

Chapitre 1

Le constructivisme après Piaget : l'apport des modèles de l'auto-organisation¹

par Jacques Lautrey

1. Introduction

Pourquoi un enfant qui en était encore incapable quelques temps auparavant parvient-il, vers un an à retrouver un objet qui a disparu de sa vue, vers 7 ans à trouver une méthode systématique pour sérier un ensemble d'objets, vers 12 ans à trouver une méthode systématique pour faire toutes les permutations possibles dans l'ordre d'un ensemble d'objets? Qu'est-ce qui a changé à ces moments là dans l'équipement cognitif de cet enfant? Comment s'est opéré ce changement? Pourquoi n'a-t-il pu avoir lieu avant ?

Au cours de l'histoire de la psychologie du développement, trois sortes d'hypothèses ont été avancées pour expliquer que les enfants acquièrent de nouvelles capacités intellectuelles lorsqu'ils avancent en âge. L'hypothèse innéiste est que les structures cognitives dont témoignent ces nouvelles capacités sont préformées. Constituées au cours de la phylogenèse, elles seraient inscrites depuis dans le patrimoine génétique de l'espèce mais ne se mettraient toutefois en place que lorsque la maturation des structures neuronales qui les sous-tendent est achevée. L'hypothèse empiriste est que l'organisation cognitive serait directement tirée de l'organisation de l'environnement au sein duquel le sujet se comporte. L'intériorisation de cette organisation se ferait par des mécanismes d'association (plus précisément des mécanismes de renforcement pour le behaviorisme). Selon l'hypothèse constructiviste, enfin, telle qu'elle a été formulée par Piaget, les structures cognitives ne seraient ni préformées ni tirées de l'environnement mais construites par l'intériorisation et l'auto-organisation des actions par lesquelles l'enfant transforme son environnement. On pourra trouver dans le chapitre 1 § C du volume de licence² une présentation moins

¹ Je remercie J. Bideaud et H. Lehalle d'avoir accepté de faire une lecture critique d'une précédente version de ce chapitre.

² Chaque fois qu'un renvoi sera fait au volume de licence, il s'agira du volume du « Nouveau cours de psychologie » intitulé « Psychologie du développement psychologie différentielle ».

schématique de ces trois sortes d'interprétations du développement de la connaissance. Rappelons seulement ici que jusqu'aux années 60-70, le constructivisme piagétien a dominé la scène en psychologie développementale, après avoir supplanté la conception behavioriste de l'ontogenèse du comportement, puis qu'à partir de ce moment là, il a lui-même perdu de son influence à la suite des critiques sévères qu'en ont fait les tenants d'un courant neo-innéiste qui s'est développé dans la mouvance du cognitivisme sous l'influence, notamment, de la théorie de Chomsky (1965) sur l'innéité et l'universalité des structures profondes du langage et des considérations de Fodor (1983) sur la modularité de l'esprit.

La thèse argumentée dans ce chapitre est que le concept d'auto-organisation, qui était au centre du modèle piagétien de l'équilibration des structures cognitives - et s'inspirait à l'époque de la cybernétique - a été profondément renouvelé par l'apparition de nouvelles formes de modélisation du changement, en particulier la modélisation connexionniste et la modélisation des systèmes dynamiques non linéaires. Dans quelle mesure ces nouvelles conceptions de l'auto organisation peuvent-elles aider, lorsqu'elles sont appliquées au développement de l'enfant, à dépasser les objections faites au constructivisme ? Telle est la question à laquelle tente de répondre ce chapitre. Avant d'en venir là, les grandes lignes du constructivisme piagétien seront d'abord rappelées, ainsi que les principales critiques qui lui ont été adressées dans le cadre du courant néo-innéiste.

1.1. Le constructivisme piagétien et le modèle de l'équilibration

Pour Piaget donc, ce ne sont pas les structures cognitives elles-mêmes qui sont innées, mais le processus d'équilibration par lequel celles-ci se construisent (pour une présentation de la théorie de Piaget, voir le chapitre 2, § A du volume de licence). Il a consacré au modèle de l'équilibration des structures cognitives un ouvrage entier dont le sous-titre précise qu'il s'agit, selon lui, du problème central du développement (Piaget , 1975). Il n'est pas question ici d'entrer dans une description détaillée de ce modèle, fort complexe, mais seulement de donner un aperçu de son principe en examinant les principaux postulats sur lesquels il est fondé (Piaget précise dans une note « nous parlons de postulats dans le sens d'hypothèses générales tirée de l'examen des faits ») (op. cit. p. 13). Le premier postulat est formulé ainsi : « Tout schème d'assimilation tend à s'alimenter, c'est à dire à s'incorporer les éléments extérieurs à lui et compatibles avec sa nature » (ibid , p.13). A l'état initial, Piaget admet donc la présence d'un répertoire limité de schèmes innés (schèmes de succion, de préhension, de poursuite du regard, etc.), non reliés entre eux, et un principe de fonctionnement, inné lui aussi, faisant que ces schèmes tendent à incorporer des éléments extérieurs à leur organisation

(par exemple le sein ou le pouce dans le cas du schème de succion). Le second postulat prend acte d'un déséquilibre initial dans l'échange qui s'instaure entre les schèmes et les éléments de l'environnement que ceux-ci tendent à assimiler. Ce déséquilibre tient à ce que « la démarche spontanée de l'esprit consiste à se centrer sur les affirmations et les caractères positifs des objets, des actions ou même des opérations, les négations sont alors négligées ou ne sont construites que secondairement et laborieusement » (ibid, p. 20). Les raisons de ce primat des affirmations sur les négations sont que « perceptivement on n'enregistre que des observables positifs, et la perception de l'absence d'un objet ne se produit que secondairement et en fonction d'attentes ou de prévisions qui relèvent de l'action entière et dépassent la perception. Pour ce qui est des actions, elles sont centrées sur le but à atteindre et non pas sur l'éloignement à leur point d'origine » (Ibid, p. 22). En d'autres termes, l'absence de ce que le schème laisse attendre, ou l'obstacle qui empêche d'atteindre le but poursuivi, ne sont, par définition, pas inclus initialement dans le schème activé et en perturbent le déroulement, d'où le déséquilibre. La perturbation est en somme le déclencheur du processus d'équilibration par lequel le schème va être modifié. C'est le troisième postulat : « Tout schème d'assimilation est obligé de s'accommoder aux éléments qu'il assimile, c'est à dire de se modifier en fonction de leurs particularités, mais sans perdre pour autant sa continuité (donc sa fermeture en tant que cycle de processus interdépendants), ni ses pouvoirs antérieurs d'assimilation » (ibid, p. 13).

Le processus d'équilibration ne régule donc pas seulement les relations entre les schèmes et l'environnement, en compensant par de nouvelles constructions les déséquilibres provoqués par les perturbations, mais aussi les relations des schèmes entre eux, comme lorsque le schème de succion et le schème de préhension, jusque là séparés, se coordonnent pour former un nouveau schème d'action consistant à prendre un objet pour le porter à la bouche. L'ajustement de ces deux schèmes dans une nouvelle organisation cognitive qui les intègre, mais à l'intérieur de laquelle ils restent néanmoins différenciés, requiert aussi une équilibration interne au système cognitif. Piaget distingue en fait trois formes d'équilibration, toutes trois nécessaires pour assurer à la fois la cohérence interne du système cognitif et sa cohérence avec son environnement :

- a) L'assimilation des objets à des schèmes d'action et l'accommodation de ces derniers aux objets.
- b) L'assimilation réciproque de deux sous-systèmes et leur accommodation (comme dans l'exemple de la coordination entre la préhension et la succion).

c) « l'équilibre progressif de la différenciation et de l'intégration, donc des relations unissant des sous-systèmes à la totalité qui les englobe. Cette troisième forme d'équilibration ne se confond pas avec la seconde, puisqu'elle ajoute une hiérarchie aux simples rapports collatéraux » (Ibid, p. 15).

Selon Piaget, c'est donc par l'ensemble de ces régulations que s'auto-organisent des structures cognitives de plus en plus puissantes, fondées sur la coordination et l'intériorisation des actions, d'abord sensori-motrices, puis opératoires concrètes, puis opératoires formelles, dont chacune intègre la précédente en la dépassant.

1.2. Les critiques du constructivisme

Les partisans d'un néo-innéisme – c'est à dire d'une conception renouvelée de l'innéisme qui a pris appui sur la psychologie cognitive - ont opposé au constructivisme piagétien des arguments théoriques et des données d'expériences.

Du point de vue théorique, trois principaux arguments ont été avancés. Le premier met l'accent sur le *paradoxe de l'apprentissage* en affirmant qu'une structure cognitive ne peut engendrer une structure cognitive plus puissante qu'elle ne l'est elle-même. Selon Fodor (1975), pour que l'enfant puisse construire des logiques de plus en plus puissantes, telles que la logique du stade de niveau N+1 contienne la logique du stade de niveau N comme une de ses parties, il faudrait qu'il puisse concevoir et vérifier des hypothèses dont la formulation même exigerait qu'il dispose de concepts du stade de niveau N+1, ce que ne lui permet évidemment pas la logique du stade de niveau N. Fodor en conclut : « ...nous n'avons aucune idée de ce que pourrait être le fait de passer d'un système conceptuellement plus pauvre à un système conceptuellement plus riche, par quelque chose comme un processus d'apprentissage. Donc l'hypothèse nativiste est la seule recevable... » (op. cit., p. 224). Ce sont ici les fondements théoriques de la notion même d'auto-organisation cognitive qui sont mis en question.

Un second argument, avancé par Chomsky à propos de l'apprentissage des propriétés syntaxiques du langage, est que la structuration du stimulus est trop ambiguë pour qu'un enfant puisse y trouver l'information pertinente sans que sa propre structuration cognitive l'y ait prédisposé. C'est ici *la pauvreté du stimulus*, qui est invoquée pour justifier la nécessité de structures cognitives préformées. Un des exemples utilisés par Chomsky (1975) pour illustrer cette idée est la règle de formation des interrogatives simples en anglais à partir de déclaratives telle que « The man is here ». Comment l'enfant peut-il inférer les règles de la transformation qui permet de former l'interrogative « Is the man here ? » ? L'opération à

effectuer consiste-t-elle à traiter la phrase déclarative du début à la fin, mot par mot, jusqu'à rencontrer la première occurrence du mot « is » et transposer alors cette occurrence au début de la phrase ? Si les enfants faisaient cette inférence sur l'organisation de la phrase qu'ils entendent, qui paraît la plus simple, ils transformeraient la déclarative « The man who is here is tall » en « Is the man who here is tall ? ». Or ils ne font pas cette erreur. Chomsky en conclut qu'ils sont sensibles à l'organisation hiérarchique de la phrase et interprètent la transformation comme portant non pas sur la première occurrence du terme « is » mais sur celle qui suit le syntagme nominal. Selon lui, le fait que, parmi la multitude d'inférences possibles sur l'organisation de l'information contenue dans le langage, certaines soient d'emblée écartées, en dehors de toute instruction explicite, signifie que l'enfant dispose d'une structure cognitive spécifique au traitement du langage, innée, donc inscrite dans le patrimoine génétique de l'espèce humaine. C'est cette structure préformée, cet « organe » de traitement du langage, qui le rendrait sensible, par exemple, à l'organisation hiérarchique de la phrase, et lui permettrait ainsi d'inférer correctement les règles qui sont dépendantes de cette structure hiérarchique.

Un troisième argument découle du second. Selon Chomsky, des exemples comme celui qui vient d'être cité montrent que l'apprentissage du langage requiert des structures cognitives qui soient spécifiques à ce type de stimulus et il pense qu'il doit en être de même pour tous les domaines du développement. Ceci le conduit à rejeter la notion piagétienne de structure cognitive à finalité générale et, plus largement, l'idée d'un modèle général du développement : « Or je dis en fait que je ne vois pas du tout comment expliquer l'état final auquel on aboutit dans les termes d'un quelconque modèle général du développement suggéré par l'intelligence artificielle, les mécanismes sensori-moteurs ou quoi que ce soit d'autre » (ibid , p. 156). Le rejet d'un modèle général de développement par le courant innéiste s'est aussi inspiré des thèses de Fodor (1983) sur la modularité de l'esprit. Fodor a argumenté l'idée que dans le système cognitif, les informations entrantes sont traitées par des modules spécifiques à chacune des modalités sensorielles. Cloisonnés, encapsulés, et par conséquent à la fois indépendants les uns des autres et imperméables aux inférences du système central de traitement, ces modules auraient une architecture neuronale génétiquement fixée et adaptée au type de stimulus traité. Leur fonction serait de fournir, en sortie, une information recodée sous une forme commune et interprétable par le système central. Pour Fodor cependant, seuls les systèmes périphériques auraient une architecture modulaire, le système central étant, lui, généraliste. La notion de module préformé a néanmoins été étendue par d'autres chercheurs au système central lui-même. C'est ainsi qu'ont été envisagés, par exemple, des modules

spécifiques au traitement des informations relatives au domaine de la physique (Spelke, 1991), au domaine numérique (Gelman, 1990), ou au domaine social (Baron-cohen, 1995).

Ce renouvellement des thèses innéistes, allant de pair avec la mise au point de nouvelles méthodes d'expérimentation adaptées au répertoire comportemental des nouveau-nés (cf. chapitre 3, § B du volume de licence), ont fortement stimulé les recherches sur les capacités cognitives des bébés. De nombreuses études dans lesquelles les invariants mis en évidence par Piaget étaient étudiés dans des situations expérimentales modifiées, adaptées aux méthodes d'habituation et de réaction à la nouveauté, ont permis d'observer chez le bébé des compétences cognitives plus précoces qu'on ne le pensait. L'expérience de Baillargeon, Spelke et Wasserman (1985), par exemple, a mis en évidence une forme de permanence de l'objet dès 5 mois alors que Piaget, avec d'autres méthodes d'expérimentation, ne l'avait observée que vers un an et considérait cet invariant comme le produit de la construction des opérations sensori-motrices. On pourra trouver dans le chapitre 4 § A du volume de licence de nombreux exemples d'expériences ayant, comme celle-ci, décelé chez les bébés des compétences plus précoces que ne l'envisageait la théorie de Piaget. Les partisans de l'innéisme ont interprété ces résultats comme autant de confirmations de l'hypothèse selon laquelle les structures cognitives sous-jacentes à ces invariants n'étaient pas construites mais préformées.

1.3. Les critiques du modèle de l'équilibration

Des critiques ont aussi été adressées, plus spécifiquement, au modèle piagétien de l'équilibration des structures cognitives. L'article de Margaret Boden (1982), donne un idée de l'accueil fait à ce modèle par la communauté des chercheurs en intelligence artificielle³. La tonalité générale des reproches qu'elle lui fait est d'être trop vague et trop abstrait pour pouvoir donner lieu à une quelconque modélisation computationnelle, seule susceptible à ses yeux d'en éprouver la faisabilité. A propos des trois formes d'équilibration mentionnées plus haut, elle écrit : « Quelles sont au juste les compensations , régulations, ou négations impliquées dans un quelconque cas particulier ? Et comment au juste contribuent-elles au contrôle d'ensemble de la fonction cognitive ? Le texte de Piaget n'est pas suffisamment précis pour répondre à ces questions et même pour les formuler adéquatement ». Elle dit aussi son scepticisme quant à la possibilité de formuler un modèle général de l'équilibration. Beaucoup de chercheurs en intelligence artificielle, dit-elle, ont abandonné l'espoir de fonder

³ Pour une critique du modèle de l'équilibration du point de vue de la psychologie développementale, on peut aussi voir Lautrey (1981).

les processus de l'intelligence sur des principes généraux de raisonnement : « Dans de nombreux cas, l'intelligence paraît en fait reposer sur de grandes quantités de connaissances spécifiques à la tâche, qui parfois sont incorporées dans le hardware et parfois doivent être apprises ». Cette critique rejoint celle qui a conduit les partisans de l'innéisme à affirmer l'impossibilité d'une théorie générale de l'apprentissage ou du développement.

Dans l'article cité plus haut, Boden formule aussi des critiques plus techniques. Elle reproche à Piaget une vue trop hiérarchisée et trop statique de l'organisation cognitive. Elle oppose à cette conception la notion d'hétérarchie qui a été développée en intelligence artificielle pour implémenter une forme de contrôle plus souple qu'elle décrit dans ces termes : « la hiérarchie est assimilable à une bureaucratie rigide, tandis que l'hétérarchie ressemble à un comité d'experts, dont chacun fait son propre travail à sa propre manière, sauf lorsqu'ils reconnaissent le besoin d'aide d'un autre expert face à une difficulté spécifique ».

Malgré ces critiques, Boden reconnaît à Piaget le mérite d'avoir formulé une question – celle de l'existence de mécanismes généraux d'auto-organisation – que se posent aussi tous les chercheurs en intelligence artificielle, mais à laquelle, à l'époque où elle publie cet article, ils n'ont pas de réponse. Ce qu'elle reproche à Piaget, au bout du compte, c'est « d'avoir pensé qu'en formulant le problème il en formulait la solution ».

1.4. Le renouveau du constructivisme

Ces différentes sortes de critiques ont grandement contribué au déclin de l'influence de la théorie de Piaget et du modèle de l'équilibration. Néanmoins, l'hypothèse constructiviste n'a pas été abandonnée pour autant. Plusieurs sortes de faits l'ont au contraire confortée, tout en la faisant évoluer.

Tout d'abord, la recherche sur les capacités précoces des bébés a considérablement enrichi les connaissances sur le développement en apportant des informations précieuses sur ses toutes premières étapes. Mais au fur et à mesure que s'est approfondie l'analyse des processus sous-jacents à ces capacités précoces cependant, leur interprétation est devenue plus complexe. L'analyse des processus sous-jacents a certes montré que Piaget avait sous-estimé l'importance des contraintes innées qui orientent précocement l'activité cognitive des bébés, mais elle a aussi montré que les capacités mises en évidence chez les bébés ne relèvent pas des mêmes processus que celles observées par Piaget à des âges différents et par des méthodes différentes. Elles laissent un champ très important à la construction ultérieure des structures cognitives, mais requièrent bien entendu un constructivisme renouvelé, intégrant ces apports de la recherche sur l'état initial du développement. On pourra trouver un exemple de cette

évolution dans l'interprétation des conduites des bébés dans le chapitre 9 § A de ce volume, à propose de la genèse du nombre.

L'évolution des connaissances dans le domaine de la génétique et dans celui des neurosciences renforce également la plausibilité de l'hypothèse constructiviste. Les informations apportées par le séquençage du génome rendent en effet peu vraisemblable que la structure des connexions cérébrales puisse être génétiquement programmée dans le détail. Le nombre de gènes portés par les chromosomes humains ne dépasse pas 40 000, dont 20% seulement, soit 8000 s'expriment dans le cerveau et sur ces 8000, on estime à la moitié environ, donc 4000, ceux qui sont impliqués dans la gestion des conduites ? Sachant que 1000 codent pour les récepteurs olfactifs, 1500 pour les autres sensibilités chimiques, etc. , il en reste probablement trop peu pour coder dans le détail la quantité de connexions neuronales qu'exigeraient de nombreuses structures cognitives très spécifiques (Roubertoux et Carlier, 2002). Allant dans le même sens, la plasticité cérébrale s'avère beaucoup plus importante qu'on ne le pensait. Pour n'en donner qu'un exemple, les méthodes d'imagerie cérébrale ont permis de montrer que lorsque des sujets aveugles de naissance et ayant appris le Braille effectuent une tâche de discrimination tactile de caractères en Braille, leur cortex visuel primaire est activé (Sadato et al., 1996). De surcroît, lorsqu'une stimulation magnétique transcrânienne* est délivrée dans le cortex visuel primaire pendant qu'ils exécutent cette tâche, elle induit des erreurs et crée des distorsions de leur perception tactile (Cohen et al., 1997°). Cette seconde expérience démontre clairement que l'activation observée correspond bien à un rôle fonctionnel du cortex visuel dans certaines tâches de discrimination tactile chez les aveugles. Le cortex visuel primaire a pourtant, chez les sujets voyants, une structure qui paraît très spécifiquement adaptée au traitement des informations en provenance de la rétine (structure rétinotopique*), dont on pourrait penser qu'elle est génétiquement spécifiée pour remplir cette fonction. Or il s'avère qu'en l'absence d'informations provenant de la rétine, cette structure neuronale se configure de façon adaptée au traitement d'autres types d'informations sensorielles.

Enfin, la modélisation du développement a elle aussi évolué. Dans sa critique du modèle de l'équilibration, Boden (1982) écrivait que l'approche computationnelle fournirait une opérationnalisation plus rigoureuse des questions soulevées par le concept d'équilibration, mais elle ajoutait : « jusqu'ici cependant, l'apprentissage et le développement échappent à l'approche computationnelle⁴ » (op. cit. p. 165). Depuis, deux approches computationnelles

⁴ Traduction libre de « As yet however, learning and development are not understood in computational terms ».

de l'apprentissage et du développement ont été proposées, la modélisation connexionniste et la modélisation des systèmes dynamiques non linéaires. L'une et l'autre opérationnalisent, avec une logique différente, la notion d'auto-organisation qui était au centre du modèle piagétien de l'équilibration. Le concept d'auto-organisation reste un fondement essentiel du constructivisme, c'est donc à cette évolution là de la recherche en psychologie du développement qu'est consacré le reste de ce chapitre. L'objectif est d'examiner, à propos du connexionnisme d'abord, puis des systèmes dynamiques dans un second temps, dans quelle mesure l'application au domaine du développement de ces nouvelles formes de modélisation de l'auto-organisation peut contribuer à renouveler l'approche constructiviste.

2. La modélisation connexionniste du développement

2.1. Introduction au connexionnisme.

Le connexionnisme est une forme de modélisation du fonctionnement cognitif qui s'inspire de certaines caractéristiques du fonctionnement cérébral. Dans le cerveau, l'unité de base du traitement de l'information est le neurone. Par ses terminaisons dendritiques, chaque neurone est en contact avec d'autres neurones qui lui transmettent des excitations plus ou moins intenses pouvant être soit activatrices, soit inhibitrices. Si l'ensemble des excitations reçues par un neurone dépasse un certain seuil, celui-ci déclenche des potentiels d'action dont la fréquence est d'autant plus importante que l'excitation est intense. Le neurone ainsi activé transmet à son tour son activation aux neurones avec lesquels il est lui-même en contact et ainsi de suite... Les performances cognitives du cerveau ne résident pas dans les capacités de traitement de l'information, très élémentaires, de chacun des neurones pris isolément mais dans la plasticité des réseaux que forment les milliards de connexions entre ces neurones (on estime que le nombre de neurones d'un cerveau humain est de l'ordre de 10^{11} et le nombre de leurs connexions de l'ordre de 10^{14}).

L'idée de modéliser le fonctionnement cognitif en mimant par des réseaux de neurones formels l'architecture et le fonctionnement des réseaux neuronaux biologiques a commencé à prendre corps dans les années quarante. Les étapes les plus marquantes du développement de cette forme de modélisation du fonctionnement cognitif ont été les contributions de Mc Culloch et Pitts (1943), de Hebb (1949), de Rosenblatt (1958) et de Rumelhart et McClelland (1986). Mc Culloch et Pitts se sont appuyés sur la logique binaire pour modéliser le fonctionnement de réseaux de neurones formels. Chaque neurone était considéré comme un automate à seuil qui s'active quand la somme des signaux d'entrée dépasse une valeur

donnée. Par ailleurs, chaque neurone ne pouvait recevoir que deux types de connexions synaptiques, activatrices ou inhibitrices (la logique binaire étant implantée dans le réseau en donnant la valeur 1 à toute connexion activatrice et la valeur 0 à toute connexion inhibitrice). Pour illustrer ce fonctionnement par un exemple simple, l'opérateur logique « et » était construit en mettant au neurone de sortie un seuil d'activation égal au nombre de neurones d'entrée avec lesquels il était connecté. Ainsi, le produit de l'opérateur logique « et » était 1, comme dans la logique des prédicats, si et seulement si toutes les connexions d'entrée étaient activées (et avaient donc elles aussi la valeur 1). Une des limites des réseaux de ce type était qu'ils n'apprenaient pas. Chaque problème nécessitait que l'on configure un réseau spécifiquement dévolu à sa résolution. La contribution de Hebb (1949) a précisément été de proposer une règle d'apprentissage inspirée de la neurobiologie. En simplifiant un peu la formulation de cette règle, l'idée était que lorsque deux neurones A et B sont excités simultanément de façon répétée, la force de leur connexion augmente. Le fondement neurobiologique de cette règle réside dans le phénomène de potentialisation à long terme des synapses de neurones co-activés (cf. le chapitre « neurones et synapses » dans le volume de licence traitant des bases neurophysiologiques du fonctionnement cognitif). L'utilisation d'algorithmes implémentant cette règle dans le fonctionnement des réseaux de neurones formels rendait ceux-ci capables d'apprentissage par la modification des poids des connexions entre neurones en fonction de l'expérience. Le premier modèle opérationnel de réseau neuronal capable d'apprentissage, le perceptron, est dû à Rosenblatt (1958). Le perceptron avait été conçu pour résoudre des problèmes de reconnaissance de formes. Des cellules d'entrée, dites sensibles, constituaient une rétine artificielle. Elles étaient connectées à des cellules de sortie dites associatives, elles-mêmes connectées à des cellules de réponse à seuil, prenant la valeur 1 lorsque la forme cible était reconnue et 0 lorsqu'elle ne l'était pas. La règle d'apprentissage implémentée dans le perceptron était différente de celle de Hebb, dans la mesure où les poids synaptiques étaient modifiés en fonction de l'écart entre la réponse donnée par le réseau et la réponse attendue. Le succès du perceptron a été de courte durée. Il est apparu assez vite que les réseaux neuronaux de ce type ne pouvaient apprendre à résoudre qu'une classe restreinte de problèmes, ce qui a conduit la plupart des chercheurs à se désintéresser un temps de la modélisation connexionniste. Celle-ci est revenue sur le devant de la scène avec la publication de *Parallel distributed processing* (Rumelhart et McClelland, 1986). Le groupe de chercheurs ayant contribué à cet ouvrage y démontrait, entre autres, que les limites du perceptron pouvaient être dépassées en utilisant des réseaux multicouches, c'est à dire en intercalant une ou plusieurs couches d'unités intermédiaires (appelées aussi unités

cachées) entre la couche d'unités d'entrée et la couche d'unités de sortie. Les principes de base du fonctionnement de ces réseaux seront présentés en décrivant les caractéristiques de leur unité la plus élémentaire, le neurone formel, la fonction de transfert de l'activation, l'architecture du réseau, et son fonctionnement.

Neurone formel. Dans la figure 1.1, le cercle schématise un neurone formel. Dans la littérature connexionniste, on désigne parfois aussi le neurone formel comme une cellule, une unité de traitement, ou un nœud du réseau. Dans ce qui suit, nous parlerons d'unité de traitement pour bien marquer qu'il n'existe que de lointaines analogies entre les neurones formels et les neurones biologiques dont ils s'inspirent.

 Insérer ici la figure 1.1

L'activation de l'unité représentée par un cercle dans la figure 1.1 est déterminée par les connexions entrantes, activatrices ou inhibitrices, qui la relient à d'autres unités. Dans le formalisme généralement adopté, la valeur prise par l'activation d'une unité est symbolisée par la lettre a et le poids de la connexion entre deux unités est symbolisé par l'expression w_{ij} , où l'indice i désigne l'unité à laquelle on s'intéresse et l'indice j les unités dont elle reçoit l'influence. Dans la figure 1.1, l'unité i , figurée par un cercle, est connectée avec trois unités entrantes, numérotées de 1 à 3. Parmi ces trois connexions, deux sont activatrices, celles provenant des unités 1 et 2, figurées par des flèches pointant vers le cercle, et une est inhibitrice, celle provenant de l'unité 3, dont la terminaison est un point. L'influence de chacune de ces trois connexions sur l'activité du neurone i dépend du niveau d'activation, a , de l'unité entrante, et du poids (ou force), w , de sa connexion avec le neurone i . Les valeurs des activations sont représentées par des nombres réels variant le plus souvent entre 0 et 1, et les valeurs des poids des connexions par des nombres réels positifs (lorsque la connexion est activatrice) ou négatifs (lorsqu'elle est inhibitrice). L'influence d'une connexion entrante j sur l'unité i se calcule donc en faisant le produit $w_{ij}a_j$ où a_j est le niveau d'activation de l'unité j et où w_{ij} est le poids de sa connexion avec l'unité i . On appelle net_i l'influence totale que l'unité i reçoit du réseau par l'ensemble de ses connexions entrantes, et on la calcule en faisant la somme des produits $w_{ij}a_j$ pour les j connexions entrantes. C'est ce qui est indiqué, figure 1.1, dans le cercle qui représente l'unité i . Si, par exemple, les valeurs d'activation des unités de la figure 1.1 étaient $a_1 = 0,60$, $a_2 = 0,20$, $a_3 = 0,80$ et les forces de leurs connexions avec l'unité i respectivement $w_{i1} = +2$, $w_{i2} = +5$ et $w_{i3} = -2$, on obtiendrait $net_i = (0,60 \times 2) + (0,20 \times 5) + (0,80 \times -2) = 0,60$. Comme cela est indiqué sur la figure 1.1, l'activation a_i à la

sortie de l'unité i est fonction de la valeur net_i reçue en entrée. Il reste à choisir cette fonction f de transfert de l'activation.

Fonction de transfert. Dans les réseaux de type perceptron, la fonction choisie était en général une fonction à seuil: si la valeur de net_i était en dessous du seuil choisi, l'unité n'était pas activée (a_i restait égal à 0) et si net_i dépassait la valeur seuil, a_i prenait la valeur 1 et le neurone était activé. La fonction de transfert entre l'information reçue par l'unité et son activation en sortie était donc en tout ou rien. Dans les réseaux de la génération suivante, on a le plus souvent lié l'activation a_i à net_i par une fonction continue et non linéaire. Plus précisément, dans toutes les recherches dont il sera question plus loin la fonction de transfert qui a été utilisée est la fonction logistique⁵, dont la courbe est représentée dans la figure 1.2.

Insérer ici la figure 1.2

L'avantage de cette fonction est d'être peu sensible aux petites variations de net_i dans les zones où sa valeur, négative ou positive, est élevée (dans ces zones, la transformation opérée par la fonction est pratiquement de type tout ou rien), mais au contraire très sensible à de petites variations de net_i dans la zone où sa valeur est proche de 0 (dans cette zone, la pente de la courbe est très forte). Ce caractère non linéaire de la fonction peut donner lieu à des changements brusques dans le comportement du réseau qui, comme on le verra plus loin, sont de nature à simuler le franchissement de stades de développement.

Architecture du réseau. La figure 1.3 donne un exemple simple de réseau multicouches comportant une couche d'unités d'entrée, une couche d'unités intermédiaires, parfois appelée couche cachée (hidden layer en anglais), et une couche d'unités de sortie.

Insérer ici la figure 1.3

Les unités d'entrée codent les informations issues de l'environnement, les unités de sortie codent les comportements par lesquels le réseau réagit à cet environnement, et les unités intermédiaires codent la représentation abstraite que le réseau se construit du problème auquel il est confronté. Le réseau représenté en figure 1.3 est non bouclé et à propagation avant (feed-forward), c'est à dire qu'il s'agit d'un réseau dans lequel, comme l'indiquent les flèches, l'information va des unités d'entrée vers les unités intermédiaires et de celles-ci aux

⁵ La formule de cette fonction logistique est $a_i = 1 / (1 + e^{-net_i})$

unités de sortie, sans revenir en arrière et sans connexions latérales entre les unités d'une même couche. Ce réseau est en outre à connexion complète puisque chaque unité d'une couche est connectée à toutes les unités de la couche suivante. Une autre grande catégorie de réseaux est celle des réseaux récurrents, dans lesquels les connexions forment des boucles par lesquelles l'information peut revenir à des unités par lesquelles elle est déjà passée, par exemple des unités de sortie vers les unités d'entrée, entre unités d'une même couche, ou d'une unité vers elle-même.

Le fonctionnement des réseaux neuronaux. La modélisation connexionniste suppose, de la part du chercheur, une succession de choix, en principe justifiés par ses hypothèses sur la nature de l'apprentissage qu'il cherche à modéliser. Après le choix de l'architecture du réseau viennent les choix qui vont déterminer son fonctionnement. L'un d'entre eux est relatif au codage : le codage des caractéristiques de l'environnement par les unités d'entrée et le codage du comportement du réseau par les unités de sortie. Un autre choix important est celui des valeurs à donner aux poids des connexions au début de l'apprentissage pour faire en sorte que le réseau n'ait, au départ de la simulation, aucune connaissance sur ce qu'il est censé apprendre. La solution généralement adoptée consiste à affecter aux poids des connexions des valeurs aléatoires faiblement dispersées autour de zéro. Il reste à choisir ensuite l'algorithme d'apprentissage par lequel les poids des connexions vont être modifiés par l'expérience. On distingue de ce point de vue deux grandes catégories de réseaux, ceux qui sont supervisés et ceux qui ne le sont pas. Les réseaux dits supervisés sont ceux dans lesquels l'erreur, estimée par l'écart entre les activations observées dans les unités de sortie et les activations qui seraient attendues en cas de bonne réponse, est utilisée pour corriger en retour les poids des unités situées dans les couches antérieures. Les réseaux dits non supervisés sont ceux qui n'apprennent qu'à partir des corrélations détectées entre les différentes caractéristiques de l'environnement, sans que le réseau reçoive aucune information sur l'écart entre sa réponse et ce que serait une réponse correcte. L'algorithme d'apprentissage utilisé dans les réseaux supervisés est un algorithme de rétropropagation de l'erreur. Le principe général en est d'estimer l'erreur faite par le réseau en calculant, pour chaque unité i , l'écart $e_i = a_i - o_i$ où a_i est la valeur *attendue* de l'activation de i et o_i sa valeur *observée*, et d'appliquer ensuite aux poids des connexions de toutes les unités j reliées à i une correction proportionnelle à e_i (en diminuant donc leurs poids lorsque l'activation de i est trop forte et en les augmentant lorsqu'elle est trop faible). Plus précisément, cette correction tient compte de la dynamique de l'évolution de l'erreur et de la dynamique de l'évolution des poids des unités j au cours des essais précédents (elle est d'autant plus forte que la pente de l'évolution de l'erreur est plus

fortement liée à la pente de l'évolution du poids de l'unité j). Le calcul de l'erreur e_i est relativement facile pour les unités de sortie, car on connaît la valeur d'activation attendue à la sortie du réseau (c'est le comportement que l'on cherche à lui faire apprendre), mais il est plus subtil pour les unités de la couche intermédiaire dont on ne connaît pas les valeurs d'activation attendues (si on les connaissait, le problème serait résolu). Disons seulement que dans ce cas, l'heuristique adoptée est de considérer que la part d'erreur dont une unité intermédiaire est responsable dans une unité de sortie donne la mesure de la correction à effectuer sur les poids des connexions reliant, en amont, cette unité intermédiaire aux unités d'entrée (d'où le terme de rétropropagation de l'erreur). La formule mathématique⁶ de cet algorithme d'apprentissage comporte une constante η par laquelle est multipliée la valeur des corrections faites sur les poids. Cette constante, dont la valeur peut en principe varier entre 0 et 1, mais qui est en général très faible, permet de régler l'ampleur moyenne des corrections apportées aux poids des connexions à chacune des itérations, elle définit ainsi le pas d'apprentissage. Le choix de la valeur de la constante η est délicat : un pas trop rapide au début peut bloquer la descente du gradient d'erreur dans un minimum local, un pas trop lent peut faire que l'apprentissage ne décolle pas. Autre choix important, celui des exemples avec lesquels le réseau est entraîné, car ceux-ci influencent bien sûr l'apprentissage. On cherche en général à échantillonner les exemples de façon à ce qu'ils soient représentatifs des différentes situations à partir desquelles l'apprentissage ciblé peut être généralisé. Chaque nouvel exemple codé par les unités d'entrée donne lieu à une nouvelle propagation des activations dans les connexions. Plusieurs milliers d'itérations sont souvent nécessaires pour faire simuler un apprentissage par un réseau et toutes les tentatives de simulation des apprentissages humains n'aboutissent pas, loin de là.

Telles qu'elles se dégagent de cette présentation succincte, les caractéristiques essentielles des réseaux neuronaux sont donc de modéliser une forme de traitement de l'information qui est effectuée en *parallèle* par toutes les unités du réseau et qui aboutit à une forme de représentation qui est *distribuée* sur l'ensemble des connexions entre ces unités. Le traitement est dit parallèle car l'activation des unités d'entrée par un stimulus est propagée *simultanément* à l'ensemble des unités du réseau par l'ensemble des connexions qui les

⁶ La correction Δw_{ij} à effectuer sur les poids est donnée par la formule $\Delta w_{ij} = -\eta \left(\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \right)$ où E est l'erreur totale calculée sur l'ensemble des unités de sortie du réseau, $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$ la dérivée partielle de l'erreur par rapport au poids, qui donne la relation entre l'évolution de l'erreur et l'évolution des poids au cours des itérations, et η une constante de proportionnalité que l'on appelle le pas d'apprentissage. On pourra trouver une présentation simplifiée de la formalisation mathématique de l'algorithme de rétropropagation, en langue anglaise, dans Elman et al (1996), p. 66 et suivantes, ou dans Munakata et Mc Clelland (2003), p. 415, et une présentation plus complète, en langue française, dans Rennard (2006), p. 78 et suivantes.

relient. La représentation de l'information acquise ainsi est dite *distribuée* car la connaissance qui en résulte réside dans la configuration particulière que prend la matrice des poids des connexions lorsque le réseau est confronté à la situation qui a donné lieu à l'apprentissage, elle est donc répartie sur l'ensemble des connexions. L'apprentissage est effectué par un processus de modification progressive de l'ensemble des poids des connexions. Ces caractéristiques contrastent fortement avec celles du traitement symbolique de l'information, qui est au contraire *séquentiel* et *local*. Local car il est formalisé comme un processus de manipulation de symboles dont chacun peut être localisé à *un nœud* singulier d'un réseau sémantique; séquentiel car les opérations par lesquelles l'information portée par les différents symboles est manipulée sont réalisées *l'une après l'autre*.

Le couplage d'une forme de traitement parallèle distribué avec la non linéarité de la fonction de transfert de l'information dote les réseaux neuronaux de capacités d'auto-organisation qui en font des candidats intéressants pour la modélisation des processus d'apprentissage et de développement.

2.2. Un exemple de modélisation connexionniste du développement cognitif.

James McClelland, l'un des co-auteurs de l'ouvrage *Parallel distributed processing*, est le premier à avoir cherché à appliquer l'approche connexionniste à la modélisation des stades de développement. La situation qu'il a choisie pour cette simulation du processus de développement est la résolution des problèmes que pose l'équilibrage d'une balance, qui est un grand classique de la littérature développementale. Les stades de développement observés dans cette situation ont été décrits par Piaget et Inhelder dans le cadre de leur approche structuraliste du développement (voir p. 51 du volume de licence), par Siegler (1976) dans le cadre d'une modélisation du développement en termes d'acquisition de règles de traitement de l'information de complexité croissante, et par les auteurs néo-piagetiens, qui ont cherché à montrer que les étapes développementales observées dans la résolution de ce problème correspondaient aux étapes de l'accroissement de la mémoire de travail (voir encadré 2.6 p. 86 et p. 89 et suivantes du volume de licence). Il était donc particulièrement intéressant de voir si un réseau de neurones formels, qui ne construit pas de structures logico-mathématiques, qui ne mémorise pas de règles, et qui ne comporte pas de système exécutif, est capable d'apprendre à résoudre ce type de tâche et passe, au cours de cette simulation, par les mêmes étapes que celles observées chez les enfants.

Le dispositif et les faits de référence retenus par McClelland sont ceux de l'étude de Siegler (1976). Rappelons les d'abord brièvement. Le dispositif est une balance dont chacun

des deux fléaux comporte une série de tiges. Celles-ci sont à des distances égales de part et d'autre du point d'équilibre (voir schéma p. 51 du volume de licence). Sur ces tiges peuvent être empilées des rondelles de poids équivalent, de telle sorte qu'un item peut être caractérisé par la configuration des poids et des distances: nombre de poids empilés sur une tige et distance de cette tige au point d'équilibre (exprimée par le rang de la tige par rapport au point d'équilibre), ceci pour chaque côté de la balance. La balance est bloquée en position horizontale par deux cales et la tâche du sujet est de dire ce qui se passerait si on enlevait les cales: la balance pencherait-elle d'un côté, si oui lequel, ou resterait-elle en équilibre ? La réponse correcte peut être trouvée en calculant le moment des forces, c'est à dire en faisant le produit du poids par la distance de chaque côté du point d'équilibre et en comparant ces produits : s'ils sont égaux il y a équilibre et s'ils sont inégaux, la balance penche du côté du plus important.

Avec ce dispositif, Siegler a trouvé que le comportement des enfants pouvait être modélisé par une succession de règles de complexité croissante, intégrant progressivement les deux dimensions en jeu, le poids et la distance. Initialement (règle I), les enfants se focalisent exclusivement sur le poids et répondent que la balance penchera du côté où le poids est le plus important. Plus tard (règle II), ils commencent à prendre en compte la dimension distance, mais seulement quand les poids sont égaux. L'étape suivante (règle III) est caractérisée par une prise en compte de la distance y compris quand les poids sont inégaux, mais sans parvenir à combiner les deux dimensions lorsqu'elles sont en conflit, c'est à dire lorsque le plus grand poids est d'un côté de la balance et la plus grande distance de l'autre ; dans ce cas, l'enfant répond au hasard. Enfin, la dernière étape, plus rarement trouvée, correspond à la réponse correcte décrite plus haut (règle IV), qui permet de résoudre tous les items.

 Insérer ici la figure 1.4

La figure 1.4 présente, dans sa partie gauche, l'architecture du réseau que McClelland a entraîné à résoudre le problème de la balance. Il s'agit d'un réseau à trois couches, supervisé et à propagation avant. La couche d'entrée comporte vingt unités, représentées par des ronds de petite taille dans la figure 1.4 et disposées sur deux lignes. La ligne du bas, désignée par la lettre R (Right) en son milieu, code la configuration des poids et des distances sur le côté droit de la balance. La ligne du haut, désignée par la lettre L (left) en son milieu, code le côté gauche. Dans l'une et l'autre ligne, les cinq unités codant les poids sont groupées dans la

partie gauche et les cinq unités codant les distances sont groupées dans la partie droite. Les unités de couleur noire sont celles qui sont activées dans l’item pris en exemple (cf. le schéma de la balance représenté en-dessous du réseau). Le nombre de poids peut aller de 1 à 5 et la distance de la tige au point d’équilibre de 1 à 5 aussi. Chaque item peut donc être codé dans les unités d’entrée en donnant la valeur d’activation 1 aux quatre unités concernées et en donnant la valeur d’activation 0 aux autres.

La couche de sortie comporte deux unités désignées par les lettres L (left) et R (right). Une activation de l’unité L plus forte que celle de l’unité R signifie que, pour la configuration de poids et de distances codée dans les unités d’entrée, le réseau répond que la balance devrait pencher à gauche ; une activation de l’unité R plus forte que celle de l’unité G signifie l’inverse, et une activation équivalente des deux unités de sortie correspond à la réponse équilibre (en fait, on considèrerait que la réponse était « équilibre » tant que l’écart entre les activations des deux unités de était inférieur à 0,333).

Enfin, la couche intermédiaire ou cachée (hidden) comporte quatre unités. On remarquera que les connexions entre les unités d’entrée et les unités intermédiaires ne sont pas complètes: les unités codant les poids ne sont connectées qu’aux deux unités intermédiaires de gauche (pour la clarté de la figure, toutes les flèches ne sont pas représentées, mais seulement évoquées) et les unités codant les distances ne sont connectées qu’aux deux unités intermédiaires de droite. C’est un point sur lequel nous reviendrons. Par contre, chacune des quatre unités intermédiaires est connectée aux deux unités de sortie.

L’entraînement du réseau portait sur des items tirés de l’ensemble des 625 problèmes résultant du croisement des 25 combinaisons possibles des poids (1 à 5 du côté gauche croisés avec 1 à 5 du côté droit) avec les 25 combinaisons possibles des distances (tiges des rangs 1 à 5 à gauche croisées avec tiges des rangs 1 à 5 à droite). Au départ, les poids des connexions du réseau étaient fixés au hasard dans un empan de valeurs variant entre $-0,5$ et $+0,5$. L’entraînement qui débutait ensuite était partagé en « époques » de cent itérations chacune. Dans chaque époque, les cent items présentés au réseau étaient tirés au hasard parmi les 625 possibles et codés l’un après l’autre dans les unités d’entrée, chacun donnant lieu à une nouvelle itération de la propagation des activations dans le réseau. Il faut aussi mentionner ici un point important sur lequel nous reviendrons également: dans cet échantillonnage, la fréquence des problèmes dans lesquels la distance au point d’équilibre était la même à gauche et à droite (donc les problèmes de nature à faire ressortir l’effet du poids) était multipliée par cinq. A partir de la réponse donnée par le réseau à chaque item, l’écart entre les valeurs d’activation observées dans les deux unités de sortie et les valeurs attendues en cas de bonne

réponse était calculé et entré dans l'algorithme de retropropagation décrit plus haut, pour calculer les corrections de poids à effectuer sur chacune des connexions du réseau en vue de réduire cet écart (le pas d'apprentissage utilisé était $\eta = 0,075$). Ces modifications n'étaient cependant pas faites après chaque itération, mais accumulées pendant les cent essais d'une époque, les poids n'étant corrigés qu'à la fin de cette époque. Une fois effectuée la correction des poids résultant de l'apprentissage réalisé sur une époque, une série de 24 problèmes tests permettant de diagnostiquer le type de règle de résolution simulé au cours de cette époque était soumise au réseau. Puis une nouvelle époque était démarrée et ainsi de suite.

Les diagnostics faits à la fin de chaque époque ont permis de montrer que l'apprentissage effectué par le réseau suit, dans ses grandes lignes, les mêmes étapes que celles observées par Siegler dans le développement de l'enfant⁷. Un comportement diagnostiqué comme correspondant à la règle I (prise en compte du poids seulement) apparaît vers l'époque 20 et reste stable jusque vers l'époque 40, où apparaît un comportement correspondant à la règle II (prise en compte de la distance quand les poids sont égaux), jusque vers l'époque 50 où apparaît le comportement correspondant à la règle III. On trouve par la suite des époques où la règle IV est diagnostiquée, mais celle-ci ne se stabilise pas et on observe de fréquentes régressions à la règle III. Mc Clelland en conclut que la règle IV relève sans doute d'une forme de raisonnement explicite que son modèle connexionniste ne peut simuler. En revanche, le réseau simule convenablement la façon dont la dimension qui n'est pas dominante au départ, la distance, est progressivement intégrée dans les jugements aux étapes suivantes.

Une des contributions intéressantes de cette simulation est de montrer comment un processus de changement continu – ici une modification progressive des poids dans les connexions du réseau – peut néanmoins donner lieu, au niveau du comportement du réseau, à des changements brusques simulant les stades de développement. La figure 1.4 donne un aperçu de l'évolution des forces des connexions relatives aux poids et aux distances au cours des cent époques de la simulation (remarquons au passage que cent époques correspondent à 10 000 itérations !). L'insensibilité initiale laisse place à une faible sensibilité dont l'intensité s'accroît ensuite régulièrement, plus rapidement et plus précocement pour la dimension poids

⁷ au cours des toutes premières époques, le réseau répond « équilibre » pour tous les problèmes. C'est une étape que l'on ne trouve pas chez les enfants et qui est due au fait qu'avec des poids de valeurs faibles fixées de façon aléatoire au début, les unités de sortie ne sont que faiblement activées et le sont de façon à peu près équivalente. A ce stade de l'entraînement, la réponse « équilibre » ne traduit que l'absence de toute représentation du problème dans la configuration des poids.

que pour la dimension distance. Néanmoins on peut remarquer qu'avant l'époque 20, à un moment où la règle I n'est pas encore apparue dans le comportement, la force des connexions relatives au poids a commencé à augmenter et que, de la période 20 à la période 40, où la règle I est appliquée, la force des connexions relatives à la distance augmente régulièrement sans se traduire encore dans le comportement. Le changement brutal qui apparaît à un certain moment, par exemple l'apparition d'un comportement correspondant à la règle II vers l'époque 40, est dû à la non linéarité de la fonction de transfert: à partir du moment où les connexions relatives à la distance atteignent les valeurs critiques où la pente de la fonction de transfert est forte, la force de leurs connexions s'accélère plus rapidement et commence à peser sur l'activation des unités de sortie.

Cette simulation a bien entendu aussi un certain nombre de limites. Les deux dimensions à prendre en compte dans l'apprentissage, la distance et le poids, sont déjà présentes dans l'architecture du réseau au départ de l'apprentissage (elles sont codées par des unités intermédiaires différentes). Par ailleurs, la dominance de la dimension poids est incluse dans la répartition des items d'entraînement (en multipliant par 5 la fréquence des items dans lesquels les distances sont égales, on a fait en sorte que la dimension poids émerge la première). Ces deux remarques soulignent qu'une partie de la solution du problème est déjà dans l'état initial du réseau (son architecture) et de l'environnement (exemples d'apprentissage) auquel il est confronté.

2.3. Apports du connexionnisme à l'approche constructiviste : quelques exemples

L'approche connexionniste du développement a apporté des éclairages nouveaux sur certains des obstacles auxquels s'est heurté le constructivisme piagétien. Elle a par exemple conduit à repenser les questions relatives à l'innéité, à la modularité de l'esprit, ou à la distinction entre apprentissage et développement.

2.3.1. Repenser l'innéité.

L'approche connexionniste a parfois été considérée comme un retour à l'empirisme. A première vue, l'état initial d'un réseau neuronal peut en effet apparaître comme une sorte de tabula rasa sur laquelle l'expérience suffit, via la modification des poids des connexions, à imprimer une structure cognitive. C'est une vue erronée de la modélisation connexionniste. Dans son état initial, le réseau est caractérisé par son architecture et par un mode de fonctionnement, qui contribuent l'un et l'autre à structurer l'expérience. Ceci peut être illustré à propos de l'exemple de modélisation du développement dans la résolution du problème de

la balance. Comme on vient de le voir, McClelland a choisi de connecter les unités d'entrée codant les poids et celles codant les distances à des unités différentes de la couche intermédiaire. La représentation des deux dimensions sur lesquelles se produisent les variations – ici poids et distances - est donc inscrite dans la structure du réseau à l'état initial. L'apprentissage ne porte que sur la façon de prendre en compte et de combiner ces deux dimensions. Si McClelland avait choisi une structure de connexion complète, dans laquelle toutes les unités d'entrée auraient été connectées à toutes les unités de la couche intermédiaire, le réseau aurait eu aussi à apprendre la distinction entre les deux dimensions, ce qui aurait changé la nature de l'apprentissage et probablement affecté son résultat. Plus généralement, les caractéristiques de l'architecture du réseau (codage de la situation par les unités d'entrée, nombre de couches intermédiaires, présence ou absence de connexions récurrentes, structure des connexions, etc.) et de son fonctionnement (algorithme d'apprentissage, pas de l'apprentissage, etc.) exercent des contraintes fortes sur le processus d'apprentissage.

Si certains chercheurs pensent que la modélisation connexionniste donne les moyens de repenser l'innéité, ce n'est donc pas parce que le connexionnisme conforterait une approche empiriste du développement. C'est en fait parce que cette forme de modélisation fournit une méthode pour reprendre, sur des bases quasi expérimentales, plus précisément sur la base de simulations, le débat sur ce qui est inné et ce qui est construit au cours du développement. Elle donne la possibilité de tester, au moyen de simulations, les hypothèses sur la structure minimale dont doit être doté un réseau neuronal dans son état initial pour apprendre comme le fait l'enfant. Comme il n'est pas envisageable de modifier l'état initial du cerveau pour voir les effets de ces modifications sur le développement, la simulation permet de faire ce genre d'expérience sur un réseau de neurones artificiels. C'est en ce sens que la modélisation connexionniste donne les moyens de repenser l'innéité. Ce point de vue a notamment été défendu, dans un ouvrage intitulé *Rethinking innateness* (Elman et al., 1996), par un groupe de chercheurs ayant adopté une perspective connexionniste pour étudier le développement. Ces auteurs écartent l'hypothèse que les représentations, c'est à dire, du point de vue de la modélisation connexionniste, les configurations des poids des connexions, puissent être innées, mais considèrent par contre la question de la structure du réseau à l'état initial comme une question ouverte, dont ils pensent qu'elle qui peut être tranchée par la simulation et l'expérimentation.

Cette façon de repenser l'innéité peut être illustrée par les travaux de Christiansen, Allen, et Seidenberg (1998). On se souvient qu'un des arguments théoriques avancés contre le

constructivisme par le courant néo-innéiste était celui dit de *la pauvreté du stimulus*: le jeune enfant détecte dans le stimulus des formes de structuration qui n'y sont pas manifestes, d'où l'hypothèse que le bébé effectue sur le stimulus un traitement de l'information guidé par certaines contraintes innées. La parole, par exemple, est un flux sonore dans lequel il existe des repères, des silences, permettant de le segmenter en phrases, mais pas de repères correspondant à la segmentation en mots. Pourtant, lorsqu'ils commencent à parler les enfants parviennent assez vite à faire cette segmentation lexicale. Quelle est nature de la contrainte qui leur permet d'opérer, dans ce flux continu, la segmentation des unités linguistiques correspondant aux mots? Cette contrainte est-elle spécifique au langage? Est-elle innée? Telles sont les questions auxquelles Christiansen et al. (1998) ont cherché à répondre. Selon eux, les enfants sont sensibles aux régularités statistiques des propriétés sublexicales de leur langage, par exemple aux régularités dans la séquence des phonèmes (c. à d. le fait qu'un phonème donné soit plus souvent suivi par certains phonèmes que d'autres, le fait que tous les phonèmes n'aient pas la même probabilité d'apparaître à la fin d'un mot, etc.). Ce serait la détection implicite de ces régularités statistiques qui amorcerait la segmentation lexicale du flux de parole. Pour le montrer, ils ont recueilli des extraits du langage adressé par des parents à leurs bébés et ont présenté ce flux de parole à un réseau neuronal dont les unités d'entrée codaient les phonèmes ainsi que les pauses correspondant aux fins de phrases. La tâche *directe* du réseau était de prédire, dans ses unités de sortie, le phonème susceptible de suivre celui qui venait d'être codé en entrée et de prédire aussi les pauses. La simulation a montré que, ce faisant, le réseau apprenait aussi une tâche *dérivée* consistant à segmenter le flux de parole au niveau des mots. Dans la mesure où le dernier phonème d'une phrase est aussi le dernier phonème d'un mot, le réseau utilisait cette régularité statistique pour anticiper la limite des mots (en prévoyant une pause) lorsqu'ils n'étaient pas à la fin des phrases. Cette tâche de segmentation lexicale était effectuée de façon plus fiable si un nouvel indice sublexical, l'accentuation des phonèmes, était ajouté en entrée. Christiansen et al. (1998) en concluent que les régularités statistiques issues des différents indices sublexicaux en interaction dans le flux de parole peuvent suffire à amorcer la segmentation lexicale dans un réseau capable de détecter ces régularités. Leur modélisation utilise un type de réseau récurrent capable de traiter l'information séquentielle (cf. Elman, 1990) mais dont l'architecture n'est pas spécifique au traitement du langage. Selon cette expérience de simulation donc, l'information contenue dans le stimulus n'est pas aussi pauvre qu'on aurait pu le penser et la segmentation des mots ne requiert pas nécessairement, au départ, une structure spécifique au langage. Elle requiert par contre une architecture permettant une forme

de traitement séquentiel appropriée à la détection des régularités statistiques qui se manifestent dans le déroulement temporel d'un flux sonore.

2.3.2. Modularité ou modularisation de l'esprit ?

La modularité de l'esprit (Fodor, 1983) est un autre argument théorique qui a été opposé au processus général de développement postulé par le constructivisme piagétien (voir l'introduction de ce chapitre). Cet argument est conforté par l'existence, chez l'adulte, de réseaux neuronaux qui ont toutes les caractéristiques de modules étroitement spécialisés dans le traitement d'un type spécifique de stimuli. Ce sont par exemple des réseaux de neurones différents qui prennent en charge différentes sortes de reconnaissance visuelle, celle des visages, celle des objets, celle des lettres et celle des mots. La question est cependant de savoir si la spécialisation étroite de ces réseaux est innée ou si elle résulte d'un processus de modularisation qui les spécialise au cours du développement. Compte tenu de la récence du système d'écriture dans l'histoire de l'humanité, il est difficile de croire que le module de reconnaissance des lettres et des mots est le résultat de pressions sélectives qui auraient inscrit dans le patrimoine génétique de l'humanité, au cours de la phylogenèse, cet organe spécialisé de traitement de l'écriture. Par contre, des modèles connexionnistes tels que celui qui a été présenté plus haut à propos de la segmentation des mots dans le flux de la parole, peuvent rendre compte de la façon dont un réseau ne comportant au départ que quelques contraintes assez générales – ici le traitement de l'information séquentielle – peut se spécialiser et s'automatiser par un processus général d'apprentissage fondé sur la reconfiguration des poids des connexions.

L'hypothèse de la modularisation de l'esprit au cours du développement a été en particulier défendue par Annette Karmiloff-Smith (1992, 1994). Cette hypothèse n'écarte pas pour autant toute forme d'innéisme, elle se propose plutôt d'intégrer les apports du courant néo-innéiste et ceux du constructivisme. Elle admet que certaines contraintes innées sur le fonctionnement cerveau, plus nombreuses que ne le supposait Piaget, prédisposent certains réseaux de neurones au traitement des stimuli relevant de tel ou tel grand domaine de la connaissance, comme le langage, l'espace, la quantification, etc. mais considère que les modules plus spécialisés résultent d'un processus d'apprentissage analogue à celui que simulent les modèles connexionnistes.

Pour étayer cette thèse, Annette Karmiloff-Smith s'est beaucoup appuyée sur l'étude du développement d'enfants chez qui une anomalie génétique a endommagé de façon sélective une partie du système cognitif. C'est le cas des enfants présentant le syndrome de

Williams, chez qui certains aspects du langage, de la cognition sociale, de la reconnaissance des visages sont relativement préservés, tandis que la cognition spatiale, la planification et la résolution de problèmes sont plus sévèrement atteints. Ansari et al. (2003) ont montré que malgré leur handicap dans le traitement de l'information spatiale, ces enfants parviennent à construire – avec retard - la notion de cardinalité du nombre qui, dans le développement typique, s'appuie fortement sur le traitement visuo-spatial des objets à dénombrer. Toutefois, une analyse fine des processus par lesquels ces enfants parviennent à construire la notion de cardinalité montre qu'ils s'appuient principalement sur le langage là où les autres enfants s'appuient principalement sur le traitement visuo-spatial. Dans le même ordre d'idées, bien que ces enfants réussissent aussi bien que les enfants d'un groupe contrôle dans les tâches de reconnaissance des visages, ils y parviennent par des processus différents. Alors que les autres enfants font un traitement global de l'information configurale du visage, les enfants présentant le syndrome de Williams en font un traitement analytique, trait par trait (Karmiloff-Smith, 1998). Ces exemples montrent qu'il existe une certaine souplesse dans la façon dont les réseaux de neurones se spécialisent. Lorsque ceux qui ont les caractéristiques générales les plus appropriées au traitement d'un certain type de stimuli sont hors service, d'autres, dont les caractéristiques générales sont moins appropriées peuvent remplir – parfois moins bien – la même fonction. Le traitement de l'information tactile par le cortex visuel primaire chez les aveugles, mentionné dans l'introduction, en est un exemple frappant. On observe alors des réorganisations du développement dans lesquelles la base neuronale des modules de traitement qui se mettent en place peut différer d'un enfant à l'autre. Cette forme de plasticité du développement est à rapprocher des phénomènes de vicariance entre processus cognitifs qui ont été étudiés par d'autres auteurs dans le cadre de l'approche différentielle (Lautrey, 1990, Reuchlin, 1978).

2.3.3. Les réseaux connexionnistes modélisent-ils l'apprentissage ou le développement ?

Dans les réseaux de neurones formels décrits plus haut, l'architecture est fixe, seuls les poids des connexions sont susceptibles de changer avec l'expérience. Les ajustements effectués au fur et à mesure des itérations sont des changements quantitatifs, continus, dans la force des connexions. Le caractère quantitatif, continu, de l'adaptation fait que les modèles connexionnistes sont en général considérés comme des modèles de l'apprentissage. Or dans les exemples présentés ci-dessus, ils sont considérés comme des modèles de développement. Peut-on vraiment assimiler le développement à l'apprentissage ? C'est l'avis de McClelland (1989). Selon lui, son modèle de simulation de la résolution du problème de la balance montre

qu'un même algorithme peut produire à la fois des changements quantitatifs et progressifs dans les poids des connexions et des changements brusques, qualitatifs, dans le comportement du réseau. Le premier de ces changements a les caractéristiques généralement attribuées à l'apprentissage, tandis que le second a celles qui sont généralement attribuées au développement. Le caractère non linéaire de la fonction de transfert des activations permet de rendre compte de ces deux types de changement par un même processus.

Le fait qu'un même algorithme puisse simuler les caractéristiques de l'apprentissage et celles du développement ne suffit cependant pas à démontrer la plausibilité psychologique et neuropsychologique de l'assimilation du développement à l'apprentissage. Du point de vue psychologique, la théorie de Piaget, par exemple, distingue deux types d'abstraction, l'abstraction empirique, dont la fonction est d'extraire les propriétés des objets, et l'abstraction réfléchissante, dont la fonction est d'extraire les propriétés des coordinations d'actions. La première est engagée dans l'apprentissage empirique des régularités présentes dans l'environnement physique et social, tandis que la seconde est engagée dans la construction de structures cognitives nouvelles et donc dans le développement. Il est vrai que cette distinction théorique n'est pas toujours facile à cerner dans la mesure où les possibilités d'abstraction empirique sont subordonnées aux structures cognitives dont dispose le sujet, donc à l'abstraction réfléchissante. Il en résulte que, dans la théorie de Piaget, l'apprentissage au sens strict est bien distinct du développement, mais néanmoins subordonné à celui-ci. Par ailleurs, en neuropsychologie développementale, il a été montré qu'au cours de l'enfance, des vagues périodiques de croissance des prolongements dendritiques établissent de nouvelles connexions entre les aires cérébrales (Thatcher, 1992). Autrement dit, dans les réseaux de neurones réels, ce ne sont pas seulement les poids des connexions qui changent avec l'âge et l'expérience, mais aussi la structure des connexions. Un réseau de neurones dont l'architecture est fixe et dont le développement ne repose que sur la modification des poids des connexions n'est donc pas un modèle neurobiologiquement plausible du processus de développement chez l'enfant. C'est ce qui fait tout l'intérêt des modélisations connexionnistes dans lesquelles le réseau est capable de modifier sa propre architecture.

Ce type de modélisation a été particulièrement développé par Shultz et ses collaborateurs (voir Sirois et Shultz, 2003, pour une revue). Ces auteurs utilisent des réseaux neuronaux qui s'auto-engendrent (*generative neural networks*), c'est à dire qui modifient leur propre architecture au cours de l'apprentissage. Ce sont des réseaux supervisés à propagation avant dans lesquels un algorithme particulier, dit de corrélation en cascade (*cascade correlation algorithm*) introduit de nouvelles unités intermédiaires dans la couche cachée pour

réduire l'erreur observée dans les unités de sortie. Le principe de cet algorithme est de chercher, à chaque étape, parmi un ensemble d'unités intermédiaires candidates, celle qui corrèle le plus avec l'erreur résiduelle en sortie. Celle qui a la corrélation la plus forte entre alors dans la couche intermédiaire et les itérations sont reprises pour ajuster les poids des connexions au sein de l'architecture ainsi modifiée. S'il reste encore une erreur en sortie après cela, l'algorithme cherche quelle nouvelle unité candidate corrèle le plus avec l'erreur résiduelle, ajoute celle-ci à la couche intermédiaire, et ainsi de suite, en cascade, jusqu'à ce que l'erreur ne puisse plus être réduite. On peut voir une analogie entre cette démarche et celle par laquelle, en analyse factorielle, on extrait le facteur qui explique le maximum de la variance restante.

Sirois et Shultz (2003) considèrent que cette forme de modélisation du développement opérationnalise de façon plus précise un ensemble de concepts piagétiens restés jusque là un peu flous. Dans le réseau qui vient d'être décrit, l'apprentissage est le processus de changement qui a lieu dans les phases où l'architecture est fixée et où les modifications ne portent que sur les poids des connexions. Le développement est par contre le processus de changement qui modifie l'architecture du réseau par l'introduction de nouvelles unités intermédiaires. Selon Sirois et Shultz, le mode de fonctionnement du réseau dans la phase d'apprentissage opérationnalise les concepts d'assimilation (à une structure donnée), d'accommodation (de cette structure par ajustement des poids) et d'équilibration (entre assimilation et accommodation), tandis que le fonctionnement du réseau dans la phase de développement opérationnalise le concept d'abstraction réfléchissante (construction d'une nouvelle architecture donnant lieu à une nouvelle représentation du problème).

Ce type de modélisation a été appliqué avec succès par Shultz et ses collaborateurs à la simulation du développement de plusieurs notions piagétienes (sériation, vitesse, temps distance, conservation, balance). Une présentation détaillée de la modélisation du développement de la notion de conservation peut être trouvée dans Shultz (1998) et une revue de l'ensemble de ces recherches dans Sirois et Shultz (2003).

2.4 Discussion

Les réseaux de neurones artificiels n'ont qu'une ressemblance assez lointaine avec les réseaux de neurones réels. Ils en diffèrent de toute évidence par la taille : de l'ordre de la dizaine ou de la centaine d'unités et de connexions dans le cas des réseaux artificiels, de l'ordre de la centaine de milliards pour les unités et du million de milliards pour les connexions dans le cas du cerveau. Ils en diffèrent aussi par l'architecture et, le plus souvent,

par le mécanisme de modification des poids synaptiques. L'algorithme de rétropropagation, par exemple, qui est le plus souvent utilisé dans les modélisations connexionnistes du développement, n'est pas un mécanisme plausible de la modification des poids synaptiques dans le fonctionnement du cerveau.

Cette réserve étant faite, le connexionnisme a néanmoins fourni à la recherche sur le développement un outil méthodologique qui a permis de repenser les termes du débat entre innéisme et constructivisme.

Il a d'abord fourni un exemple de système capable d'auto-organisation, un exemple de mécanisme de transition entre des états successifs, qui est suffisamment explicite et précis pour être implémenté sur ordinateur. C'est ce qui manquait au modèle de l'équilibration des structures cognitives proposé par Piaget (1975). Un autre apport non négligeable de ce type de modélisation du développement a été de montrer que les arguments théoriques visant à démontrer l'impossibilité du constructivisme étaient en partie erronés. Les modèles connexionnistes fournissent en effet un exemple de processus général d'auto-organisation capable d'engendrer la construction de structures majorantes. Ils montrent ainsi, de façon quasi empirique, la possibilité de telles constructions cognitives et invalident de ce fait les considérations théoriques invoquant le paradoxe de l'apprentissage et la pauvreté du stimulus pour argumenter l'irréalisme de l'approche constructiviste. Comme cela a été dit plus haut à propos du modèle connexionniste de la segmentation des mots dans le flux de parole, ces simulations ne démontrent pas que le cerveau humain fonctionne ainsi – cette partie du travail reste à faire - mais elles montrent qu'il n'y a pas d'obstacle théorique incontournable à une approche constructiviste du développement cognitif.

Mais la modélisation connexionniste a aussi contribué à montrer qu'un réseau neuronal ne peut apprendre que si, dans son état initial, il est en partie déterminé par quelques contraintes qui restreignent le champ des possibles. C'est la raison pour laquelle il est dit plus haut que les arguments théoriques des auteurs néo-innéistes n'étaient qu'en partie erronés. Pour pouvoir apprendre, les réseaux neuronaux artificiels doivent en effet être spécifiés, à l'état initial, pour le codage et le traitement d'un certain type de stimulus. L'apport du connexionnisme sur ce point est d'avoir montré qu'il n'est pas nécessaire qu'un système soit aussi étroitement spécifié au départ que le pensaient les auteurs néo-innéistes pour qu'un apprentissage puisse s'enclencher : les modules peuvent être les produits d'un processus de modularisation plutôt que des structures entièrement préformées à l'état initial.

Les limites de l'approche connexionniste du développement sont nombreuses, mais pas insurmontables. En voici deux exemples. Le manque de plausibilité neurobiologique des

structures et des mécanismes par lesquels les poids des connexions sont modifiés est une des limites que présentent beaucoup de simulations du développement. Cela n'a cependant rien d'inéluctable et certains chercheurs sont engagés dans la mise au point de modélisations connexionnistes du développement qui soient neurobiologiquement plausibles. Le constructivisme neuronal défendu par Quartz (2003) en est un exemple stimulant.

Une autre limite tient à ce que la plupart des modèles connexionnistes ont jusqu'ici cherché à simuler des propriétés connues du développement. Il a ainsi été montré qu'ils pouvaient reproduire des phénomènes aussi divers que les stades de développement, les courbes en U, les périodes sensibles (pour une revue, voir Elman, 2005). Il est plus rare, jusqu'ici, qu'ils aient permis de découvrir des propriétés du développement jusque là ignorées. La simulation par Munakata (1998) de l'évolution du comportement de persévération du nourrisson dans l'erreur A-non-B est un contre-exemple montrant que c'est possible et prometteur. Cette simulation sera présentée plus loin, dans la discussion des recherches faites sur l'erreur A non B dans l'optique des systèmes dynamiques. Disons seulement ici qu'elle a permis de prédire une courbe en U que personne n'avait encore observée dans l'évolution du comportement de persévération du bébé et que cette prédiction a été vérifiée plus tard (Clearfield, Diedrich, Smith et Thelen, 2006)

3. La modélisation dynamique du développement

3.1. Introduction à l'approche des systèmes dynamiques non linéaires

L'approche actuelle de la dynamique du développement est au confluent d'influences diverses (voir Thelen et Smith, 2006), dont la plus déterminante est à chercher dans les modélisations proposées, en mathématiques et en physique, pour expliciter et formaliser la dynamique des systèmes complexes. C'est notamment le cas, en mathématiques, de la *théorie des catastrophes* formulée par René Thom et, à la frontière de la chimie et de la physique, des travaux d'Ilya Prigogine sur les *structures dissipatives*. Le point commun de ces différentes théorisations est d'avoir montré le potentiel des *systèmes dynamiques non linéaires* (SDNL) pour rendre compte des phénomènes d'*auto-organisation* observés dans la nature.

Dans l'ouvrage intitulé « La nouvelle alliance », Prigogine et Stengers (1986) ont développé les réflexions épistémologiques que leur ont inspiré ces découvertes. Ils ont notamment défendu l'idée que les principes auxquels obéissent les SDNL sont suffisamment généraux pour pouvoir s'appliquer à d'autres domaines que la physique et pour fournir les

bases d'une « nouvelle alliance » entre les sciences de la matière, les sciences de la vie et les sciences humaines.

La modélisation de systèmes capables d'auto-organisation, ne pouvait laisser très longtemps indifférents les psychologues qui cherchent à comprendre l'émergence de comportements nouveaux chez l'enfant et on a assisté, vers de la fin des années 80, à la naissance d'un courant de recherches s'inspirant du cadre conceptuel des systèmes dynamiques non linéaires pour renouveler l'étude du développement de l'enfant. La publication de l'ouvrage intitulé « A dynamic systems approach to the development of cognition and action », publié par Thelen et Smith (1994), a constitué un jalon important dans la diffusion de cette approche. Ce courant est à l'heure actuelle encore marginal en psychologie du développement mais il se situe clairement dans la mouvance de l'approche constructiviste et contribue d'ores et déjà à l'enrichir. Comme Piaget avec le modèle de l'équilibration, il cherche en effet à expliquer l'apparition de nouveautés comportementales par l'auto-organisation des structures cognitives, c'est à dire par un processus au cours duquel l'ordre « ...émerge des interactions qui existent entre les composantes d'un système complexe sans instruction explicite, ni au sein de l'organisme lui-même, ni au sein de l'environnement⁸ » (Thelen et Smith, 2006, p. 259).

La seconde des lois de la thermodynamique a longtemps accredité l'idée selon laquelle tout système tend vers un *équilibre thermodynamique* qui correspond à son *entropie maximale* (sa désorganisation maximale) du fait que le maintien de son organisation consomme de l'énergie. Les travaux sur la thermodynamique des processus irréversibles et plus particulièrement sur les structures dissipatives, qui ont valu à Prigogine le prix Nobel en 1977, ont montré que cette loi ne vaut que pour les systèmes fermés. Les *systèmes ouverts*, c'est à dire ceux qui reçoivent de l'extérieur un flux d'énergie, peuvent, en dissipant cette énergie, s'auto-organiser et se stabiliser dans des états éloignés de l'équilibre thermodynamique. C'est ce qui a pu être observé dans certaines réactions chimiques comme celle de Belousov-Zhabotinskii (BZ), où les molécules produites par un mélange de bromate et d'acide peuvent adopter un *comportement collectif* qui aboutit à la formation de cercles concentriques ou de spirales. Cette nouvelle organisation spatio-temporelle des molécules dans le mélange peut se stabiliser, loin de l'équilibre entropique (qui correspondrait à un mélange homogène), si un apport permanent de réactifs est réalisé⁹.

⁸ Notre traduction

⁹ Une vidéo des oscillations périodiques du mélange entre la couleur bleue et la couleur rouge peut être trouvée sur le site www.faidherbe.org/site/cours/dupuis/joupond.htm. Des images des structures spatiales qui se

La matière non organique présente peu de structures dissipatives comme celles mises en évidence par la réaction BZ mais celles-ci sont particulièrement intéressantes car elles montrent que de nouvelles structures peuvent apparaître en l'absence de toute forme d'instruction génétique (il n'y a pas de gènes dans le mélange de bromate et d'acide malonique). Elles montrent aussi que des éléments peuvent adopter un comportement collectif organisé en l'absence toute forme de système exécutif. Si une forme d'auto-organisation est possible dans des systèmes ouverts composés de matière non organique, on peut penser qu'elle est a fortiori possible dans les organismes vivants, qui sont des systèmes bien plus ouverts encore. C'est la raison fondamentale pour laquelle le paradoxe de l'apprentissage, que Fodor a opposé au constructivisme – à savoir qu'une structure de niveau $N+1$ ne peut être construite à partir d'une structure de niveau N moins puissante – n'est pas convaincant. Ce paradoxe repose sur une argumentation logique, valable dans le domaine de la logique, qui est celui de structures formelles fermées, mais il n'est pas approprié au domaine du vivant qui est celui de systèmes ouverts, et, pour cette raison, capables d'auto-organisation.

L'exemple de la réaction BZ peut servir à illustrer quelques unes des caractéristiques des systèmes dynamiques. Tout d'abord, il s'agit de systèmes complexes, formés d'un grand nombre d'éléments hétérogènes susceptibles d'interagir de façon non linéaire. Dans la réaction BZ, les éléments sont les différentes sortes de molécules et les interactions que ces éléments sont susceptibles d'avoir sont de nature chimique (échanges d'ions). Ces interactions sont non linéaires dans la mesure où l'augmentation régulière de la concentration d'un composant de la solution n'entraîne pas nécessairement une augmentation régulière de la réaction : cette augmentation peut n'avoir aucun effet en-dessous d'une certaine concentration, mais provoquer une restructuration brusque du mélange – par exemple la formation de spirales- lorsqu'une certaine valeur critique est atteinte. Le système adopte alors un comportement collectif qui peut être décrit par un petit nombre de dimensions. Dans le cas de la réaction BZ, il faudrait un nombre incalculable de dimensions pour décrire toutes les interactions de toutes les molécules que comporte le mélange de bromate et d'acides mais dans l'état d'équilibre dynamique où ces molécules adoptent un comportement collectif, celui-ci peut être décrit par un faible nombre de dimensions (deux pour décrire la spirale).

Les états stables vers lesquels converge le système sont appelés *attracteurs*. Il s'agit d'états de stabilité relative dans lesquels l'organisation repose sur un assemblage souple des composantes du système. Cet assemblage est susceptible de se défaire si un des éléments

stabilisent loin de l'équilibre thermodynamique, dans une autre variante de la réaction BZ, peuvent être trouvées sur le site <http://hopf.chem.brandeis.edu/anatol.htm>.

varie. Le comportement du système peut alors présenter des *fluctuations*, se désorganiser et, éventuellement, converger vers un autre attracteur si ses éléments se réassemblent dans une autre configuration. Les *phases de transition* entre des attracteurs différents sont en général marquées par des fluctuations plus fortes. Ces fluctuations, de même que les variations aléatoires, jouent un rôle essentiel dans la genèse de nouvelles formes en favorisant l'exploration des interactions possibles entre les éléments du système. On appelle *paramètres de contrôle* les paramètres aux variations desquels le système est sensible. Dans la réaction BZ, la température et le degré de concentration des différents réactifs de la solution sont les paramètres de contrôle dont les variations sont susceptibles de faire basculer le système d'un attracteur dans un autre.

Pour revenir à la psychologie du développement, van Geert et Steenbeck (2005) contrastent l'approche des systèmes dynamiques et l'approche standard en les caractérisant par les deux équations fondamentales suivantes :

$$(1) y_{(t+1)} = f(y_t)$$

$$(2) y_i = f(x_i)$$

L'équation (1), caractéristique de l'approche dynamique, pose que la valeur d'une variable y (par exemple, le comportement de l'enfant dans la résolution du problème de la balance) au moment $t+1$ est fonction de la valeur qu'avait cette même variable au moment t . Cette équation est *réursive*, elle transforme y_t en $y_{(t+1)}$, puis $y_{(t+1)}$ en $y_{(t+2)}$, et ainsi de suite, par itérations successives. Les termes figurant de part et d'autre du signe $=$ sont de même nature (dans notre exemple, y_t et $y_{(t+1)}$ sont tous deux relatifs au comportement dans la résolution du problème de la balance). C'est donc le déroulement d'un processus au cours du temps qui est formalisé.

L'équation (2), caractéristique de l'approche standard du développement selon van Geert et Steenbeck, pose que la valeur d'une variable y (gardons l'exemple du comportement de l'enfant dans la résolution du problème de la balance) est fonction de son âge x_i . Cette fonction n'est pas réursive. Elle ne formalise pas la dynamique du comportement, mais relie deux variables de nature différente, le comportement et l'âge. Elle indique, par exemple, que le comportement consistant à tenir compte de la distance lorsque les poids sont égaux apparaît à l'âge de 7 ou 8 ans.

Un système dynamique est formalisé par un système d'équations qui ont la forme générale de l'équation (1). Le cas le plus simple est un système ne comportant que deux équations. Empruntons à van Geert et Steenbeck (2005) l'exemple de la dynamique d'une interaction sociale entre deux enfants, au cours de laquelle les changements dans l'intensité de

l'expression émotionnelle de chacun de ces deux enfants sont liés aux changements dans l'intensité de l'expression émotionnelle de l'autre. Cette interaction dynamique est formalisée par un système comportant les deux équations suivantes :

$$y_{(t+1)} = f(y_t, z_t)$$

$$z_{(t+1)} = g(z_t, y_t)$$

où y est l'intensité de l'expression émotionnelle du premier enfant, z celle du second enfant. Le *couplage* de ces deux équations forme un système dynamique dans lequel l'état de l'intensité de l'expression émotionnelle de chaque enfant au moment $t+1$ dépend de l'état, au moment t , de l'intensité de sa propre expression émotionnelle et de celle de son partenaire. Ces différents états sont par ailleurs reliés dans le temps par une fonction spécifique à chaque enfant (f pour le premier et g pour le second).

Plus généralement, la formalisation d'un système dynamique décrit un processus de changement au cours du temps, un déroulement dans lequel ce qui suit s'explique par ce qui précède. La forme prise par ce processus de changement dépend de la nature des interactions entre les éléments du système (par exemple relations de compétition ou de support mutuel) et de la forme des fonctions reliant les états dans le temps (par exemple fonction linéaire ou non linéaire). La dynamique du système ne préexiste pas dans les éléments qui s'assemblent mais résulte de leur assemblage et des interactions que cet assemblage engendre. Il faut noter une différence essentielle entre ce type de formalisation du changement et celui auquel Piaget a eu recours. Dans la théorie de Piaget, les états successifs de la cognition étaient décrits par des structures logiques n'intégrant pas la variable temps. Par ailleurs un autre mécanisme, l'équilibrage, intégrant la variable temps, était invoqué pour expliquer le passage d'un état à l'autre. D'où la difficulté à relier ces deux aspects hétérogènes de la théorie, celui rendant compte de l'organisation des états et celui rendant compte des transitions entre ces états. Dans l'approche des systèmes dynamiques, ce sont les mêmes équations - dans lesquelles la flèche du temps est intégrée - qui rendent compte à la fois de la dynamique du changement et des états (attracteurs) dans lesquels le système se stabilise.

3.2. Un exemple d'approche dynamique du développement

Comme on le sait, les enfants commencent à marcher vers la fin de la première année. Cependant, le mouvement alterné des deux jambes, caractéristique de la marche, peut être observé dès la naissance lorsque le nouveau-né est maintenu en position debout, la plante des pieds en contact avec le sol. Ce comportement disparaît cependant vers deux mois pour ne réapparaître que vers 8 à 10 mois, au début de la marche. Cette disparition, puis réapparition

du mouvement de la marche a beaucoup intrigué, comme tous les cas où la courbe du développement a une forme en U. Comment expliquer ce phénomène ?

L'explication classique, formulée notamment par Mc Graw (1945), fait relever ces deux comportements de deux structures différentes du système nerveux central. La « marche » observée dans les deux premiers mois de la vie serait un réflexe de niveau subcortical, un comportement archaïque fixé dans le patrimoine génétique à un moment de la phylogenèse. Ce réflexe, prêt à fonctionner dès la naissance, serait ensuite inhibé par le développement du cortex, dont la maturation est plus tardive. Le mouvement alterné des jambes observé de nouveau vers à la fin de la première année correspondrait par contre à la prise de contrôle, au niveau cortical, de la coordination des mouvements impliqués dans la marche.

Le réexamen du développement de la marche par Esther Thelen et ses collaborateurs est un des premiers exemples d'application de l'approche des systèmes dynamiques à la psychologie du développement (voir Thelen et Smith, 1994, chap. 4 pour une synthèse). Ce réexamen a mis en évidence plusieurs faits peu compatibles avec l'explication classique. Tout d'abord, pendant la période où le comportement de marche a disparu, le nourrisson effectue néanmoins, lorsqu'il est couché sur le dos, des mouvements de pédalage. En enregistrant les caractéristiques cinématiques de ces mouvements de pédalage, Thelen et Fisher (1983) ont montré que celles-ci étaient identiques à celles des mouvements effectués au cours de la « marche » du nourrisson. Si la disparition du mouvement de « marche » était due à son inhibition par la maturation corticale, comment expliquer qu'il soit encore observé en position horizontale lorsqu'il a disparu en position verticale ? Thelen et Fisher ont par ailleurs trouvé que les patterns de contraction des muscles ne sont pas conformes à ce qui serait attendu si ces patterns étaient les seuls responsables de l'alternances de flexions et d'extensions des jambes. Dans ces mouvements de pédalage, une partie seulement du timing du mouvement est due aux contractions musculaires, une autre partie tenant à l'effet de l'élasticité des muscles, qui tendent à se rétracter après avoir été allongés, ainsi qu'à l'effet de la gravité, qui ramène vers le bas la jambe levée. Ces enregistrements ont montré que l'appareil neuromusculaire se comportait en fait comme un ressort auquel on attache un poids : accélération nulle du mouvement au changement de direction et accélération maximale au milieu du trajet vers le haut ou vers le bas.

Pour ce qui concerne le mouvement de « marche » en position verticale, Thelen, Fisher et Ridley-Johnson (1984) ont montré qu'à l'âge de trois mois, à un moment où ce mouvement a en principe disparu, il peut être retrouvé si le poids du bébé est allégé en

immergeant ce dernier dans l'eau jusqu'à la taille. L'hypothèse sur le rôle joué par l'augmentation du poids du corps est corroborée par le fait que les bébés dont le poids augmente le plus vite au cours des deux premiers mois sont ceux chez qui le comportement de « marche » disparaît le plus vite. Par ailleurs, le comportement de « marche » a aussi été retrouvé à des âges où il est censé avoir disparu, en maintenant les bébés en position debout sur un tapis roulant (Thelen, 1986). Les mouvements des jambes, assez désordonnés au début, deviennent alternés à une vitesse donnée du tapis, assez lente chez les plus jeunes, un peu plus élevée chez les plus âgés. Dans ce cas, c'est l'extension de la jambe, entraînée en arrière par le tapis roulant, qui, lorsqu'elle atteint un certain degré, déclenche la flexion ramenant la jambe en avant, flexion pendant laquelle la traction que le tapis exerce sur l'autre jambe produit son extension.

Ces différentes observations ont conduit Thelen à réfuter l'idée que la cause d'un comportement tel que celui de la marche soit à chercher uniquement du côté d'un générateur central de patterns d'activation de l'appareil neuromusculaire. Elles l'ont convaincue que ce comportement est le produit d'un système mettant en jeu un ensemble de composantes, certaines d'origine neuronale, d'autres tenant aux propriétés de l'appareil neuromusculaire, comme l'élasticité des muscles, d'autres encore tenant aux propriétés du corps, comme le poids, ou d'autres enfin au contexte dans lequel ce mouvement prend place, comme la nature du sol sur lequel l'enfant se déplace. Le rôle de cette dernière composante, le contexte du mouvement, peut être illustré par l'exemple, cité par Thelen (1990, p. 36), d'un enfant ayant grandi dans une maison dont le sol était fait de parquets cirés et glissants. Cet enfant n'a jamais présenté le « stade » de la marche à quatre pattes. Il se déplaçait en glissant assis sur son derrière et en se poussant avec les jambes. Selon Thelen, le comportement de glissade, assemblé avec les composantes disponibles dans ce contexte particulier, était pour cet enfant un attracteur plus stable que celui de marche à quatre pattes, classiquement observé dans des environnements moins glissants.

Dans le cadre conceptuel des systèmes dynamiques, que Thelen a adopté et contribué à adapter à la psychologie du développement, la marche est donc un des attracteurs dans lesquels peuvent se stabiliser les mouvements du corps. Le pattern de mouvement alterné des jambes est vu comme une variable collective émergeant de l'assemblage souple d'un ensemble de composantes hétérogènes qui interagissent et forment de ce fait un système dynamique. Le système nerveux central est une de ces composantes, mais au même titre que certaines caractéristiques du corps, comme l'élasticité des muscles et le poids, ou certaines caractéristiques du contexte dans lequel a lieu le mouvement, comme la nature du sol.

Certaines de ces composantes peuvent jouer le rôle de paramètres de contrôle, c'est à dire de paramètres aux variations desquels le système est particulièrement sensible. Le degré d'extension de la jambe vers l'arrière, manipulé par le réglage de la vitesse du tapis roulant, est une variable de contrôle sur laquelle il est possible d'agir pour faire basculer le système vers l'attracteur que constitue le mouvement alterné des jambes, alors même que ce comportement est absent du répertoire du bébé en d'autres circonstances. La vitesse du tapis roulant joue ici un rôle analogue à celui de la température ou du degré de concentration en bromate de potassium dans la réaction BZ.

Dans cet exemple, le cadre conceptuel des SDNL est utilisé à un niveau métaphorique. Il inspire une façon de voir les choses, d'interpréter les faits. Il suscite des hypothèses nouvelles et oriente ainsi la recherche. Il ne s'agit pas, dans l'état actuel des choses et pour des comportements de cette complexité, de formuler les fonctions mathématiques décrivant les interactions entre toutes ces composantes au cours du temps.

3.3. Contribution de l'approche dynamique au constructivisme : quelques exemples

3.3.1. L'articulation entre continuités et discontinuités

La théorie des catastrophes (Thom, 1972) est une branche des mathématiques qui s'est donné pour objectif de formaliser et de catégoriser les différents types de relations liant les discontinuités apparentes aux évolutions continues qui les sous-tendent. Deux psychologues néerlandais, van der Maas et Molenaar (1992), se sont inspirés de cette théorie mathématique, plus précisément du modèle de la fonce, une des formes de catastrophe distinguées par Thom, pour modéliser les relations entre continuité et discontinuité dans le franchissement de stades de développement. Plus récemment, Jansen et van der Maas (2001) ont réalisé une expérience destinée à tester l'hypothèse de van der Maas et Molenaar en examinant si les comportements observés lors du franchissement d'un stade (le passage de la règle I à la règle II dans la résolution du problème de la balance) correspondaient bien aux prédictions du modèle de la fonce.

Le modèle de la fonce formalise la fonction qui relie un ensemble de variables de contrôle à une variable collective. Par exemple, dans le cas du changement de l'eau en glace, les deux variables de contrôle sont la température et la pression, la variable collective est le comportement de l'ensemble des molécules d'eau soumises à une température et une pression donnée. Cette variable collective peut converger vers l'un ou l'autre de plusieurs états stables (attracteurs) possibles, l'état solide (glace), l'état liquide (eau), l'état gazeux (vapeur), en

passant par des phases de transition instables entre ces différents états. L'équation de cette fonction est, dans sa forme générale, comparable à celle d'une analyse de régression : les deux variables de contrôle ont un statut comparable à celui des variables indépendantes et la variable collective a le statut de variable dépendante. La comparaison s'arrête là car la fonction reliant la variable dépendante aux variables indépendantes est linéaire dans l'analyse de régression tandis qu'elle est non linéaire dans le modèle de la fonce. Une présentation plus détaillée de la théorie des catastrophes et en particulier des équations formalisant le modèle de la fonce peut être trouvée ailleurs (van der Maas et Molenaar, 1992). Seule la représentation géométrique de ce modèle (cf. figure 1.5), suffisante pour en donner une compréhension intuitive, sera présentée ici.

 Insérer ici la figure 5

Dans le schéma de la figure 1.5, les deux variables de contrôle (correspondant à la température et à la pression dans l'exemple du passage de l'état liquide à l'état solide) sont représentées sur les axes α et β . La variable collective est représentée sur l'axe Z , perpendiculaire au plan formé par α et β . L'ensemble des valeurs pour lesquelles la variable collective Z est dans un état d'équilibre est représenté par une surface qui est repliée sur elle-même sur un de ces côtés. Cette surface évoque un morceau de tissu comportant une fonce (d'où le nom du modèle) qui le sépare en deux parties. La partie située au-dessus de la fonce correspond à un état stable de la variable collective (l'état liquide par exemple) et la partie située en-dessous de la fonce à un autre état stable (l'état solide par exemple). La fonce (grisée sur la figure 1.5) qui sépare ces deux états stables correspond à une zone inaccessible, un état instable dans lequel le système ne peut se maintenir lorsqu'il passe d'un état stable à un autre.

Lorsqu'un système obéit au modèle de la fonce, le comportement de la variable collective présente un certain nombre de caractéristiques qui ont été dérivées de ce modèle mathématique par Gilmore (1981). Cet auteur a déduit ainsi huit « catastrophe flags », autrement dit huit marqueurs de la discontinuité. Cinq d'entre eux sont indiqués sur la figure 1.5, et seuls ceux-là nous intéressent ici : l'inaccessibilité, le saut soudain, la bimodalité, la divergence et l'hysteresis. Les trois premiers sont étroitement liés : lorsqu'il y a une zone inaccessible (c'est à dire une zone dans laquelle le système ne peut se maintenir de façon stable), la variable collective ne peut passer que par un saut brusque d'un état stable à un autre et, de ce fait, la distribution des valeurs observées en Z a nécessairement une allure bimodale.

Comme l'indiquent van der Maas et Molenaar (1992), ces marqueurs ne sont pas les plus intéressants car le saut brusque et la bimodalité de la variable sont également prédits par les modèles qui considèrent les stades non pas comme des discontinuités, mais comme des accélérations brusques dans un processus continu. L'hysteresis et la divergence sont des marqueurs plus intéressants car ils ne sont prédits que par la théorie des catastrophes.

L'*hysteresis* correspond au fait que le saut brusque ne se produit pas au même endroit selon que les valeurs de la variable de contrôle sont parcourues dans un sens ou dans l'autre. Cela peut se voir sur la figure 1.5 en parcourant de gauche à droite puis droite à gauche le bord antérieur de la surface d'équilibre: le saut brusque (sudden jump) dû à l'inaccessibilité de la fronce ne se produit pas pour les mêmes valeurs de la variable de contrôle (sur l'axe α) dans les deux cas. Dans l'exemple du passage de l'eau de l'état liquide à l'état solide et vice-versa, l'hysteresis correspond au fait que, dans certaines conditions de pression (sur l'axe β), l'eau gèle à -4° , tandis que la glace fond à 0° .

L'effet de *divergence* tient au fait que la fronce est plus large dans la partie antérieure de la surface d'équilibre que dans sa partie postérieure. Pour des valeurs très faibles de la variable β , la transition d'un état à un autre n'est pas brusque et les valeurs intermédiaires sont possibles. Par contre, plus les valeurs de β augmentent (plus on va de l'arrière de la figure vers l'avant) plus la discontinuité est marquée et plus les valeurs intermédiaires sont inaccessibles.

Pour mettre à l'épreuve les hypothèses formulées par van der Maas et Molenaar (1992), Jansen et van der Maas (2001) ont pris, comme exemple de franchissement de stade, le passage de la règle I à la règle II dans la résolution du problème de la balance (rappelons que la règle I correspond au comportement des enfants qui ne tiennent compte que du poids pour décider de quel côté va pencher la balance, tandis que la règle II correspond au comportement de ceux qui prennent en compte la distance des poids au point d'équilibre, mais seulement lorsque les poids sont égaux). La variable collective est ici le nombre de bonnes réponses dans des items variés du problème de la balance.

Dans deux expériences portant chacune sur environ 300 enfants dont les âges allaient de 5 à 10 ans, les auteurs ont d'abord fait passer un pré-test dont ils ont analysé la distribution des scores. Comme le laisse attendre le modèle de la fronce, cette distribution était clairement bi-modale, l'un des modes correspondant au score typique obtenu par les enfants qui utilisent la règle I, l'autre mode correspondant au score typique des enfants utilisant la règle II. Cette bi-modalité peut être considérée comme l'indice de deux autres marqueurs du modèle de la

fronce : un saut brusque dans le comportement et l'existence d'une zone d'inaccessibilité. La mise en évidence de l'hysteresis et de la divergence, est plus cruciale pour trancher entre accélération brusque et discontinuité. Elle suppose d'abord l'identification de variables de contrôle qui puissent être manipulées par l'expérimentateur pour provoquer des changements d'état dans la variable collective.

Les deux variables de contrôle retenues par les auteurs sont d'une part la différence de distance au point d'équilibre, d'autre part le nombre de poids (ces deux variables correspondent respectivement à l'axe α et à l'axe β dans la figure 1.5). Pour détecter le phénomène d'hysteresis, la différence de distance est manipulée à poids constant. La procédure consiste à présenter aux enfants une séquence d'items dans lesquels les poids sont équivalents de chaque côté du point d'équilibre (deux poids) mais dans lesquels la différence de distance va d'abord en croissant puis en décroissant. On commence par un item dans lequel deux poids sont placés sur la première tige du côté gauche et deux poids sur la deuxième tige du côté droit (différence de distance = 1). Dans l'item suivant, les deux poids du côté gauche restent sur la première tige, mais ceux du côté droit sont déplacés sur la troisième tige (différence de distance = 2), et ainsi de suite. La balance utilisée comportant six tiges de chaque côté, la différence de distance peut être ainsi augmentée jusqu'à 5, puis ensuite progressivement diminuée pour être ramenée à 1.

Si le franchissement d'un stade obéit au modèle de la fronce, on s'attend à ce que certains enfants, ceux qui sont en phase de transition entre la règle I et la règle II, oscillent entre ces deux attracteurs et donc présentent le comportement typique de la règle I (c. à d. ne tiennent compte que du poids) lorsque la différence de distance est peu prégnante, mais basculent vers le comportement correspondant à la règle II (et donc répondent que la balance penchera du côté de la plus grande distance) lorsque la différence de distance devient plus prégnante, puis basculent de nouveau vers la règle I lorsque la différence de distance est ensuite diminuée. Plus précisément, *le phénomène d'hystérésis, laisse attendre que ce saut brusque ne se produise pas pour les mêmes valeurs de la variable de contrôle (ici la différence de distance), selon que celle-ci est parcourue dans le sens ascendant ou dans le sens descendant.*

Comme le laisse attendre l'hypothèse d'une zone d'inaccessibilité, les résultats montrent que l'on trouve peu d'enfants dans cette phase d'instabilité. La plupart sont soit dans l'état stable de la règle I soit dans l'état stable de la règle II. Toutefois, on trouve bien un faible pourcentage d'enfants qui sont dans cette phase d'instabilité et présentent le phénomène d'hystérésis, c'est à dire d'enfants pour qui le saut brusque du comportement (passage d'une

règle à l'autre) se produit à des valeurs plus élevées de la différence de distance, lorsque cette variable de contrôle est parcourue dans le sens ascendant (passage de la règle I à la règle II), que lorsque celle-ci est parcourue dans le sens descendant (retour de la règle II à la règle I).

Pour détecter le phénomène de divergence, la manipulation de la seconde variable de contrôle, le poids, est faite à différence de distance constante. Un ensemble de problèmes où les poids placés de part et d'autre du point d'équilibre de la balance sont égaux est donné dans deux conditions différentes : dans l'une les poids sont faibles (un seul poids de chaque côté), dans l'autre ils sont forts (5 poids de chaque côté). L'hypothèse est que le saut brusque de la règle I à la règle II est plus marqué lorsque la valeur de cette variable de contrôle augmente (c. à d. lorsque, sur la figure 1.5, l'axe β est parcouru de l'arrière vers l'avant), ce qui devrait se traduire par une bi-modalité plus marquée de la distribution des scores. Les résultats ne confirment pas cette seconde hypothèse.

En conclusion de cette recherche, les auteurs notent que le passage de la règle I à la règle II s'accompagne de quatre des cinq marqueurs du modèle de la fronce, dont le phénomène d'hysteresis, ce dont ils concluent que le passage d'un stade à l'autre est bien une discontinuité du type de celles qui ont été formalisées par la théorie des catastrophes plutôt qu'une simple accélération brusque dans un processus continu.

3.3.2. Le statut de la variabilité

L'approche des systèmes dynamiques contribue à changer le regard sur les phénomènes de variabilité du comportement. La recherche d'invariants, d'universaux, conduit souvent, en psychologie du développement comme ailleurs, à centrer l'analyse sur les tendances moyennes et à considérer les variations autour de ces tendances moyennes comme la manifestation d'erreurs de mesure ou de bruits parasites sans importance. C'est souvent le cas de la variabilité intra-individuelle et parfois le cas de la variabilité interindividuelle.

3.3.2.1. La variabilité intra-individuelle

Cette forme de variabilité réfère aux fluctuations du comportement d'un même individu en fonction du contexte ou du moment de la mesure. Le terme de fluctuation connote le fait que ces variations, contrairement aux changements développementaux, n'ont pas de direction privilégiée et sont observées sur des temps courts, par exemple entre un item et le suivant. Cette forme de variabilité est souvent considérée comme gênante pour dégager les grandes évolutions développementales et donc neutralisée en moyennant sur les différentes mesures effectuées. Cette pratique se justifie lorsque ces fluctuations sont effectivement dues

à des erreurs de mesure, mais elle risque par contre de priver le chercheur d'une source d'information essentielle si ces fluctuations ont une fonction dans le processus de développement.

Or c'est bien ce que suggère la modélisation des systèmes dynamiques, qui fait une large place au rôle joué par la variabilité dans l'évolution du système. Plusieurs formes de variabilité peuvent être distinguées.

Tout d'abord la simple variation stochastique des éléments du système peut, lorsqu'elle existe, être un facteur d'évolution en contribuant à faire émerger l'ordre à partir du bruit. Lorsque des possibilités d'interaction entre les éléments en présence existent, des variations aléatoires en leur sein augmentent en effet la probabilité que les éléments susceptibles d'interagir entrent en contact.

Ensuite, une augmentation de la variabilité dans le comportement d'un système dynamique peut être l'indice de changements discontinus. C'est un des indicateurs de la discontinuité dans la théorie des catastrophes (van der Maas et Molenaar, 1992). Cette forme de variabilité est la conséquence du fait qu'un système dynamique non linéaire passe par des phases de stabilité lorsqu'il converge vers un attracteur et des phases d'instabilité lorsqu'il passe d'un attracteur à un autre. Conséquence du fonctionnement du système, cette forme de variabilité est à son tour un agent du changement dans la mesure où, elle aussi, favorise l'exploration et la sélection du mode d'organisation le plus adapté aux contraintes de l'environnement.

Enfin, comme cela a déjà été souligné plus haut à propos des travaux d'Esther Thelen sur le développement de la marche, les systèmes dynamiques auxquels s'intéresse la psychologie ne comportent pas que des composantes psychiques. Ils incluent également des composantes relatives au contexte avec lequel le sujet interagit. C'est le couplage entre le sujet et son environnement qui constitue le système dynamique. Dans la mesure où chacune des composantes interagit avec toutes les autres, les variations du comportement en fonction du contexte sont elles aussi inhérentes au fonctionnement du système. Ces variations ne sont donc attribuables, dans cette optique, ni à des erreurs de mesure ni à des bruits parasites.

Si les différentes formes de variabilité intra-individuelle mentionnées plus haut sont bien des conséquences et / ou des agents du fonctionnement des systèmes dynamiques, elles offrent autant de fenêtres à travers lesquelles les mécanismes de ce fonctionnement peuvent être étudiés. Dans le cadre de l'approche dynamique, la variabilité intra-individuelle change donc de statut : de bruit parasite elle devient un objet d'étude susceptible de nous apprendre quelque chose sur les mécanismes du développement. Cette conception de la variabilité n'est

d'ailleurs pas seulement défendue par les auteurs qui s'inspirent de la modélisation des SDNL, elle a aussi été mise en pratique dans le cadre d'autres approches du développement (voir en particulier Siegler, 1996; Lautrey, 1990, 2003a).

Il n'est cependant pas simple, du point de vue méthodologique, de passer de méthodes d'analyse des données dans lesquelles la variabilité intra-individuelle a le statut d'erreur de mesure, à des méthodes dans lesquelles elle a le statut d'objet d'étude. C'est un problème à la solution duquel s'est particulièrement attaché Paul van Geert, un des pionniers de l'application de la modélisation des SDNL au domaine de la psychologie du développement. Une de ses propositions est de renoncer à caractériser le sujet par un score unique, la moyenne par exemple, censée donner une mesure représentative de sa performance, et de chercher plutôt à le caractériser par une zone de scores qui soit représentative de l'étendue de sa variabilité intra-individuelle. Tous les scores observés sont ici dignes d'intérêt et l'évolution développementale de leur variabilité intra-individuelle retient tout autant l'attention que celle de leur tendance centrale. Plusieurs méthodes permettant de réaliser cela ont été proposées par van Geert et van Dijk (2002). Toutes supposent que l'étude soit menée au niveau individuel et que la mesure soit répétée un assez grand nombre de fois sur le même individu. Un exemple simple tiré cet article servira à illustrer cette idée. Il s'agit de l'étude du développement du langage chez une petite fille prénommée Heleen, observée pendant une année, entre un an et demi et deux ans. Les productions langagières spontanées d'Heleen étaient enregistrées à son domicile par une caméra disposée dans un coin de la pièce, au cours de séances s'une durée d'une heure. Des séances d'observation avaient lieu toutes les semaines et, à certaines périodes, tous les deux jours. L'exemple pris ici est la mesure du nombre de prépositions spatiales (sur, sous, dans, etc.) énoncées par l'enfant au cours de la séance d'observation.

Une des méthodes proposées par les auteurs pour mesurer la variabilité intra consiste simplement à déplacer une fenêtre sur les mesures successives, à retenir, dans l'ensemble des mesures incluses dans cette fenêtre, la valeur maximale et la valeur minimale, puis à déplacer la fenêtre d'un cran et à recommencer... Le « moving min-max graph » que permet d'obtenir cette technique comporte deux courbes, une pour les valeurs maximales (Max) et une pour les valeurs minimales (Min). La largeur de la bande délimitée par ces deux courbes correspond à l'étendue (« range ») de la variabilité intra. La fonction de la fenêtre mobile est de lisser les courbes en réduisant l'impact des valeurs les plus extrêmes. Concrètement, si la fenêtre choisie est de largeur 5, on commence par considérer les cinq mesures correspondant aux observations 1, 2, 3, 4, et 5, on en détermine la valeur maximale, qui sera le premier point de la courbe Max, et la valeur minimale, qui sera le premier point de la courbe Min. Puis on

déplace la fenêtre d'un cran, ce qui définit un nouvel ensemble de 5 valeurs correspondant cette fois-ci aux observations 2, 3, 4, 5, 6, et permet d'obtenir le second point des courbes Max et Min, et ainsi de suite. La figure 1.6 présente le graphique obtenu à partir des observations sur le nombre de prépositions spatiales énoncées par Heleen au cours des séances d'observation réalisées au cours de l'année.

 Insérer la figure 1.6

On peut voir sur la figure 1.6 que la largeur de la bande délimitée par les courbes Min et Max, donc l'étendue de la variabilité intra-individuelle, augmente brusquement entre novembre 98 et janvier 99, et que cet accroissement de la variabilité coïncide avec une augmentation brusque dans l'évolution du score moyen (représenté par la courbe en pointillés).

3.3.2.2. La variabilité interindividuelle

Cette forme de variabilité réfère aux différences entre les individus. A première vue, l'approche des systèmes dynamiques semble rendre plus facilement compte de la variabilité intra-individuelle que des variations entre les individus. Ces dernières sont généralement attribuées à la composante stochastique du modèle ou à des différences d'environnement, ce qui ne suffit pas à rendre compte des différences individuelles stables entre les individus qui ont été mises en évidence par la psychologie différentielle.

La modélisation dynamique attire cependant l'attention sur une source de différenciation qui n'a guère été prise en compte dans les controverses classiques sur les rôles respectifs du génome et de l'environnement sur les différences. Au cours du développement, la dépendance de chaque état par rapport à l'état précédent réduit en effet les degrés de liberté du système au fur et à mesure que celui-ci évolue. Les raisons pour lesquelles un système bifurque à un moment t vers l'un ou l'autre de deux attracteurs possibles, mettons A1 ou A2, peuvent être dues à une influence de l'environnement, à un effet du patrimoine génétique, ou être purement stochastiques. Toutefois, quelles que soient les raisons pour lesquelles le système a bifurqué vers A1 ou vers A2, l'état suivant est contraint par le fait que l'état précédent ait été A1 ou A2 et il va à son tour contraindre de la même manière les étapes ultérieures. Ces contraintes en cascade sont des facteurs épigénétiques* qui canalisent progressivement les évolutions possibles du système tout en n'étant à strictement parler ni de

nature environnementale, ni de nature génétique (Lewis, 1997). En d'autres termes, même si la forme de la trajectoire d'un système dans l'espace des états est relativement indéterminée au départ, elle devient de plus en plus déterminée par les états déjà parcourus. Dans un système dynamique, la dépendance conditionnelle entre les états successifs peut donc rendre compte de différences individuelles stables dont l'origine peut n'être ni environnementale ni génétique. De surcroît, même dans le cas où des bifurcations sont déclenchées par des facteurs environnementaux ou génétiques, les conséquences ultérieures de ces bifurcations peuvent ne relever que des contraintes en cascade engendrées par la bifurcation initiale, ce qui complique beaucoup l'appréciation de l'influence propre des facteurs génétiques ou environnementaux qui ont déclenché la bifurcation.

Plus généralement, les degrés de liberté qui existent dans les possibilités d'assemblages de processus capables d'engendrer une réponse adaptée du système d'une part, et les contraintes en cascades qui découlent de ce qu'un assemblage ou un autre ait été sélectionné à un moment donné du développement d'autre part, font qu'une même étape développementale peut être atteinte par des cheminements différents. Quelques exemples en ont été donnés dans la partie consacrée aux modèles connexionnistes, à propos des conséquences que peuvent avoir certaines atteintes pathologiques sur la trajectoire développementale. Les différences de cheminement ne se limitent cependant pas aux cas d'atteintes pathologiques, elles sont aussi observées dans le développement normal (Lautrey, de Ribaupierre et Rieben, 1986). De cela, il découle que la dynamique de la construction ne peut être saisie qu'au niveau de l'individu. Ceci n'interdit pas de moyenniser sur des groupes mais, lorsque l'étude porte sur la dynamique de la construction, il n'y a de sens à le faire que si les groupes sont composés d'individus dont on s'est assuré au préalable qu'ils suivent un même cheminement développemental.

En conclusion, l'approche dynamique contribue à recentrer la psychologie sur l'étude de l'individu et pousse à prendre en compte dans une même démarche à la fois la variabilité intra et la variabilité interindividuelle (Lautrey, 2003b ; Molenaar, Hugenza et Nesselroade, 2003).

3.3.3. L'interaction entre les composantes du système

Une chose est d'identifier les composantes d'un système dynamique, autre chose est de comprendre comment celles-ci interagissent au cours du temps pour produire le

changement développemental observé. C'est à cette tâche que se sont attelés Linda Smith, Esther Thelen et leurs collaborateurs dans un ensemble de recherches sur l'erreur A-non-B.

Rappelons d'abord la situation dans laquelle cette erreur peut être observée chez les bébés vers 8 à 10 mois. L'expérimentateur cache un objet attractif sous un couvercle à un endroit A. Vers 8 mois, l'enfant est tout à fait capable de retirer le couvercle pour se saisir de l'objet. Cet essai est répété à plusieurs reprises, puis l'expérimentateur introduit, sous la vue de l'enfant, un changement qui consiste à cacher cette fois-ci l'objet sous un couvercle situé à un endroit B. Piaget avait montré que dans cette situation, les enfants de 8-10 mois font une erreur étrange : ils ne cherchent pas l'objet là où ils l'ont vu disparaître, c'est à dire en B, mais là où ils l'ont trouvé les fois précédentes, c'est à dire en A. Cette erreur disparaît vers un an. Piaget avait interprété l'erreur A-non-B comme la manifestation de ce que, vers 8-10 mois, la représentation de l'objet n'est pas encore différenciée de celle de l'action qui a permis de l'atteindre. La disparition de cette erreur vers un an correspondrait au début de la formation du concept d'objet comme entité ayant une existence permanente, indépendante de l'action.

Les recherches ultérieures ont montré que divers facteurs affectent la performance dans cette tâche : elle est réussie plus tardivement si, dans l'essai B, on allonge le délai entre le moment où l'objet est caché et le moment où l'enfant peut s'en saisir, si on augmente la distance entre les couvercles, si on augmente le nombre d'essais en A, si la couleur des couvercles est la même que celle du fond, etc. (une description des recherches effectuées sur l'erreur A-non-B figure dans le chapitre 4 § A du volume de licence).

Thelen et Smith ont appliqué l'approche des systèmes dynamiques à l'étude de l'erreur A-non-B (voir Smith et Thelen, 2003 pour une présentation succincte de cet ensemble de recherches). Elles ont considéré le comportement de l'enfant dans cette situation comme le produit émergent de l'interaction de trois composantes cognitives dont les activations évoluent de façon différente au cours de la tâche : (1) la perception des deux couvercles situés en A et B avant que l'objet soit caché, (2) la perception de l'action de l'expérimentateur lorsqu'il cache l'objet, qui a pour effet de centrer l'attention sur l'endroit où l'objet vient d'être dissimulé, et (3) la trace laissée en mémoire à long terme par les actions effectuées pour atteindre l'objet dans les essais précédents.

Smith, Thelen et leurs collaborateurs ont proposé une modélisation de l'évolution dynamique, au cours de chaque essai, du champ d'activations (dynamic field) qui résulte de l'interaction de ces trois composantes. Dans l'essai B par exemple, la perception des deux couvercles au début provoque une activation équivalente des représentations des endroits A et B. Au moment où l'expérimentateur cache l'objet sous le couvercle B, l'attention de l'enfant

est attirée sur la localisation B, ce qui provoque un pic d'activation de sa représentation. Enfin, dès que s'amorce la planification du mouvement d'atteinte de l'objet, la trace laissée en mémoire à long terme par les précédents mouvements d'atteinte provoque un pic d'activation de la localisation A. L'endroit vers lequel sera dirigé le mouvement dépend de la force relative des activations correspondant aux localisations A et B. Ces forces relatives évoluent au cours de l'essai car si l'activation de B est forte au moment où l'expérimentateur cache l'objet en B, elle décline rapidement, tandis que l'activation de A, due à la trace laissée en mémoire à long terme par les essais précédents, se maintient plus longtemps. Les forces relatives des activations de A et de B évoluent donc sur deux échelles de temps. D'une part entre les essais : la force d'activation de la trace en mémoire des actions par lesquelles l'objet a été atteint dans les essais précédents augmente avec le nombre d'essais en A. D'autre part au cours de l'essai B : l'avantage relatif de l'activation de B au moment où l'expérimentateur cache l'objet à cet endroit diminue au fur et à mesure du déroulement temporel de l'essai. Le comportement de l'enfant qui consiste à rechercher l'objet en A ou en B est considéré comme le produit de l'interaction qui a lieu, dans l'instant, entre les différentes composantes du système. Il est par définition variable puisqu'il dépend à la fois de l'essai précédent et du moment auquel se situe l'action dans l'essai en cours.

Ce modèle dynamique a permis de simuler les différents effets connus, par exemple l'augmentation des erreurs dans l'essai B lorsque le délai entre la dissimulation de l'objet et l'action de recherche de l'enfant augmente, ou lorsque le nombre d'essais en A augmente, ou encore la diminution des erreurs lorsque le nombre d'essais en B augmente. Il a aussi permis - et c'est plus intéressant - de prédire des effets qui n'avaient pas été observés jusqu'alors.

Une des prédictions était qu'en changeant la posture de l'enfant entre les essais A et l'essai B, l'erreur A-non-B devrait diminuer. L'hypothèse sous-jacente était que si le mouvement effectué pour atteindre l'objet est différent dans l'essai B de ce qu'il était dans les essais A, la trace en mémoire des mouvements effectués précédemment pour atteindre l'objet en A ne devrait pas être activée aussi fortement au moment où s'effectue la planification du mouvement pour atteindre l'objet dans l'essai B. L'expérience a été faite en demandant à la mère de tenir son enfant *assis* sur ses genoux pendant les essais A et de le tenir *debout* sur ses genoux pendant l'essai B (Smith et al., 1999). Les enfants de 8-10 mois ont effectivement fait moins d'erreurs dans cette situation. Un effet analogue a été obtenu en attachant des poids aux poignets de l'enfant au moment de l'essai B

Une autre hypothèse était que l'activation correspondant à la mémoire des mouvements effectués lors des essais précédents n'est pas spécifique aux enfants de 8-10

mois et que l'on devrait en trouver la trace résiduelle dans le comportement, y compris chez les enfants plus âgés qui ne font plus l'erreur A-non-B dans la situation classique. Cette hypothèse a été testée chez des enfants de deux ans dans une situation expérimentale où l'objet était dissimulé dans du sable. L'expérimentateur enfouissait d'abord l'objet à un endroit A, puis à un endroit B. Les résultats ont montré qu'à l'essai B, les enfants cherchaient l'objet à un endroit situé entre B et A, alors que ce biais en direction de A n'était pas trouvé chez ceux qui n'avaient pas eu les essais en A auparavant (Spencer, Smith et Thelen, 2001).

Une dernière prédiction était que l'erreur A-non-B ne devrait pas être faite par les bébés de 5 mois dans la mesure où, chez eux, le mouvement d'atteinte de l'objet n'est pas encore suffisamment stabilisé pour donner lieu à une trace précise en mémoire à long terme. Pour tester cette prédiction, Clearfield, Diedrich, Smith et Thelen (2006) ont aménagé la situation expérimentale pour l'adapter aux possibilités des bébés de 5 mois qui, à cet âge, ne cherchent pas encore l'objet mis sous un cache. Deux objets sont donc présentés au bébé, l'un en A, l'autre en B et ils sont tous deux visibles. Dans les essais A, l'expérimentateur agite l'objet qui est en A pour attirer l'attention du bébé, puis le repose. C'est alors que l'enfant s'en saisit. Dans l'essai B, l'expérimentateur agite l'objet situé en B puis le repose. Les résultats montrent que, conformément à la prédiction, les enfants de 5 mois saisissent l'objet situé en A dans les essais A et l'objet situé en B dans l'essai B. Ils ne font donc pas l'erreur A-non-B alors que, dans cette situation aménagée, les enfants de 8 mois la font¹⁰. Les auteurs en concluent que l'apparition vers 8 mois du comportement de persévération qui se manifeste dans l'erreur A non B est en fait à un progrès développemental qui correspond à la stabilisation de la trace laissée en mémoire par les mouvements d'atteinte effectués dans les essais précédents. Dans une seconde expérience, où sont étudiées à la fois l'erreur A non B dans cette situation aménagée et les caractéristiques cinématiques du mouvement d'atteinte de l'objet, ces auteurs montrent que l'apparition de l'erreur A-non-B va de pair avec la stabilisation du mouvement d'atteinte. Ceci est compatible avec – mais ne suffit pas à démontrer – l'hypothèse selon laquelle la trace laissée en mémoire à long terme par le geste d'atteinte est d'autant plus importante que le mouvement est stabilisé et donc relativement invariant entre les essais.

Selon Smith et Thelen (2003), ces résultats suggèrent que les formes de mémoire pertinentes dans cette situation sont codées dans le langage du corps, ce qui les conforte dans

¹⁰ L'évolution de la performance dans la situation A-non-B suit donc une courbe en U qui avait d'ailleurs été prédite par la simulation connexionniste qu'en avait faite Munakata (Munakata et al, 2003). Il a été fait allusion à cette prédiction dans la discussion de la partie consacrée aux modèles connexionnistes.

l'idée que la connaissance est incarnée dans le corps (sur cette notion d'*embodiment*, voir Smith, 2005). Elles soulignent aussi la pluralité des causes du comportement observé dans la situation A-non-B. Celles-ci incluent à la fois la disposition et la couleur des caches sur la table, l'événement que constitue la dissimulation de l'objet sous un des caches, le délai, l'activité passée de l'enfant dans cette situation et la sensation éprouvée, dans son corps même, à cette occasion. Du fait de la multi-causalité du comportement, la connaissance est distribuée sur un ensemble de composantes de nature hétérogène. La conduite émerge de l'interaction entre les composantes qui sont assemblées dans l'instant, en situation. Cette conception du développement conduit les partisans de l'approche des systèmes dynamiques à contester l'existence de concepts statiques qui seraient acquis à un moment donné du développement et fixés quelque part en mémoire. Dans l'optique dynamique, le comportement observé dans la situation A-non-B n'est pas considéré comme une manifestation de la présence ou de l'absence du concept d'objet mais comme l'état, dans une situation donnée et à un moment donné, de l'interaction entre les différentes composantes indiquées plus haut.

3.4. Discussion

Dans l'approche des systèmes dynamiques, du moins telle que la conçoivent Thelen et Smith, toutes les composantes se situent au même niveau et le comportement émerge de leurs interactions. Il n'y a pas de hiérarchie entre les différentes composantes ni d'instance exécutive dans le système. Dans l'exemple de l'erreur A-non-B ce modèle d'auto-organisation rend bien compte du développement de la persévérance - et de l'erreur qui en résulte - par la stabilisation des mouvements d'atteinte effectués dans les essais A et, en conséquence, du renforcement de la trace qu'ils laissent en mémoire. On voit moins bien comment il peut rendre compte de la disparition de l'erreur, dans la situation classique, vers un an. Il faudrait pour cela expliquer pourquoi l'activation de B est à ce moment là maintenue suffisamment longtemps, et avec suffisamment de force, pour l'emporter sur l'activation de A due à la trace laissée en mémoire à long terme par la répétition des essais en A. Il faut pour cela qu'il y ait maintien actif et renforcement de l'activation de B, rôle habituellement dévolu au système exécutif.

Cet aspect du développement paraît mieux pris en compte dans le modèle connexionniste de l'erreur A-non-B proposé par Munakata (1998). Ce auteur introduit une distinction entre maintien passif et maintien actif. Le premier est celui qui se produit lorsque la durée et la force d'activation de A augmentent avec la répétition des essais A. Le second est

celui qui se produit lorsqu'un mécanisme de rafraîchissement intervient pour empêcher le déclin de l'activation de B dans l'essai B. Dans le modèle de Munakata, le maintien actif est simulé par l'introduction de connexions réentrantes dans l'architecture du réseau. L'activation des unités A ou B par le regard, lorsque celui-ci est dirigé vers l'une ou l'autre de ces deux localisations, est transmise à des unités intermédiaires qui activent en retour, à leur tour, l'unité qui les a stimulées. Ces connexions réentrantes forment donc une boucle grâce à laquelle l'activation de l'unité B, qui tend à décliner une fois que le stimulus a disparu, peut s'auto-entretenir. Dans le modèle de Munakata, l'augmentation du poids de ces connexions réentrantes simule l'accroissement de la mémoire de travail qui est attribué à la maturation du cortex préfrontal.

4. Conclusion

Deux formes différentes de modélisation du changement cognitif ont été examinées dans ce chapitre, celle qui s'inspire du connexionnisme et celle qui adopte l'approche des systèmes dynamiques. Quels sont leurs rapports ? Ce sont les ressemblances qui frappent d'abord. Dans les deux cas, le traitement des informations est parallèle, distribué sur l'ensemble des connexions du réseau ou des composantes du système. Le changement émerge des interactions entre les unités du réseau ou entre les composantes du système, il se fait par itérations successives, dans une dynamique où ce qui suit dépend de ce qui précède. Dans les deux cas aussi, la fonction reliant les entrées et les sorties est non linéaire, de telle sorte que le même processus peut rendre compte à la fois de la continuité et de la discontinuité dans le changement, ainsi que des stabilités et des instabilités. Au regard de ces ressemblances, les spécificités paraissent secondaires. Le niveau d'intégration ciblé est différent, les composantes des systèmes dynamiques sont en général plus molaires et moins nombreuses que les unités des réseaux connexionnistes. Les modélisations connexionnistes sont plus tournées vers l'apprentissage, tandis que les modélisations dynamiques cherchent plus souvent à simuler les réorganisations provoquées par la manipulation de paramètres de contrôle. Enfin, les modèles dynamiques incluent plus souvent les caractéristiques du corps propre et celles du contexte dans les composantes du système alors que les modèles connexionnistes sont généralement plutôt centrés sur les relations internes au système cognitif. Ces différences paraissent plus tenir aux traditions de recherche en vigueur dans l'un et l'autre courant qu'à des limitations de nature formelle. Rien ne semble s'opposer à ce que chacune des deux approches puisse s'élargir à ce qui fait la spécificité de l'autre. C'est du

moins ce qui ressort de la lecture du numéro spécial que la revue *Developmental science* a consacrée à leur comparaison en 2003 (voir l'introduction de Thelen et Bates, 2003.)

Pour simplifier, un même vocable, celui de modélisation dynamique du changement, sera adopté dans ce qui suit pour désigner à la fois l'approche connexionniste et l'approche des systèmes dynamiques. Leur ressemblance le permet. Ces modélisations dynamiques du changement donc, ne sont pas des théories du développement. Elles ne fournissent à la psychologie du développement qu'un cadre méta-théorique et un cadre computationnel. Quel est alors, finalement, leur apport au constructivisme et, plus généralement, à la compréhension du développement psychologique ?

Du point de vue du cadre méta-théorique, la modélisation dynamique contribue à changer le regard sur la nature des structures cognitives et sur les mécanismes de leur évolution au cours de l'ontogenèse. Elle contribue notamment à enrichir et à opérationnaliser la notion d'auto-organisation qui est le noyau conceptuel central du constructivisme. C'est l'idée directrice autour de laquelle est organisé ce chapitre. Elle contribue à recentrer la psychologie du développement sur l'étude du processus de changement lui-même plutôt que sur la séquence des états. Elle contribue aussi à changer le statut de la variabilité, à attirer l'attention sur la sensibilité à l'état initial, les bifurcations, les différences de cheminement... Bref, elle introduit dans les modèles de développement une souplesse qui correspond mieux à ce que nous savons maintenant de la plasticité des connexions neuronales.

Du point de vue du cadre computationnel, la modélisation dynamique offre des outils de simulation qui permettent de spécifier de façon entièrement explicite les hypothèses sur les mécanismes de changement et d'en tester la validité par la simulation. Tous les modèles dynamiques du développement n'ont pas recours à la simulation. Le cadre méta-théorique peut suggérer des pistes de recherches, inspirer des hypothèses nouvelles, qui ne se prêtent pas nécessairement à une modélisation computationnelle et n'en sont pas pour autant moins intéressantes. Quelques exemples en ont été donnés dans ce chapitre. Néanmoins, la possibilité de simulation enrichit de façon intéressante les méthodes par lesquelles la psychologie du développement peut tester ses hypothèses.

Dans son état actuel, la modélisation dynamique a aussi ses limites. Pour n'en citer qu'une, une architecture cognitive dans laquelle le traitement est distribué sur un ensemble de composantes qui sont toutes de niveau équivalent, sans organisation hiérarchique, convient bien pour modéliser les formes de traitement procédurales, automatiques, qui jouent certainement un grand rôle dans l'ensemble du développement et plus particulièrement dans ses débuts. Elle se prête moins bien à la modélisation de formes de traitement contrôlées,

conscientes, dans lesquelles le système exécutif joue un rôle prépondérant. Or l'accroissement avec l'âge de la capacité attentionnelle, de la mémoire de travail, et plus généralement de contrôle exécutif, joue aussi un rôle important dans le développement . C'est ce que montre le chapitre suivant.

Lectures conseillées

Concernant l'approche connexionniste du développement :

Pour une introduction plus approfondie au connexionnisme voir, en langue anglaise mais très accessible, le premier chapitre de Elman et al (1992) ou, en langue française mais plus technique, Rennard (2006). Pour une revue de question récente sur l'approche connexionniste du développement, voir Elman (2005) ou Munakata & McClelland (2003). Enfin, pour des exemples de recherches récentes, voir l'ouvrage collectif édité par Quinlan (2003).

Concernant l'approche des systèmes dynamiques :

Pour une présentation approfondie de l'approche des systèmes dynamiques en psychologie du développement, voir l'ouvrage de Thelen et Smith (1994). Pour des articles de synthèse plus récents, voir Smith et Thelen (2003), Thelen et Smith (2006), et van Geert (2004).

Concernant les relations entre ces deux approches :

Voir l'article de Thelen & Bates (2003), qui introduit le n° special consacré à cette question par la revue *Developmental science*.

Toutes ces références figurent dans la bibliographie située en fin de volume.

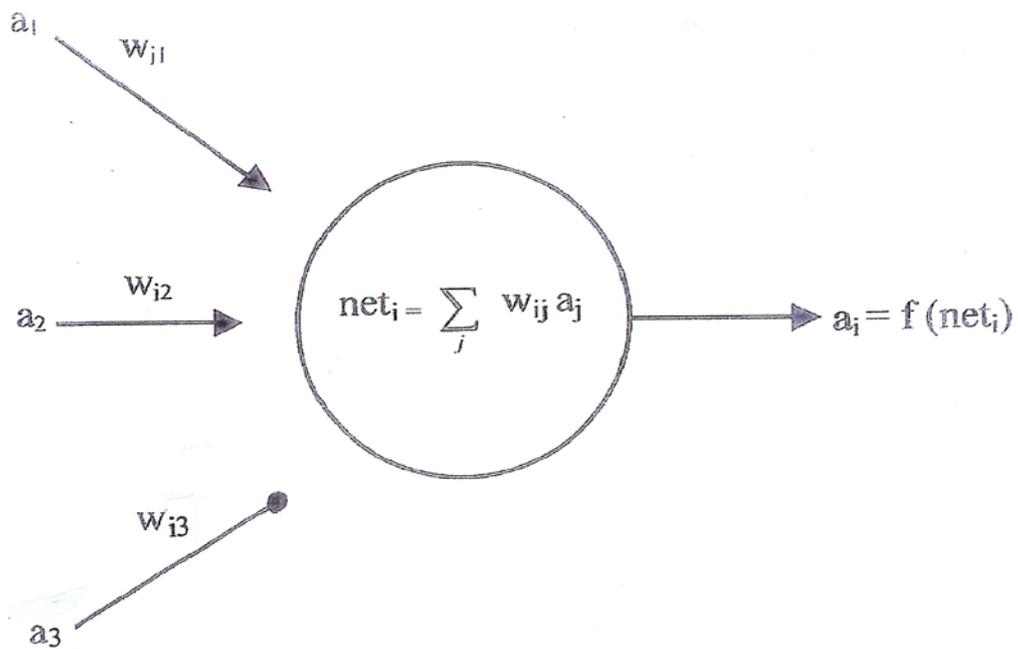


figure 1.1. Schéma résumant la façon dont un neurone formel intègre les activations en provenance des neurones qui lui sont connectés et transfère sa propre activation aux neurones suivants.

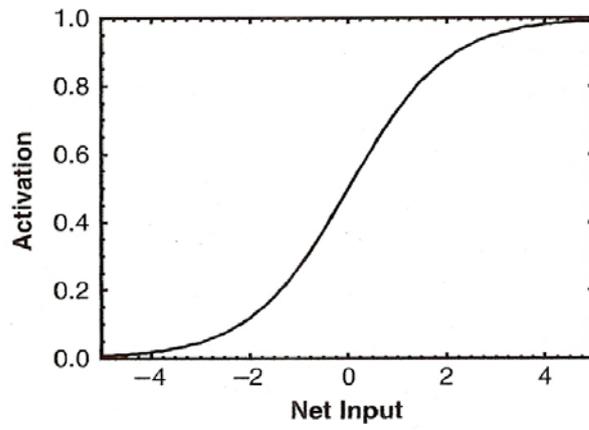


Figure 1.2. Forme de la fonction logistique

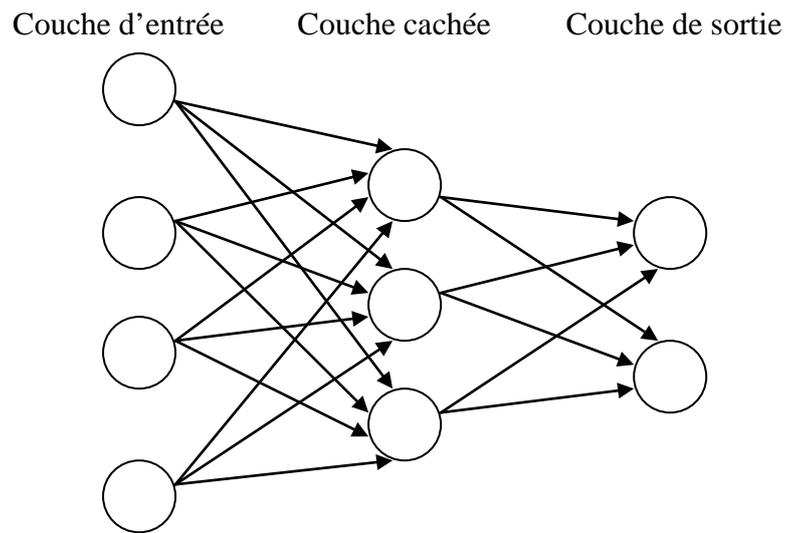


Figure 1.3. Exemple de réseau multicouches à propagation avant et à connexions complètes

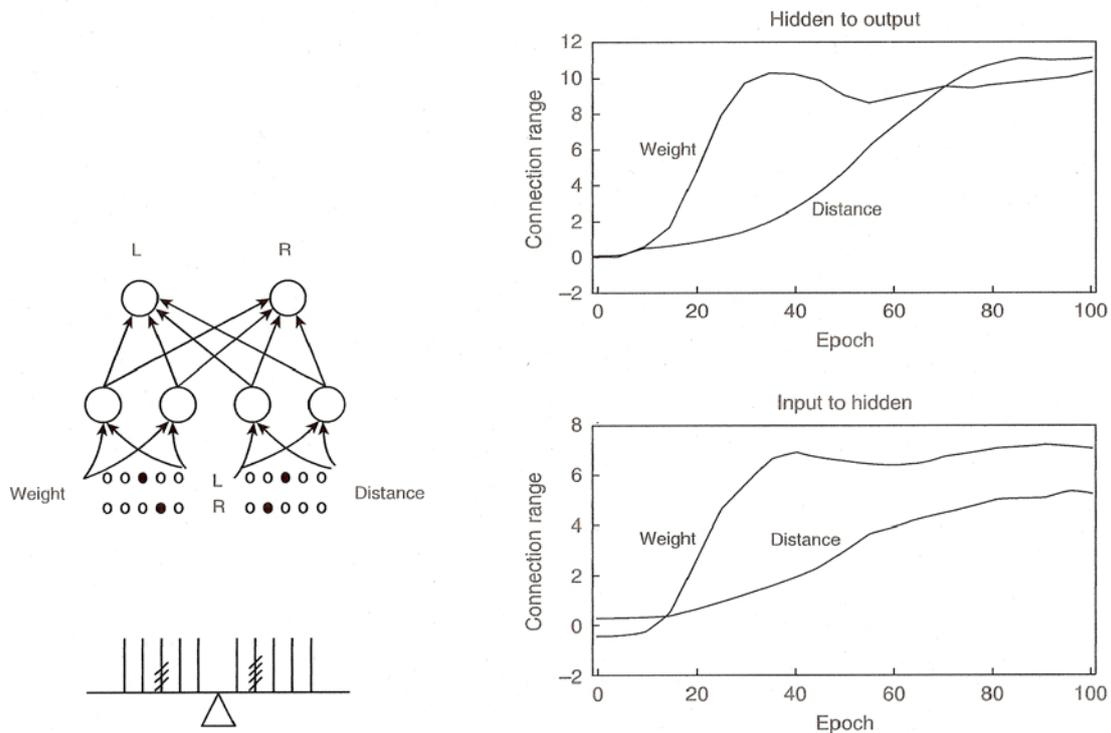


Figure 1.4. A gauche en bas, le schéma d'un exemple d'item du problème de la balance (3 poids sur la troisième tige à gauche du point d'équilibre et 4 poids sur la seconde tige à droite). A gauche en haut, un schéma de l'architecture du réseau neuronal à trois couches utilisé dans la simulation connexionniste de McClelland, sur lequel cet item particulier est codé dans les unités de la couche d'entrée (unités en noir). A droite figurent les courbes montrant l'évolution de l'impact du poids et de la distance sur la force des connexions du réseau au cours de l'apprentissage. La suite des époques de la simulation figure en abscisse. L'écart moyen entre les forces des différentes connexions figure en ordonnée. Cet écart évalue le degré auquel les connexions considérées discriminent les différentes valeurs de poids et de distance codées dans les unités d'entrée du réseau. Le graphique du haut montre cette évolution pour les connexions reliant les unités de la couche cachée aux unités de la couche de sortie (hidden to output). Le graphique du bas donne la même information pour les connexions reliant les unités de la couche d'entrée aux unités de la couche cachée (input to hidden). (Reproduction des figures 2.7 p. 25 et 2.12 p. 32 de l'article de McClelland (1989). Copyright Oxford University Press. Reproduites avec l'autorisation).

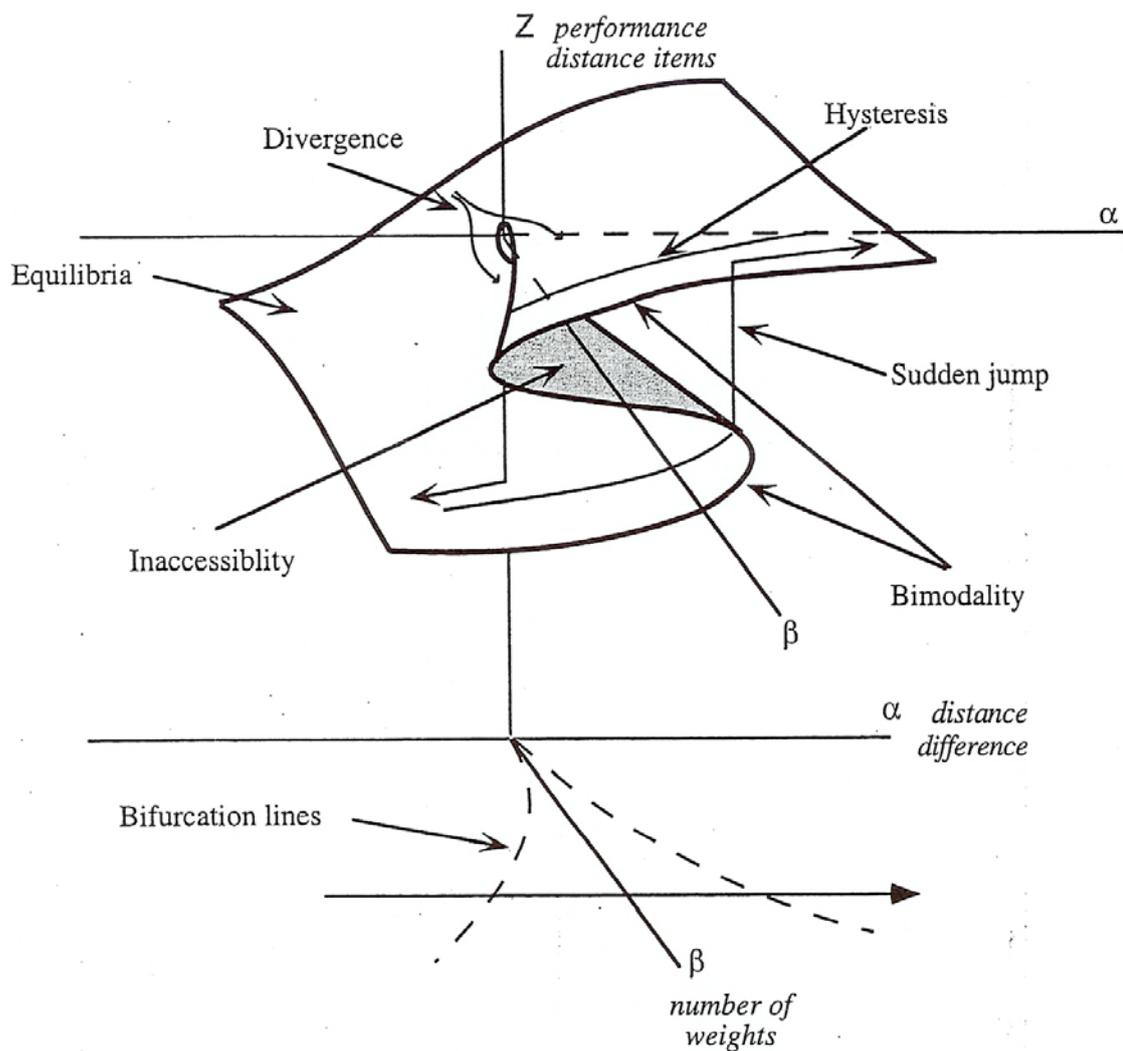


Figure 1.5. Modèle de la fronce pour la transition entre la règle I et la règle II dans la résolution du problème de la balance. Dans ce modèle, les points d'équilibre pour la variable collective Z forment une surface formant une fronce en trois dimensions. Pour certaines valeurs de α et de β (entre les deux lignes de bifurcation) deux formes d'équilibre stable existent (ainsi qu'une zone de répulsion entre les deux). L'augmentation progressive de la valeur de la variable de contrôle située sur l'axe α (différence de distance) provoque un saut brusque vers le haut (de la règle I à la règle II) dans la valeur de la variable collective qui est sur l'axe Z . La diminution progressive de la valeur de cette même variable de contrôle (différence de distance) provoque un saut brusque vers le bas (de la règle II à la règle I) dans la valeur de la variable collective. L'hysteresis correspond au fait que le saut brusque vers le haut se produit pour une valeur plus élevée de la variable de contrôle α que le saut brusque vers le bas. La divergence correspond au fait que lorsque la valeur de la variable de contrôle β (différence de poids) est augmentée, le saut brusque entre les valeurs basses et les valeurs hautes de la variable collective Z devient plus extrême. Les interprétations des axes en termes de transition entre la règle I et la règle II sont indiquées en italique (Source : « Evidence for the phase transition from rule I to rule II on the balance scale task » par B.R.J. Jansen et H.L.J. van der Maas, *Developmental review*, 21, 450-494, copyright A.P.A., figure reproduite avec autorisation).

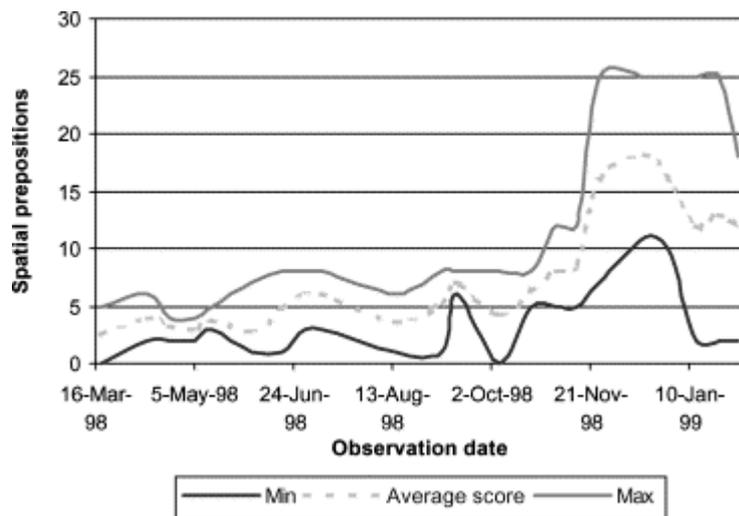


Figure 1.6. Evolution développementale de l'étendue de la variabilité dans le nombre de prépositions spatiales énoncées par Heleen au cours des séances d'observation (Source : Focus on variability, par van Geert et van Dijk, 2002, *Infant behavior & development*, 22, p. 340-374. Copyright Elsevier Limited, figure reproduite avec autorisation)