

4.1 Jean Piaget et les sciences cognitives

Jean-Jacques Ducret

L'œuvre de Piaget est pour une très large part consacrée à l'examen du développement cognitif de l'enfant et de l'adolescent dans le but ultime de résoudre des problèmes d'épistémologie. D'autres chapitres du présent ouvrage ont montré également la continuité admise par l'auteur entre l'évolution biologique et ce développement cognitif, lui-même prolongé par l'essor de la pensée scientifique¹. Dans une large mesure, la psychologie et l'épistémologie génétiques peuvent donc être considérées comme constitutives d'une véritable science cognitive, avec ses deux volets reliés que sont l'étude de la cognition (c'est-à-dire de l'activité de connaissance et des fonctions intellectuelles) et l'étude des connaissances, double volet d'étude que la continuité reconnue permet de prolonger sur le plan biologique. Du point de vue des objets étudiés, il peut en conséquence paraître tout à fait paradoxal que l'on s'interroge ici sur les rapports entre l'œuvre de Jean Piaget et les sciences cognitives : cette œuvre est en grande partie une science cognitive. Ce paradoxe disparaît dès que l'on a en vue ce qu'il est aujourd'hui convenu d'appeler « science(s) cognitive(s) ». Avant de se pencher sur ces rapports, il convient donc de rappeler en quel sens on parle aujourd'hui de ces dernières, et pourquoi on en parle tant.

LES SCIENCES COGNITIVES. ORIGINES, OBJETS, METHODES ET THESES

Partons de leur origine « officielle » telle qu'elle se manifeste par le choix de leur appellation, par l'apparition de centres de recherche qui se donnent explicitement pour but leur développement, et enfin par l'apparition de publications, notamment d'un journal scientifique (*Cognitive science*), dont la vocation est de diffuser les résultats et les thèses relevant de ces sciences. Cette origine peut être datée avec précision. Elle découle de la décision prise en 1975 par la Fondation Sloan (USA) de soutenir avec des moyens financiers très importants des projets de recherches interdisciplinaires regroupant des

¹ Signalons en passant que la thèse de la continuité entre la phylogénèse, la psychogénèse et la sociogénèse prend une forme en partie nouvelle, plus dialectique, lorsque, avec Cellérier, on prend au sérieux les interactions qui se produisent entre ces trois dimensions de l'évolution, chacune agissant sur des échelles de temps différentes (voir à ce sujet le texte de G. Cellérier « Constructivisme génétique et éducation » publié en 2001 dans *Constructivismes : usages et perspectives en éducation*, actes d'un colloque tenu à Genève en septembre 2000, Service de la recherche en éducation, 12, quai du Rhône, CH-1205 Genève).

chercheurs appartenant à des disciplines telles que la psychologie, la linguistique, la neurobiologie, la science informatique, l'intelligence artificielle, l'anthropologie et la philosophie. Les chercheurs qui vont être engagés dans ce très vaste et ambitieux programme de recherche partagent alors tous une vision néo-mentaliste de l'esprit, de l'intelligence et des fonctions cognitives essentiellement basée sur les notions de calcul symbolique et de représentation. Cette vision découle elle-même largement de l'essor très rapide pris dans les années soixante par l'ordinateur et par les sciences qui lui sont directement attachées (étude de leur architecture, des langages de programmation, des algorithmes, etc.). Nous verrons tout de suite comment cet essor a amené une profonde modification du « paysage scientifique » dans les sciences concernées de près ou de loin par l'étude de la « cognition ». Mais avant, il faut insister sur l'impact institutionnel de la décision prise par la Fondation Sloan. Dès la fin des années soixante-dix, mais surtout dans les années quatre-vingts et quatre-vingt-dix, vont apparaître dans bon nombre d'universités américaines, puis européennes, japonaises et autres, des centres d'étude en science cognitive dont certains étaient interfacultaires alors que d'autres pouvaient incorporer leurs propres sections de recherche et enseignement en psychologie, linguistique, informatique (intelligence artificielle)... jusqu'à devenir ainsi des facultés à part entière. Quelles que soient les disputes philosophiques parfois virulentes qui pouvaient naître de la vision résultant du développement de l'ordinateur et des sciences qui s'y rattachent, il n'y a pas de doute que l'apparition explosive de ces centres est la conséquence directe de la diffusion très rapide d'un véritable paradigme scientifique. Mais il est tout aussi clair que ce paradigme n'est pas né de la décision de la Fondation Sloan, et que celle-ci n'a fait que prendre acte de l'existence préalable d'un effort interdisciplinaire et permettre la mutation du regroupement interdisciplinaire en un nouveau champ scientifique transdisciplinaire, dont la vigueur et la portée ont pu faire croire, au moins momentanément, à la possible disparition de certaines disciplines dont il était issu. Pour cerner d'un peu plus près ce qu'il convient d'entendre par science cognitive, remontons donc d'une étape l'histoire de sa naissance.

Cette étape d'où est née ce qui deviendra la ou les sciences cognitives peut être elle aussi repérée avec la plus grande précision. Dès les années cinquante, à la suite de la création de l'intelligence artificielle (qui est déjà à elle toute seule une science transdisciplinaire), mais aussi des profondes transformations internes que connaissaient la psychologie et la linguistique nord-américaines, des chercheurs des différentes disciplines concernées par l'étude de l'une ou l'autre des facettes de la « cognition » humaine ont importé à l'intérieur de leur discipline respective des instruments de recherche et de modélisation empruntés aux sciences voisines. Le plus bel exemple de cette démarche profondément transdisciplinaire est fourni par les recherches de Alan Newell et Herbert Simon, qui

participent à la fois de la création d'une nouvelle psychologie basée sur la méthode de simulation informatique et du développement de l'intelligence artificielle, qu'ils ont contribué à créer, avec quelques autres collègues, dont Marvin Minsky, au milieu des années cinquante (on relèvera en passant que, comme Piaget, ni Newell ni Simon ne sont psychologues de formation; le premier est ingénieur en informatique, le second vient des sciences politiques). Il suffit d'ailleurs de prendre connaissance des actes du symposium annuel sur les problèmes de cognition (*Symposium on Cognition*), organisé de 1965 à 1972 à l'Institut de technologie de Carnegie puis à l'Université de Carnegie-Mellon (Pittsburgh, USA), et auxquels ils ont régulièrement participé, pour y découvrir une bonne partie du champ des futures sciences cognitives (seules étaient alors absentes l'étude et la modélisation mathématique du fonctionnement cérébral). Une partie importante des contributions, qui ont par exemple porté la première année sur le « problem solving », et la seconde année sur l'apprentissage des concepts et la mémoire, se rattache à cette psychologie cognitive qui, à travers des travaux tels que ceux de Jérôme Bruner et de Georges Miller (tous deux membres du centre d'études cognitives de l'Université de Harvard créés par eux en 1960), et aux côtés de la linguistique chomskyenne, a porté un coup mortel au paradigme behavioriste qui, pendant plus de trois décennies, avait marqué le développement de la psychologie nord-américaine. Mais l'ensemble des contributions du symposium annuel sur la cognition était encadré par des textes qui adoptaient et illustraient la fécondité de l'« information processing paradigm » dont Newell et Simon étaient les leaders. Pour ceux-ci, l'ensemble des phénomènes qui se rattachent d'une manière ou d'une autre à la cognition (la perception, l'apprentissage, le langage, etc.) se laisse réduire à des opérations de « traitement de l'information » similaires à celles que l'on peut implémenter dans un ordinateur digital, la meilleure théorie ou du moins modélisation que l'on puisse s'en faire se réduisant en conséquence à leur simulation informatique.

Quant à la linguistique chomskyenne qui, aux côtés de l'intelligence artificielle et de l'« information processing paradigm », va être le modèle et le moteur de la future science cognitive, il suffit de rappeler la proximité qu'elle entretient avec l'approche informatique, dans la mesure où Noam Chomsky a trouvé dans la théorie mathématique des fonctions récursives et dans les théories des automates et des langages formels (langages informatiques y compris) la source d'inspiration lui permettant de concevoir le caractère génératif et transformationnel du langage humain.

Avec la mention des travaux de Chomsky et avec celle de l'« information processing paradigm » nous sommes remontés jusqu'au cœur de ce qui, institutionnalisé, deviendra les sciences cognitives. Celles-ci peuvent être caractérisées par cet effort partagé d'étude et d'explication de la cognition dans lequel les notions de calcul et d'information, ou encore de « traitement réglé des représentations », occupent une place considérable, même si le

dogme fondateur érigé par Newell et Simon selon lequel l'intelligence ou l'esprit sont entièrement réductibles à la notion de calcul symbolique (les symboles étant identifiés à des entités physiques discrètes) a, dès la fin des années quatre-vingts, laissé place à une notion plus générale de calcul, cela à la suite du passage au premier plan de la vision neuromimétique et connexionniste de l'intelligence issue des recherches sur la modélisation mathématique des liens d'association ou d'inhibition reliant les neurones les uns aux autres.

Ainsi que les remarques précédentes le révèlent au moins partiellement, ce qu'il est convenu d'entendre par « science(s) cognitive(s) » résulte largement de la rencontre et de l'alliance extraordinairement féconde établie au milieu du 20^{ème} siècle entre d'un côté des interrogations scientifiques et même philosophiques relatives à la vie et à l'intelligence, et de l'autre côté la progression fulgurante des technologies du traitement de l'information et des sciences qui leur sont associées. L'intelligence artificielle a en particulier joué dès sa création dans les années cinquante un rôle central dans la naissance de ces sciences en y apportant les notions de calcul symbolique (matériellement réalisé), de programme, d'heuristique, d'algorithme, etc., mais peut-être aussi et surtout une conception assimilant au moins partiellement le fonctionnement cognitif de l'être humain à celui d'un ordinateur digital et des programmes qui le déterminent. Mais elle n'est pas la seule discipline technologique à avoir profondément inspiré la nouvelle vision « mécaniciste » de l'esprit et de l'intelligence. Avant elle deux autres y ont contribué : la cybernétique et la théorie du signal (ou de l'information).

Pour ce qui est de la théorie du signal, si elle résulte d'abord des efforts des ingénieurs de créer des systèmes efficaces de transmission d'information, elle n'a pas tardé elle non plus à être utilisée comme instrument de modélisation, et même comme source d'interrogations, par les sciences de la vie, mais aussi, entre autres, par la psychologie et la linguistique, ce qui est tout naturel puisque, à l'évidence, une partie plus ou moins considérable des activités psychologiques est affaire de réception, de conservation, de traitement et d'émission de signaux ou d'informations. Quant à la cybernétique, si l'invention des premières machines cybernétiques a précédé le 20^{ème} siècle, dont notamment le régulateur mécanique de Watts, c'est seulement dans les années trente que cette invention prendra tout son sens, lorsque le physicien Wiener explicitera la parenté entre le fonctionnement (ou le dysfonctionnement) d'une fusée dotée d'un dispositif cybernétique et le fonctionnement des systèmes à régulation largement présents dans les organismes vivants, et dont le dysfonctionnement peut être à la source de pathologies mentales ou organiques connues. Avant donc que l'intelligence humaine soit assimilée au fonctionnement mécanique de machines programmées capables de résoudre des problèmes et d'apprendre (et peut-être aussi de s'auto-programmer), c'est de manière beaucoup plus générale la vie qui avait pu être

assimilée à une forme spéciale de mécanisme, faisant usage de boucles de rétroaction lui permettant d'atteindre des buts et donc d'accomplir les fonctions qui la distinguent des réalités inertes.

La cybernétique offre d'ailleurs l'intérêt d'avoir été, avant l'intelligence artificielle puis les sciences cognitives, un champ de rassemblement interdisciplinaire dans lequel collaboraient des physiciens, des psychiatres, des psychologues, des anthropologues, des linguistes, des neurologues, des ingénieurs, des philosophes, etc. (là aussi une fondation a eu un poids déterminant : la Fondation Macy). Cette richesse a très vite permis de cerner les limites des premiers modèles cybernétiques, trop liés à la seule considération des mécanismes de régulation, et au rapport entre les fonctions d'input et d'output d'un système, trop peu sensible à la formidable organisation intérieure des systèmes vivants et à leur pouvoir auto-organisateur. Les travaux historiques réalisés par le CREA à Paris ont permis de bien mettre en évidence les deux étapes majeures franchies par la cybernétique entre les années quarante, où la notion de régulation était seule centrale, et les années cinquante et soixante lors desquelles les notions d'organisation et d'auto-organisation sont passées au premier plan.

Nous disposons maintenant de l'ensemble des éléments nous permettant de prendre connaissance des rapports entre l'œuvre de Piaget et les sciences cognitives. Pour bien comprendre ces rapports, il convient cependant d'élargir la définition trop restrictive qui a été donnée de ces sciences lors de leur naissance « officielle » et qui se base sur la thèse, défendue par Newell et Simon, selon laquelle l'ensemble des systèmes cognitifs sont des systèmes de traitement réglé de symboles, dont le programme d'ordinateur est un parfait modèle. Ni les modélisations cybernétiques qui ont précédé cette conception de l'intelligence et de la cognition, ou qui se sont développées parallèlement aux travaux respectant le paradigme de « l'information processing theory », ni ceux qui, depuis le milieu des années quatre-vingts, ont remis en question celui-ci en revalorisant l'ancien paradigme connexionniste, ne rentrent dans cette définition. Celle que nous allons donc retenir pour l'examen des rapports en question est plus large. Par sciences cognitives, nous entendrons l'ensemble des approches transdisciplinaires qui ont étudié non seulement la cognition au sens strict mais plus généralement le fonctionnement des systèmes capables d'adaptation en prenant appui sur les notions et les modèles mathématiques offerts par les sciences du contrôle, de la communication et du traitement de l'information dans les machines créées par l'homme (ordinateurs, réseaux de neurones artificiels, robots, etc.).

En fonction de cette définition élargie des sciences cognitives – qui soulève certes le problème de l'extension peut-être abusive ainsi donnée à la notion de cognitif, mais qui a l'intérêt de permettre d'éclairer la totalité des rapports de Piaget avec la cybernétique, l'intelligence artificielle, et toute autre discipline liant l'étude des systèmes psychologiques et des systèmes vivants à la création des

machines cybernétiques et des machines « pensantes » – nous pouvons distinguer quatre étapes qui se recouvrent plus ou moins largement et dans chacune desquelles Piaget et ses collaborateurs ont pu trouver des sources de suggestions et apporter en retour un regard enrichissant.

L'étape initiale est celle de la première cybernétique et du travail de Wiener. Mais elle contient aussi d'autres facettes, dont celle qui se rattache aux travaux théoriques de McCulloch sur les neurones et réseaux de neurones et sur leur capacité de réaliser matériellement un calcul logique, c'est-à-dire de « penser ». La seconde est celle de la deuxième cybernétique, avec les notions de systèmes homéostatiques (capables d'atteindre un équilibre) et auto-organiseurs qui la caractérisent (il faut mentionner ici les noms de W. Ross Ashby et de Heinz von Foerster, ce dernier établissant le pont entre la théorie des systèmes de von Bertalanffy et la cybernétique). La troisième est celle de l'intelligence artificielle au sens où l'ont définie Newell et Simon, mais qui est assez directement issue des recherches et réflexions métamathématiques et philosophiques de A. Turing, et à laquelle on peut rattacher la linguistique chomskyenne (même si Chomsky et ses disciples rejettent le projet de l'intelligence artificielle). Quant à la quatrième étape, elle se rattache au retour au premier plan des travaux liés à la deuxième cybernétique et à certains aspects de la première (notamment les travaux de McCulloch), retour dû pour une large part aux difficultés extrêmes rencontrées par l'intelligence artificielle à atteindre les buts qu'elle s'était fixés : la réalisation d'une machine programmée de manière telle qu'elle soit capable de résoudre intelligemment des problèmes et d'acquérir les savoir-faire et connaissances nécessaires à cet effet.

Considérons maintenant comment les travaux et conceptions de Piaget et de ses collaborateurs peuvent être rattachés d'une manière ou d'une autre aux travaux appartenant à ces étapes d'évolution des sciences cognitives.

RAPPORTS DE L'ŒUVRE DE PIAGET ET DE SES COLLABORATEURS AVEC LES SCIENCES COGNITIVES

L'anticipation de la cybernétique dans l'œuvre de Piaget

Disons-le d'emblée : les liens virtuels et réels qui relient l'œuvre piagétienne à la cybernétique sont étroits. Il y a en effet chez Piaget, et cela avant même la naissance de la cybernétique, un usage fondamental des notions de régulation et d'organisation qui explique que, lorsque à la fin des années quarante et au début des années cinquante, il prendra connaissance des travaux des cybernéticiens, il ne sera pas surpris et pourra établir tout naturellement des ponts entre ces travaux et ses propres recherches, sans même qu'il soit question de distinction entre la première et la deuxième cybernétique (le cadre théorique piagétien est alors suffisamment riche pour intégrer sans problème la totalité des idées qui ont pu opposer les cybernéticiens les uns aux autres !). Pour mieux comprendre comment une telle

anticipation était possible, mais aussi comment Piaget tirera profit de la cybernétique lorsqu'il la découvrira, rappelons la place occupée chez lui par ces deux notions de régulation et d'organisation.

La notion d'organisation est apparue très tôt dans l'œuvre piagétienne. En 1918 Piaget publie une sorte d'ouvrage mi-autobiographique mi-spéculatif, *Recherche*, dans lequel il propose une synthèse théorique des conceptions qu'il a élaborées en prenant connaissance des conceptions discutées au début du siècle, tant en philosophie qu'en biologie, en sociologie ou en psychologie. Le noyau central de cette synthèse est constitué d'une intuition théorique qui est à la base de toutes les conceptions ultérieures qu'il se fera des phénomènes biologiques et cognitifs. Les entités ou les phénomènes vivants se distinguent des phénomènes physiques par leur caractère de totalité, par les interactions qui relient chaque totalité vivante aux parties qui la composent, ainsi que les parties entre elles, et enfin par la forme d'équilibre qui assure leur conservation. Deux caractéristiques de cette conception doivent être soulignées : d'abord l'orientation organiciste et même, en un sens, holiste, qu'elle révèle (avec cette idée d'une conservation mutuelle des parties par le tout et du tout par les parties), qui est très proche de l'idée d'auto-organisation que retiendra et modélisera, plusieurs décennies plus tard, la deuxième cybernétique; et ensuite le premier lien établi avec la théorie des équilibres physiques, même si, en 1918, le jeune Piaget insiste sur l'irréductibilité des équilibres organiques aux équilibres physiques. Ce lien est essentiel à notre propos, puisque, prolongé, il permettra ultérieurement à l'auteur de prendre appui sur les modèles de la thermodynamique pour suggérer une explication de l'équilibre atteint par les structures cognitives au cours du développement intellectuel de l'enfant et de l'adolescent. La pensée opératoire est équilibrée dans la mesure où, pour chacune des opérations que le sujet peut effectuer sur les objets considérés par lui, il existe une opération inverse ou réciproque, la somme des opérations réelles et virtuelles engagées à tout moment restant toujours nulle (dans le cadre d'une pensée pleinement opératoire).

La conception de l'intelligence que se forge Piaget dans les années vingt et trente s'inscrit ainsi naturellement dans le droit fil de l'intuition théorique, au moins partiellement organiciste, élaborée dans les années dix. Mais une autre dimension vient dès la fin années trente s'ajouter aux deux mentionnées ci-dessus : l'utilisation de la théorie mathématique des groupes pour modéliser les structures de la pensée découvertes à la même époque (voir au sujet de cette découverte la section 3.2 de ce dossier). Là aussi Piaget va être conduit à développer des thèses qui pourront ultérieurement trouver un écho dans les conceptions cybernétiques créées dans les années quarante. La comparaison entre les structures caractéristiques de différents niveaux du développement de l'intelligence, comme celle entre les structures de la perception et de l'intelligence permettait en particulier de formuler deux thèses qui intéressent l'examen des rapports de Piaget avec la cybernétique. La première des deux porte

sur les propriétés de fermeture et de composabilité des structures de l'intelligence. Seules les opérations de la pensée se composent entre elles de manière à refléter parfaitement les propriétés mathématiques (associativité, existence d'inverses, etc.) des groupes mathématiques. La deuxième thèse nous place en présence de la seconde grande notion qui explique pourquoi l'œuvre piagétienne des années trente et quarante était comme préadaptée à la naissance de la cybernétique : à savoir la notion de régulation. En comparant la pensée opératoire aux conduites qui la précèdent dans la genèse de l'intelligence, et en comparant également les activités opératoires de cette pensée aux formes les plus avancées d'activités perceptives, Piaget fut amené à découvrir dans les deux cas la présence de régulations permettant à la pensée préopératoire mais aussi aux activités perceptives d'établir des relations compensatrices par rapport aux erreurs ou aux déformations induites par toute centration intellectuelle ou perceptive sur un objet.

De cette double étude comparative, l'une interne au développement de l'intelligence, l'autre mettant en rapport la perception et l'intelligence, est née chez Piaget la conviction que seules les structures de l'intelligence opératoire peuvent être convenablement modélisées par des structures mathématiques apparentées à celle de groupe. Pour les conduites compensatrices qui apparaissent, tant sur le plan de l'intelligence préopératoire que sur le plan de la perception, des modèles différents doivent être utilisés, à savoir des modèles qui accordent une place au calcul des probabilités. Mais bien sûr un lien peut être établi aussi bien entre les modèles utilisés qu'entre les phénomènes modélisés. Les opérations inverses qui annulent virtuellement une opération directe et qui font que la pensée opératoire est une pensée (en principe) parfaitement équilibrée (pour le traitement des objets auxquels elle s'applique et qu'elle structure) peuvent être considérées comme l'aboutissement des régulations qui, précédemment, permettaient à l'intelligence de compenser plus ou moins ses centrations successives.

Ce qui précède, qui résume à grands traits certaines des thèses les plus importantes que Piaget a élaborées dans les années trente en prolongeant et en enrichissant son intuition de jeunesse, laisse pressentir les raisons qui font que, lorsqu'il découvrira la cybernétique au début des années cinquante, il pourra sans autres intégrer les idées directrices de celle-ci à ses conceptions de l'intelligence et plus généralement des fonctions et des systèmes cognitifs. Nous aurions pu souligner plusieurs autres points par lesquels l'œuvre piagétienne a anticipé la naissance de la cybernétique, par exemple les conceptions établies autour de la notion d'adaptation, avec les notions de schème, d'assimilation et d'accommodation qui s'y rattachent. Mais avant d'examiner la découverte de la cybernétique par Piaget et ce que cette découverte révèle des apports mutuels de la cybernétique à l'œuvre piagétienne, nous évoquerons encore un seul facteur qui va permettre de comprendre la façon dont il s'est positionné face à cette discipline.

Dans les années quarante, parmi les multiples travaux intellectuels accomplis par Piaget (dont naturellement la poursuite des enquêtes psychogénétiques), il faut citer ceux portant sur la modélisation logique des structures opératoires. L'auteur en tire une série d'articles et d'ouvrages, dont le plus connu est le *Traité de logique*, qui sont tous d'un très grand degré d'abstraction (du moins pour qui n'est pas familier des sciences mathématiques et physiques). Ce caractère apparemment très abstrait de l'œuvre, s'il satisfait fort son auteur puisqu'il lui permet de voir dans la psychologie une science qui tend vers le mode d'intelligibilité atteint dans les sciences physiques, lui vaut en retour le soupçon de céder au logicisme : l'intelligence et la pensée seraient indûment assimilées à la logique. C'est en s'efforçant de répondre à cette critique que Piaget va être amené à découvrir la cybernétique et à la mettre en rapport avec sa propre démarche.

La découverte de la cybernétique

En 1951 Piaget publie un article sur « L'utilité de la logistique en psychologie » (par logistique, il faut entendre le travail de formalisation des logiciens et des mathématiciens face aux différentes variétés de structures formelles découvertes en logique et en mathématique, travail devenu complètement autonome par rapport à l'étude de la pensée, contrairement à ce qu'il a pu être chez les logiciens du passé). Cet article est manifestement rédigé pour répondre à la critique de logicisme que des philosophes et des psychologues adressent aux travaux piagétiens (dont on vient de voir qu'ils font appel à certaines structures de la logique et de la mathématique pour modéliser les structures de l'intelligence). Piaget laisse entendre dans son article que le « logicisme » qui lui est reproché irait de pair, selon ses opposants, avec le danger de rapprocher la psychologie de la philosophie, au lieu de la rapprocher de la physiologie, ce qui devrait être le souhait de tout psychologue scientifique. C'est là un reproche inacceptable dans la mesure où il est contraire à la conception longuement mûrie et approfondie que Piaget se fait du cercle des sciences (logico-mathématiques, physiques, biologiques et psychosociologiques). Mais au lieu de rappeler une nouvelle fois cette conception, et après avoir souligné que l'usage des modèles mathématiques se justifie autant pour la psychologie que pour la physique (et celle-ci ne s'en prive pas), l'auteur évoque une nouvelle fois une éventualité déjà avancée dans un autre article publié deux ans auparavant sur « Le problème neurologique de l'intériorisation des actions en opérations réversibles » : il se pourrait bien que la recherche neurophysiologique en vienne elle aussi à utiliser les mêmes structures logiques et mathématiques que le psychologue généticien utilise pour modéliser les structures de la pensée opératoire. Il est en effet « entièrement légitime de se demander [...] quelle est la structure qualitative d'un ensemble de circuits nerveux » : « S'agit-il d'un réseau ? Et alors de quelle forme mathématique particulière ? Ou intervient-il des structures de groupes (dont les opérateurs directs

et inverses correspondraient par exemple aux facilitations ou passages et aux inhibitions)?» (1951, p. 33). Pour qui a connaissance de la cybernétique des années quarante, il est impossible de ne pas voir immédiatement la proximité de ces interrogations et des suggestions qui leur sont liées avec les tentatives de modélisation logique du système nerveux proposées par McCulloch, cette modélisation étant liée à la thèse selon laquelle les réseaux de neurones ont la capacité d'être un calculateur logique, une machine propositionnelle. La proximité entre ce qui est suggéré en 1951 et les travaux de McCulloch apparaît d'ailleurs d'autant plus grande lorsqu'on prend connaissance des suggestions encore plus poussées faites par Piaget dans un article de 1949 dans lequel il imaginait le fonctionnement d'un opérateur neuronal positif « consistant à ouvrir le circuit A' et transformant ainsi A en B », c'est-à-dire effectuant l'opération $A + A' = B$, et un opérateur négatif, « que nous appellerons blocage » et « consistant à exclure A' du circuit B ». Pour peu qu'on envisage plusieurs blocages ou passages, on aura alors affaire à des « opérations multiplicatives (par correspondance un à un ou un à plusieurs), etc. » (1949b), p. 250). Certes Piaget ne fait ici qu'esquisser une démarche poursuivie beaucoup plus systématiquement et de manière mieux fondée par McCulloch. Mais l'important ici est de relever que se produit chez lui, à la fin des années quarante, une démarche pratiquement identique à celle de l'un des deux ou trois grands créateurs de la cybernétique.

Pourtant, en 1949 et probablement en 1951, Piaget n'a vraisemblablement pas encore pris connaissance de l'existence de cette nouvelle discipline (l'eût-il fait qu'il l'aurait certainement mentionnée dans ses articles, tant elle apportait de l'eau à son moulin). Sa première référence à la cybernétique n'apparaît, sauf erreur, que dans les actes, publiés en 1952, d'un congrès international de psychologie qui s'est déroulé à Stockholm en juillet 1951 et lors duquel Piaget a présenté une « Contribution à la théorie générale des structures ». À la page 198 de ces actes, on y lit que les groupements et les groupes de la pensée opératoire constituent des formes finales d'équilibres « qui se retrouvent dans certains modèles cybernétiques de l'activité cérébrale, ce qui montre leur généralité ». C'est toutefois dans les actes publiés en 1953 d'un colloque sur « le système nerveux et la psychologie » tenu à Paris en 1952 que l'on verra Piaget traiter systématiquement la question du rapport entre les structures opératoires et la cybernétique (« Structures opérationnelles et cybernétique »). La perspective qu'il adopte est celle qui lui est alors intellectuellement chère, à savoir celle des structures. Ce qu'il s'emploie à faire dans ce texte est en effet de montrer les convergences entre ses recherches sur les structures de l'intelligence et « la manière dont la cybernétique pose le problème des structures » (p. 380). Pour ce qui est des structures de l'intelligence, il rappelle comment il a pu en distinguer trois grands types tout au long de la psychogenèse : les rythmes (par exemple celui du schème

de succion, qui s'active puis s'apaise de manière répétée et stéréotypée), les régulations par lesquelles l'intelligence cherche activement à compenser les erreurs induites par une centration, et enfin les opérations qui, contrairement aux rythmes et aux régulations, sont « entièrement réversibles », chaque opération étant parfaitement annulée par son inverse ou sa réciproque. Et comme cet exposé suit de peu les découvertes piagésiennes sur la pensée formelle ou hypothético-déductive, Piaget en profite pour décrire à la fois la structure de groupe que constitue cette pensée, mais aussi l'exposé sur le raisonnement expérimental de l'adolescent que sa collaboratrice Bärbel Inhelder a donné lors du congrès international de psychologie de 1951, à Stockholm.

Sur le versant de la cybernétique, et pour démontrer la convergence avec ses propres recherches, Piaget commence par mentionner plusieurs travaux dans lesquels les cybernéticiens procèdent à une véritable « mathématisation de la pensée » (p. 384). Il est tout à fait remarquable de constater que, avec cette affirmation, l'auteur vise les travaux sur les « servomécanismes supérieurs [...] capables de résoudre des problèmes » (p. 384). En écrivant ceci, il a également à l'esprit les « machines à calculer électroniques » qui « admettent une arithmétisation possible de leurs liaisons, ce qui entraîne a fortiori une possibilité de logicisation » (id.; il est aussi question dans le même passage de l'arithmétique binaire en jeu et de son isomorphisme avec l'algèbre booléenne). Faisant tour à tour référence aux travaux, entre autres, de Shannon (pour ses contributions à la théorie de l'information, mais aussi pour son application de « l'algèbre de Boole aux aiguillages des circuits électriques de la machine », p. 386), de Wittgenstein (pour le calcul des propositions), de McCulloch (pour la modélisation logique des structures neuronales) et de Turing, Piaget est ici tout à fait en phase avec la percée technologique qui se produit autour des années cinquante avec le passage de ce qui était uniquement considéré comme un calculateur électronique à cette nouvelle machine arithmétique et logique qu'est l'ordinateur. Que Piaget soit aussi bien au courant tient probablement aux informations que lui apporte le jeune logicien et philosophe anglais Wolfe Mays, avec qui il est alors en contact à l'occasion de la recherche de financement pour la création du Centre International d'Épistémologie Génétique, et dont il cite un article de 1950 sur « A relay machine for the demonstration of symbolic logic » (Mays, 1950). Quoi qu'il en soit de ce point, la connaissance qu'il a des travaux de Shannon, McCulloch et Turing l'assure, face à la critique de ses collègues psychologues, qu'il n'est pas sur une mauvaise piste en utilisant, comme le font les cybernéticiens, des modèles logico-mathématiques pour « mathématiser la pensée ».

La convergence entre la psychologie génétique et la cybernétique est aussi visible par le rôle que toutes deux accordent aux « processus d'équilibration » dans l'accès à des formes croissantes d'équilibre. « La solution d'un problème au moyen de

servomécanismes tels que, par exemple, ceux de l'homéostat d'Ashby s'effectue [...] grâce à une succession d'équilibrations et de rééquilibrations progressives, avec auto-correction des « feed-back », qui rappelle [...] la manière dont travaille l'intelligence en évolution, d'abord par régulations larges, puis de plus en plus circonscrites, et ensuite par opérations de mieux en mieux équilibrées en fonction de toutes les transformations possibles du système » (p. 385). Et Piaget ajoute que le feed-back de l'ingénieur est strictement comparable à une régulation, c'est-à-dire « une opération non encore équilibrée », et que comme la régulation, il va se transformer en « liaison réversible [...] au point où l'équilibre est atteint, c'est-à-dire où la solution est obtenue » (p. 386). Cette dernière affirmation offre ceci d'intéressant qu'elle nous montre sur le vif comment son auteur, tout en se laissant enrichir par sa prise de connaissance des modélisations cybernétiques, les intègre à sa propre conception qui, ici, conçoit l'opération comme une forme de régulation parfaite (bien qu'il ne le précise pas, il est certainement évident à ses yeux que ce passage de la régulation aux opérations n'est possible que pour les formes supérieures de servomécanismes).

Avant d'aller plus loin dans notre examen des rapports entre Piaget et les sciences cognitives, il faut encore mentionner trois points à propos de cet exposé de 1952 (publié en 1953). Le premier concerne un passage particulièrement audacieux dans lequel Piaget, rappelant la comparaison attribuée à Wiener entre « la quantité d'information et l'entropie » (p. 386), se demande si la réversibilité croissante « du système » (*pensée, servomécanisme ?*) ne pourrait pas être le fait d'une « sorte de démon de Maxwell, lequel prendrait en l'occurrence la figure d'un démon logique, chargé de la sélection des informations » (id.). Le deuxième point concerne le court compte rendu des discussions issues des travaux de Turing et des découvertes des théorèmes de limitation en métamathématique. En prenant, sans qu'il le sache, le contre-pied de ceux qui, aux USA, sont en train de créer l'intelligence artificielle, et en s'appuyant alors sur le philosophe Polanyi, Piaget croit pouvoir affirmer que « la pensée peut utiliser la machine comme elle utilise un mécanisme opératoire quelconque », ou encore que « la machine ne constitue, comme le système des opérations logiques, qu'un simple instrument, lequel permet de résoudre les problèmes, mais non pas d'en inventer de nouveaux en dehors des frontières de la structure donnée » (p. 387). Quant à la pensée, elle s'appuie sur des « intentions psychologiques préalables qui permettent la formalisation mais ne sont pas elles-mêmes formalisables » (id.). Enfin, le troisième point, lié au précédent, concerne la description que Piaget a faite du développement des structures de l'intelligence. Voilà comment il concluait cette description en considérant ce qui se passe dans le « fonctionnement actuel » de l'intelligence opératoire : « les mêmes structures interviennent dans la solution des problèmes. Un problème peut, en effet, être considéré comme l'expression d'une lacune dans le système, donc d'un déséquilibre partiel. Résoudre le problème

revient alors à combler la lacune au moyen des opérations du groupe ou du réseau, c'est-à-dire à rétablir l'équilibre sur le point où un déséquilibre local ou momentané s'était manifesté » (p. 383). Les deux derniers points permettent de souligner la distance plus grande qui existe entre les thèses fondatrices de l'intelligence artificielle et les conceptions développées par Piaget dans les années quarante, que celle, pratiquement inexistante, entre ces conceptions et les thèses cybernétiques. Un seul chapitre de son œuvre aurait pu fournir à Piaget l'occasion d'assimiler plus pleinement les travaux de l'intelligence artificielle : sa description des conduites de coordinations des moyens et des fins ainsi que des combinaisons mentales de schèmes conquises par le jeune enfant la deuxième année après sa naissance. Mais avant de traiter plus en détail le rapport de cette œuvre et de ses prolongements avec l'intelligence artificielle, il convient d'examiner comment une partie des travaux du Centre International d'Épistémologie Génétique va être, dès la naissance de celui-ci, consacrée à la question du processus d'équilibration et de sa modélisation au moyen de modèles et de concepts empruntés à la cybernétique.

L'usage de la cybernétique au Centre international d'épistémologie génétique

En 1955, deux ans après la publication de l'article résumé ci-dessus, et à la suite d'un certain nombre de démarches entreprises avec la collaboration de Wolfe Mays (voir plus haut), un subside de la Fondation Rockefeller permet à Piaget de créer à Genève un centre international de recherche en épistémologie génétique (CIEG). Ce centre lui donne la possibilité de partager le développement de cette discipline créée par lui avec des logiciens, des philosophes, des psychologues, des mathématiciens, des physiciens, etc., suisses et étrangers qui acceptent de travailler avec lui pendant une période de temps plus ou moins longue et qui acceptent de confronter leurs idées aux siennes. Parmi les perspectives scientifiques ainsi ouvertes, on ne sera pas étonné d'en découvrir une qui concerne très directement les rapports des recherches piagésiennes avec la cybernétique. Si les modèles logiques créés par Piaget, de la fin des années trente jusqu'au début des années cinquante, lui permettent de rendre compte de manière plutôt convaincante des formes d'équilibre atteintes par la pensée opératoire, les explications données jusqu'alors des étapes préopératoires du développement de l'intelligence n'ont pas conduit à une modélisation qui leur soit adaptée. Certes Piaget a bien vu l'importance des régulations par lesquelles l'intelligence cherche à stabiliser ses jugements et à les débarrasser des conflits qui peuvent résulter des centrations successives de la pensée. Mais il n'a pas cherché à les modéliser de la même façon qu'il a pu le faire pour les régulations perceptives (expliquées par un modèle probabiliste). L'une des premières tâches que les membres du CIEG vont se donner sera de chercher à expliquer comment ces régulations interviennent dans le fonctionnement cognitif, jusqu'à finalement se métamorphoser en

opérations et permettre l'équilibre opératoire. Pour ce faire, ils vont utiliser de nouveaux modèles probabilistes dont certains concepts sont empruntés non plus seulement à la thermodynamique, mais aussi à la théorie de l'information (ou du signal), à la théorie des jeux ou encore à la théorie des décisions, qui toutes trois sont plus ou moins étroitement liées à la cybernétique. Les résultats de cette utilisation sont exposés dans le 2^e volume des nombreuses « Études d'épistémologie génétique » intitulé *Logique et équilibre* (publié en 1957). En plus d'un chapitre rédigé par Piaget et dans lequel celui-ci exploite la théorie des jeux, ce volume contient un texte de B. Mandelbrot (qui, entre autres choses, affine le modèle thermodynamique de l'équilibration utilisé par Piaget) et un texte de Léo Apostel sur la modélisation au moyen de la théorie des graphes, dans lequel il est fait référence à la théorie des jeux, mais aussi à la théorie des systèmes irréversibles développée par Prigogine. Dès 1957 ou 1958, ce mouvement d'intégration d'une démarche de modélisation cybernétique venant compléter la modélisation logique chère à Piaget sera considérablement renforcé par l'arrivée au CIEG du mathématicien Seymour Papert, qui va rapidement faire profiter ses collègues de ses connaissances et de sa passion pour la cybernétique. Le résultat de cet apport apparaît dans un nouveau volume de la série des Études d'épistémologie génétique, publié en 1963 sous le titre *La filiation des structures* et qu'il convient de présenter rapidement ici (notons en passant l'exceptionnelle productivité du CIEG : c'est le 15^e ouvrage en 6 ans !).

Ce nouveau volume des Etudes d'épistémologie génétique comprend quatre textes théoriques, dont deux d'entre eux, signés l'un par Apostel et l'autre par Papert, font référence à la cybernétique (les deux autres, de Grize et à nouveau de Papert, appartiennent plus au champ de la modélisation logique telle que l'a initiée Piaget dans les années quarante). L'ouvrage contient en outre une introduction de Piaget dans laquelle celui-ci précise la nature des apports de ces textes pour l'épistémologie génétique. En ce qui concerne le travail d'Apostel, nous nous contenterons d'indiquer qu'il introduit explicitement au CIEG la problématique des systèmes auto-organiseurs. Apostel, qui mentionne entre autres l'ouvrage collectif *Self-organizing systems* édité par Yovits et Cameron, mais aussi le livre de Martin Davis sur *Computability and unsolvability* (il y est question des différentes sortes de machine de Turing) et les travaux de J.H. Holland sur les « Cycles in logical nets » ou encore ceux de Neumann et Burks sur les systèmes auto-reproducteurs, cherche dans l'une des sections de son texte à abstraire la logique des mécanismes auto-organiseurs dans le but de contribuer à l'explication de la genèse des structures opératoires. Ce faisant, et grâce à l'ampleur de sa culture scientifique, Apostel contribue à enrichir considérablement la culture des membres du CIEG en ce qui concerne les modèles cybernétiques (Apostel ne cessera d'ailleurs plus, année après année, de permettre à Piaget et à ses collaborateurs d'être toujours informés de l'existence des nouveaux instruments de

modélisation formelle développés tant en physique et en logique, qu'en cybernétique et dans les sciences sociales). Mais c'est surtout de Papert, tout autant intéressé par les réalisations effectives que par les analyses purement formelles, que vient l'apport le plus percutant en ce qui concerne l'introduction de la cybernétique au sein du CIEG. Avant de dire quelques mots de son texte « Étude comparée de l'intelligence chez l'enfant et chez le robot », rapportons brièvement un passage de l'introduction dans lequel Piaget, s'appuyant sur cette étude, résume en des termes quasi prophétiques ce qui va se jouer sur le plan des futures sciences cognitives lorsque celles-ci verront s'opposer tenants de l'« information processing paradigm » et tenants d'une approche connexionniste. Après avoir rappelé le but du travail de Papert, qui est de tendre à élaborer une machine « imitant le développement réel en son double aspect de filiation des structures opératoires par construction progressive et d'équilibration par paliers successifs » (p. 11), Piaget affirme que l'originalité de ce travail est de combiner des modèles « trop opératoires » de la résolution des problèmes avec des modèles non opératoires, « cela de manière à aboutir à une machine qui, non seulement résolve des problèmes, mais encore procède par étapes ou paliers successifs, à la manière d'un développement réel » (p. 19). Certes, par machine trop opératoire, Piaget a d'abord à l'esprit l'homéostat d'Ashby; mais il a aussi en vue les « calculatrices en général » (entendons les ordinateurs). Quant aux modèles non opératoires, c'est du « perceptron » dont il s'agit (c'est-à-dire l'une des références principales du paradigme connexionniste). Mais pour y voir plus clair dans cette prise de position, il convient de tenter de rapporter brièvement ce dont il est question dans le texte de Papert, qui utilise un mode d'analyse et un langage mathématiques impossibles à refléter ici.

Au cœur de ce texte, on trouve la description d'une machine ou d'un robot cybernétique, le « généron », dont le nom fait écho à celui de « perceptron ». Simulée sur un ordinateur, cette machine – dont la conception n'a jamais été achevée – est dotée d'un mécanisme d'équilibration la rendant capable de franchir des stades d'équilibre similaires à ceux rencontrés dans la psychogenèse de l'intelligence humaine, mais bien sûr dans un univers de problèmes très simplifié. Ce mécanisme ne saurait être calqué sur les opérations à l'œuvre dans une machine programmée. En effet, contrairement à ce que l'on constate chez l'enfant, la machine programmée est douée « à l'avance d'un système efficace à représenter, à retenir et à retrouver l'information » (p. 153). De l'autre côté, le mécanisme d'apprentissage à l'œuvre dans une machine de type perceptron ne suffit pas lui non plus à modéliser la genèse des structures. Il faut ajouter à ce mécanisme des capacités de feed-back et « d'interaction dynamique » (p. 182) entre parties (elles-mêmes des générons) du généron qui permettent au robot non seulement de classer efficacement les régularités propres aux inputs (les régularités du

monde extérieur), mais aussi d'acquérir par étapes des structures toujours plus efficaces et cohérentes pour agir et classer les inputs.

Les quelques indications précédentes suffisent à saisir ce que tente ici Papert : revisiter les modèles d'apprentissage inventés par les cybernéticiens en s'inspirant des concepts et des intuitions acquises sur le terrain de la psychologie génétique. Le génétron est un pas dans ce sens qui concerne l'enrichissement à donner à des modèles du type perceptron pour qu'ils acquièrent une capacité de construire progressivement des structures. Mais les génétrons les plus simples (composés de peu de structures de départ) ne sont valables à ses yeux que pour les premières étapes de construction de l'intelligence. À partir d'un certain niveau, « l'intelligence » d'un simple génétron devient insuffisante. Papert envisage en conséquence la même démarche à partir de l'autre pôle des réalisations cybernétiques, à savoir le pôle de l'intelligence artificielle, dont il mentionne les toutes premières réalisations (il fait référence notamment à un article de Newell, Shaw et Simon sur les « Chess playing programs »), mais qu'il interprète en langage mathématique. Les programmes d'intelligence artificielle ont pour particularité de simuler une intelligence adulte, déjà dotée de la capacité de représenter (par exemple de représenter les nombres et de les traiter au moyen des règles d'une table de multiplication). Papert esquisse au contraire une description de la façon dont un génétron pourrait acquérir ces capacités par une sorte de composition et de sélection « d'organes-M [...] (M comme « mémoire ») » déjà acquis (p. 176; on a là peut-être la source de la future théorie de l'esprit comme société composée de nombreux agents, que Minsky rendra publique en 1985 dans son ouvrage *The society of mind*).

La lecture que fait ici Papert des premiers programmes d'intelligence artificielle est évidemment étonnante. C'est avec le double regard de la conception piagétienne de l'intelligence et de celle de McCulloch qu'il interprète comment un robot pourrait être conçu pour acquérir les capacités de traitement de l'information dont sont d'emblée dotés ces programmes.

Toujours à nous en tenir aux travaux du CIEG sur les mécanismes cybernétiques de construction des structures cognitives, un autre ouvrage fera date : le 22^{ème} volume des *Études d'épistémologie génétique* intitulé *Cybernétique et épistémologie* (1968). Également introduit par Piaget, cet ouvrage contient la thèse de Guy Cellérier dans laquelle celui-ci montre comment il ne peut exister de machines adaptatives qui soient purement empiristes ou purement aprioristes, ce qui est une nouvelle manière de confirmer le constructivisme épistémologique. Cellérier y rappelle aussi comment la solution commune au problème de la genèse de l'intelligence et au problème de l'évolution biologique doit intégrer la thèse, énoncée par Minsky, selon laquelle « aucun système destiné à apprendre ou à reconnaître des configurations, ne peut avoir une utilité générale s'il ne comporte une possibilité d'utilisation récursive ou au moins hiérarchique des résultats précédents » (p. 89). De manière générale,

la thèse de Cellérier montre comment le questionnement de l'épistémologie génétique peut enrichir la théorie des systèmes cybernétiques. Elle est suivie d'un chapitre de Papert et Gilbert Voyat « À propos du perceptron. Qui a besoin de l'épistémologue ? » (entre 1963 et 1968, Papert a quitté Genève pour diriger, avec Minsky, le laboratoire d'intelligence artificielle du M.I.T., à Boston). Le propos des deux auteurs est d'inciter les ingénieurs à s'intéresser à l'épistémologie, afin que ceux-ci aient une meilleure appréhension des problèmes posés par les machines adaptatives. S'intéresser de manière épistémologique au perceptron conduit à démontrer que celui-ci appartient à une certaine classe de machines limitées par le type de problème qu'elles peuvent résoudre (les deux auteurs renvoient à un exposé de Minsky et Papert sur les « Linearly unrecognizable patterns » publié en 1967 dans le volume 19 de l'« American Math Society »; rappelons que ce sont les démonstrations de Minsky et Papert sur les limitations du perceptron qui donneront un sérieux coup de frein aux recherches sur les « machines connexionnistes »). Puisque ces machines ne peuvent résoudre que des problèmes « locaux », la question se pose de savoir si la solution du problème de l'intelligence artificielle ne résiderait pas dans le choix de la famille de machines opposées, dont le principe de fonctionnement n'est plus le parallélisme mais la sérialité (la machine programmée, héritière de la machine de Turing). Papert et Voyat suggèrent une réponse « à la Piaget » : « Les machines cybernétiques réelles [la pensée humaine] sont entre les deux, bien que plus proches de la machine de Turing que du perceptron » (p. 113). En intelligence artificielle, c'est la première qui produira les résultats les plus fructueux, en raison de « la flexibilité de son emploi dans des schèmes de raisonnement très divers et où l'organisation hiérarchique va de pair avec toutes les variétés de feed-back concevables » (id; en guise d'illustration, les deux auteurs mentionnent un programme d'intelligence artificielle conçu par T. G. Evans pour résoudre des problèmes de géométrie, programme dont ils exposent un fragment en annexe).

L'examen des contributions de Papert au CIEG montre comment l'intelligence artificielle tend à s'affirmer dès 1967. Le texte de Papert et de Voyat ne pouvait qu'inciter d'autres collaborateurs de Piaget à s'intéresser de près aux recherches en intelligence artificielle. Voyons donc maintenant ce que sont devenus à partir de là les rapports entre l'œuvre piagétienne et une science cognitive dont l'intelligence artificielle, au sens où l'ont définie Newell et Simon, a en effet pris la tête.

Rapports avec l'intelligence artificielle. Un programme inachevé...

Pendant les années septante, l'intelligence artificielle va connaître un essor considérable aussi bien en Europe qu'aux Etats-Unis. Il en va de même pour les recherches en simulation des comportements entreprises à la suite des travaux pionniers de Newell et Simon. En

1972, ces deux auteurs publient d'ailleurs un impressionnant ouvrage, *Human problem solving*, dans lequel l'utilisation des modèles informatiques de description des comportements intelligents révèle toute son efficacité pour cerner le déroulement des activités de résolution de problème. Il est évident que ces travaux ne pouvaient pas laisser indifférents les psychologues collaborateurs de Piaget; et ils le pouvaient d'autant moins que certains chercheurs américains, dont les élèves de Newell et Simon, n'hésitaient pas de leur côté à utiliser l'outil de la modélisation informatique pour simuler les conduites typiques mises en œuvre par les enfants pour résoudre ces épreuves que leur soumettaient les psychologues généticiens (par exemple les problèmes de conservation de la substance, du poids ou du volume). Cependant, comme nous l'avons signalé ailleurs (Ducret, 1991), l'alliance entre psychologie génétique et intelligence artificielle (ou psychologie « informatique ») ne semble pas avoir été aussi totale qu'on aurait pu s'y attendre au vu des promesses annoncées par les essais théoriques conduits au CIEG dans les années soixante. En d'autres termes, la modélisation esquissée par Papert dans ces années n'a jamais pu atteindre le degré d'achèvement atteint par les modèles logico-mathématiques utilisés pour décrire les structures opératoires de l'intelligence. Peut-être est-ce la raison principale pour laquelle Piaget lui-même ne prêtera pratiquement plus aucune attention publique à l'apport que la modélisation informatique était susceptible de fournir à la résolution du problème des mécanismes de construction cognitive, qui était au centre de ses intérêts dans la dernière décennie de sa vie. Seuls Inhelder, Cellérier et leurs collaborateurs chercheront à introduire, dans leurs recherches sur le développement des stratégies de résolution de problème chez les enfants, des notions manifestement inspirées des travaux en intelligence artificielle et en psychologie « informatique » (stratégie « bottom-up », « top-down », procédures, routines, etc.). Mais l'emprunt restera pour une large part notionnel, sans qu'il y ait une véritable utilisation des instruments de modélisation informatique. Pourquoi l'alliance n'a-t-elle pas été poussée plus avant, alors que la nature même des questions théoriques – portant, chez Piaget, sur les mécanismes d'équilibration cognitive et, chez Inhelder et Cellérier, sur le fonctionnement de l'intelligence – aurait dû *a priori* favoriser un usage poussé de la modélisation informatique ?

Il y a différentes réponses à cette question. La première, la plus visible mais aussi la plus superficielle, consiste dans l'étendue des moyens exigés pour une telle modélisation, ou au temps disponible pour la réaliser, étendue et temps dont les collaborateurs de Piaget et d'Inhelder ne disposaient apparemment pas. Mais cette réponse en cache deux autres, théoriquement plus intéressantes. L'étude attentive des contributions respectives ou communes de Piaget et d'Inhelder nous conduit à distinguer deux obstacles à une alliance pleine et entière : le premier est surtout lié à Piaget et à la conception qu'il se fait de l'explication scientifique ainsi qu'à sa conception du

fonctionnement de la pensée; le deuxième est davantage lié à la connaissance qu'Inhelder et ses collaborateurs ont des processus de pensée des enfants, ainsi qu'aux données qu'ils récoltent en interrogeant et en observant les enfants.

En ce qui concerne l'obstacle lié à Piaget lui-même, il est double. Piaget a une haute idée de ce que sont l'explication et la modélisation scientifiques, qu'il a acquise en développant l'épistémologie de la physique. Une modélisation et une explication n'ont de valeur que si elles atteignent un degré élevé de généralité et d'intelligibilité. Rappelons que l'un de ses plus grands bonheurs scientifiques a été la découverte des structures opératoires de l'intelligence, accompagnée de la découverte parallèle de certaines structures propres à la perception. Dans les deux cas, il est parvenu à en donner une modélisation scientifique s'approchant en généralité (relative) et en intelligibilité des explications de la physique. Il est vraisemblable que les modèles de bric et de broc élaborés en intelligence artificielle et en psychologie « informatique » ont dû lui paraître trop empiriques et trop ad hoc pour atteindre le standard souhaité. D'autre part, avant même de tenter une modélisation, il lui a peut-être paru nécessaire d'en savoir plus, empiriquement parlant, sur les mécanismes de construction cognitive et leur développement – d'où les nombreuses enquêtes conduites au CIEG dans les années soixante-dix pour récolter le maximum de données capables d'enrichir ce que l'on sait de ces mécanismes (Ducret, 2000). Mais par ailleurs il y a dans sa conception du fonctionnement de l'intelligence, et en particulier de la résolution de problème, un obstacle l'empêchant de voir l'apport possible de la modélisation informatique. Il suffit de se reporter aux quelques lignes citées plus haut sur sa vision de la résolution de problème chez l'adulte comme équilibration des opérations intervenant dans cette résolution pour prendre la mesure de la distance entre ses intérêts théoriques et ceux des chercheurs en science cognitive, principalement préoccupés par le fonctionnement des différentes fonctions cognitives (le goût de l'atemporel, ou du « présentatif », comme il l'appelle dans un texte déroutant publié avec Inhelder en 1979, l'emporte manifestement chez lui sur le goût pour le temporel, le « procédural », et cela en dépit du rôle central accordé à l'action dans sa psychologie). Il est vrai que dans un autre passage cité juste avant le précédent, Piaget opposait les opérations comme outil statique et formalisable de la pensée aux intentions de la pensée qui « permettent la formalisation mais ne sont pas elles-mêmes formalisables ». Mais une telle opposition laisse suspecter que Piaget n'était probablement que faiblement optimiste en la possibilité d'atteindre des modèles convaincants et autres que statistiques des processus de construction des structures cognitives. En ce sens, il y a peut-être chez lui un scepticisme qui se rapproche de celui, certes bien plus tranché, de certains adversaires de l'intelligence artificielle.

Si maintenant on considère non plus les travaux de Piaget sur les mécanismes de construction des structures, mais ceux d'Inhelder et

de ses collaborateurs sur la résolution de problème chez l'enfant, là le fossé est bien moins grand par rapport au courant dominant de la science cognitive des années soixante-dix, avec à sa tête l'intelligence artificielle. Contrairement à Piaget, Inhelder et ses collaborateurs voient bien la démarche profondément « procédurale » et laborieuse, c'est-à-dire engagée dans le temps, des processus de résolution de problème. L'enfant – comme d'ailleurs souvent l'adulte – résolvant un problème est d'abord un enfant construisant des représentations provisoires, les modifiant, changeant l'interprétation qu'il se fait des questions qu'il se pose successivement dans le processus de résolution, oubliant des informations déjà récoltées, etc. Là, on est évidemment beaucoup plus proche des démarches « pas à pas » que l'on rencontre dans les programmes classiques d'intelligence artificielle. Mais alors pourquoi la modélisation informatique n'a-t-elle pas été utilisée par l'équipe d'Inhelder ? Certes il y a la question de la disponibilité. Mais, comme nous l'avons déjà suggéré, il existe un obstacle sous-jacent plus fondamental. Les objets considérés par les psychologues de cette équipe sont les représentations, les actions, les interrogations, etc. des enfants. Or ces « objets » ont toujours pour particularité de posséder une signification pour l'enfant chez qui on les observe. Il est probable que c'est la trop grande absence de la question de la signification à la fois en intelligence artificielle mais aussi en psychologie « informatique » qui fait que ces psychologues ne sont pas entrés dans le jeu de la simulation avec le même enthousiasme que le faisaient leurs collègues adoptant le paradigme de Newell et Simon. Pour le dire de manière très lacunaire, c'est probablement leur attention à la dimension herméneutique des actions et de la pensée humaines qui explique que l'alliance entre psychologie génétique et intelligence artificielle n'a pas rempli les attentes que l'on pouvait supposer à la suite des premières tentatives de Papert de lier ces deux disciplines.

CONCLUSION

Le relatif échec que nous venons de mentionner ne doit pas nous conduire à minimiser les richesses des apports mutuels entre l'œuvre piagétienne et les sciences cognitives. Celles-ci ont aujourd'hui appris à reconnaître la complexité considérable des systèmes cognitifs naturels. Comme le suggère la thèse de la société de l'esprit développée par Minsky et Papert (Minsky 1985), on ne peut plus croire aujourd'hui que la modélisation de ces systèmes reposera sur une seule famille de modèles. Le cerveau ou la pensée met certainement en œuvre des processus de nature très variée, dont les uns sont préférentiellement modélisables par des machines logiques et les autres par des machines neuromimétiques. Mais il est aussi assez plausible que, face à la complexité des différentes machineries à l'œuvre pour agir, pour percevoir, pour penser, pour résoudre intelligemment des problèmes, etc., la modélisation statistique envisagée par Piaget pour capturer les structures de la perception ou certaines structures instables de l'intelligence soit un outil englobant

permettant, à côté de la simple thématization ou conceptualisation, de donner un minimum d'intelligibilité à cette « société » ou cette organisation que constitue une intelligence capable de résoudre des problèmes et d'agir dans des situations réelles, mais aussi d'inventer des mondes imaginaires et des « idéalités mathématiques ». Cette modélisation ne devrait pourtant pas stériliser la démarche de bric et de broc utilisée par l'intelligence artificielle autant que par la modélisation neuromimétique pour rendre explicites certains modes de fonctionnement de telle ou telle partie du système. Tout compte fait, c'est l'effort conjoint de ces différentes démarches de modélisation qui devrait accroître progressivement notre compréhension de l'intelligence humaine. En un sens, lorsqu'on lit les textes rédigés par Piaget et ses collaborateurs dans les années cinquante et soixante, il est difficile de n'y pas voir l'annonce de la situation « polythéorique » que rencontre aujourd'hui la science cognitive, ce qui au fond vérifie l'adage que, dans les sciences du réel, les faits sont têtus.

4.2 Commentaire

Marc Richelle

La matière traitée dans ce dossier est si vaste, à l'image de l'œuvre de Piaget, qu'en commenter l'ensemble exigerait un éventail de compétences rarement réunies, et demeurerait de toute manière fort superficiel. Mes réflexions porteront sur le texte de J.-J. Ducret en rapport avec Jean Piaget et les Sciences cognitives ainsi que, dans le chapitre suivant, sur le texte de J. Montangero intitulé : Pourquoi tant de critiques à l'œuvre de Piaget ?

Dans son examen des rapports de Piaget avec les sciences cognitives, Ducret retrace judicieusement les origines et le contexte historique de ces dernières. Si leur acte de baptême peut être daté de 1975, cette consécration par la Fondation Sloan ne les inventait pas, évidemment; elle en reconnaissait simplement l'existence en leur offrant son encouragement non négligeable. Ducret, dans sa brève rétrospective, fait une place assez mince à la psychologie. Il cite, certes, Miller, fondateur avec Bruner du centre d'études cognitives de Harvard, sans le créditer de son oeuvre de précurseur, et du rôle qu'il joua dans l'importation en psychologie de la théorie de l'information (Miller, 1951, 1956). Neisser (1967) n'est pas mentionné, pas plus que les nombreux devanciers de la psychologie cognitive, y compris dans les rangs du behaviorisme, de Bartlett à Lashley ou Tolman. Nous ne nous attarderons pas sur la reprise du cliché selon lequel le mouvement cognitiviste assisté par Chomsky sonna la « mort du behaviorisme », une simplification et une dramatisation de l'histoire de la psychologie que nous avons commentée ailleurs (Richelle, 1993).

Quoi qu'il en soit, au moment de l'officialisation par la Fondation Sloan d'une entreprise pluridisciplinaire qui a connu ensuite un essor fascinant, Piaget approchait des 80 ans. Malgré sa vitalité et sa vivacité d'esprit, pouvait-on s'attendre à ce qu'il réexamine toute son oeuvre en fonction des nouvelles thématiques issues des technologies de simulation de l'esprit ? Comme le montre la suite de l'exposé de Ducret, les problématiques des « sciences cognitives » qui ont marqué le dernier quart du siècle n'ont guère été directement traitées par Piaget, mais par certains de ses collaborateurs ou disciples (encore que le terme convienne peu à des esprits particulièrement personnels de son entourage intellectuel tels que Cellérier ou Papert). Pour ce qui concerne Piaget lui-même, ce sont deux apports bien antérieurs aux sciences cognitives au sens strict, à savoir la cybernétique et la théorie de l'information, qui ont dans le second quart du siècle stimulé sa réflexion. C'est donc à elles, et plus particulièrement à la première, que Ducret consacre l'essentiel de son exposé, montrant de façon convaincante ce qu'elles présentent d'affinités avec des préoccupations de Piaget.

Lorsqu'il revient à l'intelligence artificielle, noyau des sciences cognitives, Ducret s'interroge sur les raisons que peut avoir eues Piaget de ne pas s'y engouffrer - évitant d'éluder la question en invoquant un simple effet d'âge comme nous suggérons plus haut de le faire. Son analyse renvoie avec beaucoup de finesse à la manière d'envisager l'explication, à une tournure d'esprit qui ne se satisfait pas des « bricolages » des spécialistes de l'intelligence artificielle, peu préoccupés par les modèles généraux, visant à l'« atemporel » ou au « présentatif », au mépris du « temporel », du « procédural », pour user des termes curieux repris par Ducret à un article d'Inhelder & Piaget de 1979. On retrouve ici le contraste classique entre familles d'esprits qui traverse toute l'histoire des sciences, y compris de la physique, dont Duhem donnait au début du 20^{ème} siècle une version non dénuée de nationalisme (Duhem, 1914). Un vieux débat qui laisse à penser qu'après tout les choix épistémologiques des plus grands savants (sans parler des autres) sont peut-être largement affaire de personnalité. Le « scepticisme » de Piaget reposait cependant sur des arguments plus rationnels, découlant de sa théorie. L'argument sur lequel insiste Ducret porte sur « l'intention de la pensée », sur la « dimension herméneutique des actions et de la pensée humaines », qui font totalement défaut aux machines de l'intelligence artificielles. Pour le constructiviste, qui accorde une importance primordiale à l'action finalisée du sujet, puis à son activité réfléchissante, il est difficile de concéder à la machine des propriétés qui lui donnent valeur de modèle de l'intentionnalité et de la conscience. On est là au cœur du débat, réactualisé par l'Intelligence Artificielle, sur la distinction ultime entre machines et organismes vivants, et Piaget, malgré son penchant pour les formalisations les plus abstraites des données psychologiques, n'est pas prêt à déposséder le sujet de ses prérogatives inimitables.

Il me semble qu'un autre argument, plus classique, voire banal, mais à tout prendre plus fondamental, eût pu être invoqué, même si Piaget n'y a pas eu explicitement recours dans ses derniers écrits relatifs à la question. C'est celui de la dimension génétique (au sens genevois du terme, *ontogénétique*). Toute l'enquête piagétienne est partie d'une interrogation sur le fonctionnement de l'intelligence et d'une hypothèse de travail : la réponse, l'« explication », est à trouver dans l'histoire ontogénétique. Jusqu'à présent, mis à part les tentatives connexionnistes récentes, les machines proposées n'ont pas d'histoire, du moins pas d'histoire constructiviste. Tout au plus tente-t-on, si l'on veut les doter d'expertise, de leur injecter des propriétés structurales caractéristiques de l'« expert » (entité virtuelle capable de résoudre certains problèmes complexes spécialisés au moins aussi bien que son modèle humain). A l'opposé, le « naïf », dépourvu de ces propriétés, est sans ressources face au problème. Le passage du naïf à l'expert reste dans l'ombre. Or c'est précisément ce passage, du nourrisson naïf à l'adulte normal expert en raisonnement, que Piaget a exploré pendant toute sa carrière, pour fournir une explication à l'expertise, plutôt que de se contenter d'en décrire les performances

sur un mode purement pragmatique. L'argument génétique n'est donc pas moins fort dans la perspective de Piaget face à la démarche et aux ambitions des spécialistes de l'intelligence artificielle qu'il ne l'était face aux structuralismes d'un Lévi-Strauss ou d'un Chomsky (Piaget, 1968c).

Ceci dit, si nous revenons à la question générale des rapports de Piaget non seulement aux sciences cognitives mais de façon plus restrictive au cognitivisme en psychologie, il convient de souligner une fois de plus sa position de précurseur, puisqu'elle est souvent oubliée (ou même quelquefois objet de méprise inattendue, comme dans ce fameux débat où Piaget apparaît face à Chomsky comme le porte-parole des théories de l'apprentissage [Piatelli-Palmarini, 1979]). Précurseur du cognitivisme, Piaget l'est évidemment par ce que l'on pourrait appeler son cognicentrisme, ou sa réduction de l'enquête psychologique au cognitif, l'affectif, l'émotionnel, lorsqu'il en est question, n'apparaissant que dans leur subordination au cognitif - une distorsion que le cognitivisme ne fera qu'accentuer au point qu'il n'est guère bienséant aujourd'hui d'avancer une théorie des émotions qui ne soit cognitive. La généralisation de la métaphore de l'ordinateur mise à l'honneur par les sciences cognitives consacre plus fortement encore cette tendance. Cela ne réduit en rien (c'en était peut-être la condition) la richesse des apports de Piaget à l'étude de la cognition, richesse qui justifierait qu'il leur soit fait une place dans tout traité de psychologie cognitive. Si ce n'est pas le cas, c'est sans doute en raison de la force des objections de tout genre qui se sont accumulées contre Piaget. Cela nous amène au texte de Montangero sur les critiques faites à Piaget que je commenterai plus loin.

4.3 Commentaires

Sabine Ploux

INTRODUCTION

Dans son article sur les relations entre sciences cognitives et l'épistémologie génétique, Jean-Jacques Ducret met en avant les rapprochements entre cette théorie et les différents courants des sciences de l'artefact qui lui ont été contemporains. Nous développerons le point de vue que si ces différents domaines scientifiques ont eu des trajectoires relativement parallèles (en ce sens que les renvois mutuels n'ont pas essentiellement modifié les pratiques et les travaux respectifs), il existe cependant une lecture de la genèse développementale qui serait une source d'inspiration pour les sciences de la modélisation. L'œuvre de Piaget fait référence et s'appuie sur des concepts mathématiques essentiellement algébriques et compositionnels que nous essaierons de caractériser. Mais en deçà de cette référence explicite, nous proposons l'idée qu'il existe une lecture du texte liant les différentes étapes du développement - et plus spécifiquement encore leurs articulations - à un processus dynamique (au sens de la théorie des systèmes dynamiques). En se fondant sur cette corrélation nous nous sommes inspirés de l'œuvre de Piaget pour développer une approche robotique de la constitution d'une forme de préhension comme couplage du regard et de l'agrippement. Nous espérons montrer, qu'au-delà des divergences et des critiques portant sur l'ordre nécessaire de la constitution cognitive, (critiques qui pourraient en partie être corroborées par l'utilisation de ce même cadre), l'œuvre piagétienne contient des éléments fondateurs pour le développement de modèles cognitifs, mathématiques et artefactuels.

REFERENCE ET USAGE DES CONCEPTS FORMELS DANS L'ŒUVRE DE PIAGET

Piaget s'appuie essentiellement sur la notion de groupe pour décrire les formes stables du comportement cognitif. En particulier, le groupe des déplacements permet de rendre compte de la réversibilité (par renvoi à la notion d'éléments inverses) et de la composition des actions. Dans cette théorie, la capacité à se représenter les objets comme des entités permanentes prend racine sur cette structure. Abstraite de la contingence sensori-motrice de son apparition, la notion est ensuite disponible pour être appliquée à la manipulation des propositions et des symboles. Elle ouvre ainsi la voie à une compréhension de l'émergence des formes abstraites du raisonnement. Ce concept algébrique décrit une étape stable et nécessaire dont l'émergence comportementale est finement détaillée. Cependant, il n'existe pas véritablement de concept mathématique

pour accompagner sa dynamique de constitution ou encore le processus de généralisation à d'autres structures cognitives.

POUR UNE LECTURE « DIFFERENTIELLE » DE « LA NAISSANCE DE L'INTELLIGENCE CHEZ L'ENFANT »

Pour illustrer le point de vue qu'il existe une lecture de l'épistémologie génétique qui admet une modélisation dynamique, nous mettons en parallèle, d'une part la description des réflexes, de leur évolution et de leur assimilation réciproque proposée par Piaget, et d'autre part une interprétation mathématique de cette description.

Le réflexe et son évolution

Les réflexes innés sont des comportements complexes du point de vue de la coordination musculaire impliquée, mais ils sont pris dans l'œuvre de Piaget comme des globalités qui « *préparent (...) l'individu à s'adapter au milieu externe et à acquérir les conduites ultérieures, caractérisées précisément par l'utilisation progressive de l'expérience* ». L'étude vise alors à comprendre leur évolution, leur interaction, leur capacité à s'organiser en de nouvelles globalités sensori-motrices, de nouvelles *Gestalt*.

Voici reprises quelques caractéristiques des réflexes de l'enfant : ils peuvent fonctionner à vide (exemple : la succion) et sont déclenchés par une stimulation de la zone sensitive (une main qui frôle les lèvres déclenche la succion, une pression légère sur la paume de la main déclenche la fermeture de la main).

La zone sensitive associée à ces unités est au début très localisée, le comportement moteur est isolé.

INTERPRETATION : *Le réflexe est un processus cyclique composé d'une surface sensitive initialement limitée à une zone sensitive (que nous appellerons ici foveale) et d'une unité motrice. La dynamique initiale est définie par*

- *l'activation de l'unité motrice par excitation de la zone foveale;*
- *l'activation à vide de l'unité motrice.*

ÉVOLUTION DU COMPORTEMENT REFLEXE

À l'exercice réflexe tel qu'il apparaît à la naissance succède l'élaboration d'une recherche. Il suffit par exemple, à l'enfant d'avoir heurté des lèvres le mamelon pour tâtonner la bouche ouverte jusqu'à réussite. Les mouvements de la tête sont ainsi impliqués dans la réalisation de cette unité.

La zone sensitive s'élargit. Un contact avec la joue entraîne une recherche. Au début, cette recherche est aléatoire. L'enfant tourne la tête du mauvais ou du bon côté. Puis elle devient efficace et l'enfant se tourne du bon côté. Il y a donc, par utilisation de mouvements extérieurs au réflexe initial, sélection d'un bon comportement moteur et corrélation entre une zone sensitive voisine et des unités motrices. Pour le réflexe de succion sont successivement impliqués les

mouvements latéraux de la tête puis le lever de la tête quand le seul déplacement latéral n'a pas suffi.

INTERPRÉTATION : *Nous proposons de définir l'évolution du comportement réflexe comme la constitution d'un champ vectoriel sur une surface elle-même associée à la zone sensitive. L'attracteur de cette dynamique est situé sur la zone foveale. L'évolution du système est déterminée par la recherche de sa réalisation.*

Cette recherche se réalise par un appel progressif :

- *aux unités motrices voisines de l'unité réflexe initiale en suivant l'anatomie du système;*
- *aux unités sensibles voisines de la fovea;*
- *de telle sorte qu'à chaque excitation de ces zones sensibles étendues sera associé un comportement qui rapprochera le système de la réalisation fonctionnelle attachée au réflexe. En somme, le schème initial va élargir le bassin d'attraction qui permet sa réalisation en s'étendant graduellement aux surfaces sensibles et aux unités motrices voisines. Le rayon de cette expansion est donné par une topologie somatopique.*

Interaction entre réflexes

Piaget décrit ce type d'interaction dans le second chapitre de « *la naissance de l'intelligence chez l'enfant* ». Chez le nourrisson, elles aboutissent à des comportements qui peuvent se décrire ainsi : saisir pour porter à la bouche, saisir pour regarder, regarder pour saisir... Les dynamiques constituées au stade précédent forment un ensemble déjà complexe. La vision, par exemple, fait intervenir de nombreux réflexes pupillaires, palpébral, d'accommodation... une sensibilité à l'éclairement, à la variation lumineuse. Malgré cette complexité, nous essaierons d'annoter l'acquisition de nouveaux schèmes en mettant en exergue les phénomènes d'accrochage entre des dynamiques en interaction et l'intégration progressive de comportements voisins assujettis à la réalisation du nouveau schème. Ces éléments seront ensuite repris dans l'interprétation mathématique.

Au début de façon imprévisible et ensuite entretenue, se produisent des stimulations mutuelles des zones sensibles liées à des réflexes initialement indépendants : mettre les doigts dans la bouche, saisir les joues, les mains...

Cette synchronisation perceptive va permettre la constitution d'un comportement cyclique autonome :

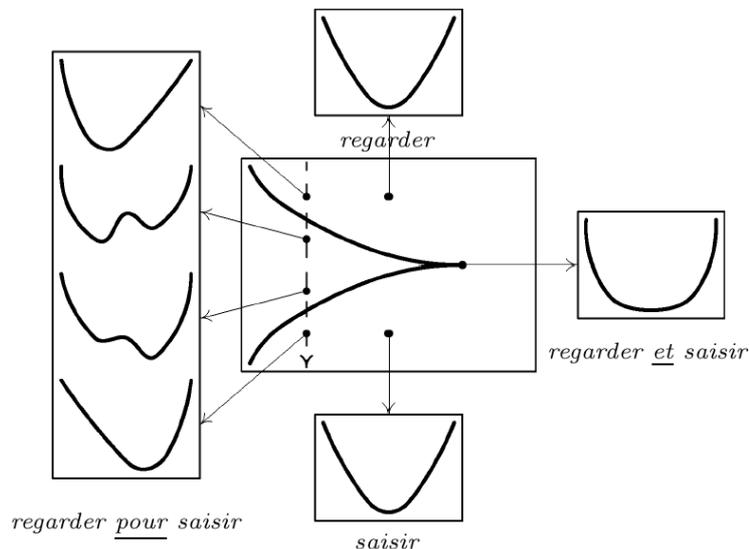
- *sucer son poing (puis/ou) son pouce; (le mouvement du bras, voisin pour l'anatomie corporelle des mouvements de la tête eux-mêmes déjà impliqués dans la succion, est à son tour utilisé pour la réalisation du nouveau schème)*

- joindre les deux mains; (ici le mouvement des épaules est impliqué dans le nouveau schème construit à partir du réflexe d'agrippement)
- il arrivera que l'enfant tenant un objet, exécute le schème de succion du poing, ce qui l'amènera à sucer l'objet tenu; (nouveau schème - sucer un objet tenu - qui est un produit de la synchronisation de la succion et de la préhension; ce nouveau schème va devenir autonome et la zone sensitive de l'agrippement - la paume - est impliquée dans sa réalisation par association au déplacement du bras)
- un autre schème va se produire : regarder un objet saisi; (voyons un événement qui permet cette création et quelques schèmes qui seront impliqués dans la recherche de sa réalisation. Le regard se porte sur l'objet qui dans sa trajectoire est amené à la bouche ou qui en sort. Nouvelle synchronisation qui cette fois implique la vision. Ce nouveau schème va se réaliser par appel à des formes variées du comportement. Les unes par exemple impliquent dans un premier temps le schème précédemment constitué - sucer un objet saisi. D'autres utilisent le regard : la main et l'objet côte à côte dans le champ visuel, sont regardés alternativement réalisant ainsi les schèmes du regard d'un objet ou du regard de la main. Les informations proprioceptives liées à ce regard alternatif servent alors de zones sensibles étendues pour effectuer le nouveau schème. Elles sont associées à de petits mouvements du bras qui permettent la saisie de l'objet. (L'enfant apprend ensuite, par extension topologique, à saisir un objet de plus en plus éloigné de la main en effectuant des mouvements du bras plus amples.)
- en dernier lieu les deux types de recherche (l'une permettant le déplacement du bras dans le champ de vision et l'autre permettant la saisie de l'objet à proximité de la main) vont se combiner pour la réalisation du schème quand la main est initialement hors du champ visuel.

INTERPRETATION : *On suppose donc que plusieurs dynamiques réflexes se sont développées indépendamment. Dans notre modèle, l'interaction est rendue possible par un recouvrement synchrone des deux dynamiques en leurs centres attracteurs. Cette synchronisation est l'élément constitutif du produit des deux unités. Le nouveau système étend ensuite ses zones sensibles et motrices. Les lois d'extension sont celles précédemment décrites; elles suivent la topologie anatomique. Notre objectif est alors d'utiliser la théorie des singularités pour mieux comprendre la composition des schèmes et leurs formes possibles à partir des dynamiques initiales. En effet, cette théorie offre la possibilité, à travers les résultats sur le*

déploiement universel, de prévoir les formes que la dynamique produit. C'est en ce sens qu'elle représente un cadre morphogénétique qui conduit à une description symbolique et algébrique des formes du comportement.

Prenons un exemple simple pour imager cette perspective. Au départ on a deux dynamiques : l'une représente le regard, l'autre l'agrippement. Le nouveau schème est une synchronisation des deux dynamiques : regarder et saisir. L'apprentissage du contrôle de ce nouveau schème conduit à des comportements du type : regarder pour saisir ou saisir pour regarder... on pourrait représenter ici cette structure par une fronce.



Cette interprétation de l'œuvre de Piaget nous a conduit à développer une application robotique pour simuler l'acquisition d'une préhension. Le dispositif est composé de deux Khépéras, l'un comporte une caméra (pour l'œil), l'autre une pince (pour la main). Le même schéma en deux étapes est reproduit : évolution de dynamiques réflexes et interaction entre ces dynamiques.

CONCLUSION

Contrairement au point de vue de Thelen, nous pensons que l'approche dynamique n'est pas une alternative à l'œuvre piagétienne et que l'on y trouve déjà le fondement de cette démarche. Cependant il n'existe pas, à notre connaissance, de traduction dans ce modèle des notions de généralisation ou d'abstraction qui relèveraient d'une évolution *intrinsèque* de fonctions sensori-motrices. Or, ces notions sont les pierres de touche du passage des structures sensori-motrices aux niveaux préopératoire puis logique.

Pour garder le même cadre, on pourrait essayer de comprendre cette étape du développement en l'associant à un couplage entre des composantes initialement indépendantes à la manière de ce qui vient

d'être décrit. Par exemple, pour être mené à bien, ce projet nécessiterait la construction d'un modèle qui rende compte d'interaction entre les dynamiques sensori-motrices et un noyau d'organisation portant sur des formes prédicatives.