

Travaux et Documents se propose de nourrir le débat scientifique, de faciliter les confrontations entre les idées et les disciplines, en permettant à chacun de rencontrer plus en amont les travaux de ses collègues, de découvrir, dans leur jaillissement, les avancées des divers champs d'études et les innovations pédagogiques qui fondent la vitalité de notre université.

Irène Sokologorsky
Présidente de l'Université

Dans ce numéro

La leçon de piano propose un cadre théorique et un mécanisme de l'apprentissage permettant d'interpréter de manière cohérente une grande partie des phénomènes cognitifs observés dans les systèmes nerveux. Le cadre général est construit autour du concept d'objet mental en double boucle. Les objets mentaux ont des caractéristiques structurelles et dynamiques à l'origine de leurs propriétés fonctionnelles émergentes, dont la constitution de représentations de l'environnement, puis d'objets mentaux abstraits et de blocs. L'apprentissage apparaît ainsi comme une capacité centrale à partir de laquelle se développent automatiquement, en tant que qualités émergentes, les propriétés cognitives des systèmes nerveux évolués.

A paraître :

4-1998 Michelle Zancarini-Fournel et Christian Delacroix,
Génocide et négationnisme
5-1998 sous la direction de Maria Helena Araújo Carreira,
Faits et effets linguistiques dans la presse actuelle
(Espagne, France, Italie, Portugal)

Pour commander ce numéro ou l'un de la collection, veuillez contacter

Giuditta Isotti Rosowsky Département d'Etudes Italiennes Université Paris 8 Vincennes Saint-Denis 2, rue de la Liberté 93526 Saint-Denis Cedex 02 Tel 01 49 40 68 40 - Fax 01 49 40 67 12
--

Chèque à l'ordre de M. l'Agent Comptable de l'Université Paris 8

3-1997
Prix : 50 F
ISBN 2-911860-02-0

Christophe Lecerf

Une leçon de piano ou la double boucle de l'apprentissage cognitif

TRAVAUX et DOCUMENTS

TRAVAUX et DOCUMENTS

Arts
Lettres
Sciences Humaines
Sciences et Techniques

3-1997 3-1997

UNIVERSITE PARIS 8 VINCENNES-SAINT-DENIS

TRAVAUX ET DOCUMENTS
3 - 1997

Arts
Lettres
Sciences Humaines
Sciences et Techniques

L'extrême fécondité des recherches produites par les enseignants et par les équipes de Paris 8 donne lieu, tant aux Presses Universitaires de Vincennes que dans les éditions nationales, privées ou publiques, à nombre de publications dont beaucoup font date.

Mais la volonté d'assurer un échange dynamique et constant entre l'enseignement et la recherche, affirmée avec détermination à la création de notre établissement et mise en oeuvre tout au long de notre histoire, nous conduit à produire également quantité de documents de synthèse, de bilans, des chronologies...

Diffusés dans le cadre des équipes ou à l'occasion d'une unité d'enseignement et de recherche, ces travaux demeurent malheureusement trop souvent confidentiels.

Il importait de les mettre à la disposition plus large d'enseignants-chercheurs et d'étudiants de notre Université, mais aussi d'autres établissements, à la disposition également de spécialistes d'autres disciplines et plus simplement de lecteurs curieux.

C'est ce que propose la série **Travaux et Documents**.

Les **textes publiés dans cette nouvelle collection** s'adressent, bien entendu, prioritairement à nos étudiants. Ils ne sont pas pour autant des photocopiés classiques, destinés à remplacer un cours non suivi. Leur ambition est au contraire de soutenir un effort d'apprentissage en sollicitant des curiosités nouvelles et en introduisant à une méthodologie et à une démarche de recherche.

Au delà, il s'agit de nourrir le débat scientifique et de faciliter les confrontations entre les idées et les disciplines, en permettant à chacun de rencontrer plus en amont les travaux de ses collègues et de découvrir, dans leur jaillissement, les avancées des divers champs d'études et les innovations pédagogiques qui fondent la vitalité de notre université.

Nouvelle étape dans la prise en compte de la diversité des publics actuels, cette initiative, qui répond à la vocation pluridisciplinaire de Paris 8 Vincennes Saint-Denis, entend participer à l'élargissement que connaissent aujourd'hui les missions de l'Université. Elle sera, nous l'espérons, un moyen d'accroître la diffusion des connaissances et d'amplifier le dialogue intellectuel.

Je forme des vœux pour qu'elle rencontre l'heureux succès qui accompagne d'autres entreprises de notre université.

Irène SOKOLOGORSKY
Présidente l'Université Paris 8
Vincennes Saint-Denis
Décembre 1996

Christophe Lecerf

Une leçon de piano
ou la double boucle
de l'apprentissage cognitif

Sommaire

1. UNE LEÇON DE PIANO	23
1.1. LES NIVEAUX D'ÉCHELLE D'OBSERVATION	25
1.2. GUIDE DE LECTURE	26
2. DU NEURONE À L'OBJET MENTAL	29
2.1. LA STRUCTURE DE L'OBJET MENTAL	29
2.1.1. le neurone	30
2.1.2. des connexions activatrices ou inhibitrices	34
2.1.3. l'effet du temps dans la communication entre cellules	35
2.2. LE MÉCANISME DE L'APPRENTISSAGE	36
2.3. DES NEURONES FORMANT UN CIRCUIT RÉSONATEUR	37
2.4. L'OBJET MENTAL, UN DOUBLE RÉSONATEUR	40
3. LES PROPRIÉTÉS ÉLÉMENTAIRES DES OBJETS MENTAUX	43
3.1. L'ÉTAT DE L'OBJET MENTAL	43
3.2. LA STABILITÉ DE L'OBJET MENTAL	43
3.2.1 le mécanisme de la stabilisation	44
3.2.2 un exemple de résonateur	45
3.3. LA RÉACTIVITÉ DE L'OBJET MENTAL	46
3.4. L'OBJET MENTAL, UN ATTRACTEUR LOCAL DANS LE RÉSEAU	48
3.4.1. l'origine de l'effet d'attracteur	48
3.4.2. la dynamique de l'état de l'objet mental	50
3.4.2.1 la transition de l'état activé vers l'état muet	50
3.4.2.2 la transition de l'état muet vers l'état activé	50
3.4.2.3 l'origine de la transition d'état	51
3.4.3. les limites de l'effet d'attracteur	51
3.4.3.1 attracteur et transition vers l'état activé	51
3.4.3.2 attracteur et transition vers l'état muet	52
3.5. LA DIFFÉRENCIATION DES OBJETS MENTAUX PAR LA TOPOLOGIE	53
3.6. L'OBJET MENTAL, UN OUTIL DE COMPARAISON	54

3.6.1	le mécanisme de la comparaison	54
3.6.2	un exemple d'utilisation de la comparaison	57

4. LES MÉCANISMES ÉLÉMENTAIRES DE L'INTERACTION ENTRE OBJETS MENTAUX 59

4.1.	L'AIGUILLAGE DU FLUX D'ACTIVATION	59
4.2.	LA PROPAGATION DES FLUX ET L'ACTIVATION EN AVAL	60
4.2.1.	le chemin structurel	60
4.2.2.	l'activation dynamique	61
4.3.	LE RECRUTEMENT DE BOUCLES NOUVELLES	63
4.3.1.	la création de boucles nouvelles	63
4.3.2.	l'origine des boucles	64

5. LES INTERACTIONS DE BASE 69

5.1.	LES CHAÎNES D'OBJETS MENTAUX	69
5.1.1.	le chaînage vertical,	70
5.1.2.	le chaînage latéral	71
5.1.3.	le chaînage est-il une duplication ?	72
5.1.4.	le SNC peut-il abriter des chaînes infinies ?	74
5.2.	L'ASSOCIATION TEMPORELLE D'OBJETS MENTAUX	76
5.3.	LES BLOCS D'OBJETS MENTAUX	78
5.3.1.	la constitution des blocs	79
5.3.1.1.	définition et structure	79
5.3.1.2.	fixation de la structure	79
5.3.2.	la stabilité et le coût d'organisation	80
5.3.2.1.	la tendance naturelle à la stabilité	80
5.3.2.2.	le fonctionnement idéal et le coût zéro	81
5.3.2.3.	l'unité de coût d'organisation	81
5.3.2.4.	la compatibilité intrinsèque entre objets mentaux	82
5.3.3.	le bloc accordé ou dissonant	83
5.3.3.1.	la mesure structurelle	84
5.3.3.2.	la mesure dynamique	85
5.3.4.	la réorganisation dynamique	86
5.3.5.	l'état d'activation d'un bloc	88

6. LES INTERFÉRENCES ENTRE BLOCS D'OBJETS MENTAUX	91
6.1. L'ABSORPTION CANNIBALE	92
6.2. LE STATU QUO PAR EXCLUSION RÉCIPROQUE	96
6.3. L'ABSTRACTION	99
6.3.1. le niveau d'apparition des objets mentaux abstraits	99
6.3.2. la convergence	101
6.3.3. l'élagage des différences	101
6.3.4. les effets de l'abstraction	102
6.3.4.1. du percept au concept	103
6.3.4.2. l'influence des concepts sur le comportement.	103
7. L'INTERPRÉTATION COGNITIVE DU FONCTIONNEMENT DU SNC	105
7.1. GÉNÉRALISATION ET CONFUSION	106
7.2. L'OUBLI	107
7.3. LES ASSOCIATIONS D'IDÉES	109
7.3.1. la recombinaison des blocs d'objets mentaux	109
7.3.2. le devenir des associations d'idées	111
7.4. LES MÉCANISMES DU CHOIX	112
7.4.1. le choix rationnel	113
7.4.2. le choix non procédural	113
8. APPLICATIONS DES OBJETS ABSTRAITS	117
8.1. LES OPÉRATEURS LOGIQUES BOOLÉENS	118
8.2. LA MÉMOIRE ASSOCIATIVE	120
8.3. LES PRÉDICATS LOGIQUES RELATIONNELS	121
9. APPRENTISSAGE, MÉMOIRE À COURT TERME, MÉMOIRE À LONG TERME	127
9.1. LA MÉMOIRE À COURT TERME	127
9.2. LES DÉBUTS DE LA MÉMOIRE	131
9.3. LA MÉMOIRE À LONG TERME	136

9.4. LE PASSAGE DE LA MÉMOIRE À COURT TERME VERS LA MÉMOIRE À LONG TERME	137
10. PERCEPTION, ACTION ET CONSCIENCE	143
10.1. L'ACTION VOLONTAIRE	144
10.2. LA PERCEPTION	146
10.3. CONSCIENCE ET INCONSCIENCE	148
11. LES OBJETS MENTAUX ET LE TEMPS	151
11.1. LE SCHÉMA CAUSAL	152
11.2. LA VALEUR FONCTIONNELLE	154
11.3. LA SÉQUENCE TEMPORELLE MOTRICE	156
11.4. LA SÉQUENCE STIMULUS-RÉPONSE	157
12. LA REPRÉSENTATION DE L'ACTIVITÉ MENTALE EN FONCTIONNEMENT	161
13. LA DOUBLE BOUCLE DE L'ORGANISME ET DU SNC	165
13.1. LA DOUBLE BOUCLE DE L'ORGANISME	166
13.2. LA DOUBLE BOUCLE DU SNC AU SEIN DE L'ORGANISME	170
13.3. LA DOUBLE BOUCLE AU SEIN DU SNC	173
13.3.1. les différentes origines des signaux	175
13.3.2. la matérialité apparente des objets mentaux activés	176
13.4. LA DOUBLE BOUCLE COMME SUPPORT DE L'APPRENTISSAGE	177
13.4.1. l'invariance de la double boucle	177
13.4.2. l'apprentissage par couplage au réel	178
13.4.3. la double boucle, la loi de Hebb et l'apprentissage	181
14. LE FILTRAGE, LA PERCEPTION ET LE COMPORTEMENT	183
14.1 DÉFINITION	183

14.2. LES EFFETS ÉLÉMENTAIRES	184
14.3. LE FILTRAGE PERCEPTIF	187
14.4. LES CAPACITÉS	190
14.5. ADAPTATION ET ADAPTABILITÉ	191

**15. LE PHÉNOMÈNE DE L'ACTIVITÉ MENTALE
COGNITIVE AUTOMATIQUE** 195

15.1. LES FILTRES GÉNÉRALISÉS	197
15.2. L'ACTIVATION SIMULTANÉE DES FILTRES	199
15.3. L'ÉTAT DE VEILLE, LE BOUCLAGE AUTO-REPRODUCTEUR ET LES CONTRAINTES DU MILIEU	200
15.3.1 les contraintes de couplage	200
15.3.2 le bouclage auto-reproducteur	201
15.3.3 l'état de veille	202
15.4. ÉCONOMIE PSYCHOLOGIQUE ET RÉGULATION DE L'ACTIVITÉ ..	203
15.4.1. une approche économique	203
15.4.2. les coûts psychologiques	204
15.4.3. la dynamique psychologique	205

**16. FONCTIONS COGNITIVES ET
APPRENTISSAGE - CONCLUSION** 209

16.1. LA MACHINE À OBJETS MENTAUX	209
16.1.1. le modèle biologique	209
16.1.2. les conditions d'apparition de la machine à objets mentaux	210
16.1.3. les caractéristiques de l'apprentissage	211
16.2. OBJETS MENTAUX ET FONCTIONS COGNITIVES	213
16.3. LES PERSPECTIVES DU MODÈLE À OBJETS MENTAUX	215
16.3.1. Les points techniques acquis	215
16.3.2. Les rapports avec les modèles de l'Intelligence Artificielle	217
16.3.3. Les développements du modèle à objets mentaux	218

EPILOGUE 221

En guise de Prélude à la “ Leçon de Piano ” de Christophe Lecerf

Le livre de Christophe Lecerf est, dans ma propre appréhension des choses, une de ces pierres d’angle scientifiques de la fin de notre siècle, à côté de laquelle il convient de s’arrêter sous peine de rater quelque chose d’important. J’ai peu coutume de m’enthousiasmer pour un ouvrage, en particulier pour un ouvrage dit de sciences cognitives, dans la mesure où nous sommes abreuvés depuis quelques années d’oeuvres de spécialistes satisfaits d’observer le monde par le petit bout de leur lorgnette, et encore plus satisfaits de présenter leur observation comme étant le monde lui-même.

Christophe Lecerf, un jour, au détour d’une conversation, m’a présenté une ébauche de travail scientifique récapitulatif de ses propres recherches. Depuis «The Modularity of Mind» de Fodor (1983), je n’ai lu aucun livre sur les modèles de l’esprit plus avidement que cette ébauche. Quelque part, dans un coin, de façon tout à fait anonyme, dans l’attitude modeste et authentique du chercheur, Christophe Lecerf a mis bout à bout le microscopique et le mésoscopique, la machine humaine et la machine électronique, le modèle de la pensée et ses substrats neuronaux. C’est ce travail de “ moine ” de la recherche, non pas dans son acception d’archiviste, mais dans celle d’exigence et d’absolu, que j’ai l’immense honneur de présenter aujourd’hui.

Cette première ébauche fut difficile à lire, car l’homme qui a capitalisé en lui l’expérience de la recherche a du mal à la médiatiser. Ce que vous allez parcourir, cher lecteur, vous paraîtra probablement toujours difficile, mais l’écriture croyez-moi en a été épurée, simplifiée, et grandement embellie : l’auteur a fait un effort de clarification remarquable. En revanche, s’il faut quand même s’accrocher, c’est parce que la matière de ce livre reste dense sans être confuse, riche sans être écoeurante, ardue parce que la science elle-même requiert que l’on fasse un effort pour elle, et qu’un travail scientifique ne pourra jamais se réduire à un article journalistique.

Cela dit, la patience sera certainement récompensée, car la démarche de l'auteur est profondément pédagogique : parce que Christophe Lecerf a parcouru de bout en bout tout le problème de la modélisation de la pensée, il va retracer pour vous l'ensemble de son cheminement. C'est donc à la fois un ouvrage de généraliste et de spécialiste, et de ce fait, il échappera toujours à une classification abusive.

Généraliste, ce travail l'est dans son ampleur et dans sa nécessité de redéfinition des notions de base. On part de la question fondamentale : que fait un neurone ? Cette question est beaucoup plus importante, croyez-moi, que la description en constituants de la cellule nerveuse. Une définition fonctionnelle a pour objectif de nous montrer comment on peut partir du substrat granulaire le plus petit au-dessus duquel la pensée va commencer à se former. Rassurez-vous, Lecerf ne commet pas le énième livre sur les neurones. Pour lui, comme pour nous, c'est le début.

Le neurone, c'est la brique matérielle à partir de laquelle va se former l'Objet Mental, qui est une association fonctionnelle de neurones qui " produit " de la pensée. Là est l'apport très spécialisé de l'auteur. L'objet mental, vu comme une boucle d'abord, puis construit comme une boucle double, structure hautement stabilisante, si évidente, mais si géniale, comme toutes les évidences...

A partir de l'objet mental originel, Christophe Lecerf montre comment des lois de composition de ces objets permettent de créer des objets de plus en plus complexes, de plus en plus abstraits. Des mécanismes que nous connaissons tous, comme l'association, l'oubli, l'agrégation, sont minutieusement décrits, avec rigueur et compétence, dans le cadre de référence du modèle. On voit alors l'oubli comme un processus nécessaire, alors qu'on le pensait indésirable, et la pensée structurée émerge des combinaisons d'objets mentaux induites par leurs potentialités et par les contraintes du milieu ambiant.

Au passage, de façon magistrale, l'auteur montre que le système " informationnel " dans lequel on peut modéliser le système nerveux central des êtres vivants, est un système comprenant l'organisme et son environnement. Il retombe sur des résultats de la systémique des Organisations découverts par des économistes et des sociologues comme Mèlèze ou Le Moigne.

Il montre aussi comment la pensée abstraite se fait par sublimation des objets mentaux structurant les perceptions concrètes, la sublimation ne modifiant pas la nature du support.

C'est le même modèle qui sert de support aux objets mentaux représentant les images perçues par l'oeil ou les sons par l'oreille, et aux structures symboliques de la logique des prédicats. Ce n'est pas une boutade, la «leçon de piano» décrit largement les deux aspects. Plus encore, les objets mentaux représentant des émotions sont de même nature et structure que ceux de la pensée : ils n'ont simplement pas la même "coloration", et ce n'est qu'une question de paramètres.

En trois coups de cuillère à pot, Christophe Lecerf règle son compte au vieux dilemme et de l'intérieur et de l'extérieur : tous les objets mentaux sont exprimables dans le même modèle, quel que soit le mécanisme (acquisition ou abstraction, émotion ou perception) qui ait servi à les engendrer. Ça, c'est une pierre dans le champ des cognitivistes purs et durs : l'émotion est un environnement cognitif pour l'auteur, et sa théorie permet de rendre compte des "confusions" apparaissant dans certaines pathologies, à savoir lorsque les représentations d'origine émotionnelle ne sont pas dissociées par le sujet des représentations d'origine sensorielle ou abstraite.

Christophe Lecerf démontre, et c'est bien le terme qui convient, que la représentation d'une information (par objet mental) n'a rien à voir avec la conscience qu'en a le sujet. Toutes les informations sont représentées par le biais des mêmes briques de base dans le cerveau, et donc sont conjugables à loisir. En revanche, c'est le sujet qui, être conscient, va décider si tel ou tel objet mental désigne correctement ou non un objet du monde extérieur.

Cette décision, l'ouvrage montre qu'elle est souvent le résultat de l'application d'un mécanisme complexe de pondération sur les objets mentaux : une extension de la loi de Hebb, dit l'auteur. Une instanciation rigoureuse et complète du principe selon lequel plus une représentation est sollicitée et donc validée, plus elle a des chances d'être présente et prégnante à chaque interaction entre l'organisme et son environnement.

Les organismes vivants, qu'ils soient individuels ou collectifs, apprennent. L'apprentissage est le processus par lequel les objets mentaux se multiplient. En expliquant patiemment, en bon professeur qu'il est, toutes

les techniques afférentes à cette genèse et à sa reproduction, Christophe Lecerf comble un grand vide épistémologique dans notre problématique scientifique. Jusqu'à présent, nous avons d'un côté les "neuros" qui expérimentaient sur la quincaillerie biologique, et montraient les relations concrétisées dans leur substrat organico-chimique. D'un autre côté, nous avons les "psychos" qui travaillaient avec des organismes complexes que sont des enfants ou des adultes en situation d'apprentissage, et, ne pouvant sonder la quincaillerie, observaient son comportement global. C'est comme si, pour comprendre une application informatique, d'un côté on autopsiait les composants de la machine sur laquelle elle tourne, et d'un autre côté on fournissait un jeu d'essais au logiciel pour extrapoler ses fonctions à partir des résultats observés.

En proposant sa Théorie des Objets Mentaux, Christophe Lecerf jette une passerelle entre ces deux extrémités : il fait un vrai travail d'informaticien, c'est-à-dire un travail de modélisateur de systèmes dont on ne connaît que les contraintes. Comment modélise-t-on ces systèmes ? Eh bien, on crée un énoncé théorique, qui s'appelle spécification, qui est tel qu'il satisfait toutes les contraintes du système. Ce faisant, on introduit des contraintes intermédiaires, mais l'ensemble doit obéir toujours au postulat de la cohérence logique. Les Objets Mentaux en double boucle sont un modèle satisfaisant de comment on passe du neurone de Changeux et Dehaene au Modèle Mental de Johnson-Laird en psychologie cognitive. On peut vérifier la cohérence intrinsèque de ce modèle en utilisant un ordinateur comme un vérificateur de non-contradiction : c'est ce que Christophe Lecerf a fait. Il a aussi utilisé les ordinateurs comme supports de simulation de son modèle dans des cas théoriques, et en a déduit un certain nombre de résultats intéressants.

Mais il y a beaucoup plus. Ce n'est pas par hasard que l'informatique est probablement la discipline intrinsèquement fondamentale d'une compréhension scientifique de la cognition. Le modèle des Objets Mentaux est un modèle de nature informatique : la double boucle est inscrite dans les "gènes" de notre appréhension du traitement automatisable de l'information. Si ce modèle, de nature informatique, vérifié dans sa cohérence interne par un ordinateur, se révèle être davantage qu'une passerelle théorique entre deux champs d'investigation scientifique, alors il faudra reconsidérer très fortement notre appréhension de l'artefacture. Mais la réponse est là, dans les objets mentaux eux-mêmes : il n'y a guère de différence entre le dedans et le dehors. Il n'y a guère de différence peut-être entre ce que nous énonçons des objets mentaux et les objets

mentaux qui matérialisent cette énonciation. Qu'ils soient naturels ou artificiels par simulation, sur le plan fonctionnel, quelle importance, même si sur le plan ontologique, la distinction est incontournable. C'est une question à méditer, mais la «leçon de piano» donne à méditer à chaque page, voire à chaque paragraphe. La richesse d'une théorie n'est pas tant proportionnelle au nombre de réponses qu'elle donne, qu'au nombre de nouvelles questions qu'elle soulève. Grâce au modèle de l'auteur, je m'émerveille de découvrir un océan de questions nouvelles qui moutonne aussi loin que l'oeil peut le suivre... Et je souhaite à tout lecteur le même enchantement.

Car cet enchantement, depuis Fodor jusqu'à Edelman en passant par Winograd et Minsky, je ne l'avais pas eu. Cela pour ne citer que l'École anglo-saxonne récente, sans omettre les fantômes des philosophes de la computation, comme Wittgenstein, Popper, Russell ou Husserl, ni oublier le néo-matérialisme sans dialectique de la neurobiologie de Changeux. Ces noms illustres ont été largement salués pour leur apport à la science : ils n'ont guère besoin d'approbation complémentaire. Pour ma part, je suis heureuse de chanter les louanges de la «leçon de piano».

*Violaine Prince
Professeuse des Universités
IUT de Montreuil
Université Paris 8 Vincennes Saint-Denis*

Christophe Lecerf est Maître de Conférences en Informatique à l'Université Paris 8 Vincennes Saint-Denis et enseigne à l'IUT de Montreuil. Chercheur en informatique, il est aussi Docteur en médecine, psychiatre et médecin du sport.

1. UNE LEÇON DE PIANO

Apprendre à jouer du piano, selon une méthode classique, comprend plusieurs étapes. Pour le débutant, tout commence par l'apprentissage des mouvements des doigts. Cela signifie aussi l'apprentissage des positions des touches sur le clavier, l'objectif étant finalement d'appuyer sur la bonne touche au bon moment. Il y a donc plusieurs mouvements différents à maîtriser, selon quelques séquences de touches typiques. Toujours dans les mouvements de doigts, il y a aussi les accords, qui imposent le mouvement simultané de plusieurs doigts. Et puis, il ne faut pas l'oublier, nous avons deux mains. Et la plupart des morceaux nécessitent l'usage des deux ! Voilà déjà un bon nombre d'apprentissages à constituer, à peaufiner, à bien distinguer les uns des autres (car ils se ressemblent !). Toutes ces acquisitions relèvent de l'habileté manuelle, c'est-à-dire du **domaine psychomoteur**.



Mais ce n'est pas tout. Un tout autre domaine, généralement abordé en même temps que le précédent, est celui de la musique proprement dite, c'est-à-dire du solfège, des tonalités, des gammes, des mesures, de la lecture des notes et divers symboles sur une partition. Clef de voûte de la musique, l'harmonie est une discipline très complexe, et les débutants n'y sont que peu ou pas confrontés, mais la matière musicale reste volumineuse même sans cela. Là encore, il y a beaucoup de choses à apprendre et à maîtriser, et cela bien avant d'être capable de déchiffrer une partition tout en la jouant. Les acquisitions et apprentissages de ce domaine entrent plutôt dans la catégorie des **connaissances abstraites**.

Très vite, selon une pédagogie habituellement pratiquée, l'élève travaille des compositions plus ou moins longues et techniques. Cela le familiarise avec tous les aspects de la musique, et permet de le motiver en marquant

clairement la progression. Il lui faut mémoriser les séquences de notes, presque intégralement de bout en bout. La partition sert alors de fil directeur pendant l'exécution, le musicien ne la lisant plus au moment de la jouer. L'élève construit progressivement des représentations pour des portions de cette séquence, et petit à petit, il les enchaîne. Voilà un troisième domaine d'acquisitions spécifiques : les **séquences temporelles**.

Pour les musiciens, la musique n'est pas vraiment réductible à une séquence de notes, c'est plutôt un véhicule pour les émotions. L'élève qui se contente d'aligner les notes les unes derrière les autres, même en respectant le rythme, ânonne le morceau, au point que la mélodie et la structure peuvent en devenir imperceptibles pour l'auditeur. Par opposition à ânonner, jouer le morceau implique une dimension supplémentaire par rapport au mouvement des doigts, en l'occurrence l'utilisation du phrasé, de la mise en valeur de certaines notes par rapport à d'autres pour susciter des émotions. En bref, l'élève produit une interprétation de la musique écrite sur la partition. Au niveau le plus élevé, l'interprétation est l'expression personnelle de la sensibilité de l'artiste, elle fait appel à un ensemble de connaissances et de qualités encore différent des trois précédents, et nécessite une maîtrise technique totale. C'est généralement la dernière phase de l'apprentissage pour devenir pianiste virtuose.

Qu'est-ce alors que jouer du piano ? Qu'on soit virtuose ou débutant, jouer un morceau implique au moins l'utilisation des savoirs acquis dans les trois premiers domaines : technique, connaissance de la musique, séquence mélodique. Le débutant aura déjà du mal à gérer simultanément tous ces aspects, et ne pourra guère se consacrer à l'interprétation d'un morceau. Le virtuose au contraire maîtrise la technique au point de ne plus y penser. Le passage à l'arrière-plan des mouvements élémentaires, par rapport au niveau conscient, est d'ailleurs la marque d'une maîtrise acquise, même pour un pianiste débutant. Fort de cette maîtrise qui laisse son esprit libre, le virtuose peut mettre toute son attention à interpréter au mieux la musique pour exprimer ce qu'elle lui évoque. Ou encore à montrer qu'un même morceau peut susciter des émotions variées selon la manière dont il est joué. Mais pour le virtuose comme pour le débutant, jouer du piano c'est finalement exploiter des capacités, c'est-à-dire utiliser des acquisitions issues d'apprentissages.

Apprentissage, mémoire, capacités, conscience, maîtrise technique, connaissances abstraites, toutes ces notions illustrées dans la leçon de piano vont être explicitées et reconstruites à partir du concept d'*objet*

mental. Tel que nous le présentons ici, l'objet mental peut être le support unique, homogène, de toutes les connaissances et représentations acquises dans les Systèmes Nerveux (SNC) évolués. Nous montrerons que, dans cette conception, l'objet mental peut prendre sa place d'élément central dans le schéma cognitif, et être ainsi le pivot du comportement de l'individu.

L'objet mental est un objet au sens plein car il est doté d'une structure propre et d'une dynamique particulière, lesquelles sont indépendantes de celles des neurones qui le constituent. La structure de l'objet mental détermine sa dynamique, laquelle en retour modifie la structure. Ainsi, parce que structure et dynamique sont intimement liées, elles donnent à l'objet mental ses propriétés et qualités spécifiques. Grâce à celles-ci, l'objet mental, véritable superstructure vis-à-vis des neurones, peut être le support des fonctions cognitives.

La progression de l'ouvrage permet de construire un objet mental avec des neurones, puis de faire apparaître les caractéristiques de l'objet mental, de groupes d'objets mentaux, et enfin d'un réseau d'objets mentaux. Plusieurs mécanismes fondamentaux du fonctionnement cognitif du SNC seront ainsi éclairés, dont les notions d'objet mental abstrait, de coût organisationnel et de conflit interne. Enfin, après analyse des flux de circulation des informations et des effets de filtres des représentations, le phénomène de la conscience et le comportement de l'individu pourront être interprétés en termes d'objets mentaux.

1.1. LES NIVEAUX D'ÉCHELLE D'OBSERVATION



0
le guide

Nous proposons dans les sections suivantes un voyage inhabituel du concret vers l'abstrait qui, partant de la cellule nerveuse, nous mènera jusqu'à l'observation du comportement de l'individu tout entier. Cette progression du plus petit vers le plus grand suppose des changements d'échelle importants que nous signalerons explicitement avec l'icône ci-contre afin de marquer des repères. Arbitrairement, nous numérotions ces différents niveaux d'échelle à partir du niveau 1 qui désigne le niveau d'échelle le plus petit, celui de la cellule nerveuse. Le numéro du niveau apparaît ainsi à côté de l'icône, ici le 0 pour introduire ce guide.

1.2. GUIDE DE LECTURE

L'ouvrage comprend 16 chapitres que l'on peut regrouper en trois parties et une conclusion.

Première partie : aspects techniques des objets mentaux

Cette partie décrit les caractéristiques du modèle à objets mentaux avec une approche assez technique. Le lecteur trouvera ici l'explication des mécanismes qui sous-tendent les fonctions cognitives.

- Les chapitres 2 à 4 exposent toutes les étapes de la construction et de l'étude des propriétés de l'objet mental, puis des interactions entre eux.
- Les chapitres 5 et 6 sont consacrés à l'étude des blocs d'objets mentaux et de leurs interactions. Les notions de coût d'organisation et d'objets mentaux abstraits y sont introduites et développées. La tendance naturelle des réseaux à établir un fonctionnement stabilisé y est expliquée.

Deuxième partie : les fonctions cognitives ré-interprétées

A partir des propriétés des objets mentaux en double boucle, cette partie montre le caractère émergent des fonctions cognitives .

- Le chapitre 7 propose une explication des fonctions cognitives, telles que l'abstraction, la reconnaissance et l'oubli, le choix et les associations d'idées, sous forme d'interprétation symbolique de la mise en œuvre des mécanismes construits dans les chapitres précédents.
- Dans le chapitre 8, les mécanismes classiquement utilisés en intelligence artificielle sont expliqués à partir de ces mêmes mécanismes.
- Le chapitre 9 réinterprète les notions psychologiques classiques de Mémoire à Court Terme (MCT) et Mémoire à Long Terme (MLT) en termes d'objets mentaux. Le mécanisme à l'origine des doubles boucles et de la fixation des premières représentations y est exposé.

Troisième partie : conscience et comportement

Cette partie aborde les aspects les plus riches du fonctionnement des systèmes nerveux évolués dans une perspective résolument cognitive qui donne aux représentations une place centrale dans le comportement de l'individu.

- Les chapitres 10 et 11 traitent de la représentation du temps et de ses effets, notamment de l'apparition du schéma causal.
- Le chapitre 13 étend la structure en double boucle des objets mentaux à l'analyse des échanges de l'organisme et du SNC. Le mécanisme du couplage du SNC sur l'organisme et sur l'environnement y est expliqué.
- Le chapitre 14 expose les effets de filtrage induits par les objets mentaux et le rôle de ces filtres dans le contrôle du comportement. Les mécanismes de l'adaptation de l'individu, et la place du SNC dans ce processus, sont abordés.
- Le chapitre 15 est consacré à l'examen du phénomène de l'activité mentale cognitive automatique, première approche explicative de la conscience comme contrôleur du comportement de l'individu. Les bases d'une analyse économique de la psychologie sont aussi proposées.

Le chapitre 16 conclut l'ouvrage en résumant, au regard des objets mentaux en double boucle, les rapports entre fonctions cognitives et apprentissage.

2. DU NEURONE À L'OBJET MENTAL

L'énorme majorité des cellules nerveuses du système nerveux central (SNC) est localisée dans le cerveau, dans deux hémisphères qui forment l'encéphale. L'encéphale est fondamental pour notre étude car c'est là que siègent les fonctions de perception, d'action volontaire et les fonctions cognitives.

Dans la profondeur du cerveau, dans un petit volume situé au centre de la tête, se trouvent les systèmes de régulation biologiques, les centres qui reçoivent et envoient des signaux aux organes, glandes, cœur, poumons, etc... A la surface du cerveau, occupant un grand volume, on décrit des zones corticales spécialisées dont la fonction est connue. La plupart de ces zones correspondent à des fonctions de perception (ouïe, vue, toucher,...) et à des capacités associées : par exemple l'aire du langage se situe à côté de l'aire auditive, les aires de la motricité volontaire sont proches des aires de la sensibilité proprioceptive. Tout en avant du cerveau, on trouve les aires frontales et préfrontales où se situent le cortex associatif et, selon des travaux récents, le siège de la personnalité¹.

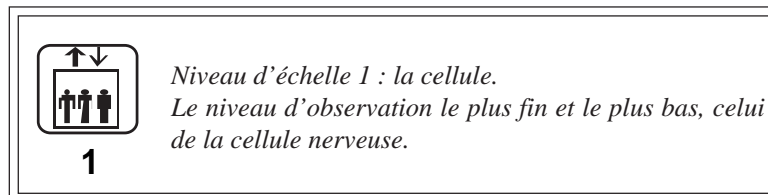
2.1. LA STRUCTURE DE L'OBJET MENTAL

La caractéristique majeure qui distingue l'espèce humaine des autres espèces animales est l'importance anatomique du cortex frontal et préfrontal dans le cerveau. Le développement particulier de cette zone du cerveau, d'apparition récente dans l'évolution, témoigne bien plus de ce qui sépare un homme d'un chat que la structure de leurs neurones respectifs. En effet, non seulement les neurones de l'un et l'autre sont très proches, mais les structures organisées (zones dédiées à la perception, à la vision, à la motricité), l'organisation de celles-ci et leur répartition spatiale sont

¹ Les résultats des interventions neuro-chirurgicales, des lobotomies préfrontales et des accidents neurologiques plaident très fortement en faveur de cette conception. Il est par ailleurs acquis que d'autres zones cérébrales interviennent dans l'expression des facultés intellectuelles, le bon fonctionnement global de celles-ci restant fortement corrélé à l'intégrité fonctionnelle de tout le cortex cérébral. L'ouvrage de Antonio R. Damasio, «L'erreur de Descartes» est très éclairant sur ce sujet. (Editions Odile Jacob, Paris, 1995).

aussi très comparables. En revanche, l'homme est doté d'un système nerveux central spécifique du fait du volume et de la place fonctionnelle occupée par les aires dites associatives. Ces zones du cerveau sont en effet connectées à toutes les autres structures existantes : elles ont un rôle intégrateur et sont le siège des facultés intellectuelles et affectives qui fondent la personnalité.

2.1.1. le neurone



La cellule nerveuse, ou neurone, est une cellule spécialisée dont l'activité est essentiellement électrique. Surtout présente dans le système nerveux central, elle traite, fabrique, transporte et transmet des courants électriques (très faibles) dans l'organisme (voir figure 1). Ces courants sont évidemment interprétés différemment selon l'organe qui les reçoit. Les muscles se contractent, les glandes sécrètent des substances, et les neurones les intègrent pour produire éventuellement un autre signal sous forme de courant électrique. Les neurones ne sont pas seuls à produire des signaux. Tous les organes récepteurs, notamment ceux à l'origine des sens comme l'ouïe, la vue, le toucher, produisent aussi des courants électriques qui sont acheminés vers le SNC. Nous désignerons tous ces échanges et transports de courants entre éléments par le terme de *signaux*.

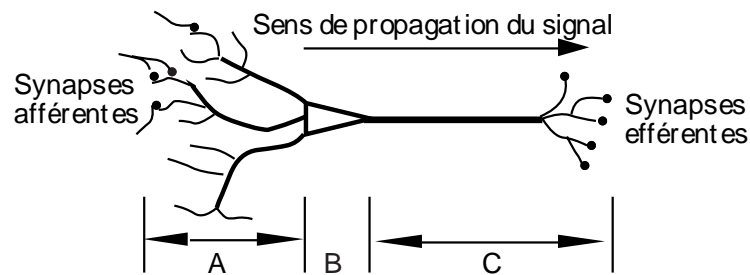


Figure 1 : Schéma fonctionnel d'un neurone

La partie A est l'arbre dendritique, qui permet la collection des signaux reçus ou afférents. La partie B est le corps cellulaire, qui intègre les signaux. La partie C est l'arbre axonal, qui propage le signal généré par le corps cellulaire vers l'extrémité distale du neurone. On parle alors de signaux efférents. Les ● symbolisent les boutons synaptiques, c'est-à-dire les connexions sur les cellules-cibles.

Du point de vue de l'apprentissage, la caractéristique fondamentale des neurones est leur capacité à modifier l'efficacité de leurs *connexions* avec les autres neurones. Une connexion est un point de transmission des signaux entre un neurone émetteur et un neurone cible. Un point de transmission est appelé une synapse (voir figure 2). Schématiquement, l'efficacité d'une synapse est comparable à une batterie solaire : plus la surface d'une batterie solaire est grande, plus elle fournit d'énergie à chaque instant. Dans la synapse, une série de récepteurs est placée devant une source de neuromédiateurs. Quand le nombre de récepteurs augmente, l'efficacité de la connexion augmente, et dans le cas contraire, elle diminue. Le neurone est capable d'adapter la surface de ses récepteurs dans une synapse. Cette modification du nombre de récepteurs est durable. Elle est une des conséquences de l'activité du neurone, et elle peut être modifiée par apprentissage.

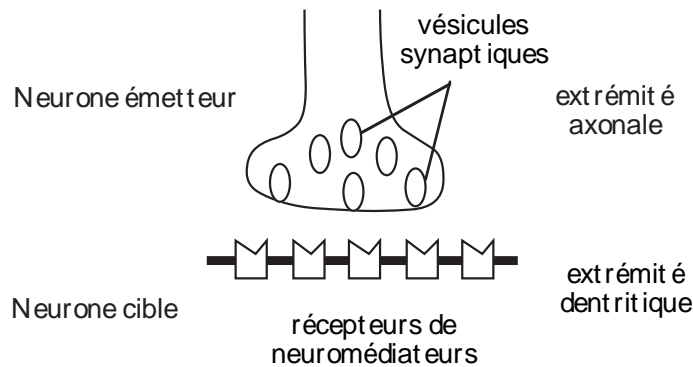


Figure 2 : schéma d'une synapse

La synapse est le lieu de transmission du signal électrique d'un neurone à un autre. La transmission est chimique, au moyen de neurotransmetteurs. Ceux-ci, contenus dans les vésicules synaptiques, sont libérés dans l'espace synaptique lors de l'arrivée du signal pré-synaptique du neurone émetteur. Fixés sur les neurotransmetteurs, ils contribuent à générer un signal électrique post-synaptique dans le neurone cible.

Un neurone activé produit un courant électrique faible, appelé potentiel d'action et d'une amplitude de 100 mV, qui se propage le long de l'axone vers les cellules cibles. Le déclenchement du potentiel d'action est automatique dès que le potentiel de membrane, qui est normalement de -70 mV, atteint la valeur seuil de -30 mV. Chaque synapse activatrice a pour effet de rapprocher le potentiel de membrane de ce seuil, alors que chaque synapse inhibitrice l'en éloigne.

Une cellule est ainsi un dispositif de sommation temporelle qui traduit le bilan de cette sommation par l'émission plus ou moins rapide d'un potentiel d'action. Si la prédominance activatrice est très nette, les potentiels d'action émis seront nombreux et très rapprochés dans le temps. Dans le cas contraire, ils seront plus rares et éloignés. C'est ainsi que l'on peut exprimer le niveau d'activité d'un neurone au moyen de la fréquence des signaux qu'il émet. Un neurone fortement excité aura une fréquence d'émission importante. Au contraire, un neurone non excité aura une fréquence d'émission très faible.

La propagation du signal le long d'un neurone est un phénomène électrique. La transmission du signal d'une cellule à l'autre est un

phénomène chimique. En effet, au niveau du bouton synaptique, le potentiel d'action provoque la libération dans l'espace synaptique autour de la cellule d'une petite quantité d'un neuromédiateur. Chaque molécule est très vite captée et fixée sur les récepteurs. Un neurone peut voir le nombre de récepteurs membranaires augmenter ou diminuer au niveau d'un bouton synaptique (voir figure 3). Quand le nombre de récepteurs augmente, l'efficacité de la connexion augmente, et dans le cas contraire, elle diminue. On dira que le poids de la connexion augmente ou diminue. Il existe une centaine de neuromédiateurs dans le cerveau humain, dont chacun agit comme la clef spécifique d'une serrure particulière, le récepteur correspondant.

Dans les simulations informatiques de réseaux de neurones, on associe à chaque connexion entre deux cellules un *poids* sous forme d'un nombre. Ce nombre est un coefficient multiplicateur du signal reçu, par exemple de 0 à 1. Il exprime l'importance ou l'efficacité de la connexion, qui est donc maximum pour un poids de 1. Le poids ainsi défini reflète une approche très schématique du transfert de signaux entre deux cellules via une synapse, mais c'est une vision juste dans son principe et, comme elle est simple à utiliser, nous y ferons souvent référence.

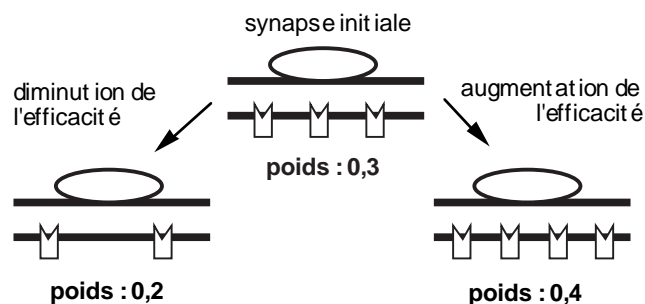


Figure 3 : La modification de l'efficacité de la connexion

Le poids de la synapse est initialement de 0,3. Par suite de l'activité du neurone et de la connexion, le nombre de récepteurs dans la membrane post-synaptique peut diminuer ou augmenter. L'efficacité de la connexion subit une évolution dans le même sens. Le poids rattaché à la connexion diminue ou augmente de la même manière.

La modification de l'efficacité des synapses, c'est-à-dire du poids des connexions, est un phénomène naturel. En physiologie, on a observé que la maturation psychomotrice se traduisait par l'établissement d'une liaison

efficace entre un faisceau musculaire et le neurone qui le pilote, alors que simultanément toutes les autres liaisons sur ce faisceau devenaient inefficaces au point de dégénérer et disparaître. En termes de poids, cela se traduit pour la liaison efficace par une valeur à 1 (le maximum), et pour toutes les autres liaisons par un poids nul (le minimum).

La maturation psychomotrice est un phénomène couramment observable. Par exemple, chez le jeune enfant, les mouvements des doigts III, IV et V sont souvent associés, c'est-à-dire que la flexion ou l'extension concerne globalement le groupe des trois doigts. Avec du temps et un apprentissage pratique, répété comme par exemple au piano, l'enfant apprend progressivement à dissocier les mouvements de chaque doigt. Ainsi, il sélectionne un «pilote» différent pour chacun des doigts.

Autrement dit, le système neuro-musculaire a appris la différenciation des doigts en donnant des poids maximum aux connexions entre chacun des pilotes et les muscles concernés.

2.1.2. des connexions activatrices ou inhibitrices

Dans le SNC, il existe deux types de synapses. Les unes sont activatrices, et tendent à provoquer l'activité du neurone cible. Les autres sont inhibitrices et s'opposent à cette activation. Chaque neurone est ainsi soumis en permanence à ces deux influences contraires : activation et inhibition. Quand un neurone est activé, cela traduit une prédominance globale des influences activatrices par rapport aux influences inhibitrices.

En principe, un neurone n'utilise qu'un seul type de neuromédiateur, qui est activateur ou inhibiteur. On peut donc avoir un *effet activateur ou inhibiteur systématique* lié à la nature du neuromédiateur synthétisé par la cellule. Le neuromédiateur activateur le plus fréquemment rencontré dans le SNC est le glutamate. Le poids des synapses des neurones à glutamate est ainsi toujours positif. Un des exemples de neuromédiateur inhibiteur les plus anciens est le GABA (acide gamma amino-butérique). De même, le poids des synapses des neurones à GABA est toujours négatif. Ainsi, l'activation d'une cellule à GABA inhibe les neurones vers lesquels cette cellule a des efférences. Au contraire, une cellule à glutamate active les neurones cibles vers lesquels elle a des efférences.

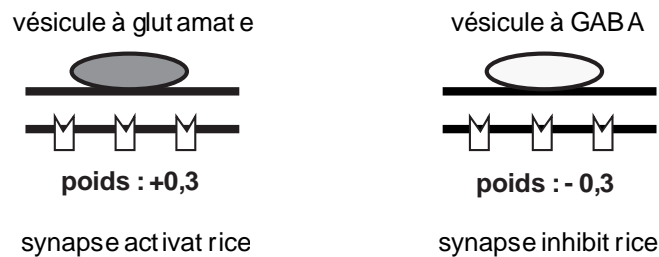


Figure 4 : Schéma de synapses activatrice et inhibitrice
 La synapse à glutamate est activatrice. Le poids qui lui est associé est positif. Elle favorise le déclenchement d'un potentiel d'action. La synapse à GABA est inhibitrice, son poids est négatif. Elle empêche l'apparition d'un potentiel d'action post-synaptique.

2.1.3. l'effet du temps dans la communication entre cellules

En plus de la nature de la connexion, activatrice ou inhibitrice, il faut prendre en considération le facteur temps. En effet, les cellules sont naturellement sensibles au décalage qui existe entre les instants d'arrivée des signaux, c'est-à-dire qu'elles sont sensibles à la phase relative des informations. Le terme de phase désigne l'intervalle de temps entre deux signaux. La phase est relative car on choisit arbitrairement un des deux signaux comme référence. Du fait de la sommation temporelle réalisée au niveau de chaque synapse, une modification de l'intervalle entre deux signaux peut provoquer un changement dans l'équilibre qui conduit à l'excitation d'une cellule, et éventuellement empêcher cette activation.

En effet, toute excitation d'un neurone entraîne, après l'émission du potentiel d'action, une période réfractaire pendant laquelle la cellule ne réagit pas aux signaux afférents qu'elle reçoit (voir figure 5). Pour une cellule, chaque excitation entraîne une inhibition momentanée. Une cellule A qui active une cellule B inhibe donc momentanément les effets de toutes les autres liaisons sur cette cellule B. Cette inhibition de phase est particulièrement manifeste pour les signaux puissants, c'est-à-dire ceux qui passent sur des connexions très efficaces et sont capables à eux seuls de provoquer l'excitation de la cellule cible.

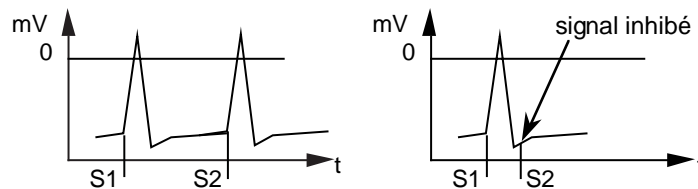


Figure 5 : Les effets de la phase relative sur des signaux puissants
Schéma de gauche, pris isolément, les signaux S1 et S2 sont chacun capables de provoquer une activation. Dans le schéma de droite, au contraire, le signal S2 arrive en pleine période réfractaire. Il est complètement ignoré. Tout se passe comme s'il n'avait pas existé. Il y a inhibition de phase.

Pour les signaux faibles, passant sur des connexions peu efficaces, l'effet de phase existe aussi et on voit apparaître, en plus de l'inhibition de phase, la concordance de phase (voir figure 6). Dans ce cas, c'est le rapprochement relatif des signaux qui, par synergie, va augmenter leurs effets excitateurs. Proches dans le temps, les signaux faibles peuvent cumuler leurs actions et provoquer une excitation. La diminution de la phase relative provoque une concordance de phase. Quand ces signaux sont éloignés ou isolés, il n'y a pas d'excitation. L'augmentation de la phase relative provoque au contraire une inhibition de phase.

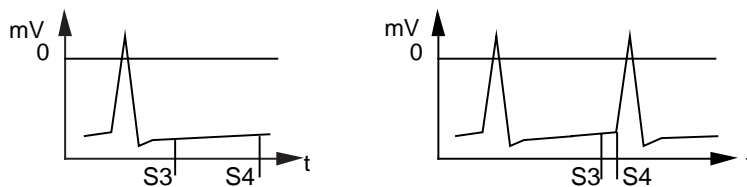


Figure 6 : Les effets de la phase relative sur des signaux faibles
Schéma de gauche, les signaux S3 et S4 isolés n'entraînent pas d'activation. Schéma de droite, la synergie des deux signaux S3 et S4 qui arrivent presque simultanément produit un potentiel d'action. Pour des signaux faibles, un rapprochement temporel entraîne une concordance de phase, et l'éloignement une inhibition de phase.

2.2. LE MÉCANISME DE L'APPRENTISSAGE

Le psychologue Hebb a proposé en 1947 une loi simple pour expliquer l'évolution des connexions entre neurones au cours du temps. Selon cette loi, un neurone renforce une connexion qui a conduit à son activation. Il


en découle que chaque cellule tend localement à augmenter l'efficacité de ses connexions actives, donc à maintenir les conditions régulières de son activité. En un mot, chaque neurone tend à stabiliser son fonctionnement en stabilisant ses connexions en fonction des signaux qu'elles véhiculent.

Un exemple concret de ce mécanisme est particulièrement bien connu. Il a été mis en évidence sur l'innervation des muscles. Il s'agit de l'épigénèse.

A la naissance, les muscles volontaires sont innervés par de nombreux neurones qui ont tous des terminaisons synaptiques sur une même plaque motrice (une structure de la fibre musculaire propre à recevoir les influx nerveux). Commence alors une véritable compétition entre les neurones. Lors de la maturation du système locomoteur, et en rapport avec la pratique des mouvements faite par l'individu, on observe l'élimination progressive de la plupart de ces connexions peu ou pas utilisées. Les terminaisons diminuent de taille puis dégènèrent. Toutes, sauf une. Le neurone restant, seul rescapé de la compétition, reçoit la responsabilité du contrôle de la fibre musculaire. Cette connexion finit par être progressivement la seule utilisée, car la plus fiable, puis la seule utilisable. Ce phénomène d'épigénèse a fait avancer par J. P. Changeux cette proposition paradoxale : «apprendre, c'est oublier».

Ainsi l'hypothèse de Hebb a-t-elle été renforcée. L'arrivée sur une synapse d'un signal, qui participe à l'activation du neurone et contribue ainsi à la propagation des signaux dans le SNC, entraîne l'augmentation du poids de cette connexion. L'efficacité de cette liaison est améliorée par rapport aux autres connexions qui, elles, ne sont pas renforcées. Toutefois, la confirmation définitive de ce mécanisme au sein même du SNC n'a pas encore été apportée à ce jour.

2.3. DES NEURONES FORMANT UN CIRCUIT RÉSONATEUR

	<p><i>Niveau d'échelle 2 : le groupe de cellules interconnectées.</i></p> <p><i>Le niveau d'observation est maintenant un peu plus élevé. On considère un groupe de cellules et leurs connexions réciproques.</i></p>
<p>2</p>	

Un neurone isolé intègre les signaux électriques afférents qu'il reçoit et produit, s'il est activé, un nouveau signal dit efférent. Mais un neurone seul est insuffisant pour remplir une fonction particulière, notamment de perception. Pour réaliser chaque partie de la fonction visuelle par exemple, de très nombreux neurones sont nécessaires. Il en est de même pour les objets mentaux qui sont construits autour de résonateurs en boucle.

Pour fixer les choses, imaginons plusieurs neurones interconnectés formant un circuit en boucle (voir figure 7). Le circuit est tel que l'activation se propage *circulairement* d'une cellule à l'autre, et que chaque cellule reçoit à chaque tour le même signal en provenance des autres². On a ainsi un circuit de cellules qui reproduisent un signal entre elles. C'est un véritable *résonateur*, c'est-à-dire que le signal est entretenu dans la boucle formée par les cellules. En tant que circuit générateur d'un signal, la boucle est alors dite autoreproductrice.

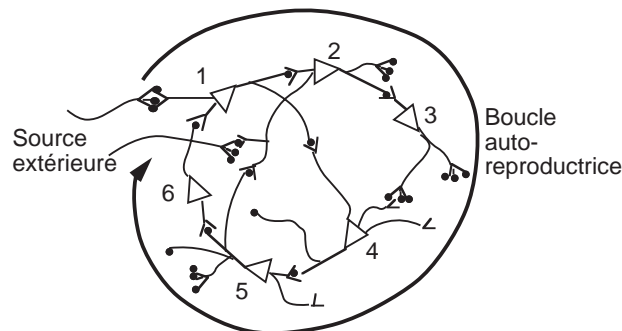


Figure 7 : Un circuit résonateur constitué de 6 neurones.

Le neurone 1 reçoit le signal de l'extérieur de la boucle, et le propage vers les neurones 2 et 4 sous forme de sa propre activation. Ce premier signal reçu par le neurone 4 est une préexcitation facilitatrice. Le neurone 2 est aussi préexcité par la source extérieure. L'activation est ensuite propagée par les neurones 2 et 3, puis 4, 5 et 6. De même que le neurone 1 préexcite le 4, le neurone 5 préexcite le neurone 2, ce qui facilite l'entretien de la boucle. Le signal étant auto-entretenu dans le circuit, on dit que la boucle est autoreproductrice.

² Nous exposerons un peu plus loin (§ 4.3 et 15) les phénomènes physiologiques qui conduisent à construire des circuits résonateurs en boucles.

Dans la leçon de piano, chaque note jouée est un signal sonore qui est reçu dans l'aire auditive du cerveau et qui active le circuit résonateur correspondant à la fréquence de la note. L'oreille est l'organe perceptif qui, grâce à une organisation spécifique, transforme l'énergie acoustique en signaux électriques. Ces signaux sont conduits à l'aire auditive du cortex où ils activent le circuit correspondant à la note. Dans le cerveau, ce circuit est une image sous forme électrique du son de la note jouée. Cette image est activée quand la note est perçue au niveau de l'oreille.


Dans un réseau de neurones comme un SNC, cette boucle n'est pas physiquement constituée avant l'apparition du résonateur, mais elle existe potentiellement sous forme de connexions pré-établies entre les cellules. A la suite d'un stimulus, dit constitutif, nous observons la *concrétisation matérielle de l'image intériorisée* du stimulus sous la forme d'une boucle résonateur. Au tout début, cette boucle est un simple flux de signaux. Ensuite, sous l'effet des répétitions, elle devient une boucle structurelle obtenue par sélection de certains circuits de cellules et connexions.

On pourrait se représenter les choses d'une manière dynamique, en imaginant le réseau comme un labyrinthe et le stimulus comme un chemin dans ce labyrinthe³. La première apparition du stimulus provoque la concrétisation d'un chemin dans le labyrinthe, entre l'entrée et la sortie. Ce chemin est probablement construit un peu au hasard, et il n'est peut-être pas le plus simple. Mais pour le moment, le seul point important est qu'il soit constitué. Les présentations successives du stimulus font parcourir ce chemin de nouveau. Sa trace dans le labyrinthe en est plus marquée.

Dans le réseau, avec la répétition du stimulus, les circuits résonateurs suscités dans le SNC se stabilisent en induisant progressivement des modifications des poids des connexions entre les neurones, c'est-à-dire en induisant une structure qui reflète le flux. Cette modification des poids est la marque structurelle de l'apprentissage dans le réseau, elle favorise la permanence du flux quand il est établi, et sa réapparition quand le stimulus se présente une nouvelle fois.

³ L'analogie demanderait, pour être complète, que la sortie du labyrinthe soit bouclée sur son entrée par une autre voie, par exemple au travers de l'environnement. Cette précision sera discutée et expliquée plus loin, dans la section sur l'organisation en double boucle de l'organisme.

2.4. L'OBJET MENTAL, UN DOUBLE RÉSONATEUR



3

Niveau d'échelle 3 : deux groupes de cellules interconnectées.

Le niveau d'observation s'élève encore un peu. On considère maintenant deux groupes de cellules formant une organisation spécifique : la double boucle de l'objet mental.

Un objet mental est la juxtaposition de deux circuits auto-entretenus : c'est une *double boucle* au lieu d'une simple boucle. Il y a une partie centrale commune aux deux boucles, et deux circuits différents qui se rejoignent pour former la partie commune. Exactement comme deux tourbillons couplés, tournant en sens contraire, et qui évoluent conjointement. L'objet mental est constitué par un *double circuit de résonateurs auto-entretenus* (voir figure 8), il a une structure en double boucle. Cette structure en double boucle s'observe fréquemment dans la nature : à très grande échelle les images météo satellitaires offrent souvent le spectacle des dépressions et anticyclones imbriqués et, à notre échelle, les cours d'eau au lit irrégulier permettent d'en voir facilement.

Il est important de noter dès à présent que la double boucle de l'objet mental est un schéma fonctionnel qui représente une forme d'organisation des flux. C'est une vision abstraite du fonctionnement du SNC, et pas directement l'image d'une structure anatomique existant dans le SNC.

Plus généralement, nous allons progressivement représenter sous forme de flux en doubles boucles, appelés objets mentaux, l'ensemble des échanges entre cellules dans le SNC. La boucle et la double boucle ont une cause et une origine profondément ancrée dans l'organisation biologique, qui sera exposée plus loin, avec l'étude de la structure globale de l'organisme et les origines de la mémoire.

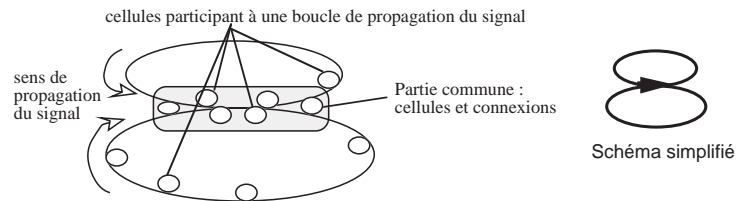


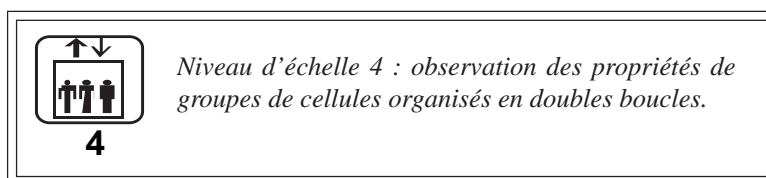
Figure 8 : la structure en double boucle de l'objet mental

La partie commune aux deux circuits résonateurs comprend des cellules et leurs connexions. C'est l'étendue des arbres dendritiques (afférences) et axonaux (efférences) qui permet aux cellules de la partie commune d'appartenir à des boucles différentes.

Concrètement, supposons que le signal entretenu dans la double boucle ait été initialement sélectionné et stabilisé sous l'effet de la perception répétée de la note «La», par exemple du La du diapason à 440Hz. La double boucle de neurones qui est le support du signal électrique auto-entretenu forme dans le réseau une image de l'événement «La» sonore. C'est une image intériorisée de la note «La». Nous dirons que la double boucle formant cet objet mental est la représentation dans le SNC de la note «La».

3. LES PROPRIÉTÉS ÉLÉMENTAIRES DES OBJETS MENTAUX

Ce chapitre expose les caractéristiques de ces constructions nouvelles que sont les doubles boucles. On y trouvera l'explication des propriétés dynamiques des objets mentaux, présentées en fonction des propriétés des cellules qui les constituent. Le point le plus délicat pour le lecteur sera peut-être de garder à l'esprit la nature double des objets mentaux : en tant que flux, ils sont dynamiques, mais en tant qu'ensembles de connexions sur lesquels circule le flux, ils sont dotés d'une structure statique.



3.1. L'ÉTAT DE L'OBJET MENTAL

Un objet mental établi est doté d'une trace structurelle stable sous la forme de l'organisation des poids des connexions, c'est la structure en double boucle. Mais l'objet mental est aussi un objet dynamique, un flux circulant dans chacune des boucles.

L'état de l'objet mental reflète ce flux. Si le flux est régulier, on dira que l'objet mental est activé, s'il n'y a pas de flux régulier, on dira que l'objet mental est muet. Le concept d'état est qualitatif, et le changement d'état est observé a posteriori. Il ne peut y avoir de passage progressif d'un état à un autre.

3.2. LA STABILITÉ DE L'OBJET MENTAL

Une double boucle imbriquée est beaucoup plus stable qu'une simple boucle. En effet, chacune des deux boucles contribue à l'existence, à l'entretien, et finalement au renforcement de l'autre au travers de leur partie commune.

Dans un objet mental, les deux boucles d'un objet mental sont interdépendantes. Très précisément, dans un objet mental activé, les flux des deux boucles sont *essentiellement dépendants* l'un de l'autre plutôt

que dépendants d'autres événements extérieurs auxquels les boucles peuvent aussi participer, soit globalement comme circuit, soit au travers des cellules qui les forment.

Une situation analogue en physique est celle des courants de convection, que l'on observe organisés en cellules de convection dans tous les systèmes avec échange de chaleur (casserole chauffée, atmosphère terrestre, soleil par exemple). Les cellules de convection se groupent avec harmonie, de manière à ce que les frottements entre elles soient réduits au minimum. Ainsi, les cellules de convection se soutiennent et se renforcent mutuellement.

Cette section expose le mécanisme de stabilisation structurelle des objets mentaux. L'origine des objets mentaux sera discutée plus loin, avec l'exposé sur la mémoire au chapitre 9.

3.2.1 le mécanisme de la stabilisation

La double boucle, qui constitue un double résonateur stable, est le résultat d'une *adaptation active* du SNC à un événement. En effet, sous l'influence de la présentation répétée des stimuli en provenance de l'environnement, les poids des connexions sont partiellement réorganisés dans chacune des cellules du réseau jusqu'à former une structure. Par rapport à un résonateur simple, la double boucle imbriquée rend le double résonateur moins sensible à la présence répétée du stimulus car la double boucle assure grâce à l'autre résonateur une partie du flux.

La stabilité est d'abord un effet dynamique du renforcement mutuel des deux boucles imbriquées. Toutefois, s'il n'y avait que cet effet dynamique, sans support structurel, on observerait des doubles boucles instables dans leur taille et leur position. Comme les cellules de convection, certaines s'agrandiraient aux dépens de leurs voisines ou se déplaceraient.

Avec l'adaptation progressive du réseau au niveau des poids de chaque connexion, la stabilité dynamique de la double boucle est renforcée par une composante structurelle. Cette structure favorise ensuite l'apparition du flux dynamique dans la double boucle, puis son entretien une fois qu'il est établi. La configuration structurelle des poids induit préférentiellement l'apparition du circuit qui lui a donné naissance, et elle induit donc un flux stabilisé dans le réseau par l'activation de l'objet mental correspondant.

3.2.2 un exemple de résonateur

Prenons un exemple concret de résonateur stable. Certains musiciens possèdent un véritable diapason intériorisé, permanent, appelé oreille absolue, qui leur permet d'identifier la hauteur d'une note isolée, c'est-à-dire sa fréquence. Ainsi, après avoir appris les notes de la gamme chromatique, ils sont capables d'associer un nom de note, par exemple Ré dièse ou La bémol, à la fréquence d'un son qu'ils entendent. Cette capacité nécessite à l'évidence une référence interne extrêmement stable et durable dans le temps, dont un objet mental en double résonateur serait un excellent support, bien que l'oreille absolue soit connue comme une habileté innée (cet exemple est explicité plus loin, au § 3.5). Le plus souvent, les musiciens sont seulement capables d'associer un son perçu à une position de doigts sur leur instrument. A travers ce moyen extérieur qu'est l'instrument, et à condition qu'il soit convenablement accordé, ils peuvent donner le nom de la note entendue. Ceux qui possèdent l'oreille absolue peuvent se passer d'instrument, il leur suffit de se référer à leur diapason interne pour reconnaître la hauteur de la note et donner son nom.

L'apprentissage s'appuie sur la répétition des événements qui entraîne une stabilisation de la configuration des connexions entre les cellules. Et après bien des répétitions, quand la structure est bien imprimée sous forme de connexions dont le poids varie peu, elle forme un résonateur centré sur son signal déclenchant, et quand il s'agit d'une note, de sa fréquence propre.

Toutefois, dans les instruments de musique à cordes comme le piano, dont chaque corde est un résonateur avec une fréquence déterminée, on étouffe les cordes qui ne sont pas jouées. En effet, sans étouffoir, une corde qui vibre provoque la vibration d'autres cordes, dont certaines sont toutes proches, et cela détériore le son global de l'instrument. Cet effet d'entraînement se produit notamment quand les fréquences propres des cordes sont peu différentes. Cette capacité des cordes à se mettre en vibration à la suite de signaux proches de leur fréquence propre est une propriété des résonateurs en général.

Comme tout résonateur, l'objet mental image d'une note peut être excité par une fréquence différente de la fréquence propre. Dans un cas d'évolution dynamique de réseau, on désigne cet effet en disant que le circuit a une action *d'attracteur local* pour le réseau. Cette action sera étudiée en détail plus loin (cf. § 3.4) pour les effets intéressants qu'elle produit.

3.3. LA RÉACTIVITÉ DE L'OBJET MENTAL

La réactivité peut être vue comme l'inverse de l'inertie montrée par un circuit pour réagir à un signal. Sur un piano, quand le clavier est dur et lourd, il faut une grande force pour obtenir un son. On dit que l'instrument a une grande inertie, ou bien qu'il a une faible réactivité. Inversement, un instrument qu'il suffit d'effleurer aura une grande réactivité, ou une faible inertie.

Dans le cas des objets mentaux, la réactivité se mesurerait plutôt avec le temps de latence dans la reconnaissance de notes sur une portée (perception), ou avec la vitesse d'exécution d'un mouvement de doigts particulier (action).

Pour bien comprendre la réactivité d'une double boucle, il faut maintenant aborder la dimension dynamique des objets mentaux et introduire la notion d'*impulsion*. L'impulsion est la *durée de présence* d'un stimulus nécessaire à l'établissement de la structure en double boucle qui fait résonateur. Si cet événement stimulus a déjà fait l'objet d'un apprentissage, l'établissement du circuit résonateur correspond à l'*activation* de l'objet mental associé à l'événement. Dans le cas contraire, l'établissement du circuit résonateur correspond à l'*acquisition* de l'objet mental.

Les impulsions nécessaires à l'acquisition et à l'activation d'un objet mental ont normalement des valeurs différentes puisque les mécanismes mis en jeu sont différents.

Pendant l'apprentissage, l'impulsion doit être grande car le réseau doit faire évoluer sa structure (les poids des connexions) jusqu'à la stabilisation de la structure des résonateurs. L'impulsion est dans ce cas le temps nécessaire à l'établissement d'une structure correspondant au flux en double boucle. On peut aussi exprimer cette durée sous forme du nombre de répétitions nécessaires à l'acquisition d'une image de l'événement.

Par exemple, au piano, la répétition d'un doigté de passage du pouce dans un exercice permet d'abord de réaliser correctement le mouvement, puis assez vite d'augmenter la vitesse de réalisation. Concrètement, quand le mouvement est correct, on peut considérer que les flux nécessaires au pilotage du doigté sont stabilisés. Par la suite, quand la vitesse d'exécution augmente et approche celle d'un doigté plus facile, on peut considérer que la structure correspondant à cet apprentissage est fixée. La durée de la phase d'acquisition, c'est-à-dire l'impulsion, couvre ces deux périodes.

Les pianistes débutants savent que le nombre de répétitions peut être assez considérable.

Après l'apprentissage, une fois la composante structurelle fixée, l'impulsion peut être beaucoup plus petite car il suffit de ranimer la dynamique d'un circuit qui dispose déjà de sa stabilité propre. Dès que le mouvement de mise en résonance est lancé par l'activation des premières boucles élémentaires, il se propage naturellement par l'entraînement réciproque des circuits. L'impulsion déclenche une réaction automatique. La durée de l'impulsion nécessaire est alors le temps de basculement d'un état stable vers un autre état stable, c'est-à-dire le temps de commutation du réseau d'un résonateur vers un autre résonateur.

Faisons une expérience de pensée pour fixer les idées. Imaginons une large gouttière faiblement inclinée dans laquelle on fait couler de l'eau. Tant que le fond est lisse, l'écoulement est laminaire, c'est-à-dire sans remous ni turbulences. Imaginons maintenant que nous tapissons le fond de la gouttière de cailloux plus ou moins gros et réguliers. Des remous et des tourbillons apparaissent. Les petits cailloux sont parfois emmenés par le courant, les tourbillons qu'ils provoquent sont instables. Les gros cailloux ne bougent pas, et les turbulences associées sont régulières.

L'apprentissage dans un réseau est le reflet exact de l'installation des cailloux : on cherche à obtenir des tourbillons à des endroits particuliers. Et il faut souvent construire les obstacles avec de nombreux cailloux, ce qui nécessite des adaptations nombreuses. De plus, pendant cette opération, il faut prendre garde à ne pas obstruer la gouttière. En effet, une fois les cailloux correctement disposés, les tourbillons existent tant que l'eau s'écoule dans la gouttière. Sans flux permanent, pas de perturbations causées par les obstacles, et pas de tourbillons visibles.

Le phénomène est identique dans le SNC : les objets mentaux ne sont activés que si les signaux arrivent en continu. Si le flux vient à être interrompu, les objets mentaux, comme les tourbillons de la gouttière, disparaissent. Il suffit pourtant de rétablir le flux pour faire réapparaître les tourbillons. L'activation d'un objet mental correspond précisément à cette opération : rétablir un flux de signaux sur une structure pré-existante. Comme les tourbillons dans la gouttière, le circuit résonateur en double boucle n'est pas long à réapparaître dès lors que les stimuli parviennent aux cellules de la structure pré-existante, inscrite sous forme de poids des connexions.

Ainsi, stabilité et réactivité sont bien des caractéristiques indépendantes de chaque résonateur dans le réseau. La stabilité d'un résonateur repose sur la force des connexions dans le circuit, représentée dans notre expérience par la taille des obstacles construits dans la gouttière. La réactivité correspond à l'utilisation fonctionnelle de la structure. Elle repose sur les relations du circuit avec ce qui l'entoure, relations représentées ici par le flux circulant dans la gouttière. Ainsi, l'objet mental idéal est stable car il est formé de gros cailloux, et il est très réactif car, collectant de nombreuses sources, il participe au moindre flux circulant et supporte de gros débits.

3.4. L'OBJET MENTAL, UN ATTRACTEUR LOCAL DANS LE RÉSEAU

Les conséquences importantes de l'effet d'attracteur sur les propriétés globales des objets mentaux, exposées dans les sections suivantes (§ 6), rendent nécessaire l'étude précise de l'origine de cet effet.

Agissant comme un résonateur physique, un objet mental tend naturellement à être activé, ou entretenu, à partir de signaux un peu différents de son signal propre, dès qu'ils rentrent dans l'enveloppe de variation tolérée du signal. Au sein de cette enveloppe, tout signal produit ou entretient l'activation. Au delà des limites de l'enveloppe, un signal est alors forcément différent du signal propre, et ne permet pas l'activation de l'objet mental. L'existence de cet ensemble de signaux variés capables d'entraîner l'activation de l'objet mental définit l'enveloppe de variation des signaux activateurs. Les limites de celle-ci fixent la limite d'action de l'effet d'attracteur de l'objet mental dans le réseau.

Ainsi, une fois établi dans le SNC, l'objet mental résonateur devient un véritable point de convergence pour tous les signaux appartenant à son enveloppe de variation. Par son activité stable et bien établie, l'objet mental empêche l'établissement et l'expression de résonateurs spécifiques pour tous les signaux appartenant à son enveloppe. Les effets de ceux-ci sont alors noyés dans le flux généré par l'objet mental, et ne font que renforcer ce flux sans le différencier.

3.4.1. L'origine de l'effet d'attracteur

L'élément fondateur de l'effet d'attracteur est structurel : c'est l'étendue spatiale des arbres d'afférence et d'efférence dans le réseau. Pour un neurone isolé, les arbres des connexions afférentes et efférentes touchent un grand nombre de cellules, dont certaines participent à un circuit et

d'autres pas. Ce phénomène est évidemment amplifié pour un circuit bouclé comprenant plusieurs cellules.

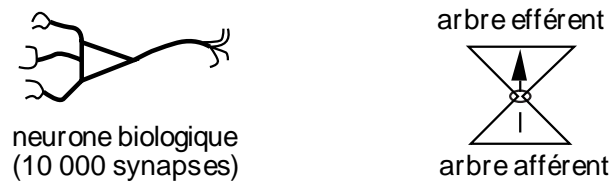


Figure 9 : l'étendue des arbres de connexions

Les dendrites et l'extrémité axonale d'un neurone sont couvertes d'environ 10 000 synapses, qui matérialisent les liaisons avec des centaines d'autres neurones.

Le signal provoquant l'activation d'un neurone est la combinaison d'un ensemble de potentiels d'action élémentaires touchant une ou plusieurs dendrites en des points précis et avec une chronologie particulière (voir figures 1 et 7). Toute autre combinaison de signaux provoquant le même effet constituera un signal équivalent pour la cellule.

Par exemple, sur une cellule, un signal sur une connexion de poids 0.6 pourrait être remplacé par deux signaux sur des connexions de poids 0.3, à condition que ces signaux soient en concordance de phase entre eux, et aussi avec le signal qu'ils remplacent.

Au niveau d'échelle d'un objet mental, le mécanisme est le même. En effet, un objet mental est d'abord un double circuit de neurones bouclés les uns sur les autres. Le signal propre d'une double boucle est en réalité un ensemble de potentiels d'action élémentaires touchant une ou plusieurs cellules du circuit avec des positions et des phases relatives précises. C'est la conjonction de ces signaux qui produit l'apparition du flux qui se propage sur la boucle, c'est-à-dire l'activation de l'objet mental.

Les limites de l'attracteur sont déterminées par les modifications de phase et/ou de position qui ne provoquent pas d'altération de ce signal propre. Plus généralement, on dira que tout signal qui permet le passage ou le maintien de l'objet mental à l'état actif appartient à l'enveloppe de variation. A l'opposé, un signal qui provoquera une transition d'état vers l'état muet n'appartiendra pas à cette enveloppe.

L'enveloppe de variation permet de définir une notion de proximité fort utile. On dira ainsi que des signaux appartenant à l'enveloppe sont proches du signal propre et au contraire que des signaux n'entrant pas dans cette enveloppe sont éloignés du signal propre.

3.4.2. la dynamique de l'état de l'objet mental

Jusqu'à présent, seul le résonateur ou l'objet mental constitués et actifs ont été considérés : un flux de signaux se propage circulairement dans une boucle (résonateur), ou une double boucle (objet mental). Nous allons examiner ici la dynamique du passage de l'état actif à l'état muet de l'objet mental, changement d'état qui provoque dans le réseau l'effet d'aiguillage de flux étudié au § 4.1.

3.4.2.1 la transition de l'état actif vers l'état muet

Le fonctionnement d'une boucle active est simple. Chaque cellule produit un signal électrique qui, excitant la cellule suivante, se propage de proche en proche et finalement, puisque le circuit est bouclé, ramène à chaque cellule une quantité de signaux suffisante pour provoquer son excitation. L'excitation de chaque cellule est ainsi entretenue au travers du circuit en boucle.

En réalité, il s'agit là d'un équilibre dynamique très précis. En effet, il peut suffire de la défaillance d'une seule cellule dans la transmission pour que le circuit soit interrompu. Et une fois la circulation du signal arrêtée, le flux disparaît définitivement puisqu'il était à l'origine de son maintien. La disparition du flux témoigne du passage à l'état muet de l'objet mental.

Mais il faut bien comprendre que la structure de l'objet mental n'est pas détruite pour autant. Celle-ci, inscrite sous forme de poids sur des connexions, quand elle a été stabilisée dans le réseau, persiste au-delà de l'activation de l'objet mental puis de son passage à l'état muet.

3.4.2.2 la transition de l'état muet vers l'état actif

La structure de l'objet mental, progressivement installée pendant l'apprentissage, soutient la permanence du circuit quand il existe, mais elle ne suffit pas à créer le flux. Sans un événement extérieur au circuit, c'est-à-dire l'apport de signaux extérieurs au circuit, le flux ne peut pas réapparaître. Cet apport extérieur au circuit est l'impulsion nécessaire au rétablissement d'un flux sur cette structure, c'est-à-dire à la réactivation du circuit (cf plus haut dans le § 3.3 sur la réactivité des objets mentaux).

L'impulsion d'activation doit être apportée sous la forme du signal activateur propre de l'objet mental, ou d'un signal appartenant à l'enveloppe de variation de celui-ci. Ainsi l'activation se produit. Avec un signal trop éloigné du signal propre, l'impulsion est insuffisante et l'activation de l'objet mental n'a pas lieu.

3.4.2.3 l'origine de la transition d'état

Dans le mécanisme de l'excitation de chaque maillon d'un circuit, qu'il soit composé d'une ou plusieurs cellules, le point sensible est la régularité des sources d'excitation les unes par rapport aux autres. A l'équilibre, c'est-à-dire quand le flux est établi, chaque signal parvient à la cellule avec un poids et un instant d'arrivée déterminé. Or les cellules sont naturellement sensibles au décalage qui existe entre ces instants d'arrivée, c'est-à-dire qu'elles sont sensibles à la phase relative des informations (cf § 2.1.3). Ainsi, une modification de phase peut provoquer un changement dans l'excitation d'une cellule, et éventuellement l'interruption (ou l'établissement) du flux dans le circuit, c'est-à-dire une transition d'état.

Du respect des phases relatives entre chaque source d'information de la cellule dépend sa participation effective au flux dans le circuit, et donc le caractère actif de tout le résonateur. Ainsi une information extérieure au circuit peut-elle provoquer une interruption du flux parce qu'elle a entraîné l'activation précoce d'une cellule dont le signal est alors entré en inhibition de phase, bousculant tout l'équilibre du circuit. Le circuit était actif avant cet événement extérieur. Après celui-ci, il est devenu muet pour l'ensemble des cellules qui en recevait des informations. Conséquence immédiate, la répartition générale des flux dans le réseau s'en trouve modifiée, ce qui modifie aussi l'équilibre de toutes les relations entre objets mentaux. C'est l'effet d'aiguillage des flux étudié plus loin (§ 4.1).

3.4.3. les limites de l'effet d'attracteur

L'effet d'attracteur d'un résonateur dans le réseau a des limites, comme pour tout résonateur physique. Ces limites sont extrêmement précises, et avec une base physiologique simple.

3.4.3.1 attracteur et transition vers l'état activé

Le signal activateur propre d'une double boucle est, au niveau de détail le plus fin, un ensemble de potentiels d'action élémentaires afférents touchant une ou plusieurs cellules du circuit avec des positions et des phases relatives précises. Les limites de l'effet attracteur de la double boucle sont

déterminées par les modifications tolérées de phase et/ou de position des signaux afférents, c'est-à-dire celles qui ne provoquent pas d'altération du signal propre.

Si on rapporte ce mécanisme de substitution de signal, de l'échelle des synapses afférentes d'un neurone (au nombre de plusieurs milliers) à l'échelle des circuits résonateurs d'un objet mental, on voit que l'enveloppe de variation est à la fois très limitée et infiniment variée. Elle est très limitée parce que les variations sont contraintes par des règles précises, directement issues du fonctionnement des neurones. Mais elle est aussi potentiellement infinie, car les combinaisons de substitution possibles sont en nombre considérable.

Même si la probabilité de réalisation d'une substitution est très faible, ce qui est fonctionnellement important est que cette possibilité existe néanmoins. En effet, il faut comprendre que cette possibilité de substitution est une porte qui ouvre la voie aux associations spontanées entre objets mentaux.

Les limites de l'effet d'attracteur d'activation sont ainsi extrêmement précises. Un signal afférent sera dit hors de l'enveloppe de variation de l'attracteur dès lors qu'il ne pourra être substitué au signal propre en produisant l'activation de l'objet mental.

Ainsi, avant activation de l'objet mental, des signaux éloignés du signal propre n'induisent pas le passage à l'état actif, ils ne participent pas à l'activation de l'objet mental. N'appartenant pas à l'enveloppe de variation de l'attracteur, ces signaux ne sont pas capturés par celui-ci et ne provoquent pas de transition d'état.

3.4.3.2 attracteur et transition vers l'état muet

Après activation de l'objet mental, quand le flux est établi, l'effet d'attracteur est défini qualitativement de la même manière que pour l'activation. Les limites de l'état activé peuvent toutefois être différentes de celles observées pour l'activation de l'objet mental.

A l'image de l'activation, la définition des limites de l'effet d'attracteur pour un objet mental activé devient : un signal afférent sera dit hors de l'enveloppe de variation de l'attracteur dès lors qu'il ne pourra être substitué au signal propre en maintenant l'activation de l'objet mental.

En effet, comme expliqué plus haut (cf § 3.4.2), des signaux peuvent inhiber une ou plusieurs cellules dans le circuit, désorganiser ou interrompre le flux et ainsi provoquer le passage à l'état muet de l'objet mental. Ces signaux sont définis comme n'appartenant pas à l'enveloppe de variation de l'attracteur.

Inversement, de nombreux signaux vont s'avérer compatibles avec le maintien de l'objet mental à l'état activé. Par définition, tous ces signaux sont définis comme appartenant à l'enveloppe de variation de l'attracteur.

Il est ainsi possible que l'enveloppe de variation de l'objet mental activé n'ait pas rigoureusement les mêmes limites que pour l'activation de celui-ci, et notamment qu'elle soit plus étendue. Cette nuance ne change en rien le contenu de la notion d'attracteur, mais elle doit être notée car elle illustre les effets évidents de la structure sur les flux au travers de l'activation, et les effets en retour de la circulation des flux sur l'utilisation fonctionnelle de la structure.

La possibilité de substitution de signaux offerte par la structure confère au flux la capacité de s'établir pour un plus grand ensemble de signaux déclencheurs. En retour, le flux établi admet un vaste ensemble de signaux comme compatibles avec son maintien ; il confère ainsi à la structure la capacité de véhiculer des flux plus variés. La richesse des échanges, tout en restant compatible avec le fonctionnement normal du réseau, se trouve augmentée par cette imbrication des effets en retour.

L'effet d'attracteur tend ainsi à maintenir l'objet mental dans son état activé, mais il ne suffit pas à empêcher son passage à l'état muet quand le signal s'éloigne trop du stimulus initial et sort de l'enveloppe de variation tolérée.

3.5. LA DIFFÉRENCIATION DES OBJETS MENTAUX PAR LA TOPOLOGIE

A ce point de l'étude des caractéristiques des objets mentaux, il nous faut identifier clairement ce qui différencie deux objets mentaux dans le réseau. A l'évidence, la valeur des signaux échangés entre les cellules a peu d'importance puisqu'ils sont globalement identiques. La forme en double boucle n'est pas plus significative car elle est commune. Au contraire, la structure de chaque boucle et la position de cette boucle par rapport aux autres dans le réseau prennent une importance majeure.

Ainsi, ce qui différencie deux objets mentaux est d'abord leur *topologie* dans le réseau. On peut distinguer à la topologie deux composantes, selon qu'on privilégie dans l'étude les relations internes ou externes à l'objet mental.

La composante interne recouvre l'ensemble formé par les cellules qui composent la boucle et leurs connexions entre elles. Cette composante est en fait la structure de la boucle ou de l'objet mental. La composante externe recouvre l'ensemble formé par les connexions qui existent entre les cellules de la boucle et les autres éléments du réseau, que ce soit des neurones isolés ou des objets mentaux. Le terme de *position topologique* de l'objet mental dans le réseau désigne cette composante.

En reprenant l'image de la gouttière développée plus haut, on peut faire les mêmes observations. Les molécules d'eau qui composent le flux ne différencient pas deux tourbillons, pas plus que leurs formes par définition similaires. Par contre, la position de chacun d'eux dans la gouttière et les effets qu'ils peuvent avoir l'un sur l'autre assurent parfaitement de leur individualité. Ainsi, lorsqu'un tourbillon réoriente partiellement le flux dans la gouttière et entraîne l'apparition d'un second tourbillon en aval, cela permet de poser la distinction entre eux, ne serait-ce qu'avec le critère de leurs différentes positions.

3.6. L'OBJET MENTAL, UN OUTIL DE COMPARAISON

Une des propriétés les plus surprenantes des doubles boucles, et par là des objets mentaux, est leur rôle de comparateur de signaux. C'est aussi une propriété très intéressante car elle enrichit considérablement les possibilités d'utilisation des objets mentaux, notamment parce qu'elle permet de comprendre ce que peut être une forme primitive de cohérence dans le SNC.

La fonction de comparateur de l'objet mental est une conséquence directe de l'organisation structurelle et dynamique des doubles boucles. Son mécanisme repose sur l'influence réciproque de la stabilité (composante structurelle), de l'effet d'attracteur (composante dynamique) et de l'état (actif/muet) de l'objet mental.

3.6.1 le mécanisme de la comparaison

Pour éclairer cet aspect, considérons à l'état d'équilibre un réseau composé d'un faible nombre d'objets mentaux. Autrement dit, observons-le après

l'activation de résonateurs et sans perturbations extérieures sous forme de signaux supplémentaires. Dans ce réseau, choisissons un objet mental activé et étudions les phénomènes à partir de cette référence.

Un objet mental est un résonateur qui entretient et reproduit un signal en fonction de sa structure interne. Du fait de l'étendue des arbres afférent et efférent de chacune des cellules, ce signal est aussi propagé dans le réseau autour de la double boucle. L'objet mental est ainsi, en plus d'un résonateur, un chemin de circulation, une voie de passage et de diffusion des signaux dans le réseau.

En termes de flux de signaux dans le réseau, et toujours à l'état d'équilibre, l'objet mental reçoit des signaux, en produit et en propage (voir figure 10). Le flux qui parvient à l'objet mental sera appelé le flux afférent, le flux propagé sera appelé efférent. Ces flux constituent le flux externe à la boucle, celui qui circule dans le réseau. Le flux circulant dans la boucle sera appelé le flux propre ou interne. Le flux afférent induit et entretient le flux interne, lequel alimente le flux efférent. Les flux interne et externe sont ainsi dépendants l'un de l'autre.

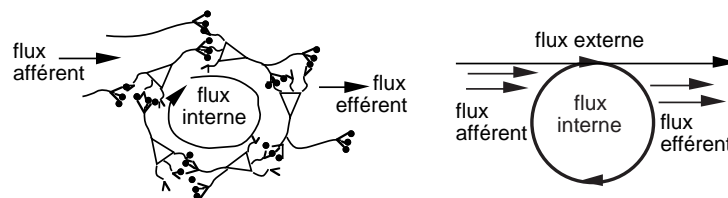


Figure 10 : le double flux interne et externe dans une boucle
Il faut faire une double lecture de ce schéma, à deux niveaux d'échelle différents. La perspective vue du dedans, c'est-à-dire du point de vue de l'objet mental, fait apparaître un flux afférent, qui entretient un flux intérieur, lequel est transmis au reste du réseau sous forme de flux efférent. La perspective vue du dehors, du point de vue du réseau, fait apparaître un flux qui transite par dessus la boucle, laquelle semble être seulement une voie de passage.

A l'équilibre, c'est-à-dire dans les conditions initiales, on observe des flux interne et externe permanents et réguliers. Le flux afférent contribue au maintien du flux interne, lequel est diffusé au réseau par le flux efférent.

Et ce flux efférent revient à l'objet mental sous forme du flux afférent après d'éventuelles modifications faites au cours du trajet dans le réseau. L'objet mental est activé et reste dans cet état.

Ainsi, la double boucle est-elle le nœud d'un double flux, le flux interne de son signal propre et le flux externe du réseau. A l'équilibre, il y a concordance entre ces flux. Les signaux du réseau ne provoquent pas le passage à l'état muet de l'objet mental, et l'activation de l'objet mental ne perturbe pas l'ensemble établi des flux dans le réseau.

Du fait de l'effet d'attracteur dynamique, des variations dans le flux afférent reçu par l'objet mental sont possibles, et sans conséquences dès lors qu'elles restent dans l'enveloppe de variation tolérée. Malgré ces éventuelles variations, le flux afférent entretient et renforce le flux interne du double résonateur. Il en résulte que le flux efférent est régulier et l'ensemble des flux dans le réseau est stable.

A l'inverse, si l'on provoque par une intervention extérieure une modification du flux afférent qui dépasse les limites de l'enveloppe de variation, l'objet mental va changer d'état et basculer à l'état muet. Le flux efférent sera interrompu et l'équilibre des flux dans le réseau complètement bouleversé car l'objet mental n'assurera plus son rôle de véhicule du flux circulant dans le réseau.

Par conséquent, la permanence dans le temps de l'état activé d'un objet mental est la preuve d'une régularité dans les échanges. Autrement dit, l'objet mental est un comparateur de signaux dans le temps, et son état actif le témoin de la régularité des flux. La permanence, au cours d'instant successifs, de l'état activé d'un objet mental est le reflet de la stabilité du flux afférent, lequel reste à chaque instant dans les limites de l'enveloppe de variation.

Cette propriété de comparaison des signaux est directement liée à l'existence d'une structure stabilisée, obtenue par la répétition des signaux. Cette structure détermine l'enveloppe de variation dynamique tolérée par le système dont elle est le support. Une fois sa structure établie, l'objet mental peut jouer son rôle de comparateur de signaux. Son état activé sera alors le témoin de la régularité des flux, c'est-à-dire d'une comparaison réussie de chaque signal vis à vis du précédent.

A ce point de l'exposé, on pourrait réinterpréter l'activation de l'objet mental à la lumière de sa propriété de comparateur. On pourrait ainsi concevoir l'activation d'un objet mental comme l'effet de la comparaison réussie entre un signal parvenant à cet objet mental et son signal propre. La non-activation serait, au contraire, la marque d'une distance trop importante entre les signaux et donc d'une comparaison infructueuse.

3.6.2 un exemple d'utilisation de la comparaison

Afin d'illustrer cette propriété, nous allons utiliser ce mécanisme de comparateur pour expliquer une particularité du monde musical que nous avons déjà abordée, l'oreille absolue. Cette capacité de certaines personnes, musiciens ou pas d'ailleurs, pose un problème intéressant car elle est connue pour être innée.

L'oreille absolue désigne concrètement la capacité de certains à se passer d'une référence réputée stable parce que supportée par un dispositif mécanique. Cela implique à l'évidence l'existence d'une fréquence de référence intériorisée.

Nous proposons d'analyser cette capacité en termes d'objets mentaux, c'est-à-dire de résonateurs et de doubles boucles. Dans ce cadre, l'oreille absolue impliquerait ainsi trois composantes différentes, illustrant trois propriétés des objets mentaux.

a- une référence permanente, comparable à celle fournie par un diapason, centrée sur une fréquence fixe et stable, et interne au SNC. Le double résonateur de l'objet mental peut fournir la référence interne stable, permanente, centrée sur une fréquence probablement acquise très tôt dans la jeunesse. Cette composante est absolument indispensable pour pouvoir se passer ensuite de référence extérieure.

b- des images des différents sons de la gamme chromatique et des noms qui leur sont associés, elles aussi internes au SNC. Les objets mentaux sont le support de ces représentations acquises, fixées dans le SNC par la répétition au cours de l'apprentissage.

c- la capacité de comparer ces images sonores intériorisées pour sélectionner celle qui correspond à la note entendue. Par un jeu de comparaisons plus

étendu, mais reposant sur le même principe, le sujet pourrait aussi reconnaître les notes à l'octave. La propriété de comparateur des objets mentaux est le support évident de cette capacité de comparaison.

La capacité de fixer définitivement et de manière stable l'image d'une fréquence sonore qui servira de référence interne est réputée innée, c'est-à-dire génétiquement déterminée. Mais elle n'est apparemment pas partagée par tous les êtres humains puisque nous ne disposons pas tous de l'oreille absolue. Seuls certains humains auraient ainsi la capacité de former un circuit résonateur stable, image d'un son perçu. Quelle que soit la fréquence propre de ce résonateur, elle ne varierait pas et pourrait ainsi servir de référence absolue pour l'individu.

Différentes gammes sont utilisées de par le monde, et l'oreille absolue n'est pas rattachée spécialement à la gamme chromatique en usage en Occident. On peut ainsi supposer qu'un individu disposant d'une référence stable apprend et fixe d'abord, par rapport à sa référence interne, les écarts des notes de son milieu musical en associant ceux-ci à un nom de note. Par la suite, ayant appris d'autres gammes, il peut exprimer sa capacité de comparaison à sa référence interne dans toutes les gammes qu'il maîtrise.

Une fois ces éléments acquis, la reconnaissance absolue d'une note n'est rien d'autre que le fruit du fonctionnement normal des objets mentaux. En effet, la fréquence entendue active sélectivement l'objet mental correspondant à l'écart entre cette fréquence et la référence interne. Le nom de la note est alors, s'il a été appris en même temps que les écarts, facile à fournir.

La structure en double boucle de l'objet mental offre ainsi un support unique et homogène pour les trois composantes de cette capacité. L'oreille absolue s'expliquerait alors simplement par les propriétés d'un unique support : la possibilité de fixation d'une image intériorisée et la possibilité d'utiliser cette image comme un comparateur une fois qu'elle a été acquise.

4. LES MÉCANISMES ÉLÉMENTAIRES DE L'INTERACTION ENTRE OBJETS MENTAUX

Les interactions entre objets mentaux sont la conséquence nécessaire de leur nature de flux de signaux parcourant des circuits de neurones en double boucle. Les mécanismes des interactions reposent sur les deux composantes des objets mentaux :

- leur dimension structurelle d'une part : neurones et boucles ont de nombreuses connexions dans le réseau et participent le plus souvent à plusieurs circuits différents, ne serait-ce qu'en véhiculant un flux de signaux ;
- et leur dimension dynamique d'autre part : l'activité des cellules et des boucles de chaque objet mental dépend en permanence des flux qui parviennent aux cellules. De même, cette activité produit un flux qui irrigue d'autres circuits.

4.1. L'AIGUILLAGE DU FLUX D'ACTIVATION

Chaque objet mental contribue à l'activité globale du réseau par un effet *d'aiguillage des flux* de signaux, conséquence de son état actif ou muet. Un objet mental actif irrigue d'autres neurones et circuits, et participe ainsi à l'activation d'autres objets mentaux. Quand il devient muet, ce changement produit des effets en cascade dans le réseau : d'autres objets mentaux peuvent devenir muets aussi. Inversement, quand un objet mental muet devient actif, il réoriente aussi les flux à travers l'étendue des arbres efférents des cellules qui le composent, provoquant éventuellement l'activation d'autres objets mentaux.

L'image de la gouttière et des cailloux utilisée plus haut peut ici aussi être utile. Un obstacle dans la gouttière, ajouté ou enlevé, n'interrompt pas le flux mais entraîne sa réorientation. Des tourbillons disparaissent, certains ne changent pas, d'autres apparaissent. Le cas du caillou qui termine le barrage et interrompt le flux en aval est une situation irréaliste dans le SNC, mais qui illustre l'importance des effets en cascade : la réorientation du flux peut prendre des proportions considérables. En effet, dans un réseau, aucune accumulation des signaux n'est possible, alors qu'elle l'est avec de l'eau et un barrage. Dans le SNC, les flux de signaux sont simplement orientés sur d'autres voies de circulation.

L'effet d'attracteur dans l'activation d'un objet mental prend ainsi toute sa dimension. Un signal, même différent du signal propre, peut provoquer l'activation d'un objet mental et voir ses effets décuplés dans le réseau par ce phénomène d'aiguillage de flux. Un phénomène analogue est, au niveau symbolique, le malentendu. Chez le receveur du message, un sens inadéquat est activé en regard d'un mot, ce qui produit une interprétation complètement erronée de tout le message. L'effet du faux-sens est amplifié par l'orientation qu'il impose au sens de tout le message reçu.

4.2. LA PROPAGATION DES FLUX ET L'ACTIVATION EN AVAL

L'activation d'un objet mental induit un flux efférent qui se propage en aval dans le réseau. Ce flux est susceptible d'entraîner l'activation d'autres objets mentaux dans le réseau. Les résultats de cette activation secondaire reposent sur une composante statique qui pose les potentialités, la structure du réseau, et sur une composante dynamique qui réalise une de ces potentialités, en l'espèce les flux effectivement présents dans le réseau.

4.2.1. le chemin structurel

La structure inscrite dans le réseau par la répétition et le maintien des objets mentaux détermine les poids des connexions. Le réseau des poids permet de définir un ordre d'activation en chaîne, par exemple en suivant les chemins constitués de connexions à l'efficacité maximale. Cet ordre est le reflet des acquisitions antérieures, la résultante structurelle de l'histoire du réseau. L'ordre d'activation correspond aux chemins les plus faciles, c'est-à-dire ceux qui passent par les connexions avec les poids les plus importants.

Ainsi, à partir de chaque objet mental, on peut suivre la chaîne des objets mentaux qui seront activés du fait de la propagation du flux à partir de l'objet mental de départ, et lister aussi les objets mentaux partiellement excités mais pas activés. Ces derniers verront leur activation dépendre du contexte, c'est-à-dire des autres objets mentaux simultanément actifs dans le réseau. Les premiers au contraire ne dépendent pas du contexte, et forment une chaîne systématiquement activée après l'activation de son origine, toute autre stimulation étant absente dans le réseau.

Ainsi, l'analyse structurelle d'un réseau permet d'avoir une description statique de la propagation des signaux dans le réseau, à partir d'une source unique et en l'absence de signaux parallèles. La structure du réseau est le terrain sur lequel se produit l'activation réelle, qui est dynamique.

4.2.2. L'activation dynamique

L'activation dynamique est le versant actif du fonctionnement du réseau, aussi fugitif et éphémère que la structure est statique et durable. En effet, la représentation des flux d'activation est difficile à saisir parce qu'il y a des flux parallèles qui se propagent simultanément dans le réseau.

A cause de ce parallélisme, l'analyse statique faite précédemment est insuffisante pour rendre compte du fonctionnement du réseau car elle ne permet de traiter que les deux situations limites, aux extrêmes de l'éventail des situations possibles. La plus simple est celle où l'on suppose une seule source d'activation. Il suffit alors de suivre les chemins à partir de ce point et la description statique conduit à une modélisation valable. L'autre cas limite est celui dans lequel tous les objets mentaux sont activés simultanément. Il faut alors sommer pour chaque objet mental les influences activatrice et inhibitrice qu'il reçoit. La description statique du réseau permet alors de conclure à un état stable dans lequel tous les objets mentaux restent activés, ou de conclure à un état instable dans lequel, contrairement à l'hypothèse initiale, certains objets mentaux passent à l'état muet.

Le fonctionnement du SNC ne correspond à aucune de ces situations limites, théoriquement maîtrisables. Précisément, le SNC en fonctionnement est un réseau dans lequel les flux sont concurrents, et de plus perpétuellement alimentés par des signaux changeants en provenance de l'environnement.

Le fonctionnement dynamique réel du SNC est la concrétisation unique et non reproductible d'une possibilité de propagation des flux selon un chemin dans le réseau. Cette concrétisation matérialisée d'une possibilité est unique car elle résulte de l'influence réciproque, activatrice ou inhibitrice, en fonction des phases relatives des signaux, de chaque neurone sur les autres et du réseau sur chaque neurone. Elle est non reproductible car le passage du flux modifie légèrement (très peu mais un peu quand même) la structure du réseau. Le réseau n'est donc pas rigoureusement identique avant et après le passage du flux.

Ces mécanismes expliquent pourquoi un réseau comme un SNC présente des caractéristiques associées aux phénomènes chaotiques, notamment la sensibilité aux conditions initiales. En effet, des modifications infimes comme la simple inversion d'ordre entre deux événements dans l'histoire du réseau peuvent conduire à des structures très différentes. C'est le

phénomène de divergence, aussi connu sous le nom d'"effet papillon"⁴. Le mécanisme d'activation dynamique apparaît ainsi, dans un réseau comme le SNC, comme un facteur générateur de variété extrêmement puissant.

Mais les mécanismes intervenant aux niveaux les plus fins (ici au niveau des cellules en provoquant des divergences), ne doivent pas masquer d'autres mécanismes qui entrent en jeu à des niveaux d'échelle supérieurs en s'exerçant sur des structures plus vastes. Ces facteurs d'un ordre plus élevé imposent des contraintes plus générales, et ils conduisent finalement à l'apparition de fonctionnalités émergentes nouvelles. On verra par exemple que le bouclage du SNC sur son environnement transforme la modification automatique du poids des connexions, facteur de divergence, en une composante de l'adaptation à l'environnement (voir sections 5.3.2 et 13).

Concrétisons les choses pour que le mécanisme de l'activation dynamique soit sans ambiguïtés. Du point de vue d'un objet mental, c'est *l'équilibre de l'ensemble des relations* établies avec les autres représentations actives autour de lui qu'il faut prendre en compte. Avec l'image des tourbillons dans la gouttière, l'équivalence ferait considérer d'un côté la position du tourbillon par rapport au flux global, qui serait la composante structurelle, et de l'autre côté l'ensemble des composantes dynamiques (débit, vitesse du flux, etc.) qui conduisent à l'apparition, puis au maintien du tourbillon dans ce flux.

En résumé, plus un objet mental a de connexions fortes avec un plus grand nombre d'autres représentations, et plus il sera facilement activé. C'est l'effet de la règle *structurelle*. Parallèlement, plus une représentation est connectée avec de nombreux objets mentaux activés très régulièrement, plus souvent elle sera elle-même activée. C'est l'effet de la règle *dynamique fonctionnelle*. Ces deux règles s'appliquent simultanément, et leurs conséquences ne sont pas systématiquement superposables. L'activation de l'objet mental est finalement la résultante de la mise en œuvre simultanée de ces deux effets.

⁴ Le nom vient de l'exemple choisi pour illustrer la divergence dans les phénomènes chaotiques. L'exemple s'appuyait sur l'atmosphère terrestre et montrait comment une tempête dans l'Atlantique pouvait être la conséquence du battement d'une aile de papillon à l'autre bout du monde.

4.3. LE RECRUTEMENT DE BOUCLES NOUVELLES

Le recrutement de nouvelles boucles autour de boucles constituées conduit à l'expansion d'un objet mental existant. C'est un phénomène purement mécanique, conséquence directe de la connexion des neurones entre eux. L'examen de ce recrutement permettra de commencer à lever le voile sur l'origine des boucles dans le SNC.

4.3.1. la création de boucles nouvelles

L'activité régulière du résonateur induit l'activation des neurones extérieurs à l'objet mental touchés par les efférences des cellules qui le composent. Ces activations sont régulières et, par effet de concordance de phase, synchronisent l'activation de certains de ces neurones extérieurs à l'objet mental. Ces neurones périphériques eux-mêmes participent à l'activation dans leur voisinage immédiat d'autres neurones. De proche en proche l'activation se propage dans le réseau, et les boucles qui peuvent se développer en concordance avec la boucle initiale vont être normalement activées. Typiquement, ce phénomène d'entraînement produit des boucles concentriques autour du résonateur initial (voir figure 11).

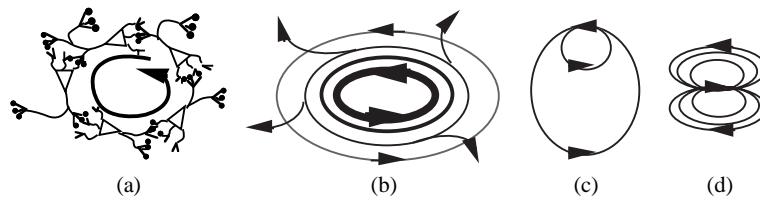


Figure 11 : entraînement local de boucles concentriques

Du fait de l'extension de l'arbre axonal de chaque cellule, les boucles établies entraînent localement autour d'elles un flux d'activation orienté dans le même sens et concentrique (a). Elles forment des systèmes d'entraînement. Le schéma (b) illustre un système concentrique centrifuge, le (c) un système concentrique centripète, le schéma (d) un système bicentré en double boucle.

Quand plusieurs systèmes concentriques se développent simultanément dans le réseau, et au voisinage les uns des autres, des conflits d'activation peuvent se produire localement dans les zones d'influence communes, notamment par le mécanisme d'inhibition de phase au niveau cellulaire. Les signaux ainsi inhibés désorganisent localement le flux périphérique. Une boucle intermédiaire apparaît alors entre les deux systèmes initiaux. Elle stabilise l'ensemble en réalisant un couplage local qui maintient les deux systèmes à distance l'un de l'autre (voir figure 12). Les boucles

intermédiaires peuvent être isolées, ou groupées mais indépendantes, ou enfin regroupées et interdépendantes. Dans ce cas, elles forment un nouvel objet mental intermédiaire.

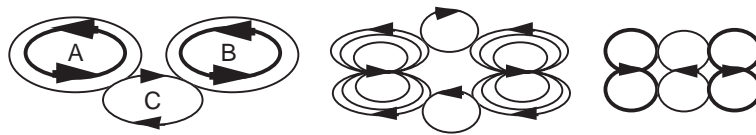


Figure 12 : schémas de résolution des conflits entre systèmes d'influence

Le schéma de gauche montre le développement d'une boucle de sens horaire entre deux systèmes de sens de rotation antihoraire. Dans leur zone d'influence commune, les cellules sont soumises à des phénomènes d'inhibition de phase qui désorganisent localement le flux. Progressivement, la boucle C se développe avec un sens de rotation horaire en faisant disparaître ces conflits. L'ensemble constitué des trois boucles A, B et C est stable, les flux sont réguliers. Les deux autres schémas illustrent le développement de boucles intermédiaires entre des objets mentaux.

Ainsi, une boucle provoque le développement d'un système concentrique autour d'elle, mais il n'y a pas de formation de boucle nouvelle. Par contre, l'existence de plusieurs de ces systèmes et leur proximité conduisent nécessairement au développement de nouvelles boucles en périphérie de ces systèmes. Ces nouvelles boucles permettent la coexistence des systèmes et l'écoulement des flux de l'un à l'autre.

4.3.2 L'origine des boucles

Nous venons de voir qu'un flux en boucle induit facilement un autre flux lui aussi en boucle. Ainsi, dès lors que des boucles sont établies, elles se généralisent dans le réseau. Ce mécanisme est simple, mais laisse entière la question : pourquoi des boucles ?

Assez simplement, les premières boucles sont elles-mêmes induites par l'organisation biologique des circuits dans l'organisme. Le détail de cet argument sera développé plus loin, dans les sections 9 et 15, après que d'autres éléments importants aient été introduits, mais l'idée princeps peut être exposée maintenant.

L'organisation biologique détermine une architecture commune à tous les individus d'une même espèce, et autorise aussi une infinité de variations

individuelles autour de ce schéma de base. L'étude de cette architecture permet d'établir l'existence de systèmes de circulation pour l'oxygène, les fluides, et les signaux électriques, communs à tous les individus. La description de ces points communs aux individus constitue l'anatomie de l'espèce.

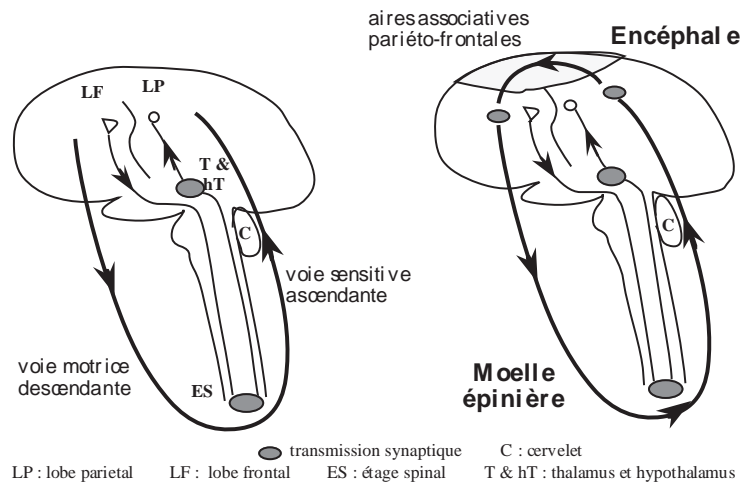
Pour ce qui est de l'organisation neurologique, l'étude anatomique est approfondie par des techniques de coloration des cellules qui permettent d'identifier des circuits fonctionnels. Certains sont fort complexes et n'ont pas livré le secret de leur fonctionnement. D'autres sont plus simples et relativement bien compris. C'est le cas par exemple des circuits moteurs, décrits ici de manière simplifiée mais éclairante pour notre propos.

La commande d'un mouvement prend son origine dans le cortex moteur, avec les cellules pyramidales de l'aire frontale ascendante. Ces neurones commandent directement les muscles via un motoneurone situé dans la moelle épinière.

L'activation d'un motoneurone entraîne évidemment la contraction d'un groupe de fibres musculaires, et c'est ce qui importe dans l'action volontaire, mais il s'agit là seulement de la conséquence manifeste. Simultanément à cette matérialisation concrète de l'activation du motoneurone, il y a aussi des conséquences dans les échanges au sein du SNC qui sont bien plus considérables.

En effet, l'excitation du motoneurone et la perception de ses effets mécaniques sont immédiatement répercutées au niveau des voies sensibles, lesquelles remontent vers le thalamus et l'aire sensitive majeure, la pariétale ascendante.

Or, les aires frontales et pariétales ascendantes sont dans l'encéphale en regard l'une de l'autre, elles se touchent littéralement, juste séparées par la scissure de Sylvius qui limite les lobes frontal et pariétal. On a ainsi un véritable **U** dont une des branches est descendante motrice, et l'autre ascendante sensitive. Les connexions via les aires associatives de ces lobes transforment ce **U** structurel en un **O** fonctionnel, elles ferment la boucle (voir figure 13).



le U strUcturel

le O fOnctionnel

Figure 13: la boucle physiologique autour du système moteur

Les voies motrice descendante et sensitive ascendante forment un U dont la base est au niveau des effecteurs moteurs. Les aires associatives entre les lobes frontal et pariétal permettent la fermeture du U en O. Il y a bouclage d'une voie sur l'autre à travers le cortex associatif.

Ainsi s'éclaire l'origine de la première boucle dans le réseau. Les circuits génétiquement déterminés forment la base des fonctions physiologiques élémentaires. Ils sont associés dans une boucle qui intègre, en plus de ces voies élémentaires, une portion de cortex associatif qui permet à la fois la fermeture de la boucle, l'association entre action et perception dans la mesure où la première provoque la seconde, et enfin le développement d'une représentation de cette association.

L'organisation biologique normale inscrit dans le SNC des chemins de circulation des signaux qui forment des boucles. Comme ces chemins sont bouclés, ils produisent des flux réguliers en boucle, lesquels se propagent et s'étendent progressivement. Les premiers résonateurs en boucle sont apparus, ils sont confortés par la stabilité de l'organisation biologique qui les a induit. En retour, ces résonateurs contribuent à améliorer la finesse de cette organisation, à accroître l'étendue de ses

habiletés initiales, à favoriser l'adéquation entre perceptions et actions de l'individu.

La boucle primitive dans le SNC est ainsi une conséquence de l'organisation biologique, de même que la transformation de cette boucle physiologique en boucle cognitive est aussi induite par d'autres caractéristiques du SNC, parmi lesquelles l'importance des aires associatives qui assurent les échanges entre chaque lobe (voir plus loin la section 13).

5. LES INTERACTIONS DE BASE

L'objet mental a permis d'enrichir considérablement les modes d'échange dans le SNC. L'introduction des résonateurs et des flux en boucles fait passer d'un réseau dominé par le simple transfert de signaux entre deux cellules à un univers où existent :

- des flux auto-entretenus ;
- des effets d'attraction avec une enveloppe de variation autour du signal propre ;
- un moyen de comparaison des signaux dans le temps ;
- l'effet d'aiguillage de flux dans le réseau, qui amplifie les conséquences d'un changement d'état de l'objet mental.

Tous ces nouveaux modes d'échange des signaux dans le réseau sont des propriétés émergentes des neurones quand ils sont organisés en objets mentaux. Les interactions entre cellules interviennent ainsi au sein d'un cadre plus global qui détermine le devenir à long terme des connexions et des systèmes dont elles sont le support physique.

Cette section expose les différentes interactions entre objets mentaux, lesquelles forment des mécanismes qui s'appuient sur les propriétés développées précédemment. Ces interactions s'articulent selon les différentes dimensions du réseau en fonctionnement :

- 1- le développement d'ensembles d'objets mentaux chaînés dans l'espace ;
- 2- l'association par coïncidence d'objets mentaux dans le temps ;
- 3- le regroupement en blocs par suite du fonctionnement normal du réseau.

5.1. LES CHAÎNES D'OBJETS MENTAUX

La construction de chaînes d'objets mentaux est le résultat du recrutement de nouvelles doubles boucles dans l'espace autour de l'objet mental. Ce développement s'effectue dans les trois dimensions de l'espace, et nous distinguerons le chaînage vertical du chaînage latéral.

5.1.1. le chaînage vertical,

Nous étudierons d'abord une première forme d'interaction spatiale entre objets mentaux : le *chaînage vertical*. Schématiquement, une boucle résonnante peut être étendue par en-dessous et par en-dessus. Ainsi, par recrutements successifs, la chaîne se développe (voir figure 14). La chaîne résultante est aussi dotée des propriétés d'un objet mental. De proche en proche, la chaîne d'objets mentaux s'allonge et finit par lier des dizaines de boucles les unes aux autres.

Ce phénomène de chaînage est favorisé par l'existence préalable d'objets mentaux établis qui suscitent autour d'eux des flux en boucle. Comme indiqué plus haut, l'interaction de ces flux provoque l'apparition de nouvelles boucles.

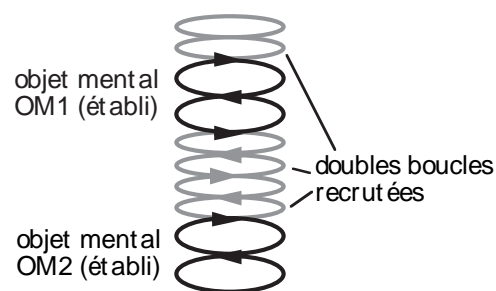


Figure 14 : chaînage vertical entre deux objets mentaux établis

Les objets mentaux préexistants provoquent des flux en boucle autour d'eux. L'interaction de ces flux entraîne l'apparition de nouvelles boucles qui forment une chaîne. Cette chaîne est aussi un objet mental, et jouit de toutes les propriétés de ceux-ci.

Le développement vertical des chaînes d'objets mentaux permet de définir la notion de niveau, qui prendra toute son importance lors de l'étude du phénomène d'abstraction (cf § 6.3). Par convention, nous dessinerons les chaînes verticales avec leur origine en bas, ce qui signifie que les chaînes sont développées du bas vers le haut (cf figure 15). A l'origine d'une chaîne se trouve l'objet mental initial, celui qui s'est établi le premier et a donné naissance à la chaîne considérée. La notion de niveau mesure la longueur de la chaîne depuis son origine. Plus l'objet mental considéré dans la chaîne est éloigné de l'origine, plus son niveau sera dit élevé par rapport au niveau d'origine.

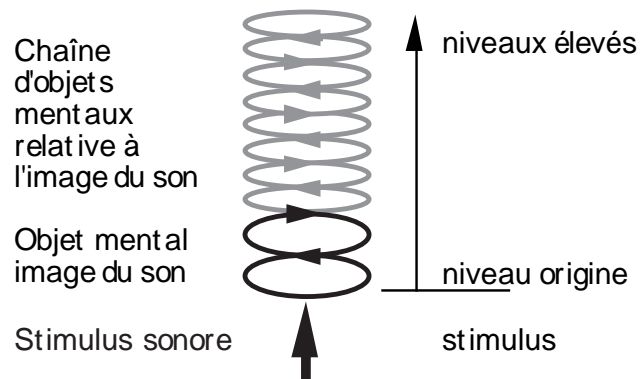


Figure 15 : convention de représentation des chaînes et des niveaux
Le schéma illustre les conventions de figuration des chaînes et des niveaux, orientées de bas en haut.

Dans la leçon de piano, un son est à l'origine d'un objet mental image de cette note. Avec cet exemple, l'objet mental initial est directement lié à la perception du son, il sera donc établi à proximité du point d'arrivée des signaux sonores dans le SNC, en l'occurrence l'aire auditive du cortex temporal. La chaîne d'objets mentaux dont il est l'origine sera développée dans les aires associatives de cette zone sensitive spécialisée. Chaque objet mental de cette chaîne sera d'un niveau plus élevé que l'objet mental initial.

5.1.2. le chaînage latéral

La seconde interaction spatiale est le chaînage latéral entre objets mentaux. Dans ce cas, les liaisons s'établissent entre objets mentaux de même niveau. C'est le deuxième axe de développement dans l'espace après le chaînage vertical.

Le facteur déterminant de cette forme d'interaction est l'effet de phase entre signaux au niveau cellulaire. Deux objets mentaux activés peuvent avoir une zone d'influence commune non conflictuelle si, par exemple, les flux d'activation arrivent sur cette zone en concordance de phase. Dans ce cas, ces connexions seront progressivement renforcées par l'activité des deux objets mentaux (voir figure 16).

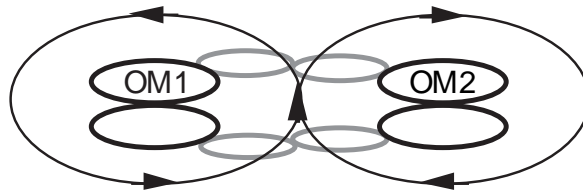


Figure 16 : chaînage latéral entre deux objets mentaux établis
*Les objets mentaux préexistants provoquent des flux en boucle autour d'eux.
 L'interaction de ces flux entraîne l'apparition de nouvelles boucles qui forment
 une chaîne horizontale entre objets mentaux du même niveau. Cette chaîne est
 aussi un objet mental, et jouit de toutes les propriétés de ceux-ci.*

5.1.3. le chaînage est-il une duplication ?

Ce phénomène de chaînage des boucles semble intéressant et prometteur, mais deux questions importantes surgissent, traitées dans cette section et la suivante.

Première interrogation, qui touche à la structure interne du réseau en tant que support des objets mentaux. Les objets mentaux ayant une partie commune ne sont-ils pas une simple reproduction à l'identique l'un de l'autre ? Le chaînage des boucles produit-il une duplication de la boucle initiale ? Deux facteurs de variété, l'un structurel et l'autre fonctionnel, permettent d'affirmer que la réponse est négative.

Le facteur structurel repose sur les ensembles de connexions dans les arbres dentritiques constitués par les afférences des cellules. Au niveau cellulaire, si deux cellules reçoivent les mêmes signaux à travers des arbres identiques en structure et en poids, elles vont être stimulées de la même manière. Au niveau d'une boucle-résonateur, si les ensembles de connexions sont identiques pour chaque cellule des deux boucles, alors les boucles sont strictement superposables et elles vont réagir de manière identique aux stimulations. La duplication d'une boucle suppose ainsi la reproduction à l'identique de toutes les connexions, en respectant à la fois l'origine et le poids correspondant, pour chacune des cellules.

Cette contrainte est en pratique impossible à satisfaire. Voyons rapidement pourquoi.

Dans une simulation informatique, en utilisant des cellules avec très peu de connexions et une architecture spécialement conçue pour cet objectif, on peut forcer la construction de boucles identiques. Mais c'est un résultat sans autre intérêt que la preuve du contrôle de l'architecture. Avec une expérimentation normale, dès que l'on utilise des centaines de connexions par cellule (soit encore 100 fois moins qu'un vrai neurone), on obtient toujours des arbres d'afférences différents dans leur structure à cause des poids des connexions qui évoluent indépendamment dans chaque cellule en fonction de l'historique particulier des stimulations de chacune d'elles. Ainsi, dans des conditions plus proches de la réalité, on observe toujours des boucles non superposables, c'est-à-dire des objets mentaux différents.

La nature donne dans le cervelet un exemple très précisément analysé de la variété induite par la répartition des poids dans les arbres dendritiques, et de son exploitation fonctionnelle. Le cervelet est un organe excessivement important pour la motricité volontaire. Placé à la base du crâne, il a grossièrement la forme d'un cerveau avec deux hémisphères. Dans le cervelet, une couche de cellules de forme pyramidale reçoit toutes les informations proprioceptives du système locomoteur : tension musculaire, tension des tendons, position des articulations, etc... Ces cellules pyramidales intègrent ces informations et régulent à chaque instant la tension des muscles dans les mouvements volontaires. Ce contrôle contribue à rendre les mouvements harmonieux.

Normalement, un être humain est capable de percevoir des variations infimes de l'angle de flexion d'un doigt. Or la finesse de discrimination des capteurs biologiques est dix fois trop faible pour permettre cette qualité de perception. Quelle organisation rend-elle donc possible une perception aussi fine ? Tout simplement la connexion simultanée de plusieurs capteurs de l'articulation à une même cellule pyramidale, mais avec des poids de connexions différents. Et ce schéma est reproduit pour chaque cellule pyramidale. Ainsi, avec la pratique des mouvements pendant la phase de maturation du contrôle moteur de la prime enfance, le cervelet apprend à associer un angle de l'articulation avec une configuration spatiale particulière des signaux émis par les multiples capteurs. Le manque de précision de chaque capteur est compensé par la multiplication de ceux-ci et le fait que, n'occupant pas la même position anatomique dans l'articulation, cette différence de position introduit un petit décalage entre leurs réponses aux mouvements. Cette organisation subtile a pu être

reproduite avec succès dans des robots⁵ et s'est montrée d'autant plus efficace que, facile à réaliser, elle permet l'utilisation de composants simples, fiables et de moindre coût. La biologie nous donne là un exemple d'organisation autour d'une variété par ailleurs inévitable, et de l'utilisation de celle-ci de manière positive.

Après cet examen du facteur de variété structurel dû aux configurations spatiales liées aux poids des connexions, étudions le facteur de variété dû au fonctionnement du SNC. En effet, ce fonctionnement repose sur des dizaines de milliards de cellules simultanément actives, ce qui en informatique serait un cas de parallélisme extrêmement massif. Dans cet ensemble déjà très touffu, en sus des configurations spatiales, il faut prendre en compte l'ordre d'arrivée des signaux sur les synapses (cf. le décalage de phase au § 2.1.3). L'arrivée des signaux sur une cellule forme, avec la position, les poids et les moments d'arrivée, une configuration spatiale et temporelle. Dans nos simulations informatiques, ce phénomène est assimilé à la «forme du signal». Ce facteur est infiniment variable et constitue une source de différence entre ensembles de signaux considérable, renforçant encore les différences entre objets mentaux partageant une même boucle. En pratique, dans un réseau complexe comme un système nerveux, même si deux objets mentaux partagent une boucle et des afférences nombreuses, ils seront différents car les configurations de leurs connexions en dehors de cette boucle sont différentes.

5.1.4. le SNC peut-il abriter des chaînes infinies ?

Deuxième interrogation, posée d'un point de vue théorique et général. Pourquoi le SNC ne formerait-il pas des chaînes infinies à partir des premiers objets mentaux acquis ? Autrement dit, ne peut-il y avoir envahissement du mental par certaines représentations ? Dans des conditions normales, il y a deux raisons qui permettent de répondre par la négative.

Première raison, les nombreux stimuli issus de l'environnement fabriquent ou excitent simultanément de nombreux objets mentaux différents. Si on suppose que chacun de ces objets mentaux peut être à l'origine d'une

⁵ On lira une description bien plus précise et formalisée dans J. S. Albus, «Brains, Behaviour and Robotics», Penguin Books 1980.

chaîne infinie, il y a alors une compétition généralisée entre eux pour recruter toujours plus de cellules dans les chaînes dont ils sont l'origine. Et la résultante de cette compétition potentielle entre les chaînes serait évidemment la limitation de leur développement. La multiplicité des stimuli parvenant au SNC est donc la première cause de limitation au développement d'une chaîne infinie.

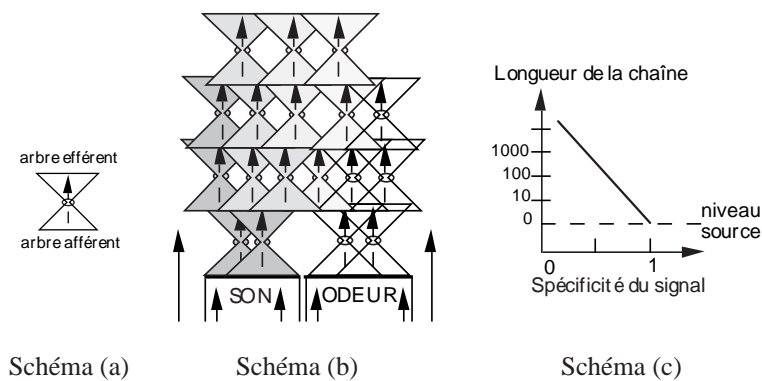


Figure 17 : la spécificité des signaux dans une chaîne d'objets mentaux. Le schéma (a) illustre les arbres afférents et efférents d'un neurone isolé. Le schéma (b) illustre l'imbrication de ces arbres dans un réseau de neurones. Sur ce schéma, toutes les cellules du niveau supérieur reçoivent des signaux des deux canaux Son et Odeur à la fois. Le schéma (c) résume l'évolution de la spécificité d'un signal le long d'une chaîne d'objets mentaux. Le signal en provenance des récepteurs directement activés par un stimulus est totalement spécifique. Au fur et à mesure que d'autres signaux sont associées à ce signal initial dans la chaîne, la proportion d'information spécifique d'une voie véhiculée par la chaîne d'objets mentaux diminue. L'échelle proposée est seulement figurative et ne reflète pas des mesures effectuées.

Deuxième raison, il y a une perte de spécificité du signal au cours du transfert dans la chaîne quand on s'éloigne de la source du stimulus (voir figure 17). Cet effet résulte de l'étendue des arbres afférents et efférents de chaque cellule. Ces arbres se recouvrent et produisent un mélange partiel des signaux. Ainsi, à partir d'un certain niveau dans la chaîne, on observe la propagation d'un flux non significatif. Ces signaux forment un bruit de fond, non spécifique et non structurant. Dans nos simulations

informatiques⁶, nous avons montré que ce bruit était nécessaire au fonctionnement normal du réseau, et qu'il favorisait l'apprentissage en rapprochant les cellules de leur seuil d'activation, ce qui les rend plus sensibles à l'effet d'un signal significatif. Ce point sera repris plus loin à propos des blocs (§ 5.3.5) et de l'activité mentale (chapitre 15).

5.2. L'ASSOCIATION TEMPORELLE D'OBJETS MENTAUX

Le second mode d'interaction élémentaire entre objets mentaux est l'association. Le résultat d'une association est un ensemble d'objets mentaux, comme avec le chaînage. Toutefois le développement ne se fait plus selon les règles de la proximité dans l'espace, ce qui est le cas pour les chaînes, mais en fonction des séquences d'activations qui se produisent dans le SNC.

C'est alors la quasi-simultanéité des activations des objets mentaux, c'est-à-dire la proximité temporelle, qui est le stimulus de l'association, tout comme la répétition est le stimulus de l'apprentissage en général. Ainsi, après s'être produite, une association devra être répétée pour être fixée durablement dans le réseau.

Au niveau cellulaire, le mécanisme est simple : deux objets mentaux activés simultanément peuvent se voir l'un l'autre comme l'origine de leur activation. Il s'agit en quelque sorte d'une «illusion d'activation» au niveau des résonateurs, chacun prenant le flux de l'autre pour la cause de son activation. Comme tout apprentissage dans le réseau, si cette situation est répétée, l'illusion va devenir une réalité transcrite au niveau des poids des connexions entre ces objets mentaux, sous forme de liaisons plus efficaces.

⁶Ce point et la forme du signal introduit précédemment, ainsi que les réseaux et objets mentaux NYMEI sont présentés dans «Contribution à l'apprentissage automatique dans les ordinateurs parallèles», C. Lecerf, Thèse de doctorat, Université Paris 8 Vincennes Saint-Denis, 1987.

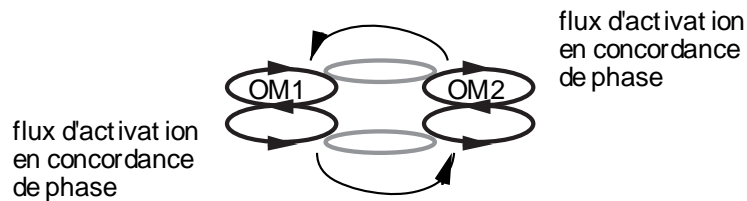


Figure 18 : l'association temporelle d'objets mentaux

Les objets mentaux OM1 et OM2 sont reliés par des connexions qui véhiculent un flux d'activation de l'un vers l'autre. Quand ces flux sont en concordance de phase, il se produit une association temporelle entre les objets mentaux puisqu'elle ne dépend que de la phase relative des flux internes et afférents sur chacune des structures.

A cause des mécanismes cellulaires à l'origine de l'interaction, notamment les effets de la phase relative, la durée de l'intervalle entre les flux d'activation prend une importance fondamentale. On peut s'attendre par exemple à ce que, au-delà d'un certain intervalle de temps, il n'y ait plus d'association possible entre les objets mentaux. L'explication est simple : l'activation des chaînes à des instants nettement séparés empêche le développement d'interactions entre elles par effet de concordance ou opposition de phase. On retrouve, au niveau d'échelle des objets mentaux, le même phénomène qu'au niveau cellulaire : les effets de la phase relative des signaux et l'indépendance de signaux éloignés dans le temps.

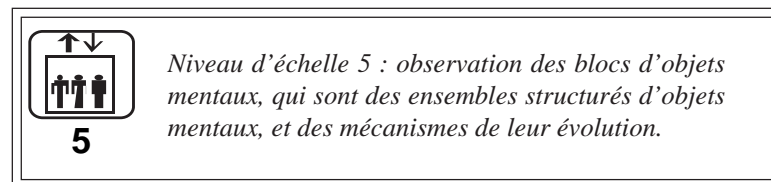
L'association est ainsi très différente du chaînage des objets mentaux. D'un côté on observe la croissance d'une chaîne dans l'espace qui est un processus profond, effet d'un déterminisme interne important, comparable à la polymérisation d'un composé chimique. De l'autre côté, on assiste au contraire à l'association aléatoire d'objets mentaux, au gré de leurs activations simultanées. Ce phénomène est plutôt comparable à l'apparition de molécules nouvelles dans un mélange, au hasard des rencontres entre les atomes. Il n'y a pas de déterminisme interne qui préside aux associations entre objets mentaux, mais une dépendance stricte envers les instants de leurs activations, que ce soit sous l'influence de stimuli en provenance de l'environnement, d'une activation fortuite liée à un effet d'attracteur, ou à la suite de la propagation d'un flux d'activation dans une chaîne.

L'association temporelle est un mécanisme générateur de variété dans le réseau car il conduit à lier l'activation d'objets mentaux a priori sans rapports. Ce mécanisme prend évidemment toute sa dimension quand

existent déjà dans le réseau les effets d'attracteur et d'aiguillage de flux. En comparaison, le chaînage apparaît au contraire comme un mécanisme créateur de liaisons régulières entre objets mentaux.

Les deux modes d'interaction ont ainsi des effets complémentaires : l'association met en rapport des objets mentaux au hasard des coïncidences temporelles, le chaînage lie des objets mentaux en fonction de la structure existante du réseau.

5.3. LES BLOCS D'OBJETS MENTAUX



A ce point de l'exposé, au-dessus du simple passage d'un signal électrique à travers une connexion, les échanges de signaux dans le réseau sont régis par plusieurs mécanismes de haut niveau, tous en rapport avec la nature de flux dynamique des objets mentaux :

- la comparaison de flux d'un instant sur l'autre,
- l'aiguillage de flux,
- les interactions entre objets mentaux par chaînage et association.

Les blocs d'objets mentaux forment l'ensemble fonctionnel du niveau d'organisation supérieur à celui des objets mentaux. Les blocs sont le résultat du réarrangement spontané des flux dans un réseau sous l'effet de la loi de Hebb. Les blocs d'objets mentaux constituent la brique de base nécessaire au support et à l'interprétation des mécanismes et capacités symboliques des SNC.

Les sections suivantes exposent la nature des blocs d'objets mentaux et leur fonctionnement.

5.3.1. la constitution des blocs

Les blocs d'objets mentaux sont issus du fonctionnement simple et normal d'un réseau dans lequel existe une organisation des flux en double boucle. La répétition de séquences d'événements groupe les objets mentaux dans un ensemble fonctionnel, le bloc, et fixe sa structure dans le réseau.

5.3.1.1. définition et structure

Un bloc est un ensemble fonctionnel d'objets mentaux intimement liés à la fois par des chaînages et des associations. La richesse de sa structure dépend du nombre d'objets mentaux qui le composent et de la complexité des relations qui les lient entre eux.

Le bloc se différencie justement des précédents arrangements d'objets mentaux, les associations et les chaînes, parce qu'il regroupe des objets mentaux selon des mécanismes variés que, pour simplifier, nous assimilerons à des types de liens. Ainsi, deux objets mentaux peuvent être reliés par un lien de type association temporelle ou de type chaînage.

Dans un bloc constitué, quelque soit le type du lien entre objets mentaux, ce lien est le support d'un flux de signaux qui a un effet en retour sur la structure du bloc : la fixation de celle-ci dans le réseau.

5.3.1.2. fixation de la structure

Dans un réseau comme le SNC, du fait des caractéristiques des neurones, la seule cause de fixation possible d'un apprentissage est la répétition car c'est le seul mécanisme ayant des conséquences physiques existant dans le réseau.

Les associations sont ainsi fixées par répétition des séquences temporelles qui en sont l'origine. Les événements à la source de ces séquences peuvent eux-mêmes avoir une origine externe et/ou interne au SNC.

De même, les groupes d'objets mentaux formés par chaînage sont fixés par la répétition de l'activation des objets mentaux de la chaîne. Enfin, l'acquisition de nouvelles représentations est obtenue par répétition des stimuli externes.

En réalité, il existe une autre source de répétitions qui contribue à la stabilisation de la structure : la compatibilité intrinsèque entre objets mentaux. Ce mécanisme nouveau apparaît avec la grande taille du réseau

et le grand nombre de représentations existant en son sein. Il est détaillé dans les sections suivantes.

5.3.2. la stabilité et le coût d'organisation

La loi de Hebb, qui gouverne l'apprentissage au niveau cellulaire, est un mécanisme local à chaque cellule. Malgré cette implantation locale, la loi de Hebb a pourtant des conséquences à plus grande échelle. Cette section développe la tendance globale à la stabilité qui en découle, et les conflits potentiels qu'elle induit. Par exemple, la stabilisation des blocs est un mode de résolution des conflits entre objets mentaux.

5.3.2.1. la tendance naturelle à la stabilité

L'idée selon laquelle il existerait dans le réseau une tendance naturelle à la stabilité peut paraître choquante, par exemple parce qu'elle semble s'opposer à la créativité et à l'imagination dont les êtres humains font preuve.

Toute opposition disparaît si l'on prend en considération l'influence du facteur d'échelle dont nous avons déjà discuté plus haut (cf § 4.2.2). La tendance à la stabilité apparaît au niveau d'échelle des flux dans le réseau, mais elle ne préjuge pas de la signification symbolique ni de la traduction comportementale de ceux-ci, pas plus qu'elle ne modifie la physiologie des neurones qui véhiculent ces flux. La portée de cette tendance est limitée à certains niveaux d'échelle.

Au niveau d'échelle des flux circulants, la tendance à la stabilité a un rôle important. Elle est un facteur de régulation des conflits entre flux et un mécanisme d'organisation de ceux-ci qui s'ajoute à ceux vus précédemment.

L'origine de cette tendance est fort simple. Selon la loi de Hebb, chaque neurone tend à stabiliser son fonctionnement en stabilisant ses connexions efficaces. Rapporté au niveau d'échelle juste supérieur, c'est-à-dire au niveau d'un circuit bouclé, ce renforcement des connexions actives se traduit par une tendance à maintenir une circulation régulière des flux dans la boucle. Et le raisonnement peut être répété de niveau en niveau, de la boucle à la double boucle, puis à la chaîne, au bloc pour arriver finalement au niveau des flux dans le réseau. Cette tendance globale à la régularité est une propriété émergente du réseau, conséquence directe de l'application de la loi de Hebb aux neurones.

Tout événement qui rompt la régularité des flux, et donc s'oppose à cette tendance spontanée, est une violation locale de cette loi générale. Or les interactions entre deux objets mentaux se traduisent souvent par des conflits d'influence sur les cellules et structures à portée de l'un et l'autre objet mental. Ces conflits d'influence peuvent ainsi provoquer des violations locales ou momentanées de la tendance globale, violations qui trouveront une résolution en accord avec la loi générale.

5.3.2.2. le fonctionnement idéal et le coût zéro

Le fonctionnement idéal du réseau est tout simplement le respect de la tendance spontanée à la circulation harmonieuse et régulière des flux. C'est le respect de la loi de Hebb au niveau des neurones, puis à tous les niveaux supérieurs dans lesquels nous avons décrit des formes d'organisation plus complexes : boucles et objets mentaux, puis ensembles d'objets mentaux.

Un réseau d'objets mentaux dans lequel on observe une circulation harmonieuse et régulière des flux définit le fonctionnement idéal du réseau. Par convention, nous dirons que le coût de fonctionnement de ce réseau qui respecte la forme généralisée de la loi de Hebb est le coût zéro. Cette définition qualitative du coût zéro pose une référence absolue, laquelle va permettre la mesure de la qualité du fonctionnement des réseaux.

En effet, avec la référence du fonctionnement idéal, l'irrégularité du flux définit le principe du coût des interactions. Ce coût supplémentaire éventuel est mesuré par rapport au fonctionnement idéal du réseau dont le coût est de zéro.

Cette définition abstraite a bien une traduction concrète cohérente. La variabilité de l'état d'un objet mental est la cause d'une instabilité locale des flux dans le réseau puisque le flux efférent de l'objet mental change. Cet état instable empêche la répétition des flux nécessaire aux neurones pour la stabilisation de leurs connexions. C'est pour cette raison que l'instabilité de l'état de l'objet mental, et donc des flux dont il est le support, est une violation de la loi de Hebb. Ainsi, il est cohérent de considérer l'état instable d'un objet mental comme l'unité de coût des interactions dans le réseau.

5.3.2.3. l'unité de coût d'organisation

Puisque la règle générale est l'harmonie et la régularité des flux, toute interaction entre structures du réseau qui rompt localement cette régularité

génère un coût de fonctionnement supplémentaire par rapport au fonctionnement idéal du réseau. Les conflits d'influence entre objets mentaux sont un exemple de ces interactions entraînant des coûts supplémentaires.

Il faut noter que le fonctionnement physique du réseau n'est rigoureusement pas altéré par l'existence de ces coûts supplémentaires. L'existence des neurones qui forment le réseau n'en est pas menacée. Toutefois la circulation des flux subit l'influence des conflits, et les poids des connexions rendues inactives, en application de la loi de Hebb, vont diminuer. Le coût supplémentaire engendré par un objet mental instable est donc un coût de type organisationnel : l'organisation fonctionnelle du réseau est modifiée. La construction et l'évolution des blocs sont l'illustration de ces effets, expliqués dans les sections suivantes.

La propriété de comparateur de l'objet mental joue ici un rôle fondamental, car elle établit une équivalence entre l'état activé de l'objet mental et la régularité des flux dans le temps. La permanence de l'état activé témoigne de la régularité des flux et, inversement, cette régularité se traduit par un état activé permanent.

Ainsi l'objet mental, à la fois comparateur et aiguilleur de flux, est le moyen par lequel sont traduits au niveau de la structure du réseau les modifications organisationnelles qui interviennent à des niveaux plus élevés. L'objet mental est le support des effets en retour de l'organisation globale et fonctionnelle du réseau sur les éléments qui le composent.

5.3.2.4. la compatibilité intrinsèque entre objets mentaux

La définition d'un coût d'organisation permet de concevoir une forme primitive de compatibilité intrinsèque entre objets mentaux dans le réseau. Sont considérés comme compatibles des objets mentaux respectant la forme générale de la loi de Hebb, c'est-à-dire dont les flux externes se renforcent l'un l'autre. En effet, l'interaction de tels objets mentaux ne génère aucun coût fonctionnel supplémentaire, il n'y a pas de violation de la loi de Hebb.

La compatibilité au sein d'un bloc est particulière car un bloc est un ensemble d'objets mentaux doté d'une structure plus complexe que la simple chaîne (interaction selon l'espace), ou que la simple association (interaction selon le temps). Il y a en effet participation de ces deux mécanismes.

Dans la chaîne ou l'association, la question de la compatibilité intrinsèque est plus facilement tranchée qu'au sein d'un bloc, nous commencerons donc son exposé à partir de ces exemples.

Pour ces interactions élémentaires, la répétition des événements est le stimulus qui, naturellement, fixe la structure de la liaison, et garantit en même temps la compatibilité des objets mentaux ainsi liés. En effet, les événements à l'origine de l'activation sont extérieurs aux objets mentaux concernés par l'interaction. La liaison entre eux est seulement le reflet d'une relation existante entre les événements dont ils sont l'image intériorisée.

De ce fait, la relation entre les objets mentaux est elle-même l'image de la relation entre les événements extérieurs au réseau. Si cette relation dans l'environnement est stable, par exemple si elle exprime un trait permanent de l'environnement, elle sera facilement répétée et la liaison entre les objets mentaux rapidement stabilisée dans le réseau. Ils sont alors forcément compatibles car leur mise en relation n'est pas fortuite, mais est au contraire une image de l'environnement.

Dans un bloc, la question de la compatibilité prend un sens différent car l'assemblage des objets mentaux n'a pas systématiquement une origine dans l'environnement. En effet, un bloc d'objets mentaux est un ensemble de chemins de circulation établis dans le réseau, et sur lesquels se maintiennent des flux d'activation auto-entretenus.

Du fait du mode de construction d'un bloc, quand un objet mental y est rattaché, le plus souvent par le hasard des activations dans le réseau, il apporte en même temps toutes les liaisons déjà établies autour de lui. La question de la compatibilité intrinsèque est alors celle de la compatibilité des chemins correspondant aux objets mentaux du bloc avec ceux nouvellement rattachés.

5.3.3. le bloc accordé ou dissonant

L'unité de mesure des coûts d'organisation dans le réseau est donc l'objet mental, comparateur et aiguilleur de flux. Muni de cette unité, on peut mesurer pour un groupe d'objets mentaux l'écart du fonctionnement observé par rapport au fonctionnement idéal, défini comme ayant un coût nul.

Puisque l'unité de coût a été définie, la mesure de l'instabilité d'un réseau peut être faite et, en fonction du résultat de cette mesure, le bloc d'objets mentaux étudié sera alors qualifié de bloc accordé ou dissonant.

L'étude et la mesure de l'instabilité d'un bloc dans le réseau peut être abordée de manière dynamique, ou bien dans sa dimension intrinsèque et structurelle.

5.3.3.1. la mesure structurelle

La mesure structurelle de l'instabilité d'un bloc est calculable à partir des poids des connexions. En supposant qu'on puisse avoir une connaissance de la structure du réseau, c'est-à-dire connaître les poids de toutes les connexions, on peut faire la somme algébrique des signaux quand toutes les lignes sont actives simultanément. C'est ce même procédé qui a été utilisé au § 4.2.1, lors de l'étude du chemin structurel dans l'activation en aval d'un objet mental.

Ainsi, pour chaque objet mental, ce calcul en fonction de la seule structure conduit à un nombre résultant de la somme des poids des connexions, puisque par hypothèse toutes sont actives. On comprend bien que si ce nombre est nettement positif, l'objet mental sera fortement stimulé et restera activé. C'est le cas favorable puisque le résultat est cohérent avec l'hypothèse de départ.

Quand ce nombre, qui reflète l'intensité du flux d'activation qui atteint l'objet mental, est faible ou même négatif, on se trouve devant un objet mental instable, susceptible de basculer d'un état à l'autre. En effet, le résultat obtenu après calcul ne correspond pas à l'hypothèse initiale. Concrètement, dans un bloc, l'objet mental initialement activé va devenir muet et ainsi largement modifier les flux autour de lui. Ce faisant, les flux réorientés vont peut-être provoquer une nouvelle transition d'état et une nouvelle répartition des flux dans le réseau. Cette situation est typiquement celle de la bascule instable qui empêche un flux régulier de s'établir dans le bloc, au moins dans un espace localisé à l'intérieur du bloc.

Quand on applique cette procédure de calcul à tous les éléments d'un bloc, le nombre de bascules structurelles ainsi calculées permet de qualifier sa compatibilité structurelle intrinsèque.

Un bloc accordé aura ainsi un très faible nombre de bascules structurelles, un bloc dissonant un nombre élevé de telles bascules. Toutefois, toutes les

bascules structurelles n'ont pas obligatoirement d'expression fonctionnelle car, rappelons-le, un objet mental est un flux circulant sur une structure. C'est seulement le flux circulant qui a des effets dans le SNC, et la structure ne peut avoir d'effets qu'en étant le support d'un flux. Ainsi une bascule structurelle, si elle n'est pas parcourue par un flux, n'aura pas d'expression fonctionnelle. Il faut alors considérer le fonctionnement dynamique réel du bloc.

5.3.3.2. la mesure dynamique

La mesure structurelle est en effet une mesure statique, quasiment théorique. Elle donne une idée de la compatibilité intrinsèque du bloc, mais ne reflète pas directement l'expression du fonctionnement de celui-ci. C'est un phénomène équivalent à celui de l'activation en aval d'un objet mental, examiné au § 4.2.2, où la règle dynamique produit des effets différents de la règle structurelle.

La mesure dynamique est celle de la réalisation concrète de la circulation des flux dans le bloc en fonction de sa structure. La mesure dynamique tient compte de l'effet d'aiguillage de flux à chaque instant dans le bloc, effet résultant de l'état activé de l'objet mental et des effets de décalage de phase entre signaux. Tous les chemins de circulation ne sont pas forcément empruntés, ce qui implique que toutes les bascules structurelles n'ont pas forcément de réalisation dynamique effective.

Pour éclairer cet aspect du fonctionnement, nous allons reprendre le schéma des flux développé pour l'objet mental au § 3.6, transposé au niveau d'échelle supérieur, celui du bloc (voir figure 19). On peut ainsi décrire un flux interne au bloc, et un flux externe, composé d'un flux afférent et d'un flux efférent. Le flux interne est éventuellement modifié par des variations dans le flux afférent, et ces modifications du flux interne produisent éventuellement des variations du flux efférent. Le flux interne apparaît donc comme un tampon entre les flux afférent et efférent. On retrouve ainsi, à un niveau d'échelle bien supérieur, l'effet d'attracteur de l'objet mental qui gomme certaines variations de son flux afférent en conservant inchangé son flux efférent.

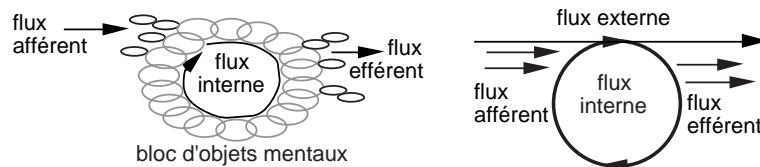


Figure 19 : le double flux interne et externe dans un bloc

Comme pour l'objet mental, il faut faire une double lecture de ce schéma, à deux niveaux d'échelle différents. Le niveau d'échelle du bloc fait apparaître un flux afférent, qui entretient un flux intérieur, lequel est transmis au reste du réseau sous forme de flux efférent. Le niveau d'échelle du réseau fait apparaître un flux qui transite par dessus le bloc, lequel est alors une voie de passage.

La mesure dynamique peut être faite au niveau du flux efférent, qui est l'expression du fonctionnement du bloc vers son environnement. Concrètement, il y a deux cas de fonctionnement exclusifs pour un bloc activé dont on observe le flux interne. Soit le flux interne est constant, sans variations localisées, et on observe un bloc accordé. Soit le flux interne est irrégulier, avec des variations localisées à type de bascule d'état d'objets mentaux, et on observe un bloc dissonant.

Un bloc peut être structurellement dissonant et, dans les conditions habituelles de son fonctionnement dans le réseau, c'est-à-dire dans ses rapports avec son environnement, fonctionnellement accordé. La dissonance structurelle intrinsèque pourrait alors apparaître avec un flux afférent particulier qui révélerait les bascules internes sous forme d'un flux efférent irrégulier.

Le bloc d'objets mentaux est une structure fonctionnelle qui développe un effet dynamique d'attracteur comparable à celui observé pour l'objet mental. Par rapport à un simple réseau de connexions non organisées, une plus grande variété de flux internes peut être véhiculée sur une même structure physique quand celle-ci est organisée au sein d'un bloc.

5.3.4. la réorganisation dynamique

Au sein d'un bloc, dissonant ou non, la réorganisation de la structure est permanente car elle est la conséquence du passage des flux d'activation et des mécanismes du fonctionnement des neurones. Ceux-ci en effet provoquent automatiquement des réajustements du poids des connexions en fonction du passage répété des flux d'activation. En d'autres termes, la

réorganisation est une composante essentielle de la dynamique naturelle des blocs.

La tendance à la régularité, expression à haut niveau de la loi de Hebb, mise en présence des mécanismes automatiques de recrutement de boucle, de chaînage et d'association, conduit le réseau vers une organisation spontanément et automatiquement centrée sur la compatibilité des objets mentaux, c'est-à-dire sur la circulation harmonieuse et régulière des flux.

En pratique, un bloc est un ensemble d'objets mentaux regroupés par des flux d'activation auto-entretenus. En accord avec la loi de Hebb, les passages répétés des flux modifient les connexions, donc la structure du bloc et éventuellement son contenu.

Il faut en effet s'attendre à observer l'élimination d'objets mentaux dont la compatibilité avec le reste du bloc deviendrait trop faible. Il suffit pour cela que la dynamique du bloc, dans sa nouvelle organisation, fasse apparaître de manière dominante des liaisons en inhibition de phase pour cet objet mental. Moins utilisées que les autres, ces liaisons voient leur efficacité diminuer, ce qui rend la liaison de l'objet mental au bloc encore moins bonne. Petit à petit, l'objet mental est activé moins fréquemment, puis plus du tout. A ce moment, l'objet mental a été éliminé du bloc. Que sa liaison au bloc ait initialement été une association ou une chaîne, elle est maintenant non fonctionnelle. Sous l'effet de la réorganisation dynamique, l'objet mental a été éliminé de l'ensemble fonctionnel des flux auto-entretenus, il ne fait plus partie du bloc.

Le processus de réorganisation est évidemment assez lent car les modifications de poids au niveau synaptique sont réalisées au moyen de changements membranaires qu'on ne peut certes pas qualifier d'instantanés. La complexité et la richesse de la structure des blocs favorisent aussi cette lenteur d'évolution, car elles multiplient les liaisons entre les différents éléments du bloc, et donc les possibilités d'activation d'un objet mental. La taille importante d'un bloc, et son caractère plus fortement accordé, sont alors des facteurs de permanence des supports dans le SNC. Les objets mentaux de ce bloc seront dotés d'une plus grande stabilité dans le temps, éventuellement au détriment de changements ou d'adaptations qu'ils auraient du subir, par exemple à la suite de changements dans l'environnement.

5.3.5. l'état d'activation d'un bloc

Le critère signant l'état d'activation pour le bloc est tout à fait superposable à celui défini pour les objets mentaux :

- un bloc actif est parcouru par un flux interne régulier et intense, à l'origine d'un flux externe efférent lui aussi régulier.
- un bloc inactif est au contraire parcouru par des flux internes partiels et instables, circulant par bouffées, et ne parcourant pas complètement le bloc. Ces flux n'entraînent aucun flux externe efférent régulier et ne sont donc pas capables d'orienter durablement les flux dans le réseau. Ces flux partiels participent à l'activité de fond du réseau, laquelle se révèle utile à son fonctionnement (cf § 5.1.4 et § 15).

Le phénomène d'activation du bloc est lui aussi superposable à celui des objets mentaux, une impulsion d'activation est nécessaire et il y a un effet de seuil. A la différence des objets mentaux pour lesquels l'état n'a que deux valeurs, on peut distinguer pour les blocs des niveaux d'activation en fonction de l'intensité des flux internes. Ainsi, dans un bloc non activé, plus les flux internes locaux seront nombreux, plus ce bloc sera proche de l'activation. Ces différents niveaux d'intensité dans les flux internes définissent les niveaux d'activation du bloc.

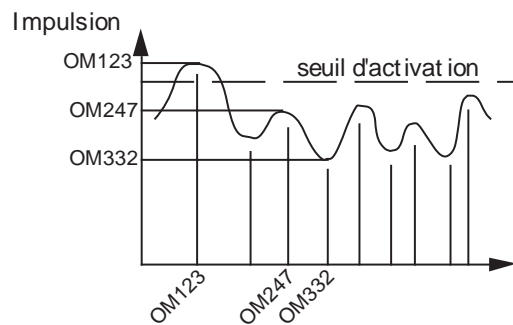


Figure 20 : Blocs d'objets mentaux et impulsion d'activation

La figure schématise plusieurs blocs d'objets mentaux, arbitrairement appelés OM123, OM247 et OM332, et un seuil d'activation normalisé pour tous les blocs. Avec ces conventions, seul l'OM123 est activé, et les impulsions d'activation pour les autres objets mentaux se mesurent par la distance au seuil d'activation. Ainsi, l'impulsion nécessaire à l'activation de l'OM247 est nettement inférieure à l'impulsion nécessaire pour l'activation de l'OM332.

Le niveau d'activation a une conséquence fonctionnelle importante : il augmente la réactivité du bloc devant un stimulus. Autrement dit, c'est parce que *chaque bloc d'objets mentaux est dans un état d'activation instable* et proche du seuil que le basculement vers l'état activé est rapide sous l'effet d'un stimulus. L'impulsion nécessaire à ce basculement est d'autant plus petite que le bloc est proche de son seuil d'activation avant l'arrivée du signal susceptible de provoquer l'activation (voir figure 21).

Les blocs non activés, qui n'orientent pas de manière efficace les flux dans le réseau, sont le siège d'une activité sporadique localisée, irrégulière, liée à l'activation d'une partie des objets mentaux qui les composent. La sommation de ces activités dispersées forme une activité de fond dans le réseau, au-dessus de laquelle on observe l'activité moins désordonnée des blocs activés.




Figure 21 : Niveau de seuil et niveau d'activité

La figure illustre l'influence mécanique du niveau du seuil sur le nombre d'objets mentaux activés, c'est-à-dire sur l'intensité des flux circulants dans le réseau.

Ce lien entre l'impulsion d'activation pour un bloc et le niveau de seuil suggère un mécanisme d'entretien de l'état de veille à l'image du contrôle réalisé, chez l'homme, par une structure du tronc cérébral appelée substance réticulée activatrice (SRA). Un seuil d'activation abaissé entraîne mécaniquement l'activation d'un plus grand nombre de blocs d'objets mentaux, situation qui favorise un niveau de bruit plus élevé et rend l'activation des blocs plus facile (voir figure 21). La veille correspondrait à cet état. Inversement, un seuil d'activation élevé entraîne mécaniquement l'activation d'un moins grand nombre de blocs d'objets mentaux, ce qui provoque une diminution globale de l'intensité des flux circulants. Une structure profonde unique pourrait ainsi contrôler globalement le niveau

d'intensité des flux dans le SNC simplement en influant sur le seuil d'activation des représentations mentales, par exemple au moyen de neurones activateurs à sérotonine qui agiraient globalement au niveau du cortex, de manière non spécifique.

6. LES INTERFÉRENCES ENTRE BLOCS D'OBJETS MENTAUX



6

Niveau d'échelle 6 : les interférences entre blocs d'objets mentaux.

L'observation porte sur les effets globaux des interférences dynamiques entre blocs d'objets mentaux. On utilise les mécanismes introduits aux niveaux d'échelles inférieures.

Dans la section précédente, les échanges de signaux dans le SNC se sont enrichis d'un nouveau mécanisme de régulation de haut niveau. Nous disposons maintenant, au moment d'aborder des fonctions plus proches de la cognition et de l'expérience de chacun, d'un arsenal d'interactions comprenant :

- l'effet d'attracteur de l'objet mental,
- l'aiguillage de flux,
- le chaînage et l'association d'objets mentaux,
- et enfin les blocs d'objets mentaux, nouvelle brique de notre étude.

Les blocs sont des ensembles fonctionnels de flux auto-entretenus. Ce sont des structures à la fois riches et durables. Elles relient de vastes ensembles d'objets mentaux par des liens de type chaînage, association temporelle ou compatibilité. Cette structure variée donne aux blocs une nature fondamentalement différente de la simple double boucle des objets mentaux, qui se traduit par l'existence de niveaux d'activation.

Sur le plan du fonctionnement, par contre, les blocs et les objets mentaux partagent la même nature dynamique : ce sont des flux circulant sur la structure sous-jacente. Des phénomènes d'interaction et de conflit entre flux au niveau des blocs vont ainsi apparaître, comparables dans leurs principes à ceux déjà étudiés au niveau des objets mentaux.

Les interférences entre blocs forment le niveau d'analyse des mécanismes de fonctionnement du SNC le plus proche des opérations cognitives. Les

interférences apparaissent comme l'expression de la résolution des conflits fonctionnels entre blocs, tout comme la constitution des blocs est une forme de résolution des conflits entre objets mentaux.

Un point important à noter pour la bonne compréhension de ces phénomènes est le rôle de support des effets en retour qu'ont les objets mentaux. Chaque objet mental est le support des effets de l'organisation globale sur les éléments du réseau (cellules). Le mécanisme général est, comme exposé précédemment, lié à la loi de Hebb. Il existe un confinement fonctionnel des flux (par aiguillage dynamique) sur les connexions qui forment la structure de l'objet mental. Selon la loi de Hebb, le passage de ce flux modifie la structure dans le sens de cette utilisation. Aux niveaux d'échelle plus élevés, comme la réorganisation spontanée au sein d'un bloc, ce mécanisme a évidemment les mêmes effets. L'activation fonctionnelle d'un bloc en renforce la structure, mais aussi la structure de tous ses composants. Le fonctionnement dynamique a ainsi des conséquences structurelles sur le réseau.

Les sections suivantes, qui étudient les formes de résolution des conflits fonctionnels entre blocs, de la plus simple à la plus complexe, vont naturellement nous conduire aux fonctions cognitives, notamment à l'abstraction.

6.1. L'ABSORPTION CANNIBALE

L'absorption d'un bloc par un autre est le mode de résolution de conflit le plus simple : il se résume en la domination complète d'un bloc sur l'autre. Cette situation élémentaire va nous permettre de poser le problème général des conflits entre blocs.

Tout comme les objets mentaux ont une zone d'influence autour d'eux liée à la dynamique du flux d'activation circulant dans la double boucle, les blocs ont aussi une zone d'influence qui dépasse les limites physiques strictes des objets mentaux qui les composent.

Deux blocs activés peuvent ainsi avoir, à l'intersection de leurs zones d'influences, une zone d'influence commune dans laquelle va se dérouler le conflit entre les deux blocs (voir figure 22).

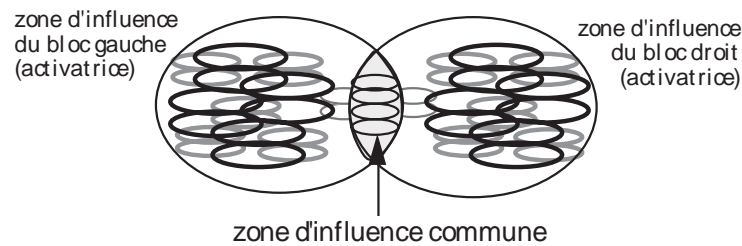


Figure 22 : Description structurelle du conflit entre blocs
Chaque bloc a une zone d'influence autour de lui, tout comme les objets mentaux. La zone grisée, au centre, est une zone d'influence commune.

Mais nous ne sommes plus au niveau de l'objet mental avec des flux simples, le bloc est une structure stabilisée complexe avec une importante compatibilité intrinsèque, et dont l'activité est quasi permanente, mais avec plusieurs niveaux d'activation (cf § 5.3.5). Les facteurs prépondérants dans la résolution du conflit sont donc le niveau d'activité du bloc et le mécanisme de compatibilité.

Le niveau d'activité du bloc dépend évidemment de ses relations avec l'environnement, et notamment de la présence autour de l'individu des objets à l'origine des représentations présentes dans le bloc. C'est le cas tant pour les représentations de perceptions et d'objets que pour les habiletés particulières, acquises par apprentissage. Par exemple, un pianiste sans piano pendant longtemps perd forcément une partie de sa dextérité car il ne peut plus s'exercer.

Si l'activité d'un bloc est régulièrement stimulée par des signaux externes, et que sont souvent produits des flux réguliers et intenses, sa structure sera maintenue par la circulation des flux qui garantit la compatibilité intrinsèque. Dans le cas contraire, le bloc ne recevra pas de confirmation par l'environnement. Il n'y aura alors dans ce bloc aucun phénomène de limitation des effets de tous les mécanismes vus précédemment : réorganisation du bloc, association et chaînage des objets mentaux, inhibitions locales pour les flux, etc...

La résolution du conflit est justement la mise en œuvre de ces mécanismes selon des schémas typiques

L'absorption est une sorte de cannibalisme d'un bloc par un autre, au travers de son système d'influence. Il y a destruction progressive de la structure du bloc absorbé par infiltration, puis domination des flux du bloc cannibale, avec éventuellement élimination des objets mentaux non compatibles (voir figure 23).

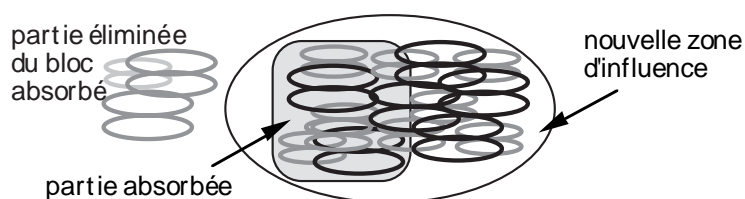


Figure 23 : recombinaison d'un bloc après absorption partielle d'un autre bloc

Le nouveau bloc a intégré dans sa nouvelle structure une partie des objets mentaux du bloc absorbé.

Un exemple musical concrétisera ce mécanisme. Pour les besoins de l'expérience, supposons une phrase musicale commune à deux mélodies par ailleurs fort différentes, ce qui est une situation assez fréquente. Supposons maintenant que l'individu ne connaisse au début qu'une seule de ces mélodies, laquelle serait représentée par le bloc gauche dans la figure 24. Puis on lui fait entendre la seconde mélodie. Progressivement, le bloc droit, image de la seconde mélodie se constitue. Tant que les deux mélodies sont proposées à l'écoute, les deux blocs coexistent.

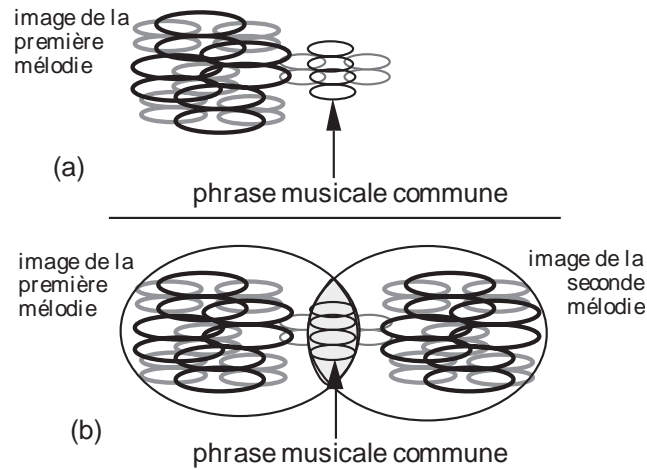


Figure 24 : la phrase musicale commune à deux mélodies

La figure illustre un cas concret de zone d'influence commune à deux blocs, ici par une phrase musicale commune à deux mélodies, lesquelles sont représentées par les blocs droit et gauche du schéma (b). Le schéma (a) montre cette même phrase dans le bloc gauche, image de la première mélodie au début de l'expérience.

Dans un troisième temps, seule la seconde mélodie est proposée à l'écoute, et de manière répétée. Peu à peu, le bloc de droite, image de cette mélodie, étend son influence et finit par absorber le bloc gauche qui n'est plus suffisamment activé pour maintenir sa structure (voir figure 25).

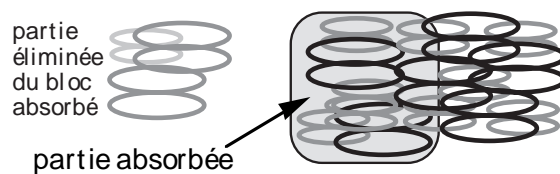


Figure 25 : absorption cannibale de la première mélodie par la seconde
A partir de la phrase commune, le bloc droit a progressivement étendu son influence sur toute la structure du bloc gauche qui a été partiellement absorbé, et pour une autre partie éliminé du nouveau bloc. Il y a eu absorption cannibale du bloc gauche par le bloc droit.

L'absorption est un mode de résolution des conflits du type «faute de combattants». La résolution est obtenue au prix d'une réorganisation structurelle importante dans laquelle un des blocs à l'origine du conflit est détruit. L'issue du conflit, éventuellement longue à atteindre, est définitivement acquise.

6.2. LE STATU QUO PAR EXCLUSION RÉCIPROQUE

Ce mode de résolution est assez simple sur le plan de son mécanisme, mais ses effets sont beaucoup plus variés que pour l'absorption. Le statu quo organisationnel s'accompagne d'une exclusion fonctionnelle réciproque des deux blocs d'influence.

Le mécanisme fondamental est celui d'une individualisation fonctionnelle des objets mentaux de la zone d'influence commune. La zone d'influence intermédiaire s'organise en un bloc fonctionnel d'exclusion caractérisé par les effets inhibiteurs de ses liens avec chacun des blocs (voir figure 26).

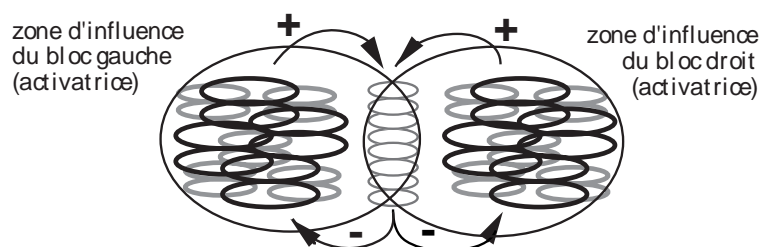


Figure 26 : Description statique du bloc d'exclusion

Le bloc d'exclusion est susceptible d'être activé par chacun des deux blocs, mais quand il est activé par un bloc, il a des effets de phase inhibiteurs sur l'autre. Une telle structure admet deux états stables mutuellement exclusifs comme solutions.

Quand ce bloc d'exclusion est activé, par exemple avec le bloc gauche, son flux externe arrive en inhibition de phase sur le bloc droit, et en concordance de phase sur le bloc gauche. Ainsi, le bloc d'exclusion est intégré au bloc gauche, avec lequel il est activé, et il empêche l'activation du bloc droit. La situation inverse est aussi possible. Dans ce cas, le bloc d'exclusion est intégré au bloc droit, avec lequel il est en phase, et il empêche l'activation du bloc gauche par opposition de phase (voir figure 27).

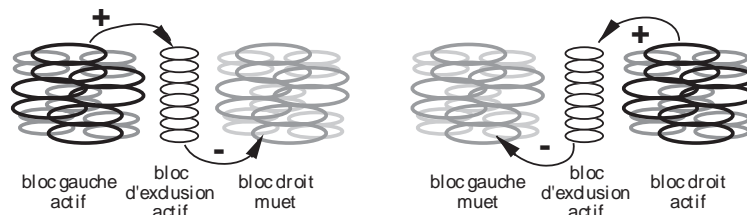


Figure 27 : le bloc d'exclusion dynamique fonctionnel

Dynamique du fonctionnement de ces trois blocs. Soit le bloc d'exclusion a été activé par le bloc gauche, et alors il inhibe le bloc droit car il est en opposition de phase avec celui-ci (schéma de gauche). A l'inverse, dans le schéma de droite, le bloc d'exclusion a été activé par le bloc droit, et il inhibe le bloc gauche.

Ce type de résolution s'observe quand les blocs sont suffisamment fréquemment activés pour maintenir leur structure propre. Il est de plus nécessaire que l'activation d'un bloc soit toujours exclusive de l'activation de l'autre. C'est sous l'influence de stimuli de l'environnement imposant ces caractéristiques que la zone d'influence commune développe ses effets fonctionnels inhibiteurs envers chacun des blocs. Dès qu'un bloc est activé, il a un effet inhibiteur sur l'autre qui empêche son activation et, ainsi, la structure du réseau est bien l'image des relations existantes entre les stimuli dans l'environnement. L'activation d'un bloc est exclusive de celle de l'autre bloc.

Nous illustrerons ce phénomène par un exemple classique : l'illusion d'optique liée à l'interprétation d'une image ambiguë. Cet exemple montre l'influence déterminante de facteurs extérieurs à la seule perception, comme l'activité d'autres blocs voisins, qui confirment un bloc et une interprétation au détriment de l'autre. Dans un cas, ce sera la vue du cube par au-dessus, puis dans l'autre cas la vue par en-dessous.



Figure 28 : des cubes sans équivoque

Le cube (a) est interprété comme vu du dessus puisque sa face avant masque le coin arrière inférieur gauche. L'observateur est au-dessus du cube et à droite. Au contraire, le cube (b) est interprété comme vu du dessous puisque sa face avant masque le coin arrière supérieur droit. Dans ce cas, l'observateur est au-dessous du cube et à gauche.

Dans les schémas de la figure 28, il n'y a pas de doute possible sur la position de l'observateur vis-à-vis du cube. Le masquage d'un coin particulier par la face avant du cube impose une interprétation sans équivoque de l'image : l'observateur est soit au-dessus et à droite, soit en-dessous et à gauche du cube. Tout repose sur l'existence d'une face opaque qui, avec nos habitudes visuelles, impose qu'elle soit devant puisqu'elle masque d'autres parties de la figure.

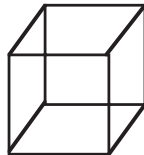


Figure 29 : un cube équivoque : où est l'observateur ?

Selon qu'on considère l'arrête la plus haute comme en avant ou en arrière du cube, la position de l'observateur change. Si cette arrête est en arrière, l'image est interprétée comme vue du dessus et l'observateur est au-dessus du cube et à droite. Au contraire, si cette arrête est en avant, l'image est interprétée comme vue du dessous. Dans ce cas, l'observateur est au-dessous du cube et à gauche.

Quand la face opaque disparaît, comme dans la figure 29, l'image devient ambiguë : le cube est-il vu du dessus ou du dessous ? Les deux interprétations sont possibles, et elles sont également valides. Les blocs représentant ces interprétations sont tous deux susceptibles d'être activés, mais pas ensemble.

L'incompatibilité totale entre ces interprétations impose qu'il n'y ait pas d'activation simultanée des deux blocs, mais au contraire une exclusion mutuelle. Le conflit entre les blocs est résolu au moyen d'un bloc fonctionnel d'exclusion mutuelle.

Le conflit et sa résolution ne produisent pas de modification des structures des blocs, il y a dans ce cas, contrairement à l'absorption, statu quo structurel.

6.3. L'ABSTRACTION

L'abstraction est le mode de résolution de conflits le plus complexe, et aussi le plus intéressant. On peut l'imaginer comme une «sortie par le haut» de l'affrontement entre blocs. Le conflit donne naissance à une nouvelle entité de niveau plus élevé, laquelle permet de gérer ce conflit. Ce mode de résolution est le passage vers l'attribution d'une signification symbolique aux blocs et à leur fonctionnement.

L'abstraction est un phénomène très important car elle produit de nouveaux objets mentaux, dits *abstrait*s, et introduit un *nouveau mode de constitution* des objets mentaux directement lié à l'augmentation de la longueur des chaînes dans les blocs. Le mécanisme est qualitativement nouveau en ce sens que :

- a- la production du nouvel objet mental ne survient que lorsqu'existent des objets mentaux élémentaires en suffisamment grand nombre,
- b- et cette production est un phénomène automatique, c'est-à-dire non consécutif à un événement extérieur.

6.3.1. le niveau d'apparition des objets mentaux abstraits

Pour étudier ce phénomène, nous allons utiliser une nouvelle approche de la structure des blocs, et nous intéresser à la position du bloc et des objets mentaux qui le composent par rapport à la source effective des signaux dans le SNC.

Les objets mentaux sont des représentations internes d'événements survenus à l'extérieur de l'organisme, et traduits par les structures perceptives en signaux à destination du SNC. Pour simplifier, la source effective des signaux dans le SNC sera assimilée au point de connexion du nerf sensitif, par exemple le nerf auditif, avec le cortex cérébral.

Dans un bloc activé, chaque double boucle reste en activité d'autant plus longtemps qu'elle est intégrée à une chaîne longue. Dans ce cas en effet, la chaîne une fois activée présente une grande inertie parce qu'elle est le siège d'un flux auto-entretenu. A cause de cette inertie, l'extrémité de la chaîne éloignée des points d'entrée des signaux prend alors une indépendance relative vis-à-vis des stimuli excitateurs et reste activée après la disparition du stimulus. Dès lors que ses relations d'activation se font de manière dominante avec des objets du bloc plutôt qu'avec des objets activés par points d'entrée de signaux, l'état activé d'un objet mental perdure même après l'extinction du stimulus activateur du bloc.

La longueur de chaîne minimum qui permet ce découplage entre le stimulus et l'état d'activation définit le *niveau d'apparition* des objets mentaux abstraits. Cette distinction topologique permet d'opposer les objets mentaux abstraits aux objets mentaux spécifiques qui sont proches du niveau de la source des stimuli.

La définition du niveau est ainsi qualitative : c'est l'apparition des objets mentaux abstraits qui prouve que la longueur minimum nécessaire a été atteinte⁷ et aucun argument ne permet de figer a priori ce nombre à une valeur déterminée, ni d'affirmer que cette valeur serait valable pour les différentes modalités perceptives.

Structurellement, cela revient à considérer la longueur absolue de la chaîne d'objets mentaux entre les voies sensibles du SNC et les représentations abstraites associées. Fonctionnellement, une relative diminution des stimuli, entraînant une activation d'objets mentaux moins spécifiques dans

⁷ Rémy Chauvin a observé un phénomène d'effet de nombre équivalent avec les populations de fourmis. Il faut un nombre d'individus minimum pour observer l'organisation de la population de fourmis en fourmilière, mais ce nombre seuil n'est pas très précis. En effet, quand on s'en écarte beaucoup en plus ou en moins, les effets sont déterminés : il y a systématiquement soit apparition, soit absence d'apparition d'une organisation en fourmilière. Mais quand on est proche du nombre seuil, l'apparition de l'organisation n'est pas régulièrement obtenue, ce qui fait supposer l'existence d'autres facteurs. Il résulte toutefois de ces expériences que l'influence du nombre d'individus sur la probabilité d'apparition de l'organisation en fourmilière est certaine.

le SNC, suffit à favoriser cette indépendance et donc les associations spontanées. On reconnaît là des situations concrètes : chacun préfère être au calme pour réfléchir, chacun a une fois fait l'expérience d'un environnement trop stimulant, ou trop bruyant, qui l'a gêné dans sa concentration. Cet exemple est repris dans la section 12 avec la représentation de la conscience en fonctionnement.

L'apparition des objets mentaux abstraits est un effet qualitatif apparaissant spontanément dès que la distance minimale, mesurée par la longueur de la chaîne, à partir du niveau source est atteinte. Il s'agit d'une conséquence mécanique et automatique liée à la topologie et au fonctionnement du réseau. Cet effet produit stabilité, autonomie et indépendance d'activation des objets mentaux abstraits et des blocs d'objets mentaux abstraits.

Les blocs d'objets mentaux abstraits fonctionnent comme tous les autres blocs. Ils sont notamment soumis aux mêmes pressions de réorganisation interne, dont la compatibilité, et aux mêmes contraintes d'évolution en fonction des stimuli externes. Associés à la relative permanence d'activation des objets mentaux abstraits, ces mécanismes vont produire des effets particuliers.

6.3.2. la convergence

La convergence désigne le fait que des signaux différents vont finalement être tous regroupés comme étant activateurs d'un même objet mental abstrait dans un bloc abstrait. Il s'agit là d'un phénomène comparable dans son principe à l'effet d'attracteur pour un objet mental, mais à un niveau d'échelle bien supérieur.

La convergence résulte de la réorganisation du bloc autour d'un objet mental abstrait dont l'activation est quasi permanente et qui capte les flux des objets mentaux de niveau inférieur, à condition qu'ils soient compatibles, en les intégrant aux chaînes qui sont le support du flux auto-entretenu de l'objet mental abstrait.

6.3.3. l'élagage des différences

L'élagage est l'autre facette de la réorganisation du bloc autour d'un objet mental abstrait. Il s'agit maintenant de l'élimination progressive des objets mentaux de niveau inférieur dès qu'ils deviennent incompatibles, la réorganisation les éjectant des chaînes-support de l'objet mental abstrait.

En effet, les coûts de fonctionnement et d'organisation supplémentaires induits par les conflits entre objets mentaux provoquent l'éjection du bloc de ces objets mentaux trop différents du noyau de compatibilité.

La réorganisation automatique du bloc abstrait a donc deux facettes : la première est la convergence, et l'élagage est la seconde. Ces facettes sont en réalité des mouvements simultanés de réorganisation du bloc. Sous l'effet de ces mouvements, beaucoup de représentations du bloc verront leur statut initial changer. Certaines, simples éléments d'une chaîne vont progressivement être intégrées à la partie abstraite du bloc pour constituer une caractéristique permanente de l'entité considérée. D'autres représentations, initialement parties intégrantes du bloc, deviendront finalement incompatibles et seront éjectées. Le statut des premières sera devenu celui d'objets mentaux abstraits alors que les secondes seront devenues étrangères au bloc.

6.3.4. les effets de l'abstraction

La convergence et l'élagage sont des mécanismes fonctionnels qui se développent automatiquement dans les blocs objets mentaux abstraits. La signification symbolique de l'abstraction, qui est sous-jacente, n'en découle pourtant pas directement. La validité éventuelle des constructions obtenues par abstraction repose sur le couplage entre les représentations spécifiques, les représentations abstraites construites et les événements ou la structure de l'environnement.

En effet, si le mécanisme d'abstraction est inscrit dans la fonctionnement du réseau et produit automatiquement des blocs abstraits, ceux-ci doivent être confirmés par répétition et validation de leur compatibilité avec l'environnement. C'est la simple application de la règle générale de l'apprentissage. Ce point est abordé rapidement au § 7.2 avec l'oubli et discuté de manière plus approfondie dans la section 9. Le lecteur attentif aura vu poindre le principe : le réseau fabrique automatiquement beaucoup de représentations et seules celles qui sont confirmées au travers des interactions avec l'environnement voient leur structure stabilisée dans le réseau.

Les effets de l'abstraction présentés ci-dessous sont une première interprétation symbolique des mécanismes d'interférence entre objets mentaux.

6.3.4.1. du percept au concept

Avec l'abstraction comme mécanisme fonctionnel apparaissant spontanément dans un réseau d'objets mentaux, le problème du passage naturel de la perception vers la construction de catégories abstraites est résolu. Il ne s'agit plus que d'une extension conceptuelle logique du mécanisme de l'abstraction et de la construction des blocs d'objets mentaux abstraits.

Toutefois, si ce passage semble maintenant possible, il pose précisément la question des relations entre le réseau et son environnement. En effet, ces relations doivent avoir certaines caractéristiques pour induire l'apparition des concepts. Ce point est discuté en détail dans les sections 10 et 13, puis utilisé dans les sections 14 et 15.


6.3.4.2. l'influence des concepts sur le comportement.

L'introduction des objets mentaux abstraits donne corps à la notion de concept, si souvent utilisée. Comme l'objet mental abstrait, le concept est un flux auto-entretenu dans un bloc abstrait.

Or, nous l'avons vu plus haut, un bloc abstrait est un ensemble d'objets mentaux dont le niveau d'activation est relativement indépendant des stimuli extérieurs. Un bloc abstrait est ainsi susceptible de conserver un niveau d'activation élevé de manière durable. Il peut ainsi influencer de manière importante, et sur une longue période, sur tous les flux dans le réseau.

L'objet mental et le bloc abstrait apparaissent alors logiquement comme le support possible des représentations des désirs, de la morale ou de la volonté. Mais l'objet mental n'est pas que le support d'une représentation, il est aussi un vecteur de flux actif dans le réseau. Ainsi, l'activité permanente dont l'objet mental et le bloc abstrait sont le siège serait le vecteur de l'influence des concepts abstraits sur le comportement. Ce point sera discuté en détail dans les sections 14 et 15.

7. L'INTERPRÉTATION COGNITIVE DU FONCTIONNEMENT DU SNC



7

Niveau d'échelle 7 : l'interprétation des interférences entre blocs d'objets mentaux.

L'observation porte sur la signification cognitive que l'on peut donner aux interférences dynamiques entre blocs d'objets mentaux. On se rapproche de l'expérience concrète de chacun.

Le bloc d'objets mentaux est la brique de base nécessaire pour aborder ce niveau d'analyse et les fonctions cognitives de niveau supérieur à la simple acquisition. Afin de faciliter la lecture, le terme d'objet mental désignera indifféremment un bloc d'objets mentaux ou un objet mental.

La première interprétation cognitive du fonctionnement du SNC a été faite avec l'examen de l'abstraction et de ses effets. L'élagage et la convergence dans un bloc abstrait sont ainsi le support de la généralisation au sens symbolique du terme. Il s'agit bien de l'identification de parties communes à différents percepts acquis séparément, puis du rattachement de ces parties communes à une même représentation (convergence) en même temps qu'on élimine les différences (élagage).

Cette section détaille d'autres interprétations cognitives: la confusion et la généralisation, l'oubli, les associations d'idées, et le choix.

D'une manière générale, dans les interactions entre objets mentaux et les interférences entre blocs, on observe qu'un mécanisme unique produit des effets multiples, éventuellement opposés. On retrouve là l'atout majeur des réseaux de neurones par rapport aux modèles symboliques à base de règles utilisés en intelligence artificielle : les mécanismes sont déterministes mais les effets sont non déterminés.

Dans le cadre des objets mentaux présenté ici, la dissociation entre le caractère déterminé et déterministe d'un mécanisme, et les effets non

déterminés de ce mécanisme est une conséquence des différences de niveau d'échelle d'observation. Les mécanismes sont implantés à un niveau d'échelle et les effets sont toujours observés à un niveau d'échelle différent ; ces effets sont dits émergents. Ainsi, la loi de Hebb s'applique au niveau des neurones, mais son effet aux niveaux d'échelle supérieurs, c'est-à-dire des objets mentaux et du réseau, est une tendance à la régularité des flux. Au plus haut niveau, celui du comportement de l'individu, l'effet émergent lié à cette loi est traduit par une tendance globale : l'adaptation à l'environnement.

Mais les effets émergents ne sont pas que des effets des niveaux inférieurs vers les niveaux élevés. Par exemple, l'orientation des flux dans le réseau, fonctionnellement induite par les objets mentaux, pose une contrainte sur la mise en œuvre de la loi de Hebb : l'adaptation des poids ne concernera que les connexions actives parcourues par les flux. Ainsi, le fonctionnement du réseau a un effet sur sa structure, il y a un effet «émergent» des niveaux supérieurs d'organisation vers les niveaux moins élevés.

7.1. GÉNÉRALISATION ET CONFUSION

L'abstraction est un phénomène qui se produit naturellement dans le SNC, mais les effets produits par ce mécanisme, c'est-à-dire son interprétation fonctionnelle, restent à préciser. Comme beaucoup de phénomènes émergents et comme nous l'avons déjà remarqué dans notre étude des objets mentaux, le mécanisme à l'œuvre dans le réseau est indépendant de ses effets.

Le mécanisme de l'abstraction peut avoir des effets jugés favorables sur le plan cognitif, notamment dans le domaine de la reconnaissance d'objets. En effet, quand l'abstraction conduit à l'identification d'un piano malgré des changements de couleur ou de forme mineures, certaines théories parleront de généralisation, et d'autres de construction d'une catégorie ou d'un modèle.

Dans des domaines plus abstraits comme les mathématiques, ce même mécanisme permettra l'identification de deux équations malgré des changements de variables parce qu'elles ont une structure identique. Là encore, les effets de ce mécanisme de résolution de conflits d'influence seront jugés comme favorables.

Inversement, l'effet de l'abstraction peut être jugé défavorable quand il entraîne la non-distinction de deux mots, ou de deux accords de musique, ou encore de deux variations mélodiques sur une partition. Dans ce cas, l'abstraction aura entraîné une confusion ou une fausse reconnaissance.

Du point de vue des objets mentaux et du fonctionnement du réseau, le mécanisme d'abstraction est absolument nécessaire parce qu'il permet le respect global de la loi de Hebb et la réduction des coûts d'organisation. Les effets cognitifs sont une conséquence de cette nécessité interne, mais le mécanisme ne les détermine pas en eux-mêmes, il détermine seulement la possibilité de leur apparition.

Du point de vue cognitif, l'abstraction améliore les capacités d'adaptation des SNC qui en disposent par rapport à ceux qui n'en disposent pas. En effet, les individus dotés de SNC ayant ces capacités vont voir leurs possibilités d'interactions avec leur environnement enrichies et, par voie de conséquence, leur capacité d'adaptation améliorée.

Mais l'existence de cette possibilité ne garantit pas plus la bonne adaptation systématique des individus que la capacité d'abstraction ne garantit la construction de concepts abstraits valides. Cela dépend finalement des échanges entre l'individu et son environnement, comme exposé dans les sections 13 et 14.

7.2. L'OUBLI

Comme dans toute situation d'apprentissage, la répétition de certains événements, de certaines pratiques, renforce les objets mentaux qui y sont associés. Il faut bien comprendre que c'est au détriment des autres représentations, lesquelles deviennent relativement moins utilisées. C'est ainsi qu'on oublie progressivement les connaissances ou les mouvements peu souvent employés, simplement parce qu'on en pratique d'autres. Un apprentissage nouveau participe au renforcement de ceux sur lesquels il s'appuie, et à l'affaiblissement puis à l'oubli des autres parce qu'il modifie l'équilibre relatif des poids des connexions autour des représentations utilisées.

Il en résulte que l'on peut chercher le point critique du mécanisme de l'oubli dans les relations de la représentation avec le reste du réseau. En effet, dans un SNC complexe avec un fonctionnement dynamique

s'appuyant sur de nombreux mécanismes parfois antagonistes, le niveau d'activation d'un bloc d'objets mentaux est principalement déterminé par l'organisation et la dynamique de ses relations avec tous les autres objets mentaux du réseau, et notamment avec ceux qui sont le plus souvent actifs. Examinons comment cette approche peut s'appliquer.

La définition fonctionnelle cognitive de l'oubli est simple : c'est la perte de l'accès à une représentation, c'est-à-dire l'incapacité à activer cette représentation. Au niveau du réseau, c'est-à-dire en termes d'activation de l'objet mental support de la représentation, il y a deux cas extrêmes qualitativement différents conduisant à cette perte de capacité d'activation, et l'oubli correspond au parcours de tous les intermédiaires entre ces extrêmes.

Un des extrêmes est l'oubli fonctionnel. Le premier stade de l'oubli fonctionnel d'une représentation est la baisse de la fréquence d'activation liée à l'affaiblissement de l'efficacité des liens de celle-ci avec le réseau. Dans ce genre d'oubli, il n'y a pas d'altération de la structure de la représentation, elle est aisément réactivable.

L'autre extrême est l'oubli structurel. Dans ce cas au contraire, il y a perte de la structure de la représentation. La représentation ne peut plus être activée, elle doit être réapprise comme si elle n'avait jamais été connue. Au moment de ce nouvel apprentissage, celui-ci sera plus ou moins facilité par les acquisitions fixées et actives.

L'oubli d'une représentation est l'expression au niveau cognitif de la diminution de l'efficacité de ses liens avec le réseau : la représentation oubliée est devenue moins facilement activable. Cette baisse d'efficacité intervient dans de nombreux phénomènes décrits au niveau des blocs : la réorganisation interne, l'élimination progressive d'objets mentaux à faible compatibilité avec le bloc, l'absorption d'un bloc par un autre, l'élagage de l'abstraction.

L'oubli est encore une illustration des effets du fonctionnement et des niveaux d'organisation élevés sur la structure du réseau. C'est l'aiguillage des flux sur certains chemins qui les favorise relativement aux autres et entraîne, par simple application de la loi de Hebb, la diminution de l'efficacité des connexions moins utilisées.

La question de l'oubli des qualités ou capacités dont dispose naturellement l'individu mérite une mention particulière. En effet, les dons ou capacités innés ne sont pas concernés par l'oubli en ce sens qu'ils sont l'expression de la structure pré-existante, précâblée, de l'individu. L'oubli touchera par contre les acquisitions faites autour et à partir de ces dons. Par exemple, certains enfants ont naturellement une grande aisance pour manipuler l'instrument. En travaillant, ils acquièrent plus vite que d'autres une plus grande maîtrise technique et une plus grande vélocité. Si par la suite, ils ne pratiquent plus l'instrument, ils vont perdre une grande partie de cette maîtrise. Ils garderont toutefois des facilités pour la retrouver dès qu'ils reprendront la pratique de l'instrument. L'oubli aura touché les acquis, pas les prédispositions naturelles de l'individu.

7.3. LES ASSOCIATIONS D'IDÉES

Ce phénomène est abordé maintenant, avec les interprétations symboliques, car il prend ainsi un sens concret et pratique. En effet, les mécanismes à l'origine des associations d'idées sont multiples et ils ont pratiquement tous été étudiés avec les interactions entre objets mentaux. L'association des représentations aurait pu être décrite plus tôt, mais elle n'aurait alors pas eu d'incarnation facilement accessible.

Définissons d'abord ce dont il est question. L'association d'idée est la mise en rapport de représentations pas encore reliées entre elles, et plus précisément la mise en rapport d'objets mentaux abstraits, puisqu'ils sont le support des idées.

Les associations temporelles entre objets mentaux sont le premier mécanisme étudié qui puisse être le support de l'association d'idées au niveau cognitif. Le chaînage, mais surtout la réorganisation au sein d'un bloc sont d'autres exemples de mécanismes connus, eux aussi susceptibles d'être le support d'associations d'idées.

De toutes façons, quel que soit le mécanisme à l'origine de l'association d'idées, le devenir de celle-ci est soumis aux règles générales de l'apprentissage. Ces points sont développés dans les deux sections suivantes.

7.3.1 la recombinaison des blocs d'objets mentaux

Les mécanismes intimes de l'association d'idées sont la réplication, au niveau d'échelle des blocs abstraits, des mécanismes observés pour les

objets mentaux. Leur examen est ainsi de relativement peu d'intérêt puisqu'on peut se référer aux sections précédentes pour en avoir le détail. On notera pour mémoire que l'association d'idées sera, comme l'association d'objets mentaux, favorisée par l'activation simultanée des représentations.

L'interprétation cognitive du phénomène mérite plus d'attention. Que produisent, en effet, au niveau des blocs abstraits, ces mécanismes automatiques de liaison entre objets mentaux ?

La mise en œuvre spontanée des mécanismes d'interaction et des interférences entre représentations conduit à la création de liens nouveaux, plus ou moins fortuits entre des blocs en fonction de leurs activations. Il y a génération automatique de nouvelles associations⁸, éventuellement dépourvues de sens, c'est-à-dire génération de variété dans le réseau. Ces nouvelles liaisons permettent la réorganisation des blocs selon de nouveaux chemins, la création de nouvelles solutions aux conflits entre représentations, et l'apparition de nouveaux blocs (voir figure 30).

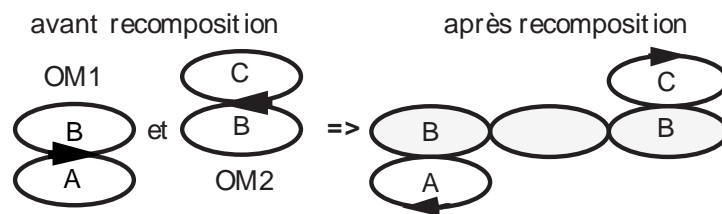


Figure 30 : recombinaison de deux blocs d'objets mentaux autour de leur dimension commune

Le schéma utilise une représentation simplifiée des blocs sous forme d'objet mental. La boucle B représente une dimension commune aux deux blocs mentaux abstraits OM1 et OM2. L'association entre les deux objets mentaux se développe selon cette dimension commune.

⁸ Afin de permettre une approche systématique du phénomène, la conception théorique suivante pourrait être appliquée à l'analyse des facteurs favorisant l'apparition de ces associations entre blocs. Choisissons de représenter les objets mentaux dans un espace vectoriel avec une base, laquelle est indépendante des objets mentaux. Posons que si des objets mentaux ont

Les associations spontanées peuvent ainsi favoriser le respect global de la loi de Hebb et de son expression généralisée, la tendance à la circulation harmonieuse des flux dans le réseau.

7.3.2 le devenir des associations d'idées

Dans ce processus de recombinaison spontanée, l'indépendance relative des représentations vis-à-vis des stimuli qui les ont produites joue un rôle majeur, justement parce que l'inertie de l'activation permet le développement plus facile des liaisons nouvelles dans les blocs.

En effet, une fois généré sous l'effet automatique des interférences et recombinaisons, le nouvel objet mental abstrait sera soumis aux effets des stimuli extérieurs, c'est-à-dire qu'il sera sélectionné par confrontation à l'environnement, celle-ci étant plus ou moins directe. De cette confrontation avec l'environnement va dépendre le devenir de l'association récemment apparue.

Supposons par exemple qu'un objet mental abstrait associe les chaînes de deux stimuli A et B qui sont des images de traits de l'environnement. Ce même environnement va alors influencer sur le devenir de l'objet mental abstrait nouvellement construit.

L'influence peut être positive quand les deux stimuli A et B sont effectivement régulièrement associés dans l'environnement. Dans ce cas, l'objet mental abstrait qui associe les représentations de ces deux stimuli sera renforcé dans sa structure et il deviendra plus stable et plus réactif. A la limite, il pourrait être activé par un seul des deux signaux. C'est

des projections communes sur des dimensions de cette base, alors les interférences entre eux, et entre les blocs dans lesquels ils apparaissent, sont possibles. La question du pourquoi des interactions devient alors : quelle serait la traduction matérielle de ces dimensions communes, c'est-à-dire d'éléments de la base, dans le réseau ? Une réponse évidente surgit. Comme toutes les représentations reposent sur l'organisation fonctionnelle des chemins de circulation entre objets mentaux, les dimensions communes sont des circuits progressivement sélectionnés dans le réseau, et qui sont devenus spécifiques justement parce qu'ils sont communs à de nombreuses représentations.

exactement le schéma classique du réflexe conditionné de Pavlov⁹, mais avec un mécanisme et une perspective cognitifs. Ce point est détaillé plus loin, au paragraphe 11.4.

L'influence peut être au contraire négative quand les deux stimuli A et B ne sont pas associés dans l'environnement. Dans ce cas, le circuit ne sera pas renforcé et donc, relativement à d'autres, il va être sous-utilisé. L'expérience répétée de perception dissociée des signaux A et B renforcera progressivement d'autres circuits au détriment de celui-ci, et entraînera la dégradation de la structure de l'objet mental abstrait nouvellement constitué. C'est une illustration concrète du phénomène d'oubli examiné plus haut.

7.4. LES MÉCANISMES DU CHOIX

Les espèces animales dotées de SNC évolués sont capables de faire des choix, ce qui les distingue de celles qui sont seulement capables de réactions, quelle que soit la richesse de celles-ci. Les objets mentaux, qui apportent de nombreuses fonctions en plus de la seule représentation cognitive, donnent sa pleine puissance à cette capacité de choix.

Cette section est consacrée à l'examen du choix tel qu'il peut être présenté en termes d'objets mentaux. On peut approcher le problème en partant de la pratique usuelle : un choix est relatif à un critère, et de celui-ci dépend l'action entreprise. Mais il y a certainement d'autres mécanismes, dont le choix intuitif que nous examinerons plus particulièrement au § 7.4.2.

⁹ Pavlov a été le premier à illustrer par une expérience concrète le réflexe conditionné chez le chien. Un chien est habitué à entendre une sonnerie quand on lui apporte à manger, et il salive naturellement en voyant arriver son plat. Après cet apprentissage, acquis par de nombreuses répétitions, Pavlov a montré que le chien salive dès qu'il entend la sonnerie, même si son plat ne lui est pas présenté. Dans cette dernière expérience, le réflexe est la salivation, la condition est la sonnerie, et le chien a associé les deux. Le schéma du réflexe conditionné était concrétisé.

7.4.1. le choix rationnel

Le choix rationnel est celui qui intervient au sein d'une procédure, laquelle est elle-même une séquence temporelle d'actions. Le choix rationnel permet de poser une alternative dans une séquence, rompant ainsi avec la simple linéarité.

Un mécanisme d'interaction des objets mentaux offre un support direct à l'alternative : l'exclusion entre blocs. L'exclusion permet d'implanter le choix de type *SI*, *ALORS*, *SINON*.

L'alternative s'appuie sur deux blocs constitués en relation conflictuelle de type exclusion-statu quo. L'un est un bloc (*OUI-ALORS*), dans lequel sont associés les valeurs correspondant à un succès de la condition testée, le *OUI*, et les actions qui doivent être déclenchées dans ce cas, le *ALORS*. L'autre bloc, (*NON-SINON*), construit de la même manière, associe les valeurs correspondant à un échec de la condition testée, le *NON*, et les actions qui doivent être déclenchées dans ce cas, le *SINON*. Les deux blocs, en relation conflictuelle, sont mutuellement exclusifs.

Quand survient l'événement correspondant à la condition testée, il en résulte l'activation de la représentation d'une valeur appartenant soit à la catégorie succès, soit à la catégorie échec. L'activation de cet objet mental entraîne l'activation du bloc dont il fait partie, c'est-à-dire le bloc (*OUI-ALORS*) ou le bloc (*NON-SINON*). Une fois le bloc activé, les actions associées sont mises en œuvre.

Les mécanismes de la formation d'ensembles groupant des perceptions et des actions, y compris au sein de séquences temporelles, relèvent des interactions entre objets mentaux classiques, et sont détaillés plus loin dans la section 11. Ainsi, les objets mentaux offrent un support simple pour le mécanisme du choix rationnel.

7.4.2. le choix non procédural

Le choix non procédural, au contraire du précédent, est un mode de fonctionnement non formalisé. Le critère de choix n'est pas identifié précisément, ou bien il existe plusieurs critères et leurs importances relatives et l'ordre de leur prise en compte n'est pas établi. Dans la pratique usuelle, ce type de démarche est décrit comme basé sur l'intuition.

L'approche de ce phénomène en termes d'objets mentaux amène à un modèle de décision plus précis. On s'appuiera pour illustrer cela sur

l'expérience concrète, maintes fois répétée, réalisée par la confrontation d'experts d'un domaine avec des informaticiens spécialistes du traitement des connaissances, parfois appelés cogniticiens, dans le but de réaliser un système expert.

L'expérience, classique dans la littérature de l'intelligence artificielle, est intéressante à plus d'un titre, son caractère paradoxal n'étant pas le moindre.

Assez typiquement, les experts sont des hommes d'expérience, parfois mondialement reconnus pour leur compétences dans des domaines précis, comme par exemple le dépannage et la maintenance de locomotives, ou bien la configuration de batteries étanches pour l'aviation. L'expérience passée a prouvé la validité des résultats proposés par ces experts de manière incontestable.

La confrontation de ces experts avec les cogniticiens conduit à ce paradoxe : les résultats sont justes, mais les explications fournies ne le sont pas. On observe parfois une utilisation de critères multiples et redondants, ou même des rationalisations a posteriori, sans véritable rapport avec les mécanismes de choix. Les explications apparaissent comme partiellement justes car elles sont variables dans le temps, parfois même pour un unique cas pratique, et souvent résistantes à la formalisation.

Et pourtant, globalement, le processus de choix fonctionne puisqu'il produit des résultats corrects en ce sens que toutes les contraintes imposées au départ sont finalement vérifiées (locomotive ou avion en état de fonctionnement).

Le concept de bloc d'objets mentaux, associé à la notion de niveau d'activation, permet de rendre compte de tels comportements. Il permet en effet l'analyse développée ici.

Chacune des explications, avancée par un expert comme étant l'ensemble des règles qu'il a suivies pour aboutir à sa conclusion, est un bloc d'objets mentaux abstraits compatibles progressivement construit dans son SNC par l'expérience. Rappelons que plusieurs de ces blocs peuvent coexister dans un réseau, dès lors qu'ils sont activés régulièrement.

Au cours de l'étude d'un cas concret, l'ensemble des données disponibles active un ensemble de représentations dans le SNC, lequel entraîne


l'activation prédominante d'un bloc, au détriment des autres qui auront un niveau d'activation moindre. L'expert exprime alors l'explication correspondant à ce bloc car il domine et commande le comportement (cf plus haut § 6.3.4.2).

C'est ainsi que plusieurs explications peuvent être avancées pour des cas très similaires car l'activation du bloc n'est pas seulement dépendante d'un critère ou d'une valeur, ni même d'une combinaison formalisable. L'activation du bloc dépend en fait des corrélations entre tous les facteurs, dont la représentation interne dans le SNC est la structure propre du bloc d'objets mentaux abstraits. Ces corrélations et pondérations sont évidemment un effet de l'apprentissage cumulé avec l'expérience de chaque expert. C'est la raison pour laquelle plusieurs experts peuvent proposer des explications différentes d'une même conclusion.

Le changement d'explication, c'est-à-dire le changement des règles employées, est avec cette conception tout à fait compréhensible. Le fait de discuter avec un interlocuteur d'un point particulier augmente son importance relative, bousculant ainsi tout l'équilibre de l'activation des blocs dans le SNC. Un bloc explicatif initialement activé peut ainsi changer de niveau d'activation au profit d'un autre, qui devient donc l'explication mise en avant par l'expert.

Le choix non procédural est donc un mode de fonctionnement du SNC à la fois plus simple et plus subtil. Il requiert un apprentissage certainement plus long car il porte sur de multiples critères, mais son mécanisme est la simple activation d'un bloc d'objets mentaux abstraits qui, parce qu'il devient dominant, commande le comportement.

8. APPLICATIONS DES OBJETS ABSTRAITS



8

Niveau d'échelle 8 : réflexion sur les applications des objets abstraits.

Il ne s'agit plus d'observation mais de montrer que le modèle des objets mentaux offre un support pour de nombreux modèles proposés dans le cadre de l'intelligence artificielle.

Les objets mentaux, construits logiquement à partir de la loi de Hebb, conduisent à soutenir une thèse qui peut paraître curieuse, bien qu'elle ne soit pas vraiment nouvelle, selon laquelle il n'y a pas d'opérateur, au sens de fonction, dans un SNC.

En effet, les opérations cognitives jusqu'à présent décrites couvrent déjà une palette importante, et toutes ces opérations ont été réalisées avec des mécanismes à type d'association sur des blocs d'objets mentaux. Même une opération habituellement considérée comme logique, l'exclusion, ne fait que réactiver des liens d'association déjà établis, soit sous l'influence directe de l'environnement, soit éventuellement par réorganisation automatique du réseau.

Il est évidemment possible de susciter de nouvelles associations de manière purement abstraite, sans autre support que l'expérience de pensée¹⁰, et d'augmenter ainsi la collection d'associations connues. L'opérateur apparaît alors comme une catégorie abstraite, construite par abstraction à partir de l'ensemble des exemples connus. Cette catégorie ne serait reconnue qu'a posteriori, bien après que les exemples connus et stockés, qui réalisent la mise en œuvre de l'opérateur équivalent, n'aient été fixés dans le SNC.

¹⁰ Nous montrerons un peu plus loin (section 13.3), que la fixation des événements par le SNC est faite de toutes façons, quelle que soit l'origine effective de l'événement.

Une fois l'opérateur identifié, c'est-à-dire une fois le travail d'abstraction fait, la construction de nouvelles substitutions, qui sont autant d'applications de l'opérateur, est largement facilitée. C'est la prise en considération de cette dernière phase qui, quand les précédentes sont méconnues, peut conduire à supposer l'existence d'opérateurs.

Le développement de l'intelligence chez l'enfant, tel qu'il a été étudié et décrit par Piaget et son école, apporte de nombreux exemples qui confirment la conception des opérateurs des objets mentaux. D'une manière générale, c'est en effet seulement après avoir expérimenté les choses que les enfants peuvent en tirer une règle qui régit les objets de leur environnement, par exemple la persistance matérielle de l'objet malgré sa disparition du champ de vision. Ensuite, dans un second temps, ces règles sont généralisées ou voient leur champ d'application étendu.

La vogue des cognitivistes dès les années 80, avec le développement des systèmes experts, est aussi un argument positif en faveur des objets mentaux. La littérature foisonne d'exemples, et c'est aussi notre expérience personnelle, d'experts d'un domaine incapables de formaliser leur expertise, alors même qu'ils sont extrêmement fiables et au meilleur niveau mondial.

Les sections suivantes exposent comment peuvent être réalisées, avec des objets mentaux, des grandes fonctions symboliques souvent utilisées pour modéliser le fonctionnement de la partie rationnelle de l'esprit.

8.1 LES OPÉRATEURS LOGIQUES BOOLÉENS

L'objectif est ici de rendre hommage au tout premier modèle neuronal, proposé par McCulloch et Pitts dès 1943, et de montrer que l'on peut, avec des objets mentaux, réaliser leur modèle.

Il y a en effet, dans le réseau d'objets mentaux, trois mécanismes qui permettent d'implanter des opérateurs logiques.

Le premier est la fonction de comparateur de l'objet mental (cf § 3.6), qui correspond à l'opérateur logique ET. Ce mécanisme s'appuie sur l'existence et la persistance du flux afférent. Dès lors que ce flux est constitué par les signaux en provenance de deux représentations, l'objet mental qui les associe ne sera actif que si ces deux images sont aussi

actives. L'état de l'objet mental témoigne de cette condition, l'objet mental réalise l'opérateur ET.

Le second mécanisme est le bloc d'exclusion (cf § 6.2) qui correspond à l'opérateur logique XOR. En effet, l'état activé de ce bloc garantit que seul un des deux blocs auxquels il est relié sera lui aussi dans l'état actif. C'est exactement ce que réalise un XOR logique qui n'est vrai que lorsque une de ses deux entrées seulement est vraie. L'existence du XOR permet de construire une image de la valeur logique FAUX.

Le troisième mécanisme réalise l'inversion, c'est-à-dire la porte logique NON. Bien qu'il soit peu usité, il est intimement lié à la constitution même des objets mentaux. En effet, à l'état d'équilibre, chaque boucle peut être considérée comme l'image inversée de son environnement puisque les flux afférent et efférent sont réguliers. D'un point de vue fonctionnel, la constance des flux signifie que l'image est reproduite à l'identique à travers un cycle complet, comme la clé et son empreinte en pâte à modeler. Avec une pellicule photographique, ce cycle enchaînerait image positive et négative, chacune permettant de reconstituer l'autre. En biologie, le système immunitaire présente une organisation comparable : un antigène sélectionne un anticorps qui est son image inversée, à partir de laquelle on peut fabriquer un anti-anticorps qui est analogue à l'antigène initial.

Dans le réseau d'objets mentaux, cette fonctionnalité d'inversion est rarement mise en évidence car cela suppose qu'un comportement particulier peut être rattaché à l'une et l'autre des images positive et négative. La chaîne ou l'association d'objets mentaux démarre alors sur le système de flux représentant l'image positive, ou au contraire sur le système de flux représentant l'image négative, la sélection entre les deux étant assurée par des éléments de contexte. En voltige aérienne, le cas se présente concrètement lors du vol sur le dos : toutes les manœuvres à effectuer avec les pieds et les mains pour diriger l'avion sont inversées. Le pilote habitué à cette situation adapte ses actions au contexte vol normal ou vol dos. Au contraire, le pilote seulement habitué au vol normal et brutalement confronté à un vol sur le dos met très souvent sa vie en danger. Les plongeurs rencontrent des expériences analogues dès qu'ils pratiquent la plongée de nuit ou la plongée-spéléo, situations dans lesquelles la perception du haut et du bas n'est pas évidente.

Dans tous ces cas d'utilisation d'une image inversée d'une perception, la perte de repères fiables susceptibles de caractériser le contexte fait perdre

la capacité de choisir un comportement adapté. Bien pire, cela entraîne souvent un sentiment de peur ou de panique que seuls l'expérience et des apprentissages variés permettent de surmonter grâce aux différentes astuces qui aident à lever le doute. L'élément contextuel est indispensable pour sélectionner l'image utile et activer le comportement correspondant.

La redéfinition des opérateurs logiques classiques manquants avec cette base ne pose aucun problème¹¹, et on peut évidemment faire un modèle de la prise de décision, telle que faite en réalité par un individu doté d'un SNC, mais ce modèle ne sera en aucune manière un modèle du fonctionnement du SNC.

Ce petit exercice n'a pas qu'une valeur intellectuelle. Il montre que l'approche choisie il y a plus de cinquante ans par les pionniers de l'intelligence artificielle, malgré le peu de moyens et de connaissances dont ils disposaient, avait touché juste, au moins partiellement. Certes les neurones ne fonctionnent pas comme des opérateurs logiques, et en ce sens leur modèle était faux. Mais les objets mentaux peuvent être le support des opérateurs logiques et, à ce titre, le modèle de McCulloch et Pitts n'est plus faux mais seulement partiellement correct ; il prend toute sa valeur de précurseur.

Par ailleurs, la capacité d'un SNC à constituer des opérateurs logiques est certainement mise en œuvre très souvent et de manière très concrète. Toutes les activités humaines à caractère procédural et répétitif sont susceptibles d'utiliser ces représentations. La vie quotidienne dans les civilisations modernes à forte composante technique fournit nombre d'exemples illustrant cette démarche.

8.2 LA MÉMOIRE ASSOCIATIVE

Plusieurs modèles informatiques ont été proposés pour résoudre le problème de la mémoire associative. Un des plus complets, bien qu'ancien,

¹¹ L'opérateur de base qui manque encore est le OU logique. Il pourrait s'écrire $OU(a,b)=XOR(XOR(a,b),ET(a,b))$. De même certains théorèmes utiles reçoivent aussi des supports simples :
 $ET(a, false)=XOR(a,a)=false$, ainsi que
 $ET(a,a)=OU(a,a)=XOR(a, false)=a$.

a été le projet CAPP (Content Adressable Parallel Processor) de C. Foster (1976) qui permettait de fabriquer une machine avec une mémoire adressable par le contenu.

Quel est l'avantage d'un tel procédé d'accès à la mémoire ? Dans un ordinateur classique, une information n'est accessible que si sa localisation, son adresse, est connue. Une donnée importante dont on ne connaît pas l'adresse est définitivement perdue, même si on en connaît une partie. Avec une mémoire associative, le fait de connaître une partie de la donnée permet de faire une recherche à partir de cet élément, ce qu'on appelle l'adressage par le contenu. Ceci permet de retrouver l'intégralité d'une donnée partiellement inconnue, et sans savoir où elle est localisée. Les parallèles avec la perception usuelle de l'oubli sont patents, notamment la réactivation d'un souvenir complet à partir d'un détail.

Pourquoi chercher à faire une mémoire associative ? Parce que la mémoire dans un SNC a des caractéristiques évidemment associatives et que, de tous temps, intelligence et créativité ont été reliées à cette capacité. On pouvait ainsi espérer, en faisant une machine dotée d'une mémoire associative, obtenir des résultats figurant des comportements intelligents.

Les objets mentaux forment un support des représentations naturellement associatif du fait de leur nature de flux dynamique. Rappelons que l'association repose sur la circulation du flux d'activation dans le réseau. Plusieurs des mécanismes étudiés précédemment, dont évidemment l'association temporelle mais aussi le concept de bloc, offrent un support à l'activation de proche en proche des représentations grâce aux associations entre objets mentaux.

Le cas particulier de l'association libre, pendant une période de relaxation par exemple, est discuté dans la section 12.

De plus, les blocs d'objets mentaux et leurs niveaux d'activation gradués offrent un support direct à bien d'autres modèles de représentation des connaissances classiques en intelligence artificielle comme les réseaux sémantiques, les K-lines ou autres modèles associatifs.

8.3 LES PRÉDICATS LOGIQUES RELATIONNELS

Les tentatives de formalisation de l'activité consciente ont mobilisé bien des chercheurs pendant de longues années. La voie de la logique avait été

ouverte par la mise au point des calculateurs puis, dès 1960 par McCarthy, avec l'introduction d'un langage applicatif fonctionnel et récursif, LISP.

L'étape d'importance suivante fut la mise au point des langages informatiques implantant la logique relationnelle. Le pionnier de ces langages fut PROLOG, élaboré dès 1971 par Colmerauer à Marseille.

La puissance de représentation de la logique relationnelle est infiniment supérieure à la logique booléenne du modèle de McCulloch et Pitts. Les mathématiciens la qualifient d'ailleurs d'un ordre supérieur à celui de la logique booléenne. De grands espoirs sont nés de cette invention, au point que le langage PROLOG fut retenu par le MITI japonais pour son projet d'ordinateurs de la cinquième génération. A l'époque, début 80, il était entendu qu'ils seraient intelligents. De grandes réalisations ont été accomplies, qui ont permis aux japonais de passer au premier plan dans bien des techniques, mais PROLOG a été abandonné, ainsi que l'objectif d'un ordinateur intelligent.

La logique des prédicats, ou relationnelle, met en œuvre une relation entre plusieurs éléments. La relation est appelée un prédicat et les éléments mis en rapports par le prédicat forment un n-uplet. Pour simplifier, on peut considérer qu'il sont l'analogue des arguments d'une fonction mathématique¹². Cette manière de représenter les connaissances offre plusieurs avantages.

Le premier est la forme déclarative utilisable pour décrire la représentation de l'univers choisi. Ainsi, un arbre généalogique sera décrit par une base de connaissance constituée seulement avec des prédicats comme :

```
père(jean, paul).
mère(marie, paul).
père(pierre, jean).
```

¹² En réalité, les mécanismes d'évaluation des langages fonctionnels comme LISP et ceux de PROLOG diffèrent beaucoup. En effet, une fonction produit un résultat, par exemple celui d'un calcul numérique, alors qu'un prédicat, lorsqu'il est évalué, produit seulement une proposition qu'on sait habituellement pouvoir dire vraie ou fausse. D'une manière générale, les fonctions peuvent être réécrites sous forme de propositions logiques, mais l'inverse n'est pas vrai.

Les prédicats qui décrivent des relations nouvelles ou complexes seront construits et décrits sous une forme équivalente. Par exemple, la notion de grand-père s'écrit :

$$\text{gd-père}(x, y) :- \text{père}(x, z), \text{père}(z, y).$$

qui signifie que tout x dont le fils z est père de y est le grand-père de y .

Le second avantage est l'utilisation qui peut être faite d'un prédicat, laquelle est double.

D'abord, on peut chercher l'un ou l'autre des arguments du prédicat, et c'est alors une utilisation proche de la mémoire associative évoquée plus haut. Par exemple, on cherche les enfants de Jean par :

$$\text{père}(\text{jean}, x).$$

Ou bien le père de Jean par :

$$\text{père}(x, \text{jean}).$$

Ou bien encore les couples qui vérifient la relation père-fils par :

$$\text{père}(x, y).$$

Seconde utilisation, un prédicat permet de vérifier la validité d'une relation supposée connue. Ainsi, on pourra confirmer la connaissance de la relation $\text{gd-père}(\text{Pierre}, \text{Paul})$ par :

$$\text{gd-père}(\text{Pierre}, \text{Paul}).$$

et infirmer la connaissance supposée de :

$$\text{père}(\text{Pierre}, \text{Paul}).$$

Il s'agit dans cette utilisation de vérifier la présence d'une information, comme on pourrait le faire avec un souvenir. Une mémoire associative serait, sur ce dernier point, plus faible que la logique des prédicats car elle ne pourrait pas confirmer la relation grand-père si celle-ci n'a pas été stockée explicitement sous cette forme. En effet, une mémoire associative ne peut ressortir que son contenu, elle n'apporte aucun mécanisme d'inférence qui permettrait de déduire la relation grand-père à partir de deux relations père chaînées.

Les objets mentaux ne remettent pas en cause le modèle relationnel et son mécanisme. Ils le complètent en offrant à la fois un support aux représentations et aux utilisations de la logique des prédicats.

Les éléments mis en relation sont évidemment stockés sous forme d'objets mentaux. La relation entre eux peut être représentée par de nombreux

mécanismes dont la chaîne d'objets mentaux, l'association temporelle, le bloc ou même le bloc abstrait. Pour simplifier, nous représenterons graphiquement cette liaison par un objet mental unique quel que soit le type du support effectif (voir figure 31).

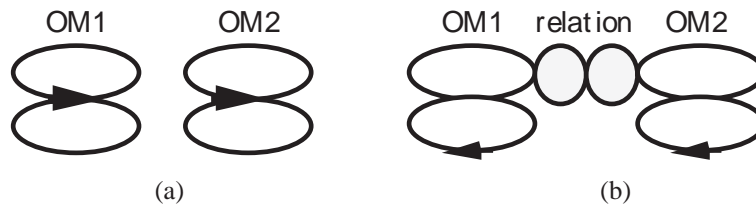


Figure 31 : représentation d'un prédicat

Le schéma (a) montre les deux objets mentaux isolés. Le schéma (b) montre ces mêmes objets mentaux associés par une relation représentée sous la forme d'un objet mental.

Une base de connaissances sera ainsi organisée sous la forme de chaînes parallèles entre chaque couple d'éléments reliés par le prédicat. L'existence dans le réseau d'une base importante de connaissances ainsi organisées conduirait naturellement, par le mécanisme d'abstraction, à la constitution d'une nouvelle représentation, de type abstrait, qui serait l'image interne au réseau du prédicat. Chacune des chaînes serait alors une instance concrète de la représentation abstraite du prédicat.

Avec le prédicat ainsi représenté entre deux objets mentaux, toutes les applications logiques précédentes sont possibles. Une recherche est réalisée par l'activation de l'un ou l'autre des éléments, et l'activation simultanée de l'image du prédicat. Le résultat de la recherche est obtenu sous forme de l'état activé de l'autre objet mental, ou des autres objets mentaux, placés en bout de chaîne. Si la recherche est infructueuse, il n'y a pas de représentation nouvellement activée.

Les objets mentaux offrent en outre une utilisation particulière qui est la recherche d'une relation existante entre deux éléments. Cette recherche est inaccessible en logique des prédicats puisque, dans ce cadre, le prédicat doit toujours être identifié préalablement à une recherche.

Avec les objets mentaux, il suffit d'activer les représentations entre lesquelles on cherche une relation pour voir apparaître, sous forme d'objets activés, toutes les relations existant entre eux. Une mémoire associative dans laquelle les relations apparaîtraient toujours en même position lors des apprentissages permettrait une recherche identique.

Les objets mentaux permettent ainsi la représentation des connaissances sous forme de prédicats logiques et, d'une manière générale, sous forme déclarative. L'emploi des objets mentaux comme support des représentations rend aussi possible les fonctions et activités déclaratives, dont l'utilisation associative des connaissances.

9. APPRENTISSAGE, MÉMOIRE À COURT TERME, MÉMOIRE À LONG TERME

Nous avons examiné le détail des mécanismes de la constitution des représentations dans un SNC, des niveaux les plus élémentaires jusqu'aux représentations abstraites. Cette section reprend les notions de mémoire à court et long terme, classiques en psychologie, et les étudie dans le cadre des objets mentaux et de leurs propriétés. Nous montrons que la théorie de la mémoire développée sur les objets mentaux permet aussi de rendre compte du rôle de l'hippocampe.

9.1. LA MÉMOIRE À COURT TERME

La mémoire à court terme (MCT) est une fonctionnalité élémentaire largement explorée par la psychologie. Elle permet de garder le souvenir d'un événement pendant quelques dizaines de secondes. Ainsi, lire un numéro de téléphone dans l'annuaire, puis laisser l'annuaire afin de composer le numéro fait appel à la MCT. De même, fredonner une mélodie après l'avoir entendue repose aussi sur la mémoire à court terme. Dans ces deux exemples, la trace d'un événement relativement complexe est construite, et elle reste accessible et utilisable pendant une brève période.

Voyons rapidement comment les objets mentaux peuvent être le support de cette forme de mémoire.

Dans le contexte des objets mentaux, la MCT s'appuie sur la reconnaissance des événements, c'est-à-dire sur l'activation immédiate et temporaire des objets mentaux déjà existant et correspondant à ces événements (voir figure 32). Les moins bonnes performances en mémorisation à court terme, généralement observées dans les épreuves portant sur des événements a priori inconnus, confirment cette interprétation. Dans le cas d'événements complexes, la trace réside dans les associations entre représentations existantes.

Avec les propriétés des objets mentaux maintenant établies, détaillons le mécanisme de la reconnaissance rapide d'un stimulus connu, puis de la perte du souvenir correspondant en quelques secondes. Schématiquement, on distingue quatre phases.

phase 1/ Tout commence avec un événement x , survenant à un instant t . La perception de ce stimulus provoque l'activation de nombreux objets mentaux dans le SNC, que la perception ait conduit à une vraie reconnaissance ou pas. En effet, le SNC bénéficie du parallélisme des voies de perception qui maintient un grand nombre d'objets mentaux actifs en permanence au sein des blocs. Cette activation devient accessible à la conscience en quelques centièmes de secondes. Pour les événements complexes, l'activation touche, en plus des objets élémentaires, les associations entre représentations existantes. Les moindres performances obtenues par les sujets dans ces situations de test en attestent, surtout s'il n'y a pas de lien évident entre les objets présentés; chacun sait bien qu'une liste à la Prévert est plus difficile à mémoriser qu'une liste de légumes ou de courses.

phase 2/ Quelques centièmes de seconde après l'instant t , ces objets mentaux activés interagissent avec l'ensemble du SNC par aiguillage de flux et filtrage dans les chaînes d'objets mentaux et, au travers de l'activation des représentations en liaison, sélectionne un ensemble X d'objets mentaux. L'exposé détaillé de ces mécanismes a été fait aux § 3.3, 3.4, 3.5 et 5. Au demeurant, ces mécanismes sont aussi ceux qui ont permis, pendant la phase 1, l'activation des objets mentaux en rapport avec le stimulus.

Cet ensemble X d'objets mentaux couvre la représentation de l'événement et les représentations associées. Celles-ci sont activées en fonction du stimulus x , naturellement, et aussi par une participation plus importante du contexte (événements précédents, autres voies de perception, perceptions internes, etc.) puisque la corrélation avec l'événement est moins directe et moins forte.

phase 3/ Cet ensemble X d'objets mentaux activés forme un bloc doté d'une certaine inertie dynamique, relativement stable, et conséquemment d'une certaine permanence temporelle. Pour schématiser, on peut dater cette phase à quelques dixièmes de secondes après l'instant t . Le bloc, du fait de son inertie, conserve un niveau d'activation autonome puisqu'il est composé de nombreux résonateurs.

Il est donc relativement indépendant des perceptions qui ont provoqué son activation.

phase 4/ Le bloc X activé est soumis au flux continu des perceptions (externes et internes) qui suivent l'événement. Les émotions et éventuels souvenirs rattachés à cet événement, réactivés, ajoutent d'autres sources d'interférences à ce flux perceptif permanent. Le flux de perceptions perturbe l'ensemble X d'objets mentaux et le déstabilise progressivement. Les phénomènes d'aiguillage de flux et d'équilibre global des liaisons déplacent l'activation vers d'autres objets mentaux ou d'autres ensembles. Le niveau d'activation du bloc est ainsi modifié en fonction de l'activation résiduelle des objets mentaux qui le composent. La présence à la conscience du souvenir est le reflet de ce niveau d'activation. Dès que le bloc n'est plus activé, le souvenir de l'événement, reconnu un moment, disparaît.

Pour reprendre les mécanismes exposés en détail précédemment, il s'agit d'un phénomène d'oubli fonctionnel typique. La durée d'activation du bloc X, c'est à dire sa résistance aux perturbations, dépend de son inertie. Certains ensembles peuvent être plus stables que d'autres et, pour ceux-là, le souvenir immédiat de l'événement associé restera plus longtemps accessible.

Comme on le voit, le SNC oublie spontanément, et l'oubli sera le sort normal des stimuli inconnus. Comment, alors, fixer un souvenir ? Le meilleur moyen de lutter contre cet oubli fonctionnel dynamique est tout simplement de maintenir la présence du stimulus pendant une durée plus longue. Ainsi, par des flux maintenus plus longtemps, on stabilise la structure de l'ensemble X en renforçant les interférences positives, celles qui correspondent à l'événement qu'on veut mémoriser, et en diminuant les interférences parasites susceptibles d'entraîner la déstabilisation de l'ensemble. Ce mécanisme est simplement celui de l'apprentissage car, dans le réseau, la circulation répétée des flux sur les mêmes connexions est le seul moyen de fixer une trace structurelle des signaux.

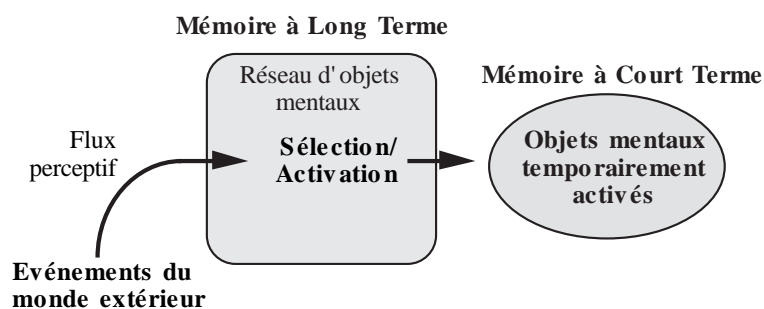


Figure 32 : l'activation des objets mentaux dans la mémoire à court terme.

Sur la base des objets mentaux déjà présents dans la mémoire, les flux perceptifs produisent une activation sélective de certaines représentations. La mémoire à court terme est alors l'activation temporaire de sous-ensembles de la mémoire à long terme.

Le mécanisme d'activation et de sélection automatique des objets mentaux en MLT éclaire le phénomène de perception proprement dit. Nous considérons la perception comme l'ensemble des processus qui conduit à l'activation d'un objet mental abstrait à partir de l'arrivée du stimulus extérieur sur les récepteurs dont dispose l'organisme. Ainsi, l'audition n'est pas seulement le résultat de la traduction d'ondes de pression acoustique en signaux électriques par l'oreille, mais recouvre en plus toute la cascade d'activations d'objets mentaux dans le SNC, notamment dans les aires associatives auditives.

Dans le SNC, la perception est en général un phénomène extrêmement rapide. En effet, en termes d'objets mentaux, pour reconnaître un stimulus visuel connu, il suffit de sélectionner quelques résonateurs à partir de l'image transmise par la rétine. Or celle-ci comporte des milliers de signaux simultanés, qui sont autant de sélecteurs utilisés en parallèle dont chacun contribue à réorienter le flux de circulation des informations dans le cortex visuel. Le résultat de toutes ces réorientations locales, effectuées simultanément aux différents niveaux de l'organisation des structures visuelles, est l'ensemble d'objets mentaux activé. On comprend sans peine combien ce mécanisme de sélection, qui exploite un très grand nombre de caractéristiques, peut être efficace quand il s'exerce sur des images connues.

C'est d'ailleurs une des caractéristiques constantes de la reconnaissance visuelle : les performances en vitesse et en fiabilité sont bien meilleures sur des images connues. Les objets mentaux et leurs propriétés rendent aisément compte de ces variations de performance car ce sont celles des mémoires associatives. En effet, dans cette mémoire adressable par le contenu, des stimuli inconnus vont activer toutes les représentations qui ont des traits communs avec eux. Il y aura alors un grand nombre d'objets mentaux activés, mais tous assez faiblement. Dans ces conditions, l'activation d'un bloc à un niveau nettement plus haut que tous les autres n'est pas possible. La sélection n'a pas été efficace, et ceci en conformité avec les mécanismes à l'œuvre dans le réseau. La fiabilité et les performances dans la reconnaissance ont chuté à cause de l'impossibilité d'identifier les stimuli.

9.2. LES DÉBUTS DE LA MÉMOIRE

Toute l'explication proposée dans la section précédente concerne la reconnaissance d'un stimulus connu, dont la trace est déjà présente dans les zones associatives du cortex. Mais comment peut fonctionner la MCT au début de la vie, quand la MLT est vide et qu'il n'y a aucun objet mental à activer?

En effet, au début de la vie, c'est-à-dire aux premiers instants du fonctionnement du SNC de l'individu, nous supposons que la mémoire est vide de tout acquis. Dans cette hypothèse, il n'y a pas de représentations présentes de l'environnement. Mais cela ne signifie pas que toute structure est absente du SNC. En particulier, doivent exister les structures de bouclage du SNC sur l'organisme d'une part, et sur l'environnement d'autre part (voies perceptives et centres d'intégration thalamiques). Le détail de ces structures et leur rôle précis sont étudiés plus loin dans les sections 10 et 13.

Il importe peu de savoir à quel moment précis de l'embryogenèse ces structures de bouclage apparaissent, le point fondamental pour les débuts de l'apprentissage est qu'elles apparaissent, ce qui est acquis puisqu'on en constate l'existence après quelques mois de gestation. Selon nous, satisfaire cette condition fonde la capacité du SNC à fixer des représentations de son environnement. En effet, si ces conditions de bouclage ne sont pas remplies, il ne peut y avoir d'effet en retour, pas de sanction de l'environnement à la suite d'une action et donc pas d'apprentissage. Sans bouclage, la question des acquisitions et de la

reconnaissance perd définitivement tout son sens. Ce point sera examiné de manière plus précise au § 13.4.

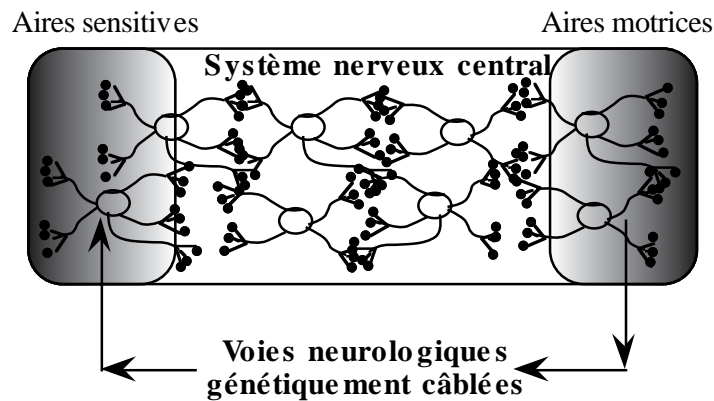


Figure 33 : le bouclage induit par les structures biologiques
Les voies de circulation des signaux extérieures au SNC sont génétiquement déterminées, et fonctionnellement fixées. Elles forment un circuit qui sera fermé par un chemin de circulation interne au SNC, formé par le recrutement progressif de neurones à cause de la régularité des signaux présentés au réseau.

En termes de représentations et d'objets mentaux, quel est donc l'état du SNC au tout début de son fonctionnement ? Grossièrement, c'est une vaste assemblée de cellules à l'activité désordonnée sous l'effet de l'activation spontanée de chacune d'elles. En un mot, on observe une activité apparemment chaotique, mais qui ne l'est en fait pas complètement. En effet, les voies génétiquement câblées qui ferment la voie de retour du SNC sur lui-même à travers l'organisme induisent de l'ordre (voir figure 33).

Concrètement, chaque activation d'une cellule pyramidale des voies motrices produira une réponse motrice, et donc l'arrivée au SNC des perceptions proprioceptives correspondantes (voir figure 34). Aussi imparfaits et immatures que soient ces mouvements et ces perceptions, ils ont une qualité essentielle pour l'apprentissage : la régularité.

L'ordre dans le SNC est au début seulement cela : une répétition régulière de certains événements traduits sous forme de signaux. Cette régularité

est due à l'organisation biologique, physique au sens le plus matériel du mot. Cette organisation fait concrètement que, au quatrième mois de grossesse pour un fœtus humain, une cellule pyramidale de l'aire motrice peut être connectée à plusieurs motoneurones dans la moelle, mais certainement pas en même temps à des groupes musculaires de l'œil et de la jambe. Cette organisation est elle-même issue des mécanismes de la morphogénèse, elle est donc vérifiée à relativement grande échelle seulement, mais elle suffit à produire une régularité dans les séquences de signaux.

Au début, la régularité découlant directement de l'organisation biologique est probablement très grossière puisque le déterminisme génétique s'exprime au niveau de populations de cellules plutôt qu'au niveau de cellules isolées. On peut voir confirmation de la relative grossièreté du déterminisme génétique dans le fait que l'organisation des systèmes effecteurs ne révèle toute sa finesse et sa richesse qu'après plusieurs années de maturation. Pour l'espèce humaine, ceci est particulièrement frappant dans le domaine psychomoteur où la maturation nécessaire à la synchronisation des mouvements de la marche n'est atteinte que plusieurs mois après la naissance. Même pour des espèces où le déplacement est une nécessité vitale dès la naissance, les mouvements ne sont assurés qu'après une période de maturation, certes bien plus brève, mais néanmoins nette.

La régularité, la répétition des séquences de signaux, induisent localement un peu d'ordre au niveau des structures les plus proches, c'est-à-dire dans les zones du cortex situées autour des efférences des voies sensibles. En effet, les boucles qui ont pour origine l'activité motrice ne se limitent pas aux seules perceptions proprioceptives. Ainsi, l'activation d'une cellule pyramidale de la zone motrice contrôlant le bras produira, outre des perceptions proprioceptives, des sensations tactiles cutanées, et éventuellement une sensation de plaisir puisqu'on peut voir les fœtus sucer leur pouce in utero. L'activité désordonnée spontanée domine le cortex, mais petit à petit, des zones plus ordonnées s'organisent localement dans les différents lobes, sous forme de résonateurs.

C'est pourquoi le SNC est un réseau avec des propriétés de type chaotique. En effet, le SNC semble respecter les lois les plus générales aux niveaux d'échelle les plus élevés : acquisition, adaptation à l'environnement. Pourtant, il présente en même temps une grande sensibilité aux conditions initiales qui se traduit par l'importance majeure, et les immenses

répercussions ultérieures, des premiers événements de la vie. De plus, des divergences individuelles considérables s'observent dans la concrétisation de toutes les contraintes qui pèsent sur chaque individu, sans que les règles les plus globales soient enfreintes.

Ainsi, l'organisation biologique induit par son fonctionnement répétitif un peu d'ordre localement dans les niveaux les plus bas du SNC. Mais pourquoi cette organisation de l'ordre est-elle induite sous forme de résonateurs en boucle ? Simplement parce que la voie de bouclage forme un flux orienté dans les aires associatives, et que ce flux induit localement dans le réseau un autre flux, celui-là strictement localisé dans le SNC (cf plus haut le § 4.3 et la figure 33), et qui devient donc circulaire. La boucle externe au SNC, parce qu'elle est régulière et répétée de très nombreuses fois, induit une seconde boucle interne au SNC. La première double boucle est formée.

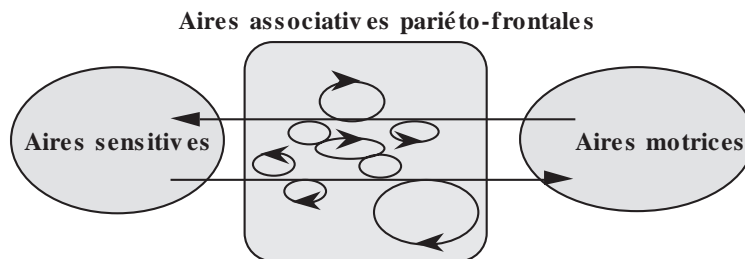


Figure 34 : la formation de flux induits en boucle dans le SNC

Les flux perceptifs se propagent autour de l'aire pariétale, et induisent sur leur passage une activation de flux. De même, les flux moteurs se propagent autour de l'aire frontale et produisent eux-aussi des flux. Quand les signaux entre ces deux aires sont réguliers, on voit apparaître des boucles élémentaires, puis des structures bouclées plus complexes.

Puis cette structure en double boucle se propage et se généralise. D'abord elle est dupliquée, en parallèle dans le sens de la largeur pourrait-on dire, pour chacune des boucles régulières de l'organisme biologique, notamment autour du système locomoteur. Ensuite, elle se propage en profondeur dans le cortex, chaque boucle en induisant une autre qui est un peu plus éloignée des sources de la stimulation. C'est le phénomène de développement des chaînes d'objets mentaux, puis des objets mentaux abstraits et des blocs.

Chacun de ces objets mentaux primitifs est un élément sur lequel se développent les mécanismes d'interaction décrits précédemment : association, chaînage, conflits et blocs. Au début, les chaînes d'objets mentaux construites sont probablement très courtes, mais l'impulsion vers l'organisation générale des représentations sous forme d'objets mentaux est donnée. Les premières habiletés, les premières actions du corps biologique se mettent en place.

Par la suite, toutes les perceptions, tous les événements qui vont donner lieu à l'arrivée d'un signal dans le SNC trouveront le terrain ainsi préparé. Les signaux sont propagés au moyen de chaînes de doubles boucles, et chacune de ces chaînes est un résonateur doté d'une certaine autonomie. Au fur et à mesure que les voies sensibles confortent leur fonctionnement, elles suivent le schéma général et chaque résonateur nouveau s'intègre dans l'organisation naissante.

Dans le SNC, les premiers apprentissages concernent donc le corps biologique, c'est à dire la première couche de l'environnement du SNC. C'est sur cette base, et à travers le filtre vis-à-vis du monde extérieur que cela représente¹³, que vont se constituer les représentations du monde extérieur, couche la plus externe de l'environnement du SNC. Ces mécanismes sont détaillés au chapitre 14.

Chez le jeune bébé, le flux d'activation des premiers objets mentaux est ainsi largement dominé par les perceptions proprioceptives. Du fait de l'immaturité anatomique et physiologique des systèmes perceptifs, les contacts avec le milieu extérieur sont fluctuants, peu durables, et de mauvaise qualité. Ainsi, le SNC est-il d'abord soumis aux régularités du corps biologique qui marquent leurs empreintes dans le réseau, avant d'être confronté aux régularités de l'environnement, qui sont alors perçues et interprétées en fonction des acquisitions antérieures.

¹³ Chez la grenouille, en greffant ou en amputant un œil très précocement dans l'embryon de têtard, on a pu montrer que l'organisation du cortex visuel dépendait effectivement de la présence et du fonctionnement des yeux.

La construction de toutes les représentations est incrémentale en conséquence de l'entrée en action des processus d'interaction des objets mentaux, chaînage, blocs et conflits. Très vite, les flux extérieurs sont indispensables pour la maturation du SNC et la poursuite de son organisation fonctionnelle. Les tentatives d'éducation et d'apprentissage tardif du langage aux enfants-loups sont en accord avec les résultats expérimentaux sur les yeux et le développement du cortex occipital : l'intégrité anatomique et un environnement adéquat sont tous deux nécessaires à la maturation correcte du SNC.

9.3. LA MÉMOIRE À LONG TERME

La mémoire à long terme (MLT) est celle qui permet de conserver une trace mnésique, la représentation d'un événement, pendant un temps prolongé, jusqu'à des années. C'est celle que nous avons étudiée depuis le début de cet ouvrage, dans laquelle il y a une trace structurelle de l'apprentissage au travers de la modification des poids des connexions entre cellules (voir figure 35).

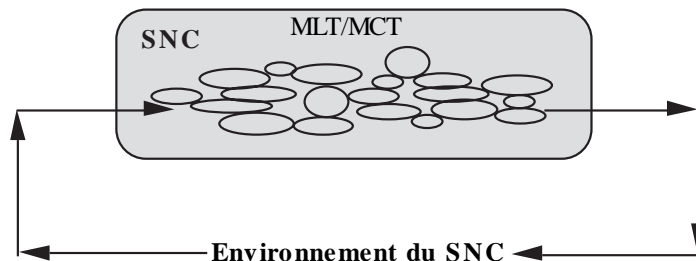


Figure 35 : le schéma général de la mémoire des objets mentaux.

Dans la théorie des objets mentaux, les représentations de l'environnement sont fixées à la suite des interactions avec celui-ci.

La durée de conservation d'un souvenir s'étend sur une échelle de temps extrêmement longue en regard de la durée de vie moyenne d'une cellule dans l'organisme¹⁴. Certes, les cellules qui vivent le plus longtemps sont

¹⁴ A titre indicatif, la durée de vie d'une hématie est de 120 jours, et celle d'une cellule de la muqueuse intestinale d'environ 2 jours. Le nombre des neurones du cerveau commence à décroître dès la fin de l'adolescence.

les neurones, et cela participe à maintenir le souvenir pendant une longue durée. Mais dans notre conception, les souvenirs peuvent durer encore plus longtemps que les neurones car ils sont stockés de manière très éparpillée, sous forme d'un flux qui passe dans des millions de connexions entre des milliers de cellules.

En effet, le caractère dynamique des souvenirs sous forme d'objets mentaux permet le changement du lieu de stockage au cours de la vie, quand les neurones meurent. En fait, il s'agit simplement de recréer au travers d'une autre voie une connexion perdue, par exemple à cause de la mort du neurone. Si c'est physiologiquement possible, la dynamique de l'objet mental va naturellement provoquer cette réorganisation. Si cette réorganisation n'est pas possible, par exemple parce qu'il n'y a plus assez de neurones disponibles, alors la qualité du souvenir se dégrade légèrement.

Ainsi, avec les objets mentaux, le processus de la formation des premiers objets mentaux dans le SNC est identifié et le mécanisme de la fixation durable de ceux-ci est aussi connu. De plus, les performances de la MCT reposent sur l'existence préalable d'objets mentaux en MLT. La psychologie relie MCT et MLT, il reste donc à examiner le passage des souvenirs de la MCT vers la MLT.

9.4. LE PASSAGE DE LA MÉMOIRE À COURT TERME VERS LA MÉMOIRE À LONG TERME

La mémoire est localisée dans les aires associatives du cortex cérébral, et pour les souvenirs dominés par une modalité sensorielle, plus particulièrement dans les zones associatives du lobe concerné. Physiologiquement, le passage de la mémoire à court terme vers la mémoire à long terme est contrôlé par l'intégrité d'une structure bilatérale particulière, l'hippocampe, qui intervient aussi dans une boucle de contrôle de l'expression des émotions, le circuit de Papez ou système limbique.

Quand les deux hippocampes sont détruits ou simplement non fonctionnels, il n'y a plus de fixation des souvenirs. C'est par exemple ce qui peut se produire lors d'un accident avec perte de connaissance prolongée. Les circonstances de l'accident ont été enregistrées dans la MCT mais, à cause de l'altération du fonctionnement du SNC, le transfert vers la MLT n'a pas eu lieu. Et au retour de la conscience, les souvenirs stockés dans la MCT sont très ténus, sinon complètement perdus. L'accident a produit

une amnésie temporaire par blocage de l'action des hippocampes. La MCT semble donc physiologiquement nécessaire à la fixation des souvenirs et à la MLT (voir figure 36).

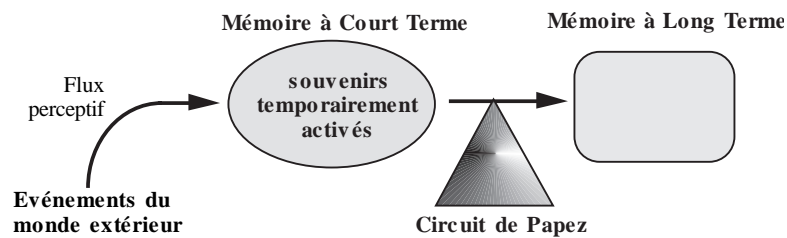


Figure 36 : le schéma classique des rapports entre MCT et MLT
Ce schéma est à comparer avec la figure 32. On voit que les rapports entre MLT et MCT sont inversés : ici, la MLT dépend de la MCT.

Dans la machine à objets mentaux, c'est-à-dire avec le cadre d'interprétation que nous proposons, le problème se pose de manière différente et les relations entre MCT et MLT sont inversées. En effet, le mécanisme de création et de fixation des souvenirs à long terme est simple. Il repose sur la répétition des stimuli, la permanence et la régularité des flux qui induisent des modifications structurelles sous la forme de poids dans les connexions. C'est la situation initiale du SNC, quand il ne contient encore aucune représentation.

Avec les objets mentaux, la MCT est clairement secondaire à la MLT. Tout d'abord, le concept de MCT n'est pas indispensable à l'existence d'une mémoire à long terme. Ensuite, sans MLT il n'y a pas d'objets mentaux pré-existants activables, et donc pas de reconnaissance des stimuli et pas de MCT.

La contradiction entre l'approche psychologique et les objets mentaux semble irréductible. Côté psychologie, le cycle commence avec la MCT et finit avec la MLT. Côté objets mentaux, c'est l'inverse. Curieusement, le problème trouve sa solution quand on considère le rôle de l'hippocampe, structure physiologique indispensable pour la fixation des souvenirs mais qui n'en contient elle-même aucun, et qu'on intègre son rôle dans le modèle des objets mentaux.

La MCT est, on l'a vu, une activation temporaire des objets mentaux liée au flux des perceptions. L'activité des objets mentaux dans les blocs est a priori instable, et d'une durée insuffisante pour produire les modifications structurelles permanentes au niveau des connexions. Dans la MCT, la boucle générale de circulation des flux mise en jeu est la voie des échanges externes, celle qui passe par l'environnement du SNC.

Nous proposons de donner à l'hippocampe le rôle fonctionnel d'assurer la fermeture d'une seconde voie de circulation des flux, celle-là interne au SNC. Par cette voie, indépendante des flux de perceptions contrôlés par l'environnement, peut s'établir un flux interne qui assure la répétition des stimuli par simple bouclage (voir figure 37).

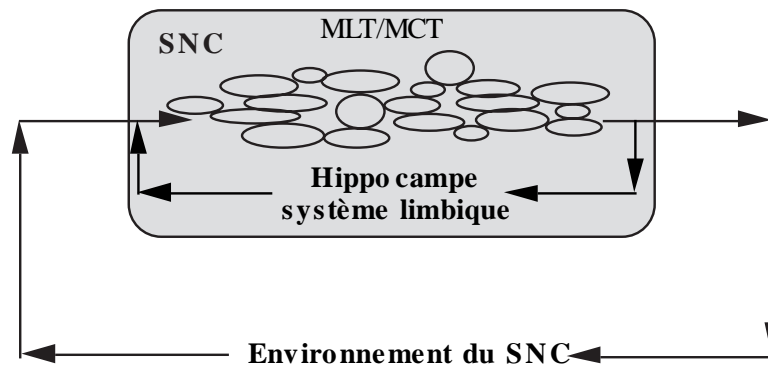


Figure 37 : le rôle de l'hippocampe dans la fixation des souvenirs

La boucle du SNC sur l'environnement, à l'origine des premiers objets mentaux, est doublée par une boucle interne au SNC, l'hippocampe. Ainsi, la présence des stimuli de l'environnement peut être remplacée par la circulation d'un flux strictement interne au SNC. L'impulsion nécessaire à la fixation des objets mentaux est alors facilement atteinte.

La trace mnésique initiale, sous forme de flux localisé en MCT, peut ainsi être progressivement inscrite sous forme structurelle dans le réseau, localisée cette fois en MLT, si ce bouclage est maintenu pendant une durée assez longue. D'une certaine manière, cette boucle interne via l'hippocampe shunte la boucle externe et permet de repasser les stimuli en continu, sans plus avoir besoin du support de l'environnement. Elle

permet d'augmenter la durée de présence des stimuli, c'est-à-dire l'impulsion, et facilite ainsi la fixation des représentations en MLT.

Toutefois, ce phénomène de répétition par bouclage interne ne peut être efficace que secondairement, une fois que les stimuli de l'environnement ont permis de construire une image dotée d'une stabilité suffisante. Cette stabilité indispensable est obtenue par exemple avec une répétition du stimulus un nombre de fois suffisamment grand, ou avec sa présentation pendant une durée suffisamment longue, ou enfin avec un stimulus d'une intensité extrême. C'est l'application de la notion d'impulsion développée au § 3.2.

Avec les objets mentaux, il n'y a plus de distinction matérielle ou structurelle entre MCT et MLT, il y a juste une distinction fonctionnelle et d'utilisation. La MCT est représentée par les objets mentaux de la MLT ayant, à un moment donné, les plus hauts niveaux d'activation. Ces objets mentaux forment des ensembles, éventuellement nouveaux qui, s'ils sont répétés, peuvent devenir des blocs fixés en MLT.

La cohérence entre le modèle des objets mentaux et la physiologie est donc totale. La MCT conserve son rôle physiologiquement premier dans la chaîne car elle est le lieu de construction du souvenir et la source de la trace à long terme. L'hippocampe est bien une structure indispensable pour la fixation des souvenirs, quoiqu'elle-même sans contenu. La mémoire est bien localisée dans les zones associatives, et la MLT peut assurer son rôle de base de la MCT. Enfin, on retrouve l'organisation globale en double boucle des objets mentaux, du SNC et des échanges, caractéristique fondamentale de la conception à base d'objets mentaux du fonctionnement du SNC.

Les paramètres et variations physiologiques de l'apprentissage sont aussi expliqués, notamment la nécessité de la présence durable ou répétée d'un stimulus pour permettre sa fixation. De même, les interférences observées banalement entre des apprentissages proches trouvent leur explication dans les mécanismes liés à la nature du support, notamment dans les interférences.

De plus, cette organisation physiologique permet aussi de comprendre l'influence de la composante émotionnelle sur la fixation des souvenirs. En effet, l'hippocampe est une structure commune aux deux systèmes émotionnel d'une part, et mnésique d'autre part. Il est pour ces deux

systèmes une étape indispensable dans un circuit fonctionnellement bouclé. Les interférences entre ces systèmes apparaissent ainsi inévitables, et trouvent une explication complète.

Chacun a vécu le cas du renforcement, par le circuit émotionnel, de l'image d'un événement au point d'en rendre le souvenir quasi-définitif après une présentation unique. Il suffit d'une interférence positive entre les circuits émotionnel et mnésique, et l'image se voit immédiatement répétée avec force, conduisant à l'inscription d'une empreinte solide dans le réseau des aires associatives. Au contraire, les événements survenus juste après cet événement fortement chargé émotionnellement subiraient une interférence négative et seraient peu ou mal fixés car insuffisamment répétés.

Pour nous résumer, voyons quelle devrait être la séquence idéale à suivre pour fixer de manière durable le souvenir d'un événement nouveau.

Phase I. perception et constitution du nouvel objet mental en MCT.

L'événement n'étant pas connu, les stimuli perçus seront interprétés en fonction de ce qu'on sait déjà pour fabriquer des repères. En théorie, il faudrait donc l'analyser et le décortiquer pour en retrouver des parties ou caractéristiques déjà connues afin de raccrocher cet événement au corpus des souvenirs. Après analyse, on pourrait alors construire par combinaison un nouvel objet mental à partir des anciens. C'est la construction incrémentale des objets mentaux. En réalité, la décomposition en éléments s'effectue de manière quasi-automatique dans la mémoire, grâce au mécanisme d'activation des souvenirs à partir des perceptions. L'analyse est donc d'abord réalisée sans intervention consciente volontaire. Toutes ces opérations sont extrêmement rapides puisqu'elles se produisent automatiquement dès l'arrivée des signaux perçus dans les zones associatives. Le nouvel objet mental, construit par combinaison incrémentale à partir de ses composantes déjà connues, est donc en MCT sous forme de flux d'activation.

Phase II. stabilisation du nouvel objet mental en MCT


Ensuite, la répétition de cet événement est nécessaire pour renforcer la combinaison qui forme le nouvel objet mental. Ces opérations de renforcement des liaisons et interférences entre objets mentaux se produisent toujours en MCT par réorganisation du flux d'activation dans un bloc. Elles augmentent la stabilité du nouvel objet mental à un niveau suffisant pour que la fixation puisse se produire. Eventuellement, la présentation des stimuli dans d'autres contextes et circonstances va permettre d'augmenter les liaisons autour du nouvel objet mental, et d'affiner celles-ci par le processus d'abstraction dans le bloc.

Phase III. fixation en MLT

La fixation en MLT est la dernière phase. Elle est obtenue par le renforcement au travers du bouclage interne qui permet la répétition sans que la référence externe fournie par les perceptions soit présente. La stabilité du flux constituant l'objet mental en MCT est telle qu'on peut reproduire l'événement par bouclage dans le SNC via le circuit hippocampique, sans besoin de l'objet perçu.

Le plus souvent, plusieurs cycles sont nécessaires à une mémorisation solide. La durée de la phase I est alors réduite au profit des étapes II et III. Ensuite, l'activation de l'objet mental peut être seulement produite par l'activation de chaînes au sein du SNC, sans aucun support perceptif dans l'environnement. La fixation peut alors être entretenue pour une période indéfinie.

10. PERCEPTION, ACTION ET CONSCIENCE



9

*Niveau d'échelle 9 : le fonctionnement d'un SNC.
On observe globalement le SNC et le corps biologique dans lequel il se trouve. Les objets mentaux sont maintenant des outils pour analyser le comportement, et plus des objets d'analyse comme précédemment.*

Les systèmes nerveux les plus simples fonctionnent selon un schéma perception-action, aussi appelé stimulus-réponse (S-R). Les SNC plus évolués fonctionnent selon un schéma perception-représentation-action (P-R-A), aussi appelé cognitif. Nous examinons ici comment les objets mentaux et leurs propriétés se révèlent être des outils utiles pour comprendre le fonctionnement des systèmes nerveux évolués et, partant, le comportement des individus.

Le comportement est la traduction, vers le milieu environnant, de l'activité mentale de l'individu au moyen de son système locomoteur. Les objets mentaux, puisqu'ils sont le support des représentations mentales et des activités cognitives, sont donc au cœur du comportement.

Le cas le plus simple est celui du schéma stimulus-réponse, dans lequel la part cognitive est très réduite. Le schéma S-R permet des réponses immédiates et stéréotypées à des stimuli répertoriés, même si ces réponses sont parfois fort complexes. C'est ce schéma qui gouverne les organismes animaux les plus simples, mais il existe aussi dans les SNC évolués et nous en détaillons le fonctionnement dans la section 11.4.

Le cas qui nous occupe est dit cognitif. Le schéma utilisé alors, de type perception-représentation-action, pose la représentation comme l'élément central autour duquel s'articulent la perception du stimulus d'une part, et la réaction de l'individu d'autre part. Grâce aux interférences entre représentations et au filtrage des perceptions (voir § 14), le schéma P-R-A permet une réactivité plus fine et plus différenciée devant les signaux de l'environnement. Les représentations internes, les connaissances ou la cognition en général, jouent ainsi un rôle de régulateur du comportement en élargissant l'éventail des réponses possibles devant un stimulus.

Pour bien éclairer ce point, reprenons l'étude des objets mentaux en les replaçant dans leur cadre de fonctionnement, en l'occurrence l'organisation des structures liées à la perception et à l'action.

Schématiquement, le SNC est à la fois le point de convergence des stimuli et le point d'origine des actions motrices. Or celles-ci provoquent à la fois des stimuli internes par les voies proprioceptives, et des stimuli externes via les modifications produites dans le monde extérieur (voir les figures 33, 34, 38 et la section 4.3.2). Le SNC est ainsi, via les actions motrices, en partie à l'origine des stimuli qui lui parviennent. Les sections suivantes examineront précisément comment l'organisation de cette boucle du SNC sur lui-même produit, avec l'accumulation d'objets mentaux abstraits, une modification du contenu de la conscience et des rapports entre perceptions, actions et représentations.

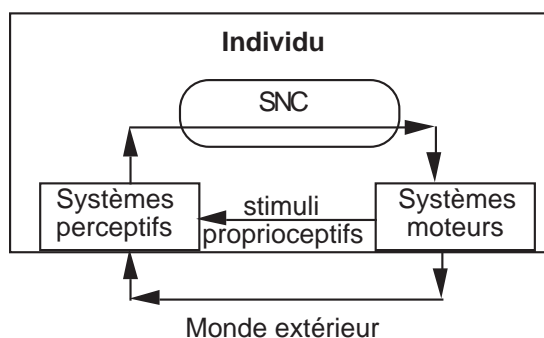


Figure 38 : les relations des systèmes perceptifs et moteurs
Le SNC est au cœur des interactions entre les deux systèmes fondamentaux de la vie relationnelle, à la fois source et destination des signaux.

L'activité du SNC est matérialisée par l'action volontaire qui, au moyen d'un système locomoteur, permet d'agir sur l'environnement. L'organisation des structures d'action motrice est plus simple que celle des systèmes perceptifs. Nous commencerons donc notre examen des systèmes périphériques du SNC par le système moteur volontaire.

10.1. L'ACTION VOLONTAIRE

Le schéma de la figure 39 montre l'organisation des objets mentaux liés aux actions à travers le système locomoteur volontaire (muscles squelettiques et cordes vocales).

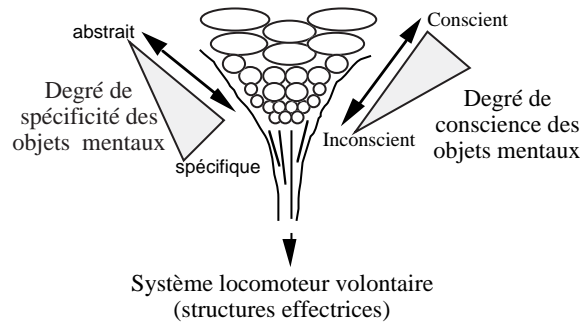


Figure 39 : l'organisation des objets mentaux dans le système locomoteur volontaire.

Les objets mentaux spécifiques sont proches des structures effectrices (cellules pyramidales de l'aire motrice). Ces objets mentaux sont peu accessibles à la conscience. A l'autre extrémité de la chaîne, au contraire, les objets mentaux sont abstraits et facilement accessibles à la conscience.

Dans ce schéma, on a fait figurer les cellules en fonction de leur position fonctionnelle plutôt que de leur position anatomique. Ainsi, la partie la plus spécifique, profonde, d'un mouvement volontaire est placée en bas, à proximité des structures qui commandent le mouvement (cellules pyramidales et motoneurones spinaux), en contrôlent la réalisation (cervelet), ou le réalisent (muscles). A l'opposé, en haut sur le schéma, on trouve la partie abstraite du mouvement. Entre les deux extrémités, il y a une chaîne d'objets mentaux. L'orientation de cette graduation suit les mécanismes de chaînage et de généralisation : plus un objet mental est éloigné des structures effectrices, plus il est abstrait.

Une première approche de la conscience dans ce contexte de graduation spécifique/abstrait permet de la placer du côté du pôle abstrait. En effet, dans l'action volontaire, tous les mécanismes de régulation des mouvements sont automatiques, inconscients, alors même que la commande du mouvement est consciente et que chaque partie du mouvement peut être volontairement exécuté indépendamment des autres. Conservons simplement l'idée que la conscience est liée aux objets mentaux abstraits pour poser une première échelle du degré de conscience, orientée à l'inverse du degré de spécificité. Une discussion plus approfondie de la conscience est proposée plus loin, dans la section 15.

Dans ce schéma, le parallèle entre degré de conscience et degré de spécificité des objets mentaux est important. Les orientations de ces graduations sont symétriques : plus une représentation est consciente, moins elle est spécifique, et inversement plus elle est spécifique, moins elle est consciente.

On trouve finalement les représentations les plus spécifiques à proximité des systèmes périphériques du SNC, ici le système locomoteur, et les représentations abstraites à proximité et dans les couches associatives.

10.2. LA PERCEPTION

L'organisation des objets mentaux perceptifs est tout à fait comparable à celle des représentations liées à l'action. Le schéma de la figure 40 peut paraître complexe, mais il montre surtout le parallélisme des différentes voies de la perception. En effet, les circuits suivis par les stimuli sont grossièrement comparables pour chacun des sens (toucher, vue, audition, goût, olfaction).

Le circuit standard d'un signal perceptif est le suivant : les signaux parviennent au cortex (les couches externes du schéma) après un passage dans les structures thalamiques qui conservent la séparation des modalités sensorielles. Schématiquement, les objets mentaux stimulés sont de plus en plus abstraits, c'est-à-dire de plus en plus associatifs, quand on approche les couches les plus externes, c'est-à-dire les plus éloignées des structures thalamiques¹⁵. De la même manière, le degré de conscience des objets mentaux activés par les perceptions augmente quand on s'éloigne des structures thalamiques.

¹⁵ Il s'agit là d'une description fonctionnelle du cerveau, non pas d'une description anatomique. En effet, s'il existe bien des couches séparées dans le cortex, et dotées de fonctions différentes, l'ordre observé de transmission des signaux de couche en couche ne respecte pas l'organisation spatiale apparente (du dedans vers le dehors, ou bien du dehors vers le dedans).

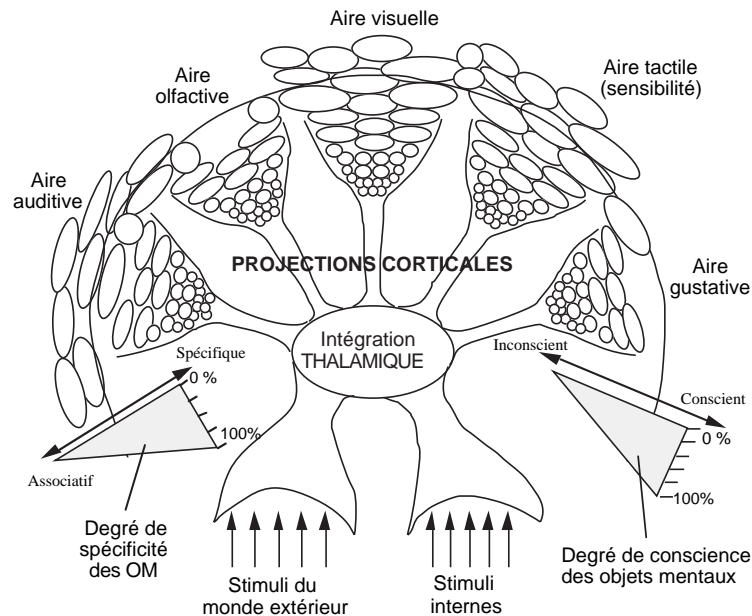


Figure 40 : l'organisation des objets mentaux dans les systèmes perceptifs.

Dans le SNC, les modalités de perception sont séparées. Le schéma figure systématiquement les projections du dedans vers le dehors, ce qui ne respecte pas l'organisation biologique mais permet de représenter le degré de spécificité des informations. Les signaux traités sont d'autant plus spécifiques de la modalité qu'ils sont observés à un niveau proche des récepteurs (voies afférentes). A l'autre extrémité de la chaîne, c'est-à-dire vers l'extérieur du schéma, les signaux traités sont plus associatifs et abstraits.

La place des objets mentaux dans la perception est maintenant plus précise. Chaque modalité sensorielle est respectée et des objets mentaux spécifiques sont d'abord construits dans les aires associatives propres à chaque lobe. Par exemple, les perceptions visuelles sont dans les aires associatives du lobe occipital situées autour des aires primaires et secondaires. Mais avec la diffusion des signaux, les niveaux de l'échelle d'abstraction sont gravés progressivement et la spécificité des signaux diminue petit à petit. Ainsi

apparaît l'intermodalité et le développement d'objets mentaux multimodaux dans une zone connue comme étant au carrefour de la mémoire et du langage, l'aire pariéto-temporo-occipitale.

L'objet mental en double boucle, avec ses propriétés, est ainsi un concept qui permet d'aborder indifféremment la perception ou l'action, tout en rendant compte de la caractéristique majeure du fonctionnement des systèmes évolués, c'est-à-dire la dimension cognitive. En effet, chaque objet mental est a priori la représentation acquise, stockée dans le SNC, d'un événement traduit sous forme de signaux par les organes de perception.

En réalité, cette conception est plus puissante, car elle ne se limite pas à l'action et à la perception. Nous allons voir que l'origine des stimuli (externe à l'individu ou interne au SNC), aussi bien que la nature de l'événement (signal isolé ou séquence temporelle) sont transparentes pour le mécanisme de construction des objets mentaux. Dans tous les cas, ce mécanisme d'apprentissage permet d'acquérir de nouvelles représentations sous forme d'objets mentaux.

10.3. CONSCIENCE ET INCONSCIENCE

Le problème de la conscience a été introduit lors de l'étude de l'action et de la perception sous forme d'un parallèle avec le caractère abstrait des objets mentaux. Il sera encore abordé, de manière plus approfondie, dans la section 15. Voyons déjà comment certaines représentations peuvent apparaître ou disparaître du champ de la conscience.

Schématiquement, tout au long d'une chaîne d'objets mentaux entrelacés, les représentations spécifiques (proches des structures effectrices) sont plutôt inconscientes, et les représentations abstraites (éloignées des structures effectrices) plutôt conscientes. Les représentations abstraites sont plus facilement accessibles à la conscience. Concrétisons cette conception à travers un exemple.

Revenons à l'apprentissage du piano. Le débutant ne possède pas de pratique ni d'expérience de l'instrument. Il ne sait pas quel effet va produire tel mouvement coordonné de plusieurs doigts. Il ne sait pas non plus comment produire une sonorité ou une mélodie particulière.

Ses premiers essais, qui s'étendent parfois sur des mois ou des années, lui permettent de dépasser ce stade. La progression suit une voie assez systématique. Au début, chaque mouvement, chaque position des doigts, chaque repérage sur le clavier, tout est strictement conscient. Tout doit être pensé et agi volontairement. Puis suit une phase, généralement agréable, où les progrès sont visibles : la vitesse croît, l'aisance aussi, jouer n'est plus un effort pénible. Bien des choses deviennent des habitudes, et de bonnes habitudes si l'on pratique correctement. La position du poignet, de la main, du coude, l'écartement des doigts pour atteindre la touche voulue, les séquences de notes, toutes ces choses ne sont plus le résultat d'une concentration de chaque instant. Le contrôle de beaucoup de mouvements a quitté le champ de la conscience. Le sentiment d'effort intense a disparu.

Pourtant, le pianiste joue du piano. Des touches de l'instrument sont enfoncées sous l'effet de l'action des mains du pianiste. A ce stade de maîtrise, il n'agit plus seulement consciemment. Le contrôle de l'action reste conscient, mais l'exécution de l'action est déjà partiellement dévolue à des structures devenues inconscientes.

La répétition des associations de mouvements, de séquences, la pratique en général, conduisent au développement de nouvelles associations entre les objets mentaux mis en jeu au cours de la pratique du piano. Ces nouvelles associations sont de nouvelles boucles imbriquées, développées à cause des nombreuses répétitions, et en quelque sorte à partir des représentations abstraites à l'origine de chaque mouvement, et donc des répétitions. Les objets mentaux ainsi logiquement regroupés et dont les relations sont renforcées par les répétitions forment des blocs d'actions.

Dans ces blocs d'actions, les objets mentaux les plus abstraits sont plus proches de la conscience, et les objets mentaux les plus spécifiques sont au contraire plus éloignés de la conscience.

C'est ainsi que l'accessibilité d'une représentation à la conscience est une propriété des objets mentaux en rapport avec leur niveau d'abstraction, c'est-à-dire leur position plus ou moins éloignée de la source du stimulus. En règle générale, plus un objet mental est abstrait, plus il est facilement accessible à la conscience, et donc plus il est manipulable consciemment. Inversement, les représentations créées à proximité des structures spécifiques motrices ou perceptives sont peu ou pas accessibles à la

conscience, même si elles sont utilisées pour l'activation des objets mentaux abstraits.

Les objets mentaux ont ainsi toutes les qualités nécessaires pour tenir leur place de maillon central du schéma P-R-A. Chaînon entre les perceptions et les actions, ils peuvent jouer un rôle régulateur dans le comportement de l'individu. Et dans ce schéma, les objets mentaux abstraits, bien plus que les objets mentaux spécifiques, ont cette fonction régulatrice. En effet, les associations de bas niveau, proches des systèmes périphériques perceptifs et moteurs, gèrent des comportements plutôt automatisés, alors que la commande est progressivement transférée vers des représentations plus abstraites. Les objets mentaux abstraits, accessibles à la conscience, parce qu'ils sont au carrefour entre perception et action, contrôlent et régulent le comportement global de l'individu.

11. LES OBJETS MENTAUX ET LE TEMPS

La question du temps doit impérativement être abordée, car le comportement s'inscrivant dans la durée, cela suppose qu'il existe une forme de représentation du temps utilisable.

A ce point de l'exposé, nous savons que les objets mentaux et leurs différentes fonctions, dont les blocs d'objets mentaux, apparaissent nécessairement dans un système nerveux dès lors que celui-ci présente des capacités d'apprentissage ainsi qu'une quantité de neurones suffisamment importante (cf § 6.3.1). La quantité de cellules, et donc de doubles boucles potentielles, est en effet déterminante pour faire apparaître tous les phénomènes cognitifs comme une propriété émergente des SNC.

Plusieurs aspects fonctionnels des objets mentaux ont déjà été examinés, mais le rôle du temps n'a pas été abordé autrement qu'à travers l'impulsion pour l'apprentissage et l'activation (cf § 3.3). Il nous faut donc montrer que les objets mentaux peuvent aussi représenter et exprimer les effets du temps.

La représentation de séquences temporelles sous forme d'objets mentaux est en fait une généralisation du phénomène d'association temporelle entre représentations examiné au § 5.2. Une séquence de stimuli, par exemple les notes d'une mélodie, crée une vague d'activations successives selon un axe perpendiculaire aux activations suscitées par chaque stimulus (voir figure 41). Cet axe est parallèle à la flèche de déroulement du temps. L'objet mental construit par la répétition de cette vague d'activations va donc avoir un caractère temporel, il représente une séquence.

L'objet mental représentation de l'association temporelle peut associer deux représentations à des instants différents, car il est lui-même une chaîne de boucles imbriquées dont la propagation du flux d'activation prend un certain temps. Cet aspect est figuré sur le schéma par les multiples boucles à l'intérieur de l'objet mental associatif. La propagation du flux le long des chaînes est parallèle à l'axe du temps.

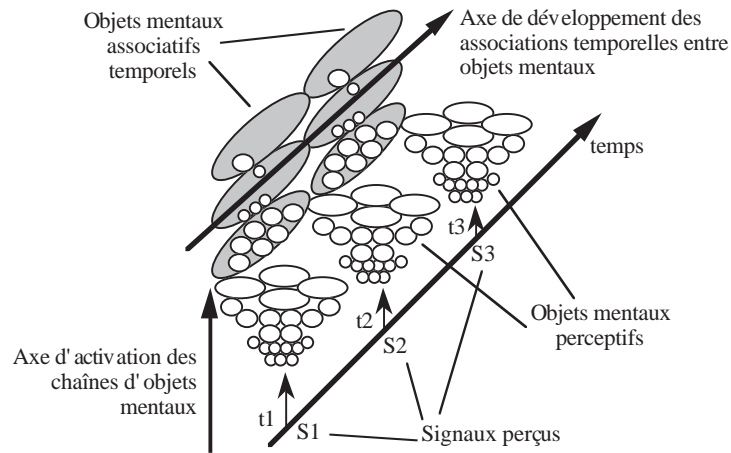


Figure 41 : la création des objets mentaux à caractère temporel (perception)

La figure schématise l'axe d'activation des objets mentaux et l'axe de développement des associations entre ces objets activés. On voit que cet axe de développement est parallèle à la flèche de déroulement du temps. La nature de l'événement représenté est indépendante de la structure de l'objet mental. Les objets mentaux associatifs illustrés ici sont à type de séquence temporelle perceptive.

Comme illustration de la séquence temporelle d'événements en tant qu'élément favorisant la construction automatique de nouveaux objets mentaux de type temporel, les sections suivantes sont consacrées à l'examen de différentes catégories d'objets mentaux temporels ayant des expressions au niveau du comportement de l'individu. Nous présenterons successivement le schéma causal, image de la relation cause-effet, la séquence motrice qui permet de réaliser des actions complexes, et le schéma stimulus-réponse qui montre les effets de l'entraînement.

11.1. LE SCHÉMA CAUSAL

Une séquence rapprochée action-résultat est ainsi stockée sous forme d'un objet mental abstrait qui représente un schéma causal. Le concept de

schéma causal a été introduit par Jean Piaget et désigne une représentation dans laquelle l'événement premier (l'action) est admis comme la *cause* (le déclencheur) de l'événement second (le résultat) observé. En termes d'objets mentaux, il s'agit d'une abstraction construite à partir de plusieurs expériences répétées de la séquence de stimuli (cf § 6.3). La figure 42 illustre la création d'un schéma causal entre deux événements perçus par l'apparition d'un objet mental associatif construit selon l'axe du temps.

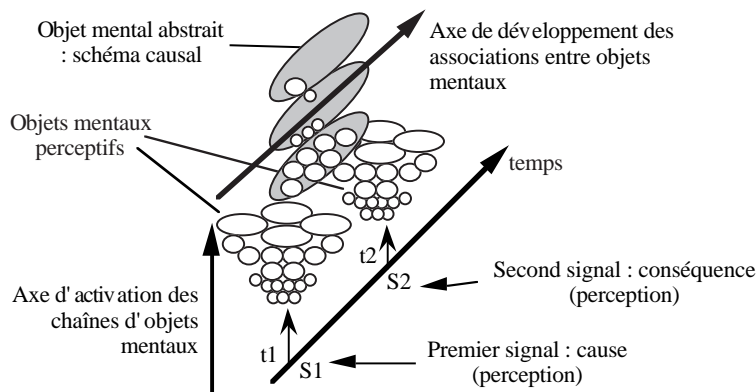


Figure 42 : un schéma causal action-résultat

Un objet mental abstrait de type temporel associe deux objets mentaux activés par des perceptions. Le premier signal sera admis comme la cause du second.

Cet objet mental abstrait tient son caractère temporel de son développement selon l'axe du temps. Il devient un schéma causal car il associe un signal-cause à un signal-conséquence, ce qui lui donne sa spécificité fonctionnelle.

Quand de nombreux exemples de représentations de ce type sont acquises par apprentissage, elles forment un ensemble dans lequel peut se produire le phénomène d'abstraction et de généralisation tel que vu au § 6.3. Une image abstraite de la relation cause-effet peut ainsi être construite, qui représente la causalité apparente dans la séquence des événements dans l'environnement. Une fois cette représentation générale établie dans le SNC, elle est susceptible de s'appliquer à toute séquence de stimuli, y compris à des phénomènes physiquement indépendants mais dont la perception rapprochée induit a priori une relation de cause à effet.

11.2. LA VALEUR FONCTIONNELLE

On a vu plus haut (§ 5.1) les facteurs de variété qui permettent d'individualiser matériellement chaque boucle à l'intérieur de chaque objet mental, lui-même étant partie d'une chaîne d'objets mentaux. Pourtant, la distinction qui existe ainsi physiquement au niveau des boucles de cellules n'est effectivement mesurable au niveau du comportement de l'individu que si l'on est capable d'associer un résultat spécifique à cette partie de l'objet mental que l'on distingue. La représentation de ce résultat se fera évidemment sous la forme d'un objet mental. Le regroupement de l'objet mental initial (action ou perception) et du résultat associé forme un bloc dont la dimension résultat est la valeur fonctionnelle du bloc.

La distinction entre deux objets mentaux n'est possible et n'a de sens que si chaque objet mental est une représentation mentale identifiable au travers d'un comportement ou d'une réaction différente de l'individu. Le comportement extériorisé, témoin de l'activité du SNC, est un reflet de la valeur fonctionnelle du bloc d'objets mentaux le plus influent à ce moment.

La valeur fonctionnelle est un concept qui permet de rattacher des ensembles de signaux, perceptions ou actions, avec des résultats, même s'ils sont retardés dans le temps. On peut ainsi approcher sur de longues périodes le comportement de l'individu, extériorisé dans l'environnement, et avoir un support à la notion de motivation. La mise en œuvre pratique de la valeur fonctionnelle est illustrée au § 14.4 avec les capacités.

Prenons un exemple pour concrétiser cette notion. Au piano, la répétition d'un doigté sur 3 doigts dans un exercice conduit assez vite à la maîtrise du problème. L'utilisation de cette acquisition dans une composition nécessite un petit travail supplémentaire pour le débutant. Pour lui, le contenu (le doigté) et la forme (l'exercice) ne sont pas bien séparés, le contenu n'est pas utilisable indépendamment de la forme. Les représentations internes de l'action (sous forme d'objets mentaux) ne sont pas bien adaptées à l'usage qu'on voudrait en faire. Avec l'expérience, qui apporte des utilisations dans des contextes différents, les représentations adéquates sont sélectionnées et la maîtrise du doigté devient indépendante du contexte d'utilisation.

Ainsi, le débutant sépare mal le contenu (ici le doigté) et la forme (l'exercice). Les deux éléments sont fixés dans un seul objet mental, et ils sont donc non séparables à ce moment de l'apprentissage. La valeur fonctionnelle de l'objet mental acquis est directement liée à l'exercice, et

seulement à lui. Le doigté est correctement réalisé au cours de cet exercice, mais pas dans un autre contexte.

Le problème de la séparation apparaît lorsqu'on a besoin d'utiliser ce doigté, déjà appris, dans des conditions différentes de l'exercice initial. A ce moment, le pianiste doit apprendre à séparer le contenu de la forme. Un nouvel apprentissage est nécessaire pour associer une valeur fonctionnelle spécifique (ici la possibilité de réaliser ce doigté) à une partie de l'objet mental initial.

Vouloir isoler une partie d'un objet mental est comme vouloir séparer forme et contenu. Cela ne prend un sens que lorsque l'expérience permet l'apprentissage concret de cette séparation. A ce moment, les objets mentaux s'individualisent naturellement au plan fonctionnel, et on pourrait (si les moyens adaptés existaient) visualiser leurs différences au niveau cellulaire dans le réseau.

D'une manière générale, la valeur fonctionnelle d'un objet mental est la représentation du résultat habituellement associé à cette représentation. Chaque répétition de l'association entre la représentation d'une perception et son résultat renforce cette association jusqu'à en faire une corrélation forte au sein d'un bloc. Participant à l'activation dynamique du bloc lié à la perception, même avec une importance secondaire, l'objet mental résultat devient un moyen d'activation et de sélection de celui-ci (cf § 8.2 et 8.3).

Prenons un cas concret lié à la perception pour illustrer ce phénomène de sélection. Chacun connaît ces planches de dessins dans lesquelles sont dissimulées des figures ou des motifs. La collection «Où est Charlie ?» en offre plusieurs bons exemples. Le jeu consiste à repérer un ou plusieurs motifs dans la planche, soit à partir d'une description verbale, soit à partir d'un modèle. Il est souvent difficile d'identifier ces motifs a priori si l'on est pas averti de leur présence dans le dessin. Mais il devient très aisé de les trouver quand on sait ce qu'il faut chercher.

Cet exemple illustre précisément le rôle de filtre déclencheur que peut avoir un objet mental pour sélectionner une représentation ou un bloc. La connaissance du motif à rechercher est traduite par l'activation de l'objet mental correspondant. Celui-ci augmente le niveau d'activation de tous les blocs auxquels il appartient. Quand les stimuli visuels sont traités dans les aires visuelles, ils provoquent automatiquement l'activation des

représentations correspondantes. Le bloc qui sera activé à la fois par l'objet mental recherché et par les perceptions verra instantanément son niveau d'activation augmenter considérablement. Quand il y a correspondance complète, le flux d'activation de ce bloc devient dominant dans le réseau.

Le phénomène est identique avec l'activation d'un bloc via sa valeur fonctionnelle. Supposons un individu affamé au pied d'un pommier. Une belle pomme, bien appétissante mais inaccessible, le nargue du haut de sa branche. La nécessité d'un outil pour prolonger le bras et atteindre la pomme apparaît. Comme son regard parcourt le sol alentour, le manche d'un rateau est immédiatement identifié comme pouvant convenir. Pour que l'histoire se finisse bien, nous dirons que le manche est assez long, la pomme excellente et le propriétaire du pommier bien éloigné.

Dans les deux cas, une composante extérieure au flux perceptif a contribué à la sélection d'une représentation dans le réseau par le flux d'activation préalable qu'elle induit. Ce phénomène sera étudié plus à fond dans la section 14, consacrée au filtrage.

11.3. LA SÉQUENCE TEMPORELLE MOTRICE

Les objets mentaux en double boucle peuvent aussi représenter des séquences temporelles motrices. Dans ce cas, l'association est à proprement parler un flux d'activations successives touchant des objets mentaux acquis préalablement, dont chacun pilote une action motrice élémentaire.

Les objets temporels associatifs se développent à un niveau d'abstraction relativement élevé, et restent donc proches de la conscience. En conséquence, et cela reste vrai avec la réorganisation des blocs, les objets mentaux élémentaires apparaissent comme relativement de plus en plus éloignés de la conscience.

De plus, si la séquence est régulièrement pratiquée, de nouvelles associations plus directes se créent aussi dans les niveaux inférieurs, plus proche des structures effectrices, augmentant l'extension verticale du bloc (cf § 5.3). Ce développement d'une chaîne d'objets mentaux du haut vers le bas, c'est-à-dire de l'abstrait vers le spécifique, correspond au passage hors du champ de la conscience d'une réaction acquise, laquelle devient automatique (cf § 10.3). L'activation de cette chaîne progressivement construite, c'est-à-dire son contrôle, repose alors sur les objets mentaux

les plus abstraits. La figure 43 illustre la création d'un objet mental de type séquence temporelle motrice.

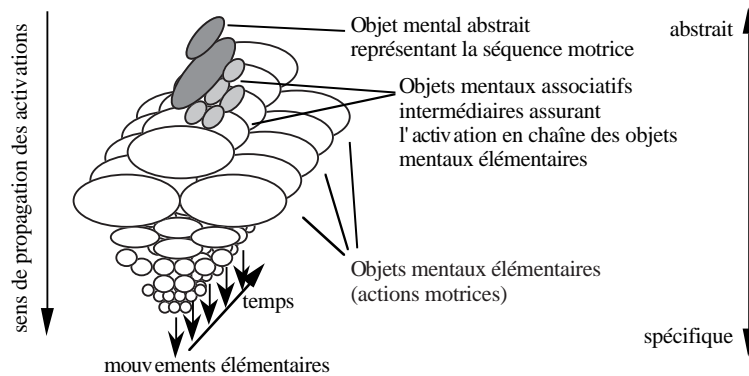


Figure 43 : une séquence temporelle motrice

Chaque objet mental élémentaire commande un mouvement, une note par exemple. L'ensemble de la séquence produit dans ce cas une mélodie.

Evidemment, les séquences répétées sont mieux apprises, mieux gravées dans le réseau de neurones. La répétition d'une séquence sélectionne en effet plusieurs fois les mêmes circuits (c'est-à-dire les mêmes objets mentaux représentant l'action), et leur stabilité en est renforcée : le souvenir est plus solide. Inversement, les circuits peu souvent parcourus, c'est-à-dire les connaissances peu utilisées, s'altèrent, se mélangent à d'autres ou disparaissent complètement. Ces variations de stabilité des représentations temporelles se mesurent relativement aux autres comme pour tout objet mental dans le SNC (voir la section sur l'oubli, au § 7.2).

11.4. LA SÉQUENCE STIMULUS-RÉPONSE

La séquence stimulus-réponse est l'aboutissement d'une réorganisation intense au sein d'un bloc, avec une extension importante vers les structures spécifiques, aux niveaux les plus spécifiques des chaînes d'objets mentaux. A la différence du réflexe biologiquement programmé, la séquence stimulus-réponse est acquise, mais elle se rapproche du réflexe par sa vitesse de mise en œuvre, totalement incompatible avec un traitement cognitif conscient.

La séquence stimulus-réponse est l'expression d'un bloc d'objets mentaux fortement structuré par de très nombreuses répétitions. Au sein du bloc, les associations ont pu se développer à des niveaux suffisamment spécifiques pour que l'étape cognitive soit shuntée dans le déclenchement de l'action (voir figure 44).

Il s'agit là d'une catégorie d'objet mental abstrait qui associe une perception et une action motrice. Cette association est possible dans les aires associatives du SNC car toutes les zones spécifiques, centres perceptifs et centres moteurs, ont des projections dans les aires associatives.

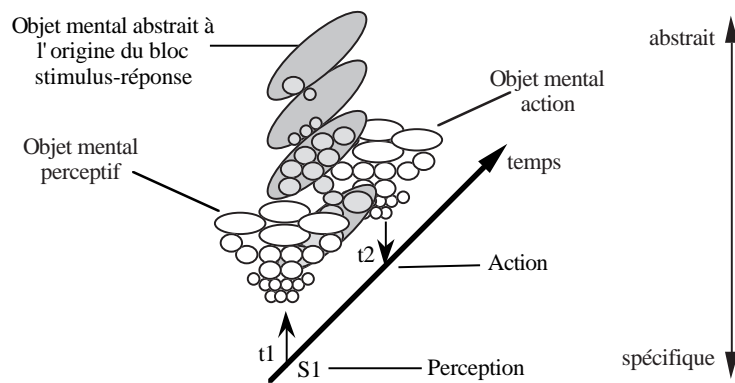


Figure 44 : une séquence temporelle de type stimulus-réponse

L'objet mental abstrait de type stimulus-réponse associe une perception comme déclencheur, et une action motrice comme réaction. Le bloc s'étend vers les niveaux spécifiques à la suite des répétitions de la séquence.

Les chaînes de type stimulus-réponse sont le fruit d'apprentissages. Plus précisément, la pratique de l'association permet d'améliorer l'efficacité de la chaîne S-R : réponse plus rapide et plus précise. Cette amélioration de l'efficacité est attendue par tous et perçue comme normale. Avec les blocs d'objets mentaux, elle est expliquée par le développement de chaînes descendantes, c'est-à-dire des niveaux abstraits vers les niveaux inférieurs. Grâce à la répétition, ces chaînes créent des associations à des niveaux de plus en plus bas, c'est-à-dire plus proches des structures spécifiques, tant perceptives qu'effectrices. Ces associations naissent spontanément des

interférences entre des objets mentaux répétitivement activés de manière proche dans le temps, et de la réorganisation du bloc provoquée par les répétitions.

Ainsi, l'association est seulement cognitive au début de l'apprentissage. Avec la pratique, elle prend un caractère plus réflexe, automatique, sans intervention de la pensée consciente. La partie cognitive abstraite de la conscience est littéralement shuntée. L'individu n'a pas le sentiment d'un effort de sa volonté consciente. C'est justement l'objectif poursuivi par l'entraînement : donner la maîtrise et la rapidité en automatisant des gestes appris. Le développement des doubles boucles en chaîne vers le bas, de la cognition abstraite vers les centres spécifiques (structures perceptives et motrices) correspond bien à ce phénomène couramment constaté.

12. LA REPRÉSENTATION DE L'ACTIVITÉ MENTALE EN FONCTIONNEMENT

Une des caractéristiques de la vie biologique est la permanence dans le temps des structures qui forment un individu, notamment le SNC. Les mécanismes intimes du fonctionnement du SNC, aux différents niveaux d'échelle (cellule, circuit, objet mental, double boucle), ont été analysés et décrits. Il nous faut maintenant représenter, au cours du temps, le résultat global du fonctionnement simultané de toutes ces structures.

Considérons pour commencer un espace abstrait de dimension 2+1 défini par l'ensemble formé de 2 objets mentaux abstraits représentant deux couleurs et le temps (voir figure 45). Les 2 dimensions des objets mentaux définissent un référentiel fixe, et le temps un axe isolé. A chaque instant t , on associe à un objet mental activé un point de coordonnée (t, X) dans cet espace, où X est la dimension, ici la couleur, définie par l'objet mental activé. Ce point est dit actif, en référence à l'objet mental qu'il symbolise. On fera figurer les points actifs, et seulement ceux-là, sur la figure.

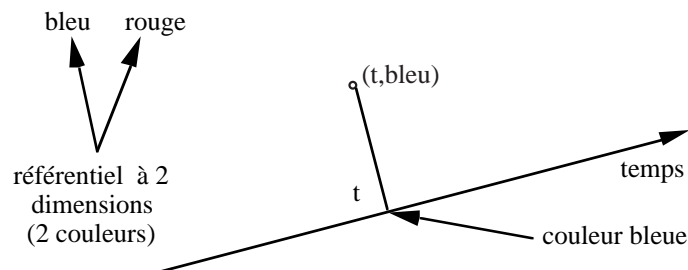


Figure 45 : Représentation d'un objet mental dans l'espace à 2+1 dimensions

On a représenté un espace arbitraire à deux dimensions, une pour chaque couleur bleu et rouge. Un objet mental activé, qui témoigne de la perception de la couleur associée, est représenté par un point dans cet espace. Comme cette activation se déroule dans le temps, l'axe temporel fournit une troisième dimension. Les coordonnées de l'objet mental activé comprennent ainsi l'instant et la couleur.

Avec ces conventions, si aucune représentation n'est activée, il n'y a pas de point associé à un instant donné. Si, dans une séquence d'instant

successifs, un seul objet mental reste actif, par exemple pour la couleur bleue, on obtient un segment de droite sur la figure (voir figure 46).

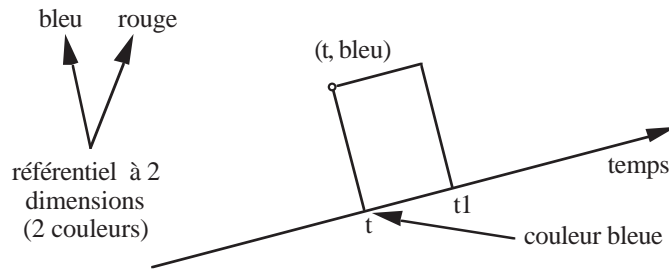


Figure 46 : Représentation d'une activation prolongée

Toujours dans notre espace arbitraire à 2+1 dimensions, on a représenté l'activation de l'objet mental «bleu» pendant une durée s'étendant de l'instant t à l'instant $t1$.

Toujours avec ces conventions si, pour une période de 10 instants, on a d'abord 3 objets mentaux activés, puis aucun pendant 5 instants, puis encore 2 objets mentaux activés pendant les 2 derniers instants, on obtient un tracé en pointillé (voir figure 47).

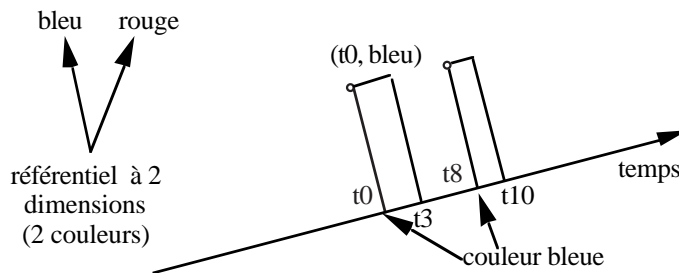


Figure 47 : Représentation d'une activation intermittente

Dans ce schéma, la couleur bleue est présentée deux fois successivement de t à $t10$, avec une période d'interruption de l'instant $t3$ à l'instant $t8$. Les segments figurant l'activation apparaissent alors entre les instants t et $t3$, puis entre $t8$ et $t10$.

Imaginons maintenant que l'on expose l'individu à un changement de couleur, du bleu au rouge, avec retour au bleu ensuite. On va obtenir une

courbe avec plusieurs segments, chacun correspondant à la couleur présentée, sur chacun des intervalles de temps (voir figure 48).

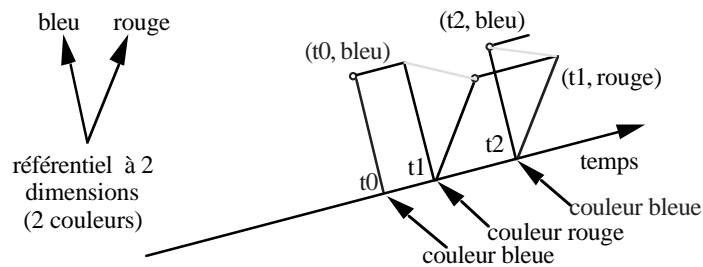


Figure 48 : Représentation de 3 activations successives (2 couleurs)
 Cette courbe représente les segments d'activation des deux objets mentaux «bleu» et «rouge» quand on présente successivement ces deux couleurs au sujet.

Intéressons-nous maintenant à un niveau plus général, qui correspond à l'état normal d'un adulte placé dans son milieu habituel. Nous allons utiliser pour cela un espace arbitraire plus grand, avec autant de dimensions que nécessaire pour représenter les composants de base des objets mentaux. Le référentiel de l'espace aura donc N dimensions, qui forment une base de l'espace, plus l'axe du temps. Comme précédemment, chaque point dans l'espace correspond à l'activation d'un objet mental. Pour simplifier la figure, les groupes d'objets mentaux formant des ensembles cohérents sont assimilés à un seul objet mental et sont donc représentés par un seul point ou segment.

Supposons d'abord que l'individu se livre à une tâche intellectuelle intense, comme la résolution d'un problème de mathématiques. Le réel est alors entièrement focalisé sur les quelques équations et symboles du problème posé. La perception du réel, toujours sous l'effet du filtre, passe totalement à l'arrière-plan du champ de conscience. Les représentations actives sont toutes reliées au problème de maths, les enchaînements sont ceux de ces représentations, c'est-à-dire logiques et cohérents. L'enveloppe globale qui entoure ces activations dans l'espace est réduite, étroite, focalisée autour des représentations actives (voir figure 49).

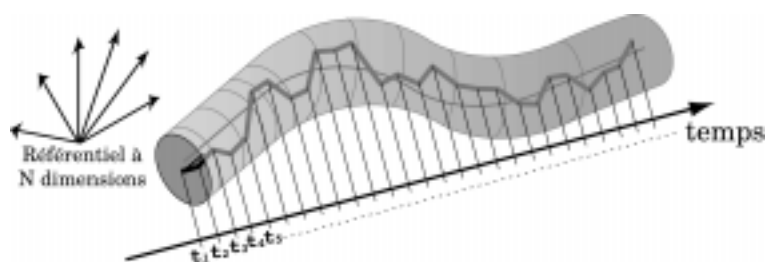


Figure 49 : La courbe des activations en phase de concentration
 Pour simplifier, chaque point ou segment figure l'activation d'un bloc d'objets mentaux associés, lesquels forment un ensemble logique vis-à-vis du monde réel. Les sauts d'un segment à l'autre illustrent les enchaînements d'un bloc à l'autre, qui sont représentés avec des positions différentes dans l'espace. Les blocs sont activés sur de longues périodes et sont spatialement très proches les uns des autres. L'enveloppe couvre l'ensemble des activations d'objets mentaux autour de chaque chaîne d'associations. Le volume délimité par cette enveloppe globale est faible et bien centré.

Supposons maintenant que le sujet se livre à une période de relaxation, par exemple avec une musique adaptée. La perception du réel devient plus uniforme, stimule presque au même niveau toutes les représentations. Les associations se font plus libres, l'enchaînement des objets mentaux devient lâche, chaotique. L'enveloppe globale qui entoure ces activations dans l'espace s'élargit (voir figure 50).

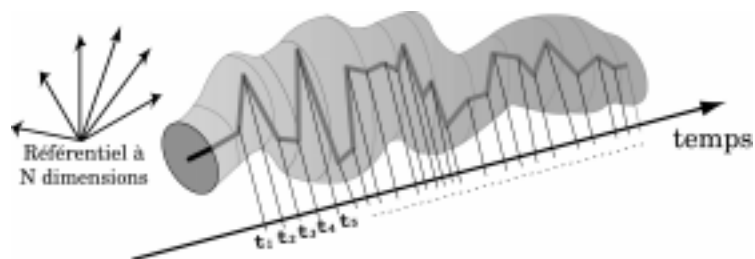



Figure 50 : La courbe des activations en période de relaxation
 En reprenant les conventions de symbolisation de la figure 49, on voit que les sauts d'un segment à l'autre illustrent les enchaînements erratiques typiques d'une attention flottante : idée concrète, puis émotion, puis son, puis abstraction, etc. représentés par des dimensions différentes. L'enveloppe couvre l'ensemble des activations d'objets mentaux autour de chaque chaîne d'associations. Le volume délimité par cette enveloppe globale est important et irrégulier.

13. LA DOUBLE BOUCLE DE L'ORGANISME ET DU SNC



10

Niveau d'échelle 10 : les points communs de l'organisation.

On montre que l'organisation en double boucle existe à tous les niveaux dans l'organisme. Cette section propose un examen de l'extérieur vers l'intérieur de l'organisme, à partir d'un point de vue anatomique et structurel pour mettre en évidence les traits invariants de l'organisation biologique.

L'organisation en double boucle que nous proposons pour les objets mentaux est un concept dont l'application s'étend au-delà du cadre strict des représentations dans un SNC. En réalité, l'organisme lui-même forme, avec l'environnement dans lequel il se trouve, une double boucle (voir figure 54). De plus, à l'intérieur de l'organisme, le SNC reproduit avec l'organisme dont il fait partie ce même schéma en double boucle (voir figure 56). Ainsi, la structure en double boucle est un *invariant* dans l'organisation du fonctionnement des systèmes de traitement de l'information, et ceci *quel que soit le niveau d'échelle* considéré.

La conservation de cette organisation en double boucle étend à tout l'organisme et à ses échanges avec le milieu la portée des constats faits au sujet des objets mentaux pour ce qui concerne l'apprentissage (voir § 5.3.2.3 et 6). La circulation des échanges en double boucle est le vecteur des effets en retour de l'organisation globale sur chacun de ses composants. Il y a un effet émergent des niveaux supérieurs vers les niveaux inférieurs.

La conservation de cette organisation en double boucle étend à tout l'organisme et à ses échanges avec le milieu la portée des constats faits au sujet des objets mentaux à propos de l'apprentissage. La double boucle est le vecteur des effets en retour de l'organisation sur chacun de ses composants. Il y a un effet émergent des niveaux les plus élevés vers les niveaux les plus bas.

13.1. LA DOUBLE BOUCLE DE L'ORGANISME

L'organisme de chaque individu est un système organisé, et en perpétuel échange avec son environnement (voir figure 51). Sans ces échanges, la survie de l'individu est directement menacée. La nature de ces échanges nécessaires est complexe et, semble-t-il, d'autant plus diversifiée que l'espèce est plus évoluée, c'est-à-dire dotée d'une organisation biologique et psychique plus complexe. En effet, si les échanges à visée énergétique suffisent pour les organismes unicellulaires, dans les espèces animales plus évoluées, la présence des congénères est nécessaire aux petits pour leur plein développement, en plus de ces échanges strictement matériels.

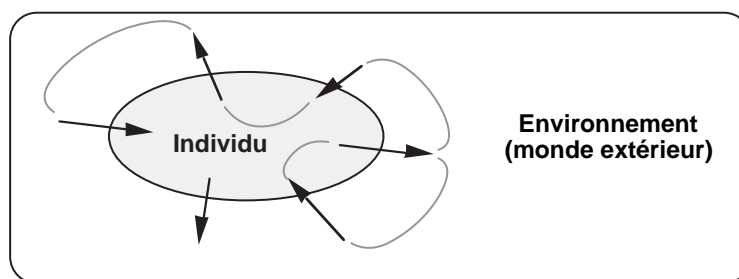


Figure 51 : L'individu et son environnement

Tout individu vivant est un système ouvert dont les échanges avec son environnement sont organisés. Les caractéristiques biologiques de l'espèce déterminent nombre de ces échanges, dont les formes d'apports énergétiques, les nutriments essentiels, la niche écologique, etc.

L'architecture du SNC est caractérisée par l'existence d'un carrefour d'intégration vers lequel convergent toutes les voies perceptives, et dans lequel elles font un relais synaptique. Il s'agit des centres thalamiques : thalamus et hypothalamus. Le rôle fonctionnel de cette zone est physiologiquement mal connu mais les deux points suivants semblent établis :

- l'organisation anatomique des connexions afférentes et efférentes implique une fonction d'intégration entre les différents signaux.
- sur le plan fonctionnel, l'intégrité anatomique de la zone revêt un caractère vital pour l'organisme (il y a une action directe sur les fonctions végétatives vitales).

Les centres thalamiques reçoivent des connexions de l'ensemble des structures perceptives, tant extéroceptives que proprioceptives. Nombre de ces connexions afférentes proviennent des centres de régulation végétatifs qui contrôlent les fonctions vitales. En retour, les centres thalamiques émettent des projections vers l'ensemble des zones corticales, en respectant la modalité perceptive des structures efférentes et des zones corticales correspondantes (voir figure 52).

Ainsi, les centres thalamiques apparaissent comme une structure qui projette sur le cortex cérébral, y compris les aires associatives des zones préfrontales, une modulation ou un signal reflétant *l'état physiologique* de l'organisme, indépendamment des perceptions identifiables via les cinq modalités de sensibilité consciente.

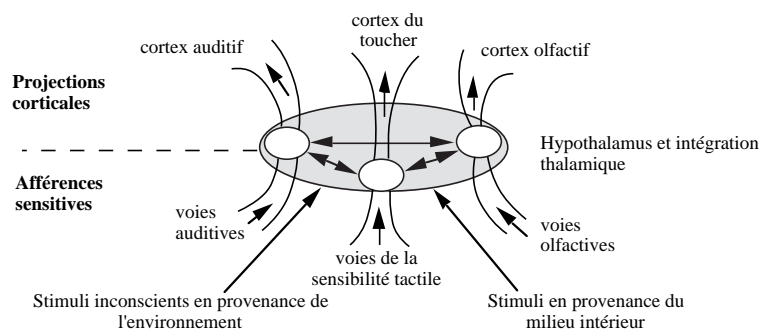


Figure 52 : Interactions entre voies sensibles au niveau thalamique. Chacune des voies sensibles afférentes fait relais au niveau d'un noyau thalamique avant d'être projetée sur le cortex correspondant. Les mécanismes physiologiques de l'intégration thalamique, figurés ici par des flèches entre les noyaux, ne sont pas précisément connus.

L'organisme est à la fois un système ouvert sur son environnement, et une organisation biologique autonome fermée sur elle-même (voir figure 53). En tant que système ouvert, l'organisme échange avec son environnement, ce sont les échanges externes. En tant que système fermé, les échanges se font en son sein, ce sont les échanges internes.

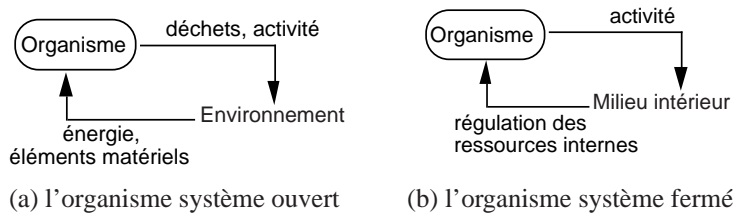


Figure 53 : les voies d'échange de l'organisme

Schéma (a). L'organisme est figuré en tant que système ouvert sur son environnement, avec lequel il échange ressources et déchets, et dans lequel il exprime son activité. C'est la voie des échanges externes.

Schéma (b). L'organisme est figuré en tant que système biologique fermé sur son milieu intérieur. Les échanges sont alors internes, et couvrent tous les aspects du maintien en activité physiologique de l'organisme.

Les échanges externes sont effectués au travers du système locomoteur, mais seulement en second lieu. En effet, les échanges primordiaux pour l'organisme sont ceux de l'alimentation en oxygène, en énergie, l'élimination des déchets, de la chaleur, et le décryptage de tous les signes d'un éventuel danger pour l'intégrité physique de l'individu. Le système locomoteur participe évidemment à ces échanges, notamment en les facilitant.

Les échanges internes concernent les effets de l'activité de l'organisme sur lui-même. Ils sont gérés par les centres nerveux du tronc cérébral, dont l'hypothalamus qui gère aussi le système hormonal et, associé au système limbique, les émotions. Tous ces centres et systèmes de régulation sont désignés par le terme système nerveux végétatif. L'intégrité de ces structures est une condition indispensable à la vie.

Le système nerveux végétatif est sollicité en permanence. En effet, la simple existence de l'organisme et son maintien en état physiologique fonctionnel pendant une période de quelques minutes implique la régulation de nombreux paramètres. La raison en est simple : toute activité physiologique est consommatrice de ressources, dont les plus élémentaires sont l'oxygène et le glucose, qui doivent être absorbés et distribués, et productrice d'oxyde de carbone, qui doit lui-même être collecté puis éliminé. Ainsi, le milieu intérieur de l'organisme est organisé pour maintenir à un niveau de disponibilité correct ces ressources consommables et les capacités d'élimination des déchets.

Les interactions entre ces deux voies d'échanges externe et interne sont fort nombreuses et gouvernent bien des aspects de la vie quotidienne considérés comme mineurs.

La première interaction, première en tant que la plus primitive, est dans le sens intérieur vers extérieur, ce sont les besoins et les pulsions. Les besoins conditionnent plus ou moins directement le comportement et les actions. Dans ce cas, les actions ont pour but une modification des échanges externes qui induit un changement dans le milieu intérieur. La faim, la soif sont des exemples de tels signaux issus du milieu intérieur, donc des échanges internes, qui provoquent un changement de comportement, c'est-à-dire une modification des échanges externes.

Evidemment, le signal physiologique ne change pas au cours de la vie, mais le comportement provoqué par ce signal évolue beaucoup, notamment avec la connaissance du milieu acquise avec le temps. Ainsi, le jeune bébé ne peut faire que ce que son état de maturation lui permet : bouger et pleurer de manière désordonnée. Quelques mois plus tard, son expression changera quand il reconnaîtra à proximité des objets comme le biberon. L'enfant et l'adulte, capables de se déplacer, organiseront leur activité pour se nourrir, et d'autant mieux qu'ils connaîtront bien leur environnement. Ainsi, dans les SNC évolués utilisant le schéma P-R-A, bien que provoqué par un signal unique, le comportement peut varier de manière infinie car il dépend, chez l'adulte, de l'ensemble des connaissances acquises.

La seconde interaction est dans l'autre sens, de l'extérieur vers l'intérieur,. Ce sont les réactions de l'organisme à l'environnement. Dans ce cas, il s'agit de comportements et d'actions provoqués par le milieu, soit plus généralement de modifications des échanges internes consécutifs à l'action de l'environnement sur l'organisme.

Les exemples les plus simples peuvent être pris parmi les réflexes physiologiques. Ainsi, la baisse de la température extérieure produit une réaction au niveau des muscles horripilateurs de la peau, la chair de poule, puis de l'ensemble du système moteur, le frisson. Ces deux actions contractent des muscles et produisent donc de la chaleur. Les échanges internes, consommation de glucose et d'oxygène, sont modifiés par les échanges thermiques externes entre l'organisme et le milieu.

L'interaction peut être plus complexe, quand l'action du milieu produit directement un comportement moteur. L'exemple type est la réaction de retrait provoquée par un stimulus douloureux. Ce réflexe est observable dans tout le règne animal, jusques et y compris chez l'homme. L'expérience classique de la grenouille décérébrée dont on trempe une patte dans de l'acide montre que le comportement de retrait peut être complexe, même sans intervention de structures associatives.



Figure 54 : la double boucle de l'organisme

L'organisme est figuré avec ses deux voies d'échanges liées au niveau biologique. Les échanges couvrent tous les aspects du maintien en activité physiologique de l'organisme.

L'organisme, avec les spécificités de son organisation biologique, apparaît ainsi comme le pivot de l'interaction entre les deux systèmes d'échanges dont il fait partie, l'un externe avec l'environnement, l'autre interne à cause de la nature biologique de son organisation.

L'existence et le fonctionnement simultané de ces deux voies d'échange forment une double boucle (voir figure 54). Cette double boucle dans les échanges de l'organisme permet le couplage de ceux-ci, et par conséquent l'expression des effets en retour du milieu sur l'organisme.

13.2. LA DOUBLE BOUCLE DU SNC AU SEIN DE L'ORGANISME

Le SNC établit ses rapports avec l'organisme, dont il fait partie intégrante, au moyen de deux ensembles de structures qui jouent le rôle d'interfaces : l'une motrice et l'autre perceptive. On trouve, côté action, les voies et les structures motrices et, côté perception, les structures perceptives associées aux centres thalamiques (voir figures 34 et 48). Entre les aires corticales perceptives (ouïe, vue parole, ...) et les aires motrices, les aires associatives occupent une position centrale et constituent un chemin de liaison et de

communication grâce auquel les objets mentaux abstraits vont exercer leur influence sur le comportement.

L'organisation anatomique fonctionnelle du SNC se superpose au schéma général de fonctionnement cognitif, perception-représentation-action. La cognition est centrale et s'articule entre les perceptions et les actions. Les représentations abstraites de ces aires sont en position de jouer leur *rôle régulateur sur le comportement*, en modulant les réactions induites par les perceptions dans l'ensemble du SNC.

Les organismes évolués sont dotés de voies de perception internes, dites proprioceptives, qui procurent à l'individu la capacité de percevoir certains effets de l'activité de son système nerveux. C'est notamment le cas pour l'appareil locomoteur puisqu'il existe des capteurs dans les muscles et les articulations. Les aires motrices volontaires commandent l'appareil locomoteur, et produisent donc, en plus du mouvement mécanique, des modifications de la perception des positions relatives des segments du corps. Ces voies proprioceptives forment un premier chemin de circulation des signaux en boucle du SNC sur lui-même. Avec ce cheminement des flux, la boucle passe à l'intérieur de l'organisme.

Par ailleurs, les actions traduites par l'appareil locomoteur provoquent des modifications de l'environnement, plus ou moins importantes, dont certaines ont une traduction au travers des différentes voies de perception extéroceptives : odorat, toucher, vue, audition, goût. Ces voies extéroceptives forment un second chemin de circulation des signaux en boucle du SNC sur lui-même. Cette fois, la boucle passe à l'extérieur de l'organisme (voir figures 55 et 56).

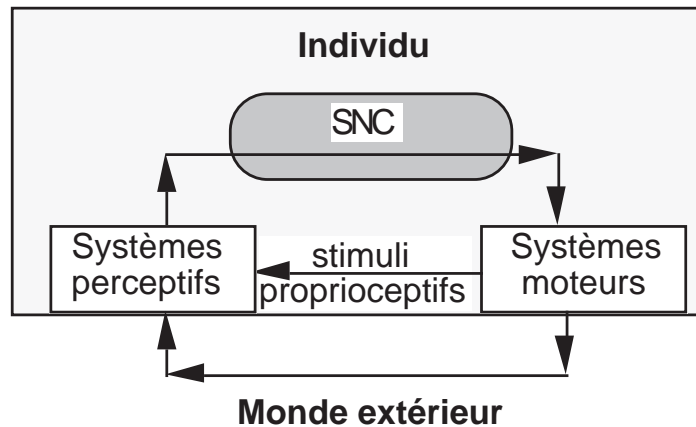


Figure 55 : Les voies des échanges de l'individu avec son environnement

Les échanges entre un individu et son environnement peuvent être vus comme une suite d'actions et réactions. Les chemins parcourus par les événements issus de cette chaîne d'actions et de réactions sont figurés. On voit par exemple qu'une action issue du SNC produit d'une part des événements dans l'environnement, lesquels provoquent une stimulation des systèmes perceptifs extéroceptifs, et d'autre part des événements internes via les voies de la sensibilité proprioceptive. Ces deux voies simultanées forment une double boucle entre le SNC, l'organisme et son environnement.

Ces deux flux d'information sont actifs simultanément. Il existe ainsi une double boucle entre le SNC, l'organisme et son environnement. Cette double boucle a sa partie commune, centrale, dans le SNC. Le SNC conserve dans ce schéma la place centrale, incontournable, que lui accordent toutes les disciplines qui étudient l'être humain : médecine, psychologie, sociologie, philosophie, etc.

Il existe ainsi une double boucle entre le SNC et l'ensemble organisme/milieu extérieur qui forme, par rapport au SNC, son environnement. Ce double bouclage couple les réactions internes (de l'organisme) et les réactions externes (du milieu) dans le SNC. Il joue un rôle fondamental dans l'apprentissage (voir plus loin la section 13.4).

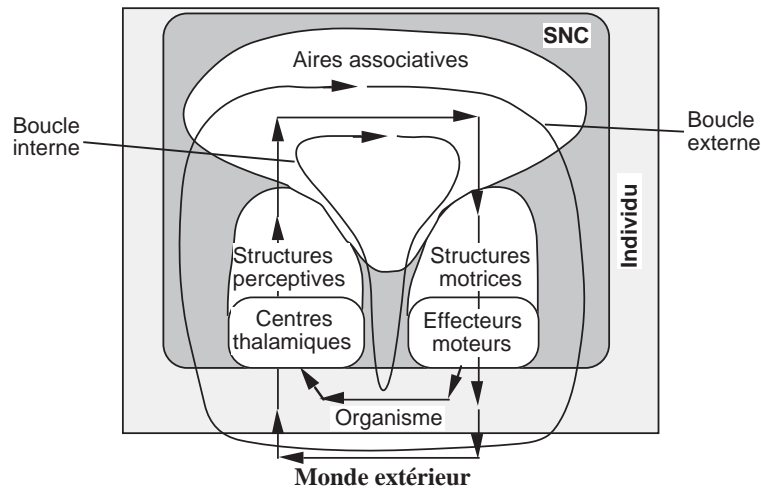


Figure 56 : La double boucle du SNC et de l'organisme

Cette figure reprend la double boucle que forme le SNC avec l'organisme et le monde extérieur. Les détails des structures impliquées dans les voies sont figurés, notamment pour montrer le rôle central des centres d'intégration thalamiques.

Dans ces imbrications répétées en poupées russes, *chaque élément considère ce qui l'entoure comme son environnement*. Autrement dit, pour chaque élément, on peut définir tout ce qui est au-delà de ses interfaces (c'est-à-dire ce qui n'est pas lui) comme le milieu extérieur de cet élément. Ainsi, pour le SNC, le corps biologique de l'individu fait partie du milieu extérieur. Pour le corps biologique, qui englobe le SNC, le milieu extérieur se situe au-delà des limites charnelles de ce corps.

Toutefois, quelle que soit la structure choisie comme référence pour l'analyse, on retrouve le schéma en double boucle dans l'organisation de ses échanges : il y a une boucle interne et une boucle externe, et la structure étudiée est le point de couplage entre ces deux flux d'échanges.

13.3. LA DOUBLE BOUCLE AU SEIN DU SNC

Le schéma en double boucle se répète aussi à l'intérieur du SNC, notamment pour chacun des objets mentaux. Mais les aires associatives, parce qu'elles sont le moins directement connectées au monde extérieur,

sont le siège du circuit en double boucle le plus interne de l'organisme (voir figure 57). Les deux boucles utilisent des voies internes au SNC, mais les flux empruntent des chemins différents.

D'une part, l'hippocampe est une voie de circulation des flux en boucle qui permet la résonance via un chemin interne au SNC, phénomène utilisé pour stabiliser durablement la structure des objets mentaux. Ce point a été exposé dans la section 10 sur la mémoire à court et à long terme. Le maintien des flux au moyen de leur circulation dans l'hippocampe permet le passage des représentations de la mémoire à court terme vers la mémoire à long terme.

D'autre part, à l'intérieur des aires associatives du SNC, les signaux sont des flux d'activation homogènes dont l'origine est le plus souvent l'activation d'objets mentaux eux-mêmes localisés dans les aires associatives. Il y a propagation des flux d'activations d'objets mentaux vers d'autres objets mentaux, d'abord au sein des blocs, puis de ceux-ci à tout le réseau. En conséquence, pour les objets mentaux abstraits qui forment la catégorie dominante dans les aires associatives, la source principale des flux qui provoquent leur activation est simplement l'activation des autres blocs d'objets mentaux. L'activation d'objets mentaux abstraits entraîne l'activation d'autres objets mentaux abstraits.

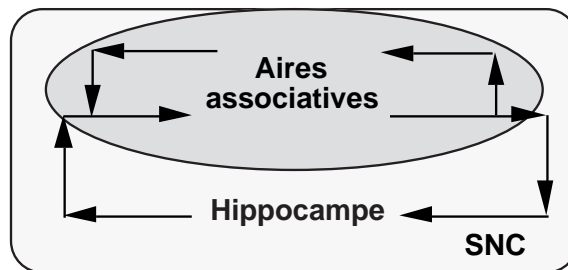


Figure 57 : La double boucle dans le SNC

Une des voies de circulation des flux est la boucle hippocampique, dont le rôle a été étudié avec le passage des souvenirs de la mémoire à court terme vers la mémoire à long terme. La seconde voie de circulation est l'ensemble formé par les aires associatives elles-mêmes. En effet, les flux d'activation produits par chaque bloc activé se propagent normalement à travers tout le réseau.

13.3.1. les différentes origines des signaux

Du point de vue de l'observateur, il existe trois catégories objectivables de l'origine des signaux circulant dans le SNC, que nous aborderons dans le même ordre que l'étude des doubles boucles.

La première catégorie recouvre les perceptions du monde extérieur. L'origine des signaux est alors à la fois externe au SNC et externe à l'organisme. Ces flux constituent toutes les perceptions du milieu extérieur (visuelles, olfactives, gustatives, tactiles, etc.), que celles-ci soient conscientes ou pas.

La seconde catégorie recouvre les perceptions proprioceptives. L'origine des signaux est alors externe au SNC et interne à l'organisme. C'est le cas des perceptions liées au système locomoteur ou à l'état interne de l'organisme (faim, soif, etc.).

La troisième catégorie recouvre l'activité du SNC. L'origine des signaux est alors interne au SNC et donc aussi interne à l'organisme. C'est le cas des flux circulant dans le SNC par simple propagation de l'activation dans le réseau.

Pour les objets mentaux des aires associatives, la situation est très différente : il n'y a *pas de distinction possible entre l'origine des flux*. Dans les aires associatives, la seule catégorie existante est la troisième : tous les flux sont des flux circulants entre objets mentaux abstraits.

En effet, la signification associée à un objet mental tient uniquement à la *position topographique* de celui-ci au sein de l'organisation du SNC, c'est-à-dire à la localisation de ses afférences et efférences (voir le détail de ce point au § 3.5). Les aires sensibles traitent des signaux a priori sensitifs, les aires auditives des signaux a priori auditifs, les aires motrices des signaux moteurs, etc., mais la forme des flux est toujours la même et les phénomènes en jeu toujours identiques.

Ainsi, la situation topographique de chaque cellule dans le réseau est la clé qui permet de *décoder le sens des signaux* traités en leur attribuant une signification particulière. Dans une partition de musique, les symboles inscrits en début de portée, et qui constituent l'armature, jouent le même rôle ; sans eux, on ne peut déchiffrer la partition.

13.3.2. la matérialité apparente des objets mentaux activés

Il résulte de cette organisation spécifique des aires associatives que, dans le SNC, actions, émotions et perceptions sont intimement mêlées. Plus concrètement, à cause de cette confusion des origines, rêves, imaginations et perceptions ont tous une même matérialité apparente, puisque la représentation des uns et des autres utilise un unique support, en l'espèce des flux organisés en doubles boucles, elles-mêmes chaînées entre elles. Les rêves et les constructions mentales imaginaires, qui sont d'origine interne au SNC et qui n'ont pas d'équivalent dans le monde réel, ont le même statut de réalité que les autres perceptions, d'origine externe et ancrées dans le réel.

Du fait de l'unicité de forme des flux d'activations, *l'origine interne ou externe* des signaux traités dans les aires associatives est pour le SNC impossible à déterminer sans une *référence extérieure*. Celle-ci est généralement apportée par la boucle des échanges externe à l'organisme qui permet un couplage sur l'environnement.

Le rêve est une expérience concrète de ce phénomène. Vue, sensibilité, émotions, audition sont fortement sollicitées, et produisent parfois un sentiment de réalité extrêmement intense pour le rêveur. Dans ces cas de rêves plausibles, au réveil, le sujet peut rester perplexe quant à la réalité de son expérience. Ce qui montre bien que, pour le SNC, les représentations mises en jeu ne portent pas de marque de leur origine, prise dans le monde réel ou le monde interne des objets mentaux.

Même les signaux moteurs peuvent n'avoir une existence qu'au sein du SNC, et c'est encore le cas pendant le rêve. Les zones motrices sont actives, mais pas le système locomoteur qui est globalement inhibé par une structure basse du tronc cérébral, à l'exception des yeux.

En pathologie psychiatrique, on appelle les perceptions sans objet des hallucinations ; elles sont souvent auditives. Ces perceptions sans objet confirment ce phénomène essentiel : les représentations mentales sont une réalité par elles-mêmes. En effet, pour les malades hallucinés, l'existence de ces bruits ou voix qu'ils croient entendre ne fait aucun doute. De plus, à la différence du rêve, l'état de conscience des malades n'est pas altéré, et cela renforce pour eux le caractère réel de leurs perceptions. Avec des aires associatives fortement développées et connectées à toutes les modalités perceptives et au système moteur, le SNC est ainsi normalement prédisposé à développer un circuit en double boucle interne en son sein.

Récepteur et mémorisateur des événements, le SNC en est aussi le générateur. En conséquence, fixant spontanément des images de tout événement, il fabrique des souvenirs et des représentations de tout, y compris de ses propres productions : rêveries, pensées, connaissances abstraites, perceptions, idées, émotions,... tout y passe. Pour les aires associatives, tout est objet mental et chaînes d'objets mentaux.

Pourtant, bien qu'il soit le producteur d'une activité dont il est réceptacle final, le SNC ne tourne pas en roue libre. L'ensemble des structures biologiques, qui le supportent physiologiquement et l'abreuvent en signaux, *forcent aussi son couplage sur l'extérieur*, organisme et monde environnant (voir figure 58 et section suivante).

Pour ce qui concerne les acquisitions, le couplage repose d'abord sur les perceptions et la double boucle des objets mentaux, ce qui couvre les liens entre le SNC et son environnement extérieur à l'organisme. La double boucle entre les échanges externes et internes renforce le couplage du SNC sur son environnement par sa composante physiologique, qui recouvre la partie de l'environnement du SNC interne à l'organisme.

Sur cette matière essentiellement malléable qu'est un SNC capable d'apprentissage, la permanence des perceptions et les interactions répétées de ce SNC avec ce qui est pour lui son environnement, impriment une représentation de l'organisme et du monde.

13.4. LA DOUBLE BOUCLE COMME SUPPORT DE L'APPRENTISSAGE

13.4.1. l'invariance de la double boucle

Notre examen des structures nerveuses a commencé au plus bas avec la cellule. Il s'est poursuivi jusqu'à considérer le SNC comme partie de l'organisme, lui-même au sein d'un environnement. En termes d'échelle, il y a eu un saut de plusieurs ordres de grandeur, tant dans les dimensions des structures étudiées que dans le nombre d'éléments dans les ensembles considérés. Le petit repère des niveaux d'échelle en témoigne, nous sommes passés du niveau 1 au niveau 10.

Pourtant, la *structure en double boucle* a constitué un outil qui a été conservé quel que soit le niveau d'échelle lors de l'examen du fonctionnement du système : c'est un *élément structurel invariant*. Et la permanence récurrente de cette structure remplit une fonction

fondamentale : elle assure la transmission du couplage des différents éléments mis en jeu.

Les effets de l'organisation des flux en boucles, c'est-à-dire des représentations internes, apparaissent sous la forme du comportement. Nous avons montré plus haut que les objets mentaux permettent le contrôle du comportement car ils occupent une position centrale entre les perceptions et l'action.

À l'inverse, cette même organisation des flux d'échanges en boucles permet de répercuter l'adaptation du comportement sur chacun des composants d'une boucle. La mesure de l'adaptation se fait sur la régularité des échanges entre la structure et son environnement. Un comportement adapté se traduit par des flux réguliers propres à stabiliser la structure qui lui a donné naissance. Au contraire, un comportement inadapté se traduit par des flux irréguliers qui conduisent à la destruction progressive de la structure initiale.

La structure en double boucle permet donc d'établir, dans les deux sens indispensables à l'apprentissage et malgré les différences de niveau d'échelle, la liaison entre le comportement de l'individu, lequel s'inscrit dans la réalité extérieure, et la double boucle de cellules qui est la représentation interne de cette réalité extérieure. La structure en double boucle est à la fois le support de l'expression du comportement à partir de la représentation, et le support de la représentation, acquise à partir de l'interaction avec le réel.

13.4.2. l'apprentissage par couplage au réel

Appliquons ces conceptions au problème de l'apprentissage, lequel met classiquement en jeu un contenu à apprendre et une sanction qui confirme l'acquisition. Pour le SNC, le réel permanent du monde est à la fois la source d'informations (le contenu de l'apprentissage) et ce qui sanctionne la validité des acquis (le superviseur). Les deux types d'information, contenu et sanction, ont une même source et partagent un unique support : la perception du réel environnant.

Comment le SNC sépare-t-il la double signification du signal perçu, et comment peut-il utiliser ces deux aspects des perceptions pour fixer un apprentissage ? Dans notre conception, la superposition des doubles boucles permet de résoudre cette difficulté par le phénomène de couplage.

Les doubles boucles internes et externes ont pour lieu d'intersection le SNC, et tout particulièrement les aires associatives, où s'établit le couplage entre les représentations et le monde environnant. L'invariance de l'organisation des échanges permet à ce couplage de se faire sentir à tous les niveaux d'échelle des systèmes mis en jeu : la double boucle est le vecteur du couplage entre l'organisme et son environnement, jusqu'au niveau le plus intime du fonctionnement du SNC (voir figure 58).

A chaque niveau d'échelle, l'organisation des échanges en double boucle assure le couplage entre la structure étudiée et son environnement (défini, rappelons-le, comme ce qui n'est pas homogène à elle). Comme cette organisation existe au niveau le plus élevé, celui de l'individu global en rapport avec un monde réel, puis à chaque niveau intermédiaire jusqu'au niveau le plus bas, celui de la cellule, les contraintes du couplage sont reproduites aussi à chaque niveau. Ainsi, la permanence du réel et de son organisation structurée, inflexible et indépendante, imprime sa marque sur les représentations élémentaires qui sont acquises au début, puis sur toutes les représentations du réel construites par le SNC à partir des signaux perçus.

L'invariance de la structure en double boucle permet finalement la liaison entre l'objet mental, représentation du réel, et la valeur fonctionnelle associée à cet objet mental (cf. § 11.2) par-delà les obstacles liés aux différences d'échelle.

Au niveau le plus bas, le mécanisme de ce couplage est la *superposition des flux bouclés* entre le SNC, l'organisme et le milieu extérieur, superposition rendue possible par l'organisation en double boucle des flux d'échanges dans et autour du SNC.

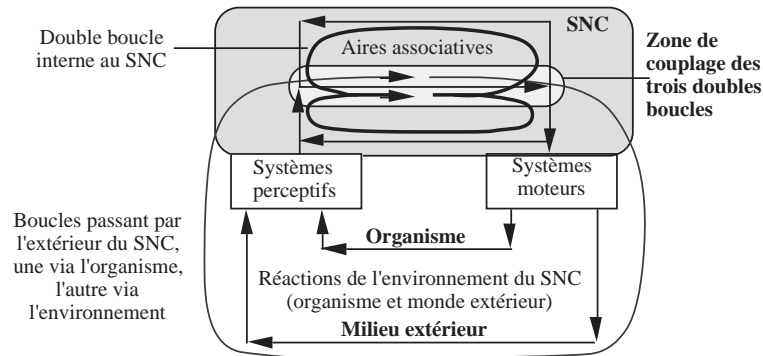


Figure 58 : Les doubles boucles dans l'organisme et le couplage sur l'extérieur

La figure montre le couplage des aires associatives sur leur environnement constitué de l'organisme de l'individu, lui-même intégré dans son milieu. Le couplage est assuré par la superposition des représentations internes sur les perceptions et les réactions de l'environnement du SNC (organisme et milieu).

Expliquons ce couplage au moyen d'une illustration concrète, par exemple le cas de l'enfant jeune qui n'a pas d'expérience du «très chaud». Il se livre alors, souvent quand il est seul, à des manœuvres qui le conduisent à des brûlures. L'expérience est douloureuse, mais le plus souvent unique, et peu d'enfants ont échappé à cette formation. Les signes qui caractérisent habituellement une chose chaude (fumée, couleur rouge, flamme, etc...) sont une perception du réel extérieur et forment le contenu de l'acquisition. La sensation douloureuse de brûlure, qui est un signal désagréable en provenance de l'organisme, sanctionne un comportement inadapté.

La double signification des signaux se superpose pour le SNC au couplage entre la perception externe (la fumée) et la perception de l'état interne de l'organisme (la douleur). Ainsi, le SNC peut utiliser le contenu et la sanction imposés par le monde environnant. La signification générale «danger, à éviter» fournie par l'organisme peut alors être associée aux perceptions du milieu extérieur, dont elle devient la valeur fonctionnelle. Quand cette liaison est très forte, les conduites de retrait physiologiquement inscrites dans l'organisme peuvent être activées par des perceptions associées à l'objet dangereux, par exemple la perception d'objets ressemblants ou qui annoncent l'apparition de cet objet auquel est rattaché le signal

«danger». C'est une extension, qualifiée de cognitive, de la signification de la représentation, témoin de la construction d'un bloc d'objets mentaux.

Il est important de noter que ce processus d'acquisition existe spontanément dès que le développement anatomique du SNC permet l'établissement des échanges. L'être humain est ainsi amené dès son plus jeune âge à apprendre le fonctionnement de son corps, puis de son environnement immédiat. Par la suite, ses moyens d'accès au réel se diversifiant, la représentation qu'il en construit s'enrichit.

Mais la capacité de développer des objets mentaux abstraits est un avantage adaptatif majeur largement pondéré par un défaut fondamental. En effet, plus les objets mentaux sont abstraits et essentiellement associatifs, plus ils peuvent échapper au contrôle et aux contraintes du monde réel, notamment en s'appuyant exclusivement sur des représentations abstraites déjà existantes. L'avantage considérable apporté par des aires associatives étendues, lesquelles permettent une représentation élargie du monde, est contrebalancé par l'affaiblissement de la correspondance entre cette représentation et son objet. Par le simple effet des mécanismes de constitution des objets mentaux, le couplage entre une représentation et le réel diminue quand les objets mentaux sont très abstraits.

L'être humain a ainsi la capacité physiologique de construire et de manipuler une représentation abstraite du monde très riche, fine et variée. Mais il peut aussi facilement développer une représentation de l'environnement plus ou moins découplée de la réalité, représentation dans laquelle certaines associations, certaines émotions, finissent par prendre une place prépondérante. Dans les sociétés modernes, la baisse des contraintes vitales pesant sur chaque individu peut favoriser cette relative perte de couplage.

La question de la place et de l'expression de cette représentation du monde environnant dans le comportement de l'individu sera traitée dans la section 14 avec les effets du filtrage généralisé.

13.4.3. la double boucle, la loi de Hebb et l'apprentissage

Le modèle en double boucle développé dans cet ouvrage, et dont l'étendue est maintenant entièrement révélée, est une utilisation stricte mais complète de la loi de Hebb. Il en donne une double lecture qui, bien que contenue dans cette proposition, n'avait pas encore été faite ni explicitée.


La première lecture est celle qui conduit des caractéristiques de la cellule au comportement du réseau. Par-dessus cette conception classique, la double lecture permet de comprendre les deux sens des effets en retour discutés précédemment : de la cellule vers le réseau, et du réseau vers la cellule. C'est ce que résume cette section.

La construction progressive des objets mentaux et de leurs propriétés a révélé les effets attendus de l'activité des neurones sur le comportement du réseau (voir sections 2 à 5.2). Les mécanismes exposés sont des propriétés émergentes du réseau apparaissant dès que les conditions de nombre et d'organisation sont réunies. Parmi les propriétés émergentes moins classiques de ces réseaux, on notera la tendance globale à la stabilité des échanges qui définit l'adaptation, et la définition d'un coût structurel de fonctionnement qui conduit à la notion de réorganisation spontanée des blocs d'objets mentaux.

Dans l'autre sens, c'est-à-dire du réseau vers le neurone, c'est encore la loi de Hebb qui intervient via le confinement fonctionnel des flux au travers de l'objet mental. L'objet mental, chemin fonctionnel des flux, est le support des effets en retour de l'organisation générale de l'organisme et de son fonctionnement global sur chacune des cellules. L'objet mental est une structure fonctionnelle qui, par aiguillage dynamique, modifie la structure du réseau en favorisant préférentiellement les chemins parcourus, normalement renforcés par l'application de la loi de Hebb aux cellules activées.

La double boucle apparaît ainsi comme le support du lien qui permet de passer de la structure à la fonction et au comportement, c'est-à-dire du structurel au fonctionnel. De même, la double boucle est aussi le moyen de traduire le comportement au niveau des cellules, c'est-à-dire le passage du fonctionnel au structurel. Elle est ainsi un élément fondamental de l'apprentissage, et lie directement cette capacité du réseau au critère global qu'est l'adaptation de l'individu vis-à-vis de son environnement.

14. LE FILTRAGE, LA PERCEPTION ET LE COMPORTEMENT

	<p><i>Niveau d'échelle 11 : les rapports entre objets mentaux et activité.</i></p>
<p>11</p>	<p>On observe maintenant un individu et, prenant en compte les propriétés des objets mentaux, on éclaire les rapports entre représentations acquises et comportement.</p>

Cette section développe la notion de filtre cognitif, qui regroupe les filtres perceptifs, rattachés aux perceptions, et les filtres relatifs aux actions, que nous appellerons des capacités. Les filtres cognitifs sont une application des mécanismes d'activation et d'interférence entre objets mentaux à l'étude du comportement de l'individu.

Pour les perceptions, le filtrage est un mécanisme qui favorise la reconnaissance immédiate des multiples stimuli, regroupés en représentations connues, et donc utilisables. Pour la capacité d'actions motrices, caractéristique majeure du règne animal, le filtrage permet le choix d'une action en fonction d'un résultat attendu ou souhaité. La construction symétrique de celle des filtres perceptifs, c'est-à-dire l'activation par un objet mental abstrait unique d'un ensemble d'actions complexes, a déjà été examinée avec la construction des blocs d'actions homogènes et les séquences d'actions motrices (voir sections 10.1 et 11.4).

Le comportement, et plus généralement l'adaptation de l'individu à son environnement, apparaissent comme des expressions de ces mécanismes de filtrage entre objets mentaux.

14.1. DÉFINITION

Tout d'abord, qu'est-ce qu'un *filtre* ? Assez simplement, un filtre désigne tout dispositif qui fournit un signal de sortie image du signal d'entrée, mais qui *accentue* certaines caractéristiques du signal d'entrée tout en *affaiblissant* d'autres. En optique, un filtre est souvent une plaque colorée qui accentue sa couleur en empêchant la propagation des autres couleurs ; en électronique, un filtre est un circuit doté d'une fréquence propre qui

renforce celle-ci et les fréquences voisines. Dans le SNC, chaque objet mental peut remplir ce rôle. En effet, chaque double boucle se comporte comme un résonateur/attracteur. Elle renforce son signal propre et inhibe les autres.

14.2. LES EFFETS ÉLÉMENTAIRES

Le décalage de phase, décrit section 2.1.3 puis utilisé dans la section 5, est à l'origine des trois principaux effets de filtrage observés avec les objets mentaux,

- le renforcement, ou interaction positive par concordance de phase
- l'inhibition, ou interaction négative par opposition de phase
- l'activation/inhibition contextuelle, où ces deux interactions coexistent simultanément.

Dans tous ces phénomènes, le facteur déterminant est le décalage temporel entre les signaux. Si ce décalage est favorable, il y a renforcement, sinon, il y a inhibition.

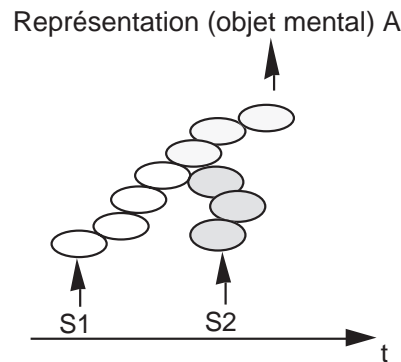


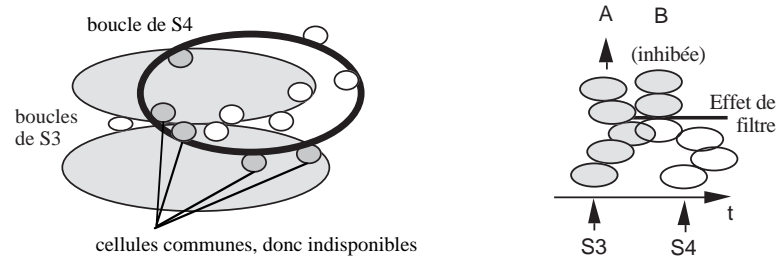
Figure 59 : Effet de filtrage : renforcement

Le signal S2 renforce l'activation de la représentation A, elle-même activée par le signal S1, c'est une concordance de phase.

Le renforcement entre objets mentaux correspond, au facteur d'échelle près, au mécanisme de renforcement par concordance de phase au niveau cellulaire. Dans la figure 59, un premier signal S1 active une chaîne de boucles qui entraîne l'activation de la chaîne de l'objet mental A. Le second signal S2 renforce cette activation. Il s'agit d'un renforcement par

concordance de phase. L'équivalent musical serait réalisé par deux sons ayant des harmoniques communes. Celles-ci seraient alors renforcées et le son paraîtrait plus fort à l'oreille.

L'*inhibition entre objets mentaux* est, comme le renforcement, la transposition au niveau des blocs de l'inhibition au niveau cellulaire ou des objets mentaux. Le mécanisme est analogue à une compétition vis-à-vis d'une ressource commune. Dans le cas des objets mentaux, la ressource est la cellule ou la boucle en tant qu'élément de transfert du signal dans la boucle.



(a) détail de la compétition sur ressources (b) inhibition de S4 par S3

Figure 60 : Effet de filtrage : inhibition

Le schéma (a) détaille le mécanisme de l'inhibition entre objets mentaux par consommation de la ressource commune constituée par l'ensemble des cellules. La compétition joue au niveau des cellules communes aux circuits de S3 et de S4. Celles qui sont recrutées et activées dans un circuit de S3 ne sont pas immédiatement disponibles pour un circuit de S4. L'inhibition apparaît donc pour une plage de valeurs du décalage temporel entre les signaux S3 et S4. Quand ce décalage diminue, l'inhibition se produit.

Le schéma (b) montre l'inhibition de la représentation B au profit de la représentation A, à cause de l'utilisation d'une portion de boucle commune. Au niveau de cette portion commune, les cellules déjà recrutées ne sont plus excitables et le circuit ne peut être établi.

Dans la figure 60a, une partie des cellules de la chaîne S4 sont déjà recrutées et activées dans les boucles de la chaîne S3 avec les contraintes de phase de l'objet mental S3. Si les phases des chaînes S3 et S4 ne concordent pas, c'est le cas de l'inhibition, ces cellules ne peuvent donc plus participer à la chaîne S4 au moment où le signal devrait se propager dans cet autre

circuit. L'activation de la chaîne liée au signal S4 est donc interrompue. L'objet mental correspondant à la représentation B n'est pas activé. Le signal S3 a filtré l'effet habituel du signal S4, l'activation de la représentation B (voir figure 60b).

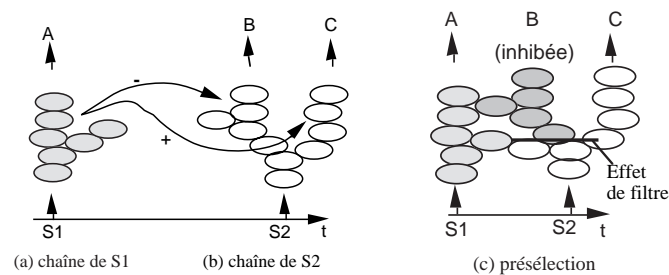


Figure 61 : Effet de filtrage : activation contextuelle

Le signal S1 active la représentation A, le signal S2 les représentations B et C. Les imbrications entre les chaînes S1 et S2 touchent négativement la représentation B, et positivement la représentation C. De ce fait, si les signaux S1 et S2 sont proches, la représentation C est activée préférentiellement. Il s'agit d'une inactivation contextuelle de B dans le contexte créé par S1.

La *présélection contextuelle* est une application dans un espace plus étendu du filtrage, lequel joue alors un rôle d'aiguillage. Du fait de l'étendue des arbres axonaux des cellules, les effets de renforcement et d'inhibition liés au décalage de phase peuvent être différents selon la distance qui sépare deux chaînes. Cela peut se produire quand des chaînes ont plusieurs points d'interaction, qui peuvent être à la fois positifs et négatifs. Sur le schéma de la figure 61, les imbrications positives entre les chaînes S1 et S2 touchent surtout la représentation C, les interférences négatives la représentation B. De ce fait, si les signaux S1 et S2 sont proches dans le temps, la représentation C apparaît comme seule activée, certaines boucles ayant filtré l'activation de la représentation B. Il s'agit d'une inactivation contextuelle de B dans le contexte A.

La structure des objets mentaux, associée au chaînage, produit un effet de filtrage (renforcement ou inhibition) sur les informations transmises le long des chaînes d'objets mentaux. Ce filtrage constitue une aide importante à la perception car il améliore les performances des capacités de reconnaissance et d'association à partir des perceptions.

14.3. LE FILTRAGE PERCEPTIF

A travers des exemples, cette section montre le rôle de filtre des objets mentaux dans la perception au cours de situations quotidiennes.

Pour illustrer le filtrage, nous commencerons par les effets de la construction d'un filtre perceptif, et la musique sera une fois de plus un bon exemple car ce n'est pas un environnement naturel. Tout doit donc être acquis : manipulation puis maîtrise de l'instrument, solfège, connaissance des partitions.

La familiarisation avec l'instrument est probablement la plus aisée à imaginer pour les non musiciens. Il faut d'abord en apprendre les éléments et le fonctionnement. Le piano est assez simple, avec son clavier unique et répétitif. Mais l'accordéon ou l'orgue paraissent déjà plus difficiles. Et que dire des instruments sans repères comme le violon ou le trombone. Dans tous les cas, il faut apprendre touches, positions de doigts et enchaînements pour produire des mélodies.

Mais une fois cet apprentissage fait, il en reste un autre, plus important encore, celui qui permet d'associer un effet sonore particulier à une technique spéciale dans la manière d'utiliser l'instrument. Dans un conservatoire, il y aura alors ceux qui disposent d'une grande palette d'acquis (le groupe des grands), et les autres pour lesquels la palette est plus étroite (le groupe des petits). Et la différence entre ces deux groupes illustre bien l'effet de filtre induit par les acquis.

Imaginons une classe où le professeur joue un bref morceau et cherche à le faire reproduire par les deux groupes d'élèves. Quand un grand écoute, il utilise toutes ses capacités, c'est-à-dire toutes les nuances de sa palette, et saisit donc un grand nombre des subtilités de l'interprétation du professeur. Ensuite, quand il joue ce qu'il a entendu, il utilise encore sa palette et restitue le morceau avec beaucoup de fidélité.

Un petit suivra exactement la même démarche, c'est-à-dire qu'il fera de son mieux. Mais comme son filtre de perception est plus grossier, certains aspects du jeu du professeur passeront inaperçus à son oreille. Ensuite, lors de l'exécution, comme les associations entre effets sonores et techniques sont incomplètes, la restitution sera de moins bonne qualité. Au pire, un petit sera incapable de restituer ce qu'il aura entendu.

Ainsi, la pratique de l'instrument et la connaissance de ses possibilités sonores rend la perception d'un morceau plus fine, ce qui permet ensuite une reproduction plus fidèle.

Le phénomène est comparable avec la lecture de la musique écrite, et on observe alors d'autres différences de performance entre les grands et les petits.

Les grands sont largement familiarisés avec le solfège : ils reconnaissent vite et fidèlement les différents symboles utilisés pour les notes et les rythmes. Les petits sont parfois hésitants sur les notes qui sont un peu loin de la portée habituellement parcourue, ou sur la tonalité indiquée en début de portée.

Au moment de lire une nouvelle partition, cette différence dans la quantité et la maîtrise des acquis, pourtant purement symboliques puisqu'il ne s'agit que de solfège, se traduira par une nettement moins bonne performance des petits en termes de vitesse et de fidélité.

Là encore, le filtre constitué par les acquis participe à la perception de l'environnement et change les performances dans la reconnaissance des éléments de celui-ci. Un filtre plus riche, plus varié, dont les objets sont plus indépendants les uns des autres, permet une perception plus fine de l'environnement.

Après avoir examiné les effets produits par des acquis différents chez deux groupes d'individus, nous allons maintenant nous intéresser à une autre forme d'interaction filtre-environnement avec le cas de la modification d'un filtre perceptif devenu inadapté.

L'exemple de la musique n'est plus adéquat pour illustrer cette phase particulière de l'utilisation des filtres, simplement parce que les partitions et les instruments ne changent pas, ou très lentement. Le cas de l'expérience vécue par une personne revenant, après un voyage de quelques mois, dans sa ville d'origine sera plus éclairante sur ce phénomène d'inadaptation, puis de mise à jour du filtre perceptif.

La situation se développe en trois temps. Premier temps, l'individu vit normalement dans sa ville, et il constitue progressivement un filtre perceptif correspondant à cet environnement et à son mode de vie. Il cherche notamment à percevoir dans son environnement les signaux

importants pour lui, qui sont bien différents selon qu'il sera commerçant ou guitariste de jazz, adolescent ou père de famille, inspecteur de police ou jardinier. De toutes façons, il organise ses moyens de perception afin de faciliter et d'améliorer le repérage et le décryptage des événements de son environnement qui lui sont importants ou vitaux.

Deuxième temps, cet individu est amené à vivre pendant plusieurs mois à l'étranger, dans des conditions fort différentes, par exemple parce qu'il participe à un projet humanitaire dans un ashram indien. Notre homme va constituer un autre filtre correspondant à ce nouvel environnement et à ses nouvelles conditions de vie. Les signaux importants vont être différents, les moyens à utiliser pour obtenir un résultat donné, le comportement à adopter pour se faire comprendre aussi, beaucoup de choses vont changer.

Et pendant ce temps, son filtre perceptif antérieur n'est d'une part plus directement utilisé, et d'autre part sa ville d'origine continue sa propre évolution. Pour cet homme, le point important est que, dans son SNC, les objets mentaux continuent d'interférer entre eux. Petit à petit, le filtre construit au début, dans sa ville, est modifié par son expérience quotidienne, qui a forcément un poids beaucoup plus important que ses souvenirs. Le nouveau filtre devrait être relativement indépendant du premier puisque globalement, tout est différent. Tout est différent, certes, mais c'est la même personne qui vit les deux situations, et elle n'a qu'un seul SNC. L'expérience de l'ashram déteint ainsi forcément sur le fonctionnement initial de son SNC.

Troisième temps, le retour à la ville natale après son temps en ashram. Notre individu s'attend bien à trouver des choses un peu modifiées, mais il a aussi, à cause de son expérience passée, la certitude de bien connaître cette vie. Plus encore, il sait y être adapté, c'est-à-dire qu'il sait être capable d'en percevoir les signaux et d'en décoder la signification.

Le plus souvent, ce genre de retour est pénible car il y a bien reconnaissance de la ville et du milieu en général, mais la reconnaissance est imparfaite, de moins bonne qualité qu'avant le voyage. Effectivement, la ville a changé, mais surtout le filtre de notre individu a été modifié par son voyage et son changement d'environnement. Il a besoin de consacrer alors du temps pour repérer les différences, comprendre les changements, en un mot mettre à jour son filtre perceptif. Une fois cette opération réalisée, les repères sont redevenus fonctionnels, et le sentiment d'adaptation reviendra aussi.

Parfois, l'expérience est assez longue et donne un sentiment plus douloureux. Le malaise ressenti correspond à ce décalage entre le filtre et le milieu. Et il dure tant que se prolonge cette inadéquation à l'environnement. En cas d'incapacité à réduire suffisamment ce décalage, le sentiment de malaise peut devenir intense et l'individu peut avoir envie de repartir.

14.4. LES CAPACITÉS

Un individu agit sur son environnement avec l'ensemble de ses moyens, notamment au travers de son appareil locomoteur. Une capacité est définie comme l'association de la représentation d'une action possible de l'individu avec celle du résultat induit.

La capacité est un élément fondamental dans la chaîne qui lie les perceptions aux représentations et à l'action de l'individu dans l'environnement, c'est-à-dire à son comportement. Elle permet une anticipation des conséquences des actions, et offre donc à l'individu un critère de choix pour son comportement. En effet, la capacité n'est autre que la valeur fonctionnelle en rapport avec l'image interne d'une action, organisée dans un bloc (voir section 11.2). La valeur fonctionnelle est la dimension résultat dans le bloc rattaché à l'action. Ainsi dotés des images d'un résultat et d'une action, ces blocs permettent de sélectionner une action à partir de sa valeur fonctionnelle.

Par opposition aux filtres perceptifs qui fixent une représentation des comportements du milieu environnant sous forme de séquences d'événements regroupées, les capacités fixent une image des comportements de l'organisme et du SNC avec les résultats associés. La capacité relève donc d'une organisation structurelle différente de celle du filtre perceptif dont l'équivalent côté action est la séquence temporelle motrice pilotée par un objet mental abstrait (voir section 11.3).

L'ensemble des capacités d'un individu représente donc la palette de ses actions possibles ou connues, c'est le filtre à travers lequel il peut estimer ses possibilités d'action sur l'environnement.

L'existence d'une représentation interne de l'environnement, de l'action et du résultat habituel de l'action donne aux SNC évolués une potentialité nouvelle : la possibilité de garder une trace des comportements variés en fonction de l'expérience de l'individu, puis la possibilité d'effectuer un choix entre ces différents comportements. A tout le moins, le schéma

cognitif introduit un facteur de variation considérable dans l'éventail des comportements possibles pour l'individu. Son adaptation à l'environnement, et surtout à ses variations, ne peut qu'en être améliorée.

Les critères du choix de l'action et du comportement deviennent eux aussi infiniment variés. En effet, tous les objets mentaux activés à un instant donné participent à l'orientation globale du flux d'activation, et peuvent ainsi orienter le SNC vers l'activation d'une action ou d'une autre, notamment à travers l'activation du résultat associé à celle-ci. Toutes choses égales par ailleurs, c'est en effet la puissance d'activation du résultat anticipé qui sera déterminante dans la domination d'un bloc et donc de la mise en action du comportement associé. L'activité mentale est bien le régulateur général du comportement.

14.5. ADAPTATION ET ADAPTABILITÉ

Le comportement de l'individu apparaît comme un élément d'étude particulièrement central. Le comportement est en effet à la fois l'expression de l'adaptation et l'outil grâce auquel celle-ci peut être modifiée. Il est aussi l'expression concrète de l'activité cognitive au travers du jeu des filtres perceptifs et de capacités. Enfin, les évolutions du comportement permettent d'apprécier l'adaptabilité de l'individu face à des changements de son environnement.

Précisons ces notions. Dans le cadre du réseau d'objets mentaux, l'adaptation est définie comme l'effet de la loi de Hebb à tous les niveaux jusqu'au plus élevé, celui des échanges entre le réseau et son environnement (voir sections 5.3.2, 6.3.4 et 13.4). L'adaptation se traduit par des flux d'échanges harmonieux et réguliers entre l'individu et son environnement.

L'adaptabilité désigne simplement pour un individu la possibilité de modifier son comportement, notamment à travers la modification de ses filtres cognitifs de perceptions et d'actions.

L'adaptation d'un individu sera évidemment meilleure si son filtre perceptif et son filtre des capacités sont plus fins : l'environnement sera mieux perçu et le comportement pourra être plus finement adapté.

Il nous faut insister sur le fait qu'il n'y a pas ici superposition des mécanismes et des résultats, tout comme cela a été précédemment discuté à propos de l'application de la loi de Hebb (cf § 5.3 et 6.3.4). A cause notamment de l'influence du facteur d'échelle, un mécanisme ne détermine

pas ses résultats de manière univoque. Dans le contexte de notre discussion sur l'adaptation, cela signifie que si le SNC, doté de larges potentialités cognitives, est le moyen naturellement donné aux individus pour réguler leur adaptation à l'environnement, l'unicité de l'outil ne préjuge en rien de la variété des formes de cette adaptation.

Pour terminer l'exposé de notre conception, nous illustrerons le rôle des filtres formés par les apprentissages dans le fonctionnement de l'activité mentale par un exemple concret sur les relations entre conscience, adaptation et adaptabilité.

Toute l'expérience passée de l'individu est finalement inscrite dans son système nerveux sous la forme de nombreux blocs d'objets mentaux qui constituent son filtre cognitif, filtre perceptif et de capacités, vis-à-vis du milieu. Tant que le milieu reste relativement stable, ce filtre reste bien adapté, et par là même l'individu est bien adapté à son milieu car il en reconnaît facilement les objets et les caractères, et il agit normalement en fonction de ces perceptions.

Les échanges entre l'individu et son milieu sont cohérents, le comportement est adapté, tout fonctionne bien. Les signaux du milieu sont correctement perçus, la réaction du sujet est adaptée et il n'y a pas d'action entreprise par le sujet qui fasse apparaître des signaux inhabituels de l'environnement ou des situations dangereuses pour son intégrité physique. De plus, il est capable d'agir sur le milieu de manière à satisfaire normalement ses besoins.

Quand un individu a atteint le troisième ou quatrième âge et a fort normalement perdu un peu de sa souplesse mentale¹⁶, *l'adéquation entre le filtre perceptif et l'environnement* devient une condition majeure de l'adaptation. Plus précisément encore, ce facteur conditionne le bon fonctionnement de l'activité mentale de la personne âgée, en tant que régulateur du comportement. Ce phénomène est bien connu des gériatres.

¹⁶ Rappelons que les neurones dans un cerveau humain ne se reproduisent pas, à la différence des cellules de la peau, des muscles ou du foie. Plus encore, l'ensemble du capital neuronal est établi dès les premières années de la vie et, avant la fin de l'adolescence, les neurones commencent à mourir. Dès ce moment, le capital de cellules dont dispose un individu décroît inexorablement. On comprend aisément que l'âge fasse diminuer un peu l'agilité de l'esprit.

En effet, ces médecins savent par expérience qu'on doit éviter le plus possible de modifier notablement l'environnement des personnes âgées, sous peine de précipiter leur déclin.

Avec le rôle de filtre des objets mentaux que nous avons exposé, cela s'explique facilement. Une modification profonde de l'environnement d'une personne entraîne immédiatement une inadaptation de son filtre-perceptif, celui qui lui sert à reconnaître automatiquement les éléments du milieu. Si la personne est incapable de corriger ce filtre en apprenant rapidement d'autres réactions, elle perd ses repères habituels et ne peut plus régler correctement son comportement. C'est ce que l'on constate chez les personnes âgées quand elles sont déplacées de leur milieu habituel.


Si la situation persiste, elles ne reconnaissent plus très bien les lieux ni les gens, s'égarant entre leur chambre et les toilettes, perdent les repères temporels quotidiens. La communication avec l'entourage devient déficiente car, ne reconnaissant plus les gens, les personnes âgées réitèrent ou taisent leurs demandes. Tous ces effets comportementaux, qui résultent d'un filtre perceptif inadapté, forment à l'extrême un tableau clinique appelé état confusionnel.

Dans le réseau, la mauvaise adéquation du filtre rend inadaptées les représentations anciennes qui ne sont plus activées. L'activité mentale automatique, en tant que système de régulation du comportement, s'altère à cause de cette déficience dans la perception des stimuli. L'ensemble de l'activité mentale se désorganise, ce qui entraîne encore plus de désordre et d'inadaptation.

Ainsi, dans le modèle des objets mentaux, *l'adaptation* est le fruit de la capacité à apprendre et à mettre en œuvre des représentations du milieu afin de constituer un bon filtre cognitif. *L'adaptabilité* désigne alors la capacité du SNC à modifier ce filtre cognitif quand le milieu se modifie. Le bon fonctionnement du régulateur de l'activité qu'est la conscience dépend de la qualité du couplage entre le milieu et la représentation du milieu, c'est-à-dire en fait de la bonne adéquation du filtre perceptif par rapport au milieu environnant.

15. LE PHÉNOMÈNE DE L'ACTIVITÉ MENTALE COGNITIVE AUTOMATIQUE

L'ensemble des outils dont nous disposons est maintenant suffisamment étoffé pour que puisse être abordée une autre caractéristique majeure des SNC évolués, l'activité mentale cognitive automatique. Nous aborderons ce phénomène comme la partie visible la plus superficielle des activités cognitives spontanées du SNC, dont les classiques (l'oubli, l'abstraction, la généralisation, les fonctions logiques) ont été étudiées dans les sections 6, 7 et 8, et les filtres, qui sont spécifiques du modèle à objets mentaux, dans les sections 10, 13 et 14.

	<p><i>Niveau d'échelle 12 : l'activité mentale cognitive automatique.</i></p> <p>On étudie le rôle des filtres perceptifs dans le comportement de l'individu. L'activité mentale cognitive automatique est le régulateur du comportement.</p>
<p>12</p>	

Dans notre modèle de fonctionnement des SNC, l'activité mentale cognitive apparaît comme un phénomène automatique, émergeant sous la forme de l'activation spontanée d'objets mentaux abstraits en réponse aux flux d'échanges entre le SNC et son environnement, lequel, rappelons-le, comprend aussi l'organisme qui abrite ce même SNC.

Le rôle de l'activité mentale cognitive est de réguler le comportement de l'organisme afin que les flux d'échanges soient harmonieux et réguliers. Les contraintes générales de stabilité, issues de la loi de Hebb, qui pèsent sur le fonctionnement du réseau et de l'organisme, sont répercutées et intégrées dans les actions de l'organisme sur son environnement.

Le mécanisme de fonctionnement par lequel s'exerce la régulation est le schéma cognitif classique, perception-représentation-action, placé au sein d'un flux d'échanges bouclé entre le SNC, siège des activités cognitives, et l'environnement qui est le siège et le lieu d'expression des contraintes extérieures à l'organisme (voir sections 10 et 13).

Ainsi, le phénomène de conscience apparaît dès qu'il existe des objets mentaux abstraits et une activité mentale cognitive automatique s'appuyant sur des représentations internes, lesquelles sont la trace de toutes les dimensions des événements qui font l'histoire de l'individu : perceptions, actions, souvenirs, réactions, besoins, états affectifs, environnement, etc... L'activité mentale cognitive automatique est susceptible de présenter, comme les blocs d'objets mentaux dont elle est issue, plusieurs niveaux d'activation qualitativement assimilables à des états de conscience différents. La conscience d'un individu adulte éveillé correspondrait alors à l'activité mentale cognitive automatique à l'état de veille.

Nous devons souligner le fait que l'activité mentale cognitive automatique est une propriété émergente des SNC liée à la conjonction de plusieurs facteurs.

1- D'une part, il doit exister dans l'organisme des interfaces sensibles et effectrices, et l'organisation physiologique des flux d'échanges doit placer le SNC au centre des relations entre ces interfaces. De plus, le SNC doit recevoir des informations de l'organisme lui-même ainsi que du milieu environnant celui-ci. Avec cette double contrainte, le SNC est susceptible de développer une relation en double boucle avec son environnement soumise à un couplage.

2- Ensuite, il doit exister dans le SNC un mécanisme d'apprentissage qui laisse des traces matérielles durables dans l'organisation interne des flux d'information. Ainsi, les interactions avec le milieu impriment des images persistantes dans le SNC sous la forme de structures en doubles boucles qui sont des objets mentaux.

3- De plus, le SNC doit être doté de structures associatives qui interconnectent les différentes modalités perceptives et qui soient suffisamment vastes pour que puissent se développer :

a/ des objets mentaux abstraits en grand nombre ;

b/ une activité mentale automatique auto-entretenu autour de ces représentations acquises.

4- Enfin, les interfaces de l'organisme imposent un couplage rétro-actif entre l'activation des représentations et les perceptions du milieu environnant. L'activité du SNC produit des effets sur l'environnement, notamment par le système locomoteur, et ces effets ont une action en retour sur l'organisme qui est transmise au SNC.

Nous rapprochons tous ces points en un ensemble homogène mais, bien qu'ils soient tous présents dans les systèmes biologiques, ces facteurs sont relativement indépendants. En effet, dans des simulations informatiques sans portée cognitive, on peut négliger tel ou tel facteur sans supprimer pour autant tout phénomène d'apprentissage. C'est la raison pour laquelle nous insistons sur l'importance de leur conjonction pour expliquer les effets cognitifs de la capacité d'apprentissage des SNC évolués.

Finalement, les objets mentaux se développent automatiquement dans un SNC dès lors qu'existent les propriétés cellulaires synaptiques nécessaires à l'apprentissage, des résonateurs en double boucle et un couplage en double boucle entre le SNC et le milieu extérieur. S'il est doté d'aires associatives suffisamment vastes (rappelons que la *quantité* est nécessaire à l'apparition de cette activité cognitive automatique qui est *qualitativement nouvelle*), un tel SNC forme une véritable machine à apprendre qui fabrique automatiquement des représentations de tous les événements qui lui parviennent. Dans ce SNC, les objets mentaux ont, en plus de leur fonction première de support des connaissances, une fonction de filtrage qui explique que l'activité mentale cognitive puisse réguler le comportement.

15.1. LES FILTRES GÉNÉRALISÉS

Bien que cela paraisse paradoxal, la plupart des objets mentaux sont inconscients, c'est-à-dire *inaccessibles à la conscience*. C'est un des effets de la répétition des stimuli. Nous avons vu avec le piano que les acquis avaient tendance à s'effacer du champ de la conscience quand ils sont régulièrement pratiqués. En fait, ce phénomène de *passage progressif à l'arrière-plan* débute avec la vie même, dès que la machine à apprendre construit des représentations à la suite des relations de l'individu avec son milieu.

Ainsi la maîtrise progressive du corps acquise avec la maturation psychomotrice fait disparaître la question de la posture du champ de la conscience de l'enfant et a fortiori de l'adulte. Sauf bien entendu pour les activités qui utilisent spécifiquement cette capacité comme la gymnastique, la danse ou l'escalade, par exemple. Il en va de même pour toutes nos autres connaissances, tant sur nous-mêmes que sur notre environnement. L'individu constitue ainsi, petit à petit et dès son plus jeune âge, un grand nombre de représentations-filtres qui passent à l'arrière-plan, au-delà du champ de la conscience.

Ces objets mentaux, bien qu'ils soient masqués à la conscience, n'en perdent pas pour autant leur rôle actif de filtre. Ils améliorent les performances du SNC dans la reconnaissance des événements habituels du milieu, mais en même temps ils tendent à masquer les événements inhabituels. L'identification des événements est d'autant plus rapide qu'ils sont déjà connus et qu'ils surgissent dans leur contexte normal. La reconnaissance d'un objet usuel mais non déterminé est déjà plus difficile. Parfois, des signaux connus survenant dans des contextes anormaux ne sont pas correctement identifiés, ou seulement avec retard.

Certains domaines de la perception illustrent bien ce phénomène, la vision notamment. Il est d'autant plus facile de voir les choses qu'on les connaît par avance. Plus encore, de savoir qu'une image est présente impose parfois sa reconnaissance. C'est ce que l'on observe couramment avec le phénomène des illusions d'optique (cf sections 6.2 et 9).

Avec les mois et les années, la multiplication des expériences quotidiennes produit une accumulation phénoménale d'objets mentaux, lesquels s'organisent en filtres de plus en plus discrets et intégrés au fonctionnement normal du SNC. Les événements du monde extérieur activent ainsi, avec la maturation de l'individu, des chaînes d'objets mentaux abstraits de plus en plus nombreuses et plus riches. L'individu apprend à connaître son environnement, il s'en construit une représentation et, aidé par l'effet de filtre induit par cette représentation, il peut en reconnaître les signaux courants sans aucun effort conscient (cf sections 6.3 et 14.3).

Chaque objet mental de la chaîne joue un rôle de filtre, c'est-à-dire qu'il renforce la représentation qu'il véhicule, et affaiblit donc les autres relativement à celle-là. Ainsi, ne parviennent aux couches les plus supérieures que les stimuli qui ont évoqué un écho, via un ou plusieurs objets mentaux, dans chacune des couches traversées. Il en résulte que *des connaissances variées et des expériences multiples donnent à l'individu des filtres plus larges* pour appréhender les événements perceptibles. La perception du monde d'un tel individu en sera plus riche et plus variée, et il n'en aura probablement pas conscience. Pas plus qu'il n'aura conscience du caractère abstrait, expérimental, affectif ou cognitif des filtres mis en jeu. En effet, répétons-le, toutes les représentations sont homogènes dans les aires associatives, quel que soit le type d'événement à leur origine : émotion (affect), ou son (perception du monde extérieur), ou encore mouvement (perception intérieure proprioceptive).

15.2. L'ACTIVATION SIMULTANÉE DES FILTRES

A chaque instant, toutes les représentations du SNC sont soumises à la stimulation de l'ensemble des sensations, ainsi qu'à leurs actions réciproques d'activation au travers des flux internes au réseau. En effet, à l'origine de l'activation d'un objet mental abstrait peuvent se trouver soit un événement en provenance du monde extérieur tangible, soit un stimulus en provenance du corps, ou encore un signal propagé par une chaîne d'objets mentaux.

Les sources d'activation sont fort nombreuses, ne serait-ce qu'à travers les voies extéroceptives qui fonctionnent en permanence. De nombreux objets mentaux sont ainsi activés simultanément dans chacune des aires liées à la perception. Ces représentations sont complètement indépendantes au niveau des interfaces (c'est-à-dire dans les systèmes de perception et d'action), mais interagissent de plus en plus quand on s'approche des niveaux abstraits, notamment dans les aires associatives.

Du fait de cette simultanéité d'activation, l'effet de filtre des représentations va s'accroître car, parmi les chaînes activées, celles qui forment un ensemble cohérent vont activer plus fortement les blocs auxquels elles appartiennent. En quelque sorte, toutes les connaissances constituées entrant en résonance et s'activant les unes les autres forment un filtre complexe, espace de convergence de l'ensemble des stimuli de l'instant.

Le SNC est ainsi le siège d'une multitude de systèmes cohérents qui s'éveillent, se développent, s'affaiblissent en permanence, entraînant et subissant à la fois des modifications internes et l'influence de l'environnement. Tous les aspects de la réalité sont pris en compte : affectivité, perceptions externes (ouïe, vue, odorat, toucher, goût), perceptions proprioceptives de l'appareil locomoteur, perceptions proprioceptives des organes, traduction de l'état neuro-végétatif (intégrée par l'hypothalamus et le thalamus) diffusée au cortex, etc.

Chacun de ces ensembles s'alimente sur une partie plus ou moins vaste des perceptions du moment, et ceci de manière dynamique dans le temps. Ainsi, une interprétation cognitive d'un signal auditif se verra renforcée dans le temps si la suite du message perçu de l'extérieur est conforme à la séquence anticipée par l'interprétation. C'est le phénomène d'activation des blocs (cf section 5.3.5), développé à propos de la valeur fonctionnelle (cf section 11.2) et des filtres perceptifs (cf section 14.3)

Plus généralement, par les répétitions qu'elles entraînent, la permanence et la stabilité des perceptions en provenance du monde extérieur provoquent une reconnaissance systématique et rapide. On pourrait assimiler cela à la création d'un filtre perceptif de fond standard, permanent et stable. Ce filtre est un ensemble d'objets mentaux fortement associés par des interférences répétées. L'ensemble, ainsi rendu cohérent, est automatiquement activé en bloc dès que sont présents plusieurs éléments appartenant au fond. Les événements non permanents sont perçus en avant-plan sur ce fond qui progressivement quitte le champ de la conscience.

15.3. L'ÉTAT DE VEILLE, LE BOUCLAGE AUTO-REPRODUCTEUR ET LES CONTRAINTES DU MILIEU

Nous exposons dans cette section l'articulation et l'imbrication des facteurs qui permettent l'apparition de la conscience en état de veille : couplage, conflits et bouclage.

L'activité mentale cognitive automatique est la partie la plus abstraite du fonctionnement du réseau soumis à ces contraintes, et la conscience la partie de cette activité visible en surface de l'extérieur, c'est-à-dire l'ensemble des blocs d'objets mentaux avec les niveaux d'activation les plus élevés.

15.3.1 les contraintes de couplage

Spontanément, une fois constitué puis coupé de son environnement, le fonctionnement du SNC est idéal. En effet, sans flux d'échanges avec l'extérieur, le SNC est entièrement soumis à la seule tendance générale à la stabilité découlant de la loi de Hebb (voir section 5.3.2). Avec cette unique contrainte, le SNC tend donc à se réorganiser selon le critère de compatibilité intrinsèque.

Le régime d'échanges d'un SNC ainsi coupé du monde serait caractérisé par l'absence de perturbations extérieures, ce qui conduirait inmanquablement à la sélection d'une image interne globalement non conflictuelle et stable. Au terme de cette évolution, tous les blocs seraient compatibles, le parallélisme des activations totalement harmonieux et la stabilité du réseau définitivement établie. Mais le couplage au réel serait aussi définitivement perdu, écartant par là toute possibilité d'adaptation par une régulation adéquate du comportement.

En réalité, et heureusement pour l'adaptation des êtres humains, ce fonctionnement idéal est contrarié, empêché même, par les relations qu'impose l'organisation biologique au SNC. Celui-ci est en effet intégré dans plusieurs circuits d'échanges bouclés avec son environnement (voir section 13 et figure 58). Le premier circuit passe par l'organisme, qui a son organisation et ses contraintes propres, de caractère biologique, ainsi qu'un rythme particulier. Le second circuit passe par le milieu extérieur, qui est organisé selon des lois différentes, issues de tous les niveaux d'organisation allant de la physique à la politique. Ces flux d'échanges apportent des stimuli qui provoquent dans le réseau des perturbations et des activations diverses et, par répétition, la fixation de représentations de ces événements.

Il y a donc naturellement des conflits entre objets mentaux, images plus ou moins fidèles de ces événements. Par exemple, les conflits entre les besoins issus de l'organisme et les lois sociales du milieu environnant sont très fréquents, ne serait-ce que sur le point du délai de satisfaction d'un besoin. L'organisme cherche en effet la satisfaction immédiate du besoin, alors que la société impose la plupart du temps des règles et un retard à cette satisfaction. En sus de ces conflits d'origine externe, il peut y avoir des conflits entre objets mentaux liés au fonctionnement du réseau et aux interférences entre représentations.

Sans conflits, l'activité mentale perd la plupart de ses attributs cognitifs : plus de réorganisation des blocs ni d'association d'idées, plus d'abstraction, plus de choix. Sans contraintes de couplage, le réseau ne fixe aucun apprentissage et ne peut exprimer ses potentialités d'adaptation de l'individu par régulation de son comportement : il n'y a plus d'activité cognitive.

Au contraire, dans un réseau soumis à ces contraintes de couplage et d'échanges, il y a apprentissage, développement de tous les mécanismes cognitifs et expression de ceux-ci au travers de la régulation du comportement. L'activité mentale cognitive automatique est la partie la plus abstraite du fonctionnement du réseau ainsi placé en position centrale dans les différents circuits d'échange en double boucle.

15.3.2 le bouclage auto-reproducteur

Par ailleurs, les boucles et circuits de bouclage internes favorisent l'activation de proche en proche d'un très grand nombre d'objets mentaux,

avec un foisonnement infini d'associations multiples. Les activations des objets mentaux s'enchaînent automatiquement, de manière libre, au gré des liens créés par les expériences passées de l'individu et des stimuli liés à son état actuel. Quand le nombre d'objets mentaux et d'associations est élevé, il y a beaucoup d'objets mentaux activés simultanément, et il y a une grande activité auto-entretenu, même si le niveau d'activation moyen de chaque bloc est insuffisant pour qu'aucun ne domine complètement le comportement.

Le SNC, notamment dans ses aires associatives, est le support d'une activité spontanément auto-entretenu. L'activité mentale, c'est-à-dire le résultat de l'activation des objets mentaux, est bouclée sur elle-même et produit de l'activité mentale. Celle-ci est indispensable au maintien de la composante structurelle des objets mentaux qui doit être utilisée pour rester fonctionnelle. Ainsi, l'activité mentale est indispensable au fonctionnement du réseau et à l'activité mentale elle-même.

La conscience est la résultante abstraite de cette activité, c'est-à-dire visible au niveau des blocs abstraits, et exprimée à l'extérieur au travers du comportement de l'individu. Celui-ci est l'expression de la domination de l'activité mentale automatique par un ensemble de blocs d'objets mentaux dont les niveaux d'activation sont régulièrement plus élevés que les autres (cf section 6.3.4).

15.3.3 l'état de veille

A travers les interfaces de l'organisme (vue, toucher, ...), le couplage du SNC sur le milieu environnant incite le SNC à suivre l'organisation de la réalité du monde extérieur en activant les représentations associées. Ainsi, pendant la phase d'éveil, l'activité du SNC est-elle très contrainte par l'ensemble des perceptions produites par l'environnement qui active les filtres correspondants.

L'expression des contraintes imposées par le monde réel est très variée. A l'échelle des êtres humains, la permanence des objets réels, la permanence et la validité des liens de causalité, la conservation de la matière, des mouvements, les symétries, le poids, ... toutes ces expériences perceptibles fondent une représentation solide du monde. Comme les individus de l'espèce humaine partagent les mêmes moyens perceptifs, et donc les mêmes perceptions élémentaires, ils partagent aussi une même expérience physique du monde. Dotés de SNC comparables et éduqués dans une culture commune, les êtres humains sont naturellement amenés à construire

une représentation du monde globalement partagée. Evoluant dans un même environnement, ils en partagent les rythmes et les influences. Et, pour chaque individu, l'ensemble de ces perceptions impose des chaînes et des séquences, contraint l'activité mentale dans un espace d'associations restreint.

L'activité mentale à l'état de veille est ainsi guidée par les perceptions dans un enchaînement de représentations cohérent avec l'environnement. Cette référence fournie par le monde extérieur apporte le couplage des représentations et permet l'adaptation de l'individu à son environnement. Les objets mentaux acquis par expérience du milieu filtrent les perceptions et font apparaître les signaux nécessaires à des échanges suffisamment harmonieux pour assurer la survie de l'individu dans son milieu.

15.4. ECONOMIE PSYCHOLOGIQUE ET RÉGULATION DE L'ACTIVITÉ

Cette section se propose d'indiquer rapidement les bases d'une approche économique, fondée sur la notion de coût d'organisation, pour l'analyse du comportement et de la régulation des activités. Les conséquences d'une telle analyse sont fort vastes, elles dépassent largement le cadre de cet ouvrage et doivent faire l'objet d'une autre étude.

Nous donnerons une brève justification de l'approche économique, puis un exposé rapide des perspectives ainsi ouvertes sur les notions de coût psychologique et de dynamique psychologique de la régulation du comportement.

15.4.1. une approche économique

Il y a deux raisons pour considérer le problème de la régulation des activités selon une approche économique, l'une propre aux objets mentaux, l'autre indépendante de cette conception.

La première justification découle directement du modèle à objets mentaux. En effet, la loi de Hebb a permis de définir un coût d'organisation, lequel est apparu comme un obstacle à la tendance à la stabilité. Nous avons montré que plusieurs mécanismes d'organisation des représentations, dont la constitution et l'évolution des blocs d'objets mentaux, s'appuient sur ce facteur. Dans une approche économique, l'adaptation de l'individu en général peut aussi être décrite comme un régime d'échange de moindre coût entre lui et son environnement, ce moindre coût étant l'expression de la tendance du SNC à la régularité.

Disposer d'une mesure de coût permet déjà de construire une analyse économique, mais il existe en plus une justification indépendante du modèle : l'écoulement du temps. En effet, toute action est consommatrice de temps, et le choix de la satisfaction d'un besoin impose le plus souvent de retarder la satisfaction d'un autre. Ainsi, très rapidement au cours de sa vie, l'individu se trouve en situation de pénurie de temps. La pénurie vis-à-vis de la ressource temps engendre des conflits dans le choix des activités, conflits que l'individu doit gérer. Or gérer des ressources en situation de pénurie relative est la définition même d'une économie.

Mais considérer qu'on se trouve devant un problème de nature économique ne suffit pas à expliciter les choix entre activités, il faut se poser la question du critère de choix d'une activité au dépend d'une autre. Nous ne reviendrons pas sur les mécanismes du choix, expliqués dans la section 7.4 et qui s'appuient notamment sur la valeur fonctionnelle (cf § 11.2) d'une action.

15.4.2. les coûts psychologiques

En réalité, la seule valeur fonctionnelle est insuffisante pour épuiser la question et il faut considérer une conception plus générale du coût psychologique. Le critère que nous proposons est le bilan des recettes et dépenses rattaché à une activité, dans lequel la valeur fonctionnelle apparaît comme recette, et où sont intégrés d'autres facteurs selon l'origine des recettes et dépenses. Ce bilan permet notamment d'expliquer la motivation et la dynamique psychologique dans la pratique d'une activité nouvelle. Le concept de bilan est une superstructure par rapport au modèle des objets mentaux, et il sera le thème d'un développement dans un autre ouvrage.

Pour illustrer le problème et notre approche, nous utiliserons un exemple concret qui laisse entrevoir l'objet d'une approche psycho-économique du comportement et de la régulation des activités : le bilan économique de l'emploi du temps.

Dans la perspective du bilan des recettes et dépenses rattaché à une activité, les activités à bilan positif doivent normalement prendre le pas sur celles à bilan négatif, dès lors qu'on connaît ce bilan. Naturellement, l'expérience fournit l'occasion d'avoir une idée précise du bilan d'une activité. Et en bon gestionnaire, averti par l'expérience passée, personne n'hésitera à choisir l'activité avec le meilleur bilan, toutes choses égales par ailleurs !

Malheureusement, ce n'est pas toujours aussi simple. Parfois se rajoutent des contraintes externes sous la forme de considérations qui n'ont pas de lien direct avec l'activité et qui interfèrent avec les choix. Supposons par exemple que Mr Bon soit invité à un dîner semi-professionnel qui ne le tente guère. A contre-cœur il finit par y aller après s'être raisonné par un argument du genre «*Mme Michu est assommante mais Mr Dupont ne me pardonnerait jamais mon absence à une telle occasion* ». Un élément de contexte a emporté son choix malgré un bilan estimé négatif du temps consacré à l'activité.

Chaque jour, chacun fait face à de nombreuses contraintes dans ses activités, et fait de nombreux choix de compromis. Et parfois, de fil en aiguille, le bilan des activités de la journée, c'est-à-dire le bilan de son emploi du temps quotidien, en arrive à se détériorer.

15.4.3. la dynamique psychologique

Il est maintenant clair que le critère de choix d'une activité, qui se verra retenue aux dépens d'une autre, repose sur une estimation du bilan de l'activité, dont la valeur fonctionnelle est l'aspect pratique du bénéfice attendu. La régulation des choix elle-même est assurée automatiquement par l'activité mentale au travers des mécanismes d'activation des blocs d'objets mentaux cognitifs.

Le choix est un phénomène instantané, répété à chaque seconde, dont le mécanisme repose sur la domination d'un bloc sur les autres par son niveau d'activation (cf section 7.4). La dynamique psychologique aborde la question des options à long terme, c'est-à-dire les composantes permanentes qui dirigent le comportement sur de longues périodes. Plus que de choix en temps réel dans les rapports de l'individu à son environnement, il s'agit du filtre cognitif de fond sur lequel s'effectuent ces choix, en d'autres termes de la coloration de fond de l'activité mentale (cf 15.2). La dynamique psychologique est ainsi fondamentalement différente de celle du choix.

En termes d'objets mentaux, la différence entre ces deux questions est définie de manière précise. Le choix est régi par un équilibre entre blocs d'objets mentaux abstraits à un moment donné. La dynamique psychologique concerne la modification des blocs qui forment les filtres

cognitifs et s'intéresse au rapport de forces entre ces blocs, reflété par le coût de cette opération de réorganisation du réseau.

Comme précédemment, utilisons l'artifice d'un exemple pour illustrer la démarche économique à laquelle conduit le modèle à objets mentaux.

Supposons un individu, Mr X, récemment soumis à un changement d'affectation professionnelle et, du fait de cette modification importante de son environnement, relativement mal adapté à celui-ci. Une analyse économique de son bilan psycho-économique permet d'établir un constat global en trois points qui éclairent la dynamique de sa réaction à ce changement.

1- le bilan actuel.

Le coût organisationnel et fonctionnel de l'adaptation courante est connu. Il correspond au bilan recette et dépense des filtres cognitifs actuels et, puisque notre homme se sent mal adapté, ce bilan est négatif.

2- le coût estimé de l'adaptation.

Par expérience, Mr X sait que retrouver ses marques dans un nouveau service est toujours un peu long. Il est parfois même un peu difficile de trouver sa place car un nouveau venu est, d'une certaine manière, une perturbation de l'organisation ancienne. Pour lui, le travail sur ses filtres cognitifs consiste à rompre certains blocs de comportements anciens et à en créer de nouveaux. Mr X sait que le prix de son adaptation ne sera pas forcément négligeable, et il en a une estimation liée à son expérience passée, c'est -à-dire en fonction de son filtre cognitif. Le coût de la réorganisation des filtres cognitifs n'est évidemment pas connu de manière précise, mais Mr X en a une estimation personnelle, qu'il a d'ailleurs du mal à exprimer. Cette estimation teinte son filtre cognitif, et donc sa perception et ses réactions.

3- Bénéfice attendu de l'adaptation.

Sur ce point aussi, les effets du filtre cognitif sont fondamentaux. Si Mr X a une image positive de son nouvel emploi et de ses perspectives à court terme, le bénéfice attendu de l'adaptation sera important. Dans le cas contraire, ce bénéfice sera faible, voire nul ou même négatif.

La dynamique psychologique de Mr X vis-à-vis des efforts d'adaptation qu'il doit faire est directement reflétée par le rapport suivant :

$$\frac{(2) \text{ bénéfice attendu} - (1) \text{ bilan actuel}}{(3) \text{ coût estimé.}}$$

qui est de la forme recettes/dépenses. En effet, le bilan de l'adaptation actuelle vient à côté des bénéfices attendus pour donner le volet recette du changement. Le coût estimé de ce changement est le volet dépense.

Ce rapport est le bilan estimé de l'adaptation, c'est-à-dire une estimation de la rentabilité de la modification des filtres cognitifs actuels pour en créer de nouveaux. C'est ce bilan qui va gouverner sur le long terme les choix instantanés de Mr X pour toutes les activités en rapport avec cette adaptation. Le bilan psycho-économique est, au niveau de l'activité mentale générale de l'individu, l'équivalent de la valeur fonctionnelle pour une capacité.

Le cas favorable est évidemment le cas où ce rapport est positif et supérieur à 1. Dans ce cas, le fond cognitif sélectionne préférentiellement les activités qui vont dans le sens de l'adaptation car elles ont d'emblée un bilan estimé positif.

Le cas défavorable est celui dans lequel le bilan est nettement inférieur à 1. La coloration du filtre cognitif tend alors à sélectionner préférentiellement les activités qui s'opposent à l'adaptation, simplement parce que le bilan de celles qui vont dans le sens de l'adaptation ont un bilan négatif. Du fait de cette composante globale négative, les activités qui y sont rattachées subissent un handicap dans leur activation, leurs blocs sont moins dominants et elles sont ainsi moins souvent traduites dans le comportement.

Bien entendu, le choix d'une activité en fonction de son bilan et la dynamique psychologique de fond n'enlèvent rien à la nécessité de la répétition des événements pour fixer les nouveaux blocs et les nouvelles associations. La modification des chemins de circulation des flux dans le SNC repose toujours, in fine, sur des adaptations cellulaires locales en fonction de la loi de Hebb.

Du point de vue de la dynamique d'un individu, le bilan psycho-économique donne une assise solide aux différentes composantes de la motivation. Chaque élément du bilan est un facteur permettant de favoriser l'adaptation à une situation nouvelle. On remarquera que le bilan actuel (1)

est un facteur qui motive d'autant plus le changement qu'il est plus fortement négatif. De même, de forts bénéfices espérés (2) et une vision minimisée des efforts à fournir (3) sont autant de facteurs motivants. Le rôle des filtres cognitifs sur ces deux derniers points est tout à fait fondamental puisque c'est la représentation mentale cognitive qui est utilisée dans le bilan. Sont ainsi présents tous les ingrédients des sessions de motivation destinés aux employés des sociétés industrielles modernes, mais aussi ceux des opérations commerciales promotionnelles : faire miroiter de grands profits facilement obtenus. On retrouve aussi dans l'équation du bilan une explication à l'importante motivation au changement montrée par ces individus dont le bilan de l'adaptation est tellement mauvais que toute modification semble positive. Le bilan psycho-économique, qui est une extension du modèle à objets mentaux, ouvre ainsi des perspectives nouvelles sur les thérapies cognitives utilisées en psychologie clinique.

16. FONCTIONS COGNITIVES ET APPRENTISSAGE - CONCLUSION

Le modèle des objets mentaux en double boucle a ainsi permis, à partir de représentations élémentaires, de construire progressivement les mécanismes supportant les fonctions cognitives simples, puis d'aborder des aspects plus globaux de l'activité cognitive comme le filtrage perceptif.

Il faut insister sur le fait que, dans le SNC dont le modèle est la machine à objets mentaux, tous les mécanismes et phénomènes décrits sont des conséquences de la concrétisation au niveau cellulaire du mécanisme de l'apprentissage représenté par la loi de Hebb.

Le modèle en double boucle associe ainsi au niveau le plus profond le phénomène d'apprentissage et les fonctions cognitives dans tous leurs aspects, y compris la régulation du comportement de l'individu.

16.1. LA MACHINE À OBJETS MENTAUX

Dans la machine à objets mentaux, la mise en œuvre de la loi de Hebb fonde la capacité d'apprentissage initiale des SNC et, avec la double boucle, elle conduit à l'apparition de fonctions cognitives comme propriétés émergentes du réseau. Mais les fonctions cognitives sont seulement des potentialités du SNC, qui ont besoin de plusieurs autres facteurs, en plus de cette capacité d'apprentissage, pour se révéler et développer leurs effets sur l'adaptation de l'individu.

16.1.1. le modèle biologique

Le modèle des objets mentaux est directement inspiré de plusieurs données biologiques importantes.

Tout d'abord, le mécanisme d'apprentissage est modélisé à partir des connaissances acquises sur l'épigénèse. Ce phénomène biologique, observé notamment au niveau de la jonction neuro-musculaire, est une confirmation de l'hypothèse émise par Hebb. Elle est, dans le modèle à objets mentaux, appliquée aux neurones du SNC et conserve son caractère strictement local.

L'influence du facteur temps dans les échanges entre neurones, largement explorée et discutée par les neurophysiologistes, est marquée par les effets de phase dans les interactions entre toutes les structures considérées dans le modèle : neurones, objets mentaux, objets mentaux abstraits et blocs d'objets mentaux. Le décalage de phase induit des interactions positives ou négatives entre ces structures.

Enfin, la machine à objets mentaux reprend et exploite les boucles des flux d'échanges physiologiques entre organisme et environnement, entre SNC et organisme, entre SNC et environnement. La forme en boucle de ces circuits physiologiques induit la forme en double boucle des résonateurs dans le modèle. De plus, les flux bouclés permettent la rétroaction et le couplage entre les représentations et les stimuli qui en sont l'origine.

16.1.2.les conditions d'apparition de la machine à objets mentaux

L'étude de l'apparition des objets mentaux et du développement de leurs propriétés cognitives permet de synthétiser les conditions nécessaires à l'observation de toutes les caractéristiques de la machine à objets mentaux.

- Un prérequis essentiel est l'existence d'un effet en retour, condition banale puisque commune à toutes les situations d'apprentissage. Pour la machine à objets mentaux, cela signifie et implique l'existence de dispositifs d'interface permettant à l'organisme d'agir sur son environnement et de recevoir des signaux en provenance de celui-ci. Plus précisément encore, la réaction de l'environnement aux signaux émis par l'organisme doit avoir une traduction en des signaux tels qu'ils puissent être perçus par ce dernier.
- Le développement de représentations à caractère cognitif nécessite plus que la simple rétroaction. En effet, il faut que coexistent plusieurs circuits de bouclage, chacun passant par des voies de circulation des signaux spécifiques, et que ces circuits partagent une partie commune. Dans la machine à objets mentaux, au niveau d'échelle d'observation le plus élevé, cette partie commune est le SNC.
- Le mécanisme de l'apprentissage implanté au niveau le plus bas n'est pas indifférent à l'apparition des fonctions

cognitives. Il doit en effet permettre la complémentarité des effets structurels localisés du niveau cellulaire, avec les effets dynamiques fonctionnels émergents à des niveaux d'échelle plus élevés dans l'organisation. Cette complémentarité sera le moyen par lequel des effets dynamiques laissent une trace structurelle dans le réseau, et le vecteur des effets en retour des niveaux d'organisation élevés sur les niveaux inférieurs.

- La taille du réseau, mesurée en nombre de cellules, doit être importante afin d'entraîner des changements qualitatifs avec l'augmentation du nombre des objets mentaux. Elle doit permettre la multiplicité des chemins pour les flux internes au réseau, ainsi que le développement concurrent et simultané des objets mentaux et des blocs d'objets mentaux. L'augmentation de taille du réseau doit se faire dans le respect des contraintes portant sur l'organisation des échanges, notamment en ce qui concerne les circuits de bouclage.
- Le mécanisme de l'apprentissage doit s'appuyer sur la répétition pour fixer la trace structurelle des signaux circulant dans les boucles d'échange. Cette répétition des signaux est la sanction positive de l'environnement vis-à-vis du comportement du réseau, c'est-à-dire la preuve de l'adaptation de l'individu à son environnement.

16.1.3. les caractéristiques de l'apprentissage

Un réseau de neurones, ainsi spécifié et placé au centre des circuits d'échange entre l'organisme et l'environnement, développe des représentations internes sous forme de résonateurs en double boucle couplés avec les signaux reçus de l'environnement. Un tel réseau est une machine à fabriquer des objets mentaux, une véritable machine à apprendre.

Les caractéristiques de l'apprentissage dans cette machine à apprendre sont les suivantes.

- *L'acquisition spontanée et permanente de représentations internes opératoires* à la fois pour les perceptions, les

actions, les séquences temporelles, les conséquences des actions et perceptions. Toutes ces représentations sont acquises à partir du couplage entre les stimuli issus de l'interaction de l'organisme avec l'environnement et les stimuli issus de la perception du milieu environnant. Ces représentations sont le fruit d'un apprentissage automatique et permanent.

- *Le couplage des représentations internes et du milieu environnant.* Le milieu impose la contrainte de sa propre organisation sur les représentations et les relations entre elles dans le réseau. Les caractéristiques stables de l'environnement du réseau laissent dans celui-ci leur empreinte sous forme de représentations. Ceci vaut pour les propriétés de l'organisme (perception et représentation de soi) autant que pour les propriétés de l'environnement extérieur à l'organisme (perception et représentation de l'extérieur), ainsi que les règles gouvernant cet environnement. Enfin, le flux de signaux parvenant au réseau d'objets mentaux influence l'activité cognitive automatique et le comportement de l'individu en activant certaines des représentations.

- *L'adaptation à l'environnement par la tendance nécessaire à la stabilisation des échanges.* Pour la machine à apprendre, du fait des propriétés du réseau d'objets mentaux, le fonctionnement idéal et optimal correspond à un régime d'échange stabilisé entre le système de représentations et son environnement. Toute perturbation dans les échanges est une augmentation du coût d'organisation interne dans le système de représentations qui va entraîner une modification de celles-ci afin de retrouver un état d'équilibre.

De manière générale et indépendamment des propriétés des représentations décrites, le mécanisme cellulaire d'apprentissage mis en œuvre dans la machine à apprendre que sont les aires associatives est local, déterministe et automatique. Par contre, il est important de noter que les effets fonctionnels observés aux niveaux d'échelle supérieurs ne sont pas univoques, et parfois même opposés. Le déterminisme à petite échelle n'engendre pas un déterminisme du même ordre à plus grande échelle.

Les propriétés des objets mentaux sont bien de véritables propriétés émergentes.

16.2. OBJETS MENTAUX ET FONCTIONS COGNITIVES

Les principales conséquences cognitives du fonctionnement de cette machine à apprendre, qui fabrique automatiquement et en permanence des objets mentaux, relèvent de trois ordres.

- D'une part, la structure des objets mentaux est uniforme, elle ne dépend pas du contenu mental de chaque représentation, non plus qu'elle n'influe sur celui-ci. Une seule forme de représentation est utilisée, le résonateur en double boucle, quelque soit le type d'événement à l'origine de la création et de la stabilisation de la représentation. Un objet mental est la représentation d'un événement perçu par le SNC, *quels qu'en soient la nature et le domaine* (odeur, sensation de chaleur, position du corps, émotion, connaissance abstraite, séquence temporelle, relation de causalité ou schéma réflexe). De même, l'origine interne ou externe à l'organisme des signaux est indifférente tant à leur fixation qu'à la forme de la représentation. Il en résulte que le contenu mental associé à une représentation dépend de sa position topologique dans le réseau, c'est-à-dire de l'ensemble des relations qu'elle entretient avec les autres objets mentaux présents dans le réseau. Ainsi, les objets mentaux des lobes temporaux, pariétaux et occipital sont le siège de représentations en rapport avec la modalité sensorielle concernée (audition, tact et vue). Le langage est fort logiquement proche du carrefour de ces aires avec l'aire motrice de la frontale ascendante puisqu'il met en jeu tous ces aspects. Les aires associatives du lobe frontal ont un rôle plus abstrait, et les émotions sont probablement stockées de manière diffuse dans des niveaux plus profonds de tous ces lobes. Enfin, les objets mentaux fournissent aussi un support à la valeur fonctionnelle d'un événement. La valeur fonctionnelle est une véritable pré-évaluation des suites d'un événement en général, et une image interne du résultat potentiel d'une action, c'est-à-dire la représentation d'une capacité de l'organisme. La possibilité de fixer ce type

d'information, puis de l'utiliser pour activer des représentations spécifiques est évidemment fort utile pour la fonction de gestion du comportement finalement assurée par l'activité cognitive automatique dans la machine à apprendre.

- D'autre part, les fonctions cognitives communes (mémoire à court et à long terme, reconnaissance, abstraction, confusion, construction et instanciation de prototypes, association d'idées, choix) apparaissent comme l'expression abstraite de la *résultante d'activations simultanées* de blocs d'objets mentaux. Le modèle en double boucle propose un mécanisme explicatif pour chacune de ces fonctions, mécanisme reposant finalement sur les caractéristiques de l'apprentissage au niveau du support cellulaire.

- Enfin, une *activité cognitive automatique apparaît spontanément* dès lors qu'il y a dans le réseau une quantité d'objets mentaux abstraits suffisante, c'est-à-dire une quantité suffisante de neurones. L'activité cognitive est la *résultante d'un enchaînement d'activations successives* dans des blocs d'objets mentaux. Cette activité automatique, que nous avons associée à la conscience, régule le comportement en s'appuyant sur le filtre cognitif. Ce dernier est constitué par l'ensemble des représentations acquises, notamment pour la perception de l'environnement et la connaissance des capacités utilisables. Le comportement de l'individu est l'expression concrète de ces représentations et des fonctions cognitives, matérialisée dans l'environnement et régulée par l'activité mentale automatique. L'adaptation d'un individu se manifeste par des échanges réguliers et harmonieux avec son environnement. Son adaptabilité désigne sa capacité à modifier son filtre cognitif lorsque l'environnement change. Le fonctionnement du réseau d'objets mentaux permet de définir des coûts d'organisation qui donnent une base à la régulation économique de l'activité cognitive, et donc au choix d'un comportement.

Les rapports entre fonctions cognitives et objets mentaux sont ainsi bouclés : les objets mentaux sont le support des fonctions cognitives, lesquelles les renforcent et améliorent leur efficacité adaptative pour

l'individu. Les fonctions cognitives sont des propriétés émergentes fonctionnelles des réseaux qui sont le support des objets mentaux. Ces propriétés nouvelles confèrent aux organismes dotés de tels réseaux la capacité de construire des représentations meilleures de l'environnement, susceptibles de favoriser leur survie en régulant de manière plus fine leur comportement.

16.3. LES PERSPECTIVES DU MODÈLE À OBJETS MENTAUX

Au terme de cet ouvrage, il nous reste à replacer le modèle à objets mentaux dans le cadre général des courants de la recherche sur la modélisation des phénomènes cognitifs, et à montrer son articulation avec ces différents travaux.

16.3.1. Les points techniques acquis

Considérons d'abord les questions auxquelles le modèle construit sur les objets mentaux apporte une réponse satisfaisante sur le plan de la conception cognitive. Il s'agit de caractéristiques élémentaires du phénomène d'apprentissage dans les réseaux biologiques et de fonctions cognitives de base. Tous ces points reçoivent des explications reposant directement sur la dynamique des échanges entre les structures fonctionnelles en double boucle dans le réseau.

- L'acquisition spontanée, permanente, systématique de représentations de tous les événements existant sous forme de signaux dans le réseau. Le modèle à objets mentaux réalise ainsi une simulation très proche de la situation d'apprentissage automatique des SNC biologiques qui s'adaptent systématiquement à leur environnement.
- La capacité à construire des représentations en extrayant les propriétés permanentes de son environnement à partir de la régularité dans les échanges provoquée par cette permanence des traits. Le modèle permet ensuite une construction incrémentale des représentations sur la base des premières régularités identifiées et fixées. Le modèle à objets mentaux rend ainsi compte de la part de l'inné et de l'acquis dans la construction de ces premières représentations.

- Le passage de la perception aux concepts. L'accumulation des objets mentaux avec l'expérience au cours du temps, et la dynamique des flux dans le réseau conduisent à la constitution de blocs d'objets mentaux. La dynamique de ceux-ci permet la sélection progressive des éléments communs à des représentations d'événements proches, lesquels constituent alors la représentation d'un événement abstrait, c'est-à-dire un prototype ou un concept. Inversement, une fois constitué, l'existence de ce concept et la dynamique du réseau font que le bloc a une influence sur les perceptions en favorisant la reconnaissance des événements dont il est le prototype.
- Le support de fonctions cognitives. Plusieurs fonctions cognitives élémentaires reçoivent des explications précises de leurs mécanismes de fonctionnement. Il en est ainsi pour l'abstraction et l'oubli, l'association d'idées, le choix. Le mécanisme intime du choix d'un comportement est aussi exposé car il relève des mêmes mécanismes issus de la dynamique du réseau d'objets mentaux.
- Le support de fonctions logiques. Les opérations logiques élémentaires trouvent aussi une explication directe à partir de la dynamique des blocs d'objets mentaux. La logique booléenne et la logique des prédicats reçoivent ainsi un support fonctionnel lié au fonctionnement des réseaux.
- L'influence des représentations dans le comportement. Le modèle à objets mentaux donne une assise technique solide au modèle cognitif du fonctionnement des SNC car il établit un pont entre la représentation fonctionnelle et le neurone effecteur. Les effets simultanés et complémentaires de la loi de Hebb et de la structure fonctionnelle en double boucle sont le vecteur de cet effet émergent inhabituel du réseau vers la cellule.

Enfin, *last but not least*, le modèle à objets mentaux offre un cadre d'étude homogène pour les phénomènes cognitifs, lesquels peuvent donc être abordés simultanément et de manière cohérente. Les mécanismes de leurs éventuelles interactions sont aussi décrits par le modèle à objets mentaux.

16.3.2. Les rapports avec les modèles de l'Intelligence Artificielle

En première analyse, le modèle à objets mentaux donne un support fonctionnel à de nombreux modèles développés en Intelligence Artificielle, souvent pour modéliser des raisonnements et des structures de représentations de connaissances adaptées. Les articulations entre chacun de ces modèles et la théorie des objets mentaux sont donc autant de points techniques dont les mécanismes et la validité doivent être établis.

Le modèle de la mémoire associative est sans doute celui pour lequel l'articulation est la plus fermement établie dans cet ouvrage. De même, la modélisation des processus de pensée par la logique s'est vue renforcée par la mise en évidence de mécanismes dynamiques supportant directement les fonctions de base nécessaires dans ces modèles.

Intuitivement, les modèles des frames et des réseaux sémantiques semblent assez proches des objets mentaux et de leurs modes d'interaction. L'articulation entre ces modèles devrait donc pouvoir être précisée sans trop de difficultés. Le formalisme particulier des communications entre objets dans ces modèles abstraits impose pourtant un travail minutieux afin de montrer comment ils peuvent être directement superposables aux mécanismes existants entre objets mentaux, ou au contraire quelles adaptations sont nécessaires pour que l'articulation avec les objets mentaux devienne fonctionnelle.

Parmi les modèles cognitifs les plus modernes, les modèles à base d'instanciation de prototypes et d'objets trouveront dans la théorie des objets mentaux des arguments en leur faveur. Inversement, on peut considérer comme argument positif pour les objets mentaux le fait que ces modèles conceptuels et abstraits puissent se rattacher aussi facilement à une construction caractérisée par son origine nettement empreinte de considérations beaucoup plus matérielles et biologiques.

Un domaine de recherche particulièrement intéressant sera certainement l'étude des rapports entre la théorie des objets mentaux et les théories du langage. L'origine du langage et son apprentissage sont des champs encore très ouverts. Sur ce thème, le modèle à objets mentaux suggérerait de rechercher le rôle du volume des aires associatives d'une part, et du contrôle moteur sur la sphère laryngée d'autre part, et de leur influence conjointe enfin, comme facteurs favorisant l'apparition du langage. Dans un autre ordre d'idées, le mécanisme de couplage entre perceptions et

représentations proposé avec les objets mentaux devrait pouvoir être validé avec des représentations verbales, ouvrant ainsi des perspectives sur les bases du développement du langage.

16.3.3. Les développements du modèle à objets mentaux

Le prochain sujet que nous souhaitons aborder, en rapport avec notre formation et notre pratique professionnelle médicale, sera la généralisation du modèle des objets mentaux aux approches psychologiques.

Dans le présent ouvrage, le sujet a été introduit au chapitre 15.4 avec l'étude de la régulation du comportement par l'activité cognitive automatique. Nous avons établi l'existence d'un coût d'organisation dans le réseau qui détermine une relation entre la dynamique propre du réseau d'objets mentaux et la dynamique du comportement. Cette relation permet de fonder une approche économique du comportement qui s'appuie sur le bilan psychologique d'une action, dans lequel apparaissent naturellement la valeur fonctionnelle associée à ce bloc et le coût d'organisation de celui-ci. Le bilan psycho-économique est ainsi, au niveau de l'activité mentale générale de l'individu, l'équivalent de la valeur fonctionnelle pour une capacité.

La psycho-économie est donc une généralisation des concepts et des mécanismes à l'œuvre dans la théorie des objets mentaux, appliquée au domaine de la régulation du comportement. Avec cette approche économique, l'adaptation de l'individu est conçue comme le régime d'échange de moindre coût entre lui et son environnement, et le modèle donne une place importante aux filtres cognitifs dans le résultat du bilan économique de l'adaptation.

Cette perspective permet ainsi d'aborder, avec un support théorique qui a déjà reçu une modélisation technique, des questions comme la motivation, ou bien comme les composantes permanentes de l'individu qui déterminent son comportement sur de longues périodes, alors que ces questions relèvent habituellement du champ des sciences humaines plus que des techniques. Forts de ce modèle, nous pourrions notamment traiter des dysfonctionnements cognitifs avec leur pendant pratique, les thérapies cognitives, ainsi que des rapports entre les objets mentaux, la pensée et la volonté.

EPILOGUE

Cette leçon de piano aura finalement été l'occasion de quelques digressions.

Nous espérons que ces dernières auront convaincu de persévérer tous ceux qui se sont découragés d'atteindre jamais le plaisir de s'exprimer dans une interprétation.

Comité de Rédaction : Maurice Courtois
Giuditta Isotti Rosowsky
Christophe Lecerf
Michelle Zancarini - Fournel

Réalisation
Service Communication Paris 8
Imprimerie Offset - Université Paris 8
2, rue de la Liberté 93526 Saint-Denis Cedex