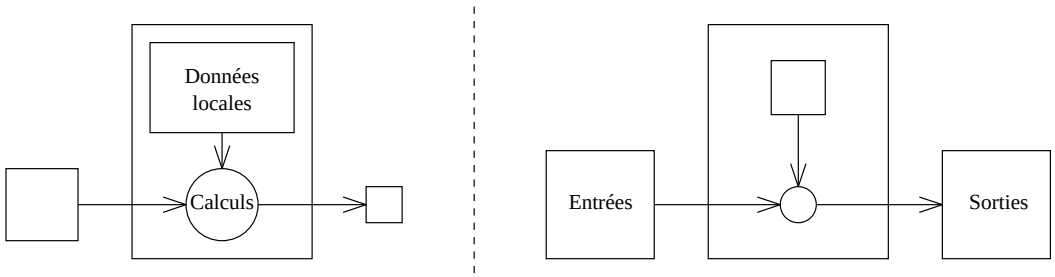


FIGURE 3.3 – Chaque schéma représente un composant de l'architecture parallèle. Tout composant utilise les entrées et les données stockées localement pour calculer des résultats en sortie. La dimension de chaque élément correspond au volume de données à utiliser ou la quantité de calculs à effectuer. (a) Pour le modèle, le grand volume de données locales correspond à l'ensemble des interactions qui évolue doucement et peut-être mis à jour progressivement. Le nombre de dimensions donc les entrées sont souvent peu nombreuses et l'interpolation comme l'intégration produisent un résultat minimaliste. (b) Pour les traitements visuels, on doit transformer de nouvelles images à chaque instant d'où un grand volume de données entrantes et sortantes. En revanche, les calculs sont simples et ne nécessitent que peu de paramètres supplémentaires.

3.1.3 Avantages additionnels

Avant de se plonger dans les détails de l'utilisation des GPU pour les calculs parallèles, il est souhaitable de se demander si le gain vaut bien tous les efforts nécessaires. Bien sûr, une charge computationnelle forte ne pourra être assurée par un processeur isolé. Il faut bien rappeler ici que les agents (en particulier robots) agissent potentiellement dans un environnement réel, et que des actions adaptées doivent être engagées dans des délais raisonnables pour que la boucle sensori-motrice soit fonctionnelle. Que ce soit à cause d'un nombre élevé de dimensions ou d'anticipations, l'implémentation parallèle apparaît alors comme une nécessité et non un choix.

La redondance étant dans notre modèle source de robustesse, la parallélisation peut également y contribuer. En prenant le cas des grilles de calcul et la mise à jour des anticipations, chaque nœud de la grille peut stocker et mettre à jour une partie de l'arbre BSP introduit au chapitre précédent. Rien n'interdit que certaines branches soient dupliquées ou plus généralement que l'ensemble du réseau permette un recouvrement de l'espace d'interaction mais pas nécessairement une partition. De nombreuses anticipations seront alors réparties et dupliquées de façon asymétrique, si bien que la perte d'un nœud entraînera une légère perturbation de l'activité, mais sera globalement négligeable. L'approximation de l'activité globale résultante peut se faire sans connaître l'état exact du réseau, c'est-à-dire sans se préoccuper des pannes ou ralentissements éventuels au niveau de chaque nœud. Encore une fois, les calculs effectués sur une machine et l'intégration globale des résultats (éventuellement centralisée) diffèrent par leur niveau d'émergence.

Enfin, les optimisations algorithmiques introduites pour limiter les anticipations à prendre en compte introduisent des discontinuités, mais celles-ci peuvent également être atténuées par un tel recouvrement. Ainsi, alors que la stabilité et fiabilité du réseau sont centrales dans de nombreuses applications réparties, le modèle de cette thèse peut se satisfaire de composants imparfaits s'ils sont assez nombreux, tout comme notre corps est constitué de cellules fragiles constamment remplacées [55].

3.2 Librairie de traitements visuels sur GPU

3.2.1 État de l'art

Que l'on cherche à simuler un système biologique ou produire un système artificiel de vision, les processus bas niveau impliqués sont massivement parallèles. Dans les approches écologique, énactive ou interactiviste, la vision est considérée comme active. Celle-ci est le fruit de séquences d'actions et d'anticipations locales dans le champ rétinien. Le mouvement est aussi bien issu de la dynamique propre de l'environnement que des saccades oculaires ou des mouvements du corps de l'individu. Les modulations top-down focalisent l'attention sur des éléments spécifiques et atténuent l'effet du bruit perceptif. Dans certaines limites, les calculs à simuler sont ainsi réduits mais la présence d'éléments saillants non anticipés doit tout de même être prise en compte.

Lorsque les images sont intégralement filtrées, segmentées et analysées, par exemple dans les algorithmes de détection de points d'intérêt ou d'estimation du mouvement en vision par ordinateur, la charge computationnelle est évidemment énorme. La modélisation des processus

55. Les cellules sont ici aussi bien celles de la peau, arrachées par milliers au moindre contact, que les neurones de notre cerveau.

rétiniens et corticaux tels que les cellules ganglionnaires (contraste et autres) ou cellules MT (mouvements orientés) nécessite de nombreux calculs, d'autant plus que de nombreux paramètres peuvent varier : taille des champs récepteurs, vitesse ou encore direction.

Cette section décrit une librairie développée et utilisée durant la thèse. Ce travail combine différent langages de programmation et techniques afin de produire une librairie portable et générique permettant de s'abstraire des spécificités des cartes graphiques tout en profitant de leur puissance. La librairie est constituée de plusieurs couches manipulant des filtres. Ces filtres peuvent être implémentés par l'utilisateur dans un langage standard puis appelés via un script ou une interface graphique. La librairie organise et applique les filtres à la volée en tenant compte de leurs dépendances spatiales et temporelles.

Les changements et extensions récentes des cartes graphiques permettent désormais de décharger le CPU d'une part de son travail et ainsi obtenir de meilleures performances. De nombreuses entreprises et laboratoires explorent les capacités actuelles des cartes graphiques pour le calcul scientifique dans la discipline nommée GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit). On peut citer RapidMind (ex Lib Sh) [McCool, 2007], Brook [Buck *et al.*, 2004] ou CUDA [CUD, 2008], qui traitent des flux de données quelconques et intègrent de nombreuses optimisations et couches d'abstraction afin d'être les plus génériques possibles. Dans une optique différente, certaines plateformes haut niveau se concentrent exclusivement sur l'optimisation de traitements graphiques, mais offrent rarement accès aux résultats intermédiaires et ne gèrent pas les dépendances temporelles. On retrouve dans cette catégorie CoreImage [Cor, 2008] et OpenVIDIA [Fung and Mann, 2005]. Enfin, la plupart des travaux ont conduit au développement d'applications spécifiques à un problème donné afin de l'optimiser au maximum [Fung and Mann, 2005; Kim *et al.*, 2007; Sinha *et al.*, 2007]. La librairie introduite ici adopte une position intermédiaire, se limitant aux traitements vidéo, le champ d'application originel des cartes graphiques. Elle reste néanmoins souple dans ce domaine, sans bien sûr rivaliser avec les niveaux d'accélération matérielle de ses "concurrentes".

L'implémentation présentée ici est codée en Java 6, se base sur JOGL [56] et fonctionne sur n'importe quel PC bon marché récent. Elle peut prendre en entrée n'importe quelle source vidéo en provenance d'un périphérique d'acquisition ou de synthèse. Tout résultat intermédiaire est stocké et peut être partiellement copié en mémoire centrale sur demande. Autant que possible, c'est-à-dire dans la limite de la mémoire disponible sur la carte graphique, tous les calculs sont effectués sur la carte, afin d'améliorer les performances. Même si le matériel est en constante évolution [57], l'article de Michael Shantzis fait une bonne revue des particularités et limitations des GPU comparés aux CPU [Shantzis, 1994]. La suite du chapitre illustre l'utilisation de la librairie avec la simulation des processus rétiniens et corticaux. Le but n'est pas de reproduire de façon exacte le comportement des processus biologiques, mais de transformer efficacement le flux optique pour fournir des sensations adaptées aux couches supérieures de notre modèle.

56. JOGL est une interface avec OpenGL en Java. Celle-ci ne dispose pas des structures et utilitaires haut niveau proposés par Java3D, mais permet un contrôle plus précis du pipeline de la carte graphique.

57. Même si on a raison de croire que l'architecture reste globalement la même, les shaders unifiés ou le rendu sur texture ne se sont généralisés que récemment, et ne sont pas encore disponibles sur toutes les cartes.

3.2.2 Contraintes théoriques

Le cadre théorique qu'adopte cette thèse partage la majorité des conclusions de Kevin O'Regan en ce qui concerne la perception visuelle [O'Regan, 1992; O'Regan and Noë, 2001a; O'Regan and Noë, 2001b]. Seule l'anticipation des signaux sensoriels permet la perception et la reconnaissance des objets. L'environnement agit comme une mémoire extérieure à laquelle on peut accéder en bougeant les yeux. Si l'on observe le flux optique comme une séquence vidéo passive, les saccades oculaires perturbent un champ visuel déjà instable et irrégulier. Si on considère en revanche leur intentionnalité, elles sont alors des éléments indispensables de la boucle sensori-motrice [Wilkie and Wann, 2003; MacKay, 1973].

Si la situation n'est pas ambiguë, il est inutile d'explorer l'intégralité de l'environnement. La confirmation de quelques anticipations peut suffire à différencier les concepts perçus, c'est-à-dire à renforcer et stabiliser l'activité d'une partie de l'espace d'interactions. L'anticipation permet aussi de se focaliser sur des aspects ou points précis de l'environnement en réduisant l'ensemble des potentialités évoquées [Kuhn and Tatler, 2005]. Quand on marche dans la rue ou que l'on conduit dans les embouteillages, on n'analyse pas la masse gigantesque d'informations qui nous entoure en parcourant l'environnement. Un comportement adapté doit simplement nous permettre d'anticiper notre trajectoire, d'éviter les obstacles, de ralentir ou accélérer le cas échéant, mais pas de dénombrer les personnes habillées en blanc ou lire la totalité des plaques d'immatriculation, même si ce peut être volontairement faisable [Wann and Wilkie, 2004].

De nombreuses études soutiennent l'importance des modulations top-down dans la perception visuelle [Engel *et al.*, 2001; Vaina *et al.*, 2001], mais d'autres montrent aussi que l'on reste réactifs en présence de changements brusques ou de signaux saillants. La librairie doit donc supporter des influences bidirectionnelles entre les différents processus.

Du point de vue de la neurobiologie, la simulation des processus visuels à grande échelle permet de tester les hypothèses et possède une souplesse avantageuse [Bálya and Roska, 2005]. Même si l'organisation du cortex visuel est étudiée depuis longtemps [Hubel and Wiesel, 1962] ou que le fonctionnement individuel des cellules MT (Middle-Temporal cells) est connu, les interactions entre ces processus et avec les couches supérieures du cortex sont encore mal maîtrisées. Les cellules MT sont des détecteurs de mouvement, sensibles à une orientation et vitesse spécifiques. Leur comportement est déjà proto-anticipateur, puisque la cellule intègre des signaux provenant de différents points de l'espace et à des instants successifs (voir figure 3.4). Celui-ci est également robuste au bruit et permet de percevoir la vitesse même pour des mouvements complexes [Clifford *et al.*, 1999]. Plutôt que de se rabattre sur des techniques de segmentations classiques [Díaz *et al.*, 2003], le même type d'anticipations peut être ensuite utilisé pour détecter des masses se déplaçant de manière cohérente, puis des proto-concepts visuels [Basille *et al.*, 2007]. La librairie doit donc être conçue pour manipuler des données temporelles et gérer les dépendances entre processus.

Que la volonté soit de modéliser le fonctionnement biologique ou de produire un système artificiel performant et robuste, il est nécessaire de facilement tester les hypothèses et d'ajuster les paramètres. L'utilisation de la puissance des cartes graphiques permet justement de comparer facilement les configurations et valeurs de paramètres en temps réel. La librairie présentée ici permet également de compiler des filtres à la volée et faire varier les paramètres en cours d'exécution, la rendant suffisamment flexible pour explorer intuitivement la majorité des architectures.

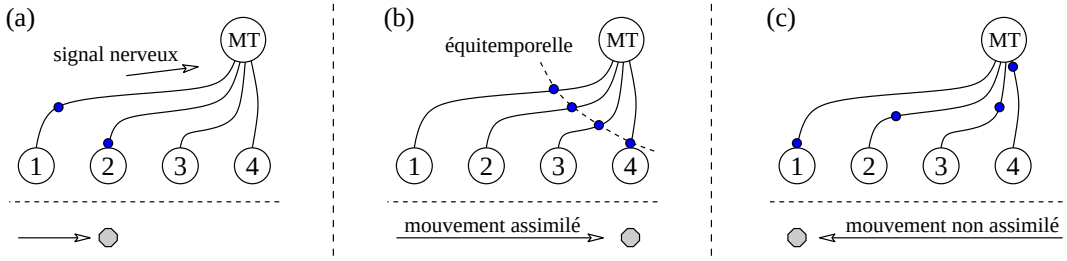


FIGURE 3.4 – Intégration temporelle réalisée par une cellule corticale MT. Une seule dimension est représentée, l'aspect orientation est donc manquant. De nombreuses cellules de la rétine ou de l'aire V1 ne sont pas représentées. (*a*) Au passage de l'objet devant les photorécepteurs de la rétine, les cellules 1 et 2 sont fortement activées et leur activité se propage le long des fibres nerveuses. Pour chaque cellule réceptrice (de 1 à 5), le temps de propagation du signal vers la cellule MT est différent. (*b*) Si le mouvement de l'objet est parfaitement assimilable par la cellule MT considérée, les signaux vont l'atteindre simultanément et celle-ci sera fortement activée, discriminant le mouvement et la vitesse associée. (*c*) Si le mouvement est inverse, les signaux arrive de manière asynchrone au niveau de la cellule MT : celle-ci est trop faiblement activée, le mouvement n'est pas reconnu.

3.3 Implémentation des processus visuels

3.3.1 Filtre/processus individuel

Tous les filtres ont la même structure générique leur permettant la manipulation de plusieurs textures entrantes et la génération d'une unique texture de sortie avec des composantes arbitraires (figure 3.5) [58]. Les textures générées successivement à chaque pas temporel sont stockées dans un tampon cyclique pour éviter des copies coûteuses en temps et en mémoire. La configuration de la carte graphique et toutes les opérations nécessaires à l'exécution du programme n'ont pas à être connu de l'utilisateur qui précise uniquement les textures à utiliser et implémente le code du programme (nommé shader) dans un langage standard [59]. Sur la figure est effectuée une différenciation entre deux textures, qui peuvent être par exemple les images successives d'une séquence vidéo ou de n'importe quel tampon cyclique produit par un autre filtre. Voici une version du code shader associé :

```
uniform sampler2D tex0,tex1;
void main(void) {
    vec2 coords = gl_TexCoord[0].st;
    vec4 a = texture2D(tex0,coords);
    vec4 b = texture2D(tex1,coords);
    gl_FragColor = a−b;
}
```

Listing 3.1 – Code source d'un pixel shader de différenciation

58. Les figures et codes des sections à suivre, quoique légèrement modifiés, proviennent d'un article en cours de révision dans la revue Machine Vision and Applications (Springer)
59. On utilise ici le langage GLSL (GL Shading Language), proche du langage C.

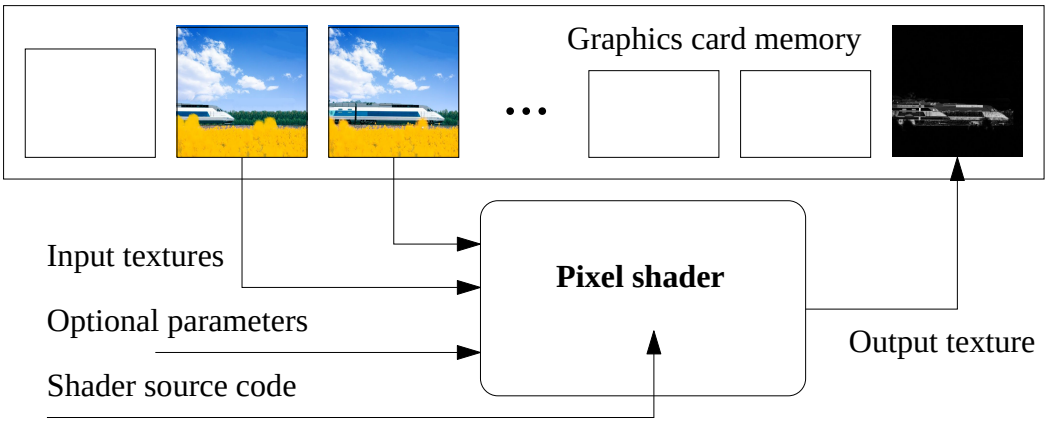


FIGURE 3.5 – La carte graphique exécute un programme (pixel shader program) et chaque pipeline génère individuellement les pixels d'une nouvelle texture en combinant les textures déjà stockées dans la mémoire de la carte. Ledit programme peut exploiter des paramètres additionnels et effectuer des calculs complexes quoique locaux.

A ce code exécuté sur la carte graphique est associé un programme Java contrôlant la carte graphique. Le shader est ainsi compilé, chargé sur la carte graphique, et les textures entrantes associées aux variables `tex0` et `tex1` via un objet `Effect`. L'appel `new Effect(n,w,h)` produit une instance de la classe qui permet d'accéder aux `n` textures consécutives de dimensions (`w`,`h`) produites par l'effet. L'effet nommé `difference` utilise ici le tampon de sortie de l'effet `camera` comme entrée. Cet effet `camera` stocke les images brutes d'un périphérique d'acquisition, permettant ainsi du prefetching et une allocation optimale de la mémoire. La dernière ligne du code ci-dessous associe la texture de l'effet `camera` au temps `t` à la variable d'entrée `tex0` et celle au temps discret `t-1` à `tex1`.

```
Effect camera = new Effect(2,w,h);
camera.setName("Input");
Effect difference = new Effect(1,w,h);
difference.setName("Differenciation");
difference.setShader("uniform [...] a-b; }");
difference.setTextures(
    new Effect[]{camera,camera},
    new int[]{0,1}
);
```

Listing 3.2 – Différenciation au niveau du code Java

Un autre exemple utilisant un ensemble de filtres plus complexes est détaillé dans l'annexe D de ce manuscrit. Bien que celle-ci ne soit en principe pas nécessaire à la compréhension de ce chapitre, elle pousse plus loin la description de la librairie. Elle montre en effet comment produire du code shader et le compiler depuis un programme écrit dans un langage haut niveau et inclut des portions du code Java et JOGL contrôlant l'exécution et la gestion des textures sur la carte graphique.

3.3.2 Multitude de processus

Les structures nécessaires à la prise en compte des relations entre plusieurs effets sont ici illustrées par un ensemble de processus rétiniens et corticaux (dont une partie du code est incluse dans l'annexe D). Ceux-ci pourraient être grandement améliorés et optimisés mais sont repris ici pour illustrer les besoins d'applications complexes et les différents types d'interactions possibles entre effets. Comme précédemment décrit, chaque effet est individuellement défini par son code source et les textures associées à ses entrées. Lorsqu'un ensemble de processus doit être mis à jour, les dépendances temporelles déterminent leur séquencement.

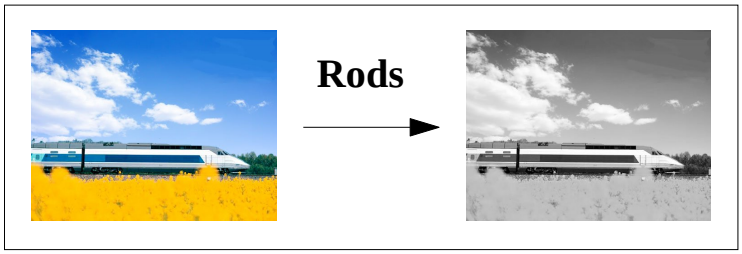


FIGURE 3.6 – Simulation de l'effet des bâtonnets de la rétine sur une images brute.

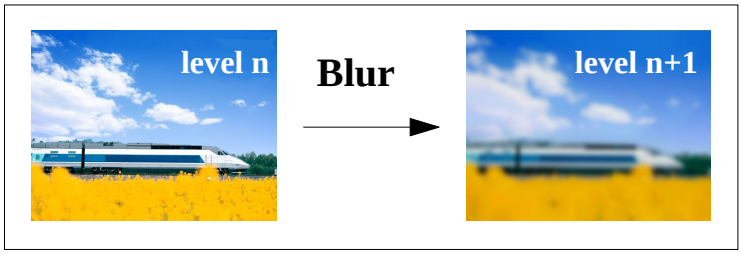


FIGURE 3.7 – Effet de flou potentiellement récursif simulant des champs récepteurs de taille variable.

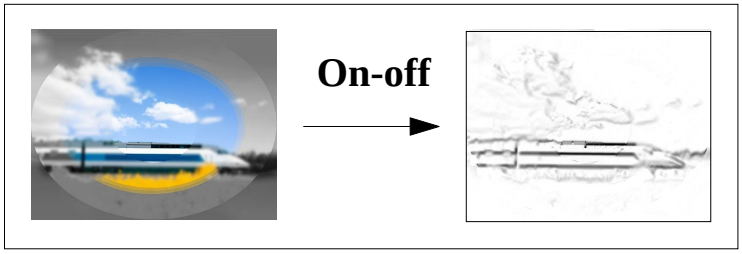


FIGURE 3.8 – Effet reproduisant le comportement d'extraction dynamique de contraste des cellules ganglionnaires "on center off surround".

Chaque figure de cette section représente un effet dont le nom est écrit au centre (figures 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10). Les flèches noires représentent les dépendances, liant les entrées de l'effet à la sortie qu'il produit. La plupart de ces effets ne prennent qu'une texture en entrée, tels que les

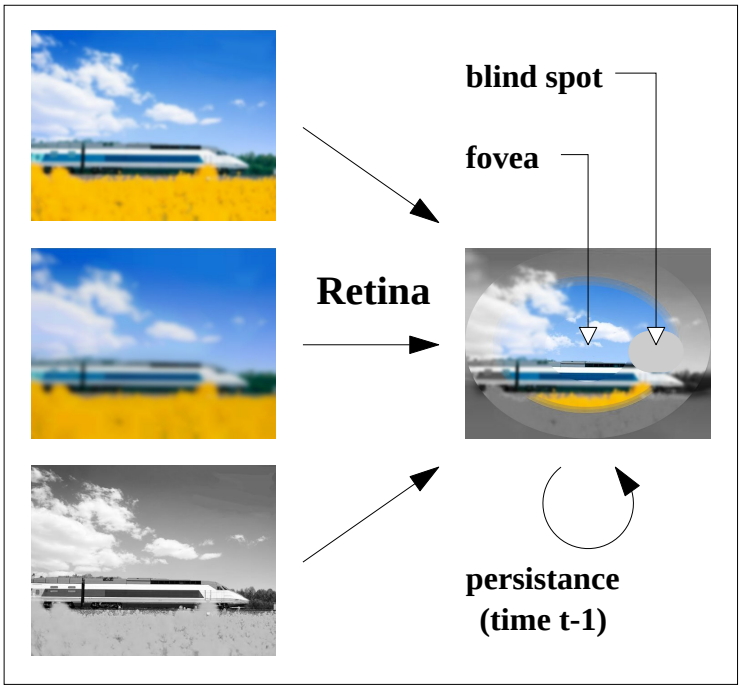


FIGURE 3.9 – Effet de simulation de la perception rétinienne, incluant par exemple la densité variable des photorécepteurs et la tâche aveugle.

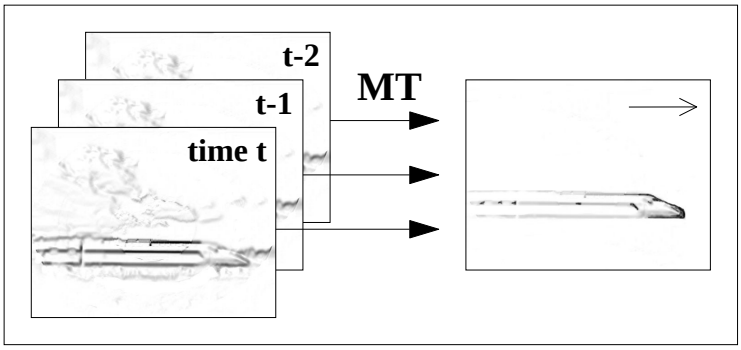


FIGURE 3.10 – Effet reproduisant le comportement des cellules corticales MT sensibles à une vitesse et orientation particulières

effets *Rods* (simulant la large sensibilité des bâtonnets de la rétine au spectre lumineux), *On-off* (reproduisant l'extraction de contraste réalisée par les cellules ganglionnaires "center-surround") ou encore *Blur*. Ce dernier a la particularité d'être applicable récursivement afin de reproduire l'intégration des signaux sur des champs récepteurs de tailles différentes. L'application de cet effet de flou limitée à la région extrafovéale simule aussi la résolution plus faible, donc l'espacement plus grand entre les photorécepteurs, sur cette partie de la rétine.

L'application de cet effet de flou en plusieurs passes permet non seulement d'accélérer les calculs en réutilisant au maximum les résultats intermédiaires, mais fournit aussi un moyen simple d'obtenir des textures multi-résolution. Les processus anticipatifs de plus haut niveau

peuvent exploiter ces textures pour détecter des objets de taille variable, de simples points d'intérêts localisés à des objets occupant une bonne part du champ visuel.

Chaque passe est effectuée en utilisant un programme de complexité constante. Chaque pixel de l'image de sortie est calculé comme une moyenne de 9 pixels voisins en entrée (figure 3.11). En négligeant les bordures de l'image, gérées intrinsèquement et sans provoquer d'erreur par les GPU modernes, la complexité peut être facilement approximée. Pour un flou n passes sur une image de $w \times h$ pixels, elle est d'environ $n \times w \times h \times 3^2$. Ce calcul inclut la génération successives des n textures correspondant aux n niveaux de flou croissant.

Comparée à l'approche directe consistant à moyenner les signaux sur un plus large champ récepteur (voir partie droite de la figure 3.11) et sans même comptabiliser la génération des résolutions intermédiaires, la version multi-passes est bien plus performante. Avec les mêmes paramètres que précédemment, le nombre d'opérations pour effectuer la mise à jour en une passe du $n^{\text{ème}}$ niveau de flou sur l'ensemble des pixels de l'image est : $w \times h \times (3^n)^2$.

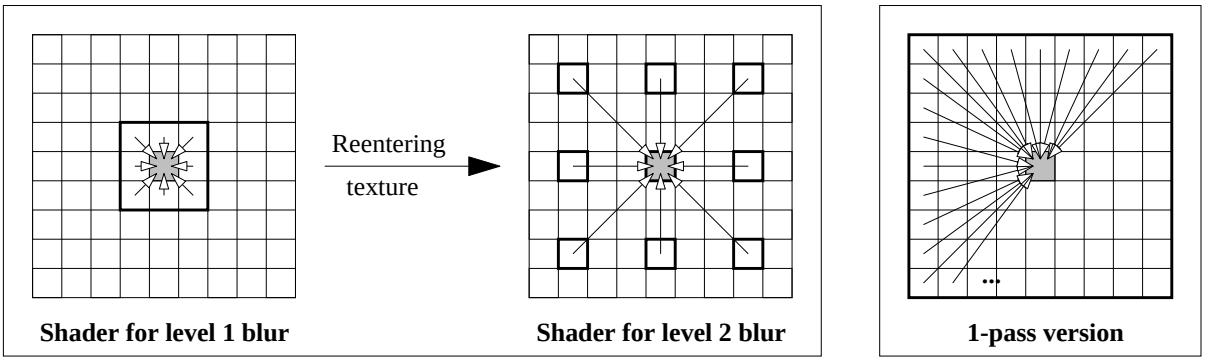


FIGURE 3.11 – Comparaison des versions 1 passe et 2 passes de l'algorithme de flou.

Des dépendances plus complexes sont illustrées par les effets *Retina* et *MT*. Ainsi, plusieurs effets peuvent être fusionnés pour simuler l'irrégularité du flux rétinien produit par les photorécepteurs. L'effet *Retina* reproduit ainsi la perte de la couleur en périphérie en utilisant *Rods*, la densité variable des récepteurs en appliquant *Blur*. La texture générée à l'instant précédent est également redirigée en entrée pour simuler la persistance rétinienne (figure 3.9).

De manière similaire, les effets *MT* évaluent les mouvements locaux à partir de plusieurs images calculées par un même effet, mais à des temps différents.

3.3.3 Ordonnancement PERT

L'ordonnancement de l'exécution des shaders est calculé par un algorithme PERT. Le graphe des dépendances temporelles est généré par une règle unique, une fois que les entrées de chaque effet ont été correctement configurées. Une dépendance est introduite à chaque fois qu'une texture d'entrée d'un effet est la sortie d'un autre, calculée dans le même cycle de mise à jour. Les dépendances sont représentées par des flèches sur la figure 3.12, dont l'effet cible dépend de la source. Le coût est uniforme et arbitrairement égal à 1, le but étant simplement d'ordonner les calculs pour éviter d'utiliser des textures non définies et de détecter des erreurs de conception dans le graphe.

La règle de construction élimine les liens depuis des textures calculées au cycle d'exécution précédent. Par exemple sur la figure, l'effet *MT* dépend de *On-off* uniquement à cause de l'uti-

lisation de la texture à l'instant t, bien qu'elle utilise également les textures aux instants $t-1$ et $t-2$. Il n'y a pas d'auto-dépendance de l'effet *Retina*, puisque la persistance rétinienne utilise l'image à l'instant $t-1$.

L'algorithme retourne une erreur s'il y a présence de cycle, mais dans le cas contraire, il garantit que tous les shaders s'exécuteront sur des textures bien définies et correctement mises à jour. Toujours sur la figure, le chiffre présent près de chaque effet indique l'étape durant laquelle il doit être exécuté. Pour chaque cycle complet de mise à jour, toutes les étapes doivent être réalisées par ordre ascendant. L'ordre des mises à jour au sein d'une étape n'a aucune importance.

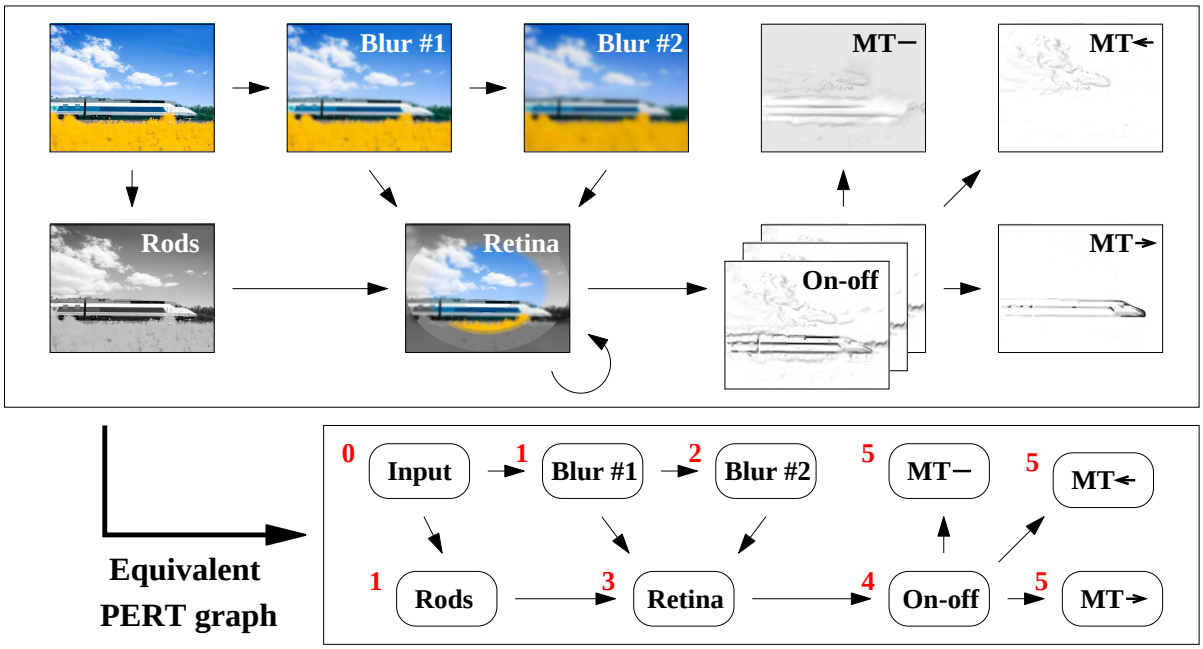


FIGURE 3.12 – Conversion du réseau d'effets en un graphe PERT dont les éléments sont uniquement connectés par leurs dépendances temporelles. Les chiffres *rouges* indique l'ordre d'exécution des shaders. Plus le nombre est petit, plus l'effet doit être appliqué tôt.

3.4 Performances

Les tests ont été effectués sur un ordinateur portable sous Windows XP SP2, équipé d'un Intel Pentium M 735, de 512Mo de DDR333 et d'une Mobility Radeon 9700. Cette carte graphique possédant 128Mo de mémoire est basée sur une architecture M11 et possède donc seulement 4 pixel pipelines effectuant 12 opérations des programmes shaders par cycle d'horloge. Bien que sa puissance soit ridicule si on la compare avec les cartes produites en 2008, le gain de performance reste impressionnant.

Les shaders ont des limites au niveau du nombre d'instructions maximal par programme ou du nombre de textures utilisées (texture unit mapping). Malgré tout, ces limitations tendent à disparaître au fur et à mesure des générations de cartes et peuvent être contournées en fractionnant le code source (moyennant une perte de performance à cause des basculements de contexte et du stockage de textures supplémentaires). La possibilité d'enregistrer le rendu directement

en mémoire graphique (render-to-texture) est désormais disponible sur de nombreuses cartes et accroît encore davantage les performances.

3.4.1 Comparaison des implémentations

La figure 3.13 compare les performances d'une série d'effets selon l'implémentation. Tous les programmes, qu'ils soient écrits en C/C++ ou Java, utilisent OpenGL, la même architecture et le même graphe de 10 effets mis à jour à chaque cycle. Une seule implémentation utilise les shaders alors que les autres se contentent de code haut niveau et d'appels OpenGL standards. Une séquence d'images de synthèses en 24 bits de 512×512 pixels ont été utilisées en entrée. La complexité de ces images n'influe pas sur les performances puisque tous les pixels sont traités systématiquement. Le temps d'exécution a été utilisé pour évaluer la performance. L'écart type relativement élevé des résultats provient des calculs statistiques introduits et des appels chaotiques au Garbage Collector en Java lors du suivi de l'évolution du programme. La version C/C++ a été développée pour évaluer le surcoût des adaptateurs JOGL (wrappers) et les possibles ralentissements dus au choix du langage. Même si on peut noter une légère différence entre C et Java, elle est insignifiante en comparaison du gain énorme obtenu en utilisant les shaders (2 ordres de grandeur). Une telle accélération peut sembler extrême et douteuse mais provient en réalité de la nature intrinsèque des calculs effectués. Ceux-ci sont intégralement et efficacement parallélisables, même s'ils restent représentatifs des besoins standards en vision. Une des implémentations sur le CPU peut servir de version de débogage pour développer de nouveaux filtres. Elle peut aussi servir de solution de secours en cas d'incompatibilité matérielle.

Cette comparaison n'est pas uniquement réalisée pour montrer l'efficacité de la version GPU, mais démontre également que le choix du langage haut niveau permettant l'exécution des effets sur la carte n'a qu'un très faible impact sur la performance globale. Cela s'explique par la relative autonomie des programmes shaders exécutés sur le GPU. En effet, un surcoût au niveau du CPU est causé par la génération, l'analyse et la compilation du code source, mais la carte graphique reste fonctionnelle durant tout ce temps. Seul le transfert du programme sur la carte affecte les performances, mais celui-ci est effectué au dernier moment. Le programme n'est transféré qu'une fois, aussi longtemps que son code reste inchangé, même si ses paramètres varient. C'est également la raison pour laquelle l'implémentation directe de programmes optimisés dans un langage natif de la carte graphique (généralement proche de l'assembleur du GPU) entraîne non seulement la perte de la portabilité du code mais n'améliore que très peu les performances. Une telle implémentation, en plus de ne profiter qu'à certains experts, n'a pas la souplesse de la librairie proposée.

3.4.2 Complexité

Les graphes de la figure 3.14 montrent l'évolution des performances en fonction du nombre de processus et en fonction de la dimension des textures à traiter. La tendance est évidemment au ralentissement lorsque la complexité augmente, mais permet aussi de trouver de façon empirique les limites de la carte en termes de mémoire. Néanmoins lorsque l'on limite le nombre de textures produites aux capacités de la carte, l'évolution est quasi-linéaire.

De plus, on remarque qu'un bon choix de paramètres évitant des chutes de performances ponctuelles sur certaines images conserve le temps d'exécution sous la barre des 10ms. Le GPU peut ainsi effectuer d'autres opérations en complément, par exemple manipuler des modèles 3D

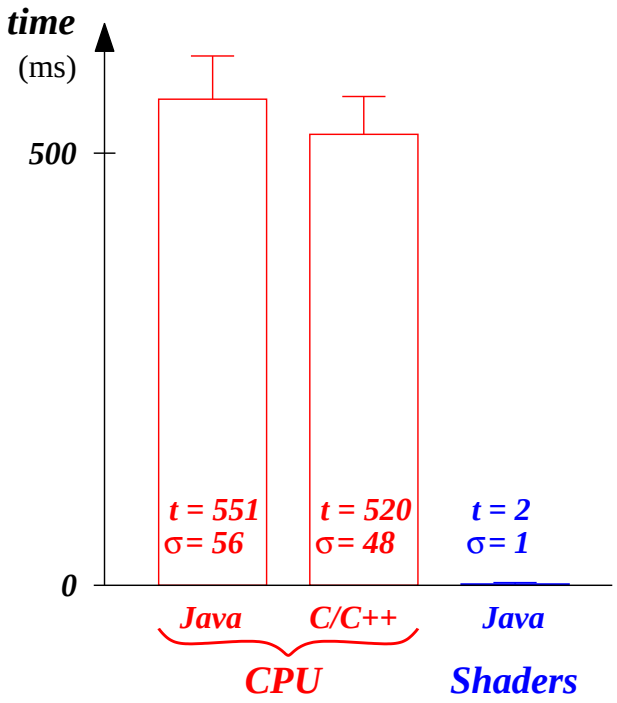


FIGURE 3.13 – Comparaison des performances avec les versions CPU (Java et C/C++) et GPU (shaders depuis Java). Chaque barre correspond au temps moyen d'exécution de l'ensemble des effets. L'écart type est représenté au dessus.

ou générer des images de synthèse. Pendant ce temps le processeur de l'ordinateur (CPU) est libre d'accomplir d'autres tâches, puisque la carte graphique le soulage des calculs parallèles pour lesquels il n'est pas adapté.

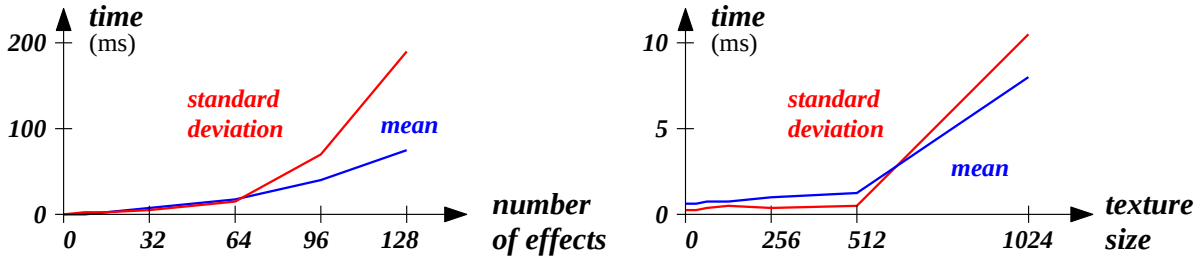


FIGURE 3.14 – Performances de la librairie en fonction de la taille des textures et du nombre d'effets à mettre à jour à chaque nouvelle image en entrée.

4

Limitations et perspectives

Sommaire

4.1 Paramètres et propriétés du modèle 184
4.1.1 Évaluation 184
4.1.2 Paramètres 184
4.1.3 Inhibition 186
4.1.4 Temporalité 186
4.2 Relations à d'autres formalismes 187
4.2.1 Réseaux de neurones 187
4.2.2 Algorithmes de recherche ordonnée 187
4.2.3 Logique floue 188
4.3 Validation expérimentale 188
4.3.1 Neurosciences 188
4.3.2 Physiologie et biomécanique 189
4.3.3 Psychologie 189
4.4 Application à la conduite automobile 190
4.4.1 Intérêt 190
4.4.2 Architecture proposée et travail réalisé 191

Le modèle décrit dans cette thèse de même que son implémentation sont en constante évolution. Ce chapitre décrit les limitations actuelles et les développements à venir. Certaines limitations sont certainement liées à un manque de temps pour approfondir le sujet, mais d'autres sont peut-être plus profondes et nécessiteront l'introduction de nouveaux principes ou la révision complète du modèle.

Le manque principal du modèle proposé est sa non application à des problèmes plus conséquents que les démonstrations présentées dans ce manuscrit. Une validation sur des problèmes de grande taille est nécessaire pour déterminer les limites d'applicabilité du modèle, et des problèmes plus complexes impliquent l'apprentissage. De plus, les tests en interaction avec l'environnement doivent continuer à se réaliser en temps réel. Même si des optimisations ont déjà été réalisées, une évaluation rigoureuse de leur coût et des changements qu'elles entraînent doit être effectuée, indépendamment du problème traité.

De nombreuses applications présentées peuvent être complexifiées à volonté, mais celles-ci resteront néanmoins au niveau sensori-moteur. Le modèle peut théoriquement et semble intui-

tivement pouvoir s'appliquer à des domaines variés et à tous les niveaux de la cognition, mais sans validation expérimentale, rien ne le confirme. Les aspects sensori-moteurs de la cognition étant loin d'être tous traités, l'émergence même de concepts dans les espaces d'interaction n'est pas triviale dans l'état actuel des recherches.

Une revue détaillée du modèle pour en analyser les capacités et limites est donc requise. Celle-ci doit aussi intégrer une comparaison aux formalismes existants et la validation potentielle des propriétés du modèle par les expérimentations réalisées en psychologie ou neurosciences.

4.1 Paramètres et propriétés du modèle

4.1.1 Évaluation

Tout d'abord, on remarquera que peu de mesures de performance sont fournies dans ce manuscrit et que les descriptions à ce sujet restent relativement évasives. Ceci découle de la difficulté même de trouver des critères d'évaluation convenables. En effet, on cherche rarement à évaluer une vitesse de convergence ou un taux de réussite. Ce ne sont pas la coordination, les interactions ou les anticipations qui sont sujettes à évaluation, mais le comportement émergent tout entier.

Ce comportement se réalise au travers des interactions avec l'environnement. Le manuscrit insiste sur la synchronie que doivent adopter l'agent et son environnement, il est donc inutile et même contre-productif d'aller "plus vite que la musique" (on pensera en particulier au TamTam). Plus généralement, de nombreux comportements animaux et humains sont sous-optimaux à bien des égards (spatialement, temporellement, énergétiquement) car toujours conditionnés par les connaissances et l'expérience de l'individu.

Je ne cherche pas ici à justifier un manque flagrant d'évaluation. Ce modèle se veut avant tout exploratoire, afin de tester des principes qu'il intègre. Les architectures informatiques modernes ne sont pas spécialement adaptées à ce type de modèles fondamentalement distribués, il est donc important d'optimiser les calculs afin de pouvoir tester les principes. Mais cela ne doit pas se faire au prix des développements théoriques qui l'ont précédé. En résumé, les principes ont été jugés adéquats si le comportement était fonctionnel.

4.1.2 Paramètres

Dans une telle perspective, comment juger de la correction des paramètres du modèle ? Comme il a été précisé dans la description du modèle, les résultats sont assez peu sensibles aux fonctions et paramètres intervenant dans les équations. Seules certaines propriétés doivent être conservées, afin d'assurer par exemple la continuité de l'activité et donc des actions.

Plusieurs outils (non décrits dans cette thèse car accessoires) ont été développés pour visualiser l'évolution des variables et leurs interactions afin de mesurer l'effet des paramètres. Cet effet est difficilement déductible des équations, ces dernières étant toutes couplées au sein d'un système complexe à l'activité chaotique. Deux types de représentations sont utilisés :

- **Trajectoires de phase du système** : les sensations et actions de l'agent sont les variables majoritairement concernées. Les plans de phase sont souvent utilisés pour déterminer graphiquement les cycles limites dans les systèmes dynamiques à 2 dimensions. Le problème ici est que le nombre de dimensions est bien supérieur à 2 et que le système entretient son

activité loin de l'équilibre. On n'a donc pas de convergence lorsque le temps augmente, mais des oscillations permanentes autour de cycles stabilisés par l'agent. On parle ici de trajectoires de phase, non pas parce que plusieurs jeux de paramètres du modèle sont testés, mais parce le paysage dynamique change en continu durant l'exécution du programme et entraînent des variations dans les "paramètres du comportement".

– **Trace de variables quelconques** : toute variable interne du système peut être tracée en fonction du temps. On peut ainsi observer la synchronisation et la séquentialité des anticipations en superposant plusieurs traces. Là aussi, le nombre de variables et d'anticipations étant potentiellement gigantesque, il faut choisir des traces significatives car la superposition devient rapidement illisible. Le niveau d'activité relatif est primordial dans la détermination des attracteurs, et des écarts parfois minimes doivent être pris en compte, ce qui rend un ensemble de courbes distinctes rapidement illisible.

Bien que cela n'ait pas été fait durant ces trois dernières années, une analyse en composantes principales (ACP) de l'ensemble des données recueillies pourrait permettre de réduire le nombre de dimensions à suivre, et permettre une visualisation et analyse plus synthétique de la dynamique.

Il semble aisé de tester plusieurs jeux de paramètres avec les outils précédents. Hélas, si chaque exécution du programme produit une "trajectoire de phase" complexe avec une succession d'attracteurs de natures diverses, comment comparer plusieurs exécutions ? Un marquage des différents "cycles limites" et leur comparaison par des homéomorphismes est probablement nécessaire, mais mon manque de connaissances en systèmes dynamiques et en mathématiques pêche à ce niveau.

Le modèle ne comprend pas de trop nombreux paramètres à régler. En effet, la plupart des constantes utilisées induisent des translations ou des homothéties. Au final seules les activités relatives sont prises en compte par l'intervention de moyennes et de rapports. La distribution des activités de chaque anticipation peut être modifiée mais leur classement n'en sera pas affecté. Le résultat de l'interpolation n'en sera donc que faiblement perturbé puisque la pondération écarte les valeurs, mais deux anticipations de degrés d'activité similaires participent équitablement au calcul. Tous ces paramètres modifient donc la courbure des trajectoires, conditionnent l'apparition de pics mais ne changent pas fondamentalement la dynamique.

Restent les distances moyennes de propagation selon que l'on considère les anticipations ou les sensations/modulations (paramètres m et M des équations de propagation). Leur calcul est désormais automatisé, mais les conditions de coordination n'ont pas été suffisamment explorées. Le paramètre m est pris égal à $M/10$, avec M lui même calculé comme la moitié de la "longueur" moyenne estimée des anticipations. On s'assure ainsi que l'activité propagée depuis la source d'une anticipation n'auto-renforcera pas l'activité de cette même anticipation et qu'une sensation ne pourra inonder le champ d'activité au delà de la portée des anticipations. Néanmoins ladite longueur dépend de l'échelle de la couche et donc de son rythme d'anticipation. Le problème est qu'un apprentissage trop peu contraint peut conduire à des anticipations de longueurs variables et ne plus respecter les propriétés énoncées ci-dessus. Que faire si deux dimensions au sein d'une même couche ne partagent pas une unique échelle, alors que la propagation est "isotrope" ? Comment déterminer le rythme adéquat pour chaque couche ? Quel doit-être le rapport entre les rythmes de couches hiérarchisées ? Toutes ces questions restent malheureusement en suspens dans cette thèse, et beaucoup de travail reste donc à faire sur ce point, afin de déterminer de manière automatique et robuste ces paramètres.

Enfin, certaines valeurs des paramètres pourront être partiellement validées si on parvient à faire correspondre la dynamique de l'agent avec des résultats empiriques chez l'animal ou chez l'homme. Par exemple, on pourra considérer l'adéquation de la dynamique des actions avec des données en électrophysiologie ou en biomécanique.

4.1.3 Inhibition

Au niveau des changements plus profonds que devra certainement subir le modèle, on peut citer l'introduction d'inhibition. Jusqu'à présent, toute propagation est attractive et l'évitement d'obstacle résulte de sa non attraction. En effet, on n'anticipe pas par exemple de traverser un mur, on peut au mieux anticiper l'effet qu'aura son contact, la douleur qu'on ressentira si on le heurte trop violemment. Les interactions les plus directes qui se coordonnent à l'atteinte d'un but derrière le mur impliquent son contournement. Pourtant, il est possible que cela ne soit pas toujours suffisant et il sera nécessaire comme dans la plupart des modèles d'introduire de la répulsion ou de l'inhibition.

A la manière du codage en fréquence des neurones, où la fréquence varie autour d'une valeur de repos et dont une faible valeur traduit une désactivation, on peut imaginer associer à chaque interaction ou anticipation une activité de repos. Un incrément de cette valeur augmentera son pouvoir attracteur, alors qu'une faible valeur aura un effet répulseur. Il faut bien souligner que dans le modèle seule l'activité relative compte, il n'y a donc aucun intérêt à décaler en quelque sorte la référence et changer de terminologie. En revanche, si le maximum de la fonction d'intégration des activités est remplacé par une somme pondérée, les valeurs faibles ne sont plus négligeables, mais réduisent l'activité résultante. Ce type de pondération a été testé, mais il entraîne également des biais indésirables et le problème a donc été évité jusqu'à présent (comme expliqué dans le chapitre *Structure du modèle mathématique*).

Une solution intermédiaire même si ad hoc serait de ne considérer que les valeurs les plus extrêmes (maximales et minimales). On pourrait aussi introduire des propagations excitatrices et inhibitrices à la manière des réseaux de neurones biologiques. Dans tous les cas, la nécessité de l'inhibition doit être confirmée par une revue de la littérature et l'expérimentation du modèle sur des problèmes critiques bien choisis.

4.1.4 Temporalité

Hormis pour le TamTam, la temporalité est toujours dérivée de l'environnement. La notion d'environnement est toujours relative au système considéré, mais au sein des espaces d'interaction, la régulation temporelle reste passive. Les anticipations ont un délai préférentiel, celui qui a permis de les apprendre, c'est-à-dire que chaque couche a elle-même un tempo particulier, mais celui-ci n'intervient à aucun moment explicitement dans les équations régissant l'évolution du champ d'activité.

Il n'est pas question de considérer un temps absolu, imperturbable sur lequel les processus internes comme externes s'aligneraient. Une des caractéristiques principale de notre perception du temps et qu'il n'est pas régulier, mais dépend du contexte et de l'intérêt porté aux choses. Le temps semblera par exemple passer d'autant plus lentement que l'on s'ennuie. Si l'on compte proposer des mécanismes plausibles sous-jacents aux comportements sensori-moteurs des orga-

nismes vivants, le temps mathématico-physique parfait n'est pas le meilleur candidat.

D'autres solutions restent envisageables. Même si elles ne sont certainement pas les seules, voici les deux propositions que je souhaiterais explorer à l'avenir, si j'en avais l'occasion :

- Le temps peut simplement être présent au niveau des anticipations (c'est le cas du Tam-Tam). En l'intégrant au niveau le plus bas, on assure sa nature distribuée. La coordination temporelle relève alors de la synchronisation des rythmes associés à des anticipations ou processus corrélés. Les délais d'anticipation prennent alors le statut de dimension et doivent être régulés comme les autres dimensions. L'interpolation peut également prendre place pour produire des rythmes intermédiaires.
- Des horloges peuvent également être réparties et recrutées par les processus. Ceux-ci se synchronisent alors sur ces horloges qui leur sont externes, mais n'appartiennent pas à l'environnement de l'organisme.

On pourra s'inspirer des études sur les "central pattern generators", sur les horloges et cycles biologiques ou sur les ondes cérébrales pour trancher et mieux saisir les apports et inconvénients de chaque proposition.

4.2 Relations à d'autres formalismes

Le modèle décrit dans ce manuscrit a été développé incrémentalement en intégrant des principes tirés du cadre interactiviste. Au final, on observe de nombreux recoupements avec d'autres modèles et techniques. Les formalismes dont ils sont issus sont souvent bien plus avancés, bénéficiant de décennies de recherche, auxquelles il serait bénéfique de se référer.

4.2.1 Réseaux de neurones

On peut tout d'abord remarquer de fortes similitudes avec les réseaux de neurones artificiels et plus particulièrement la sous-classe des réseaux récursifs et temporels. Hormis les aspects distribués et la propagation d'activité, la fonction d'intégration des anticipations est par exemple très proche de la fonction d'agrégation des neurones. La principale différence réside néanmoins dans les connexions explicites entre les neurones, absentes du modèle de cette thèse, à l'exception des liens entre interactions distantes introduits par les anticipations. La diffusion locale de l'activité et la coordination implicite sont-elles substituables par des réseaux de neurones standards, sans perte de pouvoir de modélisation ?

De plus, un nombre conséquent d'articles sont consacrés à l'analyse mathématique et dynamique de tels réseaux de neurones, et approfondir cette voie pourrait permettre de répondre à bien des interrogations sur l'évaluation du modèle de cette thèse.

4.2.2 Algorithmes de recherche ordonnée

La coordination implicite détaillée dans ce manuscrit conduit à la construction de chemin optimaux dans le champ d'activité [60]. De même que pour la comparaison avec les réseaux de neurones, il faut rappeler que la topologie des anticipations est ici variable et que les connexions ne sont pas point à point comme dans les graphes. Malgré ces caractéristiques divergentes, il serait intéressant de voir dans quelle mesure le modèle pourrait être applicable aux problèmes

60. L'optimalité du chemin implicite formé dans le champ d'activité ne signifie pas pour autant l'optimalité du comportement émergeant des anticipations, comme on l'a déjà souligné.

de recherche ordonnée ou heuristiquement ordonnée.

De plus, la théorie des graphes s'applique en robotique ou aux télécommunications et ces deux champs très actifs ont conduit à de nombreux algorithmes très performants pour la navigation et la planification. Une comparaison avec les travaux et algorithmes récents de recherche ordonnée permettrait très certainement un enrichissement du modèle (en particulier au niveau des optimisations) et une validation potentielle de certaines de ses propriétés.

4.2.3 Logique floue

Même si elles n'ont pas été présentées de cette manière, les anticipations "instantanées" du modèle peut être considérée comme des implications floues. D'après leur définition, l'assimilation de la situation par la source implique tôt ou tard son assimilation par la conséquence. L'aspect flou résulte non seulement de l'assimilation d'interactions proches, mais aussi de l'incertitude associée aux anticipations. Le chapitre *Apprentissage* a permis d'introduire la notion de confiance dans les anticipations, selon leur confirmation par les interactions de l'agent avec son environnement. Les nombreux opérateurs et algorithmes développés pour servir la logique floue et la théorie de la commande floue pourraient également se substituer aux formules naïves utilisées jusqu'à présent.

Plus anecdotiquement, la logique floue, comme outil de modélisation des phénomènes cérébraux, pourrait également servir de passerelle pour rapprocher le modèle de certains mécanismes neurologiques.

4.3 Validation expérimentale

Le modèle serait validé expérimentalement dans les deux cas suivants :
- **Postdiction** : un phénomène en sciences cognitives est étudié expérimentalement et le modèle l'approxime ou le restitue correctement. Une postdiction est d'autant plus positive qu'aucun modèle n'était satisfaisant jusqu'alors.
- **Prédiction** : la simulation d'un comportement démontre une caractéristique novatrice. L'expérimentation permet alors de tester empiriquement si cette caractéristique est également valable chez les organismes vivants.

Le modèle n'étant pas fondé sur des données empiriques ou des modèles de la physiologie, psychologie ou neurologie, la probabilité est très faible qu'une de ces éventualités se produisent. Contrairement à l'architecture ACT'R par exemple, notre modèle s'attache à des principes généraux et ne mime pas la réalité biologique. On pourra donc simplement espérer retrouver des tendances ou l'expression des principes, malheureusement sujette à interprétation. Les prédictions sont scientifiquement plus puissantes, mais leur probabilité de satisfaction est encore plus faible, et il faudrait là aussi s'intéresser aux aspects qualitatifs plutôt que quantitatifs.

4.3.1 Neurosciences

Cette section regroupe neurobiologie, neurophysiologie et toute autre sous-domaine des neurosciences. Qu'on s'intéresse à l'organisation ou à la dynamique du cerveau, de nombreux éléments peuvent venir confirmer les hypothèses théoriques du modèle. Ainsi, l'étude de la diffusion longue portée de signaux chimiques ou celle relativement récente des cellules gliales est un indice en faveur de l'assimilation. Les études sur les neurones miroirs ou la neuromodulation plaident

également en faveur de la symétrie de l'action et de la perception.

L'activité cérébrale affaiblie en l'absence des stimuli, mais présentant les mêmes caractéristiques dynamiques, semble indiquer que la temporalité des processus neurologiques ne dérive pas intégralement de l'environnement et pointe les manques du modèle. De même, les effets de saturation des neurones et le désintérêt relatif des individus aux stimuli trop stables ou répétitifs ne sont pas modélisés correctement, puisqu'une anticipation jouera toujours le rôle d'attracteur tant qu'elle n'aura pas été satisfaite.

J'ai aussi récemment découvert les travaux de Joachin Fuster grâce à une discussion avec Paul Baxter (doctorant à l'université de Reading, UK) à Epigenetic Robotics 2008 [Baxter and Browne, 2008]. Bien que je n'aie pas encore pu me plonger suffisamment dans ses travaux, ses dernières publications et hypothèses quant à l'émergence de toutes les fonctions de la cognition à partir d'associations et interactions entre des assemblées de neurones sont très compatibles avec les théories de cette thèse. Cette description est bien trop générale mais ses idées reprennent dans le détail plusieurs des principes et propriétés du modèle en les appuyant par des décennies de données expérimentales en neuroimagerie[Fuster, 2003].

4.3.2 Physiologie et biomécanique

Bien que l'application de coordination de l'avalement et de la respiration se base sur un modèle simpliste (même fondé sur des articles de physiologie et de biomécanique), il serait bon d'étudier la dynamique réelle de la soif et de l'avalement afin de déterminer la plausibilité de la coordination implicite pour rendre compte de ses régulations.

D'un autre côté, le modèle devrait être applicable au contrôle moteur en tant que processus typiquement sensori-moteur. La réduction du nombre de degrés de liberté par l'agent dans les comportements d'atteinte et de préhension serait potentiellement expliquée par l'apprentissage et l'attraction de la dynamique vers des trajectoires préférentielles. La nature oscillatoire des mouvements devrait également être expliquée par les régulations multi-niveaux du modèle. Les transitions entre différents mouvements, uniquement possibles dans certaines positions extrêmes, devraient enfin correspondre à des nœuds d'anticipations dans l'espace d'interaction, reliant des réseaux d'anticipations stables.

4.3.3 Psychologie

Dans un premier temps, le modèle s'inspirant fortement des théories piagétiennes, il serait bon de revisiter depuis notre perspective certaines expériences réalisées sur la période sensori-motrice. On pensera par exemple à la tâche du "A et non B" conduisant à l'erreur de persévérance chez le jeune enfant [61] ou aux autres expériences associées à la notion de permanence de l'objet. Ce type d'expériences reproduites par Smith et Thelen leur permet de valider l'approche dynamique de la cognition et du développement de l'enfant et de contraster avec la majorité des modèles de psychologie qu'elles jugent encore trop statiques [Smith and Thelen, 2003]. Le formalisme des systèmes complexes combiné avec une forme compatible d'apprentissage autorise

61. L'expérience consiste à cacher répétitivement un jouet sous un boîte A puis à le placer sous une boîte B. Le bébé sait au quatrième stade (10 mois) comment atteindre l'objet caché sous une boîte, mais continue de le chercher sous la boîte A après que l'adulte l'ait déplacé sous la boîte B, alors que l'enfant a pu observer le changement.

une continuité entre phylogenèse et ontogenèse alors que la plupart des modèles actuels sont contraints de l'exclure.

Le modèle permettrait donc de revenir sur de nombreux phénomènes abordés en psychologie en les présentant sous un nouveau jour. L'utilisation de cycles d'anticipations comme attracteurs dont le pouvoir dépend du contexte et de l'activité interne de l'individu peut faciliter la modélisation de comportements décrits par Luria. Par exemple, l'incapacité chez certains patients de s'arrêter de tracer des cercles alors qu'ils sont par ailleurs capables de comportements discrets bien plus complexes [Luria, 1966].

4.4 Application à la conduite automobile

Cette application est liée à de nombreux développements de ce manuscrit, mais elle est surtout l'application initialement proposée pour la thèse, bien qu'elle n'ait pas pu être développée jusqu'à son aboutissement.

4.4.1 Intérêt

On peut commencer par rapprocher la conduite automobile de la navigation spatiale dans un espace contraint. Le véhicule se déplace, doit éviter des obstacles et doit la plupart du temps atteindre un but. Comparé à la "navigation pédestre", les actions et retours proprioceptifs sont néanmoins bien plus simples. Cela peut passer pour un répertoire d'actions large, mais on ne peut que tourner le volant, accélérer, décélérer, bouger les yeux ou la tête, alors que la marche implique des coordinations musculaires complexes pour assurer la progression et le maintien de l'équilibre. Au niveau perceptif, on utilise principalement la vision et on ne ressent que les accélérations et les contraintes sur la route via le volant.

Ce comportement peut même être encore davantage simplifié en considérant la navigation d'un robot dans un environnement similaire, certaines actions ou sensations en moins. Il nécessite tout de même la coordination de nombreuses tâches à effectuer en parallèle, comme éviter les obstacles environnants ou naviguer vers des buts. Mais, en plus des aspects sensori-moteur, la conduite automobile permet des extensions quasi-illimitées : prise en compte des signaux routiers, évitement prioritaire d'êtres vivants, respect des lois... C'est pourquoi un comportement robuste de conduite automobile est la cible de nombreux investisseurs, et le but des compétitions DARPA Grand Challenge et plus récemment DARPA Urban Challenge.

A notre niveau, cette application permet également l'application de tous les principes du modèle. L'environnement change constamment, en particulier le champ visuel à des vitesses élevées, il faut donc réagir vite à des stimuli nouveaux et anticiper à tout instant. De nombreuses tâches concurrentes doivent se coordonner pour s'exécuter séquentiellement ou parallèlement, chacune nécessitant un focus différent (via les saccades oculaires chez l'homme). Et pour insister sur les aspects déjà introduits dans le descriptif de la version 2-couches de l'application de navigation, de nombreux niveaux de régulation sont présents. Il faut en effet aussi bien réguler la position de la voiture sur la route pour s'adapter aux courbes ou aux revêtements de la chaussée que planifier dynamiquement les trajets en lisant les panneaux routiers. Le style de conduite dépend aussi des conditions environnementales ou de l'expérience du conducteur, l'apprentissage ayant bien entendu son rôle à jouer. Toutes les échelles temporelles et spatiales s'y retrouvent.

4.4.2 Architecture proposée et travail réalisé

Ce projet n'est pas nouveau au sein de l'équipe, il a d'ailleurs été régulièrement revisité lors des évolutions du modèle et a conduit à de nombreuses discussions. Différentes applications exploratoires et prototypes ont déjà été produites, on peut citer par exemple le travail de Master de Francisco Pizarro González [González, 2005] qui a fourni une base encourageante. Vu la complexité du problème, une analyse approfondie et préliminaire des principes semblait tout de même nécessaire. Les différents éléments déjà réalisés ou encore à développer sont présentés ci-dessous :

- Environnement de simulation (réalisé) : graphiquement simple mais physiquement réaliste, il a été développé par des étudiants d'école d'ingénieur au cours d'un projet long. Cet environnement permet un contrôle des conditions environnementales et l'introduction d'éléments dynamiques durant l'exécution. Il fournit en sortie de nombreuses informations perceptives et proprioceptives à un agent informatique, qui peut en retour appliquer des forces sur le volant et les pédales, ainsi qu'orienter librement son regard.
- Librairie pour les traitements visuels bas-niveau (réalisée) : on parle bien entendu ici de la librairie détaillée au chapitre *Parallélisation*, qui avait été créée pour cette application précise. Plutôt que de réaliser une étape de segmentation pour exploiter les sorties des cellules MT comme dans le projet ECOVISION [Díaz *et al.*, 2003], le modèle de cette thèse peut directement être couplé à la librairie.
- Couches basses du modèle : couplées avec la librairie pour les sensations visuelles et aux contrôles du véhicules, celles-ci peuvent accomplir les différentes tâches de régulation de la position sur la route, des distances avec les autres automobilistes, mais aussi l'évitement d'obstacles (contournement ou freinage).
- Couches supérieures : les couches supérieures déterminent les comportements à mettre en œuvre, les trajets à suivre, et modulent les précédentes en leur fixant des buts temporaires (accélération, dépassement, arrêt en bord de route).

Bien sûr il serait souhaitable que le modèle s'applique à des environnements réels en utilisant des robots plutôt que des environnements de simulation. Une caméra de type CMUcam3 (montée sur des servomoteurs) est en cours d'exploitation afin d'être à terme utilisée sur des véhicules.

Conclusion

Je pense qu'il est impossible d'apporter une réelle conclusion au sujet ouvert que j'ai abordé, en particulier vu la quantité de perspectives à développer à l'avenir. Je peux néanmoins tenter de synthétiser les apports de cette thèse aux différents domaines abordés, et tenter de convaincre le lecteur du potentiel énorme des théories interactivistes.

Afin de ne pas noyer les points cruciaux dans des phrases toujours trop alambiquées, je peux simplement rappeler les points forts du modèle. Ce qui est considéré comme un point fort de mon point de vue implique souvent des contraintes et limitations computationnelles, mais je promets de faire au mieux pour y palier à l'avenir, sans pour autant dénaturer les fondements théoriques du modèle :

- Interactions continues adaptées à des comportements dynamiques dans un environnement dynamique
- Unification des représentations par l'application de principes simples mais généraux
- Coordination implicite permettant la mise à jour d'un champ de potentialités relatives
- Souplesse de l'architecture (couches, vecteurs partiellement définis, ajout d'éléments quelconques à la volée)
- Compatibilité avec de nombreux paradigmes d'apprentissage
- Généricité pour la modélisation de problèmes sensori-moteurs

Selon le cursus, l'expérience et le contexte de travail de chaque lecteur, mes travaux seront interprétés de manière variable et seront rapprochés de travaux antérieurs très divers. La coordination implicite peut par exemple être conçue comme un algorithme de recherche ordonnée, un modèle de synchronisation dans les assemblées de neurones ou une simplification des relations sociales intriquées pouvant exister entre membres d'un groupe. L'intérêt de l'approche interactiviste est justement son champ large d'applicabilité et l'utilisation de principes communs qui sont pour la plupart connus et exploités individuellement depuis l'antiquité.

Ce manuscrit déjà trop long du fait de mon incapacité à mieux synthétiser est pourtant passé à côté de plusieurs développements réalisés durant cette thèse. Ces réflexions théoriques, outils et expérimentations auraient occulté les idées majeures du fil principal de la thèse ont donc été écartés, alors même qu'ils ont parfois occupé une part majeure de mon temps (voir annexe E). Je peux simplement les citer pour attirer l'attention du lecteur et lui donner envie de me contacter s'il souhaite plus de détails :

- Outils de visualisation 2D et 3D de systèmes dynamiques et des espaces d'interaction. Les visualisation graphiques sont réalisées par projection sur un sous-espace de l'espace d'interaction et partagent une ressemblance avec les paysages épigénétiques de Waddington de par la dynamique combinée des anticipations et des sensations. Des outils de monitoring et d'analyse des systèmes complexes ont aussi été conçus afin de suivre l'évolution globale du système tout en permettant de plonger progressivement dans les détails du système,

jusqu'aux activités intégrées par une anticipation isolée (fonctionnalité bien facilitée par les arbres BSP).
- Mon stage au Japon m'a également permis de développer une interface entre le robot humanoïde HOAP3 et les programmes "intelligents" sensés le contrôler. Son originalité inspirée de mes recherches antérieures sur la régulation est le découplage total qu'elle propose entre les sensations et les actions. Les senseurs, capteurs de proprioception et actuateurs calibrés approximativement ne proposent pas forcément des échelles compatibles et souffrent de délais de transmission entraînant des biais dans les valeurs des signaux. L'idée est simplement de considérer l'atteinte d'un état comme une régulation permanente de tous les éléments, permettant un contrôle spatial et temporel de précision variable sur la dynamique du mouvement.
- Outil d'analyse automatique de QCM. Originalement destiné au recueil de données papier en psychologie (sur lequel les psychologues doivent malheureusement passer de trop nombreuses heures), la dernière version en cours de développement utilise une combinaison de divers prédicteurs et régule de manière fractale les paramètres pour localiser et reconnaître au mieux les éléments à analyser.
- Un travail de réflexion et d'expérimentation sur la dynamique de l'écriture manuscrite a été réalisé. Les résultats préliminaires confirment une forme d'isochronie de l'écriture et indiquent que la périodicité n'est pas indépendante de la forme des lettres. Afin d'analyser les traces manuscrites, un logiciel d'analyse hiérarchique de variables temporelles a été développé. Il s'agit en quelque sorte d'une version monodimensionnelle de la libraire de traitements visuels sur GPU présentée dans le chapitre *Parallélisation*.

J'espère que le lecteur aura retiré quelque chose de cette thèse, malgré les difficultés que j'ai pu rencontrer en tentant de décrire des processus dynamiques par des mots statiques. J'ai retrouvé la frustration que j'avais ressentie en lisant mes premiers articles sur les systèmes dynamiques, rencontrant les termes d'attracteurs, de transition de phase, sans pouvoir observer les changements continus qui y étaient associés. Ne pouvant fournir que des clichés des systèmes étudiés à des moments précis ou des traces brouillonnes, j'ai souvent eu l'impression de me noyer dans les explications textuelles. Moyennant un investissement de ma part, le temps me permettra j'espère d'améliorer mes descriptions.

La plupart des phénomènes complexes décrits émergeant d'une structure simple, je n'ai pas non plus toujours su structurer mon argumentation pour faciliter l'assimilation des concepts par le lecteur. Là aussi, je souhaite vivement que le temps qui aura été nécessaire à la lecture de ce manuscrit et les nombreuses répétitions présentes au fil des chapitres auront suscité chez le lecteur un intérêt pour l'étude des systèmes complexes en sciences cognitives.

Le cadre interactiviste, en tant que système dynamique intégré dans le monde de la recherche scientifique, évolue en permanence par son intégration dans des domaines très différents et ses développements internes. La multiplication de travaux scientifiques assimilés à ce cadre lui permettront j'espère de se démocratiser et de devenir un attracteur pour la recherche mondiale. J'espère bien pouvoir y contribuer dans les années à venir vu la quantité de travail immédiatement réalisable et la quantité de perspectives ouvertes. De trop nombreuses théories pourtant passionnantes se sont malheureusement effacées comme de vieux souvenirs sans qu'on ait pu exploiter tout leur potentiel. De même que les processus de mon modèle ont chacun le pouvoir d'influencer localement la dynamique globale de l'agent, je crois que chaque chercheur a le pouvoir d'influencer localement les axes de recherche pour que le cadre interactiviste et le paradigme

de l'énaction soient un jour largement reconnues.

Annexes

A

Oscillateurs couplés et synchronisation

Les versions du TamTam présentées dans le chapitre *Applications et démonstrations* indique qu'une propagation d'activité entre processus similaires peut permettre leur coordination. Mais un tel principe peut-il s'étendre à des comportements complexes impliquant des quantités de processus parallèles et séquentiels ? Pier Giorgio Zanone développait lors d'une conférence de vulgarisation récente [Zanone, 2008] la tendance de très nombreux systèmes couplés à la coordination ou à la synchronisation. On retrouve bien sûr cette tendance dans la nature et autour de nous, qu'il s'agisse des oscillateurs contrôlant la marche du centipède au niveau de chaque anneau, du scintillement dans les colonies de lucioles, des cycles menstruels chez les sportives ou des applaudissements de foule. Afin de tester les limites et conditions de ce phénomène, une application de synchronisation entre des oscillateurs couplés a été développée.

A.1 Expérience originale et littérature

Celle-ci s'inspire de l'observation faite par Christiaan Huygens en février 1665, regardant deux horloges à balancier (qu'il venait d'ailleurs d'inventer) accrochées au mur de sa chambre alors qu'il était alité. Les deux horloges étaient en parfaite synchronie. Il perturba leur mouvement, mais celles-ci se synchronisaient à nouveau en quelques minutes. C'est uniquement en les séparant que la synchronie fut définitivement perdue, chacune regagnant sa fréquence propre.

La figure A.1 présente une capture d'écran de l'application originale développée par Jean-Christophe Buisson, ou l'on considère l'interaction de nombreuses horloges au lieu de se limiter à deux. A chaque fois qu'un pendule atteint une position extrême de son mouvement, un léger choc est propagé à travers le support jusqu'à l'axe des autres pendules, perturbant leur mouvement et ralentissant leur course. La caractéristique essentielle de cette perturbation est qu'elle est d'autant plus forte que le pendule qui reçoit le choc est loin d'une position extrême. Lors de la simulation du système, les pendules se synchronisent rapidement et finissent tous en phase ou antiphase.

Afin de tester divers paramètres de couplage, une plateforme de suivi de la synchronisation a été développée durant cette thèse. Le modèle gérant l'évolution de chaque processus est quant à lui simplifié, s'inspirant des travaux de Strogatz décrits dans [Mirollo and Strogatz, 1990; Strogatz and Stewart, 1993]. Chaque oscillateur est modélisé par un accumulateur qui décharge

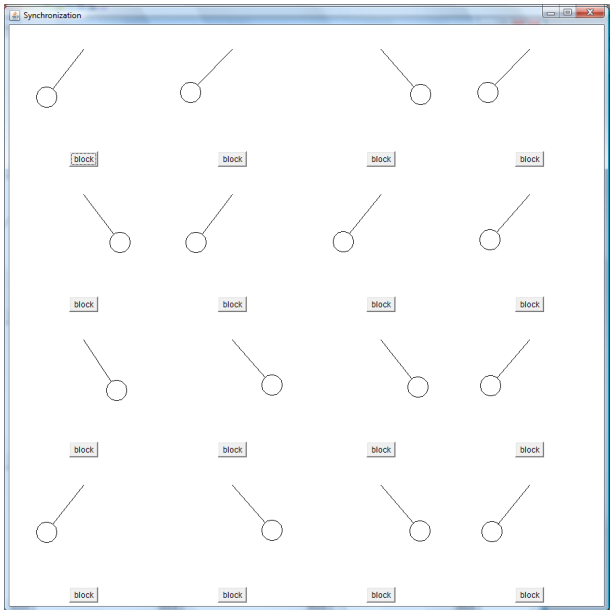


FIGURE A.1 – Capture d'écran du programme original de synchronisation d'horloges. Les chocs sont transmis de manière quasi-instantanée à travers le support et conduisent à la synchronisation en phase ou antiphase de tous les processus.

au delà d'un certain seuil, le couplage entre les oscillateurs se fait par impulsion, lors de la décharge. Ce type d'oscillateurs se retrouve chez les lucioles ou dans les pacemakers (aussi bien musculaires que neuronaux). Dans de tels systèmes, les processus oscillatoires finissent par tous adopter la même fréquence et la même phase. Pour faire le lien avec le cas des horloges, les allers et retours du balancier sont deux mouvements parfaitement symétriques. Cette symétrie implique une indifférenciation au niveau du couplage, ce qui explique la présence de deux attracteurs au lieu d'un, en phase et antiphase.

La majorité des travaux scientifiques traitant du sujet se sont attaqués à la formalisation mathématique de ces phénomènes. En considérant des systèmes constitués de 2, 3 ou 4 oscillateurs couplés, ils ont pu montrer l'existence de plusieurs cycles limites. Pour 2 oscillateurs identiques, il existe par exemple une valeur critique du déphasage pour laquelle le système ne converge pas vers la synchronie. Néanmoins, dans les systèmes biologiques qui nous intéressent dans cette thèse, les oscillateurs ne sont jamais identiques et la moindre perturbation empêche de rester sur un cycle limite instable.

Ici, on souhaite simplement tester empiriquement les conditions pour lesquelles un grand nombre d'oscillateurs se synchronisent. Quelle doit être la vitesse de transmission des signaux de couplage, celui-ci doit-il être symétrique et uniforme entre les processus ? La topologie du réseau des oscillateurs a-t-elle une influence forte sur la synchronisation ? Pour une implémentation informatique (un même calcul conduisant toujours au même résultat), il est également bon de savoir si une trop grande homogénéité des processus peut poser problème.

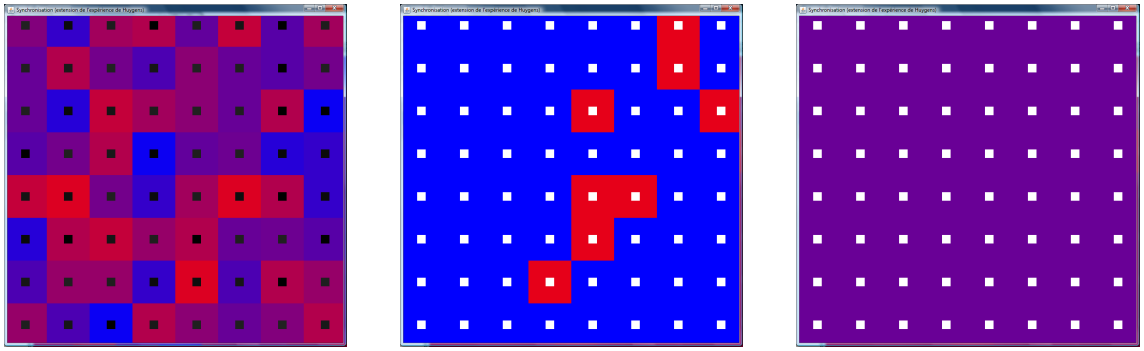
A.2 Simulation et résultats empiriques

Chaque oscillateur est modélisé par une variable $x \in [0;1]$. Celle-ci croît en permanence et retombe à 0 dès que $x > 1$. Son évolution est régie par l'équation suivante :

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \tag{A.1}$$

où f est une fonction positive et concave. Mirollo et Strogatz utilisent dans leur article la fonction introduite avant eux par Peskin, qui modélisait l'accumulateur par un système électronique composé d'un condensateur et d'une résistance en parallèle, soit $f(x) = S_0 - \gamma x$ ou γ est un paramètre positif de dissipation. N'étant pas contraints pas un modèle mathématique donné ou la plausibilité biologique de la fonction f, on a pu tester de nombreuses autres fonctions et obtenir le même type de synchronisation.

Lorsqu'un accumulateur décharge (c'est-à-dire lorsque $x > 1$), un signal est propagé instantanément aux autres oscillateurs. Ce signal provoque un incrément brutal de la variable x de l'accumulateur "récepteur". Bien sûr, celui-ci peut potentiellement entraîner une nouvelle décharge, propagée à son tour. Comme précédemment, la synchronisation s'opère (voir figure A.2).



(a) Etat chaotique initial (b) Synchronisation mixte (c) Synchronisation pure

FIGURE A.2 – Pour intuitivement observer la synchronie, chaque accumulateur est représenté par un carré coloré. La couleur correspond à la valeur de la variable x codant la phase. Un champ coloré uniforme équivaut à la synchronie. (a) État initial du système, avec une valeur aléatoire de la variable x pour chaque oscillateur. (b) Momentanément, 2 groupes d'oscillateurs adoptant 2 phases différentes peuvent se maintenir. Plus le nombre d'oscillateur est grand, moins cet état est stable. (c) Les oscillateurs finissent tôt ou tard par tous se synchroniser.

Relativement au nombre d'oscillateurs N, on peut synthétiser les résultats empiriques de simulation par les observations suivantes :

- La vitesse de convergence [62] est variable et non directement corrélée à N.
- Plus N est grand, plus la probabilité que plusieurs phases coexistent augmente.
- Cette coexistence est néanmoins d'autant plus courte que N est grand.
- Plus N est grand, plus la synchronie est stable.

62. Le système est considéré comme synchrone lorsque l'ensemble des accumulateurs pulsent avec une différence temporelle maximale d'un vingtième de période.

Cette dernière propriété nous intéresse particulièrement si l'on souhaite voir émerger des comportements coordonnés au sein d'une population immense de schémas sensori-moteurs concurrents (ou plus précisément d'anticipations si on considère le modèle développé dans ce manuscrit). En revanche, les oscillateurs sont ici tous identiques et la synchronie résultante les fait tous intervenir. De plus, ce modèle ne permet pas de voir émerger des formes plus complexes de coordination permettant un séquencement temporel des comportements.

A.3 Mathématiques sous-jacentes

Avant d'introduire des dissymétries dans le système et ajouter des paramètres supplémentaires, il est bon de comprendre comment cette synchronisation peut s'opérer. Quoique le système puisse paraître particulièrement simple, la formalisation mathématique d'un tel problème est loin d'être triviale. Intuitivement pour les horloges, un choc transmis a un effet d'autant plus grand que le pendule qui reçoit le choc se déplace à grande vitesse, donc d'autant plus qu'il se trouve loin des positions extrêmes. En résumé, plus les chocs sont temporellement proches, moins l'effet mutuel sera grand. Ce qui conduit à une convergence et une mise en phase progressive des cycles. Pour les accumulateurs, il en va à peu près de même, et les détails mathématiques sont présentés dans [Mirollo and Strogatz, 1990].

Au niveau de la stabilité, on peut reprendre la métaphore fournie par Brian Greene [Greene, 2000] : si une vague commence à se former à contre courant dans l'océan, celle-ci subit l'influence de toutes les autres et se plie à la direction proposée par le plus grand nombre. Dans notre cas et une fois la synchronie atteinte, un processus déphasé sera le seul à envoyer un signal asynchrone, ne perturbant que très légèrement la moyenne des phases. Au contraire, celui-ci recevra les signaux synchrones des $N-1$ autres oscillateurs, le ramenant aussitôt vers la phase moyenne (figure A.3). Cet effet est d'autant plus fort que N est grand :

$$\lim_{N\to\infty} \frac{1}{N}(\phi + (N-1)\overline{\phi}) = \overline{\phi} \tag{A.2}$$

où ϕ est la phase de l'oscillateur déphasé et $\overline{\phi}$ la phase moyenne adoptée par les oscillateurs synchronisés.

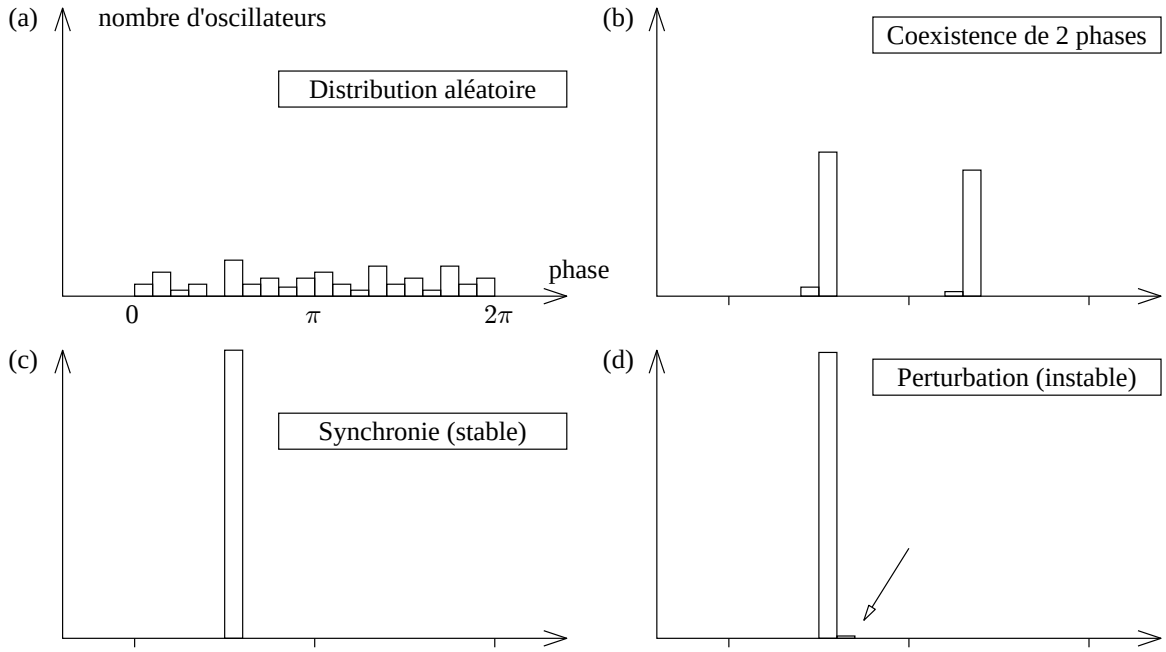


FIGURE A.3 – Exemple de l'évolution de la distribution des phases durant la simulation. (a) (b), (c) et (d) se succèdent. On remarque qu'en (c), tous les phases sont réunies dans un même $1/20^{\text{ème}}$ de période discrétisée, ce qui permet de juger de la synchronie, même imparfaite. La distribution (d) n'apparaît qu'un bref instant, après quoi le système retourne à la distribution (c).

A.4 Paramètres et dynamiques émergentes

Les paramètres supplémentaires ont été empiriquement testés au niveau des oscillateurs sont les suivants :

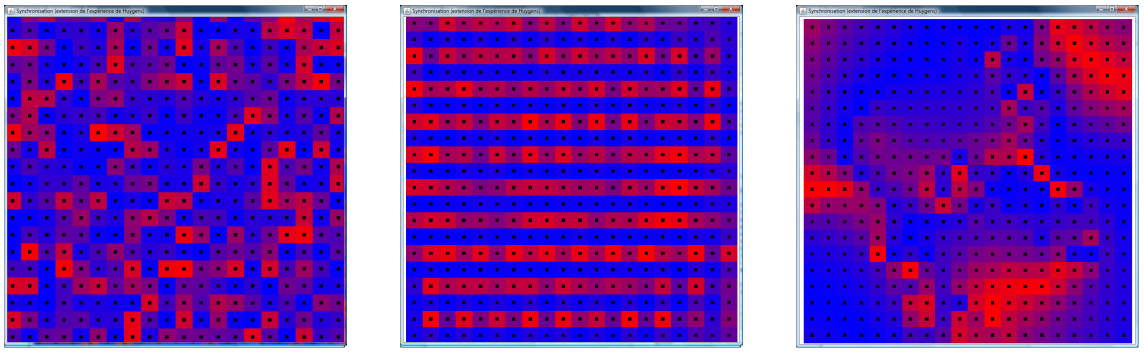
- x, y : Coordonnées de l'oscillateur dans un espace bidimensionnel afin de tester l'influence de la topologie.
- $t_1 ... t_m$: Types de signaux émis, afin de faire limiter la "communication" à un sous-ensemble d'oscillateurs et ainsi définir des classes. On peut ainsi facilement produire des hiérarchies d'oscillateurs.
- a : Amplitude du signal émis. Plus il est fort, plus son influence sera grande sur les autres oscillateurs.

Ces paramètres, dont l'effet est difficilement synthétisable textuellement, laissent imaginer l'étendue des dynamiques envisageables. Ils permettent en particulier de maîtriser la coordination locale et de contrôler partiellement les dynamiques émergentes.

Pour que la topologie des oscillateurs ait une influence réelle, la propagation des signaux ne doit plus être instantanée. Lesdits signaux deviennent ici des processus à part entière, caractérisés par les attributs suivants :

- x, y : Source du signal (en général les coordonnées d'un oscillateur).
- v : Vitesse de propagation du signal.
- a : Amplitude du signal émis. Plus il est fort, plus son influence sera grande sur les autres

oscillateurs.
L'atténuation ne perturbe pas la synchronisation si elle reste raisonnable, c'est-à-dire si le signal ne disparaît pas avant d'atteindre les oscillateurs proches. De même, on avait précédemment une vitesse de propagation infinie ($v = \infty$), mais toute vitesse telle que $v \gg \min_{o,o'} \|o' - o\|$ où o et o' sont deux oscillateurs quelconques convient aussi. Dans le cas contraire, on n'a plus réellement de synchronisation mais des coordinations locales. Celles-ci conduisent à des motifs oscillatoires complexes et des formes d'auto-organisation dynamique (figure A.4).



(a) Chaos (v=1) (b) Alternance (v=5) (c) Vagues (v=10)

FIGURE A.4 – Selon la valeur du paramètre v, sans même changer l'atténuation des signaux, la topologie des oscillateurs ou introduire de classes, on obtient des dynamiques oscillatoires très variées. (a) Si la vitesse de propagation des signaux est trop faible, les signaux propagés sont décorrélés de la phase : le couplage n'est plus suffisant et une dynamique chaotique apparaît. (b) Avec une vitesse supérieure, des dynamiques anisotropes apparaissent (ici des alternances de phase). (c) Avec une vitesse encore supérieure, les coordinations touchent des ensembles dynamiques d'oscillateurs, des vagues et autres motifs complexes apparaissent. On assiste à l'émergence d'oscillations à grande échelle.

B

Surfaces d'interpolation

B.1 Approximation d'une fonction

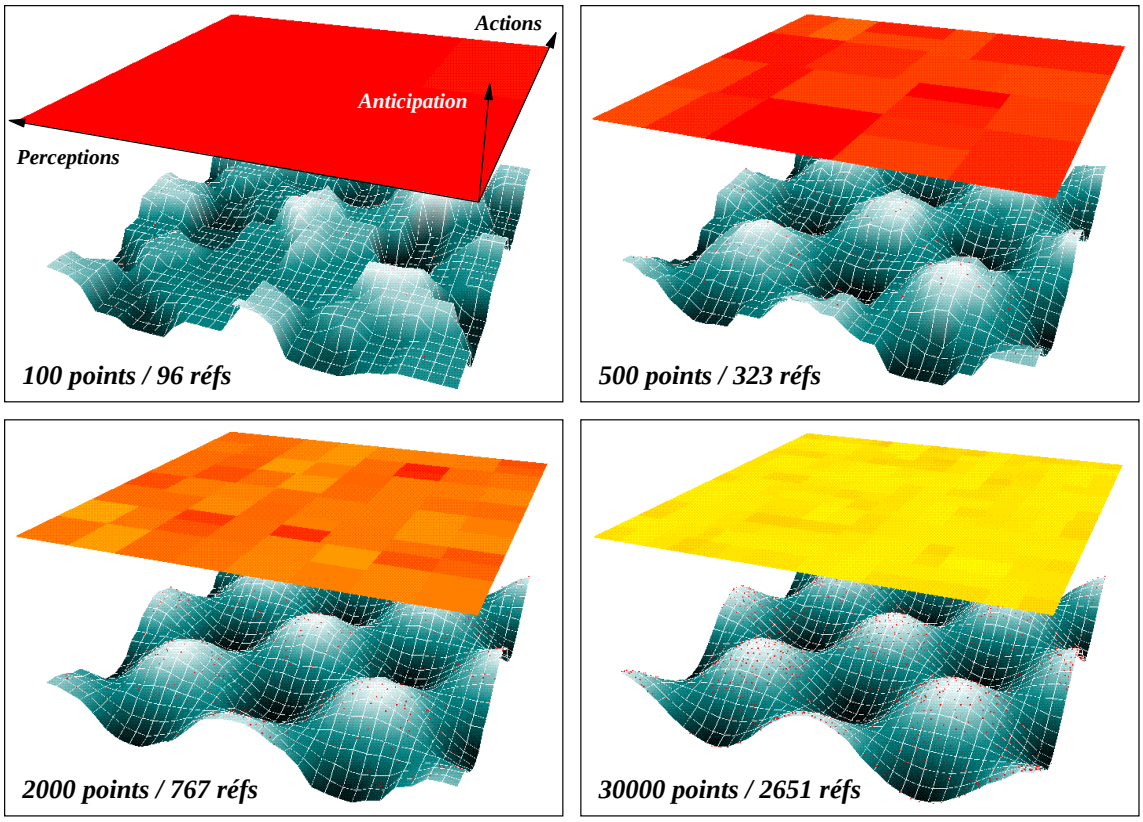


FIGURE B.1 – Surface interpolée pour un nombre croissant de points (*bleu-blanc*) et confiance dans l'estimation de la fonction (*rouge-jaune*). Le pourcentage de points de référence (*points rouges*) utilisés pour définir la surface diminue lorsque le nombre de points testés augmente. En effet, à chaque ajout d'un point de référence, meilleure est l'approximation locale de la fonction et plus faible est la probabilité d'avoir besoin de nouveaux points. La fonction considérée est ici $cos(x)sin(y)$, et le nombre de points requis dans le domaine représenté converge aux alentours de 2700. Les axes n'ont ici pas de réalité mais permette de replace l'utilisation de cette courbe dans son contexte : l'anticipation de la dynamique.

B.2 Découverte de la dynamique

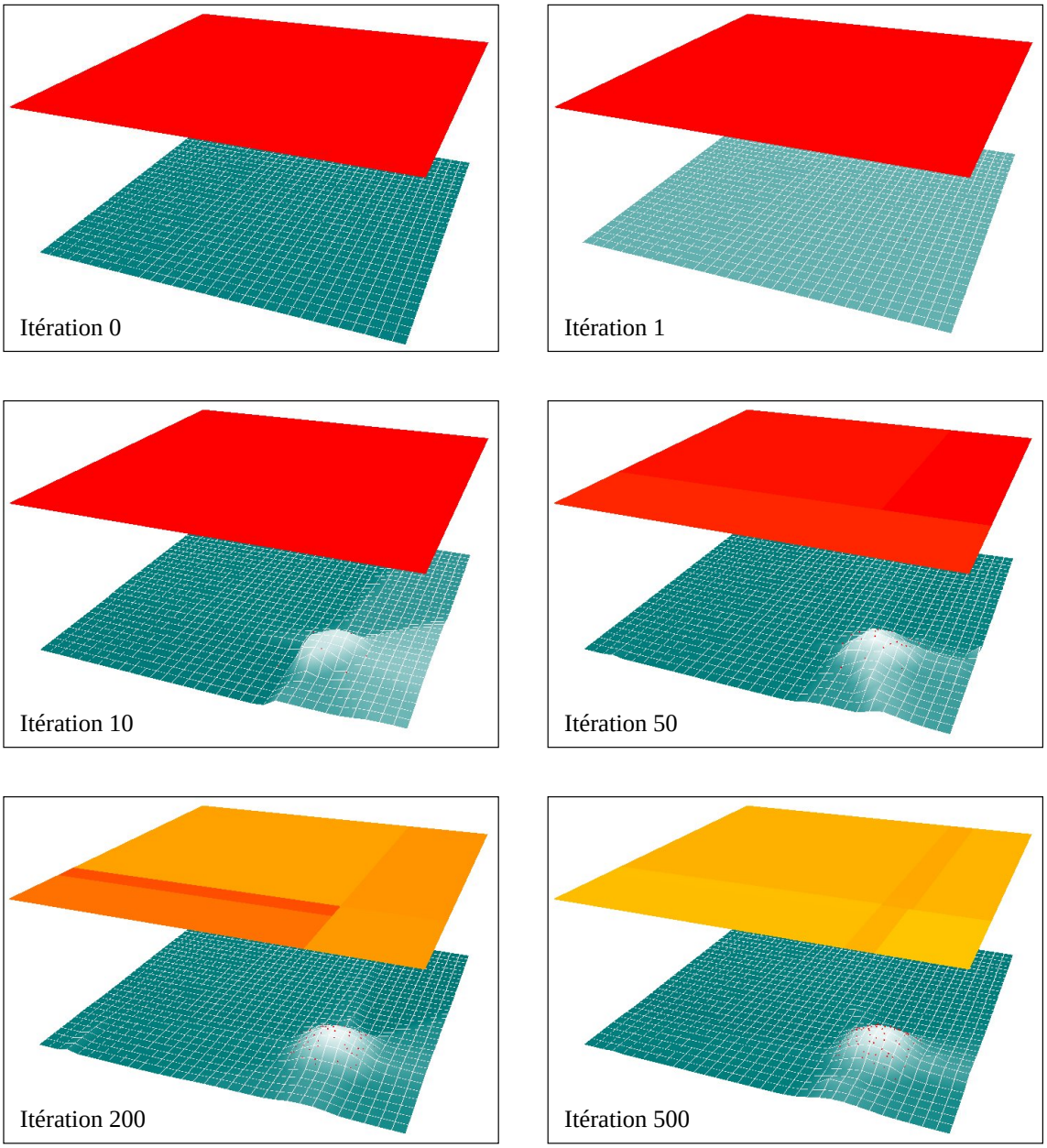


FIGURE B.2 – A chaque cycle de la boucle sensori-motrice, l'agent révise ses anticipations et modifie la surface si nécessaire. Sur ces captures de la dynamique de l'agent, on observe l'évolution de la courbe depuis l'initialisation du programme jusqu'au $500^{\text{ème}}$ cycle. Alors que la surface tout comme la mesure de confiance sont au départ uniformément nulles, l'exploration locale de la dynamique permet d'augmenter la confiance (*rouge→jaune*) et mieux maîtriser la dynamique locale (affinement de la surface *bleue*).

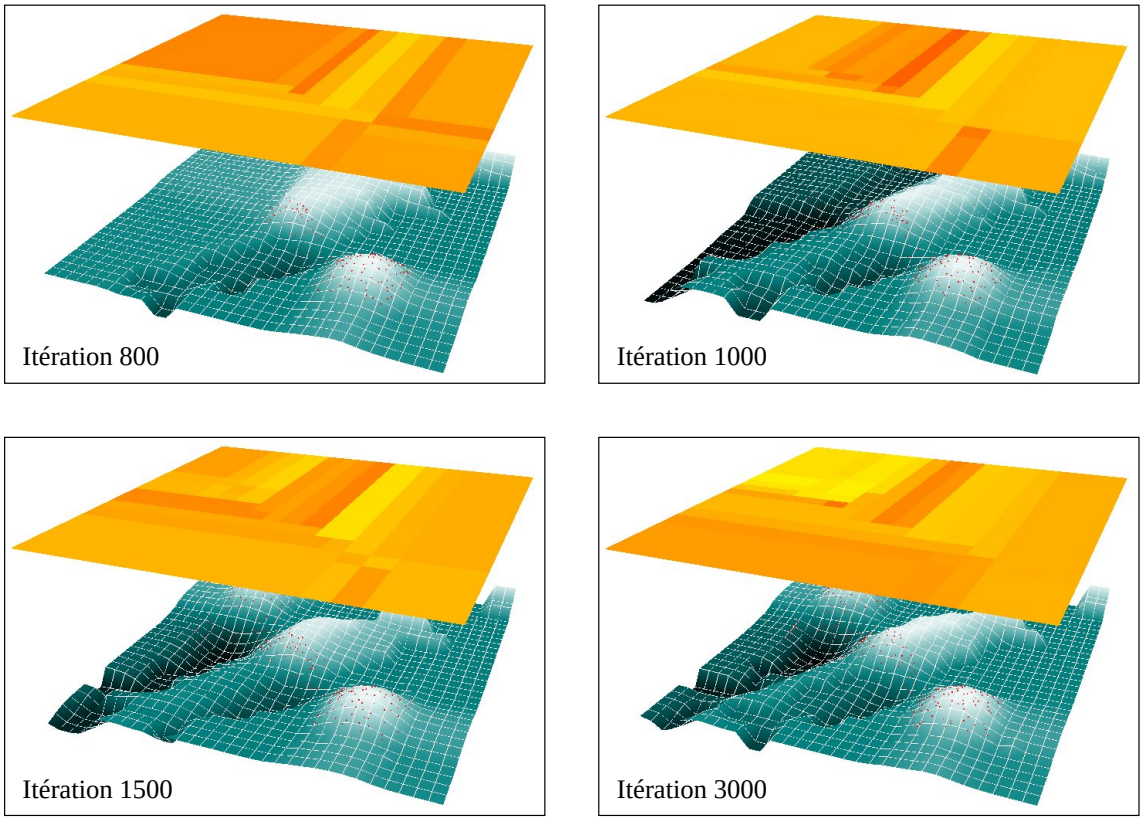


FIGURE B.3 – Ces captures font suite à celles de la figure B.2. Si une action ou l'évolution spontanée de la dynamique conduisent l'agent dans une autre partie de l'espace d'interaction, celui-ci doit à nouveau réviser ses connaissances. La confiance jusqu'à lors généralisée à tout l'espace chute puisque les anticipations ne sont plus vérifiées. Le processus d'apprentissage "reprend" alors localement et permet une amélioration continue des anticipations.

C

Dynamique d'attracteurs et d'activité

C.1 Cycle stable avec alternance

La figure C.1 illustre la dynamique de l'agent dans l'application de navigation 2D alors qu'il se déplace entre deux attracteurs notés *(a)* et *b*. Alors que le pouvoir attracteur de *(a)* reste constant, celui de *(b)* varie selon la position de l'agent. Il décroît en effet lorsque le besoin associé est satisfait, c'est-à-dire lorsque l'agent passe à proximité. Lorsque l'attraction vers *(b)* est la plus forte, l'agent rejoint le rejoint le plus vite possible. Il doit néanmoins respecter pour cela la dynamique induite par ses anticipations, suivant ainsi une des boucles jusqu'au centre avant de pouvoir continuer sur celle menant à *(b)*. L'agent est contraint de suivre les trajectoires définies par ses anticipations, même si la diffusion d'activité lui autorise des régulations locales (écart de la trajectoire).

En plus de la trajectoire de l'agent et de la dynamique des attracteurs, la figure montre l'évolution de l'activité pour un sous-ensemble d'anticipations pour chacune des deux couches

C.1.1 Couche de navigation

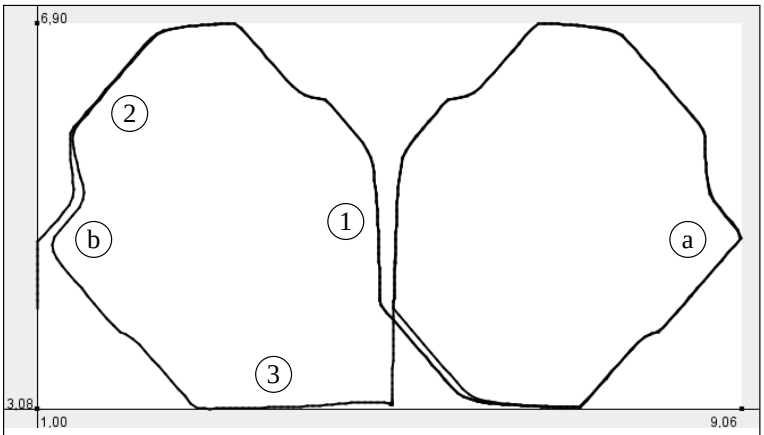
Les trois anticipations choisies participent au trajet sur la boucle de gauche. On remarque leur activité oscillatoire avec une fréquence élevée (régulations) et leur séquencement avec une fréquence plus faible mais une amplitude plus grande (anticipations successivement satisfaites). L'effet du pouvoir attracteur de *(b)* en termes d'activité est particulièrement visible sur l'anticipation *(2)* (la plus proche de l'attracteur). Alors que l'anticipation *(1)* est active à chaque passage à l'intersection des boucles, *(3)* n'est que très faiblement activée et ne prend de l'importance qu'au passage dans la boucle gauche (partie droite du graphe).

C.1.2 Couche motrice

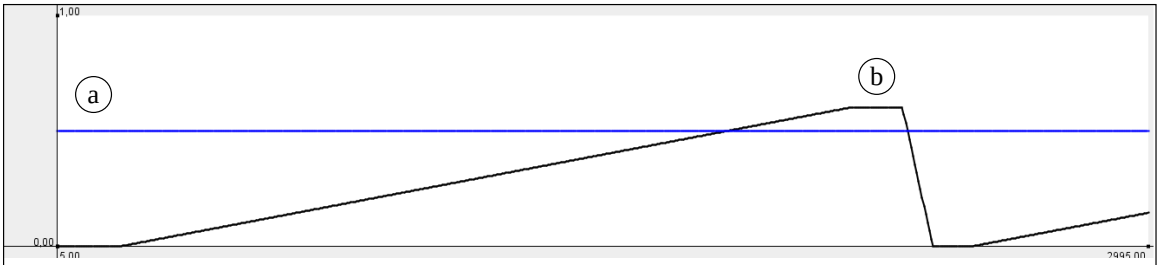
Les quatre anticipations représentées reflètent le comportement sensori-moteur permettant de se déplacer vers la droite. On peut donc suivre sur le graphe l'évolution en x de l'agent :

- Le passage de la boucle gauche à la boucle droite ($x = 1 \rightarrow 9$)
- Le retour dans la boucle droite (celui-ci s'effectuant vers la gauche, les anticipations sont peu actives)
- Le deuxième passage dans la boucle droite ($x = 5 \rightarrow 9$)

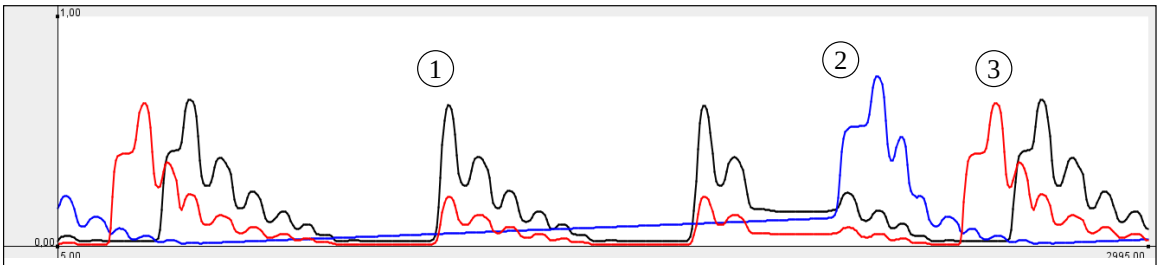
- Le deuxième retour
- Le changement de phase avec poursuite sur la boucle gauche (les anticipations à droite sont toujours faiblement actives)
- Le passage à nouveau de la boucle gauche à celle de droite avec satisfaction du besoin au niveau de l'attracteur *(b)*



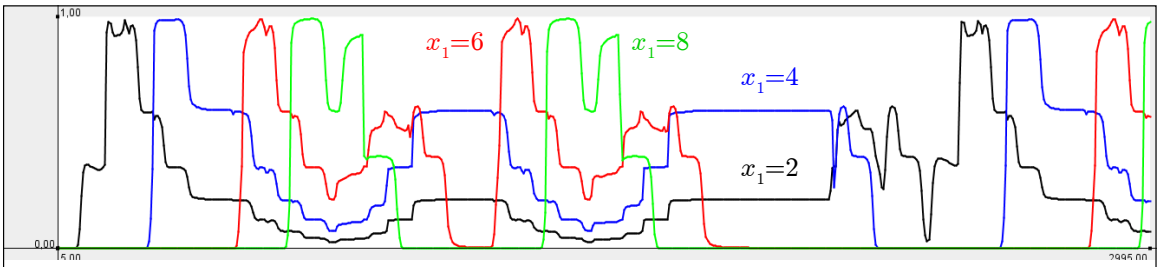
Trajectoire de l'agent dans l'espace 2D



Niveau d'activité des deux modulations



Niveau d'activité d'anticipations de la couche de navigation (numérotées sur la trajectoire)



Niveau d'activite d'anticipations de la couche motrice $(x_1,\Delta x_1) \rightarrow (x_2,\Delta x_2)$, $(\Delta x_1 > 0)$

FIGURE C.1 – Cycle stable avec alternance

C.2 Cycle stable sans alternance

On observe un comportement très différent sur la figure C.2. Bien que *(a)* ait momentanément un pouvoir supérieur à *(b)*, cela ne dure pas suffisamment longtemps pour le comportement de l'agent soit influencé. En effet, *(b)* redevient prédominant avant que le changement de boucle ait l'occasion de se faire. Avec un simple changement sur la dynamique des modulations, on obtient une trajectoire sur une seule des deux boucles.

C.2.1 Couche de navigation

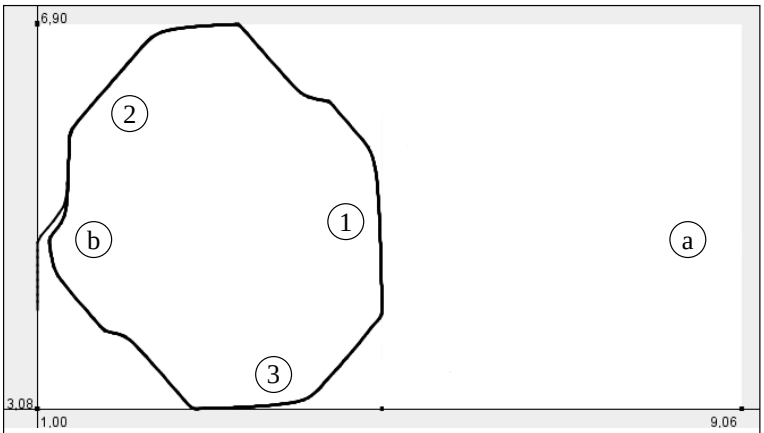
On remarque essentiellement que la dynamique de l'activité de chaque anticipation admet une période plus courte, à l'exception de l'anticipation *(1)* qui est systématiquement activée à chaque cycle, quelle que soit la dynamique globale.

C.2.2 Couche motrice

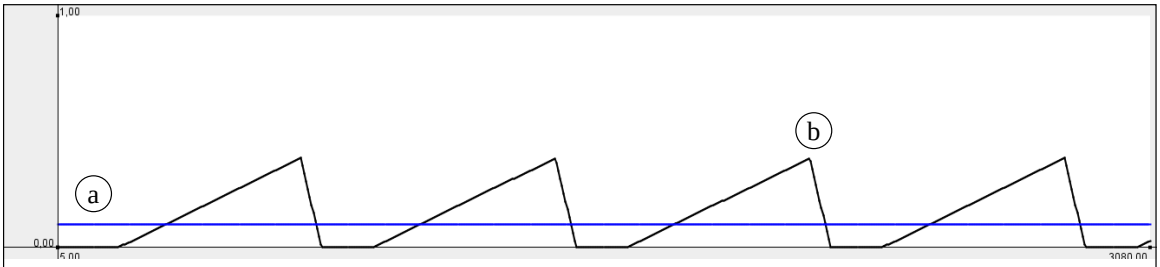
Sur la couche motrice en revanche, on peut noter que les anticipations liées à la boucle droite ne sont désormais plus actives ($x > 5$), car adaptées à d'autres classes de dynamiques. En effet, on se limite ici à la dynamique d'un système figé, mais le modèle autorise des changements à tous les niveaux :

- Connaissances internes de l'agent : il découvre par exemple un autre moyen d'atteindre *(a)* plus rapidement.
- Capacités de l'agent : quand on pense à un organisme vivant, celui-ci se développe et ses capacités motrices changent. Il peut par exemple aller plus vite, ou passer des obstacles jusque là infranchissables.
- Environnement : un changement dans la position des sources ou de leur dynamique, l'apparition de nouvelles voies explorables.

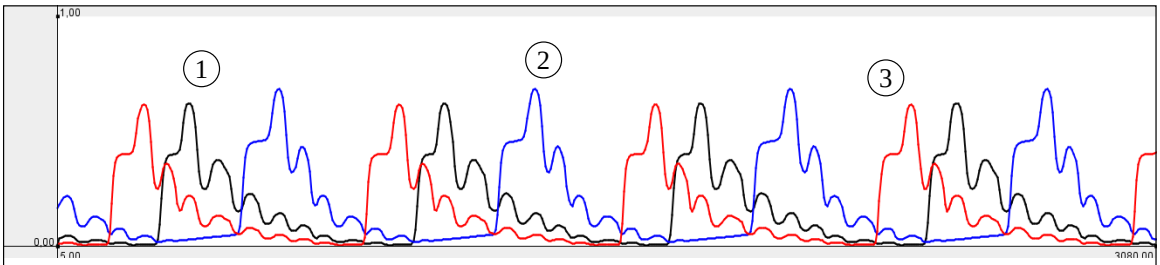
Dans tous les cas, des anticipations (de navigation ou motrices) en sont affectées et le nouveau paysage dynamique peut permettre l'alternance entre les deux attracteurs.



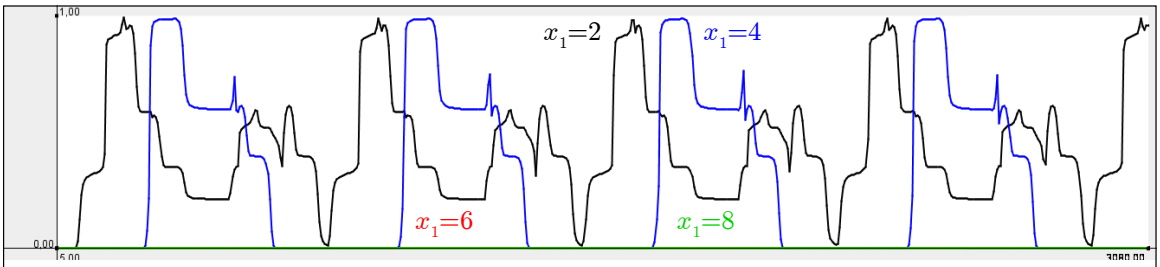
Trajectoire de l'agent dans l'espace 2D



Niveau d'activité des deux modulations



Niveau d'activité d'anticipations de la couche de navigation (numérotées sur la trajectoire)



Niveau d'activite d'anticipations de la couche motrice $(x_1,\Delta x_1) \rightarrow (x_2,\Delta x_2)$, $(\Delta x_1 > 0)$

FIGURE C.2 – Cycle stable sans alternance

D

Code Java et JOGL de parallélisation sur GPU

Cette annexe reprend des extraits de code qui permettent d'approfondir les développements du chapitre *Parallélisation*. Pour simplifier le code présenté ici, l'ordonnancement des processus est fait manuellement sans passer par le graphe PERT. Pour les mêmes raisons, les interfaces graphiques permettant d'ajouter, retirer ou modifier les effets sont absentes. Des fonctions supplémentaires sont nécessaires à l'acquisition des images sources ou à l'utilisation des textures produites mais celles-ci sont indépendantes de la parallélisation des calculs sur le GPU et ne sont donc pas présentes dans ces segments de code.

Le code source de chaque effet est généré par les fonctions ci-dessous. Des paramètres sont disponibles pour certains processus, tel que la distance d'intégration pour l'effet de flou (*Blur*). Ces exemples n'utilisent pas les "variables uniformes" gérés sur la carte graphique par les programmes shaders, permettant une interaction avec le programme durant l'exécution sans toucher au code source. Malgré tout, la génération souple du code et sa compilation sur la carte graphique permettent de modifier intégralement la séquence des instructions et ainsi tester des variations plus importantes. La modélisation des transformations rétiniennes et corticales est simpliste comparée aux processus biologiques originaux, mais suffisent à illustrer les capacités de la librairie. Les effets ne prennent par exemple pas en compte l'intégration sur une fenêtre temporelle des signaux nerveux au niveau de chaque neurone, bien que ce comportement soit reproductible au moyen des tampons cycliques.

```
public String sourceRetinaBlur(float dist, int radius) {
   String s =
   "uniform sampler2D tex0;\n" +
   "void main(void) {\n" +
   "    vec2 texCoord = gl_TexCoord[0].xy;\n" +
   "    const vec2 center = vec2(0.5,0.5);\n" +
   "    float dist = length(texCoord-center);\n" +
   "    const float offset = 1.0 / 512.0;\n" +
   "    vec4 color = texture2D(tex0, texCoord);\n" +
   "    if (dist>" + dist + ") {\n";
   for (int i=-1; i<=1; i++) {
      for (int j=-1; j<=1; j++) {
```

```
            if (i!=0 || j!=0)
                s +=
                "       color += texture2D(tex0, " +
                "texCoord + vec2(" + radius*i +
                ".* offset , " + radius*j + ".* offset ));\n";
        }
    }
    return s +
    "    color /= 9.;\n" +
    "    }\n" +
    "    gl_FragColor = color;\n" +
    "}";
}
```

Listing D.1 – Code Java produisant le code shader pour l'effet de flou

```
public String sourceMT(int dx, int dy) {
    return
    "uniform sampler2D tex0, tex1;\n" +
    "void main(void) {\n" +
    "    const float offset = 1.0 / 512.0;\n" +
    "    vec2 texCoords = gl_TexCoord[0].st;\n" +
    "    vec4 a = texture2D(tex0, texCoords);\n" +
    "    vec4 b = texture2D(tex1, texCoords + vec2(" +
        (float)dx + "*offset , " + (float)dy +
        "* offset ));\n" +
    "    if (length(a)>0.1 && length(b)>0.1)\n" +
    "    gl_FragColor = vec4(1.0-10.0*clamp(
        length(a-b),0.0,0.1));\n" +
    "    else\n" +
    "    gl_FragColor = vec4(0.0);\n" +
    "}";
}
```

Listing D.2 – Code Java produisant le code shader pour les cellules MT sous forme de chaîne de caractères

Le code Java suivant définit de nouveaux effets en appelant les fonctions introduites ci-dessus. L'utilisateur fournit le code shader sous forme de chaîne (il peut s'agir d'un fichier), qu'il peut manipuler comme une boîte noire développée par un programmeur expert. La mise à jour successive des effets suivant un ordre correct (ici par index ascendant dans la liste des effets), permet l'application de tous les effets pour chaque nouvelle image d'entrée.

```
int [][] speed = new int[][]{
    { 2, 2},{-2, 0},{ 2, 0},{ 0,-2},
    { 0, 2},{-1, 0},{ 1, 1},{ 0, 1}
};
float [] blur = new float[]{0.1f, 0.2f, 0.3f};
```

```
Effect.setGL(gl);
effects = new Effect[2+blur.length+speed.length];

effects[0] = new Effect(1,width, height);
effects[0].setName("Input");
int off = 1;
for (int i=0; i<blur.length ; i++) {
    int index = off+i;
    effects[index] = new Effect(1,width, height);
    effects[index].setName("Retina blur " + index);
    source = sourceRetinaBlur(blur[i], i+1);
    effects[index].setShader(source);
    effects[index].setTextures(new Effect[]{
        effects[index-1]},new int[]{0});
}
off += blur.length;
effects[off] = new Effect(2,width, height);
effects[off].setName("On-off cells");
source = sourceOnOff();
effects[off].setShader(source);
effects[off].setTextures(new Effect[]{
    effects[off-1]},new int[]{0});
off++;
for (int i=0; i<speed.length; i++) {
    int index = off+i;
    effects[index] = new Effect(1,width, height);
    effects[index].setName("MT cells");
    source = sourceMT(speed[i][0],speed[i][1]);
    effects[index].setShader(source);
    effects[index].setTextures(new Effect[]{
        effects[off-1], effects[off-1]},new int[]{0,-1});
}
```

Listing D.3 – Code principal de configuration des effets

Les codes ci-dessus sont les seuls accessibles et nécessaires à l'utilisateur pour utiliser la librairie, générer de nouveaux effets et les combiner. Les détails d'implémentation de la classe *Effect* sont tout de même fournis ci-dessus, même si toutes les fonctions utilitaires de cette classe ne sont pas reproduites. Les variables de cette classe et les appels OpenGL qu'elle effectue permettent de charger, compiler et exécuter le programme shader associé sur la carte, mais aussi d'autoriser un accès facile aux textures de sortie stockées dans le tampon cyclique.

```
/** Input textures (can be null) */
Effect[] in_texs; // source effects
int[] in_times; // relative time to processed "frame" (0,-1,...)

/** Output texture */
int[] out_texs; // array of generated texture (length = time window)
```

```
int out_current = 0; // current time index
int width, height; // dimensions of the output texture

/** Shader to apply */
int shader = -1;

/** Constructor */
public Effect(int time_window, int width_, int height_) {
    width = width_;
    height = height_;
    // Generate the new textures (for output)
    out_texs = new int[time_window];
    gl.glGenTextures(time_window,out_texs,0);
    for (int o : out_texs) {
        gl.glBindTexture(GL.GL_TEXTURE_2D,o);
        gl.glTexParameteri(GL.GL_TEXTURE_2D,
            GL.GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL.GL_NEAREST);
        gl.glTexParameteri(GL.GL_TEXTURE_2D,
            GL.GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL.GL_NEAREST);
        gl.glTexParameteri(GL.GL_TEXTURE_2D,
            GL.GL_TEXTURE_WRAP_S, GL.GL_CLAMP);
        gl.glTexParameteri(GL.GL_TEXTURE_2D,
            GL.GL_TEXTURE_WRAP_T, GL.GL_CLAMP);
        gl.glTexImage2D(GL.GL_TEXTURE_2D, 0, GL.GL_RGBA8,
            width, height, 0, GL.GL_RGB, GL.GL_FLOAT, null);
    }
}

/** Set the associated shader program */
public void setShader(String source) {
    shader = gl.glCreateProgramObjectARB();
    // Create the fragment program (through the pixel pipeline)
    int fshader = gl.glCreateShaderObjectARB(GL.GL_FRAGMENT_SHADER_ARB);
    gl.glShaderSourceARB(fshader,1,new String[]{source},null,0);
    gl.glCompileShaderARB(fshader);
    int [] compiled = new int[1];
    gl.glGetObjectParameterivARB(fshader,
        GL.GL_OBJECT_COMPILE_STATUS_ARB, compiled, 0);
    if(compiled[0]==GL.GL_FALSE) {
        System.out.println("Shader '"+ name + "' could not be compiled\n");
        int [] length = new int[1];
        gl.glGetObjectParameterivARB(fshader,
            GL.GL_OBJECT_INFO_LOG_LENGTH_ARB, length, 0);
        if (length[0]>1) {
            byte[] info_log = new byte[length[0]];
            int [] info_length = new int[1];
            gl.glGetInfoLogARB(fshader, length[0], info_length, 0, info_log, 0);
            System.out.println("GLSL Validation >> " + new String(info_log));
```

```
        }
        // No shader active
        shader = -1;
    } else {
        gl.glAttachObjectARB(shader,fshader);
            // Link the shader
            gl.glLinkProgramARB(shader);
            int [] progLinkSuccess = new int[1];
            gl.glGetObjectParameterivARB(shader,
        GL.GL_OBJECT_LINK_STATUS_ARB,progLinkSuccess,0);
        if (progLinkSuccess[0]==GL.GL_FALSE) {
            System.out.println("Shader '"+ name + "' could not be linked\n");
            // No shader active
            shader = -1;
        }
    }
}

/** Switch the texture to next time */
public void switchTexture() {
    out_current = (out_current+1)%out_texs.length;
}

/** Execute the texture process on the JOGL interface given*/
public void execute() {
    // Switch current texture to T+1
    switchTexture();
    // Execute the shader
    if (shader!=-1 && in_texs!=null) {
        // Activate the shader
        gl.glUseProgramObjectARB(shader);
        // Link variable to program entries + entries to textures
        boolean error = false;
        for (int i=0; i<in_texs.length; i++) {
            // Obtain access to the sampler (uniform variable)
            int shader_in_tex = gl.glGetUniformLocationARB(shader, "tex" + i);
            if (shader_in_tex==-1) {
                System.out.println("Can not get the parameter : tex" + i + "\n");
                error = true;
            } else {
                // Bind input texture
                gl.glActiveTexture(GL.GL_TEXTURE0+1+i);
                gl.glBindTexture(GL.GL_TEXTURE_2D,
                    in_texs[i].getTexture(in_times[i])); // texture -> input
                gl.glUniform1iARB(shader_in_tex,1+i); // input -> variable
            }
        }
        if (!error) {
```

```
            // Execute it on the "screen quad"
            gl.glBegin(GL.GL_QUADS);
            gl.glTexCoord2f(0, 0); gl.glVertex3f(−1, −1, −0.5f);
            gl.glTexCoord2f(1, 0); gl.glVertex3f( 1, −1, −0.5f);
            gl.glTexCoord2f(1, 1); gl.glVertex3f( 1,  1, −0.5f);
            gl.glTexCoord2f(0, 1); gl.glVertex3f(−1,  1, −0.5f);
            gl.glEnd();
        }
        // Disable the shader
        gl.glUseProgramObjectARB(0);
    }
    // Copy the generated frame buffer into the "current time" output texture
    gl.glActiveTexture(GL.GL_TEXTURE0);
    gl.glBindTexture(GL.GL_TEXTURE_2D, getTexture(0));
    gl.glCopyTexSubImage2D(GL.GL_TEXTURE_2D,0, 0, 0, 0, 0,width,height);
}
```

Listing D.4 – Fragments du code de la classe *Effect* gérant le programme shader et les textures produites par un effet

E

Organisation du travail durant la thèse

Le tableau E.1 synthétise le travail réalisé durant cette thèse en se basant sur un planning journalier tenu durant ces trois dernières années. Chaque colonne correspond à un thème (Rédaction d'articles/thèse/rapports, Lecture d'articles/documents, Participation ou assistance à des séminaires/conférences/workshops...) et chaque ligne à un mois représenté par son initiale (de septembre 2005 à septembre 2008). Lorsque le nombre d'heure passé sur un thème un mois donné est significatif (>10), la case est colorée en jaune, afin de mettre en relief le séquencement des activités. En fin de lignes et colonnes sont respectivement reportés les totaux des thèmes et mois. La case isolée en bas à droite correspond enfin au nombre d'heures total.

Ce tableau reprend aussi le temps passé à enseigner, à préparer des cours ainsi qu'à travailler pour des communautés ou associations scientifiques. Bien que ces éléments n'aient pas à figurer dans ce manuscrit exclusivement destiné à évaluer mes travaux de recherche, ils donnent une indication du temps qui peut être absorbé par des activités périphériques.

		Gestion/Administration	Communication / Mails	Bibliographie	Rédaction	Séminaires / Conférences	Réunions / Discussions	Interfaces / outils	Modèle	Applications	Parallélisation	Réseaux / Associations	Monitorat / Enseignement	Heures / mois
2005	S	15	11	30	9		13	85		6			6	175
	O	1	1	24	50		4	9	28	7			73	197
	N	2		28	3		5	10	28	2			35	113
	D	2		9	7		2	19	18	1			29	87
2006	J	2	7	36	18		1		18	2			35	119
	F	2	1	16	28	6	13	2	13				39	120
	M	5		4	1	11	21	1	46	14		7	34	144
	A	6		5	9		3		20				35	78
	M	3	7	46	23	38	11						8	136
	J	1	6	40	1	17	17	57		2			32	173
	J	5	6	29	19		5	14		34			28	140
	A		4	39	2		3			3				51
	S	6	4	51	5	5	14		2	15		9	41	152
	O	2	6	29	34	4	23	10	4	7		1	40	160
	N		33	35	26	20	17				3		22	156
	D		14	22	34	13	1	48			45	6	44	227
2007	J		26	22	31		6	24			19	6	26	160
	F	27	45	19	17		13			30	11		11	173
	M	8	14	18	66	7	15	16	54	20	24			242
	A	14	7	12	37		8	10	7	26	3			124
	M	35	8	6	74	36	20		20	29	6			234
	J	7	8	40	38	17	4			20	6		12	152
	J		11	31	41	2	6			6		3	20	120
	A		8	22	33		3		11			3		80
	S	4	6	11	50	2	13	1	1		31	10	20	149
	O	9	14	9	82	2	12			18	1	8	25	180
	N	7	15	19	14	75	16			8		11	52	217
	D	3	10	15	33	5	6			8	10	12	27	129
2008	J		27	22	7		5	50	4	4	7	38	25	189
	F	2	15	44	47	23	5	2		2	21	16	3	180
	M	3	18	13	35	52	32		25	15	9	21	10	233
	A	4	16	25	91	4	3		25	11		15	6	200
	M	6	16	18	11	6	4			31			76	168
	J	1	29	28	57	7	6	31		16		5	10	190
	J	7	25	21	131	30	13					6	5	238
	A	4	16	6	125	6	1					28		186
	S	3	12	3	86							1	3	108
Total		196	446	847	1375	388	344	389	324	337	196	206	832	5880

FIGURE E.1 – Planning synthétique du travail de thèse

Bibliographie

[Adam and Evrard, 2005] Carole Adam and Fabrice Evrard. Vers un modèle optimal des émotions - revue des modèles existants. Technical report, IRIT, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2005.

[Alexandrov, 2002] Alexander Alexandrov. Corner detection overview and comparison. *Computer Vision*, 558, 2002.

[Altschuler, 2005] Eric Lewin Altschuler. Interaction of vision and movement in a mirror. *Perception*, 34 :1155–1161, 2005.

[Anderson and Lebiere, 1998] John Robert Anderson and Christian Lebiere, editors. *The atomic components of thought*. Lawrence Erlbaum Associates, 1998.

[Anderson, 1976] John Robert Anderson, editor. *Language, Memory and Thought*. Lawrence Erlbaum Associates, 1976.

[Ashby, 1952] William Ross Ashby, editor. *Design for a Brain*. London : Chapman & Hall, 1952.

[Ashby, 1956] William Ross Ashby, editor. *Introduction to Cybernetics*. London : Chapman & Hall, 1956.

[Baars, 1988] Bernard J. Baars, editor. *A Cognitive Theory of Consciousness*. New York : Cambridge University Press, 1988.

[Bach-y-Rita *et al.*, 2003] P. Bach-y-Rita, M.E. Tyler, and K.A. Kaczmarek. Seeing with the brain. *International journal of human-computer interaction*, 15(2) :285–295, 2003.

[Bach, 2003] Joscha Bach. The micropsi agent architecture. In *Proceedings of ICCM-5*. Universitäts-Verlag Bamberg, 2003.

[Bálya and Roska, 2005] Dávid Bálya and Botond Roska. Retina model with real time implementation. In *ISCAS*, volume 5, pages 5222–5225, 2005.

[Barandiaran and Moreno, 2006] X. Barandiaran and A. Moreno. On what makes certain dynamical systems cognitive : A minimally cognitive organization program. *Adaptive Behavior - Animals, Animats, Software Agents, Robots, Adaptive Systems*, 14(2) :171–185, 2006.

[Barbeau, 2007] Emmanuel Barbeau. Cerveau gauche, cerveau droit : qui fait quoi ou quoi fait qui ?, 2007. Conférence à Toulouse le 12/12/2007.

[Basille *et al.*, 2007] Jean-Luc Basille, Jean-Christophe Buisson, and Jean-Charles Quinton. Interactivist navigation. In *Proceedings of ECSC'07 - European Cognitive Science Conference (Delphi, Greece)*, page 922. Lawrence Erlbaum Associates, 2007.

[Baxter and Browne, 2008] Paul Baxter and Will Browne. Towards a developmental memory-based and embodied cognitive architecture. In *Proceedings of EpiRob'08 - International Conference on Epigenetic Robotics (Brighton, UK)*, pages 137–138. Lund University Cognitive Studies, 2008.

[Bennett *et al.*, 2001] Matthew Bennett, Michael F. Schatz, Heidi Rockwood, and Kurt Wiesenfeld. Huygens' clocks. In *Proceedings of the Royal Society of London A*, volume 458, pages 563–579. Royal Society Publishing, 2001.

[Berridge, 2004] Kent C. Berridge. Motivation concepts in behavioral neuroscience. *Physiology & Behaviour*, 81, 2004.

[Berthoud, 2004] Hans-Rudolf Berthoud. Mind versus metabolism in the control of food intake and energy balance. *Physiology & Behaviour*, 81, 2004.

[Bickhard and Christensen, 2002] Mark H. Bickhard and Wayne D. Christensen. Process dynamics of normative function. *Monist*, 85(1) :3–28, 2002.

[Bickhard and Terveen, 1995] Mark H. Bickhard and Lauren Terveen, editors. *Foundational issues in artificial intelligence and cognitive science*. Elsevier Scientific, 1995.

[Bickhard, 1993] Mark H. Bickhard. Representational content in humans and machines. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 1993.

[Bickhard, 1996a] Mark H. Bickhard. *The Dynamic Emergence of Representation*, pages 71–90. Elsevier, 1996.

[Bickhard, 1996b] Mark H. Bickhard. The emergence of representation in autonomous embodied agents. In *AAAI Fall Symposium on Embodied Cognition and Action*, 1996.

[Bickhard, 1999] Mark H. Bickhard. Interaction and representation. *Theory & Psychology*, 9(4) :435–458, 1999.

[Bickhard, 2003] Mark H. Bickhard. Interactivism : a manifesto. Description du cadre interactiviste et de ses principaux concepts, 2003.

[Bienenstock *et al.*, 1982] E. Bienenstock, L. Cooper, and P. Munro. Theory of the development of neuron selectivity : orientation specificity and binocular interaction in the visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 2 :32–48, 1982.

[Bioulac *et al.*, 2005] B. Bioulac, P. Burbaud, J.-R. Cazalets, and C. Gross. Fonctions motrices. *EMC-Kinésithérapie*, 1(4) :183–233, 2005.

[Bourgine and Stewart, 2004] Paul Bourgine and John Stewart. Autopoiesis and cognition. *Artificial Life*, 10(3) :327–345, 2004.

[Brohy, 2000] Claude Allain Brohy. Détection des yeux. Technical report, LIG à l'EPFL, 2000.

[Brooks *et al.*, 1999] Rodney Allen Brooks, Cynthia Breazeal, Matthew Marjanovic, Brian Scassellati, and Matthew M. Williamson. The cog project : Building a humanoid robot. *Lecture Notes in Computer Science*, 1562 :52–87, 1999.

[Brooks, 1991a] Rodney Allen Brooks. Intelligence without reason. In *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 569–595. Morgan Kaufmann, 1991.

[Brooks, 1991b] Rodney Allen Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47 :139–159, 1991.

[Brooks, 1999] Rodney Allen Brooks, editor. *Cambrian Intelligence - The early history of new AI*. MIT Press, 1999.

[Brooks, 2001] Rodney Allen Brooks. The relationship between matter and life. *Insight feature*, 2001.

[Buck *et al.*, 2004] Ian Buck, Tim Foley, Daniel Horn, Jeremy Sugerman, Kayvon Fatahalian, Mike Houston, and Pat Hanrahan. Brook for GPUs : stream computing on graphics hardware.

In *SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pages 777–786, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.

[Buisson and Quinton, 2008] Jean-Christophe Buisson and Jean-Charles Quinton. Internalized activities. *New Ideas in Psychology*, 2008.

[Buisson, 2004] Jean-Christophe Buisson. A rhythm recognition computer program to advocate interactivist perception. *Cognitive Science*, 28(1) :75–87, 2004.

[Buisson, 2007] Jean-Christophe Buisson. Internalized activities, 2007.

[Camps *et al.*, 1998] Valérie Camps, Marie-Pierre Gleizes, and Sylvie Trouilhet. Properties analysis of a learning algorithm for adaptive systems. *International Journal of Computing Anticipatory Systems*, 1 :223–233, 1998.

[Cassimatis, 2005] Nicholas L. Cassimatis. Integrating cognitive models based on different computational methods. In *Proceedings of the Twenty-Seventh Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pages 402–407, 2005.

[Caveing, 2004] Maurice Caveing, editor. *Le problème des objets dans la pensée mathématique*. Vrin, 2004.

[Chen and Gordon, 1991] S. Chen and D. Gordon. Front-to-back display of bsp trees. *IEEE Computer Graphics and Algorithms*, 1991.

[Clark, 1987] Andy Clark. Being there : Why implementation matters to cognitive science. *Artificial Intelligence Review*, 1 :231–244, 1987.

[Clark, 2002] Andy Clark. Is seeing all it seems ? action, reason and the grand illusion. *Journal of Consciousness Studies*, 9 :181–202, 2002.

[Clifford *et al.*, 1999] Colin W.G. Clifford, Scott A. Beardsley, and Lucia M. Vaina. The perception and discrimination of speed in complex motion. *Vision Research*, 39, 1999.

[Colombetti, 2008] Giovanna Colombetti. *Enaction, sense-making and emotion*. Cambridge MA : MIT Press, 2008.

[Cor, 2008] CoreImage on Apple website, 2008. http://developer.apple.com/macosx/coreimage.html.

[Cormen *et al.*, 2001] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, and C. Stein. *Introduction to Algorithms (Second Edition)*. MIT Press and McGraw-Hill, 2001.

[CUD, 2008] CUDA Zone on NVidia website, 2008. http://www.nvidia.com/object/cuda_home.html.

[de Garis *et al.*, 2008] Hugo de Garis, Jian Yu Tang, Zhiyong Huang, Lu Bai, Cong Chen, Shuo Chen, Junfei Guo, Xianjin Tan, Hao Tian, Xiaohan Tian, Xianjian Wu, Ye Xiong, Xiangqian Yu, and Di Huang. The china-brain project : Building china's artificial brain using an evolved neural net module approach. In *Artificial General Intelligence 2008 - Proceedings of the First AGI Conference*, pages 107–121. IOS Press, 2008.

[de Rugy and Sternad, 2003] Aymar de Rugy and Dagmar Sternad. Interaction between discrete and rythmic movements : reaction time and phase discrete initiation during oscillatory movements. *Brain Research*, 994, 2003.

[Dehaene *et al.*, 2006] Stanislas Dehaene, Jean-Pierre Changeux, Lionel Naccache, Jérôme Sackur, and Claire Sergent. Conscious, preconscious, and subliminal processing : a testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(5), 2006.

[Delorme and Thorpe, 2003] Alain Delorme and Simon J. Thorpe. Spikenet : an event-driven simulation package for modelling large networks of spiking neurons. *Network*, 14 :613–627, 2003.

[Dennett, 1996] Daniel Dennett. *Kinds of Minds : Toward an Understanding of Consciousness*. The Science Masters Series. New York : Basic Books, 1996.

[Dewey, 1896] John Dewey. The reflex arc concept in psychology. *Psychological Review*, 3 :357–370, 1896.

[Di Paolo, 2003] Ezequiel A. Di Paolo. Organismically-inspired robotics : homeostatic adaptation and teleology beyond the closed sensorimotor loop. In *Dynamical Systems Approach to Embodiment and Sociality*, pages 19–42. Adelaide : Advanced Knowledge International, 2003.

[Di Paolo, 2005] Ezequiel A. Di Paolo. Autopoiesis, adaptivity, teleology, agency. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 4(4) :429–452, 2005.

[Di Paolo, 2006] Ezequiel A. Di Paolo. Horizons for the enactive mind : Value, social interaction and play. Keynote at the CNRS summer school Enaction and Cognitive Science, 2006.

[Díaz *et al.*, 2003] J. Díaz, E. Ros, S. Mota, G. Botella, A. Cañas, and S. Sabatini. Optical flow for cars overtaking monitor : the rear mirror blind spot problem. *Ecovision (European research project)*, 2003.

[Draper, 1996] Mark H. Draper. Can your eyes make you sick ? : Investigating the relationship between the vestibulo-ocular reflex and virtual reality. Technical report, Seattle : University of Washington, Human Interface Technology Laboratory, 1996.

[Drescher, 1991] Gary L. Drescher, editor. *Made-up Mind. A constructivist approach to artificial intelligence*. MIT Press, 1991.

[Ducret *et al.*, 2001] Jean-Jacques Ducret, Marc Richelle, and Sabine Ploux. Jean piaget et les sciences cognitives. *Intellectica*, 33 :209–240, 2001.

[Duverger, 2006] Christophe Duverger. Application des schémas sensori-moteurs piagétiens à la reconnaissance rythmique. Master's thesis, IRIT, INP, Toulouse, 2006.

[Edelman, 1987] Gerald M. Edelman. *Neural Darwinism : The Theory of Neuronal Group Selection*. Basic Books, New York, 1987.

[Engel and König, 1993] Andreas K. Engel and Peter König. Paradigm shifts in neurobiology : Towards a new theory of perception. *Philosophy and the Cognitive Sciences*, pages 131–138, 1993.

[Engel *et al.*, 2001] Andreas K. Engel, Pascal Fries, and Wolf Singer. Dynamic predictions : Oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews : Neuroscience*, 2(10) :704–716, 2001.

[Fodor and Pylyshyn, 1981] Jerry A. Fodor and Zenon Pylyshyn. How direct is visual perception ? some reflections on gibson's ecological approach. *Cognition*, 9 :139–196, 1981.

[Fodor, 1983] Jerry A. Fodor. *The Modularity of Mind : An Essay on Faculty Psychology*. MIT Press, 1983.

[Forrest and Hofmeyr, 2000] S. Forrest and S.A. Hofmeyr. *Immunology as information processing*. New York : Oxford University Press, 2000.

[Forrest, 2000] B. Forrest. Methodological naturalism and philosophical naturalism : Clarifying the connection. *Philo*, 3(2) :7–29, 2000.

[Franklin *et al.*, 1998] Stan Franklin, Arpad Kelemen, and Lee McCauley. Ida : A cognitive agent architecture. In *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 2646–2651, 1998.

[Franklin, 1995] Stan Franklin. *Artificial Minds*. MIT Press, 1995.

[Fuchs *et al.*, 1980] H. Fuchs, Z. M. Kedem, and B. F. Naylor. On visible surface generation by a priori tree structures. *ACM Computer Graphics*, 1980.

[Fukushima, 1972] Kunihiko Fukushima. Un modèle de mémoire associative dans le cerveau. *Kybernetik*, 12, 1972.

[Fung and Mann, 2005] James Fung and Steve Mann. OpenVIDIA : parallel GPU computer vision. In *MULTIMEDIA '05 : Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Multimedia*, pages 849–852, New York, NY, USA, 2005. ACM.

[Fuster, 2003] Joaquin M. Fuster. *Cortex and Mind : Unifying Cognition*. Oxford University Press, 2003.

[Ganis *et al.*, 2004] G. Ganis, W.L. Thompson, and S.M. Kosslyn. Brain areas underlying visual mental imagery and visual perception : an fmri study. *Cognitive Brain Research*, 20(2) :226–41, 2004.

[Gapenne *et al.*, 2003] O. Gapenne, A. A. Ammar, C. Lenay, and K. Rovira. Tactos : A special computer interface for the reading and writing of 2d forms in blind people. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Human-Computer Interaction*, pages 1270–1274. Lawrence Erlbaum Associates, 2003.

[Gibson, 1950] James Jerome Gibson. *Perception of the Visual World*. Houghton Mifflins, Boston, 1950.

[Gibson, 1979] James Jerome Gibson. *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflins, Boston, 1979.

[Goertzel and Wang, 2007] Ben Goertzel and Pei Wang. *Advances in Artificial General Intelligence*. IOS Press, 2007.

[Goldberg *et al.*, 2007] A. D. Goldberg, C. D. Allis, and E. Bernstein. Epigenetics : A landscape takes shape. *Cell*, 128 :635–638, 2007.

[Goldfarb, 1993] Lawrence Wm. Goldfarb. Why robots fall down. Keynote at the American Society for Cybernetics annual conference, 1993.

[Gong and Yang, 2005] Minglun Gong and Yee-Hong Yang. Near real-time reliable stereo matching using programmable graphics hardware. In *CVPR '05 : Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Volume 1*, pages 924–931, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.

[González, 2005] Francisco Pizarro González. Les schémas sensori-moteurs piagétiens appliqués à la conduite automobile. Master's thesis, IRIT, INP, Toulouse, 2005.

[Gould and Eldredge, 1977] Stephen Jay Gould and Niles Eldredge. Punctuated equilibria : The tempo and mode of evolution reconsidered. *Paleobiology*, 3(2) :115–151, 1977.

[Gould, 1991] Stephen Jay Gould. *La vie est belle : les surprises de l'évolution*. Paris : Seuil, 1991.

[Greene, 2000] Brian Greene. *The Elegant Universe : Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. Knopf Publishing Group, 2000.

[Gribbin, 2005] John Gribbin. *Deep Simplicity : Chaos, Complexity and the Emergence of Life*. Penguin Press Science, 2005.

[Guillot and Daucé, 2002] Agnès Guillot and Emmanuel Daucé. *Approche dynamique de la cognition artificielle*. Hermes, Lavoisier, 2002.

[Hamilton, 1964] William D. Hamilton. The general theory of social behavior. *Journal of Theoretical Biology*, 7 :1–52, 1964.

[Harnad, 1990] Stevan Harnad. The symbol grounding problem. *Physica D*, 42 :335–346, 1990.

[Haruno *et al.*, 2003] Masahiko Haruno, Daniel M. Wolpert, and Mitsuo Kawato. Hierarchical mosaic for movement generation. *International Congress Series*, 1250 :575–590, 2003.

[Harvey *et al.*, 2005] Inman Harvey, Ezequiel A. Di Paolo, Rachel Wood, Matt Quinn, and Elio Tuci. Evolutionary robotics : A new scientific tool for studying cognition. *Artificial Life*, 11(1-2) :79–98, 2005.

[Havelange *et al.*, 2003] V. Havelange, C. Lenay, and J. Stewart. Les représentations : mémoire externe et objets techniques. *Intellectica*, 35, 2003.

[Hawkins and Blakeslee, 2004] Jeff Hawkins and Sandra Blakeslee. *On Intelligence : How a New Understanding of the Brain will Lead to the Creation of Truly Intelligent Machines.* Times Books, 2004.

[Hayhoe and Ballard, 2005] Mary Hayhoe and Dana Ballard. Eye movements in natural behavior. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(4), 2005.

[Hebb, 1949] Donald Olding Hebb. *The organization of behavior : a neuropsychological theory.* New York : Wiley, 1949.

[Hubel and Wiesel, 1962] D.N. Hubel and T.H. Wiesel. Receptive fields, binocular interaction, and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology*, 160 :106–54, 1962.

[Husserl, 1929] Edmund Husserl. *Méditations cartésiennes.* Vrin (1999), 1929.

[Hutchins, 1995] Edwin Hutchins, editor. *Cognition in the Wild.* Cambridge, MA : MIT Press, 1995.

[Hutchins, 2006] Edwin Hutchins. Imagining the cognitive life of things. 2006. Talk at the "Cognitive Life of Things : Recasting the boundaries of Mind" symposium, McDonald Institute for Archaeological Research, Cambridge University.

[Inamura *et al.*, 2004] Tetsunari Inamura, Yoshihiko Nakamura, and Iwaki Toshima. Embodied symbol emergence based on mimesis theory. *International Journal of Robotics Research*, 2004.

[Irwin *et al.*, 1983] D. E. Irwin, S. Yantis, and J. Jonides. Evidence against visual integration across saccadic eye movements. *Percept Psychophys*, 34(1) :49–57, 1983.

[Irwin *et al.*, 1988] D. E. Irwin, J. S. Brown, and J.-S. Sun. Visual masking and visual integration across saccadic eye movements. *Journal of Experimental Psychology*, 117 :274–285, 1988.

[Jacob, 2006] Pierre Jacob. Portée et limites des théories énactives de l'expérience visuelle. *Intellectica*, 43, 2006.

[Johnson *et al.*, 2003] Scott P. Johnson, Dima Amso, and Jonathan A. Slemmer. Development of object concepts in infancy : Evidence for early learning in an eye-tracking paradigm. *Proceedings of the National Academy of Science*, 100 :10568–10573, 2003.

[Johnson *et al.*, 2004a] Scott P. Johnson, Dima Amso, and Jonathan A. Slemmer. Where infants look determines how they see : Eye movements and development of object perception. *Journal of Vision*, 4(8) :748–748, 2004.

[Johnson *et al.*, 2004b] Scott P. Johnson, Jonathan A. Slemmer, and Dima Amso. Where infants look determines how they see : Eye movements and object perception performance in 3-month-olds. *Infancy*, 2004.

[Kawato, 1999] Mitsuo Kawato. Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9 :718–727, 1999.

[Kelso, 1995] Scott J.A. Kelso, editor. *Dynamic Patterns : the self-organization of brain and behavior*. MIT Press, 1995.

[Kelso, 2006] Scott J.A. Kelso. Coordinating brains, 2006. Séminaire à l'Université Paul Sabatier le 27/10/2006.

[Kim *et al.*, 2007] S. J. Kim, D. Gallup, J.-M. Frahm, A. Akbarzadeh, Q. Yang, R. Yang, D. Nistér, and M. Pollefeys. Gain adaptive real-time stereo streaming. In *International Conference on Computer Vision Systems*, 2007.

[Kuhn and Tatler, 2005] Gustav Kuhn and Benjamin W. Tatler. Magic and fixations : Now you don't see it, now you do. *Perception*, 34 :1155–1161, 2005.

[Kuo, 2002] Arthur D. Kuo. The relative roles of feedforward and feedback in the control of rhythmic movements. *Motor Control*, 6 :129–145, 2002.

[Lamm *et al.*, 2001] C. Lamm, C. Windischberger, U. Leodolter, E. Moser, and H. Bauer. Evidence for premotor cortex activity during dynamic visuospatial imagery from single-trial functional magnetic resonance imaging and event-related slow cortical potentials. *Neuroimage*, 14(2) :268–283, 2001.

[Lappe *et al.*, 2000] Markus Lappe, Antje Grigo, Frank Bremmer, Harald Frenz, Rene J. V. Bertin, and Isabelle Israël. Perception of heading and driving distance from optic flow. In *Proceedings of the Driving simulator conference*, 2000.

[Large and Jones, 1999] Edward W. Large and Mari Riess Jones. The dynamics of attending : how people track time-varying events. *Psychological Review*, 106 :119–159, 1999.

[Large and Palmer, 2002] E. W. Large and C. Palmer. Perceiving temporal regularity in music. *Cognitive Science*, 26 :1–37, 2002.

[Large, 1995] Edward W. Large. Beat tracking with a nonlinear oscillator. In *Working Notes of the IJCAI-95 Workshop on Artificial Intelligence and Music*, pages 24–31, 1995.

[Lettvin *et al.*, 1959] J.Y. Lettvin, H.R. Maturana, W.S. McCulloch, and W.H. Pitts. What the frog's eye tells the frog's brain. In *Proceedings of the IRE*, volume 47(11), pages 1940–1951, 1959.

[Lin *et al.*, 2006] L. Lin, R. Osan, and J.Z. Tsien. Organizing principles of real-time memory encoding neural clique assemblies and universal neural codes. *Trends in Neurosciences*, 29(1) :49–57, 2006.

[Liszka, 1984] T. Liszka. An interpolation method for an irregular net of nodes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 20(9) :1599–1612, 1984.

[Llinás and Paré, 1991] Rodolfo Llinás and D. Paré. Of dreaming and wakefulness. *Neuroscience*, 44 :521–535, 1991.

[Longcamp *et al.*, 2003] M. Longcamp, J.L. Anton, M. Roth, and J.L. Velay. Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *Neuroimage*, 19(4) :1492–1500, 2003.

[Looks *et al.*, 2004] Moshe Looks, Ben Goertzel, and Cassio Pennachin. Novamente : An integrative architecture for general intelligence. In *Proceedings of AAAI 2004 Symposium on Achieving Human-Level AI via Integrated Systems and Research*. AAAI Press, 2004.

[Lorenz, 1996] Edward Norton Lorenz. *The Essence of Chaos*. Jessie and John Danz Lecture. University of Washington Press, 1996.

[Lovelock, 1988] James Lovelock. *The ages of Gaia*. New York : Norton, 1988.

[Luria, 1966] A.R. Luria. *Higher Cortical Functions in Man*. New York, Basic Books, 1966.

[MacKay, 1967] D.M. MacKay. *Ways of looking at perception*, pages 25–43. Cambridge, MIT Press, 1967.

[MacKay, 1973] D.M. MacKay. Visual stability and voluntary eye movements. *Handbook of sensory physiology*, 7(3) :307–331, 1973.

[Maturana and Varela, 1980] Humberto Maturana and Francisco J. Varela. *Autopoiesis and cognition : The realization of the living*. D. Reidel Publishing, 1980.

[Maturana and Varela, 1987] Humberto Maturana and Francisco J. Varela. *The tree of knowledge : The biological roots of human understanding*. Boston, MA : Shambhala, 1987.

[McCarthy and Hayes, 1969] John McCarthy and Patrick J. Hayes. Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In B. Meltzer and D. Michie, editors, *Machine Intelligence 4*, pages 463–502. Edinburgh University Press, 1969.

[McCool, 2007] Mickael D. McCool. A unified development platform for Cell, GPU, and multicore CPUs. In *Proceedings of International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC07)*, 2007.

[McKinley and Johnson, 2004] Michael J. McKinley and Alan Kim Johnson. The physiological regulation of thirst and fluid intake. *New Ideas in Physiological Science*, 19(1) :1–6, 2004.

[McMullin and Varela, 1997] B. McMullin and F.J. Varela. Rediscovering computational autopoiesis. In *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, 1997.

[Merleau-Ponty, 1942] Maurice Merleau-Ponty. *La Structure du Comportement*. Paris : PUF, 1942.

[Merleau-Ponty, 1945] Maurice Merleau-Ponty. *Phénoménologie de la perception*. Paris : Gallimard, 1945.

[Merleau-Ponty, 1961] Maurice Merleau-Ponty. *L'Oeil et l'esprit*. Paris : Gallimard, 1961.

[Minsky, 1986] Marvin Minsky. *The Society of Mind*. New York : Simon and Schuster, 1986.

[Mirollo and Strogatz, 1990] Renato E. Mirollo and Steven H. Strogatz. Synchronization of pulse-coupled biological oscillators. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 50(6) :1645–1662, 1990.

[Moreno, 2000] Alvaro Moreno. Closure, identity, and the emergence of formal causation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 901 :112–121, 2000.

[Mossio, 2006] Matteo Mossio. *Adéquation théorique et maîtrise expérimentale : une enquête interdisciplinaire en sciences cognitives*. PhD thesis, Université Paris 6, 2006.

[Nefian and Hayes, 1999] Ara V. Nefian and Monson H. Hayes. Face recognition using an embedded hmm. In *Proceedings of the IEEE Conference on Audio and Video-based Biometric Person Authentication*, pages 19–24, 1999.

[Nelson *et al.*, 2007] K. R. Nelson, M. Mattingly, , and F. A. Schmitt. Out-of-body experience and arousal. *Neurology*, 68(10) :794–795, 2007.

[O'Regan and Noë, 2001a] J.Kevin O'Regan and Alva Noë. A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5) :939–1011, 2001.

[O'Regan and Noë, 2001b] J.Kevin O'Regan and Alva Noë. What it is like to see : A sensorimotor theory of perceptual experience. *Synthese*, 129(1) :79–103, 2001.

[O'Regan *et al.*, 1999] J.Kevin O'Regan, R.A. Rensink, and J.J. Clark. Change blindness as a result of mudsplashes. *Nature*, 398(34) :34, 1999.

[O'Regan, 1992] J.Kevin O'Regan. Solving the "real" mysteries of visual perception : the world as outside memory. *Canadian Journal of Psychology*, 46 :461–488, 1992.

[Oudeyer and Kaplan, 2004] Pierre-Yves Oudeyer and Frédéric Kaplan. Intelligent adaptive curiosity : a source of self-development. *Proceedings of the 4th International Workshop on Epigenetic Robotics*, 2004.

[Oudeyer *et al.*, 2007] Pierre-Yves Oudeyer, Frédéric Kaplan, and V.V. Hafner. Intrinsic motivation systems for autonomous mental development. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007.

[Patla and Vickers, 2002] Aftab E. Patla and Joan N. Vickers. How far ahead do we look when required to step on specific locations in the travel path during locomotion ? *Experimental Brain Research*, 148, 2002.

[Pavlov, 1927] Ivan Petrovich Pavlov, editor. *Conditioned reflexes.* London : Routledge and Kegan Paul, 1927.

[Penrose, 1989] Roger Penrose, editor. *The Emperor's New Mind : Concerning Computers, Minds, and The Laws of Physics.* Oxford University Press, 1989.

[Perotto *et al.*, 2007] Filipo Studzinski Perotto, Jean-Christophe Buisson, and Luis Otávio Alvares. Constructivist anticipatory learning mechanism (CALM) - dealing with partially deterministic and partially observable environments. In *Proceedings of EpiRob'07 - International Conference on Epigenetic Robotics (Piscataway, USA)*, pages 117–124. Lund University Cognitive Studies, 2007.

[Perrinet *et al.*, 2004] Laurent Perrinet, Manuel Samuelides, and Simon J. Thorpe. Sparse spike coding in an asynchronous feed-forward multi-layer neural network using matching pursuit. *Neurocomputing*, 57 :125–134, 2004.

[Pia, 1977] Piaget by piaget (video réalisée à genève), 1977.

[Piaget and Inhelder, 1969] Jean Piaget and Bärbel Inhelder. *The Psychology of the Child.* Basic Books, New York, 1969.

[Piaget, 1947] Jean Piaget, editor. *La Représentation du Monde chez l'Enfant.* Paris : PUF, 1947.

[Piaget, 1952] Jean Piaget, editor. *The Origins of Intelligence in Children.* International Universities Press, 1952.

[Piaget, 1954] Jean Piaget. *The construction of reality in the child.* Basic Books, New York, 1954.

[Piaget, 1971] Jean Piaget. *Biology and Knowledge.* Chicago : University of Chicago Press, 1971.

[Planck, 1948] Max Planck. *Wissenschaftliche Selbstbiographie.* Leipzig : Johann Ambrosius Barth, 1948.

[Prinz, 2005a] Jesse J. Prinz. *A Neurofunctional Theory of Consciousness.* New York : Cambridge University Press, 2005.

[Prinz, 2005b] Jesse J. Prinz. *The Return of Concept Empiricism*. Elsevier, 2005.

[Prudkov and Rodina, 1999] Pavel N. Prudkov and O. N. Rodina. Synthesis of purposeful processes. *Psychologqy*, 10(70), 1999.

[Quinton and Buisson, 2008] Jean-Charles Quinton and Jean-Christophe Buisson. Multilevel anticipative interactions for goal oriented behaviors. In *Proceedings of EpiRob'08 - International Conference on Epigenetic Robotics (Brighton, UK)*, pages 103–110. Lund University Cognitive Studies, 2008.

[Quinton and Inamura, 2007] Jean-Charles Quinton and Tetsunari Inamura. Human-robot interaction based learning for task-independent dynamics prediction. In *Proceedings of EpiRob'07 - International Conference on Epigenetic Robotics (Piscataway, USA)*, pages 133–140. Lund University Cognitive Studies, 2007.

[Quinton *et al.*, 2006] Jean-Charles Quinton, Christophe Duverger, and Jean-Christophe Buisson. Synchronization for anticipative sensory-motor schemes. In *Proceedings of Enactive'06 - International Conference on Enactive Interfaces (Montpellier, France)*, 2006.

[Quinton *et al.*, 2008] Jean-Charles Quinton, Jean-Christophe Buisson, and Filipo Perotto. Anticipative coordinated cognitive processes for interactivist and piagetian theories. In *Proceedings of AGI'08 - Artificial General Intelligence (Memphis, USA)*, pages 287–298. IOS Press, 2008.

[Quinton, 2005] Jean-Charles Quinton. Application des schémas sensori-moteurs piagétiens au suivi d'objet mobile. Master's thesis, IRIT, INP, Toulouse, 2005.

[Quinton, 2006] Jean-Charles Quinton. Vers un modèle générique de schéma sensori-moteur anticipatif. In *Colloque des doctorants de l'EDIT (Toulouse, France)*, 2006.

[Ridet *et al.*, 1992] Jean-Marc Ridet, Roland Platel, and François J. Meunier. *Des protozoaires aux échinodermes*. Ellipses, 1992.

[Rizzolatti *et al.*, 1996] Giacomo Rizzolatti, Luciano Fadiga, Vittorio Gallese, and Leonardo Fogassi. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3(2) :131–141, 1996.

[Rizzolatti *et al.*, 2001] Giacomo Rizzolatti, Leonardo Fogassi, and Vittorio Gallese. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2 :661–670, 2001.

[Rosenblueth *et al.*, 1943] Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener, and Julian Bigelow. Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of Science*, 10 :18–24, 1943.

[Schmidhuber, 2006] Jürgen Schmidhuber. Developmental robotics, optimal artificial curiosity, creativity, music, and the fine arts. *Connection Science*, 2006.

[Searle, 1980] John R. Searle. Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, 3(3) :417–457, 1980.

[Shanon, 1993] Benny Shanon, editor. *The Representational and the Presentational - An Essay on Cognition and the Study of Mind*. Harvester Wheatsheaf, London, 1993.

[Shanon, 1998] Benny Shanon. What is the function of consciousness ? *Journal of Consciousness Studies*, 5(3) :295–308, 1998.

[Shanon, 2003] Benny Shanon. Altered states and the study of consciousness - the case of ayahuasca. *The Journal of Mind and Behavior Spring*, 24(2), 2003.

[Shantzis, 1994] Michael A. Shantzis. A model for efficient and flexible image computing. In *SIGGRAPH '94 : Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 147–154, New York, NY, USA, 1994. ACM.

[Shepard, 1968] Donald Shepard. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the ACM National Conference*, 1968.

[Simondon, 1989] Gilbert Simondon, editor. *L'individuation psychique et collective*. Paris : Aubier, 1989.

[Simons and Chabris, 1999] D.J. Simons and C.F. Chabris. Gorillas in our midst : Sustained inattentional blindness for dynamic events. *Perception*, 28 :1059–1074, 1999.

[Singh, 2003] Push Singh. Examining the society of mind. *Computing and Informatics*, 22 :521–543, 2003.

[Sinha *et al.*, 2007] Sudipta Sinha, Jan-Michael Frahm, Marc Pollefeys, and Yakup Genc. Feature tracking and matching in video using programmable graphics hardware. *Machine Vision and Applications*, 2007.

[Smith and Thelen, 2003] Linda B. Smith and Esther Thelen. Development as a dynamic system. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 :343–348, 2003.

[Soon *et al.*, 2008] C.S. Soon, M. Brass, H.J. Heinze, and J.D. Haynes. Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature Neuroscience*, 11(5) :543–545, 2008.

[Sprague and Ballard, 2003] Nathan Sprague and Dana Ballard. Eye movements for reward maximization. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 16, 2003.

[Staffelbach *et al.*,] Gabriel Staffelbach, Jean Mathieu Senoner, Laurent Gicquel, and Thierry Poinsot. Large eddy simulation of combustion on massively parallel machines. In *VECPAR'08 : 8th International Meeting High Performance Computing for Computational Science*, Lecture Notes in Computer Science.

[Stewart *et al.*, 2004] John Stewart, Armen Khatchatourov, and Charles Lenay. Enaction and engineering. *Interdisciplines*, 2004.

[Stewart, 1996] John Stewart. Cognition=life : Implications for higher-level cognition. *Behavioural Processes*, 35 :311–326, 1996.

[Stewart, 2004] John Stewart. *La vie existe-t-elle ? Réconcilier génétique et biologie*. Vuibert, Paris, 2004.

[Stewart, 2005] John Stewart. Définir le vivant : l'autopoïèse, 2005. GDR Exobiologie http://www.exobio.cnrs.fr/spip.php?article41.

[Stojanov, 2001] Georgi Stojanov. Petitagé : A case study in developmental robotics. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Epigenetic Robotics*. Lund University Cognitive Studies, 2001.

[Stout *et al.*, 2005] Andrew Stout, George D. Konidaris, and Andrew G. Barto. Intrinsically motivated reinforcement learning : A promising framework for developmental robot learning. In *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Developmental Robotics*, 2005.

[Strogatz and Stewart, 1993] Steven H. Strogatz and Ian Stewart. Coupled oscillators and biological synchronization : A subtle mathematical thread connects clocks, ambling elephants, brain rythms and the onset of chaos. *Scientific American (December)*, 1993.

[Tani, 1996] Jun Tani. Model-based learning for mobile robot navigation from the dynamical systems perspective. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics Part B : Cybernetics*, 1996.

[Tani, 2003] Jun Tani. Symbols and dynamics in embodied cognition : Revisiting a robot experiment. *Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems*, pages 167–178, 2003.

[Thelen and Smith, 1994] Esther Thelen and Linda B. Smith. *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*. MIT Press, 1994.

[Theureau, 2003] Jacques Theureau. *Course of Action Analysis & Course of Action Centered Design*. Lawrence Erlbaum Associates, 2003.

[Thomson, 1798] Benjamin Thomson, comte de Rumford. An experimental enquiry concerning the source of the heat which is excited by friction. *Philosophical Transaction of the Royal Society*, page 102, 1798.

[Tomabechi and Kitano, 1989] Hideto Tomabechi and Hiroaki Kitano. Beyond pdp : The frequency modulation neural network architecture. In *IJCAI*, pages 186–192, 1989.

[Tsien, 2007] Joe Z. Tsien. The memory code. *Scientific American (July)*, 2007.

[Vaina *et al.*,] Lucia M. Vaina, John W. Belliveau, Eric B. des Roziers, and Thomas A. Zeffiro. Neural systems underlying learning and representation of global motion. *Proceedings of the National Academy of Science*, 95(21) :12657–12662), year = 1998.

[Vaina *et al.*, 2001] Lucia M. Vaina, Jeffrey Solomoni, Sanjida Chowdhury, Pawan Sinha, and John W. Belliveau. Functional neuroanatomy of biological motion perception in humans. *Proceedings of the National Academy of Science*, 98(20) :11656–11661, 2001.

[van Valen, 1973] Leigh van Valen. A new evolutionary law. *Evolutionary Theory*, 1 :1–30, 1973.

[Varela *et al.*, 1974] Francisco J. Varela, Humberto R. Maturana, and Ricardo Uribe. Autopoiesis : the organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems*, 5 :187–196, 1974.

[Varela *et al.*, 1991] Francisco J. Varela, Evan Thompson, and Eleanor Rosch, editors. *The Embodied Mind : Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press, 1991.

[Varela, 1996] Francisco Varela, editor. *Invitation aux sciences cognitives*. Paris : Seuil, 1996.

[Vieville and Faugeras, 2001] Thierry Vieville and Olivier Faugeras. Perception visuelle en robotique : Profiter de la biologie pour faire des systèmes adaptatifs. Technical report, INRIA, 2001.

[Vieville, 2001] Thierry Vieville. Un survol de la modélisation corticale. Technical report, INRIA, 2001.

[Volterra, 1931] Vito Volterra. *Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together*, pages 409–448. McGraw-Hill, 1931.

[von Bertalanffy, 1993] Ludwig von Bertalanffy, editor. *Théorie générale des systèmes*. Dunod, 1993.

[von Uexküll, 1956] Jakob von Uexküll. *Mondes animaux et monde humain*. Gonthier, 1956.

[Vygotsky, 1930] Lev Semenovich Vygotsky, editor. *Mind and Society*. Harvard University Press, 1930.

[Waddington, 1957] Conrad Hal Waddington, editor. *The Strategy of the Genes ; a Discussion of Some Aspects of Theoretical Biology*. London : George Allen & Unwin, 1957.

[Wang *et al.*, 2006] Rubin Wang, Jing Yu, and Zhi kang Zhang. A neural model on cognitive process. In *Advances in Neural Networks - ISNN 2006*, volume 3971 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2006.

[Wann and Wilkie, 2004] John P. Wann and Richard M. Wilkie. How do we control high speed steering ? *Optic flow and beyond book contents*, pages 401–419, 2004.

[Watson and Lovelock, 1983] Andrew J. Watson and James Ephraim Lovelock. Biological homeostasis of the global environment : the parable of daisyworld. *Thelus B*, 35(4) :286–289, 1983.

[Werblin and Roska, 2007] Frank Werblin and Botond Roska. Des films sur la rétine. *Pour la Science (juin)*, 2007.

[Wilkie and Wann, 2003] Richard M. Wilkie and John P. Wann. Eye-movements aid the control of locomotion. *Journal of Vision*, 3 :677–684, 2003.

[Wilson and McNaughton, 1994] M.A. Wilson and B.L. McNaughton. Reactivation of hippocampal ensemble memories during sleep. *Science*, 265 :676–679, 1994.

[Wolpert and Kawato, 1998] D.M. Wolpert and M. Kawato. Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11 :1317–1329, 1998.

[Wooldridge, 2002] Michael Wooldridge, editor. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Chichester : John Wiley & Sons, 2002.

[Yager and Filev, 1994] Ronald R. Yager and Dimitar P. Filev. *Introduction to fuzzy logic control*, chapter 4, pages 109–153. 1994.

[Yu *et al.*, 1999] Stella X. Yu, Tai Sing Lee, and Takeo Kanade. Visual integration across saccadic eye movements, 1999. http://www.cs.cmu.edu/~xingyu/saccade.html.

[Zanone, 2008] Pier Giorgio Zanone. La synchronisation : Une tendance universelle, 2008. Conférence à Toulouse le 26/05/2008.

[Zhabotinsky, 1964] Anatol M. Zhabotinsky. Periodic processes of malonic acid oxidation in a liquid phase. *Biofizika*, 9 :306–311, 1964.

[Ziemke, 2002] Tom Ziemke. What's that thing called embodiment ? In *Proceedings of the 25th Annual meeting of the Cognitive Science Society*, pages 1305–1310, 2002.

[Ziemke, 2004] Tom Ziemke. Cybernetics and embodied cognition : on the construction of realities in organisms and robots. *Kybernetes*, 34(1/2) :118–128, 2004.

Résumé

Cette thèse propose une infrastructure cognitive permettant de modéliser les comportements sensori-moteurs animaux et humains. La réflexion théorique ayant conduit à cette infrastructure s'inspire du cadre philosophique interactiviste et du paradigme de l'énaction : tout système est représenté par un ensemble de processus actifs, en interaction permanente avec leur environnement propre, ce qui inclut leur influence mutuelle. Tout organisme vivant ou système cognitif peut ainsi être décomposé de manière fractale, chaque niveau d'émergence reposant sur les mêmes principes. Ces principes aujourd'hui largement répandus sont apparus durant l'évolution des espèces vivantes. L'assimilation, la régulation, l'anticipation ou encore la coordination ont ainsi permis à des processus en concurrence pour des ressources limitées de coopérer, se développer et se maintenir à travers les âges. Cette évolution conjointe des conditions environnementales et des structures internes a conduit aux organismes modernes, capables de s'adapter à un environnement génétiquement imprévisible et d'une complexité croissante.

Un modèle mathématique utilisant le formalisme des systèmes complexes est détaillé, ainsi que son implémentation informatique. La dynamique de l'agent y est modélisée par un champ d'activité sous l'influence permanente d'anticipations internes et de sensations externes. Le comportement global de l'agent résulte alors de la coordination implicite et stable de processus interactifs localisés. A ce niveau, le modèle étend et complète les réseaux de neurones artificiels et les modèles probabilistes classiques. Cette caractéristique essentielle permet d'appliquer le modèle à des domaines variés et d'unifier tous les niveaux de la cognition. Le modèle est validé par un ensemble d'applications s'étendant de la satisfaction de besoins physiologiques à la manipulation de systèmes mécaniques, en passant par la perception auditive et visuelle. Enfin, et afin de pouvoir étendre ce type de modèles à des problèmes plus complexes dans le futur, des contributions techniques touchant à l'optimisation et à la parallélisation des algorithmes sont développées.

Mots-clés: modèle cognitif, interactivisme, sensori-moteur, système dynamique, système complexe, anticipation

Abstract

This thesis promotes a cognitive infrastructure able to model sensorimotor behaviors in animals and humans. The theoretical developments upon which this infrastructure is drawn is inspired by the philosophical interactivist framework and the enaction paradigm : any system is represented by a set of active processes, in constant interaction with their subjective environment, which includes influences between these processes. Any living organism or cognitive system is therefore fractal, decomposed in different levels of emergence based on the same principles. These principles are now widely spread but appeared progressively during species evolution. Assimilation, regulation, anticipation or coordination made it possible for concurrent processes fighting for limited resources to cooperate, develop and maintain through ages. This joint evolution of environmental conditions and internal structures led to nowadays organisms, able to adapt to a genetically unpredictable environment of growing complexity.

A mathematical model using the formalism of complex systems is detailed, as well as its computer implementation. The agent's dynamics is modeled by an activity field under the continuous influence of internal anticipations and external sensations. The global behavior of the agent then results from the implicit and stable coordination of localized interactive processes. On this aspect, the model extends artificial neural networks and classical probabilistic models. This essential characteristic enables applications in various domains and a unification of all levels of cognition. A set of applications validates the model, extending from physiological need satisfaction to mechanical systems handling, through auditory and visual perception. Finally and in order to extend the model to more complex behaviors in the future, technical contributions on algorithm optimization and parallel implementations are developed.

Keywords: cognitive model, interactivism, sensorimotor, dynamical system, complex system, anticipation