École des Hautes Études en Sciences Sociales

Diplôme de l'EHESS

Robin Meier

MODÈLES DE LA COGNITION ET LEURS EXPÉRIMENTATIONS ARTISTIQUES

Directeur d'études : Jérôme Dokic

Année universitaire 2006-2007

MODELES DE LA COGNITION ET LEURS EXPERIMENTATIONS ARTISTIQUES 1

INTRODUCTION 4

ART ET SCIENCE 4
PARCOURS PERSONNEL 5
ORGANISATION DU MEMOIRE 6

1 MODELES DE LA COGNITION 8

1.1 REPRESENTATIONS 8
1.1.1 Connexionnisme 8
1.1.2 Traitement d'information symbolique / non-symbolique 10
1.1.3 Enaction 10
1.1.4 Boucle sensorimotrice 13
1.1.5 Cognition située 17
1.1.6 Dynamicisme 20
1.1.7 Systèmes d'oscillateurs couplés 26
1.1.7.2 Les oscillateurs adaptatifs chez Port et al. 30
1.1.8 Conclusion 32
1.2 REGULATION ET CONTROLE 35
1.2.1 Cybernétique 35
1.2.2 Homéostasis 37
1.2.3 Théorie du contrôle 40
1.2.4 Indices neuro-physiologiques 41
1.2.5 Implications sociologiques 43
1.2.6 Neurones miroirs 44
1.2.7 Auto-organisation et émergence 44
1.2.7.1 Dispositif de Gordon Pask 44
1.2.7.2 Répercussions du dispositif de Pask 49
1.2.7.3 Auto-organisation 51
1.2.7.4 Mesurabilité 52
1.2.7.5 Organisation 53
1.2.7.6 Émergentisme 55
1.2.7.7 Taxonomie de l'émergence 57
1.2.7.8 Définitions 58
1.2.7.9 Imprévisibilité 58
1.2.7.10 Nouveauté 60
1.2.7.11 Irréductibilité et survenance 61
1.2.7.12 Émergence unilatérale vs. émergence bilatérale 62
1.2.7.13 Émergence synchronique vs. émergence diachronique 64
1.3 CARTES AUTO-ORGANISATRICES 66
1.3.1 Réalisation informatique d'un SOM 70
1.3.1.1 MaxMSP Jitter 70
1.3.1.2 jit.robosom 71
1.3.1.3 Utilisation et paramètres de jit.robosom 72
1.3.2 Reconnaissance vocale et classification de voyelles 75
1.3.3 Cartes de timbres 77
1.3.4 Cartes somatotopiques 80

2. EXPERIMENTATIONS ARTISTIQUES 89

2.1 FOR ALAN TURING 89
2.1.1 Neurone isolé ou transformateur 89
2.1.2 Encodage 90
2.1.3 SOM imitateur 91
2.1.4 Dynamique 91
2.1.5 Interaction 92
2.1.5.1 Grand taux d'apprentissage (TA) : mémoire courte : imitation proche 92
2.1.5.2 Petit TA: apprentissage lent : mémoire longue : imitation éloignée / pondérée 93
2.1.5.3 TA de zéro : mémoire gelée 93
2.1.5.4 TA négatif : symétrie 94

2.1.5.5 Bruit sur connexions : oubli dans la carte entière....94
2.1.5.6 Bruit sur apprentissage : erreurs de catégorisation....94
2.1.6 Contexte temporel....*95*
2.2 CARESSES DE MARQUISES ET SYMPHONIE DES MACHINES....96
2.2.1 Dispositif....*97*
2.2.2 Avatit....*101*
2.2.2.1 Filtre perceptif....101
2.2.2.2 Lignes de retard....102
2.2.2.3 Synthèse....102
2.2.2.4 Paramètres et horloge interne....103
2.2.2.5 Initialisation....104
2.2.3 Comportements....*105*
2.2.4 Résumé Dispositif Nuit Blanche....*108*
2.2.5 Symphonie des machines....*109*
2.2.6 Dispositif....*110*
2.2.7 Dispositif technique....*111*
2.2.8 Implémentation....*115*
2.2.9 Émergence dans un système multi-agent et multi-échelle....*115*
2.2.9.1 Conditions d'émergence....117
2.2.10 Art / Science : aspects sociologiques....*118*
2.2.11 Futur....*119*
2.3 FISH....120
2.3.1 Mesure des signaux émis par les poissons....*122*
2.3.2 Stimulation....*125*
2.3.3 Méthodes d'analyse....*125*
2.3.3.1 Encodage....125
2.3.3.2 Analyse....127
2.3.3.3 Modélisation de l'apprentissage de langues naturelles....128
2.3.4 Contexte et sémantique : modèles informatiques....*130*
2.3.5 Premières tentatives de communication....*133*
2.3.5.1 Poisson éléphant....134
2.3.5.2 Les poissons couteaux comme instruments....136
2.3.6 Art biotech....*140*
2.3.7 Futur....*142*

3. CONCLUSION....145

4. BIBLIOGRAPHIE....147

Introduction

Art et Science

Le présent mémoire réunit une grande part de mes intérêts apparus au long de mon évolution artistique. Fondé à l'origine sur une problématique artistique - *a priori* plutôt implicite et personnelle, ce travail a très vite été amené à tisser des liens entre la science et l'art, qui en constituent dès lors ces deux parties principales : la première, plus théorique, montre le contexte scientifique de la deuxième concernée par l'application de ces concepts, sous la forme d'expérimentations tant empiriques qu'artistiques.

Entre le souci de l'explicité dans les sciences et la part inévitablement implicite de la création dans l'art, l'aspect "exotique", qui apparaît en croisant les deux, devient moteur. L'étrangeté - la science qui à première vue, semble si différente et éloignée de l'art - devient un défi, obligeant l'artiste à créer un contexte nouveau et original afin qu'elle puisse faire sens. Ce changement de contexte met en perspective l'objet scientifique étudié et remet en question la discipline artistique.

Cette recontextualisation a des conséquences dans les deux domaines concernés : d'une part l'approche artistique permet un nouveau regard grâce à ses libertés méthodologiques et contraintes personnelles, émotionnelles, sociales..., d'autre part les sciences créent pour l'art des nouveaux outils, grâce à leurs propres méthodes et avancements.

En même temps, la mise en oeuvre des objets scientifiques dans un contexte artistique peut changer radicalement notre interaction avec ces objets. La pratique artistique, plus libre et peut-être plus intuitive, nous permet de conduire une expérimentation et vérification ludiques des outils formalisés de la science. Nous tenterons dans la suite de ce mémoire, de montrer comment une virtuosité dans le sens instrumental / musical développé en jouant sur un outil-instrument issu des recherches scientifiques peut, en retour, enrichir les disciplines concernés, grâce aux qualités concrètes, pragmatiques, corporelles et appliquées du jeu musical.

Parcours personnel

Pratiquant dès mon enfance le violon et le piano, j'ai toujours développé en parallèle mes intérêts pour la musique et la technologie. Apprenant en autodidacte la programmation informatique, j'ai commencé ma professionnalisation en musique par des études de composition instrumentale à Zurich et à Lucerne. Mes études de la composition électroacoustique au Conservatoire National de Région de Nice m'ont finalement permis de réunir mon intérêt pour la technologie avec mon parcours musical.

C'est alors à Nice que j'ai développé mes intérêts pour la lutherie informatique et **l'interactivité** en créant des dispositifs informatiques en temps réel utilisant divers capteurs et contrôleurs ainsi que pour les systèmes génératifs en écrivant des logiciels de composition algorithmique basés surtout sur des systèmes de contraintes. C'est en même temps qu'apparaît ma fascination pour les rapports entre le **naturel et l'artificiel** qui fait l'objet d'une composition pour dispositif temps-réel *Mes avions, mes rennes*.

Toujours à Nice, c'est la rencontre avec Frédéric Voisin qui m'a amené à mes premiers programmations de réseaux de neurones artificiels et qui m'a associé pendant deux ans au projet de recherche musicale *Neuromuse* du CIRM, Centre National de Création Musicale.

L'objectif de ce projet de recherche était double: "*il s'agit, d'une part, de développer des "machines" neuromimétiques destinées à accompagner les compositeurs et musiciens dans le travail de création [...] d'autre part, les aspects musicologiques de cette recherche amènent à étudier et comparer différents concepts et objets musicaux (rythme, formes, structures) sous leurs aspects naturels, que ceux artificiels, immatériels et culturels.*"[1]

Finalement, ces recherches, mon activité en tant que compositeur ainsi que mes connaissances techniques m'ont amené à réaliser plusieurs oeuvres musicales et

[1] Extrait de la présentation du projet Neuromuse par Frédéric Voisin sur http://www.neuromuse.org

installatives ainsi qu'à exercer une activité professionnelle de tuteur en collaborant avec des compositeurs de musique instrumentale pour la réalisation d'oeuvres mixtes instrumentale et électronique au sein de plusieurs institutions[1].

Organisation du mémoire

Le choix des sujets abordés dans la première partie est lié à mes intérêts artistiques et naît principalement de la nécessité pour l'artiste de créer et de connaître ses outils et méthodes. Le but de cette partie est de mettre en évidence à la fois un contexte scientifique dans lequel s'inscrivent les différentes oeuvres décrites dans la deuxième partie du mémoire, ainsi que, plus concrètement, les observations et recherches scientifiques qui sont recontextualisées dans une pratique artistique.

Ainsi sont abordés différents types de représentations afin d'inscrire mon travail dans une conception de la cognition comme étant distribuée, non-symbolique, enactive, située et dynamique.

Des modèles de régulation et de contrôle sont décrits dans le chapitre suivant, amenant une dimension plus concrète aux théories du premier chapitre et en montrant leurs répercussions dans le domaine de l'action. Les différents modèles, théories et dispositifs décrits dans ce chapitre sont reliés grâce aux notions d'auto-organisation et d'émergence, abordés à la fin de ce chapitre. Ces notions - peut-être à cause de mon espoir de trouver une organisation dans le chaos nous entourant - sont cruciales dans les oeuvres artistiques décrites dans la deuxième partie et créent ainsi un pont important entre une épistémologie scientifique et une pratique artistique.

Finalement, sont décrits un modèle mathématique d'une carte auto-organisatrice ainsi que son implémentation informatique dans un environnement de programmation multimédia.

La deuxième partie décrit la pratique et la mise en oeuvre des théories, concepts et

[1] CIRM, Nice; GRAME, Lyon; Forum Neues Musiktheater, Stuttgart; IRCAM, Paris, ...

phénomènes de la première partie. Cette partie est divisée en trois chapitres décrivant quatre oeuvres artistiques, leur mise en place et leur contrôle :

For Alan Turing, une composition musicale pour réseaux de neurones artificiels jouant sur deux pianos virtuels, est une étude des phénomènes d'apprentissage, d'imitation et d'oubli et leur rôle dans l'émergence de structures musicales dans le cadre d'une simulation de réseaux de neurones.

Caresses de marquises et la *Symphonie des machines,* deux installations-concerts en plein air utilisant des systèmes multi-agents, sont des expérimentations d'interactions entre des agents neuromimétiques à grande échelle.

Fish, installation pour poissons vivants et ordinateur, portant sur l'interaction et l'apprentissage entre le vivant et l'artificiel.

1 Modèles de la cognition

1.1 Représentations

1.1.1 Connexionnisme

Le connexionnisme et plus particulièrement les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont issus de nombreux domaines de recherches, eux-mêmes souvent pluridisciplinaires. Notamment la biologie théorique, les sciences cognitives et l'intelligence artificielle ont contribué de manière importante à ce développement qui trouve ses débuts vers la moitié du XXe siècle avec, notamment, Warren McCulloch, Walter Pitts, Donald Hebb, David E. Rumelhart (Rumelhart et McClelland, 1986), Seymour Pappert et Marvin Minsky.

Le connexionnisme se fixe pour objet un réseau constitué de neurones formels (noeuds) dont les états évoluent au cours du temps en fonction de leurs entrées. Le fonctionnement individuel des noeuds est assez simple, analogue à un petit relais électrique. Les caractéristiques des noeuds et les valeurs des liaisons entre les noeuds (liens synaptiques) définissent ce réseau de neurones artificiels.

Ce qui a été salué comme la modélisation du cerveau et de l'esprit par les défenseurs les plus ardents du connexionnisme a souvent été réfuté par ses critiques comme n'étant pas plus que de la physique statistique et de l'ingénierie, loin de toute réalité biologique (Reeke et Edelman, 1988). John Searle (1984) va encore plus loin dans sa critique des modèles de la cognition en proposant la comparaison suivante:

"Supposons que personne ne savait comment fonctionnent les horloges. Supposons que c'était horriblement difficile de comprendre comment ils fonctionnent car personne ne savait comment les construire et à chaque fois qu'on en ouvrait une on la détruisait. Maintenant, un groupe de chercheurs propose de construire une machine qui est fonctionnellement équivalente à une horloge et nous permet de mesurer le temps aussi bien. Ils construisent un sablier et proclament "Maintenant on comprend comment marche une horloge!"" (Searle, 1984 - traduction par moi-même)

Évidemment le sablier ne nous apprend rien sur le fonctionnement d'une horloge, même s'il mesure le temps aussi bien voire mieux. Searle proclame aussi le cas de la la majorité des modèles utilisés en sciences cognitives et en intelligence artificielle: peut-être simule-t-on un raisonnement sur un ordinateur mais rien ne nous dit que cela correspond au fonctionnement d'un cerveau. Les arguments de Fodor et Pylyshyn (1988) vont dans une direction similaire. D'après eux, tout ce que fait le connexionnisme est d'implémenter dans une manière similaire au fonctionnement du cerveau un système qui lui reste symbolique.

Néanmoins, les principes du connexionnisme ont provoqué beaucoup de répercussions dans le monde de la philosophie de l'esprit, notamment avec des philosophes comme Patricia Churchland pour qui ce paradigme correspond à sa conception de propriétés mentales de haut niveau comme "propriétés émergentes [...] qui dépendent d'une manière systématique de phénomènes bas-niveaux" (Churchland et Sejnowski, 1992). Cette idée, qui s'inscrit dans une longue histoire, laissant des traces dans la métaphysique d'Aristote, a engendré le mouvement philosophique des émergentistes en Angleterre et se retrouve toujours chez un grand nombre de chercheurs aujourd'hui, notamment dans le domaine de la conscience.

Ce qui est peut-être l'apport le plus important des connexionnistes dans le monde des modèles de la cognition est leur approche non-symbolique. Un point de vue classique dans les sciences cognitives était de comparer le traitement d'information par le cerveau à la computation symbolique d'un ordinateur : toute information est représentée intérieurement sous forme de symboles qui sont manipulés comme le fait un logiciel informatique, de manière séquentielle, linéaire et déterministe. Dans les modèles connexionnistes par contre, les informations sont stockées d'une manière distribuée et non symbolique dans les connexions ou poids qui relient les noeuds d'un réseau de neurones artificiel. C'est l'activité du réseau entier qui est la réponse à une stimulation et c'est dans l'évolution et la dynamique de ces réponses que se manifeste le traitement d'information.

1.1.2 Traitement d'information symbolique / non-symbolique

Les critiques de l'approche du traitement d'information symbolique et des représentations internes sont nombreuses: Varela (1991), Clark (1997), Damasio (1994) et Brooks (1991) pour n'en citer que quelques-uns. Dans leurs critiques ils se servent des concepts de la cognition située ainsi que de l'externalisme. Les exemples qui suivent, donnés par Andy Clark dans son article "An embodied cognitive science?" (Clark, 1999), montrent des utilisations possibles de ces termes et leur importance pour la compréhension de la cognition.

1.1.3 Enaction

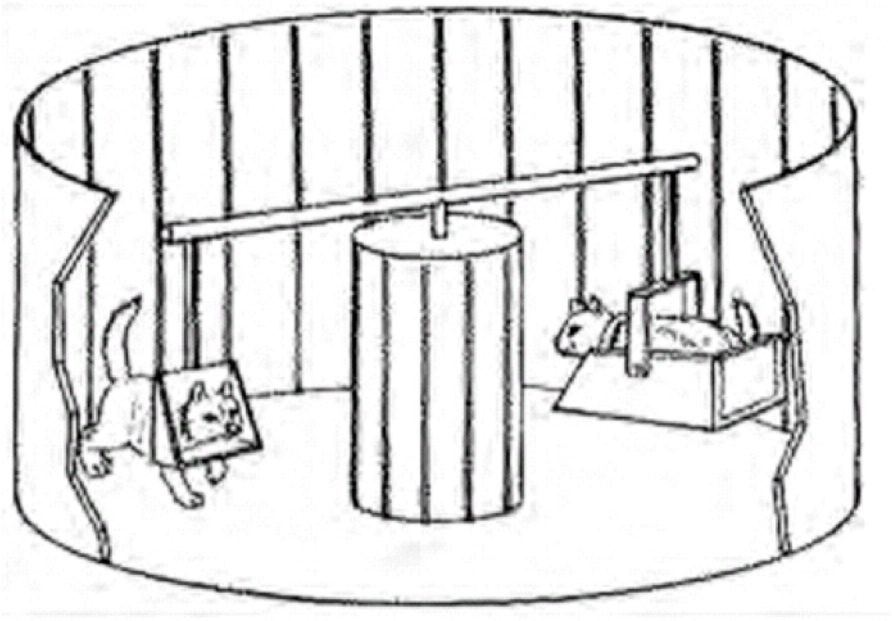
Le premier exemple donné par Andy Clark et le suivant:

"La capacité du thon rouge à faire des virages abrupts, d'accélérer soudainement et d'atteindre des vitesses très élevées était pendant longtemps assez mystérieuse. Physiologiquement il semble que ce poisson est beaucoup trop faible pour en être capable. Néanmoins des analyses des dynamiques des fluides indiquent que le thon utilise ses actions corporelles pour influencer et exploiter son environnement aquatique de manière enactive, c'est à dire à travers un couplage étroit entre ses actions motrices et les réponses environnementales. Ainsi il se sert de courants naturels dans l'eau et de tourbillons créés par lui même pour se propulser et pour changer de direction. Ainsi le système physique qui explique la natation prodigieuse du thon comprend à la fois l'agent et son environnement : le poisson inséré dans et exploitant les propriétés de son environnement local." (Clark, 1999; traduction par moi-même)

Jérôme S. Bruner (1966) a été le premier à utiliser le terme *enaction* afin de décrire une façon non-symbolique d'organiser des connaissances, même si l'on trouve des notions analogues dans l'œuvre de Husserl et des phénoménologues. Ces connaissances *enactives* sont acquises à travers une interaction physique et motrice avec le monde, tel que faire du vélo, manipuler des objets, etc.

L'importance des connaissances *enactives* pour la perception même a été montrée

entre autres par Held et Hein (1963) dans une expérience utilisant des chatons : afin de les priver de toute expérience visuelle, les auteurs ont élevé des chatons dans le noir total. Une fois que les chatons avaient atteint l'âge de pouvoir marcher, Held et Hein les ont placés dans un dispositif comme celui montré dans l'illustration suivante.



Le dispositif utilisé par Held et Hein

Dans cet appareil, l'un des deux chatons était immobilisé dans un chariot, tandis que l'autre devait tirer ce chariot. Suite à cette expérience, Held et Hein ont remarqué que le chaton qui a été immobilisé dans le chariot était sévèrement handicapé dans ses perceptions et incapable de marcher, pendant que l'autre chaton montrait un développement normal. Ainsi Held et Hein ont argumenté en faveur de l'importance d'un engagement physique et moteur avec l'environnement pour la perception et l'apprentissage.

Dans le domaine de la musique, David Wessel traite de l'*enaction* dans son article "An enactive approach to computer music performance" **(**2006**)**. Pour Wessel le phénomène découvert par Held et Hein devrait être détectable dans des expériences sur la perception musicale entre des sujets jouant d'un instrument et d'autres n'exerçant aucune activité musicale. Même s'il n'a pas réussi à démontrer ceci, le rapport évoqué par Wessel semble évident dans l'enseignement du solfège par

exemple.

Wessel analyse ensuite la situation dans le domaine de la lutherie électronique (développement d'instruments de musique informatiques), où traditionnellement les musiciens jouent à la souris de l'ordinateur portable - une interface gestuelle extrêmement pauvre. Wessel propose des interfaces gestuelles plus riches appelant des actions motrices plus complexes.

Le schéma suivant montre l'interaction entre un musicien et un tel dispositif.

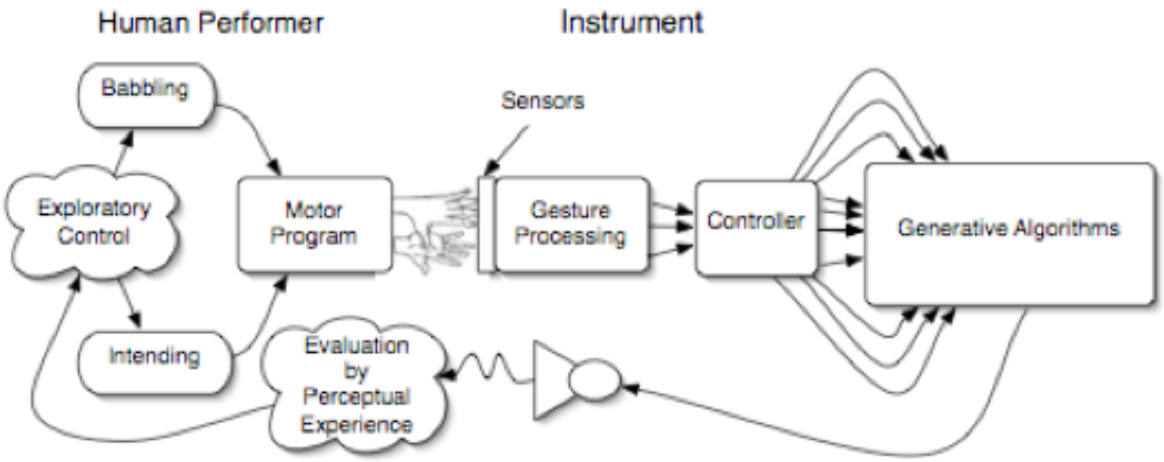


Schéma fonctionnel sur l'interaction entre en musicien et son instrument d'après Wessel

Wessel divise ce dispositif en deux parties : celle de l'instrumentiste et ses mécanismes cognitifs à gauche et celle de l'instrument des capteurs jusqu'au haut-parleur à droite.

L'instrument informatique est contrôlé au moyen de capteurs mesurant l'activité motrice du musicien. Ces donnés ont généralement peu de variables et dépassent rarement quelques dizaines, tandis que les paramètres à contrôler peuvent facilement dépasser plusieurs milliers. Un contrôleur assure le mappage entre les données obtenues des capteurs et les paramètres nécessaires au contrôle des algorithmes générant les sons. Pour une discussion de diverses stratégies de mappage, je renvoie le lecture à Momeni et Henry (2005) ainsi qu'à Momeni et

Wessel (2003).

Le contrôle de cet instrument est soit intentionnel, dans le sens d'un musicien essayant consciemment de jouer une séquence de musique, soit comparable au babillage.

D'après Wessel, le babillage représente un stade critique dans le développement du langage chez les nourissons.

"Babbling involves sequences of commands sent to the motor system in order to learn the relationship between these commands and the sonic result produced by the vocal apparatus. Babbling is distinguished from intentional commands in that auditory feedback provides information about the relationship between a gesture and a resulting sound whereas auditory feedback to intentional commands provides information about the match between the desired output sound and the actual output sound." (Wessel, 2006)

Ainsi le babillage dans le dispositif proposé permet une exploration ludique et motrice des possibilités de l'instrument, stade crucial pour son apprentissage, comme l'ont montré Held et Hein (1963). Cet apprentissage s'effectue au moyen du contrôle tactile des capteurs de l'instrument et l'évaluation immédiate du résultat sonore de ces actions. C'est dans cette boucle sensori-motrice que se réalise le jeu du musicien.

1.1.4 Boucle sensorimotrice

Un autre exemple de ce couplage étroit entre un agent et son environnement est celui de la vision animée ou interactive (Ballard, 1991). Ici, l'idée cruciale est de considérer la vision non comme la tâche de recréer à l'intérieur de l'agent des modèles riches et détaillés de son environnement, mais plutôt comme celle d'exploiter les informations visuelles données par le monde pour des actions dans ce monde.

Churchland et al. (1994) appellent "vision pure" l'idée que la perception visuelle doit permettre à un agent de faire une copie interne de son environnement qu'il peut traiter toujours intérieurement et qui, en fin de compte, donne une action à exécuter dans l'environnement externe comme résultat.

Par contre, la vision animée donne à la perception elle-même un rôle actif plutôt que celui d'un simple portail pour une recréation interne de l'environnement. Ainsi des informations utiles sont constamment récupérées de manière "just-in-time" (Ballard et al., 1997). Cette idée a été résumée par Brooks (1991) de manière succincte dans la phrase: "Le monde est son meilleur modèle".

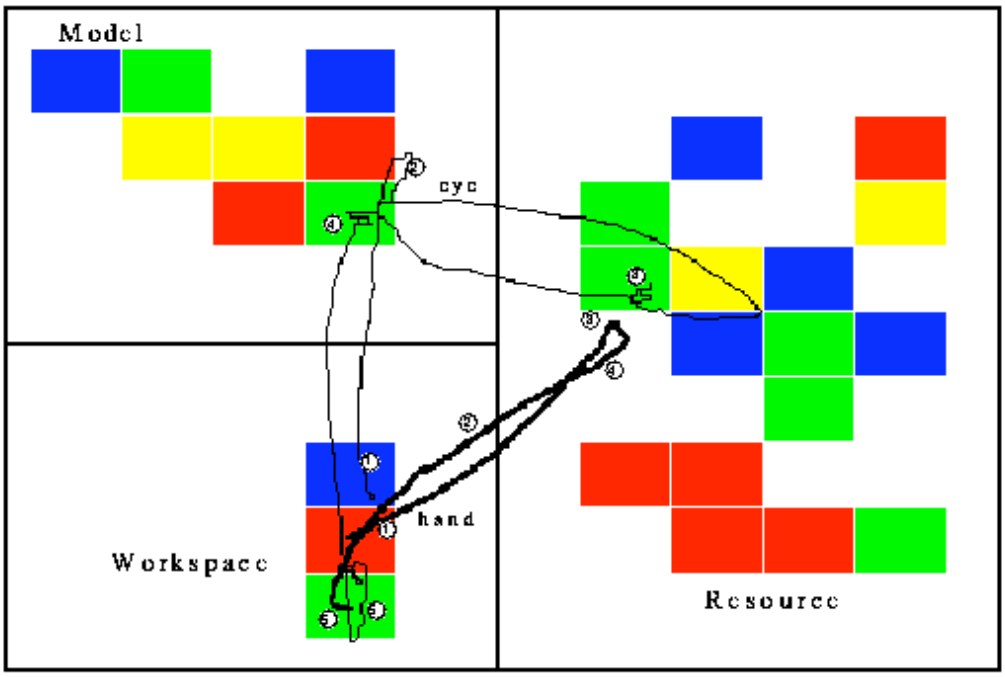
Ballard et al. (1997) montrent dans l'expérience qui suit l'effet d'économisation d'un processus cognitif lors d'une tâche visuo-motrice. Les auteurs proposent que les mouvements oculaires saccadiques sont une façon de relier des objets externes à des traitements cognitifs.

"Since humans can fixate an environmental point, their visual system can directly sample portions of three-dimensional space, as shown in Figure 1, and as a consequence, the brain's internal representations are implicitly referred to an external point. Thus neurons tuned to zero-disparity at the fovea refer to the instantaneous, exocentric three-dimensional fixation point." (Balard et al.,1997)

Ainsi, en observant l'activité physique d'un sujet lors d'une tâche donnée, il est possible de faire des hypothèses sur les processus cognitifs sous-jacents effectués pour la complétion de cette tâche. Concrètement, Ballard et al. font effectuer la tâche suivante par un sujet :

"A display of colored blocks was divided up into three areas, the model, resource, and workspace. The model area contains the block configuration to be copied; the resource contains the blocks to be used; and the workspace is the area where the copy is assembled. Note that the colored blocks are random and difficult to group into larger shapes so they have to be handled individually. This allows the separation of

perceptual and motor components of the task. Subjects copied the block pattern as described above, and were asked only to perform the task as quickly as possible. No other instructions were given, so as not to bias subjects towards particular strategies." (Balard et al., 1997)

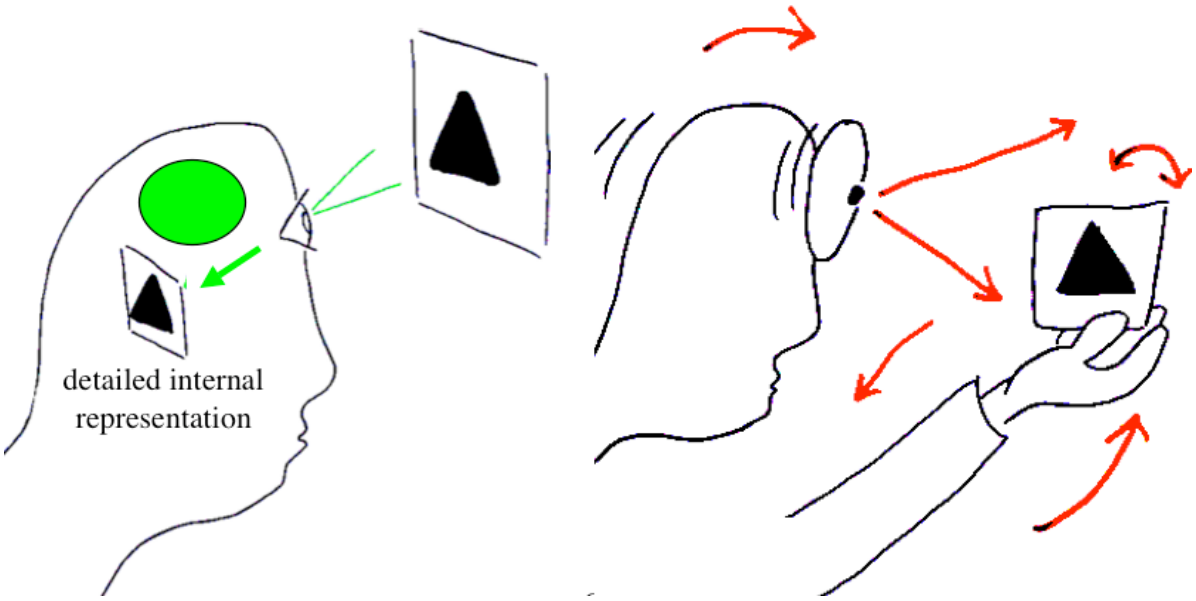


Les lignes fines montrent les mouvements oculaires ; les lignes épaisses montrent le mouvement moteur pendant la manipulation d'un bloc. On note que le sujet regarde deux fois le modèle, juste pour poser un seul bloc. Pour Ballard et al. cette consultation répétée du monde extérieur permet d'éviter la construction de modèles internes détaillés.

En mesurant les saccades oculaires et les mouvements de la main du sujet, Ballard et al. découvrent une stratégie surprenante de la part du sujet : même s'il a été demandé de compléter sa tâche le plus vite possible, aucun sujet n'essaie de mémoriser le modèle une fois pour toutes afin de le reconstruire. Au contraire, les auteurs observent des mouvements oculaires passant rapidement entre modèle, ressource et *workspace*, se servant ainsi du modèle comme d'une mémoire externe. Ce comportement est interprété comme une économie cognitive permettant d'alléger la charge cognitive et représentationnelle.

Pour Alva Noë (2002) la question des rapports entre la stimulation sensorielle et l'impression consciente du monde se résume dans la dichotomie de cette citation de Wittgenstein : *"The world we live in is the world of sense-data; but the world we talk about is the world of physical objects."* Comment est-il donc possible, demande Noë, que nous avons à la fois une conscience directe du monde qui nous entoure et en même temps nous en percevons juste une apparence ?

L'auteur propose une théorie de la boucle sensorimotrice d'après laquelle avoir une sensation perceptive veut dire être en train d'accéder au savoir qu'on exerce actuellement une compétence sensorimotrice d'un type spécifique. Ainsi, la conscience phénoménologique naît d'une boucle constituée par un engagement physique avec l'objet perçu. Le dessin de Kevin O'Regan illustre ce mécanisme :



Si traditionnellement on supposait que le cerveau créait des représentations internes et en générait des sensations, la théorie de la boucle sensorimotrice propose que c'est à travers notre interaction avec le monde perçu que le cerveau génère du savoir et des actions.

Alva Noë (2004, 2002, 2001) et Kevin O'Regan (2001) donnent une série d'illustrations concrètes de leur théorie. Par exemple, Philipona et O'Regan (2006)

analysent la question de savoir en quoi notre perception de la couleur est dépendante d'une activité motrice. Berlin et Kay ainsi que Kay, Regier et Cook (d'après Philipona et O'Regan, 2006) ont observé qu'à travers différentes cultures, des couleurs telles que le rouge, le bleu, le vert et le jaune sont considérées comme pures et portent des noms originaux dans quasiment toutes les sociétés, même les plus isolées. Philipona et O'Regan proposent d'expliquer cette forme d'universalisme par les propriétés de réflexion particulières de ces couleurs dans différentes conditions lumineuses :

"[...] the existence of four special surface colors can be expected from trichromatic theory alone, when constraints satisfied by natural illuminants and surfaces are taken into account. The colors predicted to be special from this approach are precisely those which are found in empirical surveys to be most often given a name by different cultures throughout the world. [...] [I]nstead of variations in the incoming light causing variations of the reflected light along three *component directions as is usually the case, in the singular cases, variations in incoming light only produce strong variations in the reflected light along one or along two directions."* p. 4

Cette découverte implique, de façon plus générale, que ce sont les contraintes imposées par l'interaction d'un organisme avec son environnement qui déterminent les qualités d'une sensation perçue. Ainsi ce serait notre interaction avec une surface colorée (différentes perspectives et conditions lumineuses suivant le point de vue de l'organisme) et les variations dans notre perception de cette surface colorée qui nous permet d'avoir une conscience phénoménologique de nos perceptions. C'est donc la boucle entre l'apparence du monde et notre faculté de la changer qui relie des objets externes à nos états mentaux portant sur ces objets[1].

1.1.5 Cognition située

Le problème de l'intentionnalité, c'est-à-dire la question de savoir comment l'esprit peut viser des choses qui sont en dehors de lui, est considéré de façon analogue par

[1] Pour une étude de la perception catégorique voir Harnad (1987). La perception catégorique est un phénomène de compression intra-catégorielle et de séparation inter-catégorielle.

la cognition située ou externaliste en philosophie. Tandis que l'internalisme cartésien et ses variations plus modernes proposent que les états mentaux sont des modifications internes de la "substance pensante" ou de l'esprit-cerveau, l'externalisme propose que nos états mentaux et nos croyances sont essentiellement ou constitutivement dépendants de notre environnement externe.

Putnam (1975, d'après Clark et Chalmers, 1998) et Burge (1979, d'après Clark et Chalmers, 1998) proposent l'expérience de pensée qui suit. Leur stratégie d'explication est de changer l'environnement afin de montrer les incidences sur les états mentaux d'un sujet :

Pierre est téléporté à son insu sur Terre-jumelle, une planète exactement similaire à la Terre sauf que l'eau n'y est pas de l'H2O mais de l'XYZ. Si Pierre, en voyant un lac, dit "Ah, de l'eau!", Pierre dit le faux car il désigne de l'XYZ. Pourtant, le *Doppelgänger* Pierre2 qui vit sur Terre-jumelle, dit le vrai en prononçant les mêmes mots, car pour lui "eau" désigne en effet l'XYZ. Ainsi la signification des mots dépend du contexte linguistique externe et non pas des états internes de Pierre.

Cet externalisme linguistique est critiqué et élargi par Clark et Chalmers (1998) :

"In most of the Putnam/Burge cases, the immediate environment is irrelevant; only the historical environment counts. [...] In counterfactual cases where internal structure is held constant but these external features are changed, behaviour looks just the same; so internal structure seems to be doing the crucial work. [...] [W]e note that active externalism is not threatened by any such problem. The external features in a coupled system play an ineliminable role - if we retain internal structure but change the external features, behaviour may change completely. The external features here are just as causally relevant as typical internal features of the brain." p. 9

L'exemple donné par Clark et Chalmers pour illustrer la thèse de l'externalisme actif (par contraste avec l'externalisme passif de Putnam et Burge) concerne les

croyances d'un agent. Les auteurs proposent que les croyances elles-mêmes, et pas seulement leur contenu, peuvent être externalisées, en étant essentiellement couplées à l'environnement dans lequel est inséré l'agent.

D'une part, considérons l'exemple courant d'une croyance résidant dans la mémoire biologique : Inga apprend qu'il y a une exposition au musée d'art moderne et se décide d'aller la voir. Elle réfléchit, se souvient que le musée se trouve sur la 53ème rue et elle y va. Il semble clair qu'elle croit que le musée se trouve sur la 53ème rue et qu'elle y croyait déjà, même avant de consulter sa mémoire. Ce n'était peut-être pas une croyance occurrente jusqu'au moment où elle s'en rappelait, mais cela est vrai pour une majorité de nos croyances.

D'autre part, considérons l'exemple d'Otto : Otto souffre de la maladie d'Alzheimer et, comme beaucoup de patients Alzheimer, il se fie à des informations dans son environnement pour structurer sa vie. Otto a un calepin qu'il garde toujours sur lui et dans lequel il note toute information qui pourrait lui être utile. Ce calepin joue pour lui le rôle d'une mémoire biologique. Quand Otto apprend qu'il y a une exposition dans le musée d'art moderne il se décide d'y aller. Il consulte son calepin et va à la 53ème rue.

On peut dire ainsi qu'Otto voulait aller au musée d'art moderne et qu'il croyait que le musée ce trouvait sur la 53ème rue. De la même façon qu'Inga avait cette croyance déjà avant de consulter sa mémoire, il semble raisonnable de dire qu'Otto avait cette croyance avant de consulter son calepin. L'information dans ce calepin est aussi bien une croyance non-occurrente qu'une information dans la mémoire biologique, sauf qu'elle se trouve en-dehors de l'enveloppe corporelle. (Clark et Chalmers, 1998)

Les trois exemples présentés ci-dessus montrent comment, à des niveaux physiologiques, perceptifs et même mentaux, nous sommes liés par une boucle étroite à notre environnement. En allant encore plus loin, on pourra dire : nous sommes non seulement liés à notre environnement, mais nous en faisons partie et *vice versa*, les limites de nos identités étant mobiles.

Pour Varela (1995) c'est cette boucle même qui définit un système cognitif :

"Des neurones ont des interactions spécifiques à travers une boucle de surfaces sensorielles et de surfaces motrices. C'est au travers de ce processus circulaire qu'émerge un domaine de perception, qu'émerge une structure cognitive qui définit à ce niveau là un soi, une identité. Ce soi virtuel est évident parce qu'il fournit une surface d'interaction, mais sa localisation n'est pas évidente parce qu'il est complètement délocalisé. Un agent peut avoir une multitude d'identités: cellulaire, immunitaire, cognitive, ... - toutes définies par leur mode d'interaction." (Traduction par moi-même)

Pour une discussion du sujet richement illustrée, je renvoie le lecture au livre *Natural-Born Cyborgs* de Clark (2003).

1.1.6 Dynamicisme

Jusqu'ici, on a parcouru plusieurs conceptions de la cognition qui sont résumées par Varela et al. (1991) en trois groupes: **cognitiviste, émergentiste (connexionniste) et enactive**. Leurs différences se reflètent déjà dans les métaphores choisies pour décrire ce qu'est la cognition. Si l'approche cognitiviste choisit la métaphore de la computation symbolique, les connexionnistes comparent la cognition avec l'émergence d'états globaux au sein d'un réseau distribué et parallèle. Enfin, l'approche enactive voit la cognition comme une interaction continue et dynamique avec l'environnement ou comme le disent Varela et al. (1991) : *un couplage structurel qui donne naissance à un monde*.

Si ce résumé simplifie sans doute les positions souvent intermédiaires et subtiles, il permet néanmoins de structurer le nombre abondant d'approches.

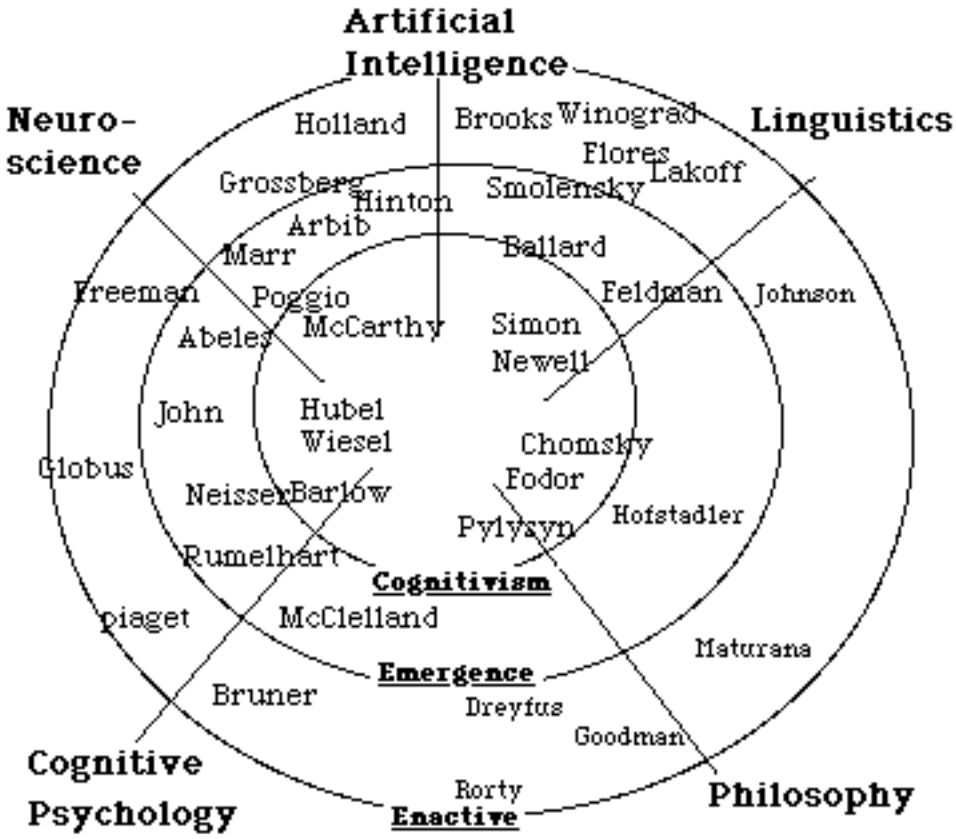


Schéma conceptuel des sciences cognitives (1991) dans la forme d'une carte polaire, avec les disciplines contribuant dans la dimension angulaire et les trois approches citées ci-dessus dans l'axe radial (s'après Varela et al., 1991).

Il reste aujourd'hui à mentionner le dynamicisme, approche voisine de l'approche enactive souvent présentée comme conflictuelle avec le connexionnisme (Van Gelder, 1995). Les adhérents de cette approche (Van Gelder et Port, 1995; Thelen et Smith, 1994) proposent que la métaphore la plus adaptée à la description de la cognition est celle des systèmes dynamiques et des équations différentielles. Ils tentent notamment d'expliquer la cognition en termes de trajectoires à travers un espace multidimensionnel qui représente l'espace de toutes les pensées et comportements possibles (Eliasmith, 2004).

En traitant le processus de la prise de décision Van Gelder (1999) décrit un modèle dynamique de la cognition comme processus où des variables numériques évoluent de manière couplée *dans* le temps (et non à travers le temps), donc comme

phénomène essentiellement temporel. Plus loin, Van Gelder précise qu'un système dynamique dans un tel contexte, constitue un ensemble de variables quantitatives évoluant continuellement, de manière parallèle et interdépendante dans le temps, en accord avec des lois dynamiques.

La notion de représentation est traitée par les dynamicistes non comme une entité symbolique manipulée de manière algorithmique mais plutôt comme des états stables dans un contexte transitoire et fugitif, comme des trajectoires dans une topologie d'attracteurs dynamiques.

Par rapport au connexionnisme, Van Gelder, qui a d'abord critiqué cette approche (Van Gelder et Port, 1995), concède aujourd'hui que les deux visions se chevauchent (Van Gelder, 1999) : s'il y a des recherches connexionnistes qui s'inscrivent dans les paradigmes établis par le dynamicisme (Beer, 1995 par exemple), l'interprétation connexionniste de ces systèmes reste souvent computationnelle (Rosenberg et Sejnowski, 1987 par exemple).

Un exemple récent d'une approche dynamiciste en robotique est donnée par Lauwers et al. (2005, 2006). Au Robotics Institute de Carnegie Mellon University, Lauwers et ses collaborateurs ont créé un robot se balançant dynamiquement sur un ballon afin de se mouvoir. D'après ces auteurs des robots classiques utilisant trois roues ou plus risquent de tomber assez facilement s'ils n'ont pas un centre de gravité près du sol et une base suffisamment large. Des mouvements rapides ou des pentes peuvent également contribuer à une instabilité du robot. Grâce à son évaluation permanente et dynamique de sa position, Ball-bot, le robot développé par Lauwers et al., se trouve dans un couplage étroit avec son environnement. En faisant de l'inclinaison du robot une variable dynamique et instable, ces chercheurs ont créé une stabilité du système globalement plus importante.

Le "Ballbot" avec ses concepteurs Ralph Hollis (à gauche) and George Kantor (à droite)

L'importance des aspects temporels des systèmes dynamiques semble évidente dans le contexte de la création musicale en particulier et dans le contexte acoustique en général. Le son et la musique étant des phénomènes intrinsèquement temporels et le jeu musical étant un processus "temps-réel", c'est à dire hautement lié au contexte dans lequel un musicien joue, une approche tenant compte du temps nous semble primordiale.

Pour illustrer l'efficacité d'un système dynamique dans le domaine acoustique lié à des facultés cognitives on peut citer l'exemple de Port et al. dans leur article "A Dynamic Approach to Rhythm in Language: Toward a Temporal Phonology" (1995), lequel traite de la modélisation, de la production et de la perception du langage parlé. Les auteurs, au lieu de travailler avec les modèles classiques d'enchaînement simple d'unités phonologiques symboliques, traduites en mouvements physiologiques des systèmes articulatoires (Chomsky et Halle, 1968), ont opté pour une approche dynamiciste dans leurs explications utilisant des oscillateurs adaptatifs.

Leur refus de l'approche symbolique se fond sur l'analyse rythmique de phrases japonaises d'une part et de phrases anglaises d'autre part. Dans le cas du japonais les auteurs analysent la rythmique *mora*, particulière à cette langue. Même si l'exemple est clair et se prête bien à la démonstration que souhaitent faire Port, Cummings et Gasser on examinera leurs observations à propos de l'anglais, qui semblent plus révélatrices et plus généralisées, en tout cas pour un lecteur occidental.

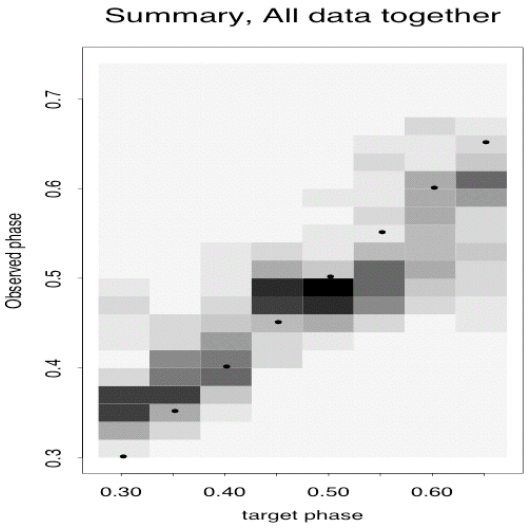
Ainsi, dans leur expérience, Port et al. font répéter à des sujets la phrase "take a pack of cards" avec une fréquence de répétition imposée de 1.5 secondes, donnée par un métronome. Cette fréquence est considérée comme la fréquence de référence. Au début de chaque tour de l'expérience, la phrase est lue à un sujet au moyen d'une voix synthétique avec une intonation plate et une durée donnée - naturellement inférieure à la fréquence de référence. La tâche du sujet était de répéter la phrase dans la durée donnée à la fréquence de référence. Par exemple, si la durée cible est de 800ms et la fréquence de référence de 1500ms, le sujet essaie de répéter sa phrase en 800ms toutes les 1500ms. Ce qu'on mesurait était le temps à l'intérieur de chaque cycle pour l'accentuation du mot */cards/*, dernière emphase dans la phrase "*take a pack of cards"*. Entre chaque tour, le moment cible pour cet accent était changé à une valeur entre 0.3 et 0.65 fois la fréquence de référence (0.3 et 0.65 se réfèrent à l'espace de phase dans le cycle 1.5Hz).

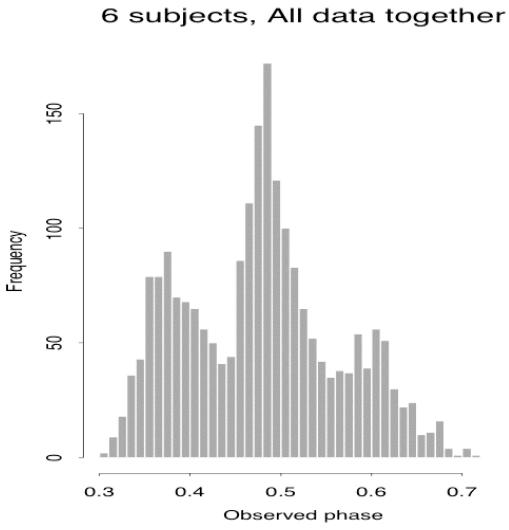
Port et al. présupposent que si les aspects rythmiques de la production linguistique sont régis par un système dynamique, le moment de placement pour l'accent dans le mot */cards/* tendra vers des fractions harmoniques de la fréquence de référence. Pour cela ils se réfèrent à des expériences utilisant des tâches motrices où il était demandé à un sujet d'entretenir deux oscillations avec un rapport de fréquences complexe comme 2:3 ou 3:4 par exemple (Kelso et de Guzman, 1988; Treffner et Turvey, 1993). Dans ces expériences, les auteurs ont trouvé une forte tendance des sujets à changer le rapport de fréquences à un rapport simple comme 1:1 ou 1:2.

Pour Port et al. leur propre expérience ressemble aux expériences motrices décrites ci-dessus : le sujet se trouve dans des rapports rythmiques complexes entre la fréquence de référence (1.5 secondes) et la fréquence d'emphase (le moment cible pour le mot */cards/*). Les auteurs proposent donc que s'il existe un système dynamique régissant le placement rythmique des emphases en anglais, ce système - étant pris dans un rapport de fréquences complexes - va essayer de placer les emphases à des moments de rapports simples ou harmoniques (p.ex. 1:2, 1:3, 1:4, 2:3...) entre fréquence de référence et durée cible.

Cette expérience ne me semble pas sans danger méthodologique : la répétition d'une phrase à une fréquence donnée nous amène dans un domaine hybride entre le langage parlé et le chant musical. Il est difficile, dans ce domaine, d'exclure des "contagions" musicales comme on ne sait pas si le sujet aura "chanté" la phrase demandée de façon musicale ou s'il l'a prononcée à la façon du langage parlé. Comme il est demandé aux sujets de garder une même durée pour la phrase à énoncer dans une fréquence régulière, un sujet pourrait exploiter des rythmes musicaux afin de simplifier sa tâche.

Les résultats de l'expérience de Port et al. confirment leurs attentes : les sujets ont placé l'emphase du mot */cards/* non pas de façon linéaire comme dans les stimuli., Le placement d'emphase se concentre plutôt autour de trois centres: 0.35, 0.49 et 0.6 - proches des rapports simples : 1/3, 1/2 et 2/3.





Résumé de toutes les durées mesurées chez les sujets. A gauche: durée cible contre durée observée chez les sujets. Les points indiquent la durée cible dans le diagramme ; la noirceur d'une cellule indique la fréquence des durées observées. A droite: mêmes données sous forme d'histogramme. Notez les 3 modes autours de 1/3, 1/2 et 2/3.

Comment expliquer ce phénomène de quantification rythmique? Ici, Port et al. (1995) marquent "une rupture radicale par rapport à la théorie phonologique" classique reposant sur des enchaînements symboliques en choisissant comme modèle d'explication un système d'oscillateurs couplés ce qui, d'après les auteurs, permettra d'unifier la théorie linguistique avec des théories du contrôle moteur ou de la perception.

1.1.7 Systèmes d'oscillateurs couplés

Un des premiers exemples d'observation d'un système d'oscillateurs couplés dans la nature est donné par Huygens en 1665 :

"Being obliged to stay in my room for several days and also occupied in making observations on my two newly made clocks, I have noticed an admirable effect which no one could have ever thought of. It is that these two clocks hanging next to one another separated by one or two feet keep an agreement so exact that the pendulums always oscillate together without variation. After admiring this for a while, I finally figured out that it occurs through a kind of sympathy: mixing up the swings of the pendulums, I have found that within a half hour they always return to consonance and remain so constantly afterwards for as long as I let them go. I then separated them, hanging one at the end of the room and the other fifteen feet away, and noticed that in a day there was five seconds difference between them. Consequently their earlier agreement must in my opinion have been caused by an imperceptible agitation of the air produced by the motion of the pendulums. The clocks are always shut in their boxes, each weighing a total of less than 100 pounds. When in consonance, the pendulums do not oscillate parallel to one another, but instead they

approach and separate in opposite directions." p. 106 (d'après Strogatz, 2003)

Après quelques tests, Huygens détermine que la raison de ce phénomène ne se trouve pas dans des vibrations aériennes mais dans les vibrations passant par la structure en bois de laquelle étaient suspendues ses deux horloges. Tant que les deux horloges étaient hors synchronie, ces vibrations perturbaient le système entier, les pendules des horloges incluses. Ainsi, à travers ces perturbations, ce système évoluait jusqu'à ce qu'il trouvât son point d'équilibre : la synchronie.

Un deuxième exemple est donné par Philip Laurent en 1917 :

"Some twenty years ago I saw, or thought I saw, a synchronal or simultaneous flashing of fireflies. I could hardly believe my eyes, for such a thing to occur among insects is certainly contrary to all natural laws." p. 11 (d'après Strogatz, 2003)

Ce phénomène a été observé maintes fois par des voyageurs dans le sud-est de l'Asie ainsi qu'en Afrique, relatant d'énormes congrégations de lucioles clignotant en synchronie sur plusieurs kilomètres au bord d'un fleuve.

L'explication formelle de ces phénomènes de synchronie est restée élusive pendant des années. Ce n'est que dans les années 1960 que John et Elisabeth Buck arrivent à résoudre ce problème. En observant des lucioles isolées, ils découvrent qu'une fois qu'une luciole "synchronisée" est isolée des autres, elle garde son rythme, indiquant ainsi l'existence d'un système interne régulant la fréquence de son clignotement. Dans une expérience ultérieure, John et Elisabeth Buck découvrent qu'en stimulant une luciole avec une lumière artificielle, ressemblant à celle d'une autre luciole, la luciole stimulée ajuste son clignotement en avançant ou en retardant son prochain flash.

Enfin, un principe moteur de ces phénomènes de synchronie a été découvert. A travers une adaptation, comme celle observée chez les lucioles, dépendant de la différence de phase entre deux oscillateurs, une population entière d'oscillateurs

homogènes arrive à se synchroniser.

Il existe différents types de systèmes d'oscillateurs couplés. On distingue notamment les oscillateurs adaptant leur phase des oscillateurs adaptant leur fréquence. Les réalisations naturelles de ces systèmes sont nombreuses et vont des cellules *pacemaker* dans le coeur en biologie, jusqu'à la réaction Belousov-Zhabotinsky en chimie.

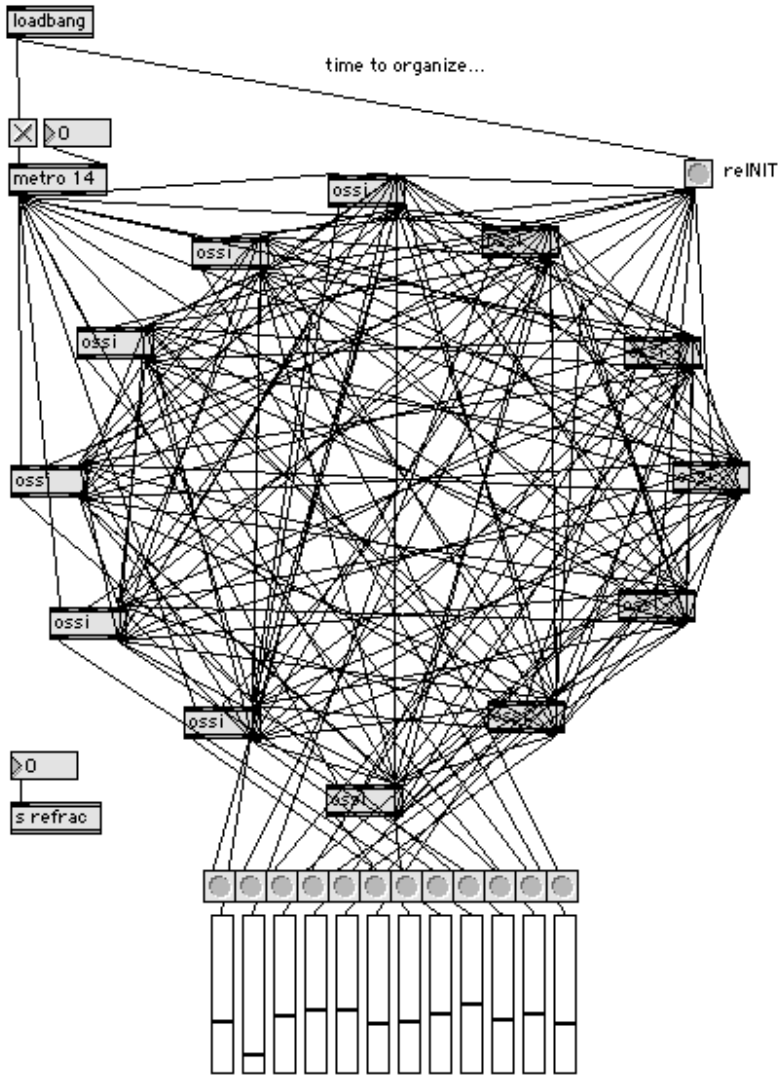
Yoshiki Kuramoto, en analysant des phénomènes de synchronie dans des systèmes chimiques et biologiques, arrive à en faire la description mathématique suivante:

Kuramoto suppose un couplage faible entre en ensemble d'oscillateurs quasi-identiques en fonction de leur différence de phase.

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N}\sum_{j=1}^{N}\sin(\theta_j - \theta_i)$$

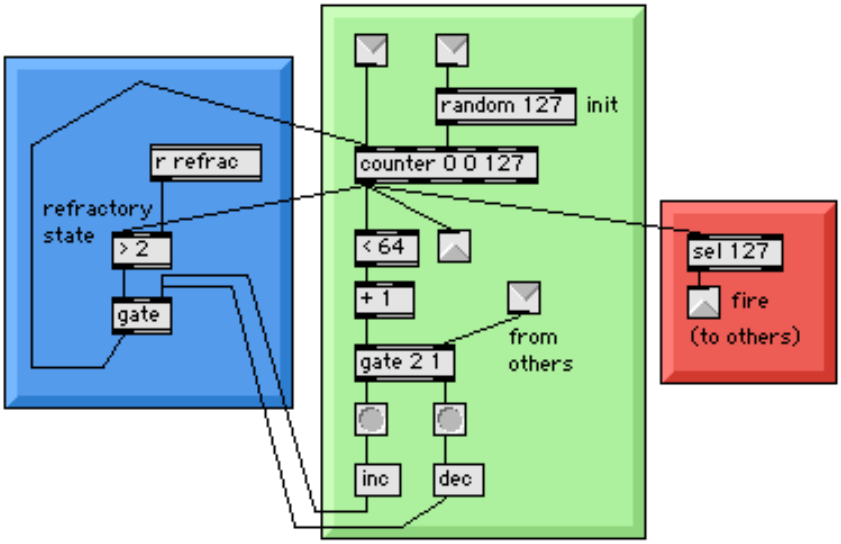
theta étant la phase de chaque oscillateur, omega sa fréquence naturelle, N le nombre d'oscillateurs et K une constante de couplage.

J'ai réalisé en 2005 un programme simple mettant en oeuvre ce phénomène de synchronie tel qu'il a été observé chez les lucioles, de façon simplifiée :



Programme MaxMSP "twelve'o'scils"

Ce programme consiste en douze oscillateurs identiques. Chaque oscillateur consiste en un compteur allant de 0 à 127. Chaque fois qu'un compteur arrive à 127, un signal est envoyé à tous les autres oscillateurs (cf. rectangle à droite dans la figure suivante). Cet instant correspond à l'instant où une luciole émet un clignotement. Chaque fois qu'un oscillateur reçoit ce signal émis par un autre oscillateur, il ajuste son compteur : le reculant d'un pas si sa "phase" actuelle est inférieure à 64 et l'avançant dans le cas contraire. Lors de l'initialisation des oscillateurs, tous les compteurs sont réglés à des valeurs aléatoires entre 0 et 127. (cf. rectangle central)



Le fonctionnement d'un oscillateur dans "twelve'o'scils"

Inspiré par l'architecture de carte auto-organisatrice nommée "ROSOM" (cf. chapitre "For Alan Turing"), j'ai ajouté une fonction d'état de réfraction (cf. rectangle à gauche). Cette fonction, similaire à l'état de réfraction dans des neurones biologiques, inhibe des ajustements de phase pendant une certaine durée après qu'un oscillateur a envoyé un signal.

J'ai utilisé ce système, plus développé, pour une installation audio-visuelle nommée *Remember Me?* créée avec Noël Dernesch à la galerie Artrepco à Zurich. Dans cette installation, les oscillateurs couplés servent à synchroniser un système génératif musical avec des rythmes visuels. Des paramètres tels que le bruit (décalant aléatoirement les compteurs), le temps de réfraction et la force de couplage permettaient un jeu riche avec ce système en passant d'états chaotiques à différents états stables.

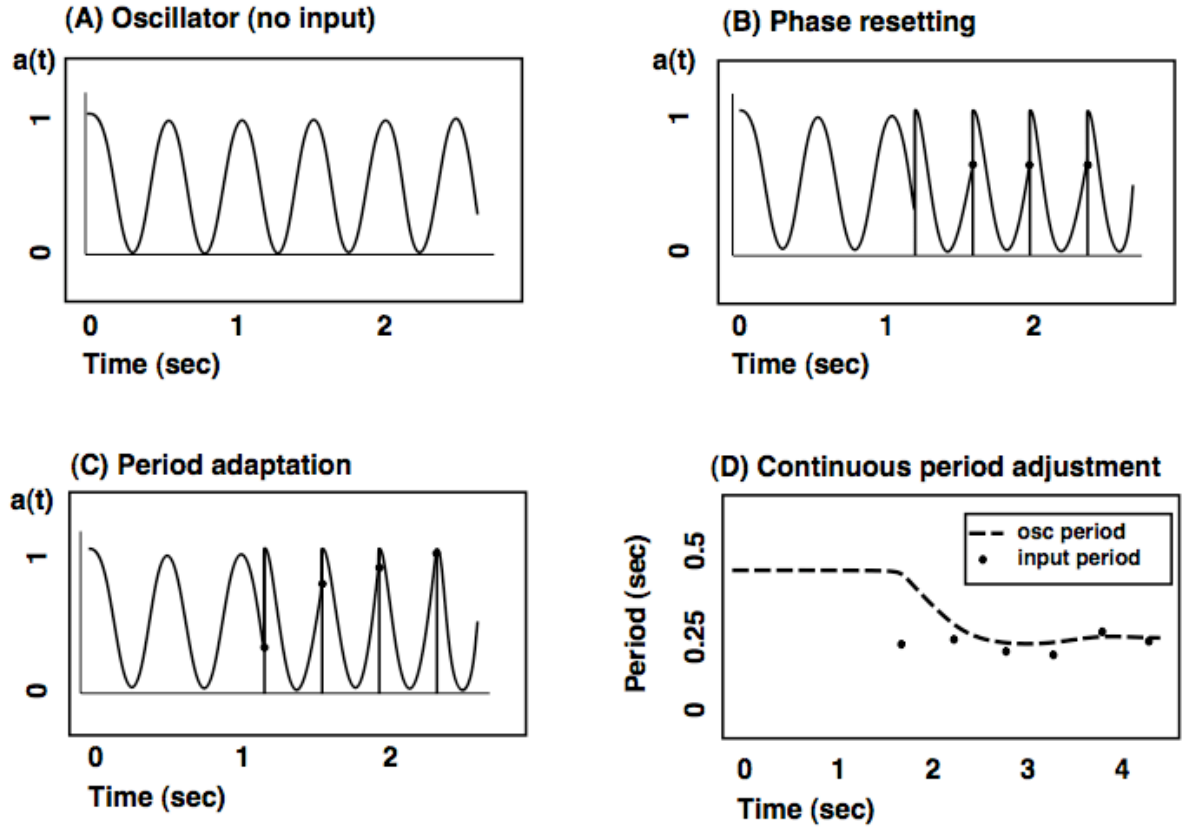
1.1.7.2 Les oscillateurs adaptatifs chez Port et al.

Port et al. (1995) décrivent un modèle d'oscillateurs adaptatifs développé par McAuley (1995). Le couplage entre deux oscillateurs a lieu à travers des impulsions. Chaque fois qu'un oscillateur reçoit une impulsion, il remet immédiatement sa phase à zéro continuant ensuite son oscillation (B, dans la figure suivante). Si la stimulation est périodique ou quasi-périodique, l'oscillateur ajustera sa phase jusqu'à ce qu'il soit

en synchronie avec le stimulus (C). Différents paramètres du système permettent de contrôler la vitesse à laquelle l'oscillateur s'adapte ainsi que sa sensibilité à des variations rythmiques dans le stimulus.

Port et al. décrivent le comportement de ce système de la manière suivante:

"It will quickly (within a few cycles) speed up or slow down so as to approximate the frequency of the inputs. If the inputs cease, then after a few cycles the system begins to decay toward its original intrinsic rate. Simulations show that if the inputs are somewhat irregular or if one or two pulses are missing entirely, the behavior of the [adaptive oscillator] is largely unaffected; it oscillates at a rate that approximates a running average of the most recent input cycles [D]"



(A) montre le signal naturel de l'oscillateur, sans entrées externes.

Dans leur article, Port et al. parviennent à donner une explication possible pour un phénomène rythmique particulier dans la langue japonaise à l'aide de ce modèle,

mais d'après Port et al., celui-ci ne suffit pas pour la modélisation du phénomène de quantification rythmique décrit ci-dessus. Néanmoins, l'utilisation d'un système dynamique semble le plus approprié. Ainsi Port et al. décrivent les propriétés des oscillateurs adaptatifs nécessaires à une telle modélisation. Après avoir insisté sur la nécessité d'utiliser des oscillateurs qui n'adaptent pas que leurs phases mais aussi leurs fréquences, Port et al. proposent le modèle suivant :

"Each oscillator should behave like a unit in a connectionist network in that it has an amplitude and is joined to other oscillators by weighted connections. Unlike other adaptive oscillator models, here the oscillators should couple with each other in a way that facilitates the identification of hierarchical metrical structure and also permits the representation of rhythmical patterns that fit that meter. The inter-oscillator connections will need to include both built-in components and components that are learned as the network is exposed to input patterns. [...] the coupling strengths and the oscillator periods will be adaptive variables in the model.

1.1.8 Conclusion

Malheureusement, Port ne revient pas sur l'explication du phénomène de quantification dans le placement rythmique des emphases en anglais. Par contre, un article de Steven Strogatz (1993) pourrait en donner un éclaircissement.

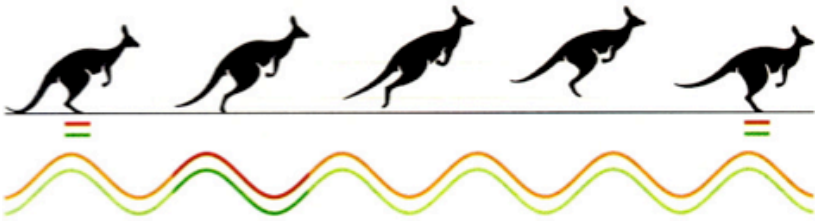
D'après Strogatz, en utilisant la théorie des ensembles ainsi que la bifurcation de Hopf Stewart et Golubitsky ont trouvé deux patterns dans l'analyse des états stables dans un système de deux oscillateurs couplés : la synchronie (différence de phase nulle) et l'anti-synchronie (différence de phase = 1/2). Stewart et Golubitsky comparent ces états avec différentes allures (*gait*) dans la locomotion chez les animaux : le kangourou pour la synchronie (a, dans le schéma suivant) et l'homme pour l'anti-synchronie (b).

Pour un système de trois oscillateurs, Strogatz cite quatre états dont la synchronie des trois oscillateurs est le premier (c). Le deuxième état est une différence de phase de 1/3 entre les trois oscillateurs (d), le troisième montre une synchronie entre deux

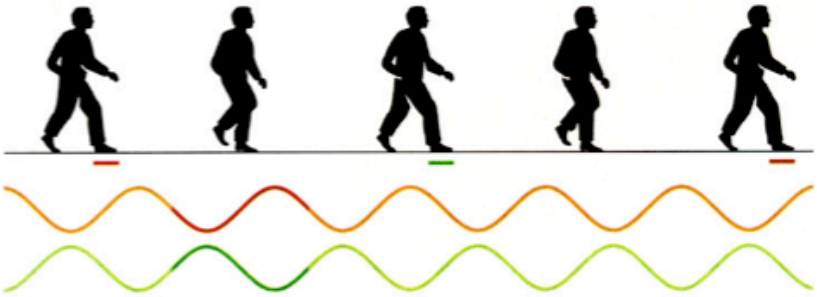
des trois oscillateurs et une décorrélation de la phase du troisième oscillateur. Néanmoins, ce dernier est à la même fréquence que les deux autres (e). Finalement, Strogatz cite l'état de l'anti-synchronie entre oscillateur 1 et 2 tandis que le troisième oscille à la fréquence double, avec une différence de phase de ± 1/4.

Nous observons donc, dans ces systèmes d'oscillateurs couplés, les mêmes rapports simples que ceux observés par Port et al, ce qui soutient leur mode d'explication. Il semble dès lors possible de modéliser un système d'oscillateurs, qui s'adapte selon sa stimulation externe et tend vers les états stables observés par Port et al. ainsi que par Stewart et Golubitsky.

a TWO IN SYNCHRONY



b TWO OUT OF SYNCHRONY

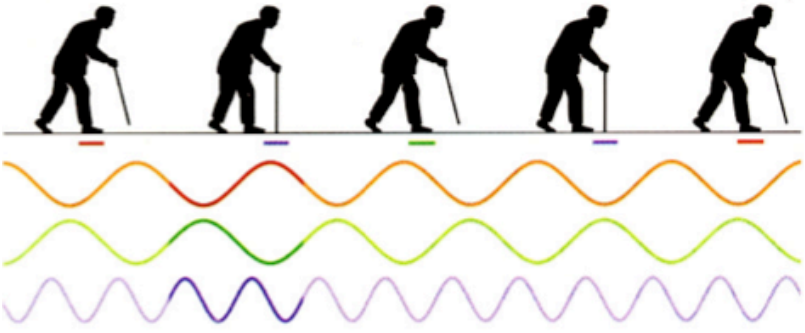


c THREE IN SYNCHRONY

d THREE ONE THIRD OUT OF PHASE

e TWO IN SYNCHRONY AND ONE WILD

f TWO OUT OF SYNCHRONY AND ONE TWICE AS FAST



1.2 Régulation et Contrôle

1.2.1 Cybernétique

Les racines des sciences cognitives telles que nous les connaissons aujourd'hui ont été posées dans la décennie entre 1943 et 1953 par le programme de recherches baptisé "*cybernetics"* par Norbert Wiener (1948). Parmi les résultats les plus impressionnants de cette filière figurent d'après Varela (1989)

- l'utilisation de la logique mathématique afin de comprendre le système nerveux et la cognition;
- l'invention des ordinateurs numériques et notamment de l'architecture Von Neumann, ce qui posait la base indispensable pour le développement de l'intelligence artificielle;
- l'établissement de la théorie des systèmes qui se retrouve encore aujourd'hui dans des branches aussi diverses que l'ingénierie (analyse des systèmes, théorie du contrôle), la biologie (physiologie régulatoire, écologie), les sciences sociales (anthropologie structurale, urbanisme) et l'économie (théorie des jeux);
- la théorie de l'information en tant que théorie statistique du signal et les canaux de communication;
- les premiers exemples de systèmes auto-organisateurs.

Une illustration typique du mode de pensée de cette époque est donnée par Warren McCulloch et Walter Pitts en 1943 dans leur article "A logical calculus of ideas immanent in nervous activity". Cet article propose la logique comme discipline appropriée pour la compréhension du cerveau et de l'esprit et décrit un système de neurones formels simples ayant deux états possibles et étant interconnectés afin de créer des réseaux capable d'un traitement d'information logique.

Cet exemple est typique notamment à cause de l'inspiration provenant de la biologie pour des applications de logique et de calcul. On note également l'intérêt particulier pour le cerveau et la cognition. Même s'il s'agissait de construire des machines de

production ou des usines, la métaphore préférée des cybernéticiens restait le cerveau. Pour une description détaillée du projet Cybersyn développé par Stafford Beer au Chili voir (Pias, 2004). Cybersyn était une tentative d'organisation de l'état chilien par des principes de régulation cybernétiques.

Toujours pendant la deuxième guerre mondiale, Norbert Wiener travaille sur la conception d'une machine de défense antiaérienne, afin de sauver l'Angleterre de l'effondrement total par les attaques aériennes accablantes (Wiener, 1952).

Le problème qu'essaient de résoudre Wiener et son collaborateur Bigelow est d'intégrer dans la machinerie de défense aérienne des mécanismes qui prédisent la trajectoire d'avions hostiles. Après un travail sur une extrapolation linéaire de la trajectoire, Wiener et Bigelow s'attaquent à la prédiction de la trajectoire au moment où le pilote essaie d'esquiver le feu venant de la surface. Pour Wiener, cela correspond au développement d'un système électromécanique qui prend en charge des tâches spécifiquement humaines telles que la prédiction de l'avenir (Wiener, 1952).

La problématique posée ici est particulièrement intéressante car le but de Wiener et Bigelow n'est pas une machine-outil augmentant l'efficacité d'actions humaines mais plutôt une machine autonome connaissant, imitant et prédisant le comportement humain. Il s’agit d’un exemple parmi beaucoup d'autres de l'aller-retour extrêmement riche entre les études de la cognition et leurs modélisations.

Pour Wiener et al., la métaphore qui servira comme outil est le servo-moteur. Ils estimaient que la manière dont un pilote esquivait un feu hostile était fondée sur des principes similaires au feedback dans la mécanique "servo". L'idée que toute action humaine volontaire est basée sur des processus circulaires est développé par le physiologue mexicain Arturo Rosenblueth, Wiener et Bigelow dans leur article "Behavior, Purpose and Teleology" (1943). Elle est l'un des principes les plus importants dans le vocabulaire des cyberneticiens.

Ce processus circulaire que les auteurs appellent "feedback négatif" passe par le système nerveux vers les muscles afin de provoquer des actions motrices. Ces actions sont de nouveau perçues par les organes des sens et retransmises dans le système nerveux. Cette boucle sensori-motrice a une fonction régulatrice pour les actions d'un agent. Wiener qui avait déjà trouvé l'utilité de ce type de régulation dans la conception de ses machines de défense antiaérienne retrouve le même mécanisme chez des patients qui souffrent d'une lésion du cervelet.

Rosenblueth et al. décrivent ainsi les effets d'un manque de feedback négatif dans la boucle sensori-motrice: au repos, le sujet ne montre pas de problèmes moteurs. Par contre, lorsqu'on lui demande de porter un verre d'eau vers sa bouche, la main qui porte le verre va faire une série de mouvements oscillatoires qui s'amplifieront de plus en plus jusqu'au point où le sujet aura renversé toute l'eau et aura échoué dans sa tâche.

Il est intéressant de constater que Rosenblueth et al. proposaient déjà cette notion de boucle sensori-motrice encore aujourd'hui d'actualité (Noë, 2002; O'Regan et Noë, 2001), même si elle a été affinée et développée. On remarquera comment cette notion est liée en même temps à la modélisation, à l'ingénierie et aux machines. Pour Wiener (1952), les humains s'intègrent parfaitement dans une machinerie, ce qu'on peut observer dans l'exemple du pilote et du tireur antiaérien: "il est essentiel de connaître leurs caractéristiques afin de les prendre en considération de façon mathématique pour les appareils qu'ils opèrent". Le comportement humain et le fonctionnement d'une machine sont ici mis côte à côte de façon égalitaire.

1.2.2 Homéostasis

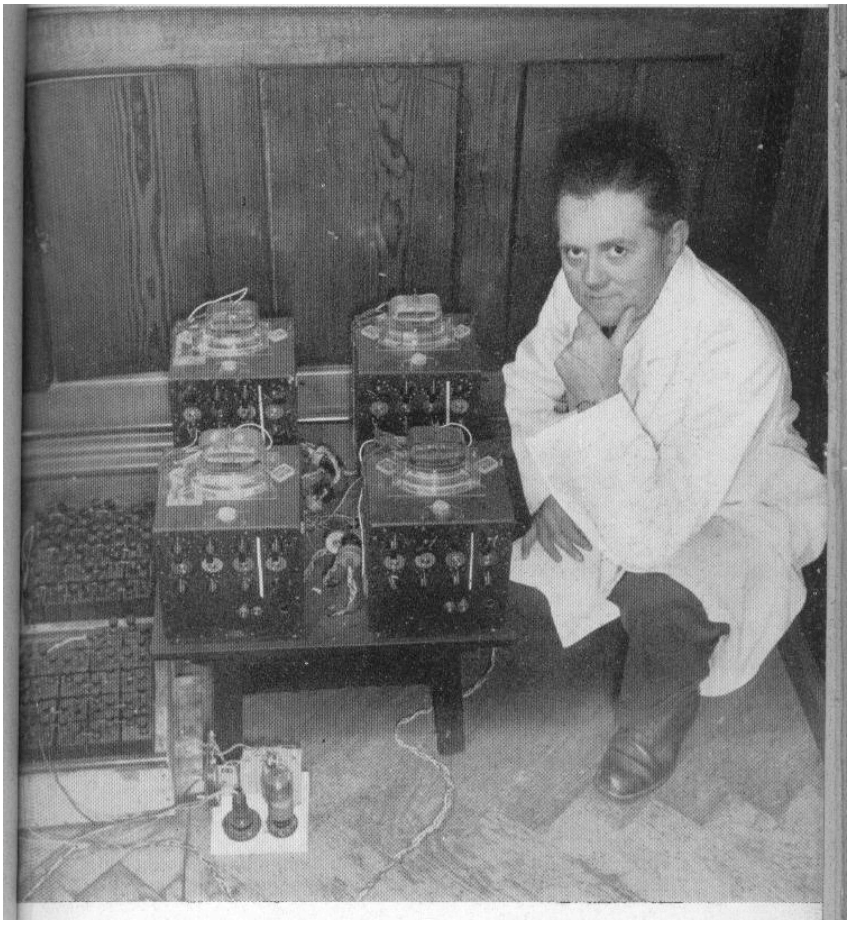
L'homéostat est un appareil électrique construit par Ashby en 1948 et qui a fait l'objet d'une publication intitulée "Design for a Brain" (Ashby, 1948). Il s'agit d'un modèle du phénomène biologique appelé *homeostasis*: la faculté d'un organisme de maintenir des variables essentielles telles que la température du sang face à une fluctuation constante de l'environnement.

L'homéostat d'Ashby était constitué d'une aiguille qui plongeait plus ou moins profondément dans un récipient d'eau en haut de l'appareil. Afin de trouver une *homéostasis*, l'homéostat était connecté à d'autres homéostats qui constituaient un environnement pour le premier.

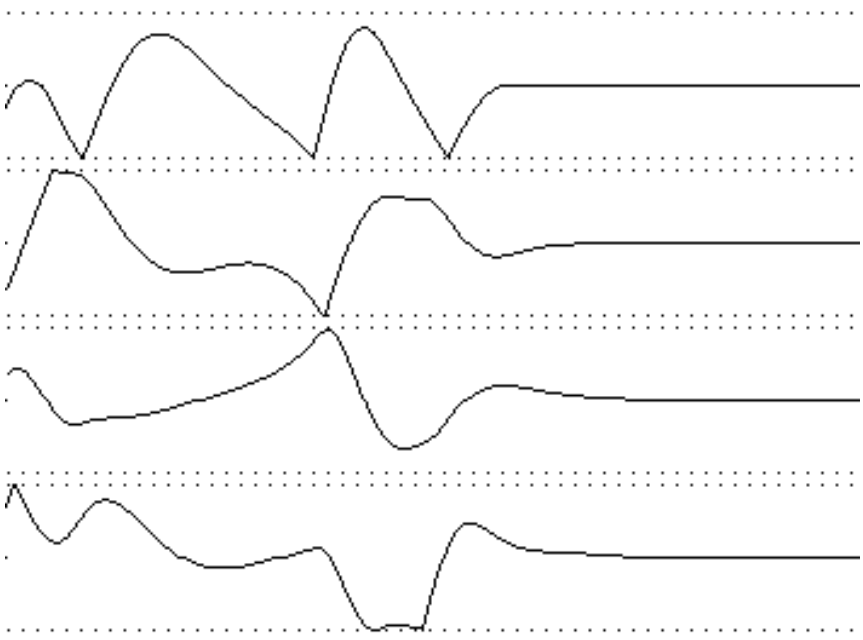
A l'intérieur de l'homéostat se trouvait un système de résistances qui pouvait se réorganiser de façon aléatoire dès que la tension sur une de ces connexions afférentes depuis un autre homéostat dépassait une certaine limite. Si après la reconfiguration de l'appareil la tension restait trop élevée, l'homéostat se reconfigurait de nouveau jusqu'à ce que l'homéostasis soit trouvée.

L'homéostat malgré - ou plutôt grâce à sa reconfiguration aléatoire - est considéré par Ashby comme un appareil ultrastable qui rompt avec les approches traditionnelles. Au lieu de se tourner vers le passé, à savoir l'analyse symbolique des données connues sur un environnement, l'homéostat se réorganise seulement si besoin est, jusqu'à ce qu'à travers cette réaction à l'environnement un nouvel équilibre soit trouvé.

Il est intéressant de noter une observation d'Ashby qu'il appelait la *loi de variété requise* (Ashby, 1956). La variété désigne le nombre d'états possibles pour un système: 25 dans le cadre des homéostats d'Ashby. La loi de la variété requise dit qu'un homéostat réussit seulement à trouver les états stables si le nombre des états internes possibles est supérieur ou égal au nombre d'états possibles de l'environnement.



Walter Ross Ashby au laboratoire de Gloucester avec quatre homéostats (1948 – 1952)



simulation numérique des variations de tension entre quatre homéostats interconnectés: http://www.hrat.btinternet.co.uk/Homeostat.html

1.2.3 Théorie du contrôle

Dans l'article "Every good regulator of a system must be a model of that system", Roger Conant et Ashby (1970) postulent que, afin d'apprendre et de contrôler, tout système doit former des modèles de son environnement. Ils présentent un théorème d'après lequel tout régulateur étant à la fois réussi et simple doit être isomorphe avec le système à réguler. Cette conclusion provient directement des observations d'Ashby par rapport à l'homéostat (*loi de variété requise).*

Finalement, Conant et Ashby proposent une neurologie théorique. Les auteurs comparent leur situation historique avec celle où le coeur humain était considéré comme la pompe parfaite. Ils écrivent: "De nos jours, les ingénieurs hydrauliques en savent trop sur le pompage pour suivre aveuglément le modèle du coeur. Ils savent ce que le coeur est *censé* faire et mesurent son efficacité". Cette comparaison mène Conant et Ashby à proposer que le cerveau, en tant que régulateur, doit nécessairement créer des modèles de son environnement et qu'il est possible de mesurer l'efficacité du cerveau dans cette tâche.

L'idée que le cerveau régulateur doit modéliser des tâches motrices a été largement développée dans les années suivantes. Un des concepts importants est l'idée d'une copie interne d'efférence (von Holst et Mittelstaedt, 1950). Dans l'exemple de Rosenblueth et al., la copie interne d'efférence serait un système cérébral simulant ou modélisant à l'intérieur de l'organisme son activité motrice. La découverte dans les années 90 des neurones miroirs (Gallese et al., 1996) semble également soutenir cette idée.

Ainsi Marc Jeannerod et Eisabeth Pacherie argumentent en faveur d'une hypothèse de simulation qui prétend que des actions, qu'elles soient ouvertes (exécutées) ou couvertes (non exécutées), sont simulées centralement par un réseau de neurones et que cette simulation fournit la base pour la reconnaissance et l'attribution d'actions (Jeannerod et Pacherie, 2004).

Les auteurs étudient un nombre de cas pathologiques dans l'attribution d'actions à

soi-même ou à quelqu'un d'autre, notamment la sur-attribution et la sous-attribution (Janet, 1937). Lors d'une sous-attribution un patient schizophrène interprète ses pensées et ses actions comme venant d'une source externe - comme s'il était contrôlé par quelqu'un d'autre - tandis que lors d'une sur-attribution le patient croit initier ou contrôler des actions d'autrui et pouvoir influencer d'autres personnes : des événements externes sont interprétés comme résultant de ses propres intentions.

Bonda et al. (1995) citent les pathologies suivantes liées à des lésions de la région pariétale du cerveau: la désorientation gauche/droite, l'impossibilité de localiser des membres par rapport au reste du corps, l'absence ou le déplacement d'une partie du corps, la transformation d'un membre en un objet mécanique ou encore l'apparition d'un membre fantôme supplémentaire, tel un troisième bras.

En cherchant les mécanismes sous-jacents de ces pathologies, Jeannerod et Pacherie proposent deux modèles similaires: l'hypothèse du monitoring central et l'hypothèse de la simulation.

L'hypothèse du monitoring central provient directement de l'ère cybernétique (Sperry, 1950; von Holst et Mittelstaedt, 1950). Son principe propose qu'à chaque fois que le centre moteur génère un signal efférent afin de produire un mouvement, une *copie d'efférence* est retenue. Des signaux reafférents (proprioception et vision par exemple) sont comparés avec cette copie afin de mettre à jour le centre moteur en cas de différence.

D'après Jeannerod et Pacherie, des descriptions plus récentes (Wolpert et al., 1995) proposent l'existence de *modèles internes* simulant les conséquences sensorielles d'une commande motrice. Comme on l'a vu plus haut, Conant et Ashby en parlent déjà dans leur article "Every good regulator of a system must be a model of that system" (1970) en partant de la *loi de variété requise* (Ashby, 1956).

1.2.4 Indices neuro-physiologiques

Farrer et al (2003) arrivent même à mesurer grâce à la *Positron Emission*

*Tomography (*PET) un changement dans l'activité neuronale dans plusieurs aires du cerveau, notamment le lobule pariétal inférieur, une région qui traite probablement des signaux visuomoteurs et proprioceptifs. Des sujets utilisent un *joystick* et voient, par retour visuel, une projection d'une main suivant leurs mouvements. Graduellement, le rapport entre mouvement du sujet et projection de la main est de plus en plus distendu, les mouvements dans la projection correspondent de moins en moins aux mouvements du sujet. Lors de cette expérience, Farrer et al. notent une augmentation d'activité dans le lobule pariétal inférieur en fonction de la discordance entre action motrice et perception visuelle.

Cette observation expérimentale donne un support neuro-physiologique à la théorie du monitoring central dans la mesure où on peut dire que l'activité neuronale d'une aire cérébrale spécifique est corrélative du sentiment de contrôler l'action. Cela n'est cependant pas suffisant pour l'attribution d'une action dans le cas où cette action n'est pas exécutée : une *action couverte*. Il est donc nécessaire de trouver une autre explication.

D'après Jeannerod, toute action ouverte/exécutée passe par un stade d'action couverte, tandis qu'il n'est pas le cas que chaque action couverte devienne nécessairement action ouverte. Ainsi Eva Bonda et al. comparent, dans leur article "Neural correlates of mental transformations of the body-in-space" (1995), l'activité neuronale grâce à la PET de sujets accomplissant des rotations mentales de leur main avec l'activité chez ces sujets exécutant des tâches de contrôle qui ne nécessitaient pas de rotations mentales. Les auteurs détectent chez les sujets accomplissant les rotations mentales une augmentation d'activité entre autres dans le lobule pariétal inférieur, la même région désignée par Farrer et al. en 2003 comme étant impliquée dans la sensation de contrôler ses mouvements; ils en concluent qu'il existe un système cérébral engagé dans la transformation mentale du corps dans l'espace.

Plus loin dans leur article, Jeannerod et Pacherie (2004) élargissent la notion d'action couverte à l'observation d'une action et reviennent ainsi à leurs observations à

propos de l'attribution d'action. La capacité de comprendre une action ou une intention d'autrui relève de l'empathie, comme l'a déjà noté Lipps en 1903. Aujourd'hui, les théories de l'empathie s'articulent surtout autour de deux pôles: la théorie de l'esprit et la simulation interne.

1.2.5 Implications sociologiques

Si autrefois la cognition était considérée comme la différence essentielle entre l'homme et l'animal, ce point de vue n'est plus défendu aujourd'hui et la cognition a fait place au langage et aux institutions sociales comme critères de différence. En partie, des phénomènes sociaux aussi complexes que l'économie ou la législation reposent sur la faculté d'empathie. C'est dans ce contexte de cognition au niveau social que le concept prend de l'ampleur. Comment sommes-nous capables de comprendre ou même de ressentir intuitivement ce qui se passe psychologiquement pour autrui?

D'après la théorie de la théorie de l'esprit (sic Gopnik et al., 1994), notre capacité d'attribuer des états mentaux et de prédire un comportement se fonde sur la possession d'une théorie de l'esprit: un ensemble de connaissances sur la cognition et la motivation applicable à la fois à autrui et à soi-même (d'après Jeannerod et al. 2004). La théorie de l'esprit nous permet de supposer qu'autrui a un esprit, que cet esprit est similaire au nôtre, ce qui rend possible l'empathie.

Au lieu de présupposer une théorie de l'esprit ou un raisonnement théorique dédié à la compréhension des actions d'autrui, la théorie de la simulation interne fait l'hypothèse que nous utilisons nos propres procès neuraux afin de simuler ceux d'autres agents. Cette forme de cognition située nous permet d'exploiter notre propre système interne pour nous mettre à la place d'autrui plutôt que de construire un modèle de cette personne à un "coût cognitif" beaucoup plus élevé. Si la théorie de la simulation interne est vraie, il doit être possible de repérer dans le cerveau des régions qui réagissent à la fois lors de l'exécution d'une action et lors de l'observation de cette action, même si celle-ci est effectuée par autrui. La découverte des neurones miroirs semble conforter cette thèse.

1.2.6 Neurones miroirs

En 1988, Giacomo Rizzolatti et al. découvrent chez des singes dans leur laboratoire à Parme une aire neuronale F5 dans le cortex pré-moteur ventral qui semble encoder non pas des mouvements élémentaires mais des actions à but précis (Rizzolatti et al., 1988). Cette découverte déjà très intéressante mène à une autre encore plus étonnante: parmi ces neurones F5 une classe de neurones s'active non seulement lorsqu'une tâche est effectuée mais aussi quand la même tâche est effectuée par un autre singe ou même par un expérimentateur.

Comme toute découverte spectaculaire, celle-ci n'a pas manqué d'inspirer les recherches. En 2004**,** Gallese et al. proposent même l'existence d'un système miroir non seulement pour les actions motrices mais aussi pour les émotions.

Dans leur critique de la théorie motrice de la cognition sociale (2005), Pierre Jacob et Marc Jeannerod rappellent la richesse énorme des interactions humaines et les nombreuses manières de comprendre autrui. Face à une telle variété de facultés, l'explication fondée sur les neurones miroirs ne suffit pas. Néanmoins, l'apport de cette découverte reste important dans la compréhension de nos actions motrices et des actions motrices d'autrui.

1.2.7 Auto-organisation et émergence

1.2.7.1 Dispositif de Gordon Pask

Du point de vue artistique, il est particulièrement intéressant de noter combien les cybernéticiens étaient dans une pratique de leur savoir, et ceci tout en poursuivant la logique de leurs recherches. L'appareil crée par Gordon Pask dans les années 1950 et décrit ci-dessous en est un exemple fascinant. Même si le calcul numérique était déjà devenu omniprésent et presque trivial, Pask tenait à construire un dispositif physique réalisant ses théories sur l'auto-organisation et l'émergence.

Comment un concepteur peut-il construire une machine qui dépasse les capacités du

concepteur lui-même (Ashby, 1952) ? D'après les cybernéticiens, cette question renvoie aux spécifications qui sont données par le concepteur : si le concepteur définit pour toutes les parties de son système toutes les actions possibles dans un contexte donné, ce système ne dépassera jamais son concepteur. Pourtant, pour ne donner qu'un exemple, Deep Blue, un ordinateur développé par IBM, gagne en 1997 contre le champion du monde, Gary Kasparov, aux échecs.

Ashby (1952) propose donc des systèmes qui sont capables d'interagir avec leur environnement de façon indépendante de leur concepteur (*informationally open systems)*. Ces systèmes sont dotés d'une certaine *autonomie structurelle*, leur permettant de s'améliorer et de s'adapter en changeant eux-mêmes leur structure, pour Ashby, la seule façon de dépasser les limitations du concepteur.

Parmi d'autres, Pask avait reconnu les avantages des systèmes biologiques pour ce qui est de l'auto-régulation ainsi que de la prolifération de ces systèmes, permettant ainsi une grande souplesse structurelle.

“We believe that if the ’complexity barrier‘ is to be broken, a major revolution in production and programming techniques is required, the major heresies of which would mean weakening of machine structural specificity in every possible way. We may as well start with the notion that with 10 000 000 000 parts per cubic foot (approximately equal to the number and density of neurons in the human brain), there will be no circuit diagram possible, no parts list (except possibly for the container and the peripheral equipment), not even an exact parts count, and certainly no free and complete access with tools or electrical probes to the ’innards‘ of our machine or for possible later repair... We would manufacture ’logic by the pound‘, using techniques more like those of a bakery than of an electronics factory" (Stewart, 1969)

Concrètement, Pask expérimentait avec des solutions de sels métalliques, tels que le sulfate ferreux, en y induisant des courants électriques. Cette technique a été explorée depuis le début du XXème siècle. R.S. Lillie travaillait notamment de 1909 à

1930 sur des systèmes de structures métalliques en fer, cuivre ou argent, immergées dans un milieu acide, tel que l'acide nitrique. Les propriétés de ces systèmes ressemblaient de façon étonnante au comportement de cellules neuronales (Cariani, 1993).

"[...] iron wires in nitric acid propagated electrical disturbances down their lenghts, causin g refractoriness and recovery in their wake, they had thresholds for initiating these travelling pulses, they could be excited or inhibited by electric currents, they exhibited threshold accomodation and oscillatory, rhythmic behaviour. Like myelinated nerve fibres, when these wires were intermittently shielded to expose only discrete nodes to their nitric acid milieu, the wires exhibited a rapid saltatory conduction, their pulses jumping from node to node. The interplay between the iron-wire physical model and the developing theories of the neuron continued well in the 1950's." (Cariani, 1993)

En passant des courants de façon intermittente ou de façon continue par des électrodes en platine immergées dans une solution du type décrit ci-dessus, Pask faisait "pousser" des structures dendritiques. En choisissant le passage du courant électrique, il était possible de réguler la croissance de ces dendrites.

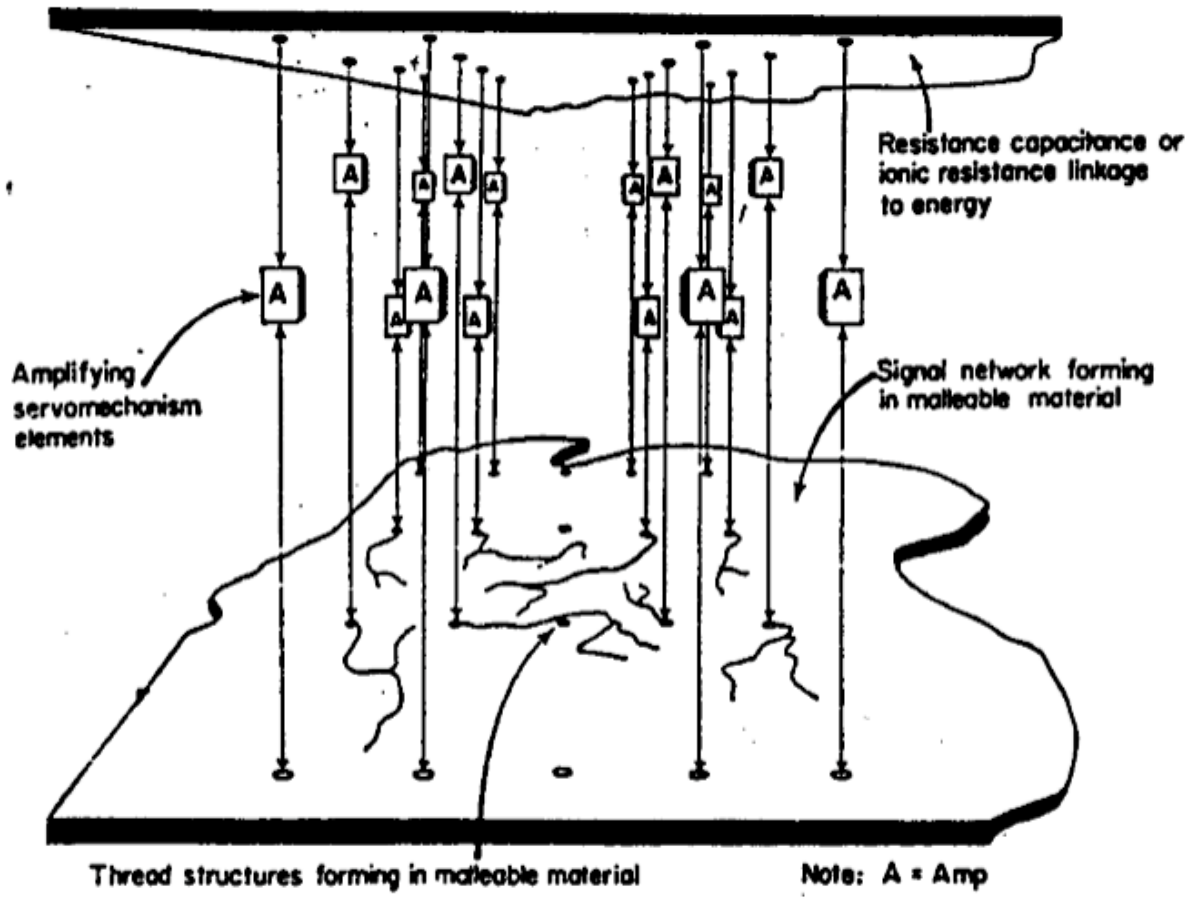


Schéma de Pask (1960) montrant l'étalage des électrodes dans leur milieu de sulfate ferreux.

Lors de la conférence "Mechanization of Thought Processes" en 1958, Pask présente son dispositif au public (Pask, 1958a) et montre comment il est possible de réaliser un réseau de neurones formels dans un médium analogique. Ce réseau est capable de distinguer entre différents stimuli soit sonores soit magnétiques, mais ceci n'est pas la propriété la plus étonnante. Des simulations numériques de réseaux de neurones étaient déjà bien connues à cette époque. Ce que Pask est parvenu à faire va plus loin que quasiment tous les systèmes réalisés à cette époque grâce à une malléabilité particulière : à travers un système de récompense le dispositif, *à priori* sensible à toutes les perturbations externes, pouvait être influencé afin d'avantager une sélectivité du dispositif à un certain type de perturbation. Effectivement, l'apprentissage qui consiste à distinguer une fréquence acoustique d'une autre réussit rapidement, une fois que le dispositif est devenu sensible aux sons, ce qui prenait une demi-journée, d'après Pask.

“We have made an ear and we have made a magnetic receptor. The ear can discriminate two frequencies, one of the order of fifty cycles per second and the other on the order of one hundred cycles per second. The ’training‘ procedure takes approximately half a day and once having got the ability to recognize sound at all, the ability to recognize and discriminate two sounds comes more rapidly... The ear, incidentally, looks rather like an ear. It is a gap in the thread structure in which you have fibrils which resonate at the excitation frequency.” Gordon Pask (1960)

La capacité du dispositif de Pask à faire évoluer ses sensibilités est d'intérêt jusqu'à nos jours, notamment par rapport au problème d'encodage dans l'utilisation de réseaux de neurones artificiels (RNA). L'encodage des données présentées à un RNA détermine en quelque sorte sa "perception" du monde et joue donc un rôle crucial dans son traitement d'informations. L'encodage d'événements musicaux sous forme symbolique (hauteur, durée, intensité) entraîne un traitement différent d'un encodage de ces mêmes événements sous forme d'analyse spectrale par exemple.

Traditionnellement, il revient donc au concepteur d'un système de choisir ses capteurs et effecteurs pour une tâche donnée. Ashby (1970) pose le problème ainsi:

"The would-be model maker is now in the extremely common situation of facing some incompletely defined system, that he proposes to study through a study of its variables. Then comes the problem: of the infinity of variables available in this universe, which subset shall he take? What methods can he use for selecting the correct subset?"

Le dispositif de Pask entreprend une solution à ce problème. A partir d'une "infinité de variables" son système adapte ses sensibilités pour trouver les variables pertinentes pour une tâche donnée. Il est important de noter la différence du mécanisme d'adaptation par récompense dans le dispositif de Pask:

"What I am trying to bring out is a basic distinction which exists between reward, as

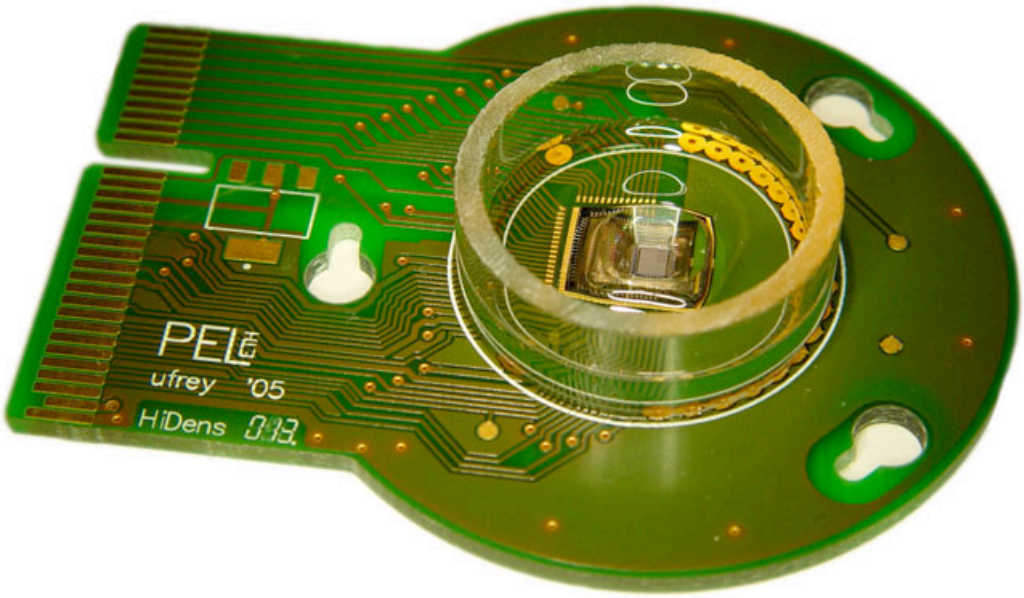
used in computer programmes to mean that a rewarded event becomes more probable, and reward as it is used in a system able to create fresh components and parts of itself. In this latter case, reward means ability to develop, ability to expand, and ability to become stable by becoming a larger system." (Pask, 1958a)

Dans un autre article, Pask élabore ce même sujet:

"But there is no possible way in which a control mechanism built of elements with well specified functions to perform, can acquire special sensitivity to an input not originally specified as relevant. On the other hand, it would be surprising if an extensive control mechanism built of elements with an initially unspecified function did not behave in this manner. Thus, for example, vibration may not be included in the list of relevant inputs, but vibration may so modify the state of an extensive control mechanism that it elicits a particular decision. Suppose this decision is favored, so that when it is made, more current is allowed to pass. In this case the current or currency will be used to construct a region in which the elements have acquired the function of vibration receptors - in other words - the extensive control system seeks current for building itself by forming a region sensitive to vibration." (Pask, 1958b)

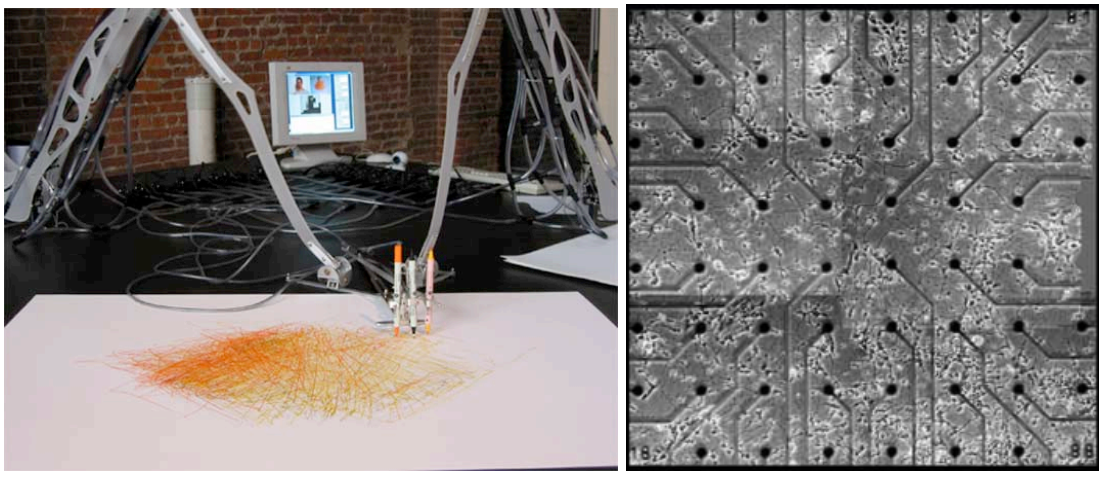
1.2.7.2 Répercussions du dispositif de Pask

Les développements électro-chimiques de Pask semblent peu connus, même de nos jours (Cariani, 1993). Pourtant, des développements récents s'inscrivent dans ce même axe de recherche. Ainsi, divers projets commerciaux et universitaires ont déjà réalisé des étalages d'électrodes multiples (*multi electrode array MEA*) sur lesquels on a fait pousser des populations de neurones biologiques. Ces étalages permettent à la fois de mesurer l'activité des neurones ainsi que leur stimulation. Concrètement, Heer et al. (2006) à l'École Polytechnique de Zurich (ETH) ont réussi sur leur "*Neurochip*" à générer des réponses reproductibles à des patterns de stimulations.



Le « Neurochip » de Heer et al. (2006)

Bakkum et al. (2004) décrivent un même type de système contrôlant un robot qui navigue dans un environnement en évitant des obstacles. Dans le même article, les auteurs décrivent MEArt, un bras robotique générant en temps réel des dessins à partir de la réponse d'une population de neurones biologiques à la stimulation par des portraits de visiteurs d'une exposition artistique.



Les bras robotiques (à gauche) contrôlés par le MEA (à droite).

Les portraits créés par MEArt (en haut) et leurs modèles (en bas).

Dans le domaine de l'intelligence artificielle, la nécessité d'une réalisation physique a été soulignée notamment par Rodney Brooks (Brooks, 1987 ; Steels et Brooks (éd.), 1995). On voit ici apparaître l'importance pour l'environnement déjà mentionnée dans le chapitre sur les représentations non-symboliques.

1.2.7.3 Auto-organisation

Je pense qu'intuitivement, nous pouvons supposer que le dispositif d'adaptation structurelle de Pask est un système auto-organisateur. Pour résumer les propriétés du système créé par Pask, Cariani (1993) note, parmi d'autres:

- **fermeture structurelle** (*"structural closure"*) : la capacité d'un système de construire et de reconstruire ses propres parties
- **variété structurelle** : la prolifération de connections parallèles - dans le cas du dispositif de Pask, à travers des structures dendritiques développées à partir des électrodes
- **autonomie structurelle** : la structure interne du système n'est pas déterminée dans tous ses aspects par son concepteur
- **ouverture informationnelle** (*"informational openness"*) : le système est exposé à des influences externes, sans médiation nécessaire par le concepteur

Je crois que cette liste de propriétés peut très bien s'appliquer d'une part pour l'analyse de la description des systèmes auto-organisateurs et d'autre part pour leur modélisation. Une comparaison de ces propriétés avec les propriétés d'une carte auto-organisatrice sera tentée dans le chapitre de ce mémoire intitulé "Les cartes auto-organisatrices".

1.2.7.4 Mesurabilité

J'aimerais ajouter à la liste des propriétés citée ci-dessus, la **propriété d'émergence**. Dans le dispositif de Pask nous observons l'occurrence d'une nouvelle propriété (la perception sonore), à partir des comportements locaux des molécules constituant les dendrites, qui sont exposés aux influences externes (ouverture informationnelle).

Cariani formule ainsi le rapport entre "émergence" et auto-organisation telle qu'elle a lieu dans le dispositif de Pask:

"If one is to build a device which purportedly has the capacity to evolve new functions, then one must grapple with problem of recognizing when this has occurred. Only a dadaist would think of building a device without some recognizable purpose, or without some perceptible effect whose utility could be evaluated. How does one recognize an emergent property? One needs appropriate operational criteria for

functional emergence, such that a community of observers can independently verify for themselves that an emergent event has occurred. Pask was very careful in this respect; many of his discussions about the electrochemical experiments delve deeply into systems theoretic considerations [...] of exactly how the situation and its evolution could be described and observed. [...]

The ill-defined nature of the electrochemical milieu necessitated a sophisticated account of role of the external observer attempting to "track" what is going on in the assemblage and its environment by altering his/her model [...]. An emergent event can be defined as the point where the observer's model breaks down, or in Rosen's terms, the deviation of the observed behavior from the behavior predicted by a model [...]. When devices alter their structure to evolve new informational linkages with their environments (new observables), their behavior becomes contingent upon new factors, and consequently changes relative to a fixed model. Thus "self-organization" (in the sense of structural rearrangement) and "emergence" are related." (Cariani, 1993)

1.2.7.5 Organisation

Dans son article "Principles of the Self-Organizing System" Ashby (1962) analyse de manière très systématique le terme d'auto-organisation. Sa première interrogation se porte sur ce qu'est une "organisation". D'après Ashby, l'aspect peut-être le plus important d'une organisation est une conditionnalité entre les différents éléments la constituant.

“As soon as the relation between two entities A and B becomes conditional on C's value or state then a necessary component of ’organization‘ is present.” (Ashby, 1962)

Plus loin, Ashby cerne la séparabilité ou réductibilité comme critères pour délimiter une organisation:

The converse of "conditional on" is "not conditional on", so the converse of

"organization" must therefore be, as the mathematical theory shows as clearly, the concept of "reducibility". (It is also called "separability".) (Ashby, ibid.)

Pour illustrer, Ashby donne les exemples suivants : une fonction mathématique complexe avec beaucoup de variables, où, lors d'une analyse plus profonde, on trouve éventuellement des parties de cette fonction qui ne dépendent pas du résultat d'une autre partie de la même fonction. Dans ce cas-là, nous pouvons séparer cette fonction en plusieurs parties différentes et, d'après Ashby, dire que la fonction originale est constituée de plusieurs "organisations".

L'autre exemple donné par Ashby est celle d'un objet mécanique, qui peut se diviser en plusieurs "sous-mécanismes" indépendants. Dans ce cas, on se trouve de nouveau face à plusieurs organisations (mécaniques) séparées.

Cette conclusion permet à Ashby de proposer des outils mathématiques pour l'analyse et même la mesure d'organisation tels que l'analyse corrélative et surtout l'analyse d'incertitude, se rajoutant à la proposition de Rosen (1985) de comparer la différence entre le comportement d'un système et la prédiction faite d'un modèle de ce système. Dans le domaine de la mécanique computationnelle, cette idée se retrouve d'une façon différente dans le concept selon lequel la prévisibilité augmente dans un système auto-organisateur ou émergent, une fois que l'auto-organisation ou l'émergence est apparue. D'un autre côté, comme le dit Rosen, l'occurrence même de ces phénomènes n'est pas prédite par un modèle.

Ashby propose notamment *l'analyse d'incertitude* de Garner et McGill (1956) pour la mesure d'organisation, permettant une mesure de conditionnalité.

De façon similaire, Fabio Boschetti et al. (2005) proposent pour le cas de la détection d'émergence les cartes auto-organisatrices. Cette approche me paraît prometteuse, surtout dans la mesure où la carte auto-organisatrice est elle-même déjà un système à propriétés émergentes (cf. chapitre suivant). Serait donc l'outil d'analyse d'une carte auto-organisatrice une autre carte auto-organisatrice ? Des travaux de Jae-

wook Ahn et al. (2006) parmi d'autres, semblent indiquer ici une piste intéressante.

Dans leur article "A Two-Level Adaptive Visualization for Information Access to Open-Corpus Educational Resources" Jae-wook Ahn et al. (2006) décrivent un système de plusieurs cartes auto-organisatrices en série, l'une analysant la structure de la précédente et permettant ainsi à un utilisateur une navigation multi-échelles dans un grand corpus de données.

1.2.7.6 Émergentisme

Une des racines des idées entourant la notion d'émergence en général et l'émergentisme plus particulièrement se trouve dans le holisme. Dans son livre *Holism and Evolution* Jan Smuts définit le holisme comme "la tendance dans la nature à former des entités (wholes) à travers une évolution créative, qui sont plus grandes que leur somme" (Smuts, 1926). Cette idée se trouve déjà chez Aristote, qui écrit: "Le tout est plus que la somme de ses parties" (Aristote, Métaphysique).

C'est au début du XXe siècle que se forme en Angleterre ce qui sera nommé l'émergentisme britannique, représenté entre autres par Charlie Dunbar Broad (1887 – 1971), Lloyd Morgan (1852 – 1936) et Samuel Alexander (1958 – 1938). Plus tôt encore, en 1843 John Stuart Mill (1806 – 1873) pose un fondement important avec la parution de *A System of Logic* (Mill, 1843).

Dans cet ouvrage, Mill traite du sujet de la causalité dans les cas de la mécanique et de la chimie, en tirant une différence importante qu'il exprime en parlant de l'effet "homopathique" dans la mécanique et de l'effet "hétéropathique" dans la chimie. D'après Mill, dans le domaine de la mécanique, un effet est réductible à la somme de ces causes:

"Dans cette classe importante de cas de causalité, aucune cause, à proprement parler, n'en détruit ni n'en altère une autre ; chacune a son plein et entier effet. Si un corps est poussé dans deux directions par deux forces, dont l'une tend à le faire aller au nord et l'autre à l'est, il ira dans un temps donné exactement aussi loin dans les

deux directions que si chaque force l'avait poussé séparément ; et il reste précisément là où il serait arrivé s'il avait été actionné d'abord par l'une des deux forces et ensuite par l'autre. Cette loi de la nature est appelée en dynamique le Principe de la Composition des Forces ; et à l'imitation de cette expression bien choisie, j'appellerai Composition des Causes le principe applicable à tous les cas dans lesquels l'effet total de plusieurs causes réunies est identique à la somme de leurs effets séparés." (Mill, 1843)

Plus loin, Mill met en opposition à ces observations des phénomènes chimiques :

"La combinaison chimique de deux substances produit, comme on sait, une troisième substance dont les propriétés sont complètement différentes de celles de chacune des deux substances séparément ou de toutes deux prises ensemble. Il n'y a pas trace des propriétés de l'hydrogène et de l'oxygène dans celles de leur composé, l'eau. La saveur du sel de plomb n'est pas la somme des saveurs de ses composants, l'acide acétique, le plomb ou ses oxydes ; et la couleur de la couperose bleue n'est pas un mélange des couleurs de l'acide sulfurique et du cuivre. Ceci explique pourquoi la Mécanique est une science déductive ou démonstrative, et la chimie pas. Dans l'une, on peut calculer les effets de toutes les combinaisons des causes, réelles ou hypothétiques, d'après les lois connues qui gouvernent ces causes quand elles agissent séparément, parce que ces causes, combinées comme séparées, observant les mêmes lois, ce qui serait arrivé en conséquence de chaque cause prise à part arrive encore quand elles se trouvent ensemble, et on n'a qu'à additionner les résultats. Il n'en est pas de même pour les phénomènes dont s'occupe spécialement la science chimique. Là, la plupart des uniformités auxquelles se conforment les causes agissant séparément, disparaissent entièrement quand elles sont réunies ; et nous sommes hors d'état, du moins dans l'état actuel de la science, de prévoir, avant une expérimentation directe, le résultat d'une combinaison nouvelle." (Mill, 1843)

Enfin, Mill en conclut pour un corps vivant qu'il ne sera jamais possible de comprendre ou de prédire son comportement à partir de la simple connaissance et

addition des propriétés de ses divers ingrédients. C'est dans cette *irréductibilité* d'un niveau macroscopique à un niveau microscopique que se situe l'intérêt central des émergentistes britanniques.

Afin d'étudier ces phénomènes irréductibles, les émergentistes examinent les interactions a) entre les éléments d'un niveau et b) entre les différents niveaux eux-mêmes. A partir de ces observations, ils concluent que d'une part il peut exister des entités qui émergent à des niveaux supérieurs et qui ont des propriétés qu'on ne trouve à aucun des niveaux inférieurs (irréductibilité) et, d'autre part on ne peut pas prédire ces nouvelles propriétés émergentes à partir de celles qu'on trouve aux niveaux inférieurs (imprévisibilité).

Cette division du monde en niveaux emboîtés les uns dans les autres se reflète dans les sciences jusqu'à nos jours et détermine les disciplines scientifiques ainsi que les propriétés - propre à chaque niveau - étudiées par ces disciplines. Ainsi, la physique étudie des atomes, la chimie des molécules, la biologie des cellules, la physiologie étudie des organes, les propriétés psychologiques d'un individu ou d'un organisme sont envisagées par la psychologie et, enfin, collectifs et sociétés par les sciences sociales.

Selon la structure étudiée, on peut la diviser en plusieurs niveaux. Chacun de ces niveaux a ses propriétés individuelles ne s'appliquant pas aux niveaux supérieurs. En étudiant des phénomènes d'émergence, nous portons désormais notre regard sur les interactions entre ces niveaux d'organisation.

1.2.7.7 Taxonomie de l'émergence

Comment le comportement individuel des membres d'une population donne-t-il naissance à des phénomènes sociaux tels qu'une législation? Comment apparaît la conscience à travers des interactions de neurones? Qu'est-ce qui donne naissance à un organisme dans un conglomérat de cellules? Les occurrences des phénomènes émergents semblent abondantes. Nous allons tenter ci-dessous, de trouver les critères qui définissent et décrivent l'émergence.

Afin d'élaborer cette taxonomie de l'émergence, je me référerai surtout à deux textes : "Les phénomènes émergents", un article inédit de Bernard Walliser (ENPC, EHESS) écrit en mars 2006, un article intitulé "Varieties of Emergentism" d'Achim Stephan (1999) ainsi qu'une série de cours organisée par Henri Berestycki et Michel Morvan à l'EHESS sur l'émergence dans les systèmes complexes. Les deux textes mentionnés ci-dessus proposent des analyses de différents types d'émergence permettant leur classification et donnant les conditions pour une modélisation éventuelle.

1.2.7.8 Définitions

Dans la plupart des utilisation "techniques" le terme émergence dénote d'après Walliser des phénomènes imprévisibles - voire inexpliqués - à un niveau macroscopique. Selon l'interaction de ce niveau macroscopique avec le niveau microscopique sous-jacent, ces phénomènes peuvent prendre des formes diverses allant de simples régularités statistiques à de nouvelles entités originales.

Des conditions plus strictes ont été proposées par Frédéric Nef lors d'une présentation en mai 2006 à l'EHESS. D'après Nef des propriétés émergentes sont:

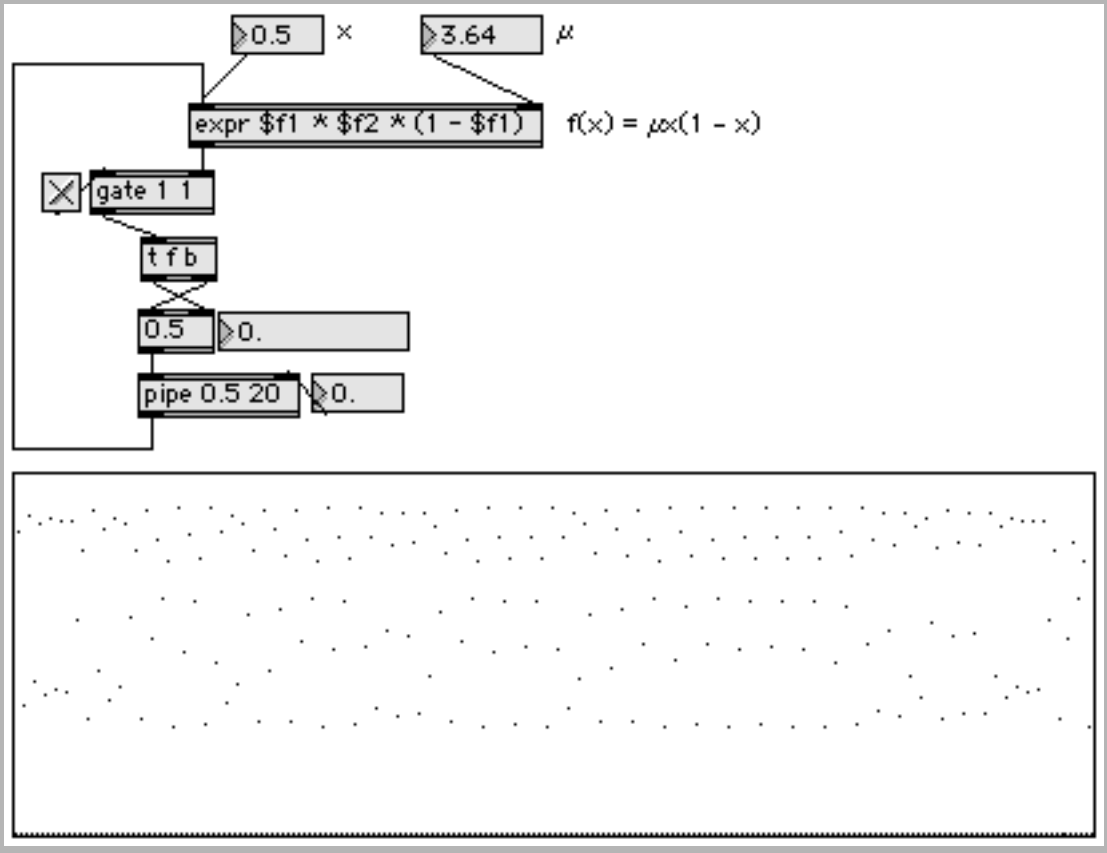
- imprévisibles
- nouvelles
- irréductibles

1.2.7.9 Imprévisibilité

Les propriétés émergentes sont des traits systématiques d'objets (ou systèmes) complexes qui ne peuvent cependant pas être prédits - même par un esprit omniscient - à partir d'un stade pré-émergent, en dépit d'une éventuelle connaissance approfondie des traits et lois gouvernant les parties de cet objet complexe. Dans le cas de la modélisation, nous pouvons dire plus simplement qu'il n'existe pas de moyen de prédire un résultat final sans passer par toutes les opérations, sans simuler toutes les interactions du système modélisé. Nous sommes à chaque fois obligés de laisser évoluer le système dans sa temporalité.

Une exception possible, donnée par Michel Morvan lors d'une présentation en mai 2006 à l'EHESS, est l'exemple d'un tas de sable : il est supposé que le tas de sable est un système complexe avec des unités (les grains de sable) en interaction (les grains qui s'entrechoquent). Un tel système arrivera toujours à la même forme de tas en passant chaque fois par des chemins différents. Même si ces chemins ne sont pas prévisibles, la forme finale qui émerge l'est.

Imprévisibilité mathématique : f(x) = *μ*x(1-x)



implémentation de f(x) = μx(1 – x) dans MaxMSP

Un exemple typique de l'indéterminisme mathématique donné par Stephan (1999) est la fonction logistique f(x) = *μ*x(1 – x) pour 0 < x < 1. Pour le paramètre *μ* entre 0 et 4, le résultat de cette fonction sera toujours entre 0 et 1. En variant la valeur *μ* lors d'itérations répétées, différents comportements peuvent être observés.

Pour μ entre 0 et 1, f(x) tend vers l'attracteur 0 pour toutes les valeurs x après un nombre suffisant d'itérations.

Pour μ entre 1 et 3 on observera un attracteur de valeur A = 1 - 1/μ. La fonction trouve donc un équilibre stable. Pour μ égale à 3 un seul attracteur A est trouvé, mais f(x) ne converge que très lentement, indiquant un changement important dans son comportement.

Ainsi pour μ entre 3 et 4 le comportement de f(x) devient plus complexe : pour les valeurs μ entre 3 et $1+\sqrt{6}$ (env. 3.4494897), f(x) oscille entre deux attracteurs. Pour les valeurs entre 3.4494897 et 3.58 nous observons une cascade d'attracteurs : ainsi, pour $1 + \sqrt{6} < \mu <$ 3.56 la fonction convergera sur 4 attracteurs, à 3.56 sur 8 attracteurs, à 3.567 sur 16 attracteurs et ensuite sur une séquence rapide de 32, 64, 128, ... attracteurs.

Vers 3.58 cette séquence se termine et la prédiction semble impossible - f(x) génère donc une suite de nombres quasi-aléatoires et chaotiques.

1.2.7.10 Nouveauté

Une propriété émergente est un type de propriété fondamentalement nouvelle. Ici, la nouveauté n'est pas nécessairement temporelle dans le sens où elle devrait se référer à la première occurrence d'un phénomène particulier : ainsi, par exemple, la taille d'une femme de 1.7532983 mètre, même si elle était la première occurrence de cette taille précise pour une femme, n'est pas une propriété émergente au sein de la société.

Une propriété émergente est donc une propriété qui n'est possédée par aucune des parties du système observé, mais seulement par l'ensemble de ce système.

Pour Stephan (1999) cependant, la notion de nouveauté est forcément temporelle et dissociable de l'imprévisibilité.

1.2.7.11 Irréductibilité et survenance

Un exemple pour l'irréductibilité d'une propriété émergente a déjà été donné par Mill (1843) dans ses observations chimiques. Il est utile pour une formalisation de cette idée d'introduire le concept de survenance (*supervenience*).

Un ensemble A survient sur un ensemble B si et seulement si tout changement dans A entraîne nécessairement un changement dans B. (McLaughlin et al., 2006) Ainsi la distribution des couleurs sur un tableau survient sur les propriétés microphysiques de ce tableau. Il est impossible de changer la distribution des couleurs sans changer nécessairement les propriétés microphysiques du tableau.

L'origine du terme *supervenience* en anglais n'est pas très claire. Il a été souvent utilisé dans la littérature émergentiste britannique (p.ex. Morgan 1923), mais son utilisation philosophique se distingue de son utilisation courante. En tout cas Donald Davidson joue un rôle central dans l'introduction du terme "*supervenience"* dans la philosophie de l'esprit:

"Mental characteristics are in some sense dependent, or supervenient, on physical characteristics. Such supervenience might be taken to mean that there cannot be two events exactly alike in all physical respects but differing in some mental respects, or that an object cannot alter in some mental respects without altering in some physical respects." (Davidson, 1970)

Ainsi, d'après Davidson, les états mentaux surviennent sur les propriétés physiques.

Dans le cas de l'émergence, on peut dire que si une propriété P d'un objet O émerge sur un ensemble de propriétés des parties de O, alors la propriété P survient sur les propriétés des parties de O (la base). La propriété P dépend donc des propriétés de la base et covarie en même temps que ces propriétés, sans pour autant être réductible à ces propriétés de la base.

Or, la survenance n'entraîne pas toujours un phénomène émergent. Ainsi le poids survient sur la masse sans qu'il soit une propriété émergente de la masse. Néanmoins, la survenance des propriétés émergentes affirme que les propriétés des parties de O (niveau microscopique) sont suffisantes, mais non forcément nécessaires pour rendre compte d'un phénomène émergent (niveau macroscopique). Cela veut dire qu'une même combinaison de propriétés microscopiques donnera toujours naissance au même phénomène émergent sans pour autant être la seule combinaison possible. Le phénomène émergent est donc multi-réalisable. Par contre, deux phénomènes émergents différents ne résulteront jamais de la même combinaison de propriétés microscopiques. Ainsi un organisme peut résulter de cellules différentes qui se renouvellent sans cesse.

1.2.7.12 Émergence unilatérale vs. émergence bilatérale

Il est nécessaire pour cette distinction de considérer plusieurs niveaux d'observations: le niveau microscopique constitué d'unités plus ou moins indépendantes en interaction, et le niveau macroscopique dans lequel est observable le phénomène émergent. Dans le cas de l'émergence unilatérale nous supposons que le niveau microscopique engendre, *à lui seul,* les phénomènes macroscopiques. Il suffit donc, pour ce type d'émergence, d'analyser les éléments suivants:

- les propriétés des unités constituant le niveau microscopique
- leurs relations ou interactions
- le contexte externe

Ici, la relation entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique est à sens unique. Ainsi, par exemple, des particules ont des charges électriques qui ne dépendent pas du champ électrique lui-même - elles le créent. Les propriétés microscopiques se combinent donc pour donner naissance à des propriétés macroscopiques sans que ces propriétés macroscopiques agissent sur le niveau microscopique en retour.

Dans le cas de l'émergence bilatérale, la relation entre les deux niveaux, micro- et

macroscopiques, est plus complexe. Il est supposé que comme dans l'émergence unilatérale les propriétés, les interactions ainsi que le contexte du niveau microscopique engendrent des phénomènes émergents dans le niveau macroscopique. Par contre, pour le cas de l'émergence bilatérale, les propriétés émergentes au niveau macroscopique conditionnent en retour les propriétés des unités du niveau microscopique formant ainsi une boucle entre les deux niveaux. Par exemple, un individu subit des influences de la société que lui même contribue à modifier ou encore : un corps chimique est transformé par les produits même de la transformation à laquelle il participe.

La première partie de cette boucle, celle expliquant comment des combinaisons des propriétés microscopiques créent des propriétés macroscopiques correspond au phénomène d'émergence unilatérale. Cette relation est appelée *bottom-up.* La deuxième partie de la boucle - la relation *top-down* influence les éléments microscopiques. Il est supposé que cette relation *top-down* - cette influence directe du niveau macroscopique sur le niveau microscopique est irréductible à des relations bilatérales entre entités microscopiques.

Les propriétés des unités microscopiques peuvent être influencées par des grandeurs macro. Les propriétés psychologiques d'un enfant sont individuelles et propres à chaque enfant. Néanmoins il existe une influence sociologique comme par exemple un pré-conditionnement des enfants par le moule scolaire.

Müller (2002) donne l'exemple de fourmis fourrageant qui se déplacent entre leur nid et une source de nourriture pour l'émergence bilatérale. Chaque fourmi dépose lors de son passage une trace de phéromones sur son chemin attirant ainsi d'autres fourmis. Ce type d'interaction locale entre fourmis engendre un phénomène macro, une route de fourmis visible pour un observateur externe. Ce phénomène macro agit en retour sur le niveau micro, les fourmis, qui sont attirées par les phéromones créant cette route. De plus, l'accumulation de phéromones se faisant plus rapidement sur le chemin le plus court entre nid et source de nourriture, est une façon d'optimisation par auto-organisation.

Pour ce qui est des relations entre les unités microscopiques il faut différencier les interactions *sub-induites* des interactions *super-induites*. Une interaction sub-induite

est propre au comportement individuel (par exemple les caractéristiques hormonales peuvent engendrer des relations sexuelles) tandis qu'une interaction super-induite résulte de contraintes provenant d'un niveau macroscopique (le milieu social défendant certaines relations sexuelles).

Le troisième élément régulant les propriétés des éléments au niveau microscopique est le contexte - les influences externes au niveau microscopique du système observé. Dans le cas de l'émergence unilatérale, ces influences se limitent au contexte externe, telles une cellule de peau qui subit des perturbations provenant de l'environnement qui entoure l'organisme. Par contre, dans le cas de l'émergence bilatérale, il est nécessaire de considérer également un contexte "interne" ou englobant provenant du niveau macroscopique. Ainsi une cellule de peau est exposée non seulement aux agressions externes mais aussi aux influences de l'organisme auquel elle appartient.

1.2.7.13 Émergence synchronique vs. émergence diachronique

L'émergence synchronique s'applique à des systèmes où les influences ascendantes (*bottom-up*) s'exercent en même temps que les influences descendantes (*top-down*). L'émergence diachronique, par contre, s'applique aux systèmes où les influences descendantes s'exercent plus lentement que les influences ascendantes. Walliser donne les exemples suivants pour un rapport diachronique:

"Ainsi, en mécanique, des billes peuvent se déplacer à court terme à l'intérieur d'un bol tandis qu'à long terme, la forme du bol peut elle-même varier sous l'influence des billes ou d'autres facteurs. En économie, les quantités de biens offertes et demandées s'adaptent aux prix fixés à court terme tandis que les prix évoluent eux-mêmes à long terme sous l'influence des offres et demandes ou de facteurs extérieurs."

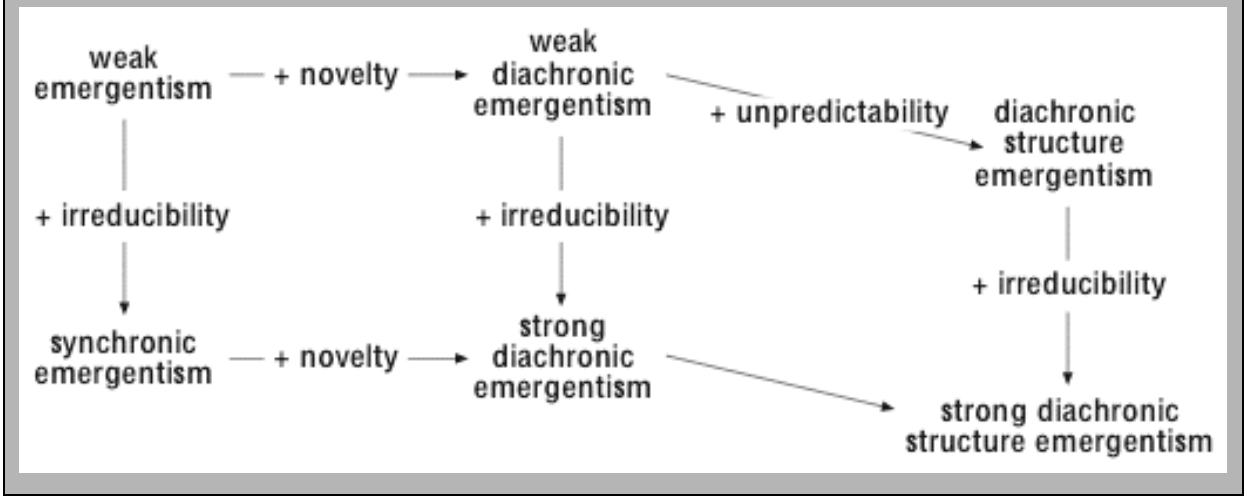
D'après Stephan (1999), la relation entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique dans le cas de l'émergence synchronique peut être considérée hors du temps en observant les rapports entre un système et ses parties constituantes. Le

critère central dans ces observations est donc l'irréductibilité d'une propriété émergente. Les phénomènes émergents synchroniques étant irréductibles, ils sont forcément imprévisibles avant leur première occurrence, quand on les observe dans le temps.

La stabilisation d'un système synchroniquement émergent n'est possible qu'à des états d'équilibre entre l'influence ascendante et l'influence descendante. Une fois qu'un tel équilibre est trouvé, des perturbations externes sont nécessaires afin de faire dévier / évoluer le système. Walliser appelle ce type de phénomène émergent "auto-renforçant".

Dans le cas de l'émergence diachronique, grâce aux échelles temporelles différentes entre les deux niveaux, des comportements parfaitement réversibles au niveau microscopique peuvent, à travers le temps, engendrer peu à peu un phénomène irréversible au niveau macroscopique. De même, des phénomènes discontinus tels les impulsions électriques des neurones font émerger des états mentaux continus.

Les différentes propriétés de phénomènes émergents sont montrées sous forme synthétique par Stephan (1999) dans le schéma suivant.



1.3 Cartes auto-organisatrices

Les cartes auto-organisatrices (*self-organizing maps - SOM*) sont une architecture de réseaux de neurones artificiels développée par Teuvo Kohonen au début des années 1980 (Kohonen, 1982). Typiquement, les SOM sont utilisés pour l'analyse et la visualisation de données à haute dimensions (des données décrivant des états d'un système avec beaucoup de paramètres) dans un espace généralement compris entre une et trois dimensions. Les applications de cette technique sont nombreuses : la classification de typhons (Kitamato, 2002), l'analyse de données d'IRM fonctionnelle (Kai-Hsiang et al., 1999), la reconnaissance vocale (Kurimo, 1997), l'acquisition et l'organisation de grandes collections de documents tels que des newsgroups sur internet ou des articles dans l'Encyclopedia Britannica (WEBSOM) (Lagus et al., 2004) ou encore l'analyse de l'apprentissage de la musique tonale occidentale (Tillmann et al., 1998).

Le fonctionnement du SOM tel qu'il a été présenté par Teuvo Kohonen en 1990 est le suivant: Une carte auto-organisatrice constituée par un réseau d'unités fonctionnelles (neurones). Des observations multi-dimensionnelles sont encodées dans des vecteurs dont le nombre d'éléments correspond au nombre de dimensions / paramètres utilisés pour l'observation.

Ces vecteurs sont associés à toutes les unités de la carte qui essaient chacune de représenter chaque vecteur avec une précision optimale. Le nombre de vecteurs qu'une carte peut représenter dépend du nombre d'unités dans la carte. Grâce à des réponses combinées de plusieurs unités, le nombre de vecteurs représentés est supérieur au nombre d'unités. En même temps, les représentations des vecteurs s'organisent dans la topologie de la carte afin que des vecteurs similaires soient proches l'un de l'autre et *vice versa*.

organisation de huit images différentes par un SOM à seize unités. Image réalisé avec jit.robosom

Lors de la présentation d'un vecteur au SOM, un neurone gagnant est déterminé en calculant une distance (en général euclidienne) entre le vecteur présenté et le vecteur représenté par chaque neurone. Le neurone gagnant est celui qui est le plus proche du vecteur présenté. La matrice contenant toutes les distances pour un vecteur donné est l'activation du SOM pour un certain stimulus et peut être comparé à une sorte de résonance à ce stimulus.

Visualisation de l'activation d'une carte auto-organisatrice (16 neurones) à un stimulus donné. Chaque pixel représentant un neurone artificiel, les parties plus foncées indiquent des neurones proches du stimulus ; les parties plus rouges indiquent des neurones peu similaires.

Après la détermination du neurone gagnant, celui-ci et un sous-ensemble de neurones proches du gagnant (son voisinage) sont mis à jour par une règle d'apprentissage. Cette règle tend à rendre plus précise la représentation du stimulus.

Voici la condition pour l'identification du neurone gagnant:

$$\forall i, ||\mathbf{x}(t) - \mathbf{m}_c(t)|| \leq ||\mathbf{x}(t) - \mathbf{m}_i(t)||.$$

t = 1, 2, ... étant l'index de pas où un pas correspond à une présentation d'un vecteur / stimulus x(t). le neurone gagnant est c.

Ensuite, les poids synaptiques du neurone gagnant c = c(x) ou alors les neurones voisins à l'intérieur d'un rayon sont modifiés de la façon suivante (fonction d'apprentissage) :

$$\mathbf{m}_i(t+1) = \mathbf{m}_i(t) + h_{c(\mathbf{x}),i}(\mathbf{x}(t) - \mathbf{m}_i(t)).$$

le rayon est généralement une fonction décroissante de la distance entre le neurone i et le neurone gagnant c:

$$h_{c(\mathbf{x}),i}$$

Les propriétés du dispositif de Pask comparées à celles du SOM

Les propriétés du dispositif de Pask, telles qu'elles ont été proposées par Cariani (1993) montrent des similarités avec le SOM. Voici un rappel abrégé de ces propriétés (voir chapitre 1.2.7.3 auto-organisation) :

- **fermeture structurelle**
- **variété structurelle**
- **autonomie structurelle**
- **ouverture informationnelle**

Dans sa structure le SOM est fermé (*structural closure*) dans le sens où il adapte ses poids synaptiques grâce à sa règle d'apprentissage. Ces poids étant initialisés de façon aléatoire et ensuite modifiés par la fonction d'apprentissage inhérente au SOM, sa structure interne n'est pas définie par son concepteur. Cela confère au SOM une *autonomie structurelle.*

La façon dont évoluent les poids synaptiques du SOM dépend de ses stimulations, de ses influences externes. Même si à ce niveau là, il y a un encodage choisi par le concepteur ou l'utilisateur du système, on doit considérer le SOM comme ouvert à son environnement (*informational openness*).

La variété structurelle, finalement, est liée au nombre des neurones simulés dans le SOM ainsi qu'à la taille des vecteurs utilisés. Ainsi le nombre de poids synaptiques

correspond au produit de ces deux éléments. Pour un SOM de 25 neurones traitant des vecteurs de 16 éléments par exemple, il existe 400 poids synaptiques. Selon l'architecture informatique utilisée, la taille d'un SOM peut facilement dépasser plusieurs centaines de neurones. Si les vecteurs utilisés sont petits, ce nombre est encore plus important.

1.3.1 Réalisation informatique d'un SOM

1.3.1.1 MaxMSP Jitter

MaxMSP-Jitter (Max) (asdf) est un environnement de programmation graphique destiné aux applications multi-médias dont les premières versions ont été programmées dans les années 1980 par Miller Puckette à l'IRCAM, Centre Pompidou. Depuis 1999, Max est commercialisé par l'entreprise Cycling'74 à San Francisco. Au cours des années, Max est devenu *de facto* le langage standard dans les applications musicales interactives et installations sonores.

Initialement, Max était destiné à être un contrôleur informatique d'équipements externes tels que synthétiseurs, échantillonneurs, etc. au moyen de protocoles de contrôle tels que le MIDI. Les données manipulées à ce niveau sont généralement symboliques ou des commandes haut-niveau telles que des valeurs de notes ou de vélocités, des listes de paramètres, etc.

L'échelle temporelle à laquelle sont effectuées différentes chaînes d'opérations est de l'ordre de 1000Hz. En 1997 était publiée une collection d'extensions audio nommée MSP (pour "Max Signal Processing", ou les initiales de Miller S. Puckette) fonctionnant à 44.1kHz ou 48kHz et permettant ainsi le traitement du signal tel que la synthèse ou la transformation sonore.

Le nombre de fonctions ou *objets*[1] standard de MaxMSP, donc sans compter des objets développés par des parties tierces, est d'environ 350. En interconnectant ces 350 objets il est alors possible de créer des systèmes de flux audio ainsi que des

[1] Des fonction écrites en C

chaînes de contrôle très complexes permettant la création de nouveaux traitements sonores ou synthétiseurs numériques. Dans son principe d'utilisation Max ressemble aux synthétiseurs modulaires analogiques où on créait des chaînes de synthèse et de traitement en reliant des modules à l'aide de câbles audios.

1.3.1.2 jit.robosom

Enfin, en 2003, Cycling'74 publie *Jitter,* module de traitement vidéo accompagné d'une collection d'environ 200 objets Max fondés sur la manipulation de données sous forme de matrices destinées à la transformation vidéo. C'est en utilisant principalement ce type d'objets que j'ai écrit *jit.robosom* en juin 2004 au CIRM, Centre National de Création Musicale à Nice dans le cadre de mes études en composition électroacoustique.

L'objet jit.robosom est disponible sur internet avec une série d'exemples ainsi qu'une documentation[1]. Jit.robosom a été utilisé dans divers projets, dont *For Alan Turing* et *Caresses de Marquises* décrits dans ce mémoire ainsi que par divers artistes et chercheurs utilisant MaxMSP.

Mon mémoire "Applications musicales de cartes auto-organisatrices: jit.robosom", en annexe à ce mémoire, décrit en détail le fonctionnement de cette implémentation ainsi que les exemples distribués avec elle. Ce mémoire technique a été validé avec la mention "très bien" pour mon diplôme d'études musicales au Conservatoire National de Région de Nice en 2004.

Pour la programmation du noyau même d'une carte auto-organisatrice, Jitter n'est probablement pas l'environnement optimal. Aux points de vue de la souplesse et de l'élégance, des langages comme le LISP, le Python ou le Java dépassent Jitter. Pour ce qui est de la vitesse de calcul, le C est sûrement plus efficace. Je suis actuellement impliqué dans une évaluation de faisabilité d'une implémentation OpenGL, ce qui permettrait de calculer des SOM sur les processeurs de cartes graphiques, optimisés pour le calcul parallèle d'images. Une telle implémentation

[1] http://robin.meier.free.fr

serait encore plus rapide que le C et permettrait ainsi la modélisation de cartes auto-organisatrices avec un très grand nombre de neurones formels et des vecteurs d'entrée très larges, contenant beaucoup d'informations. Une grande taille de vecteurs permet par exemple le traitement par un SOM en temps réel d'images vidéo ou d'analyses FFT du son à haute définition. Par une vitesse de calcul bien supérieure à la version actuelle de jit.robosom, il serait peut-être même envisageable de faire fonctionner un SOM à 44.1kHz, permettant du traitement audio en temps réel.

Malgré ces quelques désavantages de Jitter, l'environnement Max reste une plateforme d'expérimentation intéressante par sa souplesse de programmation et d'exploitation. Par son côté graphique et en temps réel, Max permet de changer un programme pendant son fonctionnement et d'expérimenter ainsi différentes implémentations et architectures à la volée. De plus, à cause de l'orientation multi-média de Max, tout est en place pour l'utilisation de *jit.robosom* dans un contexte musical, visuel ou autre.

1.3.1.3 Utilisation et paramètres de jit.robosom

Arguments

1er argument : Le nom du SOM. Cette dénomination permet d'envoyer des messages à une instance de jit.robosom sans connecter la boîte de messages à l'objet jit.robosom lui-même. C'est aussi une méthode efficace d'organisation, quand on travaille avec plusieurs SOM en même temps.

2ème argument : « number of neurones » Définit la taille du SOM. Comme dans cette version de jit.robosom toutes les cartes sont carrées ce nombre doit être un nombre carré.

3ème argument : « number of dimensions » Définit le nombre de dimensions du SOM et ainsi la taille des stimuli et la taille des réponses.

Entrées et sorties

jit.robosom a quatre entrées (inlets) et quatre sorties (outlets) :

1er inlet : « learn on / off » Permet de mettre en marche l'apprentissage ou de l'arrêter. Cela permet p.ex. de voir comment le SOM classe une certaine entrée, sans qu'il adapte ses poids synaptiques.

2ème inlet : « radius » (rayon) Dans cette implémentation de jit.robosom la rayon maximal est 1.

3ème inlet : « input-vector » C'est ici qu'on envoie les stimuli en forme de matrices jitter pour le SOM. La taille des matrices doit correspondre au nombre de dimensions du SOM, désigné comme 3ème argument de jit.robosom.

4ème inlet : « learning-rate » Le taux d'apprentissage (c.f. chap. 5.3.1 Apprentissage supervisé)

1er outlet : « winning neuron » Les poids synaptiques du neurone gagnant en forme d'une matrice jitter qui logiquement a la même taille que les stimuli.

2ème outlet : « number of winning neuron » Le nombre attribué au neurone gagnant. Dans une carte de 3 sur 3 neurones p.ex., la numérotation est comme suit :

1 2 3
4 5 6
7 8 9

3ème outlet : « Error of winning neurone » Le taux d'erreur du neurone gagnant. Le taux d'erreur correspond à la distance euclidienne entre le stimulus et le neurone. Un taux d'erreur faible indique que le neurone gagnant et le stimulus se ressemblent fortement.

4ème outlet : « Epoch » : un cycle complet d'apprentissage qui consiste en

• Une présentation d'un stimulus
• Une désignation du neurone gagnant
• Une modification des poids synaptiques

Messages de contrôle

« reset » : initialise les poids du SOM. À faire avant chaque apprentissage.

« temp $1 » : monte la température de la valeur spécifié par la variable $1. Valeur par défaut = 0

« learntemp $1 » : monte « learntemp » de la valeur spécifiée par la variable $1. Valeur par défaut = 0

« init_range $1 » : Définit la borne supérieure des valeurs aléatoires qui sont utilisées pour l'initialisation des poids synaptiques du SOM. Valeur par défaut = 0.02 (la borne inférieure est toujours 0). Si les valeurs envoyées au SOM ne sont pas comprises entre 0. et 1. mais entre 0. et 127. p.ex. il peut être utile de monter init_range (jusqu'à 2. p.ex.)

« version » : imprime dans la fenêtre « Max » des informations sur la version du SOM utilisé, ainsi que les valeurs « init_range », « temp » et « learntemp ».

Matrices

Comme dans Jitter les matrices peuvent avoir des noms, il est possible de récupérer le contenu de certaines matrices en dehors de l'abstraction jit.robosom. Deux matrices en particulier sont utiles dans le travail avec les SOM.

« jit.matrix $1-küde » : $1 doit être remplacé par le nom du SOM (1er argument). Cette matrice contient tous les poids synaptiques du SOM. Cela peut être utile quand on veut visualiser toutes les données qui sont dans le SOM comme dans l'exemple «

2 classification images », où dans le patcher « show_me_the_map_ !!! » tous les neurones sont visualisés.

« jit.matrix $1-error » : $1 doit être remplacé par le nom du SOM (1er argument). Cette matrice contient les erreurs (distances euclidiennes) pour chaque neurone. Elle est mise à jour une fois par cycle d'apprentissage. L'erreur de toutes les unités nous informe sur l'activation du SOM. Ainsi une grande activation indique une petite erreur et donc une représentation fidèle du stimulus dans la carte et *vice versa.*

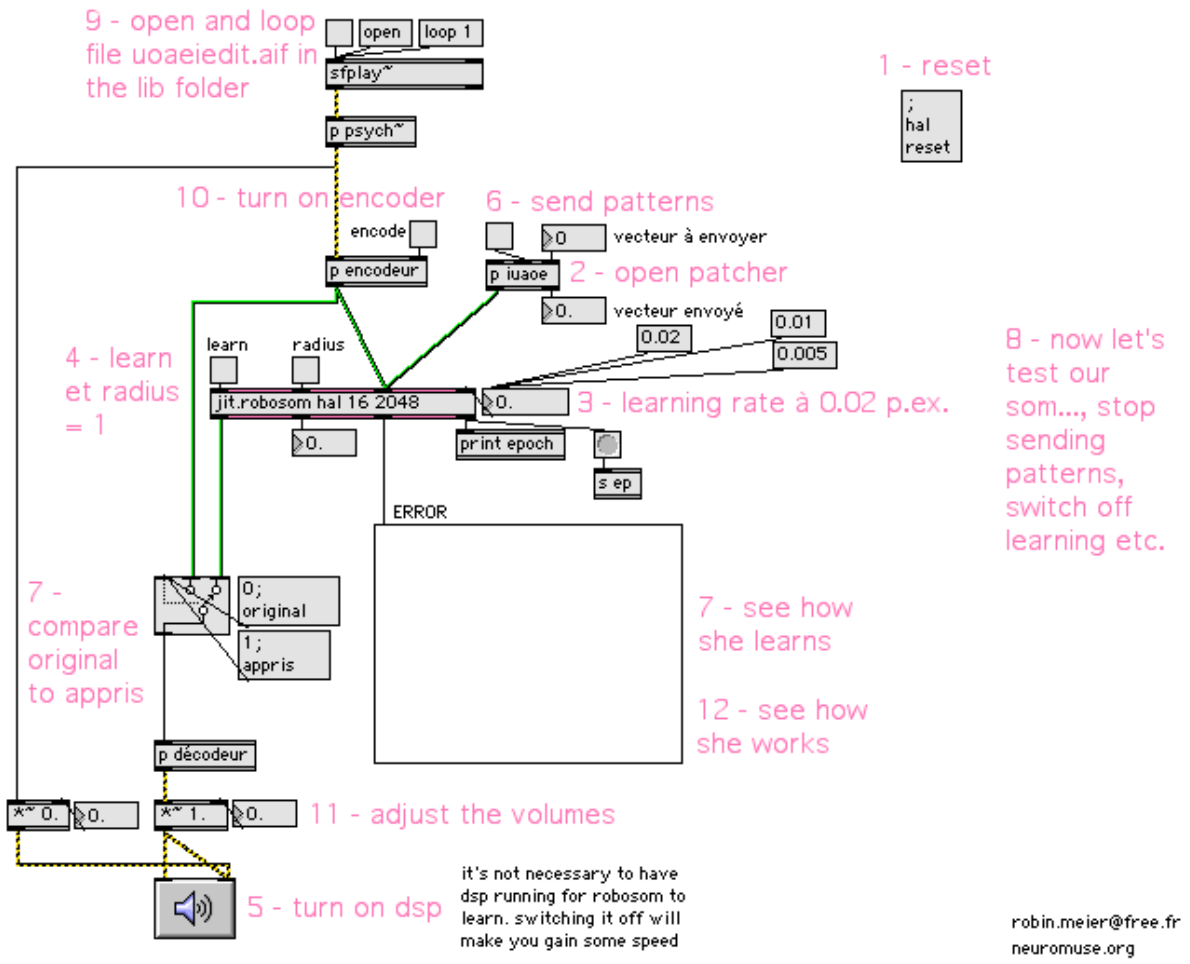
Pour une discussion détaillée de jit.robosom je renvoie le lecteur à mon mémoire du Conservatoire National de Région en annexe.

1.3.2 Reconnaissance vocale et classification de voyelles

L'exemple suivant montre l'application d'une carte auto-organisatrice dans MaxMSP Jitter pour la reconnaissance et la resynthèse vocale ainsi que la classification topologique des voyelles apprises dans la carte.

Dans cet exemple, un signal audio numérique est encodé en concaténant quatre fenêtres successives d'une transformation de Fourrier (FFT) à 512 bandes. Cela donne des vecteurs d'entrée à 2048 dimensions (ou éléments) qu'on donne à "écouter" à un SOM de 16 neurones, nommé HAL. Pour faciliter l'utilisation du *patch,* un tel encodage de cinq fichiers sons contenant des extraits des voyelles *a, e, i, o, u* a été sauvegardé en format Jitter jxf.

Lors de l'apprentissage, il est déjà possible d'écouter la réponse du SOM. Comme, par correction récursive, les neurones s'adaptent de plus en plus aux stimuli, les réponses du SOM vont ressembler de plus en plus aux stimuli. Ces réponses sont rendues audibles par une FFT inverse (module "décodeur").



Le programme ou "patch" HAL utilisé pour cet exemple fait partie des exemples distribués avec "jit.robosom".

Un module "erroranalysis" permet de suivre visuellement l'évolution des poids synaptiques du SOM. On voit alors comme les activations de neurones se déplacent au fur et à mesure de l'apprentissage, pour finalement donner à chaque stimulus et ainsi à chaque voyelle sa place sur la carte.

Une vidéo de cette évolution de la carte se trouve sur le CD-ROM accompagnant ce mémoire ainsi que sur internet[1].

Grâce à l'effet d'auto-organisation du SOM des voyelles spectralement similaires telles que *i* et *u* sont placées les unes proches des autres. Des voyelles spectralement éloignées se trouvent éloignées aussi dans la carte du SOM.

[1] http://www.neuromuse.org/txt/tutorial/Hal04.html

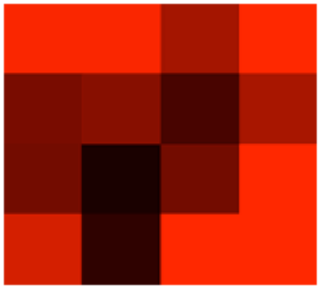


Fig. 24 : Activation du SOM lors de la voyelle « U »
Le centre de l'activation se trouve en bas à gauche

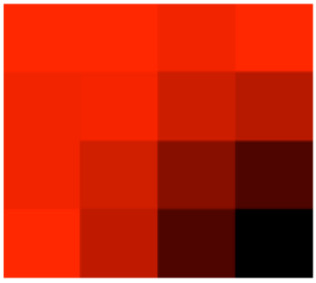


Fig. 25 : Activation du SOM lors de la voyelle « O »
Le centre de l'activation se trouve en bas à droite

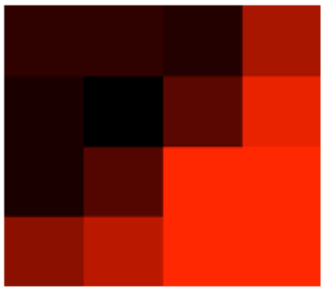


Fig. 26 : Activation du SOM lors de la voyelle « I »
Le centre de l'activation se trouve en haut à gauche

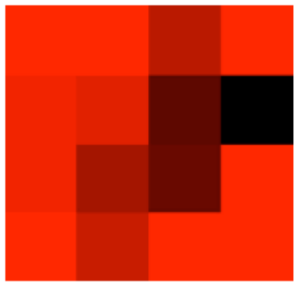


Fig. 27 : Activation du SOM lors de la voyelle »E »
Le centre de l'activation se trouve en haut à droite

Fig. 28 : Activation du SOM lors de la voyelle « A »
Le centre se trouve près du « U » mais n'est pas très développé

Le placement respectif des voyelles i a e o u dans la carte de HAL comme décrit dans mon mémoire « jit.robosom : applications musicales de cartes auto-organisatrices » (cf. annexe).

1.3.3 Cartes de timbres

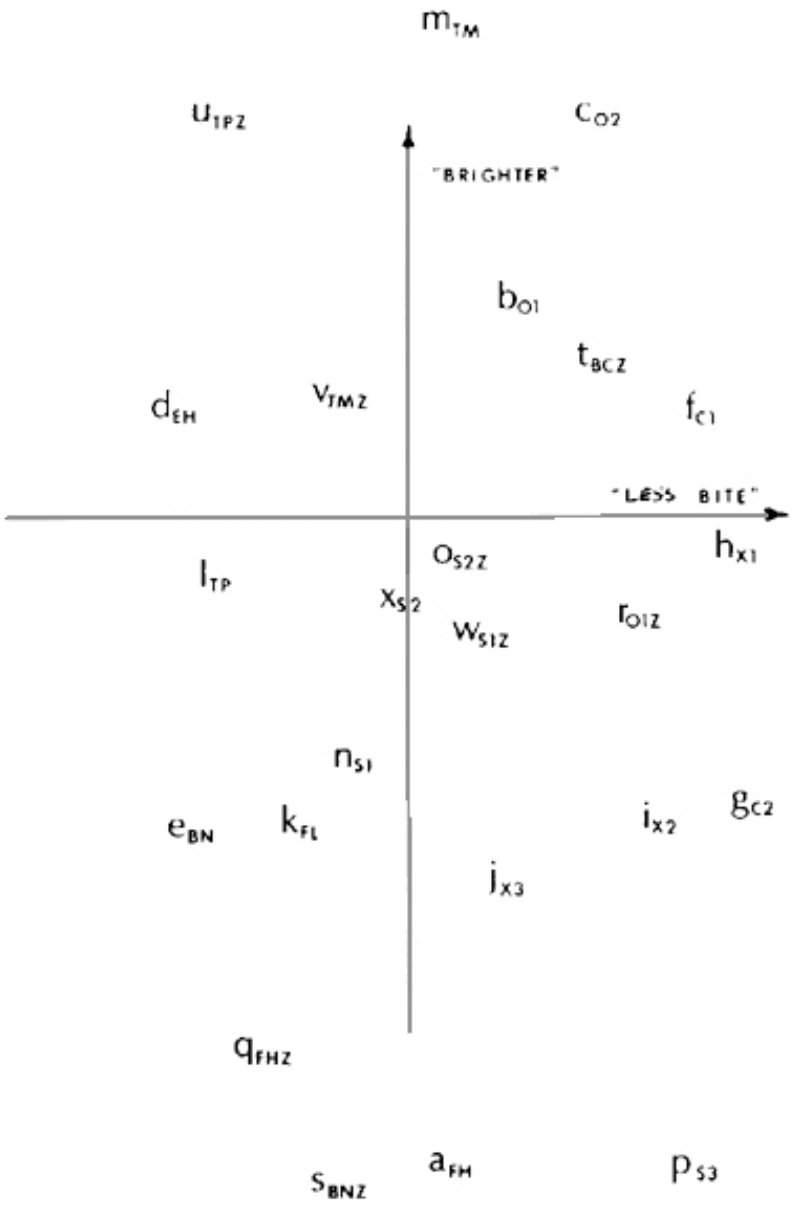
L'organisation des qualités timbrales du son occupe le monde musical depuis longtemps. Pierre Schaeffer avec son *Traité des Objets Musicaux* (1966) était parmi les premiers à adopter une démarche systématique dans l'organisation et la catégorisation de sons. D'une manière phénoménologique, Schaeffer introduit des

catégories pour l'organisation de tout objet sonore en partant de ses qualités perceptives: au lieu de parler de *fréquence* par exemple, il parle de *hauteur* pour bien distinguer entre des qualités physiques mesurables et des qualités perceptives.

Plus tard, David Wessel (1978) décrit dans "Low dimensional control of musical timbre" la constitution d'une carte de timbres, obtenue à partir des réponses de plusieurs sujets comparant des sons de synthèse dans une expérience conduite par Wessel à l'IRCAM à Paris.

“Though there exist a variety of ways to collect perceptual dissimilarities, we have found simple ratings of the extent of dissimilarity to be the most efficient and least tedious way to make the judgments. At IRCAM we have been using direct estimates of the dissimilarity between two tones. Our listening judge, using a program written by Bennett Smith called ESQUISSE, sits before a CRT display terminal and an audio system fed by the computer's digital-to-analog converters. The two sounds in a pair are related to the terminal keys "m" and "n", allowing the listener to play the sounds at will. After listening, the judge enters a rating with one of the keys "0" through "9" on the terminal. Immediately after the judgment is entered, the next pair of tones is ready to be played from the keyboard. The sequencing of the judgment trials is random, and all of the n(n - 1)/2 pairs are used, where n is the number of sounds under study. After all the pairs have been judged, the random sequence is unscrambled and a matrix of dissimilarities is formed.”

Les données ainsi obtenues sont ensuite visualisées sur diverses cartes bidimensionnelles.



visualisation de 24 sons de synthèse ressemblant à des sons instrumentaux. Les lettres en index sont des abréviations pour les différents stimuli. D'après Wessel (1978) : 01, 02 = oboes, FH = French horn, BN = bassoon, C1 = E-flat clarinet, C2 = bass clarinet, FL = flute, X1 X2, X3 = saxophones, TP = trumpet, EH = English horn, S1 = cello played sul ponticello, S2 = cello played normally, S3 = cello played muted sul tasto, FHZ = modified FH with spectral envelope, BNZ = modified BN with FH spectral envelope, S1Z = modified S1 with S2 spectral envelope, S2Z = modified S2 with S1 spectral envelope, TMZ = modified TM with TP spectral envelope, BCZ = modified C2 with 01 spectral envelope, 01Z modified 01 with C2 spectral envelope.

L'utilisation et surtout la quantification de données subjectives sont problématiques,

comme Wessel le note lui-même. Des unités de mesure ainsi obtenues dépendent fortement du contexte de l'expérience. Par exemple, l'échelle des unités subjectives telle que les *sones* pour la mesure de l'intensité sonore perçue (S. S. Stevens, 1957) n'est pas la même pour chacune des deux oreilles d'un sujet.

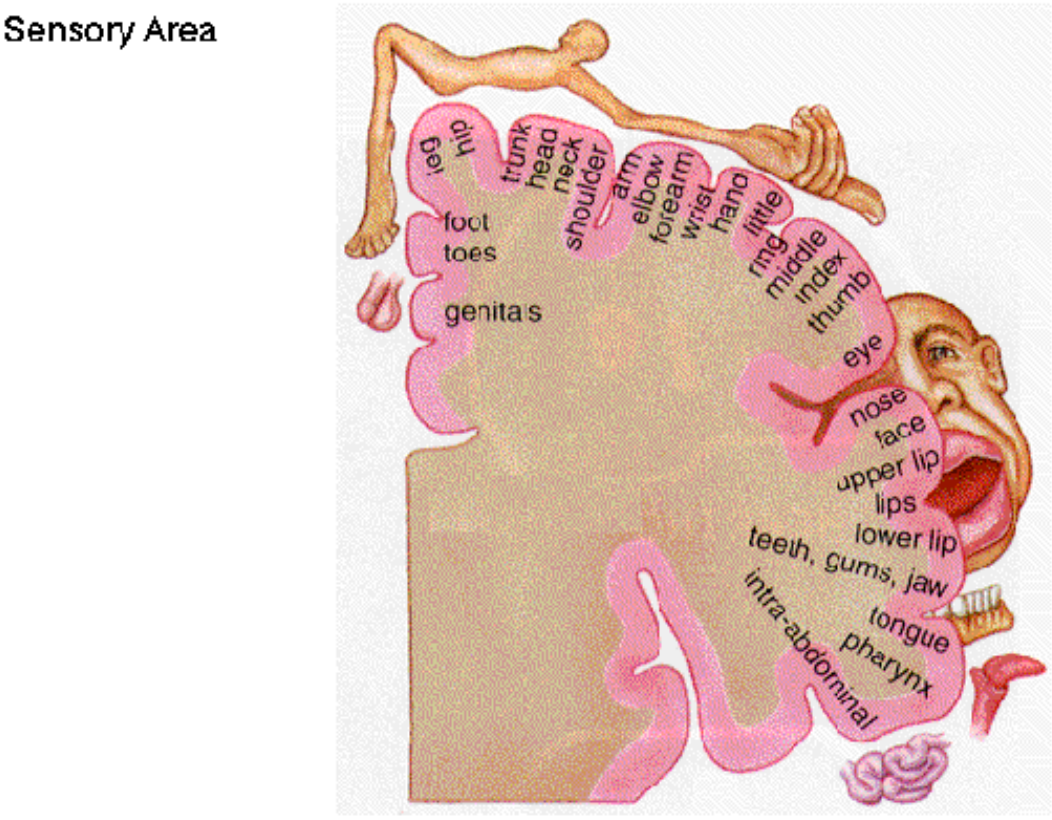
Dans ce cas, un outil comme le SOM permet la création d'une référence computationnelle (non-symbolique) pour des valeurs subjectives, qu'il est possible de comparer avec des données obtenues dans des situations expérimentales. Ainsi, cette référence mettra en perspective notre perception subjective.

Dans un contexte de création musicale, l'utilisation des SOM est aussi intéressante. La création d'une carte de timbres, pour rester dans cet exemple, est beaucoup plus simple en utilisant un ordinateur personnel qu'en faisant des expériences avec des sujets humains (l'efficacité des méthodes n'est pas à sous-estimer dans la création musicale). Finalement, nous pouvons même envisager de créer une telle carte en temps réel pendant l'exécution d'une pièce en faisant apprendre les sons joués par les musiciens à un SOM et de nous en servir soit pour le contrôle haut niveau de paramètres de synthèse ou de traitement sonore, soit pour directement resynthétiser des timbres appris ainsi que leurs interpolations.

1.3.4 Cartes somatotopiques

Pour ce qui est de la pertinence neurophysiologique des SOM, on note les cartes somatotopiques, une région découverte chez l'homme par Penfield et Boldrey (1937) en stimulation des parties du cortex chez des sujets éveillés. Ces cartes représentent la surface de notre corps sous forme de cartes, où des parties plus sensibles sont représentées par des surfaces plus larges que d'autres.

Brown & Benchmark Introductory Psychology Electronic Image Bank copyright © 1995 Times Mirror Higher Education Group, Inc



Visualisation schématique de la carte somatotopique chez l'homme ainsi qu'un homunculus déformé afin de correspondre à la taille des différentes régions. On note que par exemple les lèvres ou les mains sont représentées de façon précise, tandis qu'une petite région représente les jambes.

La plasticité de ces régions chez des patients ayant des sensations fantômes suite à la perte d'un membre a été étudiée notamment par Vilayanur Ramachandran et Diane Rogers-Ramachandran (2000). Les auteurs décrivent des sujets qui, ayant perdu un bras, perçoivent des sensations dans leur bras fantôme lorsqu'on les touche sur le visage. Ce transfert de sensibilité a été cartographié par les auteurs.

Régions dans le visage d'un patient qui évoquent des sensations dans son membre fantôme lorsqu'on les stimule, quatre semaines après l'amputation de son bras gauche en dessous du coude. Ce phénomène, qui d'après les Ramachandran est dû à la plasticité corticale, est observable déjà quelques heures après l'opération, indiquant une réorganisation rapide dans le cerveau.

Les auteurs obtiennent des résultats surprenants en travaillant avec des patients éprouvant des fortes douleurs fantômes, tel les ongles perçant la paume.

"Some patients claim that they can experience vivid voluntary movements in their phantom limb, presumably because reafference signals from motor commands sent to the phantom limb are monitored in the cerebellum and parietal lobes. However, over time, the phantom limb becomes "frozen" or "paralyzed," perhaps because of a continuous absence of visual and proprioceptive confirmation that the commands have been obeyed. Some patients experience excruciatingly painful involuntary clenching spasms in the phantom limb; they experience their nails digging into their phantom palm and are unable to open the hand voluntarily to relieve the pain." (Ramachandran et al., 2002)

Pour une discussion de l'hypothèse du monitoring central vs. l'hypothèse de simulation, voir le chapitre 1.2.3 sur la théorie du contrôle.

Dans une expérience utilisant des miroirs afin de donner l'impression visuelle de l'existence du membre fantôme, les auteurs arrivent à changer la position perçue du membre fantôme d'un patient.

"In our studies, we placed a midvertical sagittal mirror on the table in front of the patient. If the patient's paralyzed phantom limb was, say, on the left side of the mirror, he placed his right hand in an exact mirror-symmetric location on the right side of the mirror. If he looked into the shiny right side of the mirror, the reflection of his own right hand is optically superimposed on the felt location of his phantom limb so that he has the distinct visual illusion that the phantom limb had been resurrected. If he now made mirror-symmetric movements while looking in the mirror, he received visual feedback that the phantom limb was obeying his command." (ibid.)

Ainsi, six patients sur dix notent qu'ils peuvent effectivement sentir des mouvements simulés dans le miroir, au lieu de seulement les percevoir visuellement. Grâce à cette expérience, quatre patients arrivent même à défaire les tensions perçues dans leur membre fantôme et à assouplir ainsi les douleurs subies.

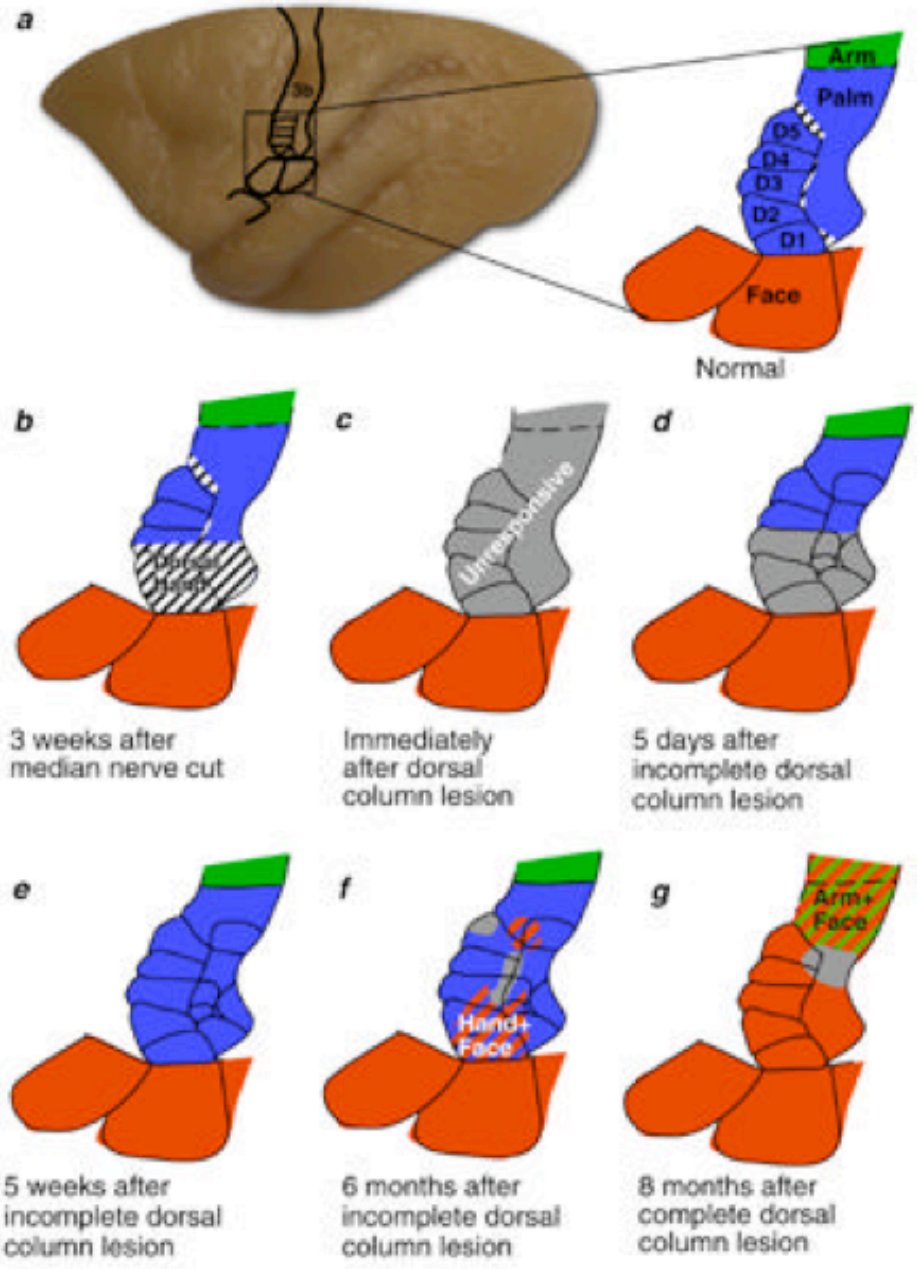
Un autre exemple de la plasticité est donné par Recanzone (1998) pour notre perception de l'espace acoustique que l'auteur appelle *Ventriloquism aftereffect*. Dans son expérience, Recanzone donne à entendre un événement sonore qui est décalé de 8° par rapport à un stimulus visuel associé à ce son. L'auteur mesure un changement perdurant dans la perception acoustique d'un sujet après 20-30 minutes d'exposition à ce type de stimuli. Ainsi, quand un sujet essaie de localiser une source sonore après stimulation, son positionnement de cette source est décalé du même nombre de degrés dans le sens inverse de l'expérience.

Ces expériences indiquent une grande plasticité de notre perception, même à court terme. Des études effectuées par Merzenich et al. (1983a, b) chez les singes de nuit

(*Aotinae*) éclaircissent les mécanismes sous-tendant ces phénomènes.

"The authors showed that when part of the hand representation in the primary somatosensory cortex or area 3b of owl monkeys is deprived of its normal inputs by cutting one of the three peripheral sensory nerves to the skin of the hand, neurons in the deafferented region do not remain unresponsive, but begin to respond to the stimulation of adjacent normally innervated parts of the hand." (d'après Neeraj Jain, 2002)

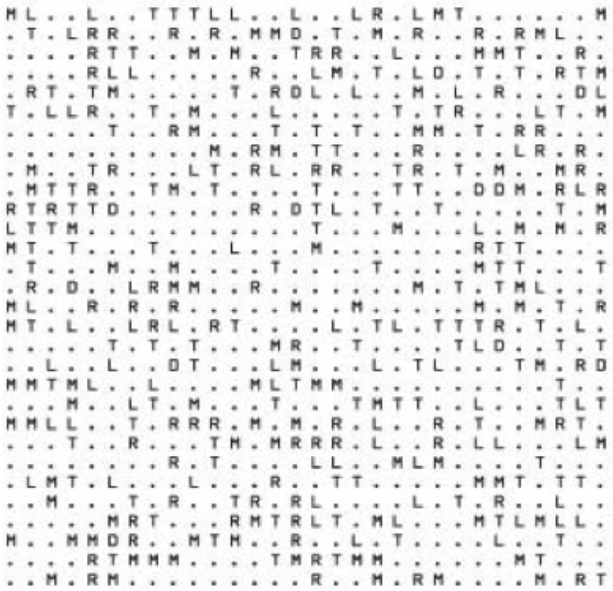
Cette forme de parasitisme neuronal est illustré dans le schéma suivant qui superpose les régions somatotopiques mesurées dans la région 3b du cerveau du singe de nuit à une vue dorsolatérale du cerveau (a). On note la représentation du visage au-dessous des représentations de la main (paume et doigts), eux au-dessous de la représentation du bras.



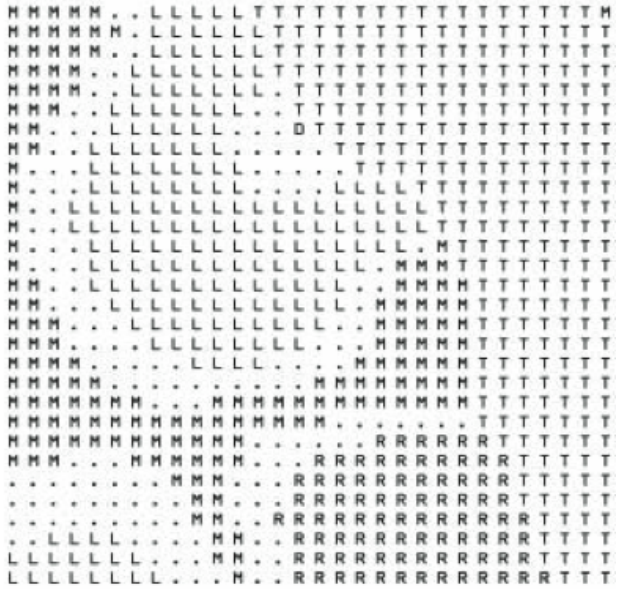
(b) montre la même région après une lésion du nerf médian sensible aux stimulations de la moitié de la paume plus proche du pouce. Immédiatement après la lésion, on observe l'absence de réponse neuronale dans cette région suite à une stimulation. Cependant, après trois semaines, cette région répond à des stimulations du dos de la main du singe. (c-g) mettent en évidence un phénomène similaire après la lésion de la colonne vertébrale induisant une insensibilité au dessous du visage. Lors d'une lésion incomplète, les régions initialement devenues insensibles commencent à réagir à la stimulation des parties de la main, dont la perception est restée intacte. Ce processus commence déjà dans la première semaine après la lésion (d), après cinq

semaines, toute la région est redevenue sensible aux stimulations par les nerfs intacts (e). Après plusieurs mois, des stimulations venant des nerfs afférents du visage parasitent en partie la région initialement sensible aux stimulations de la main lors d'une lésion partielle (f). Lors d'une lésion complète, l'expansion de la sensibilité aux stimulations du visage parasite la région entière, se mélangeant même dans la région sensible aux stimulations du bras (g).

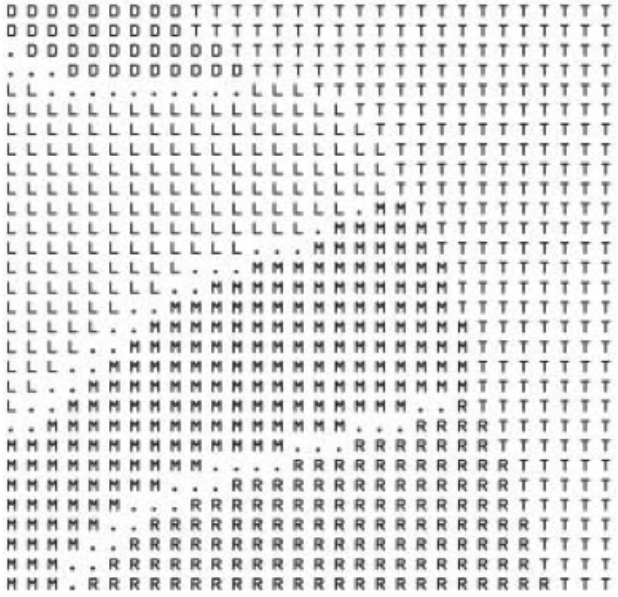
Les mécanismes qui sous-tendent cette réorganisation corticale ont été simulés en utilisant des SOM par Ritter et al. (1992, p. 101-117). Ainsi les auteurs arrivent à observer dans leur modèle une organisation topologique, analogue aux cartes somatotopiques par simple stimulation tactile d'une main simulée. En partant d'un SOM désorganisé, ils notent une organisation graduelle de la carte en fonction des stimulations. Ainsi, des régions de la main qui sont beaucoup stimulées sont représentées sur un espace plus important dans le SOM.



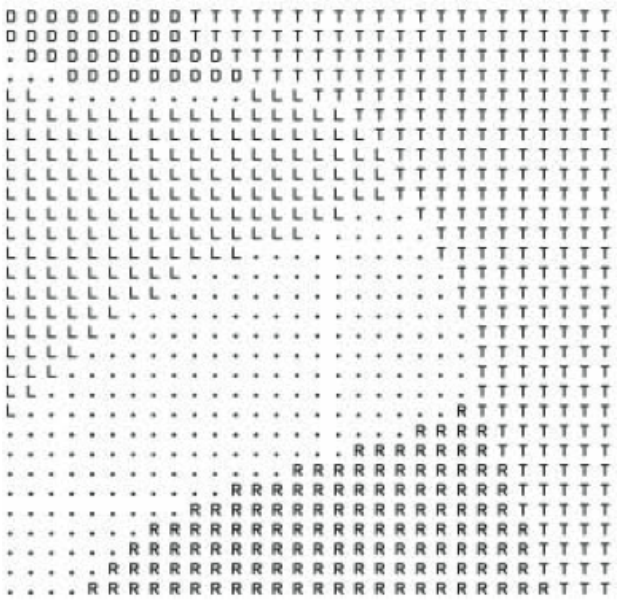
900 unités d'un SOM désorganisé avant sa stimulation. D, L, M, R et T dénotent le pouce (D), les doigts gauche (L), central (M) et droit (R) ainsi que la paume (T)



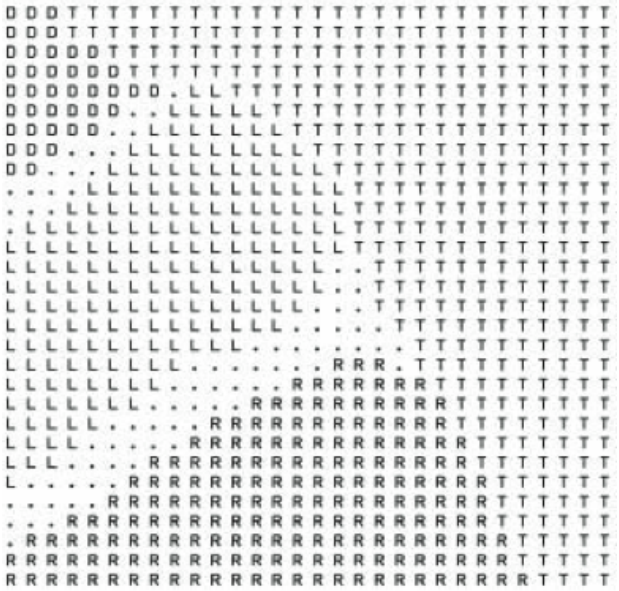
Le même SOM après seulement 500 stimulations. On note déjà une organisation similaire a celle somatotopique dans le cortex.



Après 20'000 stimulations, nous observons une organisation quasiment identique à celle trouvée dans les cartes somatotopiques. On note également que la disposition spatiale des doigts a été reprise dans leur représentation dans la carte respectant ainsi le voisinage entre les différentes parties stimulées.



Afin de simuler une "amputation" du doigt central, celui-ci n'est plus stimulé dans la suite de l'expérience, contrairement au reste de la main. Ainsi la région sensible à ce type de stimulation cesse de répondre.



Enfin, après 50'000 stimulations supplémentaires, la région précédemment sensible au doigt central a été parasitée par les stimulations provenant des doigts gauche et droit, de la même façon que ce qui a été observé chez les singes de nuit.

2. Expérimentations artistiques

2.1 For Alan Turing

For Alan Turing, composition pour deux réseaux de neurones artificiels du type SOM, créé au festival Manca, Nice (2004), met en musique un jeu sur l'apprentissage, l'imitation et l'oubli. En faisant appel à sa faculté d'auto-adaptation, ce système est utilisé ici comme une mémoire dynamique d'un jeu musical. Dans *For Alan Turing* un SOM joue sur un premier piano virtuel (à entendre sur les haut-parleurs à gauche de la scène) et essaie d'imiter et d'interpréter le jeu d'un neurone isolé, transformateur de structures musicales préparées (à droite de la scène).

Pendant le concert, je régule en temps réel l'activité du SOM ainsi que du neurone isolé, dans lequel j'injecte également des thèmes musicaux préparés. La composition étant créée en direct, elle ne se reproduira jamais de la même façon.

Une publication de Frédéric Voisin et moi-même (2004) est reproduite dans l'annexe de ce mémoire.

2.1.1 Neurone isolé ou transformateur

Le neurone isolé est un SOM à une seule unité. Ce SOM opère comme un simple transformateur de données: suivant les poids synaptiques de son unique neurone ainsi que son taux d'apprentissage, la réponse du SOM se rapproche, s'éloigne ou dépasse la valeur cible. Généralement, avec un taux d'apprentissage de 1. la sortie du SOM est égale à son entrée, avec un taux d'apprentissage supérieur à 1. les données seront étirées, inférieur à 1, les données seront compressées, etc.

Pour *For Alan Turing* j'ai composé quatre "thèmes" différents qui sont transformés l'un après l'autre par le neurone isolé. Ces "thèmes" sont des matrices spécialement préparées pour cette composition. Il s'agit de données obtenues en jouant sur un clavier MIDI et ensuite transformées et enregistrées dans une matrice avec les notes dans leur succession temporelle dans l'abscisse et les propriétés de chaque note

(hauteur, vélocité et intervalle entre deux notes successifs (IOI)) dans l'ordonnée.

En multipliant hauteur, vélocité et IOI par des variables on dépasse rapidement le domaine du musicalement jouable: des hauteurs en dehors de l'ambitus, des vélocités et intervalles négatifs, et autres configurations injouables peuvent se produire. En superposant plusieurs sets de ces données, on obtient une sorte de partition dans laquelle seule une partie des événements est dans la fenêtre de lecture. Or en passant cette partition dans le neurone transformateur, celle-ci est transformée par les poids synaptiques de ce neurone ainsi que par son taux d'apprentissage à chaque lecture.

La partition est à la fois lue et transformée en boucle (la taille de la boucle étant la taille du thème). Ceci crée déjà des structures musicales de variation continue en soi. En même temps, les notes injouables qui rentrent et sortent graduellement de la fenêtre de lecture permettent l'apparition et la disparition de différentes couches de discours musicaux dans le temps.

Même si cette configuration ne fait pas vraiment appel à un SOM, sa structure circulaire inspirera la conception d'une architecture que Frédéric Voisin et moi avons appelée *Avatit.* Le fonctionnement principal se retrouve dans les deux cas: une réinjection avec un retard. Pour le neurone transformateur ce contenu est sa partition.

2.1.2 Encodage

Il est nécessaire de faire des choix au niveau de l'encodage qui ont souvent des conséquences esthétiques: par exemple, dans *For Alan Turing* les valeurs de hauteur, vélocité et IOI sont mis au même niveau. Dans sa classification, la vélocité à laquelle une note est jouée est aussi importante pour un SOM que la hauteur de cette note. Cette mise à plat de paramètres musicaux rejoint les idées du sérialisme intégral dans la musique, comme par exemple dans la composition "Mode de valeurs et d'intensités" d'Olivier Messiaen (1949). Il est possible de donner plus d'importance à un paramètre en changeant la structure des vecteurs d'entrée pour le SOM. Par

exemple, en encodant plusieurs fois la valeur pour la hauteur un poids statistiquement plus lourd peut être donné à ce paramètre particulier d'une note :

[64, 64, 64, 50, 1242] : (3 fois la valeur 64 pour un mi, vélocité 50 et durée 1.242 secondes)

2.1.3 SOM imitateur

L'autre acteur dans *For Alan Turing* est un SOM de 25 neurones recevant en entrée la réponse du SOM à un neurone. Ce SOM imitateur crée une deuxième couche musicale dans l'oeuvre, régulée de façon très différente de la première.

Il n'y a pour ce SOM imitateur aucune partition. Il réagit directement au jeu de l'autre SOM mais dans sa temporalité il est autonome, car la durée de chaque note est déterminée par sa sortie (IOI). Sa réponse est pondérée à la fois par le taux d'apprentissage, le bruit sur les connexions synaptiques, le bruit sur l'apprentissage et finalement son état actuel. L'état actuel dépend de l'histoire du SOM. Comme un résonateur formé par ses résonances passées, le SOM imitateur amplifie des événements connus et atténue des événements inconnus.

2.1.4 Dynamique

J'aimerais insister ici sur une différence cruciale dans notre utilisation des SOM par rapport aux utilisations classiques. Contrairement à une démarche classique où on essaie d'obtenir un SOM qui a appris de façon optimale et dont on se sert afin d'analyser et de classifier ces données ce qui nous intéresse est le SOM en tant que mémoire dynamique soumise à une évolution continue : sa façon d'apprendre, sa façon d'oublier, ses incapacités d'imitation dans certains cas, ses effets d'interpolation lors de l'apprentissage, tout est exploitable musicalement et constitue un terrain vaste d'exploration empirique.

Timo Honkela et Juha Winter (2003) proposent même que les SOM en tant que modèles cognitifs ne doivent être considérés que dans leur état dynamique :

"The self-organizing map is a good example of a "non-trivial machine" (Von Foester, 1984). It is not [a] behavioristic model, but on the contrary, the internal state of the system influences the behavior and it is changing during the "life" of the map. One of the reasons why the self-organizing map and other artificial neural network models may appear behavioristic is that their internal state is difficult to grasp and analyze. For instance, multilayer perceptrons typically are used as black-box systems: only the input-output behavior is considered in applications. However, as cognitive models these systems should be considered only in the continuous learning mode: the relationship between the input and the output is constantly subject to change and, thus, the system is non-trivial." (Honkela et Winter, 2003)

Dès que nous nous intéressons à ces dynamiques d'un réseau de neurones, des valeurs traditionnelles telles que l'erreur changent de signification et cessent d'être des critères d'évaluation pertinents pour la "fitness". Suivant le contexte musical, un grand taux d'erreur peut engendrer des comportements tout à fait souhaitables et intéressants. Quelques aspects de ces observations empiriques ne remettent pas seulement en question des approches connexionnistes mais aussi des représentations humaines d'un savoir musical. Il est tout à fait envisageable que des "erreurs" de classification se produisent pour des musiciens humains, qui essaient de jouer une musique très différente de ce qu'ils ont habitude de jouer par exemple. Ces "fausses" interprétations et évaluations d'un texte musical se révèlent souvent motrices pour la création d'un matériau musical nouveau et original.

2.1.5 Interaction

Parmi les principaux modes de jeu que j'ai adoptés dans mes interactions avec le SOM dans *For Alan Turing* j'ai pu identifier les suivants:

2.1.5.1 Grand taux d'apprentissage (TA) : mémoire courte : imitation proche

Plus le taux d'apprentissage se rapproche de 1. plus l'imitation du SOM est proche de l'original. Cependant, même si l'adaptation est presque immédiate et parfaite,

quasiment aucun apprentissage n'a lieu. Souvent, c'est toujours les mêmes noeuds qui deviennent neurone gagnant et même après un apprentissage prolongé les stimuli ne se répandent pas dans la carte et ne laissent donc quasiment pas de traces. On peut résumer cette configuration de la façon suivante: mémoire courte, imitation proche

2.1.5.2 Petit TA: apprentissage lent : mémoire longue : imitation éloignée / pondérée

Des taux d'apprentissage entre 0.2 et 0. sont plus habituels dans l'utilisation traditionnelle des SOM. Dans le cadre d'une performance musicale ces taux résultent dans des imitations plus éloignées de la référence ainsi que plus pondérées par les événements "vécus" et appris par le SOM auparavant. Ainsi il peut arriver que l'imitation d'un thème donné soit un suivi seulement du contour mélodique en utilisant des hauteurs existantes dans la carte à cause de son exposition aux notes des thèmes passés.

Le TA étant petit, la topologie de la carte ne se change que lentement. Des imitations parfaites se produisent lors d'une relative stabilité du jeu du premier SOM ou lors d'une concordance entre événements appris préalablement et le jeu actuel. On peut décrire ce comportement avec les termes "mémoire longue" et "imitation éloignée / pondérée".

2.1.5.3 TA de zéro : mémoire gelée

Cette configuration extrême gèle la dynamique du SOM et le réservoir de réponses possibles se réduit à 25 - le nombre de neurones dans la carte. Toute imitation sera faite uniquement avec les connaissances préalablement acquises. Il arrive souvent dans cette configuration que la même réponse du SOM imitateur soit donnée à plusieurs stimulations différentes, ce qui musicalement se traduit en notes répétées comme on peut les entendre vers 4 minutes 10 dans l'enregistrement de *For Alan Turing* disponible sur le CD-ROM accompagnant ce mémoire ainsi que sur internet[1].

[1] http://robin.meier.free.fr

2.1.5.4 TA négatif : symétrie

Cette configuration se comporte de façon symétrique aux deux premiers modes de jeu décrits. Au lieu de s'approcher des valeurs cibles le SOM s'en éloigne au fur et à mesure de l'apprentissage. Musicalement cette sorte d'inversion peut être exploitée à la façon d'un contrepoint.

2.1.5.5 Bruit sur connexions : oubli dans la carte entière

Le bruit sur les synapses du SOM modifie aléatoirement le poids synaptiques de chaque noeud dans la carte en fonction du taux de température. Concrètement cela modifie tous les paramètres de toutes les notes représentées et brouille quelque peu les connaissances du SOM. Musicalement cet oubli peut amener à la génération de matériau original. Ainsi le taux de température nous donne un contrôle sur la corrélation entre le jeu original et son imitation. Cela permet de passer continuellement entre un matériau presque entièrement aléatoire et des imitations très proches voire parfaites.

2.1.5.6 Bruit sur apprentissage : erreurs de catégorisation

Musicalement ce type de bruit est très similaire au bruit sur les connexions. Cependant la manipulation des connaissances du SOM n'est pas la même, car le bruit sur l'apprentissage ne modifie que certaines régions de la carte: le neurone gagnant et ses voisins. Cela permet d'amener le SOM à générer du matériau quasi-aléatoire dans une région de la carte, tout en gardant intacte la topologie dans d'autres régions.

Au lieu de se rapprocher linéairement de la cible, les réponses du SOM effectuent une sorte de *random walk* tout en étant dans un *mouvement global* vers la cible. Musicalement ceci correspond à une sorte d'ornementation de l'interpolation entre l'état actuel du SOM et sa cible - l'imitation parfaite.

Le bruit sur l'apprentissage se règle par le paramètre learn-temp.

Les deux types de bruits rentrent chacun à sa façon en antagonisme avec

l'apprentissage. En trouvant un bon équilibre entre taux de bruits et taux d'apprentissage, il est possible de créer des tensions musicales: on entend à la fois un mouvement dans la musique ainsi qu'une sorte d'inhibition venant du bruit ou d'un changement de stimuli. Il est intéressant de voir comment dans une telle configuration le concept d'attracteur semble le mieux adapté pour décrire ce comportement.

2.1.6 Contexte temporel

Malgré le comportement dynamique de ce système, le savoir encodé dans une telle architecture ne contient aucune information sur l'enchaînement des notes et leurs valeurs rythmiques. Sans ce contexte temporel pour le SOM un mi reste presque le même mi, quasiment sans différence s'il se trouve dans une gamme descendante ou dans une gamme ascendante par exemple - information qui musicalement par contre est très pertinente.

Cependant, en phase d'apprentissage, la dynamique du SOM n'est pas exactement la même, selon le contexte temporel. La topologie de la carte étant formée par ses stimulations subies elle ne peut pas être la même selon ce qui s'est passé auparavant. Toutefois, cette trace indirecte du passé peut ne pas suffire pour certaines applications musicales, très dépendantes et sensibles à ces aspects temporels.

Une architecture étendant le modèle classique du SOM en y intégrant des oscillateurs couplés peut nous donner justement les informations temporelles souhaitées: la carte auto-organisatrice récurrente et oscillatoire - recurrent oscillatory self-organizing map (ROSOM).

J’ai réalisé en 2004 une implémentation informatique du ROSOM, mais malgré ses propriétés prometteuses cette architecture n’a pas encore pu être testée dans une application artistique. Je renvoie le lecteur à (Kaipainen et Ilmonen, 2003) et à (Kaipainen et Karhu, 2000) pour une discussion de cette architecture.

2.2 Caresses de marquises et Symphonie des machines

Caresses de marquises (Paris, Nuit Blanche 2004) et la *Symphonie des machines* (Sophia Antipolis, Festival de la quatrième dimension, 2006) sont deux projets artistiques similaires, la principale différence étant leur taille. Tous deux sont des concerts-installations musicales en plein air pour agents neuromimétiques, réalisés par Frédéric Voisin et moi-même, le premier à l'occasion d'une commande de la Mairie de Paris pour la "Nuit Blanche" 2004 et le second, d'une commande du "Festival de la quatrième dimension", tenu en juin 2006 à Sophia Antipolis. Tandis que pour *Caresses de marquises* nous investissions les marquises de la gare de l'Est et effectuions nos calculs sur huit ordinateurs macintosh, pour la *Symphonie des machines* nous investissions cinq sites différents dans une région d'environ 1.5km2 en utilisant l'équivalent d'environ 200 d'ordinateurs de bureau. Cependant, le principe de fonctionnement est quasiment le même pour les deux projets.

Un premier germe de l'idée menant à la réalisation de *Caresses de marquises* est une observation que j'ai faite en regardant trois lumières de bateaux clignotant sur un lac. En raison de leurs fréquences légèrement différentes, les trois lumières se décalaient rythmiquement – d'une manière similaire au phénomène appelé *phasing* par le compositeur Steve Reich. Ce phénomène utilisé dans la majorité de ses compositions a été découvert par Reich en jouant un même enregistrement sur deux lecteurs de bande magnétiques simultanément. A cause des imprécisions dans la vitesse de lecture, les deux enregistrements ce décalent graduellement, créant une multitude de configurations rythmiques et mélodiques (écouter *It's gonna rain* pour entendre cet effet et *Piano Phase* pour son interprétation instrumentale de ce même effet). Ce qui était frappant pour moi en observant les lumières des bateaux, était une impression très acoustique de cette perception visuelle. Je ne pouvais m'empêcher *d'entendre* intérieurement les rythmes visuellement perçus.

En partant de cette observation personnelle, j'ai voulu, pour la Nuit Blanche, créer une oeuvre multimodale et polyphonique, dans le sens où des rythmes lumineux donnaient naissance à une sorte de contrepoint avec des événements sonores,

diffusés en même temps : une "fugue" devait ainsi se créer dans la tête d'un observateur en réunissant les stimuli visuels et acoustiques.

H21

Gare de l'Est
Rue d'Alsace

Rue d'Alsace, 75010
M° Gare de l'Est

Caresses de marquises

Robin Meier et Frédéric Voisin

Directeur artistique **Nicolas Frize**

> expérimentation musicale

Depuis la rue d'Alsace, qui borde la Gare de l'Est, s'ouvre un plateau de marquises alignées côte à côte, longs toits formant une forêt horizontale et longiligne, protégeant les quais des voies de chemin de fer. Au lointain, les immeubles dessinent une fresque large et immobile. Se dégagent de ce lieu inattendu et calme, des "êtres sonores" constitués de neurones artificiels, qui naissent, se développent, puis se meuvent, s'individualisent.
Au moyen d'un apprentissage - par adaptation et mimétisme - ces sons vivants et mobiles font émerger d'étranges langages qui se propagent, partent au loin et disparaissent.
L'œuvre est ici non seulement inventée mais apprise et développée en temps réel.

Avec le soutien de la **Sacem**

En partant de mes expériences avec des architectures du type utilisé pour *For Alan Turing*, j'avais déjà essayé de mettre des SOM en *feedback* afin de créer des systèmes capables de générer des structures soit de manière autonome, soit en interagissant avec leur environnement. Ce travail initialement plutôt théorique semblait bien adapté à la réalisation de ce projet et a été accéléré par le travail de Frédéric Voisin et moi-même pour *Caresses de marquises*, qui nous donnait une plate-forme formidable d'expérimentation et nous permettait d'aboutir ce travail dans la création d'une structure neuromimétique que nous avons appelée *Avatit,* mot inuktitut pour "agent".

2.2.1 Dispositif

Pour la Nuit Blanche, la ville de Paris et la SNCF avaient mis à notre disposition tout l'espace ouvert qui couvre les quais extérieurs de la gare de l'Est. Sur cet espace d'environ cents mètres par deux cents mètres nous avons disposé vingt haut-parleurs ainsi que vingt projecteurs de lumière, tous contrôlables séparément depuis la régie.

Le système informatique faisait appel à huit ordinateurs Macintosh (processeurs

IBM-powerpc G4) : quatre pour les Avatit, deux pour la diffusion (son et lumière) et deux pour le contrôle. Les Avatit étaient réalisés dans l'environnement Jitter de MaxMSP (Cycling'74) qui, s'il n'était pas optimal en termes de calcul, en facilitait l'expérimentation au sein d'un environnement de production musicale.

Texte du catalogue Paris Musées (Paris Musées 2005 (éd.))**:** Depuis la rue d'Alsace, qui borde la gare de l'Est, s'ouvre un plateau de marquises alignées côte à côte, longs toits formant une forêt horizontale et longiligne, protégeant les quais des voies de chemin de fer. Au loin, les immeubles dessinent une fresque large et immobile. Dans cet espace qui offre une grande profondeur, des sons, nés d'une intelligence artificielle, se propagent, fuient et reviennent horizontalement par des enceintes placées sur une profondeur de 200 mètres. S'il existe en électroacoustique des concerts aux spatialisations circulaires (sons qui viennent sur les côtés, devant, derrière) ou verticales (sons qui évoluent en hauteur), la spatialisation sonore de *Caresses de marquises* est créée en profondeur. Les sons naissent des ordinateurs et se développent en temps réel, par un système d'apprentissage, d'adaptation et de mimétisme, devenant une matière presque vivante entre les mains de Frédéric Voisin et Robin Meier. Tous deux participent au programme de recherche *Neuromuse* du CIRM (Centre national de création musicale) à Nice, où ils développent des recherches musicales en intelligence artificielle. Pour Nuit Blanche, ils ont réalisé cette "installation-concert" pour neurones artificiels. Différentes espèces d'agents se distinguent par leur architecture neuronale, par leur sensibilité aux aspects de leur environnement et par leur mode de synthèse sonore. L'architecture de chaque agent est composée d'un double noyau de quelques dizaines de "neurones", nombre variant selon les espèces. Chaque partie du noyau, interconnectée à l'autre, représente deux états internes des agents, l'une sensible et active avec l'extérieur (lumière et son), l'autre plus interne, modérant l'activité de la première. Toute la nuit, ces agents réagissent à la fois aux rythmes lumineux projetés sur les marquises et à l'activité sonore des autres agents. Différentes déclinaisons des architectures neuronales donnent lieu à autant de comportements et, par incidence, à autant de jeux sonores. Pour entendre les *Caresses de marquises,* il faut tendre l'oreille. Cette musique douce est une oeuvre minimaliste dans un lieu monumental.

L'espace sur lequel étaient installés les projecteurs de lumières et les haut-parleurs. Le public se trouvait sur une estrade située rue d'Alsace, longeant les rails (en haut à droite de la photo). La régie informatique, son et lumière se trouvait dans des bureaux de la SNCF en contrebas de la rue d'Alsace.

Les contraintes définies par nous-mêmes pour la conception du système étaient de créer des agents capables de produire des sons en fonction de leur état interne, l'état des autres agents ainsi que l'état de leur environnement commun.

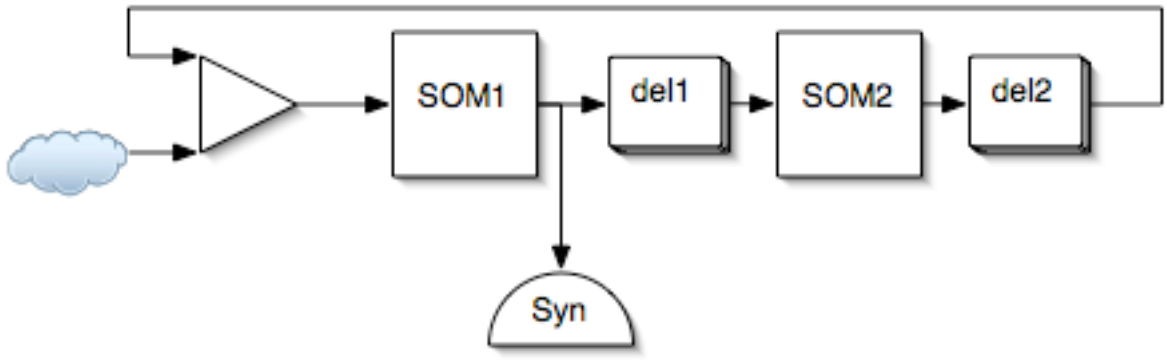
Cet environnement était défini par les lumières, que Frédéric Voisin et moi-même contrôlions de façon plus ou moins déterministe depuis la régie.

Interface de contrôle des lumières disposées sur les marquises de la gare de l'Est. Chaque projecteur était conçu comme un oscillateur, clignotant une fois par cycle. Pour chaque projecteur on pouvait ajuster sa fréquence, sa phase ainsi que son intensité.

L'état de chaque projecteur était rendu au moyen d'une interface numérique DMX, qui permettait le contrôle informatique des projecteurs sur les marquises, où ils influençaient de façon "écologique" l'activité des Avatit en changeant leur environnement.

2.2.2 Avatit

Un Avatit consiste en deux cartes auto-organisatrices (SOM1, SOM2) chacune étant dotée d'une ligne de retard (del1, del2) et d'un "filtre perceptif" (le triangle du schéma ci-dessous) réglant le rapport - de manière probabiliste - entre *feedback* interne et stimuli externes, tels que la lumière et l'activité des autres Avatit (dans le schéma, le nuage). Les réponses de la première carte auto-organisatrice contrôlent un module de synthèse sonore (Syn), propre à chaque Avatit.



Lors de la Nuit Blanche, la taille des vecteurs transmis entre les différents modules d'un Avatit et échangés entre les Avatit eux-mêmes était de 20 éléments. La taille de ces vecteurs correspondait à la fois au nombre de haut-parleurs et à celui, identique, de projecteurs disposés sur les marquises, permettant ainsi de communiquer aux agents, le cas échéant, l'état de toutes les lumières. Même si habituellement un agent ne percevait que son environnement local, la possibilité d'avoir des "super-agents" était intéressante à certains moments dans le déroulement de l'oeuvre comme mode de jeu dramaturgique.

La taille des deux SOM était variable et dépendait de la richesse des stimuli comme de la variété des réponses voulue. Dans la majorité des cas, on utilisait la même taille pour SOM1 et pour SOM2 mais des architectures non-symétriques peuvent avoir des comportements particuliers.

2.2.2.1 Filtre perceptif

Le module réglant la quantité de *feedback* interne par rapport aux stimuli externes

consiste en un simple choix stochastique avec un seuil réglable entre 0% et 100% de *feedback*. Malgré sa simplicité, ce système s'est avéré comme assez performant dans le cadre de notre installation et d'autres utilisations musicales. Même si ce choix n'a pas été fait sur un fondement biologique ou d'une spéculation sur le fonctionnement d'un système cognitif existant, on pourrait argumenter que les conditions de viabilité tel qu'elles étaient posées par le contexte artistique justifient ce choix. Plus encore, l'invention de nouvelles règles de viabilité, les définitions du fonctionnement de l'environnement et l'analyse des comportements engendrés à partir de ces choix font partie intégrante du travail artistique.

2.2.2.2 Lignes de retard

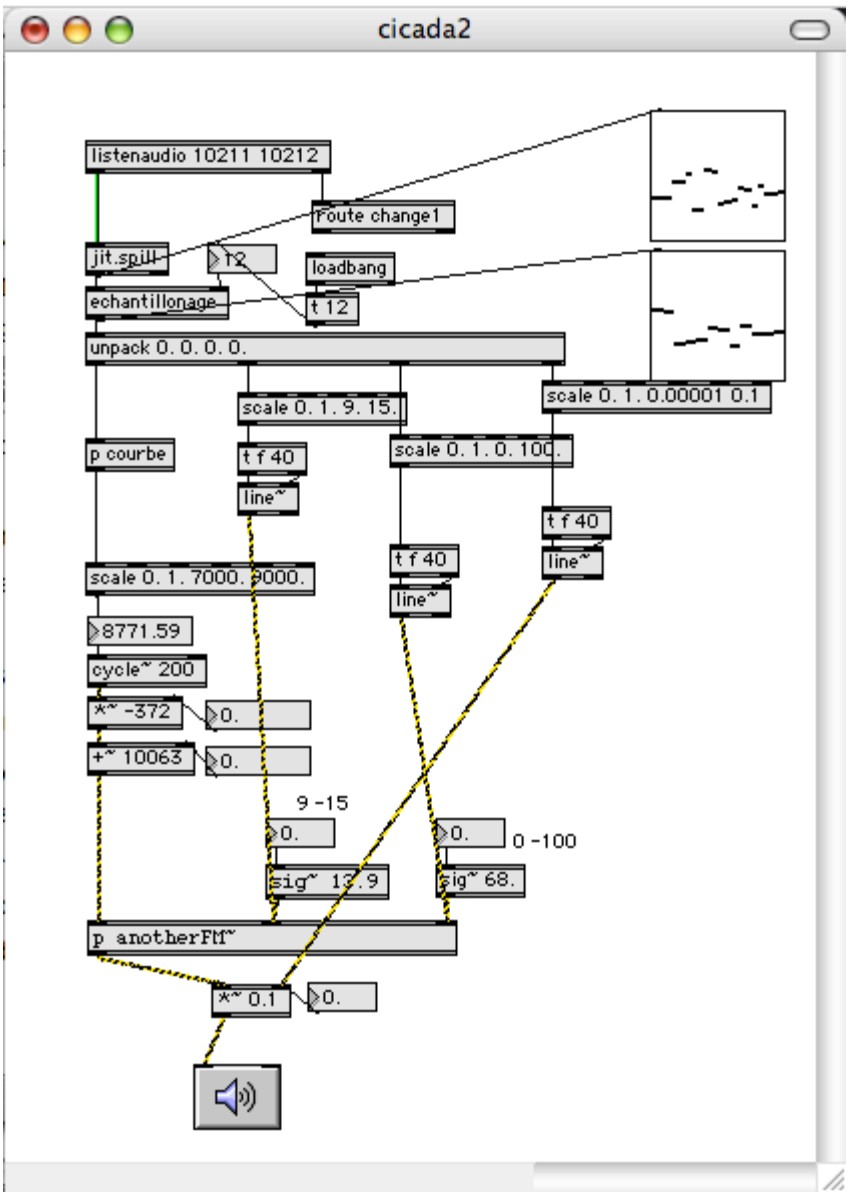
Les lignes de retard fonctionnent comme de simples "stacks" en jargon informatique: chaque vecteur est retenu pendant un certain nombre d'étapes avant d'être envoyé au SOM suivant. Le rôle de ces modules est similaire à la ligne de retard déjà décrite dans le chapitre sur *For Alan Turing*. Ils contiennent une sorte de partition qui est transformée en fonction des taux d'apprentissage lors de la lecture.

2.2.2.3 Synthèse

Le module de synthèse sonore peut être très variable et rejoint davantage un travail de création musicale traditionnel. Selon une métaphore organique, cette partie peut être comparée à des connexions neuronales efférentes d'une part et à des organes moteurs de création sonore tels que les cymbales d'une cigale d'autre part. Aux connexions efférentes de notre modèle correspond la partie de *mapping* entre les valeurs numériques provenant de l'Avatit et les paramètres de synthèse. À l'organe de création sonore correspond un processus de traitement ou de synthèse audio spécialement réalisé par nous-mêmes pour le projet.

Les synthétiseurs - ou instruments numériques - utilisés étaient des adaptations de synthèse additive, de synthèse par modulation de fréquence, d'échantillonneurs dotés d'échantillons préparés et, enfin, de synthétiseurs fondés sur des procédés de resynthèse vocale. Selon l'instrument utilisé pour chaque Avatit, restait à définir un *mapping* musicalement intéressant, *ad hoc,* entre les vecteurs envoyés par SOM1 et

les paramètres de synthèse.



Un des synthétiseurs utilisés pour la Nuit Blanche, réalisé dans MaxMSP

2.2.2.4 Paramètres et horloge interne

Les paramètres de contrôle d'un Avatit sont ceux de chaque SOM, comme ils ont été décrits dans le chapitre 1.3.1.3 sur jit.robosom : taux d'apprentissage, radius et température). En plus de ces paramètres classiques, il était possible de régler dynamiquement le taux de *feedback* ainsi que la période d'une horloge interne, déterminant la vitesse à laquelle un Avatit percevait et traitait ses stimulations. Cette horloge interne réglait donc à la milliseconde près la résolution temporelle du

fonctionnement pour chaque Avatit. Lorsque cette période était nulle, l'Avatit tournait à la vitesse maximale permise par l'architecture informatique utilisée. Sinon un nouveau vecteur est calculé à chaque période spécifiée. Il est important de noter que la vitesse de l'horloge interne ne représente non pas des états discrets dans une conception du temps d'enchaînement séquentielle d'événements, mais définit plutôt un seuil temporel minimal de perception du modèle, comparable au seuil de séparabilité temporelle acoustique qui fait qu'on entend des événement sonores séparés d'environ moins de 15 millisecondes comme un seul événement.

Spécifiée ici par nous mêmes, la valeur de l'horloge interne peut néanmoins être régulée de manière quasi-autonome lorsqu'elle est intégrée directement dans le vecteur réinjecté par le SOM2 ou du vecteur sortant du SOM1, déterminant ainsi le temps d'attente avant l'exécution du prochain événement, tel que cela a été fait dans *For Alan Turing*. Lorsqu'un Avatit est actif en *feedback* sans stimuli externes, son activité propre permet une richesse rythmique plus grande. Néanmoins, lorsque l'Avatit doit réagir à des stimulations venant de l'extérieur, il est souvent plus approprié de recourir à une horloge interne afin qu'il n'omette pas d'événements importants, ce d'autant plus que, dans ce dernier modèle, la périodicité du temps discret n'est pas régulière mais contenue dans chacune des fenêtres temporelles : cela mettrait alors en question l'inscription temporelle de ce modèle ainsi que son aspect dynamique.

Cependant, même en recourant à une horloge interne, une richesse rythmique est assurée par des variations et des cycles dynamiques inhérents dans le comportement propre aux Avatit. Ces évolutions dans le temps deviennent audibles à travers les paramètres de synthèse et sont donc couplées à l'évolution des sons.

2.2.2.5 Initialisation

Lors de l'initialisation d'un Avatit, des valeurs aléatoires comprises entre 0. et 1. sont attribuées aux poids des deux SOM. La même chose s'applique aux vecteurs dans les lignes de retard. Un Avatit peut être réinitialisé à tout moment. Ceci est intéressant pour l'interaction dans un contexte artistique, permettant un oubli soudain

chez l'Avatit qui entraîne alors un nouveau processus d'apprentissage et d'adaptation.

2.2.3 Comportements

Dans le cadre de la Nuit Blanche nous nous intéressions particulièrement à l'interaction entre l'environnement lumineux et les Avatit. Ce couplage était réglable par le module du filtre perceptif et donc par la quantité de *feedback* interne, réinjectée dans l'Avatit. Lors d'un *feedback* de 100% aucun vecteur venant de l'extérieur de l'agent n'est traité tandis que chaque sortie de l'Avatit est automatiquement réinjectée. Lors d'un *feedback* de 50% la probabilité qu'un vecteur provienne de l'extérieur ou de la boucle de réinjection est la même. Le choix des taux de *feedback* est fixé par les artistes pendant la présentation de l'oeuvre et évolue selon la dramaturgie escomptée.

Lors d'un *feedback* de 100% un Avatit est enfermé sur lui-même : son activité sonore est totalement découplée de l'environnement lumineux et des autres Avatit. Dans cette configuration où l'Avatit devient autonome par rapport à son environnement, il est capable de générer du matériau musical sans stimulation externe, utile notamment pour lui attribuer un rôle de soliste ou celui de maître d'un ou plusieurs autres Avatit, ces derniers étant mis à l'écoute du premier. Cette configuration est alors dans le principe similaire à celle du neurone isolé, décrite dans le chapitre *For Alan Turing*, mais son contrôle est plus fin.

En effet, si dans le cas du neurone isolé, le taux maximum d'apprentissage (1.0) met en boucle le contenu dans la ligne de retard sans que ce contenu soit transformé pendant sa lecture, ce réglage s'affine dans le cas de l'Avatit car nous disposons ici de deux SOM régulant son activité, chacun doté d'une valeur d'apprentissage. Ainsi il est possible d'expérimenter des relations différentes entre les deux taux d'apprentissages permettant de jouer sur le comportement du premier SOM dont les réponses sont transformées en événements sonores séparément du comportement du deuxième SOM, agissant de façon plus implicite dans la génération musicale en tant que régulateur du premier. Par exemple, un taux d'apprentissage de 1. pour le

premier SOM et 0.1 pour le deuxième SOM permet à SOM1 d'imiter le plus fidèlement la sortie de SOM2, tandis que ce dernier continue d'évoluer et de varier légèrement les stimuli reçus de - et renvoyés à - SOM1.

L'effet de cette architecture correspond en quelque sorte à une mémoire à deux niveaux. Elle permet dès lors diverses combinaisons de comportements déjà mentionnés dans le chapitre "Interactions" dans *For Alan Turing*. Par exemple, les taux d'apprentissage de 0.9 pour SOM1 et 0.1 pour SOM2 entraînent une adaptation rapide et une mémoire courte pour SOM1, qui est en contact direct avec l'environnement ainsi qu'avec le module de synthèse sonore, tandis que l'apprentissage de SOM2 se fait sur des durées plus longues en conservant des traces plus persistantes des événements passés : ainsi la production sonore d'un Avatit réagit de façon rapide et précise à des stimulations externes, tout en gardant des éléments appris précédemment.

En élevant le taux de température, il est possible de décorréler l'activité d'un Avatit de celle suscitée par les stimulations tant externes qu'internes. Le bruit peut alors devenir le germe pour un nouveau thème, développé ensuite par l'Avatit. Comme déjà mentionné dans le chapitre *For Alan Turing*, les antagonismes entre taux de bruit et taux d'apprentissage sont très intéressants et donnent souvent naissance à des tensions musicalement perceptibles. De plus, contrairement au neurone isolé de *For Alan Turing*, le deuxième niveau de mémoire que constitue le second SOM de l'Avatit peut affaiblir l'effet du bruit dans le premier SOM, par réinjection de l'activité précédente de ce dernier.

Cette combinatoire de différents comportements ouvre un vaste champ de modes de jeux et assure une grande variabilité des Avatit. Des illustrations de ces différents comportements sont données dans les enregistrements issus des répétitions pour la Nuit Blanche et sont inclus dans le CD-ROM accompagnant ce mémoire[1].

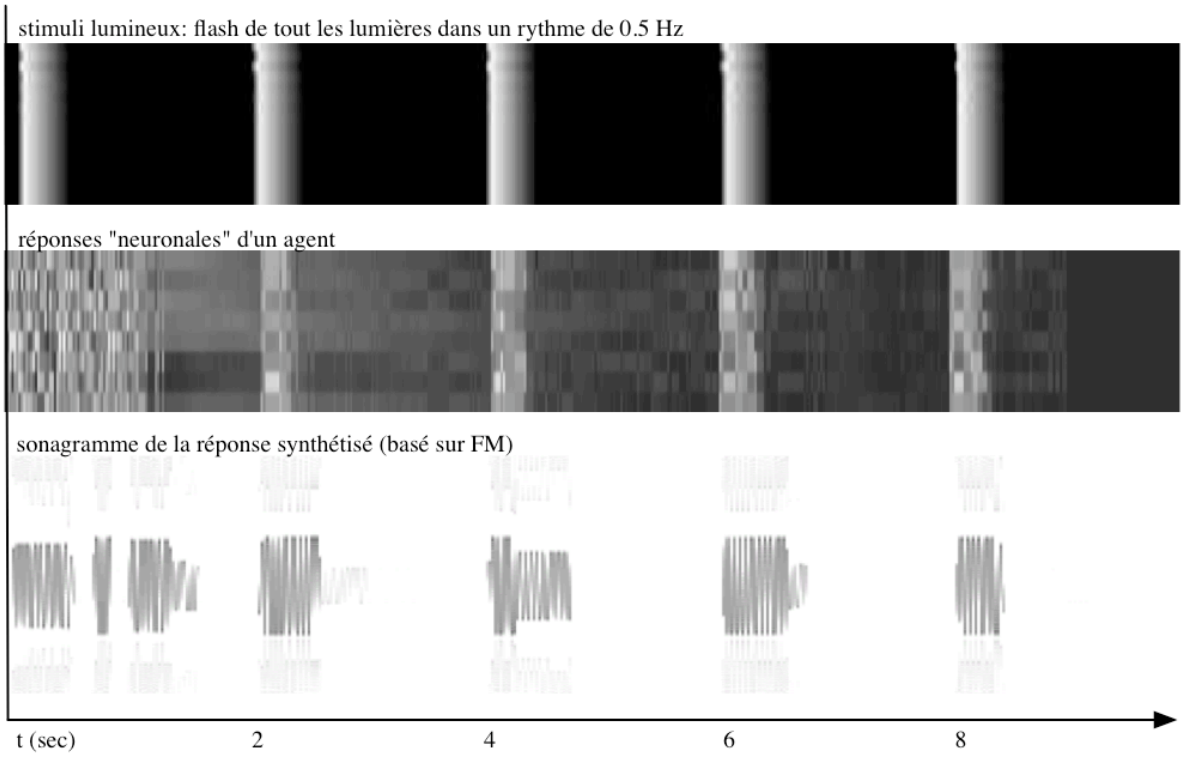
[1] Les enregistrements peuvent également être écoutés en ligne: http://robin.meier.free.fr/wiki/wakka.php?wiki=NuitBlanche

Dans "quatuor2270904" nous entendons une introduction soliste d'un Avatit contrôlant un échantillonneur de pizzicato d'alto. Cet Avatit est en *feedback* complet et donc entièrement découplé de son environnement. On note déjà à l'écoute plusieurs fragments se ressemblant qui réapparaissent d'un temps à l'autre. Dans "criquetetoiseau", à partir de 27 secondes dans le "chant d'oiseau réalisé par un synthétiseur de modulation de fréquence contrôlé par un Avatit également mis en *feedback* complet, nous pouvons entendre un exemple évident de variations continues.

Ces comportements sont musicalement très intéressants car ils s'apparentent à un processus de développement d'un thème musical, le degré de variabilité et de nouveauté étant contrôlé par les taux d'apprentissage et par la température des SOM : des événements sonores pseudo-aléatoires générés par un taux de température élevé sont forgés et organisés par les deux SOM lorsque, ensuite, on abaisse la température tout en augmentant le taux d'apprentissage de l'Avatit.

Un exemple d'antagonisme entre les deux SOM d'un Avatit est audible dans le "quatuor2270904" à partir de 3'00" et allant jusqu'à 4'45" environ. Deux Avatit réagissant aux stimuli de leur environnement lumineux contrôlent deux échantillonneurs de violons jouant *sul ponticello*. A cause d'une accélération du cycle des lumières, les deux Avatit jouent des notes de plus en plus aiguës. Mais au lieu que les violons suivent linéairement l'accélération des lumières, on a, à l'écoute, l'impression que quelque chose retient cette montée. Cet effet musical de tension est là engendré par le SOM2 qui a ici un taux d'apprentissage inférieur à celui du SOM1 et réagit donc plus lentement aux changements dans l'environnement.

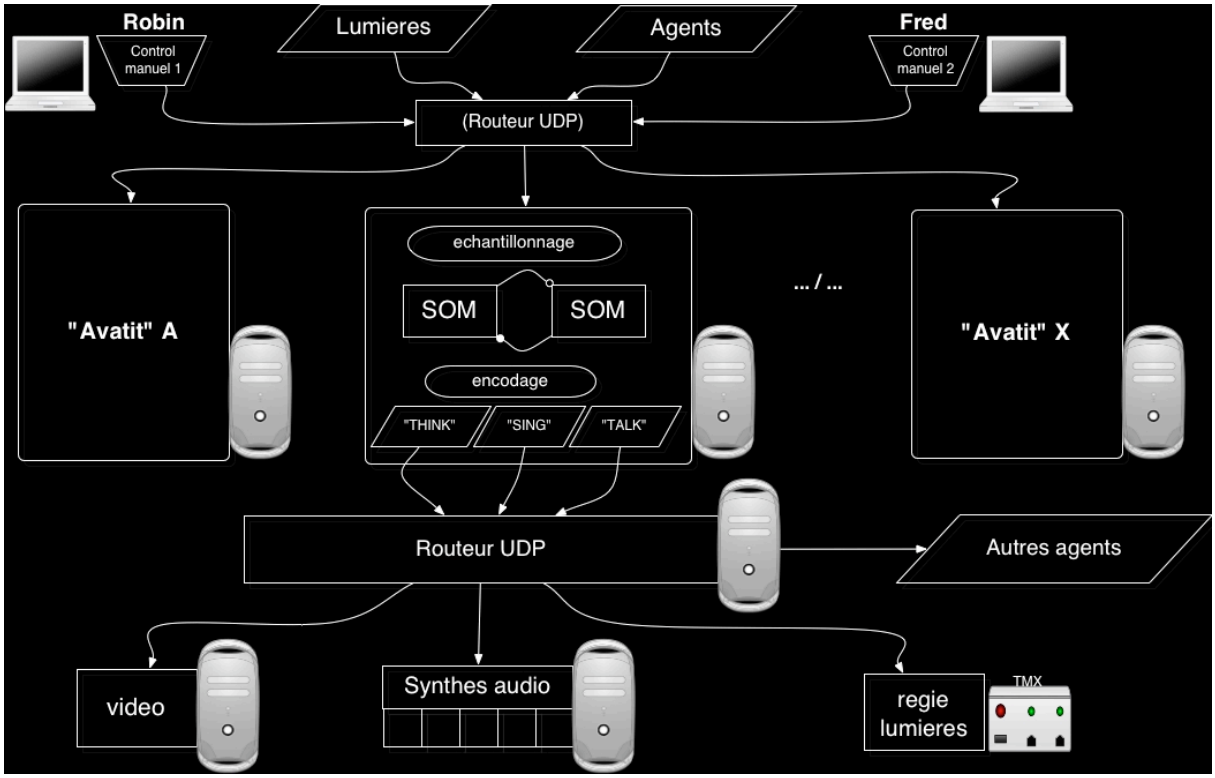
Lors d'un taux de *feedback* de 0%, le SOM2 n'entre plus du tout en jeu pour l'activité sonore d'un Avatit, même s'il continue à évoluer selon les stimuli envoyés par SOM1. Dans ce cas là le comportement de l'Avatit est le même que celui du SOM imitateur dans *For Alan Turing* et les modes de jeu se réduisent à ceux déjà cités dans le chapitre *For Alan Turing*.



Ce tableau nous montre sur le même axe temporel des stimuli lumineux réguliers et les réponses à ces stimuli par un seul Avatit. Le taux d'apprentissage de cet Avatit est assez élevé (0.45) et la réinjection interne entre les deux cartes de l'Avatit est nulle. Les valeurs de chaque neurone constituant la réponse de l'agent sont montrées en deuxième ligne. On observe une adaptation rapide due au taux d'apprentissage élevé, après une première phase plutôt chaotique (entre 0 et 1 seconde). En troisième ligne figure le spectre des sons (sonagramme) générés par le synthétiseur FM, dont les paramètres sont contrôlés par les réponses envoyées par l'Avatit.

2.2.4 Résumé Dispositif Nuit Blanche

Le schéma suivant donne une vue d'ensemble du dispositif fonctionnel de *Caresses de marquises.*



Le contrôle de la lumière et des Avatit provenant de Frédéric Voisin et moi-même ainsi que les informations sur l'environnement (lumière et activité des autres Avatit) sont reçus par un routeur informatique qui les renvoie aux différents Avatit en utilisant un protocole standard (UDP).

Trois aspects de l'activité d'un Avatit sont utilisés : un module "think" renvoie l'état des deux cartes auto-organisatrices afin qu'ils soient visualisés sur un écran vidéo près de l'estrade accueillant le public; le module "sing" renvoie les poids synaptiques du neurone gagnant afin de contrôler le synthétiseur audio associé à un Avatit; enfin le module "talk" envoie les mêmes informations que "sing" formatées de façon légèrement différente aux autres Avatit l'entourant. La distribution de ces informations et de nouveau assurée par le routeur UDP.

L'ordinateur-routeur contrôle également la lumière à travers une interface DMX pour les projecteurs de lumière.

2.2.5 Symphonie des machines

En raison des ressources de calcul importantes utilisées par un Avatit par rapport au

nombre relativement restreint d'ordinateurs, le nombre maximal d'Avatit utilisés simultanément pendant la Nuit Blanche n'était que de huit, chacun constitué d'un maximum de 200 neurones formels.

Dans cette configuration, comparable en nombre d'agents, à un ensemble de "musique de chambre", des dynamiques de comportement à grande échelle, observables dans des systèmes multi-agents, n'étaient visibles que dans leur état embryonnaire, ce qui permettait néanmoins une première familiarisation avec ces phénomènes. Grâce au Festival de la quatrième dimension à Sophia Antipolis en 2006, nous avons pu dépasser ces limitations en utilisant un grand nombre d'ordinateurs mis à disposition par les partenaires de ce projet.

Une vidéo de 12 minutes, commentée et complétée par des animations, montre la *Symphonie de machines* pendant son montage et sa présentation au public. Cette vidéo est disponible sur le CD-ROM accompagnant ce mémoire.

2.2.6 Dispositif

La *Symphonie des machines* est une installation-concert pour une population d'agents neuromimétiques de même type que les Avatit utilisés pour la Nuit Blanche. Elle a été créée du 6 au 9 juin 2006 lors de la première édition du Festival de la quatrième Dimension à Sophia Antipolis, sous l'égide de l'association Telecom Valley, avec la participation de la Fondation Sophia Antipolis, du CIRM, de l'institut Eurecom, Infineon, France Télécom R&D, Philips, l'INRIA, EDF et Cisco.

La *Symphonie des machines* s'est déroulée simultanément sur 5 sites : ceux de Eurécom et Infinéon, situés du coté Nord de la vallée des Bouillides et, en face, coté Sud, ceux de la Fondation Sophia Antipolis, Philips et France Telecom.

Sur chaque site étaient donnés à voir les rythmes lumineux, au moyen de projecteurs disposés par nous-mêmes selon l'architecture et l'environnement de chacun des bâtiments; dans le même temps, sont données à entendre les diverses interactions des agents au moyen de haut-parleurs qui sont également intégrés *in situ*. (cf. vidéo

sur la *Symphonie des machines* sur le CD-ROM)

Vue aérienne de Sophia Antipolis.

A Infineon se trouvait la régie principale où Frédéric Voisin et moi-même contrôlions la population des agents simulés sur deux cluster (à Infineon et à Eurécom) reliés par une liaison hertzienne (wifi) à très haut débit spécialement installée pour la *Symphonie des machines*. Cette population envoyait alors, par internet, sa propre activité aux autres sites qui constituaient autant d'organes sonores, diffusant les interactions polyphoniques dans la vallée des Bouillides à Sophia Antipolis.

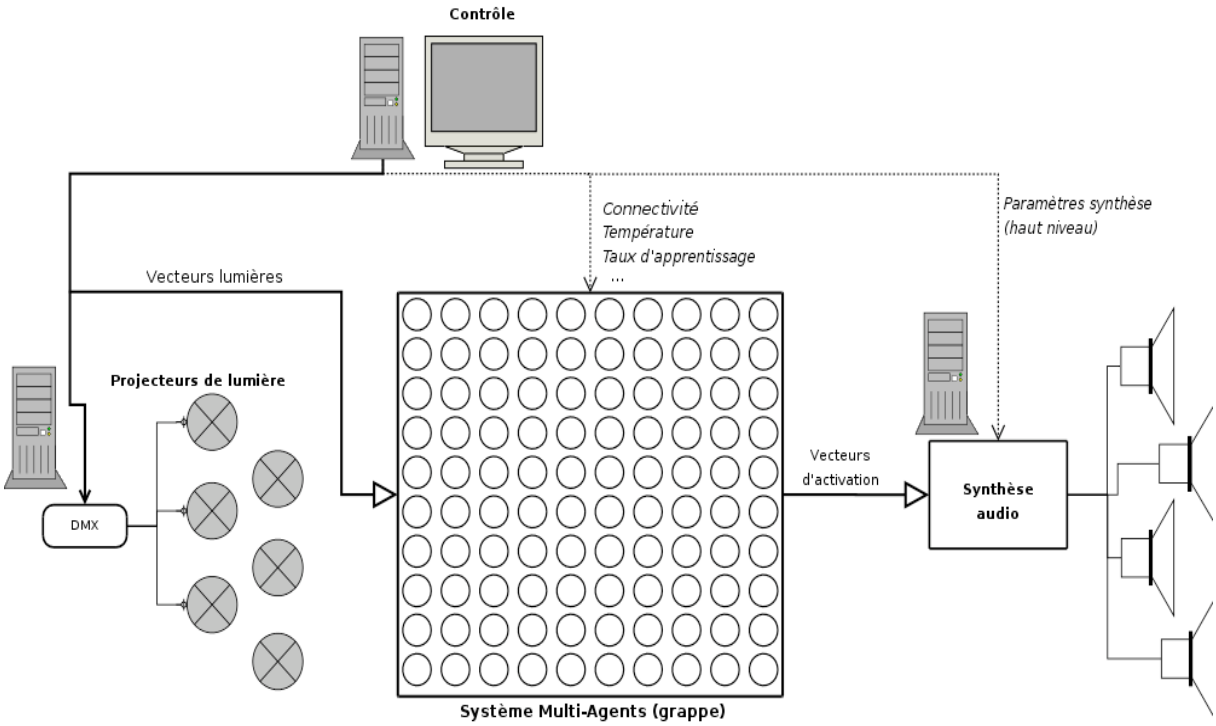
2.2.7 Dispositif technique

Une grande partie du dispositif de la *Symphonie de machines* faisait appel aux

ressources mises à disposition par les différents partenaires du festival : les bâtiments où siègent ces partenaires, l'infrastructure informatique, des moyens de télécommunication ainsi que du personnel nous aidant dans de multiples domaines : installation technique, implémentation, déploiement, relations publiques... Le matériel supplémentaire tel que les haut-parleurs, les projecteurs de lumière, etc. a été loué à une entreprise siégeant à Cannes.

Les cluster informatiques ont été mis à disposition par Eurecom (50 ordinateurs de bureau), Infineon (36 serveurs SUN) et l'INRIA (environ 30 ordinateurs de bureau). Le cluster mis en place par l'INRIA n'a malheureusement pas pu être utilisé dans les délais imposés par le festival. En plus des ressources physiques ces partenaires nous mettaient à disposition des ressources humaines, indispensables pour l'installation, les tests et le fonctionnement informatique de notre performance.

La figure suivante résume le schéma fonctionnel de la *Symphonie des machines* :



Depuis la régie générale Frédéric Voisin et moi contrôlions les lumières, les agents ainsi que la synthèse audio.

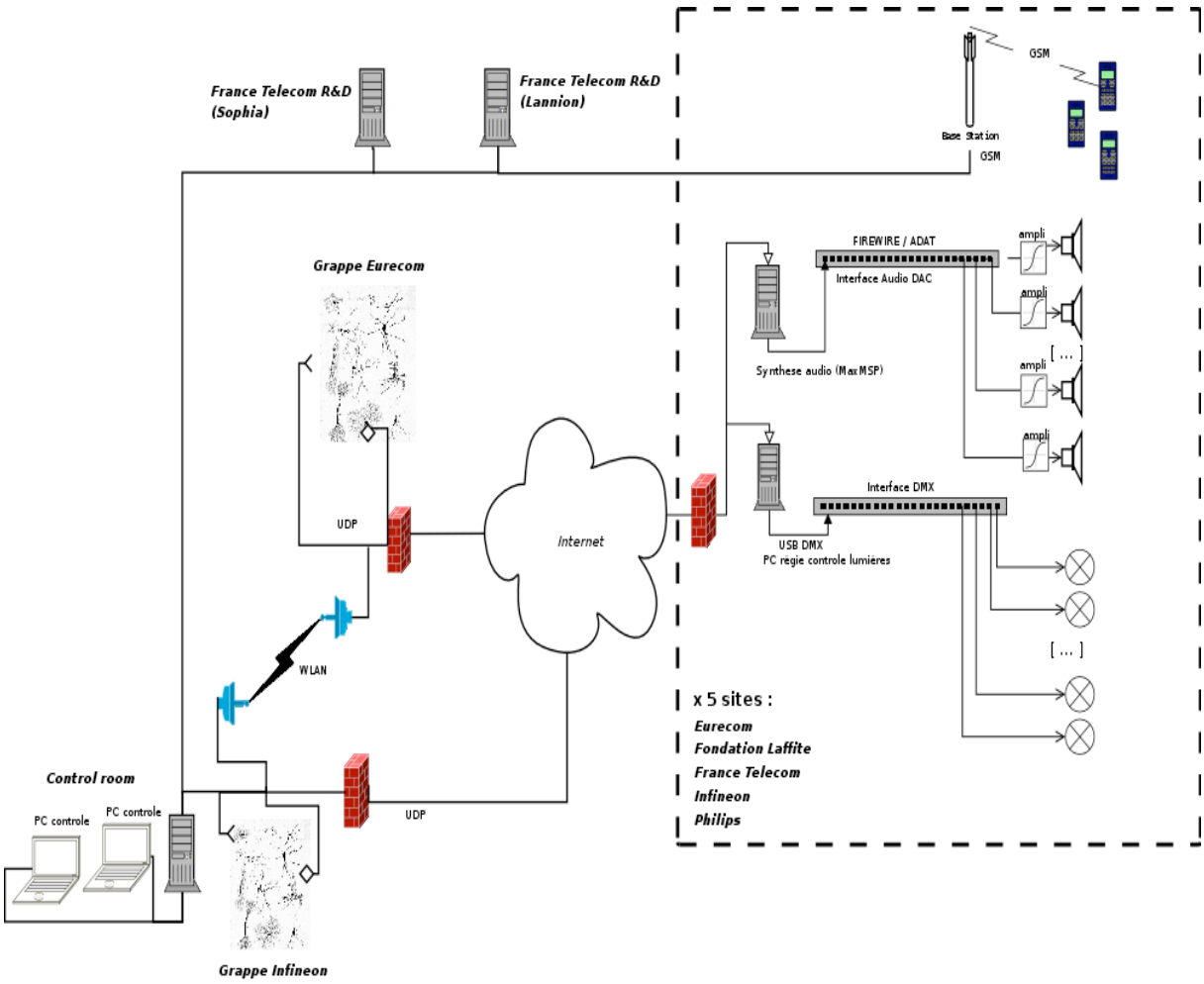
Pour le contrôle de la lumière nous envoyions les mêmes vecteurs au dispositif lumière ainsi qu'aux agents. La stimulation des agents par la lumière était ciblée : un agent ne réagissait donc qu'à une partie des vecteurs envoyés. Ainsi les agents étaient associés à certains sites, même si ces vecteurs pouvaient se propager au sein de toute la population selon la communication inter-agents.

Les agents étaient contrôlés au moyen des paramètres déjà présentés ci-dessus (connectivité entre les agents, leurs températures, etc.). Par défaut un agent ne communiquait qu'avec ses voisins, de manière comparable à la fonction de voisinage dans un SOM. Néanmoins, il était intéressant de créer de temps en temps des connexions "longue-distance" entre des agents éloignés, afin d'altérer la propagation des vecteurs. Pour une discussion de cette technique voir "Collective dynamics of 'small-world' networks" (Watts et Strogatz, 1998) ainsi que "Exploring complex networks" (Strogatz, 2001).

Pour la synthèse sonore nous choisissions l'affectation d'un synthétiseur à un agent, comme s'il s'agissait d'orchestration dans le travail de composition instrumentale. De plus le contrôle de la synthèse nous permettait de réguler les intensités sonores et le lieu géographique où tel agent ou tel groupe d'agents jouait.

Sur chaque site le relais du contrôle de la lumière et de la synthèse était assuré par deux ordinateurs dédiés.

La figure suivante résume le dispositif physique utilisé pendant la *Symphonie des machines :*



A droite, dans le rectangle pointillé, est résumé le dispositif se trouvant sur chacun des cinq sites : synthèse audio et projection lumière. De plus il était possible pour le public, grâce à un service mis en place par France Télécom, d'appeler un numéro gratuit et de laisser des messages sur un serveur vocal à Lannion. Ces messages étaient ensuite transférés automatiquement sur un serveur similaire à Sophia Antipolis où nous pouvions accéder et les distribuer ensuite sur les ordinateurs assurant la synthèse sonore sur chaque site : ces messages laissés par le public visitant la Symphonie de machines nous servaient alors de matériau sonore pour différents types de synthèse tels que la synthèse granulaire. Les messages étaient dès lors transformés et réinterprétés par les agents en temps réel.

Les deux cluster étaient reliés par une connexion hertzienne (wifi) dédiée à très haut débit et étaient tous les deux contrôlés à travers les réseaux internes - intranet - d'Eurecom et d'Infineon. L'envoi des vecteurs générés par les agents vers les différents sites s'effectuait par internet.

2.2.8 Implémentation

Les agents neuromimétiques ont été développés de manière quasiment similaire dans les langages LISP et Python pour les environnements Linux et Mac OS X. L'implémentation en LISP des agents n'a pas pu être implémentée sur le cluster de Eurecom ni sur celui de INRIA, à cause d'incompatibilités. Sur ces cluster, seuls les agents écrits dans Python, indifférents à la version du noyau Linux (2.4 ou 2.6), ont pu être instanciés. Les agents écrits en LISP ont donc été mis en oeuvre sur le seul cluster de Infineon Technologies dans la mesure où ces machines, mises à notre complète disposition, purent être complètement réinstallées.

L'implémentation en Python se révèle donc plus aisée, tant pour la création de processus simultanés et la gestion de flux UDP, et ce pour différents systèmes d'exploitation (Linux, Mac OS X, Windows). Si des tests comparatifs en calcul (*benchmarks*) semblaient montrer des performances du LISP parfois supérieures au Python, dans la pratique les performances étaient comparables : le plus souvent 98% des ressources de chaque processeur Intel Pentium4 de 3 Ghz (40 % pour les serveurs Sun) étaient mises à contribution pour chaque agent, mais aucune latence autre que celle propre au réseau n'était décelable. Les agents, en LISP comme en Python, pouvaient rester actifs plusieurs jours, les surchauffes des processeurs pouvant être évitées en modulant les latences des agents à différents niveaux.

2.2.9 Émergence dans un système multi-agent et multi-échelle

Nous avons pu observer des phénomènes que nous considérons comme émergents à deux niveaux de notre système : d'une part à l'intérieur des cartes auto-organisatrices, telles que nous les connaissons déjà depuis nos premiers essais en 2003 et telles qu'elles ont été décrites dans le chapitre sur les cartes auto-organisatrices. D'autre part, nous avons pu observer des phénomènes similaires au niveau de la population de nos agents.

Concrètement nous avons constaté la formation de régions topologiques constituées

de plusieurs agents partageant des ensembles similaires de vecteurs. Ces régions "linguistiques" pouvaient se développer de façon assez indépendante et des croisements entre différents ensembles de vecteurs ont pu être observés dans les zones entre deux régions.

Cette apparition de groupes parmi les agents s'explique en partie par la topologie informatique du réseau reliant les agents ainsi que par notre stimulation ciblée des agents, mais des dynamiques inhérentes à l'interaction entre les agents influencent certainement ce phénomène également.

La topologie du réseau des machines accueillant les agents était très hétérogène pour trois raisons : les différents types de machines utilisées (allant de serveurs SUN jusqu'à des ordinateurs de bureau dans une salle de classe), les différents types de connexions entre ces machines (réseau ethernet interne, liaison wifi dédiée) ainsi que la puissance variable des machines utilisées (différentes architectures de processeurs, utilisation d'ordinateurs par des étudiants en parallèle à nos expériences). Tous ces facteurs influençaient la communication entre les agents. Ainsi des connexions de très haut débit entre des machines à proximité favorisaient l'échange de vecteurs entre deux agents et engendrait généralement un couplage plus fort entre eux. En même temps, un ordinateur à puissance réduite, ralentissait considérablement l'agent qu'il accueillait et dont le comportement se découplait ainsi partiellement des autres.

Cette topologie informatique est comparable à des topologies naturelles, telles que des vallées ou des fleuves créant des barrières linguistiques par exemple.

Lors de la stimulation de la population des agents par les rythmes lumineux, nous avons choisi de stimuler des agents différents pour chacun des cinq sites. Ce choix entraînait naturellement la formation de régions au sein de la population mais ne constituait avec la topologie du réseau pas les seules influences de ce phénomène. Ainsi les traces des vecteurs passés précédemment dans les SOM des agents pouvaient accélérer ou ralentir la propagation de certains vecteurs. C'est dans cet

aspect dynamique que se montre également une rétroaction de l'organisation en groupes sur les interactions entre les agents, telle qu'elle a déjà été décrite pour l'émergence bilatérale. Ainsi les états internes des agents définissent des régions de vecteurs partagés, pendant que l'appartenance à une certaine région influence de nouveau la formation des états internes des agents.

Nous pensons que ces phénomènes ressemblent beaucoup aux dynamiques d'auto-organisation à l'intérieur d'un SOM et que des mécanismes utilisés pour les SOM permettront d'affiner ce comportement pour un système multi-agent comme le nôtre. Cet effet à échelle multiple - neurones formelles vs. SOM ; SOM1 et SOM2 vs. agent ; agent vs. population - me semble particulièrement intéressant et augmente considérablement la complexité et la richesse du système, tout en permettant, selon notre méthode, un contrôle musical de haut niveau, à la manière d'un chef d'orchestre. Grâce à ses différents niveaux, un tel système est capable de représenter des aspects dans son environnement de plusieurs échelles **(asdf)**, allant par exemple d'un décalage rythmique entre deux projecteurs jusqu'à des régularités de longue durée entre plusieurs sites.

2.2.9.1 Conditions d'émergence

Rappelons ici les conditions des propriétés émergentes proposées par Frédéric Nef (cf. chapitre 1.2.7.8 sur l'émergence)

- imprévisibilité
- nouveauté
- irréductibilité

Du fait de la complexité de notre système, des interactions à l'intérieur des niveaux différents cités ci-dessus et des interactions entre ces niveaux, l'organisation topologique au sein de la population n'est pas prévisible sans passer par toutes les étapes de calcul menant à un état précis, et satisfait ainsi la première condition d'émergence de Frédéric Nef (cf. chapitre sur l'émergence). De même, le critère de nouveauté dans le sens proposé par Stephan (1999) - donc une nouveauté dans le

sens temporel - est satisfait par la nature dynamique de notre système. De plus, le niveau d'organisation qui se situe à un niveau supérieur ne se retrouvant pas de la même façon dans les propriétés d'un agent ce même critère est satisfait aussi dans le sens de Nef. Finalement, l'organisation topologique observée dans la population des agents survient sur les propriétés d'un agent par la rétroaction décrite ci-dessus. De plus, cette organisation est multi-réalisable : les régions de vecteurs partagés pouvant apparaître à différents endroits de la population.

2.2.10 Art / Science : aspects sociologiques

L'initiative du projet sur le site relève à la fois des domaines politiques et artistiques (Telecom Valley, GRID 5000...). Un projet artistique qui participe de la dynamique de développement technologique et régional. Ainsi se sont posées de nombreuses questions sur la couverture en moyens de télécommunication sur l'ensemble du site et l'évaluation de solutions technologiques plus ou moins expérimentales (wimax, fibre optique, liaison satellite...).

La dimension artistique du projet a bien sûr été un élément fédérateur décisif en suscitant un enthousiasme de chacun sans lequel certaines perturbations dans le fonctionnement normal des instituts et entreprises n'auraient été rendues possibles. Divers désagréments, comme par exemple, la pose de plusieurs kilomètres de câbles entre les bureaux, des problèmes de sécurité (électrique et informatique notamment).

Pour les responsables et ingénieurs informatique, un tel projet permettait de valoriser de manière originale leur expérience professionnelle et, aussi, de permettre une contribution directement publique, à travers la présentation de la *Symphonie des machines* à un large public (la manifestation était gratuite pour le public).

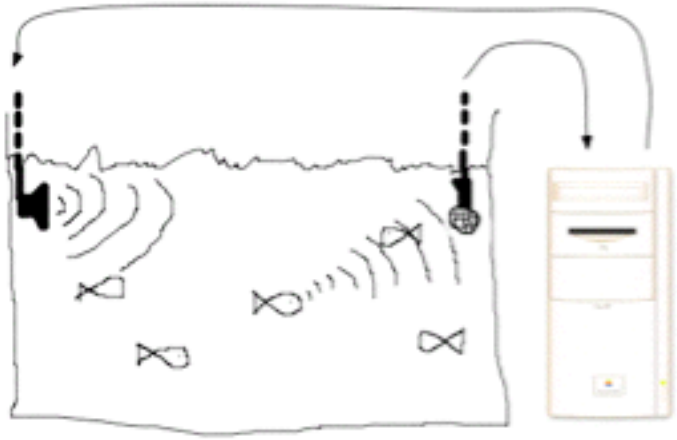
Si ces contributions venaient, pour commencer, s'ajouter au travail lié au fonctionnement normal de chacune des entreprises ou instituts, elles devaient ensuite mobiliser une partie de leurs ressources en personnel et en matériel.

2.2.11 Futur

Les expériences de la Nuit Blanche et du Festival de la quatrième dimension ont montré la nécessité de répéter et de conduire des expériences *in situ* à grande échelle afin de pouvoir évaluer et apprendre à contrôler les dynamiques complexes de ces systèmes. Nous nous retrouvons ici dans la situation similaire à celle d'un musicien travaillant son instrument, même si malheureusement les contraintes temporelles et budgétaires souvent ne nous permettent pas d'y consacrer suffisamment de temps. Pour cette raison, Frédéric Voisin et moi-même travaillons actuellement à la mise en place d'un *cluster* constitué d'un vingtaine d'ordinateurs de bureau dans une cave en banlieue de Paris. Ce *cluster*, à notre entière disposition, permettra enfin d'étudier et de développer en détail les travaux décrits ci-dessus.

2.3 Fish

Fish est une installation cybernétique dédiée à Stafford Beer essayant d'établir une boucle cognitive entre un ordinateur et trois poissons électriques. Dans sa forme actuelle décrite ci-dessous, ce work-in-progress est pour moi la mise en place d'un dispositif, la création d'un laboratoire, pour des futures versions de ce projet plus élaborées et étendues.



Fish a été réalisé à Nice grâce au soutien du Projet Diligence[1] et a été montré à la Sous-station Lebon, Nice lors de l'exposition "Pouvoir / Puissance" du 20 juin jusqu'à mi-août 2007. Le temps nécessaire au montage de l'installation et à la conduite des recherches qui y étaient liées a été très limité : à peine une semaine dédiée, ainsi que quelques semaines parallèlement à mes autres activités professionnelles. Ainsi l'état dans lequel cette oeuvre a été présentée pendant l'été 2007 relève plus d'une démonstration de faisabilité que d'une véritable recherche aboutie. Mais les éléments pour poursuivre cette voie sont maintenant en place.

[1] Je tiens à remercier Valentin Souquet, Émilie Pischedda et Pierre-Laurent Cassière pour leur aide indispensable dans la réalisation de ce projet

Ci-dessus, poisson éléphant et visiteur de l'exposition

Le dispositif de Fish à la Sous-Station Le Bon

Dans *Fish* un ordinateur essaie par adaptation et mimétisme d'établir une communication avec trois poissons électriques, chacun isolé des autres dans son aquarium: un poisson éléphant (*Gnathonemus petersii)* un poisson couteau américain "black ghost knifefish" (*Apteronotus albifrons*) et un autre poisson couteau: "brown ghost knifefish" (*Apteronotus leptorhynchus*).

Les signaux électriques émis par ces poissons, qui vivent tous dans des rivières avec une visibilité minimale, servent à l'orientation, à la détection ainsi qu'à la communication (Hopkins et al., 1986; Kramer, 1990; Moller, 1995; Carlson, 2002). Tandis que le poisson éléphant émet des clics à une fréquence d'entre 10Hz et 0.5Hz, les poissons couteau émettent des signaux quasi-sinusoïdaux à 500-1500Hz. Ces signaux sont analysés avec différentes méthodes afin d'être imités par la machine. Ces imitations sont resynthétisées dans l'eau en créant des champs électriques similaires à celui d'un vrai poisson.

A travers des haut-parleurs fixés sur la structure métallique accueillant les trois aquariums, on entend les activités électriques des poissons ainsi que leurs imitations par la machine.

Le but du dispositif est de provoquer des changements dans le comportement du poisson. Grâce à la nature artistique de ce travail, n'importe quel changement comportemental observable, qu'il soit moteur, électrique ou autre, donne à ce dispositif un sens directement percevable et vérifiable par le public de l'exposition.

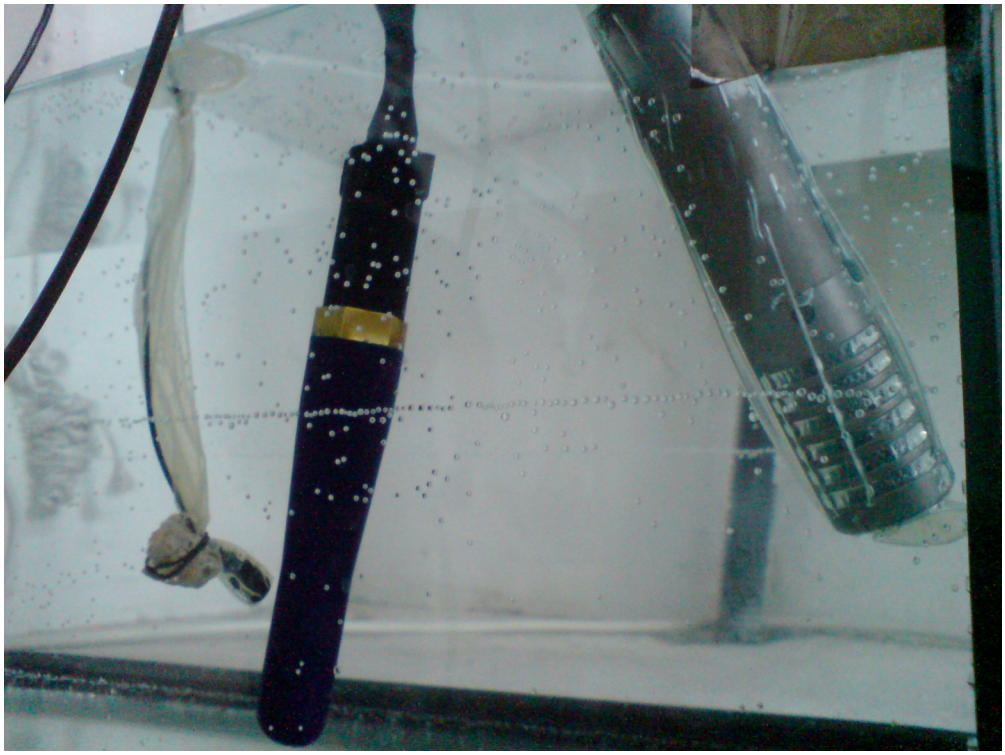
2.3.1 Mesure des signaux émis par les poissons

Différentes façons de mesurer les signaux des poissons ont été expérimentées. Au début du projet j'avais voulu travailler avec les sons acoustiques des poissons, phénomène dont j'ai entendu parler lors d'une conférence de Roy Patterson à l'École Normale Supérieure en mai 2006 sur le sujet de la communication sonore chez les animaux.

Pierre-Laurent Cassière et moi avons essayé divers types de microphones allant d'un hydrophone (destiné à enregistrer des baleines et pas suffisamment sensible pour notre expérience) jusqu'à des micros électrostatiques miniatures protégés par un emballage latex de forme allongée. Malheureusement nous n'avons pas réussi à entendre un seul son de poisson et étions obligés de changer rapidement notre stratégie, la littérature indiquant par ailleurs que la production sonore du poisson éléphant n'est qu'intermittente, préférablement la nuit et lors des phases d'accouplement : ces conditions semblait trop contraignantes dans le cadre d'une exposition artistique publique.

C'est suite à cette première expérience que j'ai décidé d'utiliser les signaux électriques des poissons. Des dispositifs de captation électrique dans l'eau sont peu coûteux et sont faciles à réaliser. Nous avons dénudé des câbles audio (mono) et utilisions la masse et le signal comme deux électrodes. Ensuite la différence de potentiel mesurée par nos électrodes était amplifiée par les préamplificateurs d'une carte son RME Fireface 400. A cause du manque d'isolation ainsi que du matériel non adapté à ce type de mesures, nous avions une quantité considérable de bruit de fond dans l'enregistrement. De plus, les électrodes s'apparentant à des antennes, les perturbations ambiantes dans la Sous-station Lebon, ancienne centrale électrique, parasitaient également les signaux émis par les poissons. Heureusement ces signaux sont très saillants et l'amplification sonore obtenue est utilisable pour l'analyse après un filtrage passe-haut. Cependant, ce point pourrait être amélioré pour un meilleur rendu acoustique.

Pierre-Laurent Cassière avec microphone électret



Différents types de microphones dans l'aquarium

2.3.2 Stimulation

Afin d'envoyer des stimuli dans les aquariums contenant les poissons, le même type d'électrodes que celles utilisées pour la captation ont été utilisées. L'amplitude des signaux envoyés a été réglée à l'oreille en la comparant à celle du champ électrique reçu des poissons, à travers la même électrode réceptrice. Bien qu'assez imprécise, cette méthode aboutissait quand même à évoquer des changements dans les signaux émis par les poissons couteaux. Ultérieurement, l'utilisation de matériel adapté pour un meilleur étalonnage permettra d'affiner la création des stimuli, permettant peut-être enfin une meilleure communication avec le poisson éléphant que nous ne croyons pas avoir encore suscitée *(cf. infra)*.

2.3.3 Méthodes d'analyse

Les méthodes d'analyse des signaux émis par les poissons constituent un point crucial pour la réussite de cette expérience. Cette problématique se divise en deux parties: l'encodage des mesures obtenues et l'analyse des données générées par cet encodage.

2.3.3.1 Encodage

Le choix de l'encodage nous ramène aux observations d'Ashby (1970) sur le choix des observables dans un système, déjà mentionnées dans le chapitre sur le dispositif de Gordon Pask:

"The would-be model maker is now in the extremely common situation of facing some incompletely defined system, that he proposes to study through a study of its variables. Then comes the problem: of the infinity of variables available in this universe, which subset shall he take? What methods can he use for selecting the correct subset?"

Quels sont donc les observables intéressants pour cette expérience? Dans sa présentation mentionnée ci-dessus, Roy Patterson parle des propriétés indexicales (Abercombie, 1967) dans des signaux acoustiques discontinus émis par des animaux tels que les grenouilles ou les poissons éléphants. Ces propriétés sont porteuses d'information sur le producteur du signal. Les signaux acoustiques émis par des poissons sont généralement créés par un muscle spécialisé, tapant sur la

swim-bladder. La taille d'un poisson se multipliant par un facteur entre 100 et 1000 pendant sa vie, le spectre et les formants de la résonance suivant une impulsion créée par ce muscle, informent sur la taille du poisson - critère de *fitness* dans le sens évolutionnaire. Je n'ai trouvé aucun article analysant cette propriété indexicale pour les signaux électriques des poissons et une étude de cet aspect me semble nécessaire.

Patterson distingue trois façons d'encodage d'information dans cette forme de signaux: la propriété indexicale décrite ci-dessus, les aspects temporels par la fréquence des clics ainsi que la résonance après une ségrégation des propriétés indexicales (Smith, D.R.R., Patterson, R. et al., 2005) et (Peirce, C.S., 1932) Cette ségrégation est comparable à un effet d'échelle du signal perçu, selon ses propriétés indexicales, afin de normaliser en quelque sorte le signal. Ces trois aspects doivent être analysés dans de futures expériences. Pour l'instant, le seul aspect étudié parmi ces trois, est d'ordre temporel ou rythmique.

Pour cette première expérience, les encodages que j'ai choisis sont la fréquence du signal émis par les poissons couteaux, le temps entre chaque impulsion du poisson éléphant (*inter-onset interval IOI*) ainsi que la différence entre chaque IOI et l'IOI précédant (*delta-IOI*), ce qui nous donne l'information sur l'accélération ou le ralentissement des impulsions du poisson éléphant.

Afin d'encoder les signaux du poisson éléphant sous leurs aspect temporels, je constitue des vecteurs de quatre éléments attribués à chacun des derniers quatre clics émis. La valeur de ces éléments est soit l'IOI, soit sa dérivée (delta-IOI). Chaque vecteur s'inscrit donc dans une fenêtre du temps, soit de manière discrète lorsqu'elle est actualisée tous les quatre clics, soit flottante lorsqu'elle est générée après chaque clic.

Dans notre implémentation, la détection des clics recourt au procédé de traitement de signal en temps réel pour la détection de notes, "bonk~", développé par Miller Puckette (Puckette et al., 1998, programmes Puredata et MaxMSP).

Dans le cas des poissons couteaux, j'effectue une analyse de hauteur au moyen du procédé de traitement de signal en temps réel pour la détection de hauteurs "fiddle~" (Puckette, idem)

Je projette d'expérimenter d'autres encodages lors de prochaines sessions avec les poissons. Notamment, l'analyse des formes d'ondes des poissons couteaux est intéressante et nécessite un matériel de mesure plus adapté, tel qu'un oscilloscope. Cela permettrait également d'analyser plus en détail la forme des clics du poisson éléphant.

2.3.3.2 Analyse

Dans la suite de ce travail, nous nous proposons d'effectuer plusieurs types d'analyses des signaux des poissons, selon l'encodage choisi pour les stimuli.

Afin de mesurer la quantité d'information, l'analyse nécessite de comparer des signaux "solo" de poissons éléphants, sans stimuli, avec ceux "solo" avec stimuli. Une étude comparée des signaux émis par un poisson isolé avec les signaux de deux poissons communicant est certainement nécessaire afin de détecter des changements entre ces deux cas. Ces différentes analyses restent encore à faire et vont probablement s'effectuer à Nice, fin septembre 2007.

A la suite d'une analyse statistique, des mesures de l'entropie de Shannon des signaux nous permettront d'étudier la quantité d'information contenue dans nos signaux. Aussi, la recherche d'autocorrélations permettront, le cas échéant, de détecter des régularités ou des motifs répétés, de même que l'analyse par des algorithmes de clustering, motifs qui pourront inspirer, par la suite, des nouveaux stimuli.

Egalement, le système ROSOM (cf. chapitre "For Alan Turing") pourrait être un outil d'autant plus intéressant qu'il permet non seulement de trouver des régularités dans le temps mais aussi d'en effectuer une classification par apprentissage non supervisé.

Pour l'instant, l'outil choisi pour l'analyse des données obtenues du poisson éléphant est un SOM à 100 unités. L'encodage a été réalisé en recourant à une fenêtre flottante de quatre IOI.

2.3.3.3 Modélisation de l'apprentissage de langues naturelles

Le traitement du langage naturel (*natural language processing - NLP*) est un des sujets phares de l'intelligence artificielle. La littérature en ce domaine est abondante et les SOM comme technique utilisée ne sont qu'un outil parmi beaucoup d'autres.

Comme, face aux poissons, nous nous trouvons dans une situation de non-compréhension presque totale, le sous-domaine de l'acquisition du langage semble le plus adapté à notre problématique. Même si, en général, les études de ce genre se limitent au langage humain, les études sur l'acquisition du langage chez les nourrissons de différentes cultures pourraient se relever assez générales pour alimenter notre recherche. La première question doit être celle de la faisabilité : est-il possible de construire un système capable de créer des catégories linguistiquement pertinentes sans connaissances de plus hauts niveaux préalables ?

Lors d'une présentation au sujet de l'acquisition des phonèmes en mars 2007 à l'EHESS, Sharon Peperkamp (Université Paris VIII et IUF) montrait un modèle mathématique capable, après un apprentissage, de classer correctement des sons dans leur catégorie phonétique (Le Calvez, Peperkamp et Dupoux, 2007). Ce travail démontre la possibilité d'une approche *bottom-up* dans l'acquisition des phonèmes : le nourrisson pourrait donc, comme le fait ici la machine, former les catégories phonétiques de sa langue sans connaissances de plus haut niveau, telles que les catégories lexicales, syntaxiques, etc.

Dans le résumé de sa présentation à l'EHESS en mars 2007, Sharon Peperkamp décrit la problématique de la façon suivante:

"Pendant leur première année de vie, les nourrissons apprennent avec une rapidité surprenante plusieurs aspects de la structure sonore de leur langue maternelle, alors

même qu'ils ne reconnaissent que très peu de mots, et qu'ils n'en produisent aucun. [...] Les phonèmes sont des unités abstraites qui peuvent avoir plusieurs réalisations phonétiques. Par exemple, en français le phonème /k/ est produit soit comme un son vélaire (comme dans le mot cou) soit comme un son palatal (comme dans le mot qui), et ce en fonction du son qui suit. Le contraste entre ces deux types de k n'est pas distinctif, c'est-à-dire qu'il n'est pas utilisé pour faire la différence entre deux mots, comme le fait par exemple le contraste entre p et b dans la paire de mots pain – bain. Le fait qu'un contraste donné soit distinctif ou non dépend de la langue et doit donc être acquis ; par exemple, contrairement au français, le contraste entre les deux types de k est distinctif en sanscrit."

La question est de savoir comment un nourrisson parvient à faire cette distinction sans avoir des connaissances lexicales ou même orthographiques. Sharon Peperkamp continue dans son résumé:

"Un algorithme d'acquisition qui ne prend pas en compte des connaissances lexicales est basé sur l'observation que les sons qui sont des réalisations d'un même phonème ont des distributions complémentaires. Je montrerai qu'une version statistique de cet algorithme (utilisant la divergence de Kullback-Leibler symétrisée) permet bien de détecter les distributions complémentaires, et ce même en présence de bruit dans les données. En m'appuyant sur des simulations effectuées sur des transcriptions phonétiques de parole d'adultes adressée à des enfants, je montrerai ensuite que cet algorithme est trop puissant mais que de nombreuses fausses alertes peuvent être écartées à l'aide d'un filtre linguistique. Enfin, je présenterai brièvement les résultats d'une expérience de perception qui montrent que les nourrissons de 10 mois sont sensibles aux distributions complémentaires."

L'algorithme décrit repose sur les distributions complémentaires des sons. La distribution complémentaire indique en linguistique que deux éléments (deux sons différents) n'apparaissent jamais dans le même contexte. Ainsi le même phonème français /k/ apparaît soit comme son vélaire ("cou") soit comme son palatal ("qui"), mais jamais dans la configuration "c-ui" : "c-" comme dans "cou" et "-ui" comme dans

"qui". C'est donc grâce au contexte qu'il est possible de catégoriser des phonèmes.

2.3.4 Contexte et sémantique : modèles informatiques

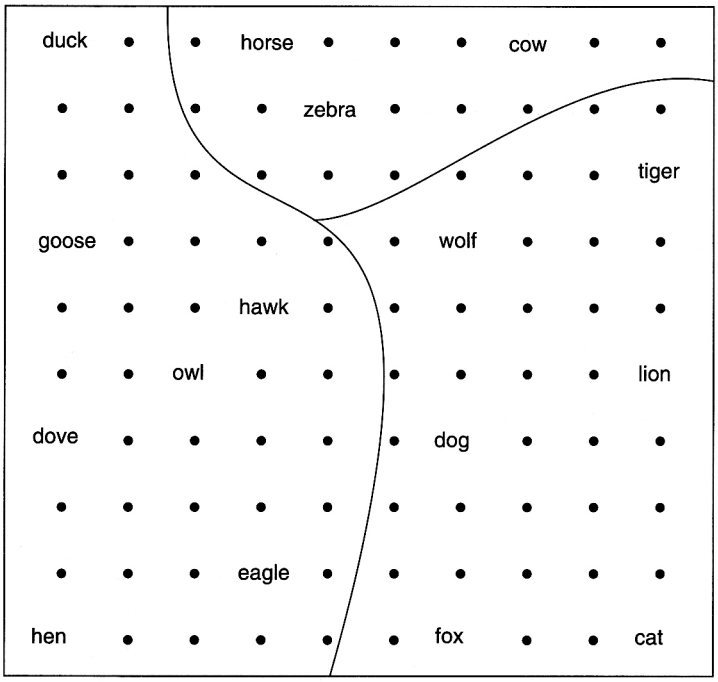
Manfred Spitzer dans son livre *The Mind within the Net* (1999) cite Ritter et Kohonen (1989) qui ont réussi une organisation sémantique de mots par une carte auto-organisatrice.

Dans une première expérience, Ritter et Kohonen créent des vecteurs à 13 valeurs binaires représentant des animaux. Les informations encodées dans ces vecteurs sont des informations contextuelles qui décrivent les propriétés de ces animaux. Par exemple, si l'animal est petit ou grand, s'il a des plumes ou non, etc.

		dove	hen	duck	goose	owl	hawk	eagle	fox	dog	wolf	cat	tiger	lion	horse	zebra	cow
is	small	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	medium	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	large	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
has	2 legs	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4 legs	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	hair	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	hoofs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	mane	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0
	feathers	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
can	hunt	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
	run	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0
	fly	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	swim	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

la représentation d'animaux avec des vecteurs

Ces vecteurs sont présentés à un SOM à 100 unités. Après 2'000 présentations, voici l'organisation de la carte :



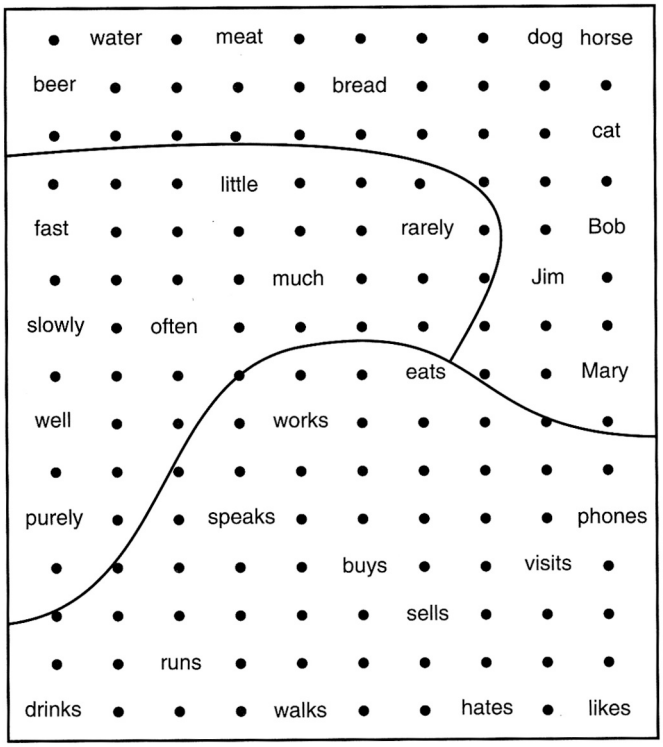
Les points noirs marquent des neurones à activation faible, tandis que les neurones "nommés" représentent des neurones gagnants. On observe une catégorisation pertinente des animaux : à gauche les oiseaux, à droite les animaux sauvages et en haut les animaux à sabot. À l'intérieur des catégories nous observons également que des animaux similaires sont placés proches les uns des autres (zèbre et cheval) et que des oiseaux prédateurs sont proches de la catégorie prédateurs.

Dans une autre expérience décrite dans le même article de Ritter et Kohonen (1989), trente mots sont organisés d'après leurs propriétés grammaticales. Ces catégories sont numérotées et en utilisant un automate obéissant à des règles d'enchaînement 498 différentes phrases ont été générées.

Word	Grammar	Example
1 Bob, Jim, Mary	5-12 1-9-2 2-5-14	Mary likes meat
2 horse, dog, eat	1-5-13 1-9-3 2-9-1	Jim speaks well
3 beer, water	1-5-14 1-9-4 2-9-2	Mary likes Jim
4 meat, bread	1-6-12 1-10-3 2-9-3	Jim eats often
5 runs, walks	1-6-13 1-11-4 2-9-4	Mary buys meat
6 works, speaks	1-6-14 1-10-12 2-10-3	dogs drink fast
7 visits, phones	1-6-15 1-10-13 2-10-12	horse hates meat
8 buys, sells	1-7-14 1-10-14 2-10-13	Jim eats rarely
9 likes, hates	1-8-12 1-11-12 2-10-14	Bob buys meat
10 drinks, eats	1-8-2 1-11-13 1-11-4	cat walks slowly
11 much, little	1-8-3 1-11-14 1-11-12	Jim eats bread
12 fast, slowly	1-8-4 2-5-12 2-11-13	cat hates Jim
13 often, rarely	1-9-1 2-5-13 2-11-14	Bob sells beer
14 well, poorly		etc.

Tableau des mots et règles grammaticales utilisés et quelques phrases exemplaires.

Lors de la construction des vecteurs, chaque mot est lui-même encodé ainsi que son contexte, les mots l'environnant. Voici l'organisation du SOM obtenue :



On observe une organisation sémantique et grammaticale des mots classés par noms, substantifs, verbes et adverbes. À l'intérieur de ces catégories des couples comme "fast" et "slow" sont proches, car ils apparaissent dans des contextes similaires : "the dog is fast/slow".

Ritter et Kohonen en concluent:

"In this work we have now shown that the principle of self-organizing maps can also be extended to higher levels of processing, where the relationships between items are more subtle and less apparent from their intrinsic features, a property that is characteristic of symbolic expressions. Symbols, in general, do not contain metrically relatable components. Consequently, meaningful topographic maps of symbols must no longer display intrinsic features, but instead the logical similarities of their inputs. It turns out, however, that organized mappings of symbolic data may still ensue from the same basic adaptation laws, provided that the symbolic input data are presented together with a sufficient amount of context, that then defines the similarity relationships between them." (Ritter et Kohonen, 1989)

Au vu des études et expériences décrites ci-dessus, l'utilisation d'un modèle computationnel non-symbolique pour l'analyse des signaux émis par les poissons semble pertinente. Le SOM comme un des outils de cette analyse, semble pouvoir apporter des informations utiles pour la catégorisation des différents signaux émis.

2.3.5 Premières tentatives de communication

Jusqu'à présent, nous n'avons pas encore pu observer de changements comportementaux chez le poisson éléphant malgré diverses propositions de stimuli. Les poissons couteaux par contre, changent la fréquence de leur signal électrique d'une dizaine de hertz lors d'une stimulation précise; nous arrivons même à contrôler la direction de ce changement de fréquence au moyen d'une fréquence proche évoquant un éloignement de la fréquence du poisson. Ce comportement reproductible peut constituer un outil de contrôle intéressant dans les

développements futurs de ce projet.

2.3.5.1 Poisson éléphant

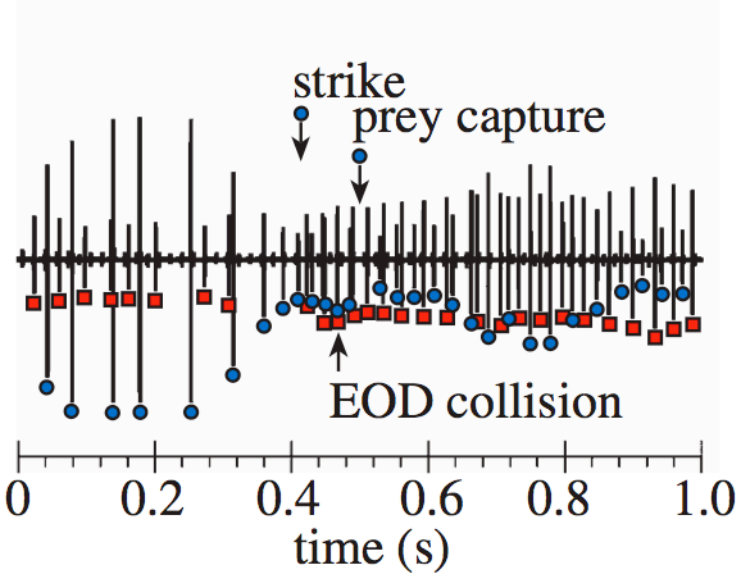
Malgré les tentatives provisoirement défaillantes d'établir une communication entre la machine et les poissons éléphants, ce n'est à mon avis plus qu'une question de temps pour arriver à émuler le comportement communicatif d'un poisson éléphant par un ordinateur et à influencer ainsi le comportement d'un autre poisson éléphant, lui réel. Comme nous l'avons vu, les conditions de l'expérience peuvent être encore améliorées, de même que la nature des stimuli qui nécessitent de mener une analyse plus approfondie des clics des poissons éléphants que nous avons pu enregistrer.

Les résultats prometteurs dans le domaine de la linguistique d'une part, et des observations sur le comportement des poissons électriques dans la nature d'autre part me semblent confirmer mon intuition. Arnegard et Carlson (2005) ont réussi pour la première fois à étudier le comportement de groupes de *Mormyrops anguilloides,* poisson électrique de la même famille que le poisson éléphant, dans leur habitat naturel. L'eau clair du lac Malawi permettait de filmer les poissons lors de la chasse en groupe, ce qui est impossible dans l'eau trouble des rivières dans lesquelles vivent habituellement les *mormyrides*.

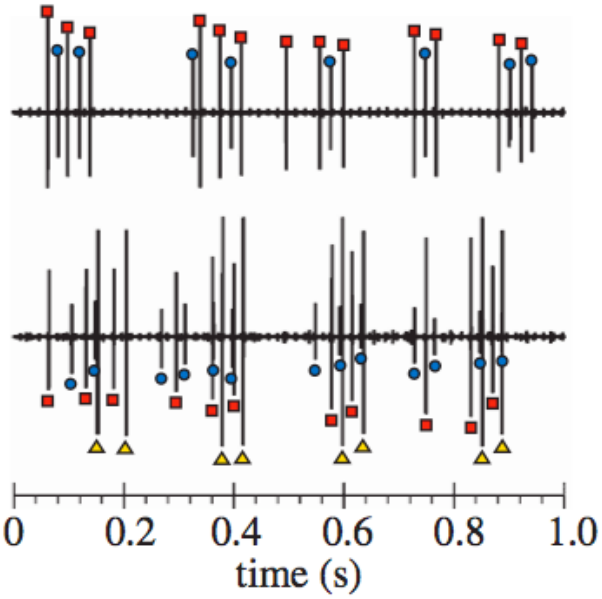
Arnegard et Carlson ont découvert la formation de groupes de chasse parmi les *Mormyrops anguilloides* restant ensemble pendant plusieurs semaines consécutives. Ces groupes restaient les mêmes malgré des rencontres avec d'autres *M. anguilloides*, indiquant une forme de communication entre eux. Graff et Kramer (1992) et Friedman et Hopkins (1996) ont montré que des variations individuelles dans la forme d'onde de leurs clics (*electric organ discharges - EOD*) suffisaient pour la reconnaissance de poissons individuels et donc l'identification des membres d'un groupe de chasse. Arnegard et Carlson concluent que des études utilisant des enregistrements de EOD seraient nécessaires, afin de tester cette hypothèse chez les *M. anguilloides.*

En comparant l'activité électrique des différents membres d'un groupe de chasse, Arnegard et Carlson observent deux phénomènes: un comportement qu'ils appellent *echoing* ains qu'une synchronisation des EOD. Ces observations indiquent que les *M. anguilloides* peuvent ajuster leurs EOD entre eux et soutiennent donc la thèse selon laquelle une interaction machine - poisson pourrait évoquer un changement comportemental dans le placement temporel des EOD chez un poisson électrique isolé.

L'accélération et la régularisation des EOD observées chez *M. anguilloides* pendant la chasse en groupe semblent similaires à celles observées chez des individus isolés. Cependant, Arnegard et Carlson notent une tendance forte du *echoing* des EOD parmi les membres du groupe de chasse : lors de la détection d'un EOD d'un poisson voisin, les deux individus ajustent le placement de leurs prochains EOD afin d'éviter des collisions d'EOD. Cette forme de synchronisation avec un décalage d'une demi-phase a été observée chez d'autres poissons électriques (cf. *jamming avoidance response* ci-dessous) et ressemble beaucoup au comportement de lucioles se synchronisant, tel qu'il a été décrit dans le chapitre 1.1.7 sur les oscillateurs couplés. Une modélisation du phénomène observé chez les poissons par un système d'oscillateurs couplés me semble facilement réalisable et pourrait apporter une approche supplémentaire dans les tentatives d'établir une interaction.



Les cercles et les carrés indiquent les EOD de deux individus chassant ensemble. On observe le phénomène de synchronisation décalée après la collision des EOD vers 0.6 secondes.



La synchronisation des EOD entre deux M. anguilloides après une courte séparation pendant la chasse (en haut) et entre trois individus dans leur cache pendant une pause de chasse (en bas). Arnegard et Carlson interprètent ce comportement comme outil de reconnaissance entre individus servant la cohésion du groupe de chasse.

2.3.5.2 Les poissons couteaux comme instruments

Pour les poissons couteaux, une influence par l'ordinateur sur leur comportement électrique a été réussie lors de la présentation de l'installation à Nice. Même si la façon d'influencer n'a pas été trouvée par l'ordinateur seul, ce moyen de contrôle peut constituer un outil de valeur dans des versions futures de cet oeuvre, comme ce sera décrit dans la conclusion de ce chapitre.

La manière de contrôle est décrite par Watanabe et Takeda (1962) et un article de Bernd Kramer (1999) en donne une explication possible.

D'après Kramer, il existe une multitude de formes d'ondes émises par des poissons

électriques produisant des signaux continus, selon leur espèce, taille, sexe, etc. (Kramer, 1999). En étudiant le poisson électrique *Eigenmannia,* de la même famille que les poissons couteaux, Kramer a détecté une grande sensibilité à des petites variations dans la forme d'onde émise par un autre poisson, réagissant même à des légers changements de phase entre les harmoniques du signal. D'après Kramer, cette sensibilité provient des battements d'interférence créés par la différence entre le signal propre du poisson et le signal émis par un autre poisson.

Akira Watanabe et Kimihisa Takeda (1962) décrivent le signal émis par *Eigenmannia* comme extrêmement stable, la température de l'eau restant, elle aussi, stable. La fréquence du signal ne change pas, même lors de stimulations diverses incluant des stimuli électriques (Grundfest, 1956). Cependant, Watanabe et Takeda ont trouvé une façon de stimuler le poisson entraînant un changement de sa fréquence.

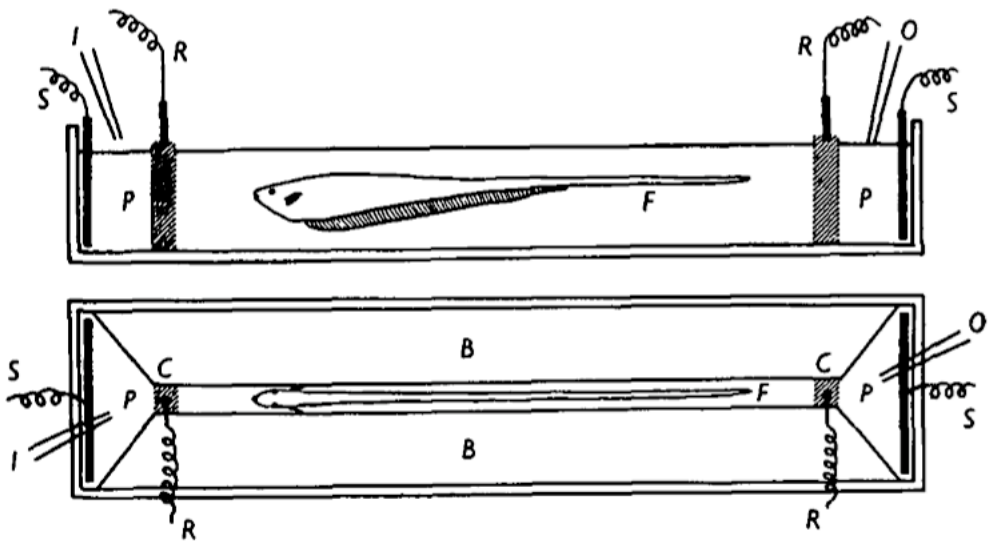
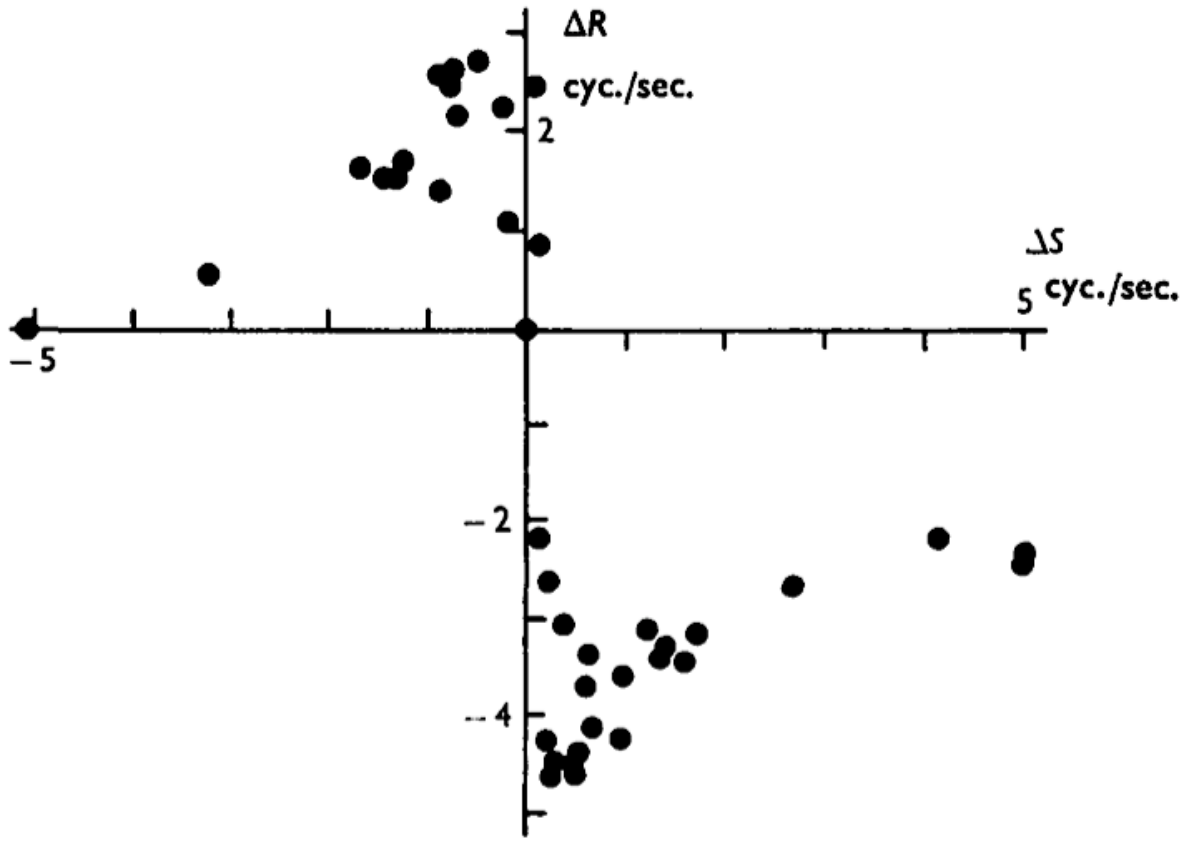


Fig. 1. General arrangement for the experiment. Upper: the side view. Lower: the top view. *B, B*: two paraffin blocks. *C, C*: cotton waddings. *F*: the electric fish. *I*: the inlet of circulation water. *O*: the outlet of circulation water. *P, P*: pools at both ends of the trough. *R, R*: two silver-wire recording electrodes. *S, S*: two silver-plate stimulating electrodes.

Le dispositif utilisé par Watanabe et Takeda pour la captation du signal émis par le poisson et sa stimulation.

En envoyant comme stimulus un courant alternatif généré par un oscillateur analogique de fréquence proche à celle du poisson, Watanabe et Takeda ont réussi à induire un changement de fréquence chez le poisson. Quand la fréquence du

stimulus était ± 20Hz celle du poisson (ΔS = 20Hz), le changement de fréquence chez le poisson était très petit (ΔR). Plus ΔS se rapprochait de la fréquence propre au poisson, plus ΔR augmentait, jusqu'au point où ΔS fut quasiment zéro, donc presque égale à la fréquence du poisson : dans ce cas, ΔR était soit très faible, soit non mesurable.



Les données ΔR vs ΔS obtenues par Watanabe et Takeda

Comme Kramer le note (1999), une hypothèse serait que le poisson se sert des battements d'interférence entre stimulus et fréquence propre, expliquant ainsi le fait que ΔS = 0 n'entraîne pas de réponse du poisson. Watanabe et Takeda (1962) décrivent cette situation comme un équilibre instable:

"[...] when ΔS is zero, the state may be regarded as being at an unsteady equilibrium. Probably a spontaneous fluctuation of the discharge frequency [la fréquence émise par le poisson] *can trigger the response, because even if the fluctuation is very small, the frequency difference will be increased once the response is elicited."*

Kramer montre ce même phénomène de façon reproductible et l'étudie de façon systématique. Son interprétation du comportement des poissons est que des stimuli très proches du signal propre au poisson créent des interférences (*jamming*) perturbant le discernement entre stimulus et fréquence propre, ce qui rend difficile la navigation par exemple. Ainsi le poisson ajusterait sa fréquence afin d'esquiver le stimulus (*jamming avoidance response - JAR*).

Stockhausen

En travaillant sur ce projet, plusieurs personnes m'ont parlé d'une anecdote racontée par Karlheinz Stockhausen lors d'une conférence en 1972 à Essen et retranscrite dans "Vier Kriterien der elektronischen Musik" (1973).

En parlant des influences physiologiques des sons, Stockhausen mentionne une lettre qu'il a reçue d'un biologiste à Siegburg, travaillant avec des malades mentaux en utilisant des sons et demandant accès au studio électronique de Stockhausen, afin de poursuivre ses recherches.

Stockhausen cite la lettre du biologiste :

"[...] Il m'est arrivée une chose phénoménale la semaine dernière. J'ai enregistré un métronome sur une bande magnétique que j'ai graduellement ralentie; à travers un casque j'ai transmis ce son dans un aquarium et j'ai réussi à synchroniser un poisson avec le rythme. A cause du ralentissement du métronome le poisson est mort, alors que ce n'a pas été mon intention. Il a bougé de plus en plus lentement - entièrement synchrone avec le métronome - et tout d'un coup, il était mort." (cité d'après Stockhausen. traduction par moi-même)

"Ich muß in Ihr Studio. Ich möchte die elektronischen Möglichkeiten benutzen, denn ich will kontinuierliche Accelerandi und Ritardandi mit bestimmten Klängen machen, die die Leute kennen, und sehen, was passiert. Mir ist vorige Woche etwas Phänomenales passiert. Ich habe ein Metronom auf Tonband aufgenommen und

dieses kontinuierlich sehr stark verlangsamt; über Kopfhörer habe ich den Klang in ein Aquarium übertragen und mit dem Rhythmus einen Fisch synchronisieren können. Durch die Verlangsamung des Metronoms ist der Fisch, und das war wirklich nicht beabsichtigt, gestorben. Er hat sich immer langsamer bewegt - völlig synchron mit dem Metronom -, und plötzlich war er tot." (cité d'après Stockhausen, 1973)

Malheureusement ces observations ne sont qu'anecdotiques et Stockhausen ne donne ni le nom du biologiste en question ni d'informations plus précises sur la synchronisation réussie. En quoi le poisson était synchrone avec le métronome? Concernant le phénomène en lui-même, je reste sceptique : un couplage si direct entre un stimulus sonore et la physiologie complexe d'un poisson serait étonnant et certainement désavantageux pour la survie de cette espèce. Il suffit de penser aux conséquences du ralentissement d'une hélice de bateau.

2.3.6 Art biotech

Dans son article "Bio Art - Taxonomy of an Etymological Monster" (2005) Jens Hauser donne quatre hypothèses pour une taxonomie de l'art biotech[1]. Hauser compare la situation contemporaine de l'art biotech avec la situation de l'art des nouveaux médias il y a quelques années:

"What is it exactly that is essential to and definitive of [media art] : that it produces art with the help of media, or that artists' encounters with certain subjects are thematicizing and changing the way media are being used? [...] It would be safe to say that nobody today would even think of categorizing Miltos Maneta's conceptual oil paintings depicting joysticks, computer mice and tangled thickets of cables and wires as computer art or media art. [...] Bio-fictional manifestations such as chimera-sculptures, DNA-portraits, chromosome-paintings or mutant-depicting digital photo-tricks are no more examples of Bio Art than Claude Monet's impressionistic paintings could be classified as "Water Lily Art" or "Cathedral Art". (Hauser, 2005)

[1] Je renvoie le lecteur à MEArt décrit dans le chapitre “Répercussions du dispositif de Pask » pour un exemple d’une oeuvre biotech.

Ainsi Hauser note comme première hypothèse de taxonomie la *rematérialisation* des oeuvres artistiques et évoque le festival Ars Electronica 1993 "Genetic Art - Artificial Life". D'après Hauser, l'art biotech ne s'inscrit pas dans ce courant qui met en avant une conception de la vie comme code, langage, software immatériel ou système dynamique, mais s'intéresse plutôt au *wetwork,* à la vie dans sa forme physique et incorporée.

En conséquence, Hauser note comme deuxième hypothèse de taxonomie l'abandon des visualisations et simulations, omniprésentes dans les oeuvres de vie artificielle, au profit des oeuvres artistiques qui sont plus proches des performances et qui s'intéressent à des *processus de transformation*. Il y a donc à la fois une rematérialisation dans les médias utilisés ainsi qu'une dématerialisation du sujet même lorsque mis en scène pour le public.

Troisièmement, l'auteur compare cette situation à la relation dialectique entre la présence réelle et sa représentation métaphorique, tel un acteur de théâtre qui représentant un rôle toujours métaphorique et, à l'inverse, un artiste de performance qui met en scène son propre corps avec son histoire individuelle. Pour Hauser il existe des *relations structurelles entre ce domaine d'art de performance et l'art biotech*. Un artiste emblématique de cette liaison est Stelarc, transformant son corps à l'aide des outils de la biotechnologie afin d'étendre ses limitations physiologiques (je renvoie le lecteur sur le site web de Stelarc : http://www.stelarc.va.com.au).
Finalement, Hauser cite la *manipulation des mécanismes de la vie* comme quatrième hypothèse et permet ainsi un élargissement de la taxonomie de l'art biotech, qui d'après lui, ne se laisse pas réduire à des procédures et des matériaux utilisés.

D'un point de vue esthétique, du fait des médias utilisés, *Fish* diffère des projets présentés précédemment dans ce mémoire : tandis que les autres projets étaient tous réalisés au moyen d'artefacts techniques, *Fish* se réalise dans le vivant, dans le changement comportemental des poissons.

Ici, même si physiquement le dispositif physique de cette oeuvre s'apparente à une

sculpture, celle-ci consiste cependant à montrer - à mettre en oeuvre - un processus d'adaptation, d'apprentissage et de manipulation. Ainsi l'oeuvre ne se situe pas dans les poissons ou la structure métallique ou leur juxtaposition, mais dans le processus de décodage - dans une dialectique entre une machine et un poisson s'adaptant l'un et l'autre à leur environnement changeant.

Par rapport à la quatrième hypothèse de Hauser, des mécanismes de la vie sont manipulés non pas directement à un niveau moléculaire ou génétique comme chez Eduardo Kac par exemple, mais à travers le niveau cognitif et éthologique, survenant sur ces premières propriétés.

Enfin, Hauser relativise sa taxonomie en citant Joe Davis, artiste pionnier de l'art biotech :

"Some day, it will no longer be called Bio Art, but rather simply: art." (d'après Hauser, 2005)

2.3.7 Futur

Le projet *Fish* est pour moi, dans l'évolution de mes oeuvres réalisées jusqu'à présent, un abandon progressif de l'idée de l'ordinateur comme machine universelle dans la création artistique. Même si ici l'ordinateur joue encore un rôle central dans le dispositif, mon intérêt se porte sur la manipulation du vivant, plus que sur sa simulation. C'est le premier projet pour lequel j'utilise des réseaux de neurones artificiels non pas comme acteur, créant un matériau artistique, mais comme régulateur, ou pont, entre le vivant et l'artificiel. Ainsi les comportements des agents neuromimétiques tels qu'ils ont été utilisés pour la Nuit Blanche par exemple, ont été remplacés par les comportements d'acteurs vivants, les poissons. D'un point de vue poïetique par contre, le but reste le même : le contrôle et la mise en scène de ces comportements.

Un premier moyen de contrôle a été trouvé pour les poissons couteaux, en réussissant à changer la fréquence des signaux qu'ils émettent. Des applications de

ce type de contrôle ont été étudiées par Stafford Beer (1926-2002).

L'homéostat d'Ashby était une simulation électrique du phénomène biologique d'homéostasie et Ashby n'hésitait pas à appeler son appareil "cerveau". Fortement influencé par ce dispositif, Beer tentait d'utiliser des systèmes naturels ayant intégré naturellement l'homéostasie, afin de créer des systèmes contrôlables - des ordinateurs biologiques. Ainsi Beer avait réussi en 1956 à faire résoudre des équations linéaires simultanées par des enfants qui ne connaissaient pas les outils mathématiques nécessaires à la solution de ces problèmes, en utilisant un simple jeu :

"The children would make selections from various alternative moves, and their choices would be encouraged or discouraged by what Beer called algedonic feedback—in this case, coloured lights signifying pleasure or pain at whatever moves the children made. In effect, the children were the material basis of an adaptive or self-organising system that could explicitly 'programmed' to do so." (Pickering, 2002)

Suite au succès de cette expérience, Beer essayait d'appliquer ce même principe à un dispositif constitué de souris, également destinées à résoudre le même type d'équations que les enfants. Malheureusement, les résultats de cette expérience ne sont pas connus, mais l'idée n'a pas manqué d'inspirer Douglas Adams qui relatait un ordinateur constitué de souris dans son roman *The Hitchhikers Guide to the Galaxy* .

Finalement, Beer expérimentait avec des colonies de daphnies en leur faisant ingérer des limailles de fer, afin de les coupler avec un environnement externe à travers des aimants électromagnétiques. Malheureusement, les résultats de cette expérience ne sont pas documentés non plus, mais Beer insiste sur le problème de trouver des points d'entrée et de sortie pour ces systèmes, afin d'interagir avec eux.

Je pense que ce point est crucial pour Beer, car une fois ces points d'interaction trouvés, il suffira de changer l'environnement dans lequel se trouve son système, afin

d'évoquer - une fois que l'homéostasie naturelle a été trouvée - les réponses voulues.

La recréation de systèmes similaires me tente beaucoup. Comme nous sommes arrivés à contrôler la fréquence émise par les poissons couteaux grâce au JAR, différents dispositifs me viennent en tête. Ainsi on pourrait par exemple essayer de stocker des données dans les poissons, en changeant ou en bloquant leurs fréquences à des valeurs précises. Dans le cas de données binaires, on définirait une fréquence inférieure à une fréquence de référence comme 0 et une fréquence supérieure à la fréquence de référence comme 1. Avec un nombre suffisamment important de poissons, on pourrait ainsi, en théorie, stocker des informations sonores ou visuelles par exemple. Afin de lire ces données, on analyserait les fréquences émises par les poissons. Des effets "d'oubli" ou de "désobéissance", ainsi que des perturbations externes, telles qu'un changement de température de l'eau, entraîneraient des transformations de ces données sûrement intéressantes. Ici, comme dans beaucoup d'autres exemples (algorithmes de traitement d'image pour des sons visualisés p.ex.), un changement dans la façon de représenter des données nous donne des nouveaux moyens d'agir sur ces données.

Il devrait également être possible de créer un système homéostatique de poissons couteaux. En interconnectant plusieurs poissons, afin qu'ils puissent communiquer avec leurs congénères et en envoyant des stimuli précis, constituant un environnement auquel les poissons doivent s'adapter, nous pourrions créer un système tendant vers un équilibre homéostatique en fonction de l'environnement défini par l'utilisateur. Un tel système pourrait, par ses propriétés auto-organisatrices, devenir lui même un nouvel outil de création, dont les possibilités restent à être explorées.

3. Conclusion

Les divers sujets exposés dans ce mémoire font pour moi partie d'une évolution artistique de longue durée. Leur variété, complexité et richesse permettraient facilement d'y consacrer plusieurs vies et nous obligent, en même temps, de creuser encore plus, d'affiner d'avantage et enfin de répéter autant que possible les outils créés, afin de nous familiariser avec eux et d'acquérir une maîtrise et connaissance de plus en plus fine des mécanismes sous-tendant et des conséquences engendrées.

J'aimerais donc souligner l'importance d'une manipulation active des concepts, théories et outils présentés dans ce mémoire, car leur mise en oeuvre nous met en interaction directe et perceptible avec eux et engendre des connaissances actives de leur comportement ainsi qu'*in fine* de nous-mêmes.

Ceci m'amène aussi à intégrer dans mes oeuvres futures, une notion de l'action plus physique, plus incorporée que la génération des sons par exemple. Le projet *Fish* en est une façon car il s'agit ici d'induire des changements éthologiques chez les poissons. Mais même dans l'artificiel une corporalité peut être trouvée grâce à la robotique. Un projet essayant d'investir ce domaine est en développement (cf. *Procarya Speculatrix* dans l'annexe).

Cette installation visuelle et sonore se meut grâce à des moteurs contrôlant des excroissances dotées de capteurs vidéo et acoustiques. Selon les stimuli visuels perçus, sont générées des structures musicales et sonores différentes. Ces sons engendrent à leur tour, grâce aux capteurs acoustiques, des nouveaux mouvements des excroissances et changent ainsi la perception visuelle de ce système circulaire.

Différentes architectures informatiques permettant un couplage entre perception et action sont actuellement étudiées. Notamment une modélisation des cartes motrices a suscité notre intérêt. Avec ce modèle de plusieurs SOM couplés, Ritter et al. (1992) ont réussi à simuler un bras robotique balançant un bâton. Je vois dans ce genre de

développement un moyen de concrétiser encore plus la boucle sensori-motrice si importante dans la création d'un modèle cognitif.

Comme les expériences de *Caresses de marquises* et de la *Symphonie des machines* l'ont montré, des systèmes de grande complexité peuvent engendrer des résultats très riches et sont capables d'interagir avec des environnements très variables. L'étude et le développement de ce type de système permettront dans l'avenir une intégration dans le monde réel de plus en plus étroite et constituent des premiers pas vers une interaction autonome avec des systèmes naturels et hautement complexes dans le monde.

Finalement, la mise en oeuvre des différents modèles de cognition dans un contexte d'expérimentation artistique a confirmé leur efficacité en tant qu'outils pour la création d'oeuvres esthétiques dans divers cadres d'application.

4. Bibliographie

Ahn, J., Farzan, R., Brusilovsky, P. (1948). *A Two-Level Adaptive Visualization for Information Access to Open-Corpus Educational Resources*. Social Navigation and Community-Based Adaptation Technologies, Dublin. http://www2.sis.pitt.edu/~peterb/papers/SocialSearch2006.pdf

Aristote. *Metaphysics*. London: William Heinemann Ltd

Arnegard, M.E., Carlson, B.A. (2005). *Electric organ discharge patterns during group hunting by a mormyrid fish.* Proc. R. Soc. B 272 : 1305 - 1314

Ashby, W. R. (1948). *Design for a Brain*. Electronic Engineering 20 (Dec 1984): 379-83

Ashby, W. R. (1952). *Can a mechanical chess-player outplay its designer?* British Journal for the Philosophy of Science 3: 44-57

Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics.* New York: Wiley

Ashby, W. R. (1962). *Principles of the Self-Organizing System.* Dans *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium* (Von Foerster, H. et Zopf, Jr. G. W., coord.). London: Pergamon Press

Bakkum, J.D., Shkolnik, A.C., Ben-Ary, G., Gamblen, P., DeMarse T.B., Potter, S.M. (2004) *Removing Some 'A' from AI: Embodied Cultured Networks.* Dans *Lecture Notes in Computer Science.* Berlin: Springer Verlag

Ballard, D. (1991). *Animate vision*. Artificial Intelligence 48: 57-86

Ballard, D. et al. (1997). *Deictic codes for the embodiment of cognition*. Behavioral and Brain Sciences 20: 723-767

Beer, R. D. (1995). *A dynamical systems perspective on agent-environment interaction.* Artificial Intelligence 72: 173-215

Beer, S. (1984). *The Viable System Model: its provenance, development, methodology and pathology.* Journal of the Operational Research Society 35: 7-26

Bonda, E., Petrides, M., Frey, S., Evans, A. (1995) *Neural correlates of mental transformations of body-in-space* Proceedings of the National Academy of Science 92: 11180-11184

Boschetti, F., Prokopenko, M., Macreadie, I., Grisogono, A-M., (2005*) Defining and detecting emergence in complex networks.* Lecture Notes in Computer Science : 3648

Brooks, R. (1991). *Intelligence without representation*. Artificial Intelligence 47: 139-159

Bruner, J.S. (1966). *Toward a theory of instruction.* Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press

Cariani, P. (1993). *To evolve an ear: epistemological implications of Gordon Pasrk's electrochemical devices.* Systems Research Vol. 10, No. 3: 19-33

Carlson, B.A. (2002). *Electric signaling behavior and the mechanisms of electric organ discharge production in mormyrid fish*. J. Physiol. (Paris) 96 : 405 - 419

Chomsky, N. et Halle, M. (1968). *The Sound Pattern of English.* New York: Harper and Row

Churchland, P. S. et Sejnowski T. (1992). *The computational brain*. Cambridge MA: MIT Press

Churchland, P. S. et al. (1994). *A critique of pure vision*. Dans *Large-Scale Neuronal Theories of the Brain* (Koch, C. et Davis, J., coord.). Cambridge MA: MIT Press

Clark, A. (1997). *Being There: Putting Brain, Body and World Together Again*. Cambridge MA: MIT Press

Clark, A. et Chalmers D. (1998). *The extended mind.* Analysis 58: 7-19

Clark, A. (1999). *An embodied cognitive science?* Trends in Cognitive Sciences Vol. 3, No. 9: 345-351

Clark, A. (2003). *Natural-Born Cyborgs.* New York: Oxford University Press

Conant, R. et Ashby, W. R. (1970). *Every good regulator of a system must be a model of that system*. International Journal of Systems Science 1.2, 89-97

Damasio, A. (1994). *Descartes' Error*. Grosset/Macmillan

Eliasmith, C. (2004). *Dynamical Systems Theory.* Dans *Dictionary of Philosophy of Mind* (Eliasmith, C., coord.). http://philosophy.uwaterloo.ca/MindDict/dynamicsystems.html

Farrer, C., Franck, N., Georgieff, N., Frith, C.D., Decety, J. et Jeannerod, M. (2003). *Modulating the experience of agency: a PET study.* Neuroimage 18 : 324–333.

Fodor, J. et Pylyshyn Z. (1988). *Connectionism and cognitive architecture: A critical analysis*. Cognition 28: 3-71

Friedman, M.A. et Hopkins, C.D. (1996). *Tracking individual mormyrid electric fish in the field using electric organ discharge waveforms*. Anim. Behav. 51 : 391 - 407

Gallese, V., Keysers, S. et Rizzolatti, G. (2004). *A unifying view of the basis of social cognition.* Trends in Cognitive Sciences Vol. 8, Nr. 9: 296-403

Gallese, V., Fadiga, L., Fogass, L., Rizzolatti, G. (1996). *Action recognition in the premotor cortex.* Brain 119 : 593 - 609

Garner, W.R. et McGill, W.J. (1956*). The relation between information and variance analyses.* Psychometrika 21/3

Gopnik, A. et Wellman, H.M. (1994). *The theory theory.* Dans *Mapping the Mind: Domain Specificity in Cognition and Culture* (Hirschfeld, L.A. et Gelman, S.A. éds.) Cambridge: University Press

Graff, C. et Kramer, B. (1992*). Trained weakly-electric fishes Pollimyrius isidori and Gnathonemus petersii (Mormyridae, Teleostei) discriminate between waveforms of electric pulse discharges.* Ethology 90 : 279 - 292

Grundfest, H. (1957). *The mechanisms of discharge of the electric organs in relation to general and comparative electrophysiology.* Prog. Biophys. 7 : 3 - 85

Harnad, S. (éd.) (1987). *Categorical Perception: the Groundwork of Cognition.* New York: Cambridge University Press

Hauser, J. (2005). *Bio Art – Taxonomy of an Etymological Monster.* Linz : Ars Electronica Centre

Heer, F., Hafizovic, S., Franks, W., Blau, A., Ziegler, C., Hierlemann, A. (2006) *CMOS microelectrode array for bidirectional interaction with neuronal networks.* IEEE Journal of Solid-State Circuits 47/7: 1620-1629

Held, R. et Hein, A. (1963). *Movement-Produced Stimulation in the Development of Visually Guided Behavior.* Journal of Comp Physiol Psychol. 56 : 872 - 876

Honkela, T. et Winter, J. (2003). *Simulationg Language Learning in Community of Agents Using Self-Organizing Maps.* Publications in Computer and Information Science, Report A71. Helsinki : University of Technology

Hopkins, C.D. et Westby, G.W.M. (1986). *Time domain processing of electric organ discharge waveforms by pulse-type electric fish.* Brain Behav. Evol. 29 : 77 - 104

Jacob, P. et Jeannerod, M. (2005). *The motor theory of social cognition: a critique.* Trends in Cognitive Sciences 9/1 : 21 - 26

Jain, N. (2002). *Adult brain plasticity - what is revealed is exciting, what is hidden is critical.* Journal of Bioscience 27/5 : 439-442

Janet, P. (1937). *Les troubles de la personalité sociale.* Annales Médico-Psychologiques

2: 149-200

Jeannerod, M., Pacherie, E. (2004). *Agency, Simulation and Self-identification.* Mind & Language 19, 2: 113-146

Kai-Hsiang, C., Ming-Jang C., Chung-Chih, L. et Jyh-Horng, C. (1999). *Model-free functional MRI analysis using Kohonen clustering neuralnetwork and fuzzy C-means.* Dans IEEE Transactions on Medical Imaging 18: 1117-1128

Kaipainen, M., Karhu, P. (2000) *Bringing Knowing-When and Knowing-What Together: Periodically Tuned Categorization and Category-Based Timing Modeled with the Recurrent Oscillatory Self-Organizing Map.* Minds and Machines 10 : 203 - 229

Kaipainen, M., Ilmonen, T. (2003). *Period detection and representation by recurrent oscillatory self-organizing map.* Neurocomputing 55 : 699 - 710

Kelso, J.A.S. et de Guzman, G.C. (1988). *Order in time: How the cooperation between the hands informs the design of the brain* Dans *Neural and Synergetic Computers* (Haken, H. éd.) p. 271-287 Berlin: Springer

Kitamato, A. (2002). *Spatio-Temporal Data Mining for Typhoon Image Collection.* Journal of Intelligent Information Systems 19/1: 25-41

Kohonen, T. (1982). *Self-organized formation of topologically correct feature maps.* Biological Cybernetics 43: 59-69

Kohonen, T. (1990). *The self-organizing map.* Proceedings of the IEEE 78/9: 1464-1480

Kramer, B. (1990). *Electrocommunication in Teleost Fishes: Behavior and Experiments.* Berlin: Springer

Kramer, B. (1999). *Mechanisms of signal analysis in Eigenmannia (Gymnotiformes): the jamming avoidance response and communication.* Biology of Tropical Fishes, Manaus: (in press)

Kurimo, M. (1997). *Using Self-Organizing Maps and Learning Vector Quantization for Mixture Density Hidden Markov Models.* Thèse de doctorat à l'université de Helsinki

Lagus, K., Kaski, S. et Kohonen, T. (2004). *Mining massive document collections by the WEBSOM method.* Journal of Information Sciences 163/1-3: 135-156

Lauwers, T. B., Kantor, G. A. et Hollis, R. L. (2005). *One is enough.* Dans *Proceedings of the 12th International Symposium on Robotics Research.* San Francisco. http://www.msl.ri.cmu.edu/publications/pdfs/isrr05.pdf

Lauwers, T. B., Kantor, G. A. et Hollis, R. L. (2006). *A Dynamically Stable Single-*

Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive. Dans *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation.* Orlando FL. http://www.msl.ri.cmu.edu/publications/pdfs/ballbot_ICRA06_web.pdf

Le Calvez, R., Peperkamp, S. et Dupoux, E. (2007). *Bottom-up learning of phonemes: A computational study.* Dans *Proceedings of the Second European Cognitive Science Conference*

McAuley, J.D. (1995). *Temporally directed attending in the discrimination of tempo: Further support for an entrainment model.* JASA 97/5 : 3278

McLaughlin, B. et Bennett K. (2006). *Supervenience*. Dans *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2006 Edition)*, Edward N. Zalta (ed.). http://plato.stanford.edu/archives/fall2006/entries/supervenience/

Meier, R. (2004). *Applications musicales de cartes auto-organisatrices: jit.robosom.* Mémoire technique pour le Diplôme d'Études Musicales au Conservatoire National de Région de Nice

Merzenich, M.M., Kaas, J.H., Wall, J., Nelson, R.J., Sur, M. et Felleman, D. (1983a). *Topographic reorganization of somatosensory cortical areas 3B and 1 in adult monkeys following restricted deafferentation*. Neuroscience 8 : 33–55

Merzenich, M.M., Kaas, J.H., Wall, J.T., Sur, M., Nelson, R.J. et Felleman, D.J. (1983b). *Progression of change following median nerve section in the cortical representation of the hand in areas 3b and 1 in adult owl and squirrel monkeys*. Neuroscience 10 : 639–665

Mill, J.S. (1943). *System of logic,* London : Longman, Green, Reader and Dyer

Moller, P. (1995). *Electric Fishes : History and Behavior*. London : Chapman & Hall

Momeni, A. et Wessel, D. (2003). *Characterizing and Controlling Musical Material Intuitively with Graphical Models.* Dans Proceedings of the New Interfaces for Musical Expression Conference. Montreal

Momeni, A. et Henry, C. (2005). *Dynamic Independent Mapping Layers.* Computer Music Journal 30/1

Morgan, L. (1923) *Emergent Evolution*. London: Williams & Norgate

Müller, J.P. (2002) *Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents : interactions, émergence et systèmes complexes.* Rapport de l'habilitation à diriger des recherches. Université Montpellier II

Noë, Alva (2002). *On what we see.* Pacific Philosophical Quarterly 83: 57-80

Noë, Alva (2004). *Action in Perception.* Cambridge MA: MIT Press

O'Regan, K. J. et Noë, A. (2001). *A sensorimotor account of vision and visual consciousness.* Behavioral and Brain Sciences 24: 939-1031

Pask, G. (1958a) *Physical analogues to the growth of a concept.* Dans *Mechanization of Thought Processes*, Symposium 10, National Physical Laboratory. London: H.M.O.S: 765-794

Pask, G. (1958b). *The growth process inside the cybernetic machine.* Dans *Actes du 2nd Congrès International de Cybernétique,* Namur, Belgique

Pask, G. (1960). *The Natural History of Networks.* Dans *Self-Organizing Systems* (Yovits, M.C. et Cameron S., ed.) New York: Pergamon Press

Peirce, C.S. (1932). *Division of Signs* Dans *Collected Papers of Charles Sanders Peirce, vols. 1–6*, (Charles Hartshorne and Paul Weiss (éd.)) Cambridge, MA : Harvard University Press

Penfield, W., Boldrey, E. (1973). *Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation*. Brain 60 / 4 : 389 - 443

Philipona D.L. et O'Regan J.K. (2006) *Color naming, unique hues and hue cancellation predicted from singularities in reflection properties.* Visual Neuroscience 23: 331-339

Pias, C. (2004) *Der Auftrag. Kybernetik und Revolution in Chile* Dans *Politiken der Medien* Gethmann, D. et Stauff, M. (éd.). Zurich/Berlin : diaphanes

Pickering, A. (2002). *Cybernetics and the mangle : Ashby, Beer and Pask*. Dans *La reconfiguration des sciences pour l'action dans les années 1950* (Dahan, A. et Pestre, D. (éd)) Paris : EHESS

Port, R., Cummins, F. et Gasser, M. (1995). *A Dynamic Approach to Rhythm in Language: Toward a Temporal Phonology.* Dans *Proceedings of the Chicago Linguistics Society* (Luka, B. and Need, B., coord.). CLS-31: 375-397

Puckette, M., Apel, T., Zicarelli, D. (1998) *Real-time audio analysis tools for PD and MSP.* International Conference on Computer Music, ICMC
http://crca.ucsd.edu/~msp/Publications/icmc98.ps

Recanzone, G. (1998) *Rapidly induced auditory plasticity: The ventriloquism aftereffect.* Proceedings of the National Academy of Science USA 95 : 869 – 875

Reeke, J. G. N. et Edelman, G. M. (1988). *Real brains and artificial intelligence.* Cambridge MA: MIT Press

Ritter, H., Kohonen, T. (1989). *Self-organizing semantic maps*. Biological Cybernetics 61/44 : 241 - 254

Ritter, R., Martinetz, T. et Schulten K. (1992) *Neural Computation and Self-Organizing Maps - An Introduction*. New York: Addison-Wesley

Rosen, Robert (1985). *Anticipatory Systems.* Pergamon Press

Rosenberg, C. R. et Sejnowski, T. J. (1987). *Parallel networks that learn to pronounce English text.* Complex Systems 1

Rosenblueth, A., Wiener, N. et Bigelow J. (1942). *Behavior, Purpose and Teleology.* Dans *Philosophy of Science* 10: 18-24

Rumelhart, D. E. et McClelland, J. L., Ed. (1986). *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition.* Cambridge MA: MIT Press

Schaeffer, P. (1966). *Traité des objets musicaux.* Paris: Seuil

Schrader, J. R. (2000). *John Stuart Mill and the Development of British Emergentism*. University of Notre Dame.
http://www.nd.edu/~wshrader/papers/Mill%20and%20British%20Emergentism.pdf

Searle, J. (1984). *Minds, Brains and Science*. Cambridge MA: Harvard University Press

Smithers, T. (1995). *Are autonomous agents information processing systems?* Dans (Steels, L et Brooks, R. (éd.)) *The artificial life route to artificial intelligence.* Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum

Smuts, J. C. (1926). *Holism and Evolution*. New York: Greenwood Publishing Group

Sommerhoff, G. (1950). *Analytical Biology.* London: Oxford University Press

Sperry, R.W. (1950) *Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion.* Journal of Comparative and Physiological Pychology 43: 482-489

Spitzer, M. (1999) *The mind within the Net.* Massachusetts : MIT

Stephan, A. (1999) *Varieties of Emergentism.* Dans *Evolution and Cognition* 5.1: 45-59

Stevens, S. S. (1957) *On the psychophysical law.* Dans *Psychological Review* 64.3: 153-181

Stewart, R. M. (1969) *Electrochimcally active field-trainable pattern recognition systems.* IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics 5: 230-237

Stockhausen, K. (1973) *Vier Kriterien des elektronischen Musik.* Dans *Selbstdarstellung. Künstler über sich.* Düsseldorf: Herzogenrath

Strogatz, S. (1993). *Coupled Oscillators and Biological Synchronization* Scientific

American 269 / 6 : 102 - 108

Strogatz, S. (2001). *Exploring complex networks*. Nature 410 / 8 : 268 - 276

Strogatz, S. (2003). *Sync: The Emerging Science of Spontaneous Order.* New York: Hyperion

Thelen, E. et Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action.* Cambridge MA: MIT Press

Tillmann, B., Bigand, E., et Pineau, M. (1998). *Implicit Learning of Tonality: A Self-Organizing Approach.* Psychological Review 107/4

Treffner, P.J. et Turvey, M.T. (1993). *Resonance constraints on rhythmic movement.* Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance 19/6 : 1221 - 1237

Van Gelder, T. (1995). *What might cognition be, if not computation?* Journal of Philosophy 91: 345-381

Van Gelder, T. et Port, R. (1995). *It's about time: an overview of the dynamical approach to cognition.* Dans *Mind as motion: explorations in the dynamics of cognition.* Cambridge MA: MIT Press

Van Gelder, T. (1999). *Dynamic approaches to cognition.* Dans *The MIT Encyclopedia of Cognitive Sciences* (Wilson, R. et Keil, F., coord.) 244-6. Cambridge MA: MIT Press

Varela, F. (1989). *Invitation aux sciences cognitives*. Paris: Éditions du Seuil

Varela, F. et al. (1991). *The Embodied Mind*. Cambridge MA: MIT Press

Varela, F. (1995). *The Emergent Self.* Dans *The third culture* (Brockman, J. coord.). Simon & Schuster

Voisin, F. et Meier, R. (2004) *Playing integrated music knowledges with artificial neural networks.* Proceedings of the sound and music conference. Paris : IRCAM

Von Holst, E. et Mittelstaedt, H. (1950) *Das Reafferenzprinzip. Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie.* Naturwissenschafter 37: 464-476

Watanabe, A. et Takeda, K. (1963). *The change of discharge frequency by A.C. stimulus in a weak electric fish*. J. Exp. Biol. 40 : 57 - 66

Watts, D.J., Strogatz, S. (1998). *Collective dynamics of 'small-world' networks*. Nature 393 / 4 : 440 - 442

Wessel, D. (1978). *Low dimensional control of musical timbre.* Computer Music Journal

Wessel, D. (2006). *An Enactive Approach to Computer Music Performance.* Rencontres Musicales Pluridisciplinaires. Lyon: GRAME

Wiener, N. (1948). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine.* Cambridge MA: MIT Press

Wiener, N. (1952). *Mensch und Menschmaschine.* Frankfurt a. M.: Metzner Verlag

Wolpert, D.M., Ghahramani, Z. and Jordan, M. I. (1995). *An internal model for sensorimotor integration.* Science 269 : 1880–1882.