

Rapport Fonds National 97-98

Luc-Laurent Salvador
Groupe Systèmes Autonomes
Institut d'Informatique de l'Université de Neuchâtel
salvador@ext.jussieu.fr

18 octobre 1998

Mise en place d'un apprentissage piagétien chez un robot autonome dans une tâche de suivi de mur

1. Introduction

Conformément aux orientations du projet PNR n° 20-46916.96, la présente étude s'inscrit dans la perspective d'une robotique autonome visant à doter le robot d'une capacité à réaliser des tâches complexes dans un environnement non trivial sans supervision humaine. Ceci veut dire que le robot devra apprendre, de façon autonome, à réguler son activité en fonction de conditions environnementales changeantes, et ce, de manière à tenir les objectifs qui seront les siens.

Cette problématique d'autonomie dans l'apprentissage constitue le cadre général de la recherche exposée ici. Un aspect plus spécifique —correspondant lui aussi aux objectifs du projet PNR— concernera la problématique de la composition “ modulaire ” et hiérarchique de l'organisation nécessaire à l'implantation d'une capacité donnée.

L'axe fondamental autour duquel la recherche est effectuée provient des travaux de psychologie du développement que Jean Piaget a mené à Neuchâtel et Genève dans le cadre de son épistémologie génétique. En effet, le modèle piagétien présente a priori un grand intérêt pour la robotique puisqu'il vise à définir les processus par lesquels les organismes naturels en viennent à construire une connaissance de leur environnement à partir d'une organisation et d'une activité de nature sensorimotrice et qu'il explicite comment, ce faisant, leur organisation évolue et s'adapte. Ainsi, en raison de cette convergence entre les problématiques du psychologue du développement et celles du roboticien, on peut penser que bon nombre de problèmes auxquels la robotique autonome se confronte peuvent trouver, sinon des réponses toutes faites, du moins, de très sérieuses pistes de réflexion dans la théorie psychologique du développement. Et c'est donc cette voie qui a été ici explorée. On a, en particulier, cherché à mobiliser la conception piagétienne d'organisation car 1) elle est avant tout basée sur des structures dorénavant omniprésentes en robotique autonome, à savoir, les boucles sensorimotrices et 2) elle offre un modèle des organisations qui est, tout à la fois, modulaire¹ et hiérarchique —car récursif.

La première partie de cette étude visera à dégager l'aspect novateur que présente la perspective piagétienne pour la robotique autonome au travers d'une analyse de la notion d'organisation. Cette analyse montrera d'une part, en quoi les avancées de la robotique autonome par rapport à la robotique classique vont tout à fait dans le sens du relativisme interactionniste défendu par Piaget. Et d'autre part, elle s'efforcera de montrer en quoi le système théorique de ce dernier pourrait permettre de tirer toutes les conséquences de l'approche comportementale (behavior-based) lancée par Brooks. Cela se fera, en particulier, au travers d'une extensions des conceptions piagésiennes induite par la réintroduction des

1 Au sens de composé d'unités élémentaires et surtout pas au sens de la modularité des fonctions.

thématiques tant mimétiques que darwiniennes de celui qui fût son “ maître à penser ”, à savoir, James Mark Baldwin.

Sur la base de ces éléments théoriques, le projet expérimental sera alors spécifié et ses premiers résultats seront commentés. Une discussion finale exposera les développements à venir et fera le point sur l'intérêt intrinsèque de cette approche piagétienne.

2. Qu'est-ce qu'une organisation ?

2.1 Introduction

La notion d'organisation n'a pas de définition clairement arrêtée. En attestent, d'une part, l'absence d'unité et le caractère éclectique des définitions fournies par les encyclopédies et autres dictionnaires, et d'autre part, l'usage informel et nullement coordonné, qui en est fait ici et là, en sciences naturelles, humaines et informatiques. Il n'y a pas lieu de s'en étonner, un tel état de fait est assez caractéristique des notions génériques² et ne fait, en somme, que traduire l'étendue de leur domaine d'application ainsi que leur caractère fondamental.

Il n'y a pas, cependant, de raison de se satisfaire d'un tel état de fait, et au contraire, toutes les raisons pour rechercher activement une définition tout à la fois claire et opératoire de ce que recouvre la notion d'organisation, entendue au sens le plus générique qui soit, c'est-à-dire, sans chercher, a priori à la distinguer des notions satellites telles que système, structure, architecture, etc. Des distinguo pourront apparaître ultérieurement, mais ils ne s'imposent pas dans l'immédiat.

2.2 Tentative de définition

Parmi les très rares auteurs qui se sont pas contentés de faire usage de la notion d'organisation et qui en ont proposé une définition, on doit naturellement citer Maturana & Varela qui, dans *l'Arbre de la Connaissance*, affirment :

“ “ Organisation ” signifie l'ensemble des relations qui doivent être présentes pour qu'une chose existe. ” (p. 31)

Comme il apparaîtra par la suite, la conception cyclique des organisations que je vais proposer convergera sur une assertion semblable. Mais cette dernière n'aura pas la même signification et ne pourra donc apparaître comme une définition suffisante de la notion d'organisation, tout au plus pourra-t-on la considérer comme un de ses corollaires immédiat. Nous y reviendrons dès que les éléments nécessaires à une discussion fructueuse auront été disposés.

Ainsi, l'entrée en matière se fera tout simplement par l'analyse de la définition fournie par le dictionnaire Le Petit Robert, qui n'est pas plus mauvais qu'un autre. Le Petit Robert propose :

“ 1 ♦ **VIELLI** Etat d'un corps organisé. ◇ Manière dont ce corps est organisé. ”

“ 2 ♦ **MOD.** Action d'organiser (qqch.) ; son résultat ”

“ 3 ♦ Association qui se propose des buts déterminés ”

“ ◇ **CONTR.** Anarchie, chaos, dérèglement, désordre, désorganisation ”

♦ Peu informative en raison d'une circularité par trop immédiate, la définition 1 ne fait, en

²Le terme social, par exemple, est d'un usage tout aussi général et ne dispose encore que de définitions nébuleuses (cf. Zajonc 1966, Salvador 1996, 1997)

somme qu'assigner à la notion d'organisation un statut de propriété, lui refusant par la même, la plénitude ontologique d'une chose en soi, pourrait-on dire. Dans cette perspective, l'organisation est relative à un corps donné, un corps ayant la propriété d'être *organisé*. Cet arbitrage apparaît pour le moins abusif dès que l'on s'interroge sur ce que corps peut bien vouloir dire. Car il se pourrait qu'il ne soit pas dissociable de la notion d'organisation et qu'il n'y ait là, en définitive, qu'une étiquette commode et surtout, conventionnelle, désignant exactement la même chose. De fait, la notion de corps renvoie directement —quoi que non exclusivement— à celle d'organisme. Il apparaît donc quelque peu vain de cantonner “ organisation ” au statut de propriété. En conséquence, dans ce qui suivra, nous accorderons cette notion la plénitude ontologique dont elle bénéficie déjà dans la plupart des domaines scientifiques où on la thématise. Autrement dit, une organisation désignera une chose, une entité, et non la propriété d'une chose qui ne serait pas elle-même une organisation.

- ◆ La définition 2 est bien plus intéressante, grâce à cette juxtaposition entre l'action d'organiser et son résultat. Il est en effet tentant d'y voir un effet de miroir et d'envisager alors le cas où le résultat de l'action organisatrice serait lui-même l'agent de cette action. Mais partons d'abord du schéma linéaire inhérent à cette définition : un agent opère une action organisatrice dont le résultat est quelque chose d'organisé :

action d'organiser

Fig. 1 L'organisation comme hétéro-organisation

et envisageons maintenant le cas où le “ quelque chose d'organisé ” serait capable de produire l'action organisatrice dont il serait lui-même le résultat . Nous obtenons une dynamique d'*auto-organisation* nettement distincte du cas précédent qui relève lui de l'*hétéro-organisation* :

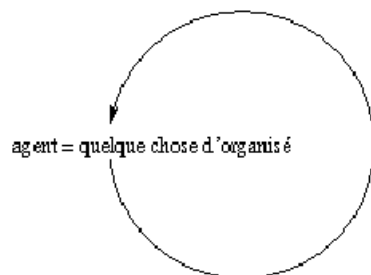


Fig. 2 L'organisation comme auto-organisation

- ◆ La 3e définition introduit la notion de but. Là aussi, le schéma proposé est linéaire car on

comprend qu'en général une association se donne des buts externes, c'est-à-dire, autres que celui de se constituer en association. Cependant, il nous faut là encore dépasser cette linéarité, implicite et simplificatrice car, tout bien considéré, une association doit assurément se donner pour but premier celui de se maintenir dans son organisation afin de perpétuer ce qui est, en définitive, la condition de possibilité pour l'accomplissement de quelque but extérieur que ce soit. En résumé, le but premier d'une association —et plus généralement de toute organisation sociale— c'est bel et bien de se constituer. Ceci est vrai chronologiquement parlant, puisque le premier acte de l'association est bien celui qui la fait naître, mais c'est aussi vrai à tout instant. Et c'est cela que l'on a tendance à perdre de vue car, précisément, c'est une telle constante qu'il en devient non pertinent de le signaler.

Nous voici à présent au coeur du problème : celui de la stabilité. En effet, quand bien même nous ignorerions tout de ce qu'est une organisation, nous savons au moins qu'elle devra satisfaire une contrainte de stabilité minimale. S'il n'y a pas de stabilité, il n'y a pas d'organisation. Autrement dit, une organisation quelle qu'elle soit, devra se maintenir, se répéter, ou se reproduire. Elle devra, en somme, se conformer à la loi de la survie du stable dont Dawkins (1976) disait que la loi darwinienne n'était qu'un cas particulier.

Si nous nous en tenons à cette condition minimale, nous pourrions considérer qu'une organisation se définit essentiellement par le fait de boucler sur elle-même de manière à assurer son maintien, sa reproduction. Mais cette définition est-elle suffisante, ou seulement intéressante ? Il semblerait que cela puisse être le cas car, un auteur aussi remarquable que Piaget a très nettement défini l'organisation sur la base d'une telle causalité circulaire. De fait, le modèle piagétien de l'organisation s'enracine dans la notion de *cycle assimilateur* défini de manière quelque peu formelle comme “ un cycle de processus physico-chimiques et cinétiques qui, en relation constante avec le milieu, s'engendrent les uns les autres ” (1936 :11) .

Par ailleurs, bien qu'ils n'aient pas explicitement tenté de définir la notion d'organisation *per se*³ de nombreux auteurs ont eux aussi convergé sur une conception cyclique des organismes, c'est-à-dire, des organisations vivantes. Après Baldwin (1902), von Uexküll (1926, 1935), Goldstein (1945), Maturana & Varela caractérisèrent à leur tour l'organisation vivante comme étant de nature autopoïétique, c'est-à-dire, comme se produisant (*poiësis*) elle-même (*auto*) :

“ Un système autopoïétique est organisé comme un réseau de processus de production de composants qui (a) régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits, et qui (b) constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau. ” (Varela, 1989:45)

Mais il importe ici de noter que, ce faisant, ces auteurs introduisent une démarcation nette entre la notion spécifique d'organisation vivante à laquelle, seule, correspond le critère d'autopoïèse et la notion d'organisation au sens large qui se voit laissée dans l'ombre⁴.

3 C'est-à-dire, indépendamment de la question de savoir ce qu'est une organisation *vivante*.

4 Une bonne illustration de cet état est fournie par la pauvreté de l'exemple d'organisation générique fourni dans l'ouvrage “ L'arbre de la connaissance ” :

“ Qu'est-ce que la constitution, l'organisation de quelque chose ? La réponse est à la fois très simple et potentiellement très compliquée. “ Organisation ” signifie l'ensemble des relations qui doivent être présentes pour qu'une chose existe. Pour que je puisse affirmer que cet objet est une chaise, je dois pouvoir établir un certain nombre de relation entre les parties que j'appelle pieds, dossier et siège, de telle façon que l'on puisse s'y asseoir. Qu'elle soit faite de bois et de clous, ou de plastique et de vis, n'a absolument rien à voir avec la classification que je fais dans la catégorie “ chaise ”. Cette situation, dans laquelle nous reconnaissons implicitement ou explicitement

L'attitude de Rosen (1991) est semblablement " orientée vivant ", puisque, dans sa thèse, il s'efforce simplement d'établir le fait que le critérium du vivant tient à une clôture sous causalité efficiente. Ce qui, bien sûr, interdit *ipso facto* de concevoir la notion *générique* d'organisation sur la base de cette clôture causalement efficiente que constituerait l'action organisatrice d'une entité sur elle-même. Ce faisant, la notion d'organisation non vivante se voit quasiment vidée de toute signification. On pourrait ici, avec raison, faire remarquer que Maturana & Varela ne sont peut-être pas aussi strict que Rosen puisque leur définition de l'autopoïèse inclut aussi un critère de clôture topologique et ne prive donc pas *nécessairement* la notion générique d'organisation de la clôture causale. Pourtant, même si une telle nécessité n'a pas été affirmée, on peut, ici et là, surprendre les auteurs à définir le vivant par la seule auto-production, ce qui est, somme toute, congruent avec le fait que le label retenu pour désigner le vivant soit " autopoïèse " —terme qui en lui-même ne véhicule pas le critère de clôture topologique. En somme, on peut affirmer que ces auteurs sont, à tout le moins, peu enclins à thématiser une notion d'organisation échappant au domaine de l'autopoïèse. Et fort logiquement, ils se retrouvent alors pris dans des controverses pour savoir dans quelle mesure on peut étendre l'autopoïèse à tel ou tel domaine, comme celui du social, alors même que la clôture topologique —telle que celle induite par l'existence d'une membrane cellulaire— fait apparemment défaut (cf. Mingers 1998). Maturana serait plutôt pour une telle extension, Varela contre. Nous ne sommes guère avancés. Il est, par contre assez évident qu'une telle controverse n'existerait pas si ces auteurs admettait une notion générique d'organisation rassemblant le vivant et le non-vivant sous l'égide de la causalité circulaire. Mais, il faut y insister, tel n'est apparemment pas le cas. Tout comme Rosen, ils tiennent visiblement, à réserver la clôture causale au cas des organisations vivantes. Toutefois, en raison même de l'implicite dans lequel cette question a été laissée, nous ne disposons d'aucun élément sérieux susceptible de justifier ce qui, pour le moment, n'est qu'une préférence.

Il en va tout autrement du point de vue piagétien — point de vue profondément inspiré par des concepts que Baldwin utilisaient tant en biologie, en psychologie qu'en sociologie, c'est-à-dire, bien au-delà de la stricte définition du vivant—, comme du point darwinien précédemment esquissé. Dans un cas comme dans l'autre, il apparaît assez clair qu'on ne saurait parler d'organisation, vivante ou pas, dès lors que la rétro-action organisatrice ferait défaut. C'est pourquoi, sans nous soucier davantage du problème de la démarcation entre organisation vivante et organisation non vivante, nous nous tiendrons à cette perspective darwino-baldwino-piagétienne, et considérerons qu'une organisation, au sens le plus général du terme, se définit comme un cycle qui se maintient, se répète ou se reproduit en raison de la nature causalement fermée de ses réactions.

2.3 La conception baldwino-piagétienne de l'organisation

Pour formaliser sa conception de l'organisation comme un enchaînement de processus bouclant sur lui-même et se perpétuant donc par le simple fait qu'il s'exécute, Piaget élaborait la notion de cycle assimilateur et reprendra pour ce faire la notation proposée par Le Dantec (1913). Celle-ci, bien qu'opérant une distinction entre des éléments de l'organisation et ceux du milieu, visait cependant à bien marquer leur caractère indissociable et à ne pas assigner de frontière précise entre les uns et les autres. Voici comment Piaget présentait son cycle :

l'organisation d'un objet quand nous le désignons ou le distinguons, est universelle. C'est quelque chose que nous faisons sans cesse ; c'est un acte cognitif de base. " (p. 31)

Cet exemple est édifiant car il éloigne autant que possible le lecteur de la notion autopoïétique de cycle de production de composants. La chaise n'est ici organisation que dans l'œil de l'observateur.

“ Appelons A, B, C...Z les éléments, matériels ou dynamiques, d'une structure comportant un ordre cyclique, et A', B', C',...Z' les éléments, matériels ou énergétiques, nécessaires à leur entretien. On aura alors, si le signe \times représente l'interaction des termes du premier ensemble et de ceux du second, et si le signe \rightarrow représente l'aboutissement de ces interactions:

$(A \times A') \rightarrow (B \times B') \rightarrow (C \times C') \rightarrow \dots (Z \times Z') \rightarrow (A \times A') \rightarrow \text{etc.}$

En un tel cas, on est en présence d'un cycle fermé en tant que cycle et exprimant la reconstitution permanente des éléments A, B, C...Z, A, etc. qui caractérisent les parties de l'organisme...” (1967:183)

Piaget se servait de cette représentation formelle avant tout pour introduire les notions d'*assimilation* et d'*accommodation*, la première correspondant au fait qu'un élément du milieu, tel que par exemple A', vient s'intégrer au cycle assimilateur, lui permettant, ce faisant, d'assurer sa **fermeture**, sa **stabilité**, lui permettant, en somme, de se **perpétuer**. Le cycle est dit *assimilateur* parce que, d'une part, à chaque étape de son exécution, il assimile —au sens physiologique— des éléments du milieu, c'est-à-dire qu'il les fait siens, il les intègre à une structure préexistante qui, ce faisant, se maintient, se perpétue. D'autre part, par assimilation, il faut entendre le fait que l'élément intégré est *de facto* reconnu comme **semblable**⁵ aux éléments précédemment assimilés. Il s'agit donc d'une assimilation au sens cognitif étant donné que l'élément assimilé se révèle **conforme** à l'attente ou l'**anticipation** instanciée par l'état d'avancement du processus en cours d'exécution⁶. Ainsi, comme son nom l'indique, l'assimilation correspond à un **pattern matching** élémentaire et constitue donc une forme de “ protoreprésentation ” de ce qui est assimilé.

L'*accommodation*, quant à elle, désigne classiquement la modification subie par le cycle lorsque l'environnement ne correspond pas à ce que permettaient d'anticiper les précédentes interactions —qui sont en somme “ engrammées ” ou résumées dans la structure assimilatrice du cycle.⁷

Pour ceux qui sont habitués à l'ontologie touffue qu'a traditionnellement autorisé le cognitivisme inspiré par la métaphore informatique,⁸ la simplicité ascétique de ce modèle cyclique de l'organisation biologique ou mentale peut surprendre. Pour aider à en mieux saisir le bien-fondé —c'est-à-dire, la connexion avec les considérations précédentes— comme la dimension heuristique, on peut pointer les aspects suivants :

- ◆ Tout d'abord, il faut revenir à cette idée, commune entre toutes, selon laquelle l'activité cognitive, tout comme l'activité scientifique, vise avant tout à détecter des régularités dans l'environnement de manière à produire une action adaptée, c'est-à-dire, réaliser ce qui aura été anticipé et disposer ainsi d'un contrôle effectif sur l'environnement. C'est, en effet, tout cela qui se voit cristallisé dans les réactions circulaires, de quelque manière qu'on les appellent. La réaction circulaire, la boucle sensorimotrice, le schème, qui tendent à “ maintenir, répéter ou reproduire ” leurs propres stimulations ne sont rien d'autre que des détecteurs de régularité, ou, pour parler à la manière de Piaget, des constructeurs d'invariants.

5Ce qui, bien sûr, ne veut pas dire identique.

6A l'étape A, le cycle anticipe A', à l'étape B, ce sera B' etc...

7En fait, ainsi qu'y insistait Piaget, il y a accommodation même quand l'environnement correspond idéalement à ce qui était anticipé. Piaget n'a pas fourni d'explication satisfaisante à cet état de fait, sans doute parce qu'il procède d'un dynamique darwinienne. En effet, j'ai montré par ailleurs (Salvador 1993) que l'on pouvait considérer l'accommodation comme l'équivalent de la reproduction différentielle au niveau de l'écosystème des schèmes. A l'instar d'une espèce au sein d'un écosystème constitué avant tout par les autres formes vivantes, un cycle assimilateur ou un schème ne se maintient invariant que parce qu'il est constamment accommodé ou co-sélectionné par les autres schèmes avec lesquels il est en interaction.

8Ce que Changeux (1992) n'hésitait pas à qualifier de “ boxologie ”.

- ◆ A ce sujet, il est important de signaler que, du fait même que ces cycles assimilateurs transcendent le classique découpage organisme / environnement, ils amènent une importante nuance par rapport à l'idée traditionnelle de "régularité environnementale". En effet, la régularité "détectée" est, très concrètement, construite et "incarnée" par le cycle lui-même ; elle ne saurait donc être simplement attribuée à l'environnement.
- ◆ Comme cela vient d'être dit, lorsqu'on se réfère à un cycle donné, il n'y a pas à proprement parler d'organisme et d'environnement distincts. L'organisation cyclique est autant organisme qu'environnement, autant sujet qu'objet, autant représentation que réalité. Ces classiques bipôles sont encore à constituer et se confondent dans le cycle qui les subsume et constitue donc une sorte de *tertium* à leur opposition traditionnelle. C'est pourquoi, en définitive, on doit considérer que le cycle, seul, jouit d'un plein statut ontologique et qu'il n'est en rien l'expression incidente d'un couplage entre deux pôles opposés comme on le pense trop souvent. Ceci veut dire, en particulier, qu'il ne se résume pas au couplage entre la perception et l'action. Le cycle est une unité⁹ qui, en fonctionnant, "manifeste" des aspects perceptif et actif dont le caractère indissociable devient ainsi pleinement intelligible.
- ◆ Ces cycles sont cependant loin d'être monolithique. Chez Piaget, comme auparavant chez Baldwin, ils ont une nature intrinsèquement récursive, de sorte qu'un cycle donné est toujours composé de cycle plus élémentaires et est aussi partie intégrante d'un cycle de niveau englobant. Ainsi, un organisme, qu'il soit naturel ou artificiel peut être considéré comme un ensemble ou une population de cycles ou de schèmes en interaction et plus ou moins bien coordonnés. Une question essentielle étant alors de déterminer selon quelle hiérarchie on doit les considérer. A quel cycle pourrait-on, en somme, identifier le niveau d'organisation constitué par l'organisme prit dans son ensemble ? Piaget ne s'est pas posé une telle question car, après avoir posé ses concepts architectoniques, il ne les a jamais retravaillés. On peut cependant fournir une réponse qui ressortit davantage au cadre baldwinien, fondamentalement social. C'est bien, en effet, de social qu'il s'agit car, la réponse à cette question dépend de l'observateur, ou de la communauté des observateurs, et de leur manière d'appréhender l'organisme en question. Ainsi, pour le biologiste, le cycle fondamental n'est autre que celui de la reproduction. Monod, par exemple, affirmait que l'activité du courtisan qui écrit des poèmes et chante pour sa belle n'est en définitive qu'une expression sophistiquée de vieille habitude biologique qui vise à la réalisation de l'accouplement. Dans cette perspective, le schème que l'on peut considérer comme récursivement constitué de tous les autres, c'est celui de la reproduction. Le psychologue, comme de la rue aura tendance à considérer que c'est le schème du soi qui dispose du plus haut niveau d'organisation. Tout cela, on le voit bien, est affaire de point de vue. Et quoi de plus logique : avec une organisation cyclique, il va de soi que la hiérarchie sera "enchevêtrée" (Hofstadter 1985).

Il est un dernier point à développer concernant cette conception de l'organisation. Il concerne l'interaction entre les cycles. Cette question est d'une importance extrême étant donné qu'une population de cycles pourra être considérée comme une organisation dès lors que les

⁹Dans la définition qu'il donne de l'organisation du vivant comme processus autopoïétique, Varela est, lui aussi, tout à fait clair sur la nécessité de considérer le cycle comme une unité :

" Un système autopoïétique est organisé comme un réseau de processus de production de composants qui (a) régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits, et qui (b) constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau. " (Varela, 1989:45)

d'un même organisme, le terme *coordination* est plus adéquat.

Quoi qu'il en soit, il importe de noter que :

- ◆ cette dynamique d'interaction entre cycles est totalement indépendante de la nature des cycles concernés : quelle que soit leur degré de complexité, quelle que soit la ou les modalités sensorielles et motrices concernées, dès lors qu'une assimilation réciproque est possible, on débouche "mécaniquement" sur une imitation réciproque ou une coordination par accrochage sur la "phase" objet de l'assimilation. En effet, dès lors qu'on s'accorde à définir l'organisation comportementale en termes de schèmes ou de réactions circulaires, on peut, en principe, modéliser sur cette base l'ensemble des dynamiques de coordination intra ou inter-sujets. Et de fait, dans le champ de la neurophysiologie des comportements moteurs, les accrochages d'oscillateurs constituent à présent un axe fondamental du dispositif explicatif (cf. Cattaert 1997, Stein et al. 1997, Ijspeert et al. 1998). De même, dans le domaine des comportements collectifs, maintes coordinations ou synchronisations de comportements peuvent être comprises comme des processus d'accrochage de phases entre les cycles comportementaux correspondant ; c'est le cas, par exemple, de la vocalisation chez les cigales (Williams & Smith 1991), de la photoluminescence chez les lucioles (Buck & Buck 1978) ou de la construction du nid chez les termites (cf. Grassé 1959, Salvador 1995).
- ◆ Observons aussi qu'en s'assimilant réciproquement, les cycles se stimulent aussi réciproquement, ce qui amène une plus grande vigueur et surtout une meilleure *stabilité* de l'activité. On peut voir là l'explication des phénomènes dits de "facilitation sociale" qui se caractérisent par le fait que l'activité d'un individu est généralement accrue dans son intensité et sa durée lorsqu'il se trouve en présence de congénères effectuant la même activité (cf. Clayton 1978, Guerin 1993)
- ◆ Les accrochages entre réactions circulaires en interaction servent donc la même " " " finalité " " " que les accrochages d'oscillateurs physiques, chimiques ou autres : ils engendrent une meilleure stabilité. On peut donc voir là un facteur du processus d'évolution des organisations, qui, comme nous l'avons vu plus haut, n'échappe pas à la problématique de la reproduction différentielle qui définit la sélection naturelle darwinienne, ou la sélection fonctionnelle baldwinienne (Baldwin 1902). L'accrochage entre cycles favorisant leur stabilité, c'est-à-dire, leur reproduction, on peut le considérer comme l'équivalent des processus de cosélection intervenant au niveau des écosystèmes naturels.

2.4 Résumé

Dans cette section, nous avons examiné la notion d'organisation au sens le plus général du terme et nous avons conclu qu'une organisation ne pouvait légitimement mériter ce nom qu'à condition de pouvoir se maintenir, et donc, à condition d'opérer sur elle-même une action organisatrice. Cette "clôture sous cause efficiente" a pu être réservée aux organisations vivantes par certains auteurs —par exemple Rosen 1991, Maturana & Varela 1992. Mais on peut considérer cette restriction comme insuffisamment argumentée car si, depuis deux décennies, beaucoup de débats tournent autour de la question de savoir quels sont les critères de définition du vivant, ces mêmes débats n'en viennent jamais à considérer la distinction qu'il conviendrait d'opérer entre organisation vivante et organisation non-vivante. Cette

dernière notion est ainsi restée généralement informulée. Piaget, cependant, définissait l'organisation d'une manière très générale, sur la base d'un modèle simplement physico-chimique. C'est cette conception qui sera ici reprise. Une organisation sera donc vue comme une chaîne causale bouclant sur elle-même de sorte qu'elle se maintient en se reproduisant, par le simple fait qu'elle s'exécute. La fermeture du cycle en chacune des étapes qui le constituent vient de ce que le cycle produit cela même qui assure la perpétuation de la chaîne causale. Dès lors, si l'on porte le regard sur une étape donnée on pourra constater que la stabilité du cycle procède de sa capacité à maintenir un invariant qui est tout à la fois produit et capturé par le cycle, assimilé dirait Piaget. Tout comme l'organisation dans son ensemble, cet invariant appartient autant à l'organisme qu'à l'environnement, ces deux dernières notions étant des distinctions secondaires opérées par l'observateur. Ontologiquement, l'organisation, le cycle est premier. On doit noter que l'invariant considéré est en somme *anticipé* par l'organisation qui, par son activité tend à assurer sa production et donc, subséquemment, sa perception ou assimilation. Si la production est conforme à l'anticipation, s'il y a *assimilation*, c'est-à-dire, si le *pattern matching* est effectif, le cycle se ferme à cette étape et peut continuer son exécution, sa reproduction, c'est-à-dire, en particulier, tendre à nouveau vers la production du même stimulus, la production du même invariant.

Nous pouvons à présent revenir à la définition générale de l'organisation fournie par Maturana & Varela :

“ “ Organisation ” signifie l'ensemble des relations qui doivent être présentes pour qu'une chose existe. ” (p. 31)

Du point de vue piagétien qui vient d'être développé, cette assertion apparaît valide en ce sens qu'elle dit clairement la nécessité d'être une organisation pour accéder à l'existence. Si une chose existe, c'est qu'elle *est* une organisation. Quelqu'éphémère qu'elle soit. S'il n'y pas d'organisation, ainsi que l'indique nettement le 4^e point de la définition du Petit Robert, c'est qu'il y a le chaos, le *non-être* dirait Parménide.

Mais en tant que définition de l'organisation, cette assertion est largement insuffisante, car elle laisse ouverte la possibilité de réserver la “ clôture sous causalité efficiente ” aux organisations “ vivantes ”, et de laisser, ce faisant, les organisations non vivantes dans un bien étrange vide conceptuel seulement peuplé de rares métaphores (cf. la note 4 page 4) La position piagétienne adoptée ici est par contre très explicite à ce sujet : par organisation, on ne peut pas entendre autre chose qu'un cycle de processus causalement fermé sur lui-même. Il ne semble donc pas souhaitable d'accoller à cette conception un label tel que *self-organization* ou *auto-organisation* car, malheureusement, cela donnerait à penser qu'il peut y avoir de l'organisation en dehors de processus bouclant sur eux-mêmes. Ce qui, selon toute évidence, ne paraît pas pouvoir être le cas.

Mais encore faut-il régler la question de savoir comment la chaise (de la note 4 page 4), comme tout autre objet disposant d'une organisation au sens populaire du terme, peut exister. Pour y répondre, il importe d'abord de bien fixer le niveau d'observation. Posons d'abord que la matérialité de la chaise, le métal dont elle est fait, ne pose pas problème sous le rapport de l'organisation au sens où celle-ci est suffisamment bien connue comme étant celle de la structure métallique dans laquelle, par le jeu de leurs attractions, répulsions, les atomes se voient insérés dans un réseau de forces qui les maintiennent en place de manière stable. Considérons plutôt cette organisation que pointaient Maturana et Varela et qui résultent de l'activité constructrice de l'homme. En agençant les morceaux de métal convenablement nous obtenons *un objet dans lequel nous voyons une organisation*. Et, à l'évidence, cette organisation là ne semble pas correspondre à la définition mise en avant plus haut. La chaise existe, visiblement, sans pour autant manifester, semble-t-il, cette dynamique de “ clôture

sous causalité efficiente ”.

Dans la perspective défendue ici, une telle vision ne fait que traduire une conception naïve de l’objet. C’est-à-dire, cette idée que l’être de l’objet puisse être dans l’objet lui-même. La chaise existe, certes. Mais pas toute seule. Il s’agit de bien comprendre ce qu’exister signifie, au moins pour un objet. C’est à la fois très simple et très difficile, parce qu’étranger à nos habitudes perceptives. On doit, en effet, pouvoir reconnaître que la chaise existe parce qu’elle a été “ construite ” —mentalement parlant— par l’observateur dont l’organisation (les schèmes, les cycles assimilateurs etc.) bouclent sur cette chaise qui s’en trouve donc partie intégrante. La chaise existe parce qu’elle se tient au confluent d’un ensemble de schèmes qui se coordonnent sur elle et lui donne sa signification. Car une telle coordination de schèmes élémentaires, c’est déjà un schème de niveau supérieur, un schème englobant qui porte la signification de ce qu’est une chaise et qui en constitue l’organisation. Hors de ce schème, il n’est point de chaise. La fourmi qui marche sur la chaise ne connaît pourtant aucune chaise, la chaise n’existe pas pour elle en tant que chaise. La chaise n’a pas d’organisation dans l’univers de la fourmi.

Autrement dit, la chaise a bel et bien une organisation qui correspond à notre définition. Mais cette organisation n’est pas là où on croit la voir. “ L’ensemble des relations qui doivent être présentes pour que la chaise existe ” ne se trouve pas *dans* la chaise. Il est dans la coordination des schèmes du sujet qui se rapportent à l’objet chaise. Les découpages sujet-objet sont seconds. Seule l’organisation, le schème, est premier.

Quant à savoir pourquoi nous ne voyons pas d’emblée les choses ainsi, pourquoi l’organisation, le cycle, c’est-à-dire, “ l’être ”, se retire pour laisser place à des “ étants ”, sujets et objets, nous ne pouvons en traiter ici, bien que ce soit une question fondamentale pour la robotique. La question est d’importance, en effet, puisqu’il s’agit, ni plus ni moins, que de comprendre comment s’opère la construction du réel sur la base de ces organisations élémentaires que sont les boucles sensorimotrices ou les réactions circulaires de l’organisme robotique. Nous y ferons seulement allusion plus loin, lorsque les possibles développement de l’expérimentation seront évoqués (pour davantage d’information sur la construction de la réalité, cf. Salvador 1996, 1997a, 1998b).

3. La robotique autonome : mise en contexte théorique et empirique

3.1. introduction

Ces dix dernières années, principalement sur l’initiative de Brooks (1986, 1989), s’est imposé une nouvelle conception de la robotique radicalement à contre-courant des approches classiques qui, depuis les années soixante essayaient de réaliser des machines aux comportements cognitivement complexes, c’est-à-dire, capables d’effectuer des actions intelligentes sur la base d’inférences opérées à partir d’une représentation codée de l’environnement dans lequel s’effectue l’action. Cet objectif ambitieux était poursuivi au travers d’une traditionnelle et très cartésienne division des tâches qui devait amener à une segmentation de l’étude du comportement intelligent : perception, représentation, planification de l’action, contrôle du mouvement etc. constituaient autant de domaines d’études séparés qu’il fallait ensuite tenter de réunir dans une synthèse toujours difficile étant donnée le niveau de complexité recherché (cf. Coiffet 1993).

Les résultats de ces approches étant restés bien en deçà des espérances qu’elles avaient suscitées, Brooks (1986) proposa d’aborder le problème de manière apparemment plus modeste en partant de comportements très élémentaires mais, cependant, considérés dans leur intégrité, dans leur unité, la perception et l’action se trouvant réunies au sein d’une structure de boucle sensorimotrice, c’est-à-dire, prises dans une causalité circulaire. En installant des sortes de *réflexes* sensorimoteurs faciles à mettre en œuvre, il put élaborer des niveaux de

comportements plus complexes par coordination des comportements des niveaux sous-jacents, ceci aboutissant à une organisation hiérarchique —baptisée “*subsumption architecture*”— complètement dénuée de centre organisateur puisqu’en définitive chaque unité comportementale, chaque “ activité ” agit pour son propre compte, dans la limite d’un pouvoir d’exercice contraint par les inhibitions des activités collatérales ou “ englobantes ”.

Ce renversement de perspective, qui a ensuite été largement repris dans le cadre de la robotique autonome, consistait pour l’essentiel à :

1. **adopter une approche *bottom-up***, c'est-à-dire, privilégier l’intelligence sensorimotrice sur l’intelligence rationnelle à “ base de connaissance ”
2. **restituer son intégrité au comportement** qui, cessait ainsi d’être atomisé en de multiples étapes pour se voir, au contraire, réuni grâce aux boucles sensori-motrices qui incluent tout la chaîne comportementale, de la sensation à l’action et retour.
3. **considérer l’organisation comportementale comme une *collectivité d’unités comportementales élémentaires et distribuées*** qu’il s’agit en somme de faire collaborer de manière harmonieuse, c'est-à-dire, *cohérente* (Brooks 1994) afin d’engendrer des niveaux de comportements toujours plus élaborés.
4. **construire des “ créatures ” complètes, capables d’actions simples dans un environnement réel** donc complexe et changeant —et non pas des entités hyper-rationnelles mais seulement capables d’agir dans un univers simplifié (Brooks 1991),

Ce faisant, sur chacun de ces points, la robotique autonome s’est retrouvée en harmonie avec les conceptions évolutionnistes et développementales de la biologie et de la psychologie développée par Piaget. En effet, reprenons ces points successivement :

1. Piaget a étudié la construction des connaissances par l’enfant dès les tout premiers stades de l’intelligence dite sensorimotrice et son mouvement était donc déjà-toujours *bottom-up* —ce qui est assez logique de la part d’un constructiviste.
2. Plus important, Piaget, on l’a vu, concevait l’organisation des êtres vivants sur la base de la notion de réaction circulaire ou de cycle assimilateur qu’à la suite de Baldwin (1895, 1902), il pouvait présenter comme le mode de fonctionnement “ naturel ” des boucles sensorimotrices qui composent l’organisme naturel. La concordance avec la position de Brooks est ici aussi excellente puisque ce dernier propose, en somme, de concevoir l’organisation des robots sur la base d’unités comportementales implémentées par des boucles sensorimotrices. Mais cette concordance n’était pas totale car, précisément, la notion de réaction circulaire fait défaut. Nous allons y revenir tout de suite.
3. On l’a vu plus haut, la vision “ collectiviste ” de l’organisme artificiel qui résulte du tournant proposé par Brooks, était déjà inhérente à la vision radicalement récursive de Piaget pour qui, chaque schème ou cycle assimilateur d’un niveau donné pouvait toujours est vu comme résultant de la coordination de cycles de niveau plus élémentaire.
4. Dans une perspective piagétienne, le 4^e point est “ tout naturel ”. En effet, l’insistance sur la nécessité de s’adresser à des créatures complètes peut-être vue comme une conséquence du point précédent (le 3) lorsqu’appréhendé dans la perspective des boucles sensorimotrices, c'est-à-dire, dans le cadre d’une causalité circulaire entre action et perception. Car, si la coordination des parties qui forment le tout de l’organisation doit dépendre des effets de l’action sur la perception, on voit mal comment une telle coordination pourrait s’établir si ces parties, normalement en interaction, sont étudiées séparément.

4 . Recadrage piagétien

L'accord entre les deux perspectives est donc apparemment très large, presque complet. Mais, comme je l'ai déjà signalé, il subsiste une zone d'ombre que nous allons tenter d'éclairer étant donné son importance. Car il s'agit du mode de mise en correspondance entre l'action et la perception que Piaget, à la suite de Baldwin, a clairement défini sous le rapport de la construction *d'invariants*.

Je le rappelle, Baldwin avait indiqué qu'une réaction circulaire tend à " maintenir, répéter ou reproduire " sa propre stimulation. Piaget donnera à cette perspective toute son ampleur en rendant pleinement explicite que cette activité de maintien d'une stimulation est seulement une instance sensorimotrice de l'activité parfaitement générale qui consiste à dégager des régularités dans le cours des interactions avec l'environnement. Ceci n'étant, en définitive, qu'une lecture cognitive de la vieille dynamique de l'habitude dont la psychologie du XIXe était replète. De plus, il est déjà tout à fait clair que dans le cadre piagétien, fondamentalement relativiste, ces régularités ne sauraient être vues comme simplement environnementales. Elles ne sont pas détectées dans l'environnement, elles sont **construites** par l'action exercée sur, dans, au travers de, l'environnement. Ainsi, lorsque le couplage entre perception et action accède à un régime stable, il manifeste une *invariance* qu'on ne peut attribuer ni à l'environnement ni à l'organisme mais qu'il convient plutôt de faire correspondre avec l'émergence d'une organisation sensori ou perceptivo-motrice qui, transcendant leurs frontières, court de l'organisme à l'environnement et inversement.

Cette perspective relativiste, inhérente au couplage perception-action, a été assez clairement traduite ici et là, notamment en référence à la notion d'*umwelt* (Aitken 1994, Hendriks-Jensen 1996, Rutkowska 1997), mais il semble, cependant, que le courant de la robotique autonome ne soit pas encore arrivé à une thématization pleinement explicitée du régime fonctionnel de la réaction circulaire. Car l'idée que le but fondamental de toute organisation soit le maintien d'un invariant sensoriel ou perceptif reste, à l'évidence, passablement étrangère au champ de réflexion actuel.

Bien sûr, la notion de maintien d'une stimulation invariante peut être déjà repérée dans maints travaux (p. ex. Müller 1997, Billard & Hayes 1997), mais pour connaître l'audience qu'elle mérite, elle attend encore, me semble-t-il, d'être présentée comme le mode de fonctionnement normal de la boucle sensorimotrice.

De fait, quand Brooks (1991) définit l'essence de l'alternative qu'il a proposée, il le fait en des termes à la fois très clairs et peu explicites :

“ This alternative is to operate in a tight coupling with the world through a sensing-acting feedback loop. Instead of relying on inaccurate values returned by noisy sensors, we can rely on the time averaged derivative of these signals as the creature actively changes its state within the world in a way which forces largers changes in the sensor readings than those contributed by noise. ” (p 437)

Comme on le voit, la dérivée du signal, porteuse de l'invariance, est adéquatement mentionnée, mais elle n'apparaît qu'incidemment, comme l'outil de la désambiguation du signal, et certes pas comme l'alpha et l'oméga de l'organisation sensorimotrice sous-jacente. Ainsi, lorsque par exemple, Hendriks-Jansen (1996) résume le propos de Brooks, il n'en retient que les forts changements induits par l'activité :

“ By inducing changes of state that are larger than any possible changes due to uncertainties in the sensors' readings, the creature transcends the limitations of its own sensors (p. 138)

Au mieux, il indique seulement :

“ By moving in specific, structured ways, the creature selects the information it is interested in. ” (p. 139)

Visiblement, nous sommes là assez éloignés de la conception baldwino-piagétienne car, si tant est que cet auteur ait eu en tête quelque chose approchant l'idée que l'organisation produit la sensation qu'elle anticipe et vise en même temps, il n'aurait pas manqué de le préciser, et n'aurait pas alors employé cette notion équivoque de “ sélection de l'information ”.

On retrouve, en général, la même imprécision dans les multiples autres instances où un auteur du domaine essaie de formuler ou de préciser la nature de ce lien étroit entre perception et action qui sert de fondement à l'approche “ autonome ” de la robotique ¹⁰. Il y a, à cela, me semble-t-il, une bonne raison, qui tient au caractère contre-intuitif de cette visée à la stabilité d'une sensation ou d'une perception. En effet, la robotique, tout comme l'intelligence artificielle ¹¹, entretiennent plus volontiers la vision du comportement adapté comme celui qui consiste à savoir quelle action **a** choisir lorsque l'état perceptif **x** se trouve réalisé. Cette vision n'est pas fautive intrinsèquement, elle est même parfaitement justifiée dans des contextes précis, mais elle n'a pas valeur générale. Elle laisse en effet échapper ceci : le choix d'une action parmi un ensemble de possibles n'a de signification que dans le cadre d'une visée plus globale qui, en définitive, ressortit toujours au cadre de la régulation ou du maintien d'un “ paramètre ” donné.

Autrement dit, dans la perspective baldwino-piagétienne, toute organisation n'est pas seulement orientée vers la constance de son milieu intérieur, ¹²elle vise aussi une ce que je qualifierais volontiers d'” homéostasie extéroceptive ” ou, ce qui revient au même, de “ constance du milieu extérieur ”. Elle a, pour ce faire, tout le registre des schèmes de niveaux sous-jacent dont elle est composée. Et la plus ou moins grande richesse de ce répertoire ne doit pas nous faire perdre de vue l'unité organisationnelle qui l'englobe et qui lui donne sa signification en même temps que sa finalité.

On le sait suffisamment, les “ drives ” les plus fondamentaux concernent la survie (cf. Lorenz 1981, Tinbergen 1953, Baerends 1976) et sont clairement des fonctions visant au maintien d'un environnement favorable, c'est-à-dire, un environnement offrant aliments, partenaires sexuels et absence de danger. En biologie de l'évolution, il est bien connu qu'une espèce se maintient dans un écosystème changeant en faisant du “ tracking ” de niche, c'est-à-dire, en s'assurant, par son activité, un environnement constant en dépit des variations incessantes que l'on peut objectivement constater. A ces niveaux élevés —ou fondamentaux— d'organisation, la recherche d'une constance environnementale est aisément admise.

Par contre, dès qu'on en vient à l'organisation d'un sujet donné, il semble qu'on ait toutes les peines du monde à s'arrêter sur cette idée qu'elle vise d'abord une constance, une régularité de cet environnement qu'elle définit et constitue tout à la fois (cf. Salvador 1993, 1996, 1998). Comme je l'ai déjà indiqué, on sait généralement pointer les corrélations perception-action

¹⁰ Rutkowska (1997:291) :

“ sensors may not function by detecting environmental invariants but depend on sensory-motor covariation, varying in ways that depend on the dynamics of the agent-environment interaction. ”

¹¹ Cf. la manière terriblement réductrice avec laquelle Drescher (1991) a rendu compte de la notion piagétienne de schème.

¹² Evoquée en 1852 par Claude Bernard dans sa “ méthode expérimentale ” et, depuis Cannon, mieux connue sous le label d'homéostasie.

dont le robot pourra se servir pour désambiguïser les signaux en provenance de l'environnement. Mais on ne dit pas, pas encore, pas assez, que ces corrélations, parce qu'elles signifient un rapport invariant entre la perception et l'action, sont précisément ce qui marque l'existence d'une organisation. Organisation dont la "visée" première est de se maintenir en vérifiant ses anticipations, c'est-à-dire, en assurant le maintien, la répétition ou la reproduction du signal précédent obtenu, c'est-à-dire, la reproduction de cette corrélation, de ce rapport perception-action.

En résumé, on pourrait dire que sous le rapport du cycle perception-action, la robotique autonome a judicieusement redécouvert von Uexküll (1935) —qui dans les années 20, avait défini la notion d' *umwelt* sur la base du "cycle fonctionnel" (cf. figure 4)— mais qu'il lui manque de redécouvrir Baldwin¹³ et sa réaction circulaire. Le couplage perception-action est le point de départ nécessaire de toute approche constructiviste. Il peut aussi être le point d'arrivée. Mais à condition d'en parcourir toute la logique. A condition de repérer que sa dynamique présente cette formidable régularité qui consiste à construire des invariances.

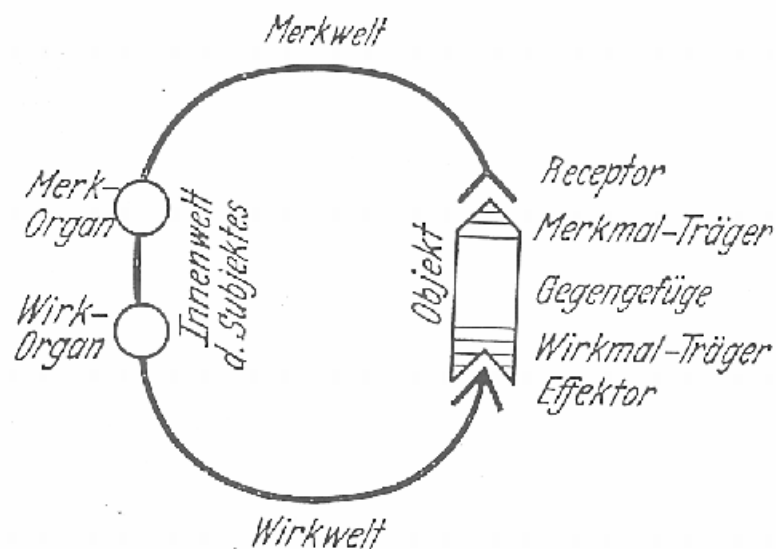


Abb. 3. Funktionskreis.

Fig. 4 Le "cycle fonctionnel" de von Uexküll

Comme suggéré plus haut, on pourrait probablement attribuer cette difficulté à converger sur la thèse balwino-piagétienne à une polarisation excessive sur cette étape particulière qu'est le choix d'une possible action étant donné un état perceptif particulier. On peut soupçonner ici l'influence d'une pensée individualiste fortement enracinée depuis le début du XXe siècle et qui nous amène à minimiser le déterminisme de l'habitude que le XIXe siècle avait largement reconnu. En bref, comme nous aimons beaucoup entretenir l'idée que nous prenons des décisions, que nous sommes agents, plutôt qu'agis par notre système d'habitudes, nous avons mécaniquement tendance à reproduire cette vision lorsque nous concevons nos créatures artificielles et, ce faisant, nous avons des difficultés à les concevoir comme une simple population d'habitudes en compétition les unes avec les autres. Nous préférons, et de loin, l'idée que l'organisation du robot est composée d'un ensemble de **comportements** car ce terme ne véhicule pas la charge de "mécanisme" inhérente à la notion d'habitude. Ce qui, bien sûr, ne laisse pas d'être paradoxal dans le cadre robotique !

¹³ Dont von Uexküll s'est très certainement inspiré étant donné la renommée dont Baldwin disposait —en biologie autant qu'en psychologie— à l'époque où le biologiste allemand entamait ses recherches.

De manière plus fondamentale peut-être, on peut voir une autre raison derrière la faible reconnaissance du fait que l'organisation perceptivo-motrice d'une boucle sensorimotrice peut et doit être pensée sur le mode de la réaction circulaire, c'est-à-dire, sur le mode du maintien d'une stimulation. En effet, depuis qu'il est apparu suffisamment clair que nul comportement intelligent, adapté, ne pourrait être produit *ex abrupto* par un *deus ex machina*, un " grand horloger ", mais qu'il faudrait très certainement faire partiellement évoluer une organisation minimale vers des stades de plus en plus adaptés, et ce, via des apprentissages (ontogenèse) ou via un processus de sélection (phylogenèse), l'attention se voit quasi exclusivement portée sur la volet adaptatif de l'organisation au détriment du volet conservatif, celui que Piaget appelait assimilation¹⁴ et qu'il identifiait à l'organisation elle-même.

Evolution, apprentissage, adaptation, accommodation, sont des termes qui, à force de véhiculer l'idée tellement valorisée de différence, de changement, de progrès, en viennent à occulter ce fait essentiel sur lequel Piaget n'a cessé d'insister : tous ces changements, toutes ces adaptations, toutes ces accommodations ne sont jamais que des variations du mode de conservation qui reste la dynamique fondamentale, nécessairement première de l'organisation. Pour bien souligner le " décalage " inhérent à une telle vision " orientée progrès ", sans doute faut-il rappeler que le cycle assimilateur, et donc, le volet conservatif, est bien le seul à disposer d'une consistance ontologique (cf. Salvador 1993, 1996, 1997n). L'accommodation, l'adaptation, l'évolution, l'apprentissage désignent seulement des transitions de ce substrat dynamique et n'ont donc pas plus de consistance que la sélection naturelle qui —faut-il le rappeler ?— ne consiste en rien d'autre qu'un processus de **reproduction** différentielle.

Il semblerait en somme que prévale actuellement une conception de l'apprentissage et de l'évolution quelque peu oublieuse de l'invariance. Et l'on peut craindre que cet état de fait rétrécisse la dimension heuristique de l'opération de mise en boucle de l'action et de la perception initiée par Brooks. La présente étude peut être comprise comme une tentative de déploiement de la signification dont est porteur le " tournant brooksien " de la robotique. Sa visée sera de favoriser une meilleure prise en compte de cette dimension d'invariance intrinsèque à la notion d'organisation.

5. Spécification du projet

1.1. Introduction

Comme nous venons de le voir, cette étude est basée sur l'idée baldwino-piagétienne selon laquelle les organisations, de quelque domaine qu'elles soient, sont des cycles ou schèmes qui, en vertu même leur nature cyclique, satisfont à l'exigence fondamentale de stabilité via leur capacité à se reproduire. L'organisation est ainsi caractérisée de la manière la plus essentielle, comme étant un processus cyclique qui se maintient en se reproduisant. Cela signifie, en particulier, que l'organisation comportementale devra, à quelque niveau qu'on la considère, être pensée comme visant au maintien d'un *invariant*.

L'organisation sensorimotrice du robot est ici considérée comme un écosystème de schèmes (cf. Salvador 1992, 1993) dont l'évolution se marquera, à l'instar des écosystèmes naturels, par l'évolution de la population de ses schèmes. Cette évolution, tout comme celle du vivant, s'appuiera sur un processus de reproduction différentielle¹⁵ qui concernera autant l'organisation elle-même que chacun des schèmes qui la composent, étant donné qu'ils sont

14 D'où l'appellation de cycle assimilateur qu'il devait donner à son modèle formel de l'organisation.

15 Que Baldwin (1902) désignait du nom de " sélection fonctionnelle " et qu'il considérait comme l'équivalent du processus de sélection naturelle qui se joue au niveau inter-organismes et non pas intra-organismes comme c'est ici le cas.

eux aussi composés d'une population de cycles plus élémentaires. Au niveau d'un organisme donné, naturel ou artificiel, la reproduction d'un schème est à concevoir comme répétition. Cette dernière tendant à augmenter la force de l'habitude, c'est-à-dire, sa tendance à la répétition.

Tout comme pour les formes vivantes constitutives d'un écosystème donné (cf. Salvador 1992, 1993), c'est par les interactions qu'il entretient avec les autres schèmes de la population constitutive de l'organisation qu'un schème se verra *accommodé*, adapté, du fait que certaines de ses modalités de fonctionnement, certains des cycles qui le composent, seront en mesure de se reproduire davantage que d'autres. Cette reproduction différentielle aura pour conséquence de modifier la conformation du schème considéré et c'est en cela que consiste précisément l'accommodation. **Dans la perspective ontogénétique qui sera la nôtre, cette évolution du schème correspond à ce que l'on appelle classiquement un apprentissage.**

A la suite de Piaget, nous considérerons qu'une organisation évolue de manière *adaptée* dans la mesure où elle maintient en permanence un équilibre entre stabilité et plasticité. C'est-à-dire, dans la mesure où, tout en continuant à se reproduire (stabilité), elle intègre (plasticité) de nouveaux mode de régulation lui permettant d'assurer cette reproduction en dépit de conditions environnementales changeantes. Autrement dit, **nous considérerons qu'un apprentissage s'est opéré dès lors qu'une organisation est capable d'assurer son maintien —c'est-à-dire, est capable d'entretenir son invariant— dans des situations nettement plus perturbées que celles dans lesquelles un tel maintien pouvait être assuré avant la phase d'apprentissage.** C'est à la mise en évidence d'une telle forme d'apprentissage qu'est consacré le projet expérimental exposé ci-après.

1.2. *Objectif : l'apprentissage autonome d'un suivi de mur*

Sans doute convient-il de préciser qu'en raison du cadre piagétien donné à cette recherche, nous nous distancierons des lectures béhavioristes de l'apprentissage qui ont actuellement cours en *machine learning*. Celles-ci s'appuient sur la vieille notion d'*apprentissage par renforcement* que Sutton, en particulier, a contribué à réactualiser (cf. Grossberg 1988, Watkins 1989, Sutton 1991, Klopff 1993). Il ne faut pas voir là une contestation directe de ces travaux. A l'évidence, les résultats de ce courant de recherche sont d'une grande valeur. Cependant, le cadre conceptuel sur laquelle ils s'appuient, cette invocation —quel autre mot ? — des renforcements, avec en particulier cette référence à des "signaux spéciaux" venus de l'environnement qui seraient porteurs dudit renforcement (cf. par ex. Sutton 1991), tout cela apparaît —du point de vue du psychologue conscient de la transition paradigmatique béhaviorisme → cognitivisme— inutilement basé sur une conception populaire¹⁶ et tout à fait surannée de la psychologie du renforcement (cf. Allison 1989, Vaccarino et al. 1989). Autrement dit, l'apprentissage par renforcement dans le domaine de la machine ne doit certainement pas son efficacité au fait qu'il s'approcherait de quelque manière de l'apprentissage par renforcement auquel la psychologie populaire et le béhaviorisme ont crû pouvoir s'adresser. En effet, une telle forme d'apprentissage attend encore une démonstration claire de son existence. Et l'on a déjà toutes les raisons de penser qu'il n'y en aura pas (cf. les beaux résultats de Premack (1965) qui déconstruisent la notion de renforçateur).

Dans le cadre baldwino-piagétien où l'évolution de l'organisation est vue comme un processus de reproduction différentielle conditionnée par les couplages entre réactions circulaires, on peut complètement se dispenser de toute référence au doublet renforçateur-renforcement. Les réactions circulaires jouant les unes pour les autres, via leurs modalités de couplage, le rôle d'agent de sélection, les variations de "force" de tel ou tel lien sensorimoteur

¹⁶Au sens où elle ressortit à la *folk psychology*.

n'ont aucun besoin de se voir rapportées à l'administration de on-ne-sait-quels agents de renforcements. Il s'ensuit que nous situerons le robot dans un environnement où il opérera de manière autonome, c'est-à-dire, sans supervision, sans administration de récompenses ou de punitions. Ce qui, on le verra, ne signifie pas pour autant que toutes formes de modelage ou de tutorat doivent être absentes.

L'apprentissage, autonome, dont nous allons traiter ici est donc défini comme l'élargissement progressif du domaine dans lequel une réaction circulaire est susceptible d'assurer le maintien de son invariant, c'est-à-dire, sa reproduction, élargissement obtenu au travers de la seule activité, c'est-à-dire, de la seule succession des interactions avec l'environnement. Plus précisément, dans le cas qui nous occupe, **le robot sera, à l'origine, seulement apte à suivre des murs rectilignes ou faiblement perturbés, et manifestera donc un apprentissage autonome s'il se révèle capable, sans renforcements externes, d'adapter sa fonction de suivi de mur à des conditions environnementales de plus en plus perturbées de manière à pouvoir négocier des déviations angulaires importantes telles que, par exemple, celles suscitées par des coins concaves ou convexes.** Cet apprentissage est donc à concevoir comme développement, au sens étymologique, c'est-à-dire, qu'en s'opérant, il contribuera à *la mise en place* de la capacité fonctionnelle du robot. Au début du processus, cette dernière sera minimale, du fait qu'une seule la boucle sensorimotrice disposera d'une population cohérente et opératoire de circuits qui permettront une capacité minimale de régulation de la proximité au mur. Les autres boucles sensorimotrices seront "vierges" et verront leurs circuits spécifiés au fur et à mesure de la dynamique sensorielle et motrice suscitée par l'activité de la boucle sensorimotrice "tuteur".

Dès lors que l'on considère chaque boucle sensorimotrice comme un agent en venant à se coordonner avec ses "congénères" pour faire émerger une action collective *adaptée*, on ne peut manquer d'observer que l'ontogenèse va, en somme, se dérouler comme processus de conformisme d'une population à l'égard d'un leader. On retrouve donc la situation classique, scolaire, d'apprentissage, où l'expert montre un comportement adapté que les "élèves" vont tendre à reproduire dans la mesure de leur capacités. Il s'agit donc d'une forme d'apprentissage mimétique dont on pourrait songer à étendre le principe jusqu'à amener un expérimentateur à s'inscrire dans l'organisation du robot comme boucle "tuteur" et à donner à celui-ci un comportement adapté dans des situations très complexes que l'organisation pourrait ainsi apprendre à gérer progressivement en associant les percepts aux actions adaptées dont le modèle est ainsi directement fourni. Il s'agit là d'une forme d'imitation dont la psychologie du XXe a perdu jusqu'au souvenir malgré la reconnaissance dont elle jouissait à la fin du siècle dernier sous l'appellation de "putting through the act" (Hobhouse 1901, Thorndike 1901). Il s'agissait alors de faire découvrir un comportement adapté à un animal en le manipulant de manière à lui faire exécuter correctement ledit comportement qu'il n'aurait eût qu'une chance infime d'exécuter spontanément.

Avant de pouvoir évoquer de manière précise l'organisation sensorimotrice et les mécanismes d'apprentissage, un bref rappel de l'architecture sensorimotrice du robot expérimental va être nécessaire.

1.3. *résumé de l'anatomie du robot Nomad 200.*

1.3.1. Les capteurs

Le robot est un Nomad 200¹⁷ équipé d'un anneau de 16 sonars (Polaroid 6500) pour la détection à longue portée (de 15 cm à 10 m) sur 360°. De même, le robot dispose d'une

¹⁷ Produit par Nomadic Technologies, cf. http://www.robots.com/n200_96.html

anneau de 16 détecteurs infra-rouge pour la détection d'obstacle à courte portée (de 0 à 90 cm) sur 360°. Seule une partie de ces derniers sera utilisée dans la première phase expérimentale. Le robot dispose aussi d'une double ceinture de chacune 10 détecteurs de chocs ; les ceintures en question étant disposées en quinconce. Le robot dispose enfin d'un compas (non utilisé) et d'un retour odométrique basé sur la rotation des roues.

1.3.2. Les moteurs

La motricité est exercée, en translation et rotation, sur les 3 roues qui sont motrices et directrices. Il existe aussi la possibilité de faire tourner la tourelle porteuse des sonars, infra-rouges et compas indépendamment de la base porteuse des bumpers. Mais il ne sera pas fait usage de cette possibilité qui sera annihilée par "copie d'efférence", c'est-à-dire, par envoi de la même commande de rotation à la base et à la tourelle, de sorte que cette dernière restera solidaire de la base.

1.3.3. Les boucles sensorimotrices

De prime abord, on peut considérer qu'il existe une bijection entre les capteurs et les boucles sensorimotrices car nous considérerons n'avoir affaire qu'à une seule sortie motrice multimodale (translation & rotation). Comme nous le verrons, la distinction physique des capteurs, et donc, des boucles sensorimotrices correspondantes, n'interdit pas d'envisager que ces dernières se voient intégrées au sein d'une seule réaction circulaire coordonnant l'ensemble de l'espace sensorimoteur mis à disposition par lesdites boucles sensorimotrices.

Plus précisément, le robot comportera 8 boucles sensorimotrices. 6 d'entre elles concerneront les capteurs infra-rouge 0, 15, 14, 13, 12, 11. L'odométrie (vitesse de translation) correspondra à la boucle sensorimotrice dite Exploration puisqu'elle tendra à maintenir, autant que possible, le robot en translation avant. Les détecteurs de chocs, pris dans leur ensemble, fourniront le "percept" on-off d'une réaction réflexe d'évitement. N'étant pas articulées sur une population de liens sensorimoteurs, c'est-à-dire, de *circuits* susceptibles d'évoluer dans leurs caractéristiques (cf. *infra*), ces deux dernières boucles sensorimotrices ne seront pas concernées par les processus d'apprentissage.

1.3.L'organisation sensorimotrice et les réactions circulaires

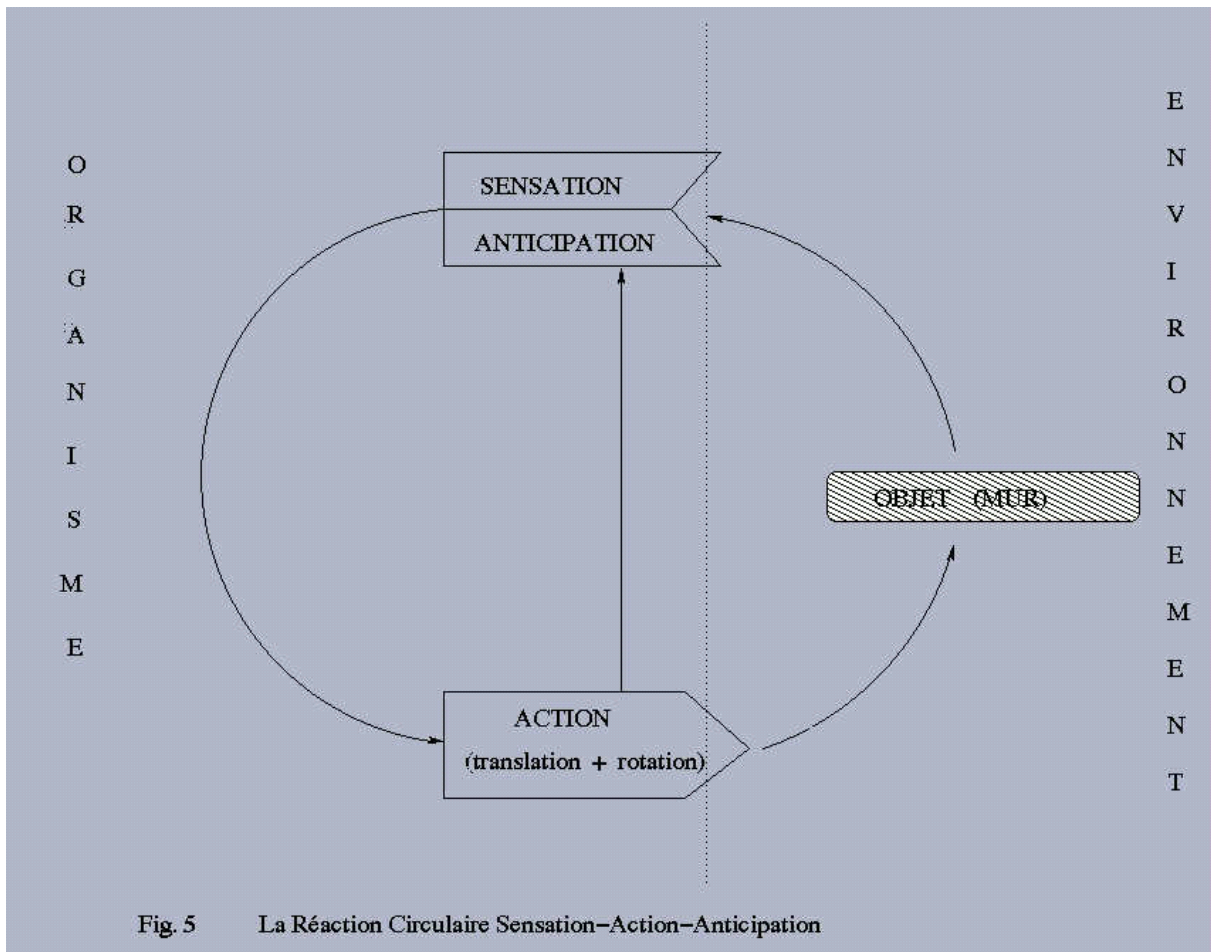
Suite aux précédentes considérations, on tiendra les réactions circulaires comme étant le mode privilégié de *fonctionnement* des "espaces sensorimoteurs" ouverts par l'établissement de connexions entre capteurs et effecteurs. Une boucle sensorimotrice, une connexion entre un capteur et un effecteur, sera donc vue comme étant une *structure*¹⁸ —ou un *organe*, pourrait-on dire— qui pourra converger vers un mode de fonctionnement en réaction circulaire. Par réaction circulaire, on désignera une fonction¹⁹ visant à assurer "le maintien, la répétition ou la reproduction" d'un invariant perceptif. Au risque de me répéter, je rappelle que l'essence de la réaction circulaire tient dans sa circularité qui suscite la tendance à se reproduire et donc, à maintenir sa stimulation. En tant que telle, la réaction circulaire s'identifie à la notion même d'organisation et en constitue l'unité élémentaire. Ces unités élémentaires peuvent se coordonner, coordonner donc leurs "espaces sensorimoteurs", pour constituer une réaction circulaire émergente que l'on pourra identifier à l'organisation englobante, c'est-à-dire, l'organisme. A cette réaction circulaire émergente correspondra à l'invariant fondamental que l'organisation dans son ensemble tendra à maintenir ou, plus

18 A entendre ni au sens piagétien, ni au sens varélien, mais au sens biologique du terme, celui qui concerne l'opposition classique fonction / structure.

19 Là encore convient-il de préciser que ce terme n'est pas à prendre au sens de ces "facultés" (perception, représentation, planification etc.) que l'IA classique pensait pouvoir étudier séparément.

exactement, à construire.²⁰

En résumé, une réaction circulaire sera ici définie comme étant une connexion entre une sensation²¹ et une activation motrice —avec une composante en translation et une en rotation — de nature à favoriser l’occurrence de la sensation ou du percept en question (cf. figure 5).



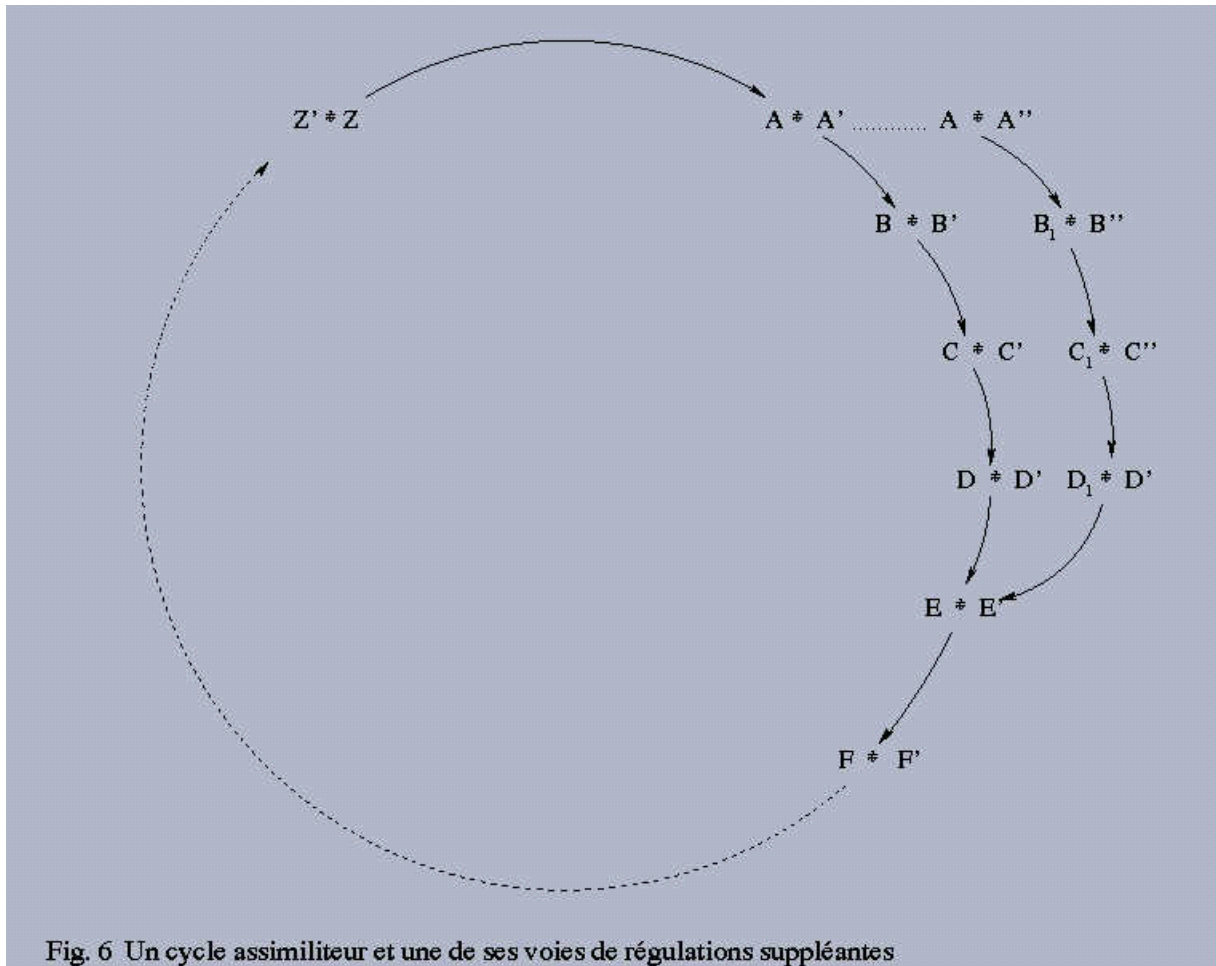
On peut donc dire que, par construction, ce que la réaction circulaire “ anticipe ” comme résultat de son action, c’est, précisément, sa propre stimulation.

Il faudra la distinguer des “ circuits ”, simples connexions Perception-Action-Anticipation pour lesquels l’anticipation ne correspond pas nécessairement au stimulus déclenchant. Ces circuits ne peuvent donc être que les éléments d’une réaction circulaire englobante. Leur “ vocation ” est de contribuer à la régulation et donc au maintien de l’invariant de ladite réaction. Il s’agira par exemple des réactions $(A \times A') \rightarrow B$ etc. qui appartiennent à la chaîne “ normale ” de la réaction circulaire, mais il s’agira aussi de tous les circuits annexes que la réaction pourra emprunter lorsque les valeurs perceptives anticipées (les A' , B' , C' etc.) ne

20 Car, la réaction circulaire est non pas tant un *détecteur* de régularités environnementales qu’un *constructeur* de régularités élaborées au travers de son activité sur l’environnement. Il faut y insister, c’est cette perspective qui, probablement, distingue le plus nettement la présente approche baldwino-piagétienne des autres travaux qui, bien que faisant appel aux notions de boucles sensorimotrices, ne se sont pas encore clairement arrêtés sur ce mode de fonctionnement en réactions circulaires, en particulier sous le rapport du maintien d’un invariant. Tout se passant comme si la perception était préférentiellement associée à l’idée d’une détection d’événements consistant en une *variation*, c’est-à-dire, une rupture d’invariance (cf. *supra*).

21 En fait, il s’agira d’un *percept* puisque ce qui sera “ saisi ” de l’environnement comportera une part de construction liée au fait que les anticipations seront mêlées à la valeur brut du signal.

seront pas au rendez-vous de l'anticipation. Dans ce cas, l'occurrence de A'', de B'', ou de C'' etc. fera dévier la réaction circulaire sur une suite de réactions "subsidiaries" qui, en un point ou un autre, auront à rejoindre la chaîne normale des réactions, après avoir assumé, en somme, la régulation d'une perturbation (cf. la figure 6 où la perturbation originelle vient de l'assimilation de l'élément A'' au lieu du A' normalement attendu). La plus ou moins grande capacité d'une réaction circulaire à assurer de telles régulations est précisément la marque des apprentissages qu'elle aura suivis ou pas.



Les réactions circulaires proprement dites sont donc à voir comme la fonctionnalité émergente d'une population de circuits dont un, au moins, va anticiper sa propre stimulation comme résultat de son action ; circuit pour lequel l'action des autres circuits adjacents contribuera au maintien de son invariant, de son anticipation ou de sa stimulation. Ce circuit, que l'on qualifiera de *leader*, est donc celui qui pointera vers l'invariant que la réaction circulaire —émergeant de la dynamique d'ensemble de la population de circuits— tendra à maintenir.

Chaque boucle sensorimotrice (infra-rouge) disposera d'une double population de circuits. La première est composée de 16 circuits correspondant chacun à une des valeurs possibles du signal fourni par le vecteur d'état du robot. La deuxième est constituée par 32 circuits correspondant aux valeurs possibles de la dérivée du signal. Il eût sans doute été concevable de ranger ces deux populations dans deux boucles sensorimotrices différentes —la deuxième pouvant être considérée comme articulée autour d'un capteur "dérivée". Pour d'historique de

conception, il n'en a pas été ainsi. Mais, si elle devait s'avérer nécessaire, l'option pourrait aisément être prise.

Quoi qu'il en soit, ces populations de circuits vont, chacune, être le lieu d'émergence d'une réaction circulaire. Emergence qui sera conditionnée par le succès ou l'insuccès de la dynamique sensorimotrice suscitée par la somme des impulsions motrices en provenance de l'ensemble des boucles sensorimotrices. Cette émergence ne se fera cependant pas au hasard car, à l'origine, la boucle sensorimotrice relative au capteur infra-rouge 12 disposera de populations de circuits déjà mises en forme (informées), de sorte qu'une capacité minimale de suivi de mur pourra être assurée. Tout l'apprentissage consistera à étendre cette capacité de manière à pouvoir négocier des déviations angulaires de plus en plus prononcées.

Comme cela a été dit plus haut, les schèmes du robots évolueront dans un cadre écosystémique, c'est-à-dire, au travers d'un processus de cosélection déterminé par les couplages que les réactions circulaires —leurs populations de circuits— entretiennent les unes avec les autres. En fonction de leur fréquence de fonctionnement, du résultat de l'action à laquelle ils auront contribué, et des coactivations en provenance de leurs voisins, les circuits qui composent les schèmes se verront modifiés, dans leur force, dans les modalités de l'action qu'ils soutiennent, et dans leur anticipation du résultat de l'action. C'est ce que nous allons examiner plus en détail.

1.4. Les mécanismes de l'apprentissage : le couplage entre les réactions circulaires et leurs circuits sous-jacents

1. Le premier principe d'apprentissage qui a été appliqué à la population des circuits est tout à fait classique : il dépend de la qualité du maintien des invariants visés par chacune des réactions circulaires et joue sur le " poids " ou la " force d'activation " motrice du circuit concerné. En fonction de la satisfaction de l'anticipation définie par le circuit leader de la réaction circulaire ²², les sensations et actions subséquentes du circuit précédemment actif verront le poids de leurs connexions augmenté ou abaissé de sorte que, lorsque la même sensation se présente à nouveau, elle a plus (ou moins) de chances de susciter l'action qui s'était précédemment révélée bénéfique (ou néfaste).
2. Le deuxième principe d'apprentissage est de nature davantage " sociale ", ou " mimétique " pourrait-on dire, au sens où, l'action pour laquelle un circuit vote —c'est-à-dire, donne une impulsion fonction de son poids— va se voir influencée ou modifiée par modelage sur les actions choisies par les circuits collatéraux, dès lors que ces circuits auront pu contribuer efficacement au maintien de l'invariant de leur boucle sensorimotrice. Cette dynamique " mimétique " s'effectuera à deux niveaux , d'une part au niveau intra-boucle dans lequel interagissent les circuits d'une même boucle, ainsi qu'au niveau inter-boucle, ce qui permettra la diffusion des compétences depuis les circuits de la réaction circulaire tutrice (ir12) vers ceux des boucles sensorimotrices collatérales. En somme :
 - a) A l'intérieur d'une boucle sensorimotrice donnée, le circuit ayant contribué à une action efficace dans le maintien de l'invariant anticipé et qui gagne en puissance ou poids de vote d'action propagera sa prise de poids à ses voisins avec une incidence inversement proportionnelle à la distance de voisinage. Pour minimiser le temps d'exécution de cette étape, la propagation sera limitée aux deux circuits voisins ²³ de

²² Ainsi que de la moyenne des satisfactions correspondant à chacune des boucles sensorimotrices du robot. On trouve donc là une dimension collective dans la dynamique d'apprentissage.

²³ Les circuits voisins bénéficient de l'incrément de poids s'ils appartiennent à la même catégorie de vote

- part et d'autre avec un impact réduit à $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{4}$ de l'incrément originel.
- b) Pour ce qui est des interactions entre boucles sensorimotrices, les circuits votants de chacune d'elles se modèleront sur l'action du circuit qui, par son poids, aura le plus contribué à l'action bénéfique dont la variable *satisfaction_globale* rend compte — bien sûr, au début, ce sont les circuits de la boucle sensorimotrice *ir12* qui serviront systématiquement de modèle en raison de la nette supériorité de leur poids inné. Les circuits “imitent” le circuit modèle en conformant sur ce dernier les rapports respectifs des votes relatifs à chaque type d'action possible. La variation sera proportionnelle à la différence de poids des circuits, à l'accroissement de *satisfaction_globale* induit par l'action précédemment exécutée et inversement proportionnelle au poids du circuit apprenant.
3. Après le poids des circuits et les modalités de l'action “votée”, le troisième domaine d'apprentissage concernera l'anticipation que chaque circuit fera du percept consécutif à son action. Cette anticipation sera susceptible d'évoluer relativement à son poids qui détermine la part qu'elle prend dans la construction du percept et relativement à sa valeur nominale qui sera corrigée à chaque occurrence de la valeur effective du percept. La correction sera d'une ampleur inversement proportionnelle au poids de l'anticipation.

Comme indiqué, la structure innée installée dans la boucle sensorimotrice du capteur infra-rouge 12 (*ir12*) servira de tuteur au développement de toutes les autres réactions circulaires. Cela s'effectuera d'abord dans un environnement faiblement perturbé de sorte que les capacités minimales de régulation de la réaction circulaire tuteur permettront le maintien de l'invariant de cette réaction circulaire et mettront les circuits des autres boucles sensorimotrices en situation optimale pour commencer à élaborer leurs propres invariants et mettre en place des capacités de régulation qui seront acquises par “observation” des comportements régulateurs de *ir12*. Ensuite, au fur et à mesure où les compétences de *ir12* diffuseront sur ses collatérales, ce qui augmentera la capacité globale de régulation du robot, on augmentera l'importance des perturbations environnementales —en rendant les murs de moins en moins linéaires—de manière à mobiliser les boucles sensorimotrices les plus exentrées afin que l'expertise initiale de *ir12* se voit distribuée sur toute la population des boucles sensorimotrices. A ce stade, le robot ayant en somme déployé l'invariant premier d'*ir12* sur l'ensemble de son organisation sensorimotrice, il devrait se révéler capable de gérer des perturbations environnementales bien plus importantes qu'à l'origine du processus puisque des processus régulateurs pourront maintenant intervenir avant qu'*ir12* puisse “percevoir” une déviation.

Ce mode de conception des apprentissages peut sembler quelque peu restreint comparé aux approches qui souhaitent voir la machine apprendre “from scratch”, c'est-à-dire, résoudre son problème sans apparemment disposer d'une quelconque esquisse de solution. Or, la présente proposition correspond précisément à l'idée qu'une organisation ne se développe jamais *ex nihilo*. Ça n'est jamais une *tabula rasa* qui se trouve confrontée à une problématique d'adaptation, à une “situation problème”. C'est toujours une **organisation disposant d'un passé adaptatif, c'est-à-dire, d'une histoire faite d'une succession d'adaptation. Il faut y insister, l'histoire du vivant n'est faite que d'une succession d'organismes adaptés qui sont donc allés de réussite (succès reproductif) en réussite (toujours le succès reproductif)**. L'apparition d'une forme nouvellement adaptée s'est toujours opérée par la transformation *graduelle* (cf. Dawkins 1989) d'une forme précédente. L'apprentissage, parce qu'il constitue, en définitive, une évolution de l'organisation de l'individu considéré, peut être pensé selon la même logique : celle d'une succession

définie par le fait

d'adaptation. Pour le dire autrement, on ne résoud un problème qu'en l'assimilant à ses schèmes, c'est-à-dire, à des stratégies qui se sont révélées efficaces. On fait alors évoluer ces dernières, on les combine d'une manière nouvelle, mais on ne les crée pas *de novo*²⁴. C'est une telle évolution que le présent projet étudie.

6. Implantation

Elle a été réalisée sur station Sun, avec Solaris 2.5, en langage JAVA 1.1. Grâce, en particulier, à une interface avec les routines C du robot Nomad réalisée par Antoine Berner.

L'implantation comporte 6 classes :

- 1) **Lancebot**, qui contient le main, et qui crée simplement un objet Controleur en lui passant les paramètres éventuellement reçus avec la commande d'exécution
- 2) **Controleur** définit des objets qui sont, en quelque sorte, le centre de l'organisation sensorimotrice. Un controleur, en effet, crée un objet Motricité et sept BSM (boucle sensorimotrice).
- 3) L'instance de **Motricité** recevra les votes d'action en provenance des circuits actifs de chacune des boucles sensorimotrices, puis exécutera l'action correspondante.
- 4) Chaque **BSM** créée par le controleur se dotera d'un objet de la classe Percept ainsi que de 2 tableaux d'objets circuits, l'un pour les intensités infra-rouge, l'autre pour les dérivées de ces valeurs.
- 5) L'objet **Percept** va simplement chercher dans le vecteur d'état fourni par le robot les valeurs lues sur le capteur correspondant à sa BSM. Sur la base de l'*anticipation* fournie par la BSM, il établit le percept "intensité", calcule sa dérivée et retourne ces deux valeurs à la BSM.
- 6) Chaque objet **Circuit** correspond à une des valeurs perceptives possibles (16 pour les intensités, 32 pour les dérivées). Une fois activé par la BSM, le circuit envoie son vote à l'objet Motricité et fournit à la BSM son anticipation vis-à-vis du percept suivant. Au prochain cycle, ce circuit verra sa puissance ainsi que ses modalités de vote modifiées en fonction de l'impact que l'action exécutée aura eu sur les satisfactions globale et locale. Son anticipation se verra elle aussi ajustée quant à son poids et sa valeur nominale, et ce, en fonction de la seule satisfaction locale. Les valeurs relatives à la "satisfaction" seront transmises par la BSM appelante.

FIGURE 7

Cette organisation sensorimotrice s'est révélée fonctionnelle puisque le robot présente²⁵ des capacités minimales de suivi de mur, au sens où :

24 Contrairement à ce que croyait François Jacob (1978), la pensée humaine ne dispose pas d'une quelconque supériorité vis-à-vis de la nature et de ses processus évolutifs. L'une comme l'autre sont faites du "bricolage" de l'organisation qui s'offre au processus évolutif. Qu'elle soit psychologique plutôt que biologique ne change rien à cette dynamique. La pensée ne peut, davantage que le vivant, s'élever au-dessus d'elle-même. Elle ne peut que tenter de se répéter —c'est-à-dire, assimiler la situation problème à des situations solubles (Polya 1959)—et constater son succès a posteriori

25 Pour le moment, les tests sont opérés seulement en simulation.

- ◆ Lorsque le mur est rectiligne, le robot peut assurer une navigation stable, avec un maintien satisfaisant de la distance par rapport au mur.
- ◆ Lorsque le mur n'est pas linéaire, le robot peut réguler des déviations de faibles importances (angle $< 30^\circ$) et maintenir son invariant perceptif et donc, la distance au mur.

Nous disposons donc là d'une organisation "adaptée" à son environnement —faiblement perturbé— et à partir de laquelle on pourra entamer un parcours évolutif afin de maintenir une adaptation à des environnements de plus en plus perturbés. Cette évolution, ou plus précisément, cet apprentissage porte sur l'acquisition de compétences régulatrices par les différentes boucles sensorimotrices apprenantes, et s'effectue, comme indiqué, par "observation" de la réaction circulaire tuteur. L'expérimentation est actuellement en cours. Elle s'est, en effet, heurtée à quelques problèmes et n'offre donc que des indications partielles.

Il a fallu, en premier lieu, contourner une difficulté liée au fait que les circuits apprenants gagnaient en puissance de vote sans avoir acquis suffisamment de capacités régulatrices, de sorte que l'inertie de l'ensemble s'en trouvait augmentée. Car la boucle sensorimotrice tutrice, dont la puissance de vote est fondamentalement stable, se voyait alors de moins en moins capable d'assurer les régulations nécessaires, ceci nuisant, bien sûr, à l'apprentissage.

Il semble que cet état de fait soit la conséquence de la dépendance de l'apprentissage des circuits vis-à-vis de la *satisfaction locale* de leur boucle sensorimotrice et de la *satisfaction globale* de l'ensemble des boucles. Plutôt que les circuits apprenant gagnent en puissance de vote en fonction directe des satisfactions locale et globale, l'alternative à présent explorée consiste à augmenter la puissance de vote en fonction des *différentiels* de satisfaction locale et globale suscités par l'action précédente.

Par ailleurs, il est probable que cette trop lente diffusion des compétences de la réaction circulaire ir12 était aussi la conséquence de la modalité d'interaction entre boucles sensorimotrices qui avaient été précédemment retenue.

Celle-ci, en effet, consistait à modeler les circuits respectifs des boucles sensorimotrices sur la base de l'action globale qui résultait de la somme des votes de chacune d'elles. Cette option semblait devoir s'imposer puisque c'est cette action globale qui, en définitive, était exécutée et qui donc déterminait les feedbacks sensoriels reçus subséquentement. Cette action globale apparaissait donc plus représentative, plus informative sur la dynamique de couplage avec l'environnement. Cependant, il est probable qu'un tel choix contribuait à affaiblir le modèle d'action fourni par la boucle sensorimotrice ir12 puisque ce dernier se trouvait moyenné avec les votes d'actions des autres boucles sensorimotrices novices.

C'est pourquoi, comme indiqué plus haut (dans la section 2b des principes d'apprentissage), le couplage des boucles sensorimotrices apprenantes s'opère à présent avec un modèle qu'elle "choisissent" sur la base de sa puissance de vote. Ce qui veut dire, en l'occurrence, que ce sera ir12 qui, au moins initialement, servira de modèle.

Dans cette perspective d'un "modèle" choisi, il sera aussi testée la possibilité de faire dépendre ce choix de la proximité. Dès lors, des boucles sensorimotrices qui n'auraient pas la puissance de vote maximale pourraient devenir modèles pour leur voisines. D'un point de vue topologique, c'est cette option qui paraît la plus prometteuse étant donné que, dans l'hypothèse où les valeurs de régulations varient de manière continue, deux boucles sensorimotrices adjacentes auront probablement une dynamique très proche (cf. Sabine Ploux 1997).

Outre cela, il reste à mettre au point (1) des outils de visualisation plus performants, ainsi que (2) une méthode d'évaluation quantitative de la performance globale de suivi de mur sur

un parcours donné. Et ce, afin de permettre une comparaison plus fine des performances des différentes options via des courbes d'apprentissages étalonnées.

7. Discussion

Au delà de ces résultats encore très partiels, il semble important de souligner que l'intérêt premier de ce dispositif, c'est qu'il permet de mettre à l'épreuve la cohérence et la capacité opératoire de la théorie piagétienne. S'inscrivant dans une perspective où la robotique constitue le terme ultime d'une psychologie théorique, ce travail vise, en somme, à monter la capacité du schématisme piagétien à rendre compte de ce qu'il prétend modéliser.

D'un point de vue très spécifiquement robotique, l'intérêt premier d'une telle tentative vient de ce qu'en confirmant la portée organisatrice du schématisme piagétien, c'est-à-dire, la valeur des concepts et outils intellectuels qu'il offre pour "comprendre" l'évolution des organisations, on se dote d'une grille d'analyse susceptible d'éclairer les processus en jeu lorsque, par exemple, l'organisation d'un réseau de neurones évolue par apprentissage ou par sélection (algorithmes génétiques). A cet égard, les besoins sont d'une urgente actualité (cf. Husbands et al. 1995). On ne sait pas encore mettre en correspondance les comportements manifestés par l'agent artificiel et la dynamique sensorimotrice qui s'établit dans son réseau de neurones. L'approche en terme de réaction circulaire permettrait de savoir où rechercher l'organisation sensorimotrice dans la confuse dynamique de son activité neurale.

La visée du présent travail est donc d'abord théorique au sens où la théorie est ce qui permet de "voir" des "faits".

Outre cette visée conceptuelle qui permettrait, à moyen terme, une migration vers une architecture à base de réseaux de neurones, la présente organisation sensorimotrice permettra à plus court terme, d'étudier les processus de construction —de représentation— de l'environnement par une entité sensorimotrice (cf. Piaget 1937, Scheir & Pfeifer 1995, Salvador 1997a). En effet, l'organisation sensorimotrice, les réactions circulaires ou les schèmes avec lesquels le robot interagit avec le mur pourront se voir associés d'autres modes perceptifs (p. ex. les sonars), ce qui permettra d'établir une perception intermodale du mur. Et dès lors que des invariants intermodaux (intensité et temporalité des signaux) seraient construits, le mur se verrait "perçu" d'une manière plus stable. Il aurait donc acquis une meilleur "objectivité" autorisant des comportements eux aussi plus stables, c'est-à-dire restant adaptés en dépit de perturbations telles que, par exemple, la présence d'ouvertures plus ou moins marquées du mur ²⁶. Là encore, l'appréciation fine des processus en jeu qu'autoriserait une telle implantation viendrait directement alimenter la visée conceptualisatrice vis-à-vis des réseaux de neurones que l'on placerait dans le même ensemble de boucles sensorimotrices.

8. Bibliographie

- Aitken A.M. 1994 an architecture for learning to behave. In Cliff D., Husbands P., Meyer J.A., Wilson S.W (eds.) *Proceedings of the third international conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Pp 315-324. MIT Press.
- Allison J (1989) The nature of reinforcement. In Klein SB & Mowrer RR (eds.) *Contemporary learning theory* (pp. 13-39), LEA.
- Baerends G (1976) The functional organisation of behaviour. *Animal Behaviour*, 24:726-735.
- Baldwin JM 1895/1906 *Mental development*. McMillan. New York.
- Baldwin JM 1902 *Development and evolution*. McMillan. New York.

²⁶ Ce qui pourrait donner un mur "en pointillé", impossible à suivre pour des infra-rouges à faible portée, mais dont les sonars, à plus longue portée, pourraient "apprécier" la continuité.

- Bergé P, Pomeau Y & Vidal Ch (dir.) (1988) *L'ordre dans le chaos*. Hermann. Paris.
- Billard A. & Hayes G. 1997. Learning to communicate through imitation in autonomous robots. In Gertsner W., Germond A., Hasler M., Nicoud J.D (eds.). *Proceedings of ICANN'97* (Lausanne, Octobre 1997). Springer Verlag.
- Braitenberg V (1984) *Vehicles : Experiments in Synthetic Psychology*. MIT Press
- Brooks RA 1991 Challenge for complete creature architecture. In Meyer JA & Wilson SW (eds.) *From animals to animats* (pp. 434-443), Cambridge, MIT Press.
- Brooks RA (1989) A robot that walks : emergent behavior from a carefully evolved network. *Neural Computation* 1, 253-262
- Brooks RA (1994) Coherent behavior from many adaptive processes. in D. Cliff et al. (eds) *Proceedings of the third international conference on simulation of adaptive behavior*. MIT Press
- Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA- 2:14-23
- Buck, J. and Buck, E. (1978). Les lucioles à luminescence synchrone. In *Les sociétés animales*, 10-19. Paris : Pour La Science. (originally published in Scientific American 1978)
- Cattaert D (1997) Intégration sensori-motrice dans les réseaux moteurs. In *Le mouvement, des boucles sensorimotrices aux représentations cognitives*, Actes de la 6^e Ecole d'été de l'Association pour la Recherche Cognitive, Bonas, Gers, France, 6-13 Juillet.
- Clayton DA (1978) Socially facilitated behavior. *The Quarterly Review of Biology*, 53, 373-392
- Changeux JP (1992) Communication personnelle. Aix-en-Provence. Juillet.
- Coiffet P (1993) *Robot habilis, Robot sapiens : histoire, développements et futurs de la robotique*. Hermès
- Dawkins R. (1976) *The selfish gene*. Oxford University Press.
- Drescher GL (1991) *Made-up minds*. MIT Press.
- Eigen M & Schuster P 1979 *The hypercycle*. Springer-Verlag. Berlin.
- Grassé PP (1959) La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez "Bellicositermes Natalensis" et "Cubitermes sp." La théorie de la stigmergie. *Insectes Sociaux*, 6, 41-99
- Grossberg S (1988) Nonlinear neural networks : principles, mechanisms and architectures. *Neural Networks*, 1, 17-61
- Guerin B (1993) *Social facilitation*. Maison des Sciences de l'Homme. Cambridge.
- Hendriks-Jansen H. 1996 *Catching ourselves in the act*. MIT Press.
- Hobhouse LT (1901) *Mind in evolution*. McMillan. London.
- Hofstadter D (1985) *Gödel, Esher et Bach*. Interéditions. Paris.
- Husbands P, Harvey I & Cliff D (1995) Circle in round: state space attractors for evolved sighted robots. *Robotics and Autonomous Systems* 15 (1-2) 83-106.
- Ijspeert, Hallam J, Willshaw D (1988) From lampreys to salamanders : evolving neural controleurs for swimming and walking. In Pfeifer R, Blumberg B, Meyer JA & Wilson SW (eds.) *From Animals to Animats 5*. MIT Press.
- Jacob F (1978) *La logique du vivant*. Gallimard. Paris
- Klopf AH, Morgan JS & Weaver SE (1993) Modeling nervous system function with a hierarchical network of control systems that learn. In Meyer JA, Roitblat HL & Wilson S (eds.) "From Animals to Animats 2" *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*. MIT Press
- Le Dantec F (1913) *La mécanique de la vie*. Flammarion. Paris.
- Lorenz K (1981) *Foundations of ethology*. Springer Verlag.
- Maturana HR & Varela FJ (1987/1992) *The tree of knowledge. The biological roots of human understanding*. New Science Library. New York.
- Mingers J (1998) Applications of autopoïesis in the social sciences. Ve Ecole Européenne de Systémique. Neuchâtel, 7-11 septembre.
- Müller JP (1997) La relation de représentation comme attribution. Communication au *Colloque Interdisciplinaire de l'Association Ferdinand Gonseth "Les modèles de représentation : quelles alternatives ?"*. Neuchâtel, Suisse, 3-5 septembre.
- Piaget J (1937) *La construction du réel chez l'enfant*. Delachaux & Niestlé. Neuchâtel.
- Piaget, J. 1936. *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchâtel, Switzerland : Delachaux &

- Niestlé.
- Ploux S (1997) Une étude pour un modèle morphogénétique de la structuration cognitive : la construction des fonctions de saisie et d'imitation. In *Le mouvement, des boucles sensorimotrices aux représentations cognitives*, Actes de la 6^e Ecole d'été de l'Association pour la Recherche Cognitive, Bonas, Gers, France, 6-13 Juillet.
- Premack D (1965) Reinforcement theory. *Nebraska Symposium on Motivation*, 13 , 123-180.
- Preyer W (1881/1887) *L'âme de l'enfant*. Alcan. Paris.
- Rosen R (1991) *Life Itself : A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin, and Fabrication of Life*. Columbia Un.Pr.
- Rutkowska JC 1997 What's value worth ? constraining unsupervised behaviour acquisition. In Husbands P and Harvey I (eds.) *Fourth European Conference on Artificial Life*. MIT Press.
- Sagi A & Hoffman ML (1976) Empathic distress in the newborn.. *Developmental Psychology*, 12, 175-176
- Salvador LL (1992) Evolution et Herméneutique: vers une approche écosystémique de la cognition. *Revue Internationale de Systémique* 6 (3), 185-203
- Salvador LL (1993) Pour un relativisme interactionniste conséquent: de Piaget à Darwin et retour. *Intellectica* 16, 101-131
- Salvador LL (1995). Swarm intelligence, collective action and imitation. In *Proceedings of the First European Conference on Cognitive Science*, 267-275. Paris : ARC & INRIA.
- Salvador LL (1996) *Imitation et Attribution de causalité : la genèse mimétique du soi, la genèse mimétique du réel. Applications à la psychose naissante et à l'autisme*. Thèse de doctorat de psychologie de l'Université Paris V.
- Salvador LL (1997) Assimilation, imitation and the elementary social fact. Toward a definition of social interactions. *Working notes of Socially Intelligent Agents Workshop, 1997 AAI Fall Symposium Serie*, pp 115-117. AAI Press
- Salvador LL (1997) La construction de la réalité par accrochage de phase entre cycles sensorimoteurs. In *Actes du Colloque Interdisciplinaire " Les modèles de représentations : quelles alternatives ? "*. Neuchâtel, Suisse, 3-5 septembre 1997. Association Ferdinand Gonseth et Institut de la Méthode.
- Salvador LL (1998) The universal and mechanical nature of imitation. *Workshop "Acquiring Competence Through Imitation"*, *Autonomous Agents' 98*, Minneapolis, MN, 9-13 May
- Salvador LL (1998) La construction mimétique de la réalité. Communication au colloque international "*Education, Mimesis, Violence and Reduction of Violence*". Saint-Denis, 27-30 mai.
- Scheir C., Pfeifer R. 1995 Classification as sensorimotor co-ordination: A case study on autonomous agents. In: F. Moran, A Moreno, P. Chacon & J.J. Merelo (eds.) *Proceedings of the Third European Conference on Artificial Life*. Springer Verlag. NY.
- Simner, M. L. 1971. Newborn's response to the cry of another infant. *Developmental Psychology* 5:136-150.
- Stein PSG ed. (1997) *Neurons, Networks, and Motor Behavior*. MIT Press
- Strogatz S.H., Stewart I. 1993 Coupled oscillators and biological synchronization. *Scientific American*, December 1993, pp.102-109
- Sutton RS (1991) Reinforcement learning architectures for animats. In JA Meyer & SW Wilson (eds.) *Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior*. MIT Press
- Thorndike EL (1901) The mental life of the monkeys. *Psychological Review*, 3, 1-57
- Tinbergen N (1953/1980) *L'étude de l'instinct*. Payot. Paris.
- Uexküll J von (1934/1965) *Mondes animaux et monde humain*. Denoël. Paris.
- Uexküll, J. von 1926 *Theoretical biology*. London : Kegan, Paul, Trench, Tubner.
- Vaccarino FJ, Schiff BB & Glickman SE (1989) Biological view of reinforcement. In Klein SB & Mowrer RR (.) *Contemporary learning theory* (pp. 111-142), LEA.
- Varela FJ (1979) *Principles of biological autonomy*. North Holland.
- Varela FJ (1989) *Autonomie et connaissance*. Seuil. Paris.
- Watkins CJCH (1989) Learning with delayed rewards. *PhD. dissertation*, Psychology Department, University of Cambridge, England
- Williams KS & Smith KG (1991) Dynamics of periodical cicada chorus centers (homoptera : cicadidae : magicicada). *Journal of Insect Behavior*, 4, 275-291
- Zajonc RB (1966) *Social psychology: an experimental approach*. Wadsworth. Belmont.

