

Juhel, J. (à paraître). Les systèmes dynamiques non linéaires dans l'étude de la variabilité cognitive. In B. Cadet et R. Hérin (Eds.), *La complexité : ses formes, ses traitements, ses effets : approches transdisciplinaires*. Caen, P.U.C.

Les systèmes dynamiques non linéaires dans l'étude de la variabilité cognitive

Jacques Juhel¹

Université Rennes 2

¹ Groupe de recherche en psychologie différentielle, Laboratoire de psychologie expérimentale, CRPCC - Université de Rennes 2, Place du Recteur Henri Le Moal - CS 24307, 35043 Rennes cedex. mel : jacques.juhel1@wanadoo.fr

Les voies de recherche empruntées jusqu'ici par la psychologie scientifique dans ses efforts d'élucidation des mécanismes explicatifs des conduites humaines ont en commun une certaine épistémologie qui relie directement la métaphore de la cause « efficiente » (Van Orden et Holden, 2002) à l'étude empirique de la régularité de variations comportementales de systèmes dont les composantes, une fois certaines conditions externes spécifiées, produisent leurs effets de manière déterministe et prédictible. C'est ainsi qu'on a cherché en psychologie expérimentale à mettre en évidence les variables causales susceptibles d'intervenir entre le stimulus et la réponse en analysant la conduite d'un sujet moyen sur la base de patrons moyens de performance liés à la manipulation de telle ou telle caractéristique de la situation. C'est de façon comparable, en décrivant les variations interindividuelles par rapport à une moyenne idéalisée, qu'on a cherché en psychologie différentielle à identifier les sources manifestes ou latentes des variations interindividuelles. Participant d'une même logique conventionnelle, ces deux démarches appliquées à la modélisation homéostatique de la cognition placent les phénomènes non prévisibles à la marge des régularités qui transcendent les conduites. Elles s'attachent l'une et l'autre à l'étude des variations régulières causées par des manipulations expérimentales ou liées à des caractéristiques individuelles en négligeant ou contrôlant les formes de variabilité susceptibles de masquer le déterminisme sous-jacent des phénomènes étudiés. Elles appliquent aussi à la régularité comportementale ainsi dégagée un même principe de superposition qui fonde la plupart des méthodes statistiques employées (analyse de variance, analyse factorielle, analyse de Fourier, etc.).

Or cette dichotomie stricte entre invariants et variants, classique dans les recherches sur la cognition, semble être aujourd'hui à relativiser. Deux grands mouvements d'idée ont en effet largement contribué à faire évoluer la question de l'articulation entre invariants et variabilité. La théorie synthétique de l'évolution d'une part qui permet de comprendre les propriétés adaptatives du vivant et les faits de changement comme le résultat de processus combinant le hasard des variations aléatoires et la nécessité de la sélection naturelle. La pensée de la complexité d'autre part qui offre des outils conceptuels et méthodologiques permettant d'appréhender des phénomènes à la fois stables et instables qui « réfléchissent les interactions fonctionnelles complexes entre les multiples éléments d'un système dynamique soumis à des contraintes endogènes et exogènes fluctuantes » (Juhel, 1997, p. 36). Les conséquences de cette évolution épistémologique sont importantes pour la psychologie cognitive (Lautrey, 2003 ; Lautrey, Mazoyer et Van Geert, 2002). Si comme il paraît raisonnable de le penser, invariants et variabilités sont « les deux faces d'une même pièce », il faut accorder à la

variabilité plus d'intérêt théorique qu'on ne lui en a porté jusqu'ici en cherchant à conceptualiser autrement certains des phénomènes que nous étudions. Les conséquences de l'évolution du statut de la variabilité sont aussi méthodologiques. Le problème se pose en effet de repérer dans les variations celles dont on veut comprendre la signification fonctionnelle, ce qui nécessite de nouvelles méthodes d'observation et d'analyse permettant de les différencier de celles qu'il convient de traiter comme du bruit

1. Invariants et variabilité : la complexité de l'événement cognitif

L'existence de variations dans le domaine cognitif est un fait psychologique essentiel dont les manifestations, intra-individuelles notamment, prennent diverses formes selon le niveau d'observation et l'échelle de temporalité choisis (Lautrey, 1995). Une première forme de variabilité intra-individuelle manifeste des modifications réversibles correspondant à l'adaptation stratégique et comportementale de l'individu aux contraintes endogènes et exogènes liées à la tâche. Celle-ci est appelée « vicariance » par Reuchlin (1978). Un enfant de 5 ans ayant à résoudre plusieurs exercices du type « parmi ces deux lignes de perles, quelle est celle où il y en a le plus ? » peut ainsi, selon les configurations proposées ou selon le moment, s'appuyer sur la longueur de la ligne, sur le type de transformation ou mettre en correspondance les deux ensembles (Siegler, 1995). Cette forme de variabilité est également repérable chez l'adulte. Un lecteur qui lit et relit un texte complexe pour en dégager la signification peut mobiliser plusieurs stratégies distinctes de lecture et de re-lecture, certaines étant plus guidées par des aspects structuraux et sémantiques du texte que d'autres, plus globales, ce qui rend délicate toute classification des lecteurs en fonction d'une stratégie mobilisée de façon stable au cours du temps (Goldman et Saul, 1990). Certaines des irrégularités comportementales observées dans le domaine cognitif peuvent donc être attribuées à la vicariance des processus.

Une autre forme de variabilité intra-individuelle semble avoir pour fonction d'offrir au système cognitif des possibilités d'organisation et de réorganisation. Cette variabilité naturelle (Ward, 1991) ou spontanée (Lautrey, 1995) paraît en effet intrinsèquement liée au fonctionnement du système cognitif. Giraud et Pailhous (1999) en étudient le rôle et la signification dans la formation et la stabilisation d'images spatiales chez des adultes apprenant à reproduire une configuration de points (la cible). La tâche comporte 40 essais, la cible étant présentée au premier essai puis en milieu de tâche. La précision de l'image (distance entre la reproduction et la cible) et sa variabilité (distance entre deux reproductions successives) sont mesurées à chaque essai. Les auteurs notent que l'évolution au cours des

premiers essais vers un niveau maximum de stabilité de l'image (variabilité minimum) s'effectue indépendamment de la précision de celle-ci. Ils observent également un accroissement considérable de la variabilité lorsque la cible est présentée pour la seconde fois. Faisant remarquer que la construction d'une image mentale présuppose que le niveau d'instabilité du système ne soit pas trop élevé (voir aussi van Geert, 1998), Giraudo et Pailhous suggèrent que la variabilité naturelle est une « condition d'adaptabilité » du système cognitif. Les résultats de certaines études chez l'enfant peuvent être rapprochés des précédents. Siegler (1994, 1995 ; Siegler et Shipley, 1995) rappelle par exemple qu'au cours du processus de découverte de stratégies nouvelles, une importante et imprévisible variabilité intra-individuelle des conduites peut être observée pour les items précédant celui où la découverte est faite. Goldin-Meadow, Nusbaum, Garber et Church (1993) observent cette même forme de variabilité intra-individuelle. Ils estiment qu'elle reflète les oscillations entre l'activation de stratégies adaptées et celle de stratégies inadaptées à la tâche. L'activation et l'évaluation simultanée de plusieurs stratégies (processus, règles d'action, etc.) permettraient ainsi à l'enfant de passer d'une stratégie préférentiellement mobilisée dans le passé, mais désormais immature, à une stratégie plus mature. Comme ces résultats et d'autres semblent le suggérer, la variabilité intra-individuelle naturelle déplacée vers une variabilité d'émergence fonctionnelle pourrait donc avoir une importante fonction adaptative.

Conséquence fonctionnelle ou agent du changement adaptatif, la variabilité intra-individuelle semble donc bien être un constituant indissociable de la cognition humaine. Il s'agit alors de reconnaître la complexité de l'activité cognitive, de faire appel à un nouveau langage, à un nouveau cadre d'analyse qui permette d'en appréhender aussi bien les manifestations multiples de stabilité (les comportements stables aussi bien que les différences stables de comportement entre individus) que les diverses formes d'instabilité (certaines formes informatives de variabilité comportementale). Les approches dynamiques de la cognition offrent à cet égard d'intéressantes perspectives que nous nous proposons maintenant de mettre en lumière.

2. L'hypothèse dynamique dans l'étude de la cognition humaine

2.1. Les agents cognitifs sont des systèmes dynamiques

Le rôle du temps dans l'activité cognitive n'est pas compris par tous les psychologues de la cognition de la même façon (van Gelder, 1998). L'approche classique situe la complexité de la cognition dans des structures élaborées à un moment donné -dans la machinerie cognitive

interne- plus que dans le temps lui-même. Dans son principe général, le système est computationnel et représentationnel : il reçoit de l'information, la transforme en représentations symboliques sur lesquelles il effectue certaines opérations, programme certaines formes d'action. Mais d'une certaine manière, le système est intemporel en ce sens que le temps y est plus souvent considéré comme un facteur extrinsèque à la performance cognitive (par ex., l'âge chronologique dans l'étude de la pensée opératoire chez l'enfant, dans la comparaison entre juniors et seniors de la performance à des tâches d'inhibition cognitive ou le nombre de répétitions dans une tâche d'apprentissage) que comme un constituant indissociable de celle-ci. Le point de vue des approches dynamiques contemporaines, sans être inconciliable avec le précédent, n'est pas tout à fait le même. La cognition est en effet comprise comme un phénomène essentiellement temporel dont la complexité tient dans le flux du changement lui-même. Les phénomènes observables y sont considérés comme des propriétés émergentes de systèmes dynamiques capables de développer des structures à la fois stables et flexibles pour s'ajuster aux contraintes que les contextes imposent. Les processus cognitifs y sont conçus comme des variables collectives situées, emboîtées (« des cerveaux dans des corps dans des contextes », Kelso, 1995), les représentations mentales comme des entités dynamiques transitoirement stables (des états du système, des trajectoires façonnées par des attracteurs). Les recherches s'inscrivant dans cette perspective générale sont aujourd'hui très nombreuses en psychologie. Elles s'attachent principalement à décrire l'évolution dans le temps et la sensibilité aux manipulations expérimentales de certains agents moteurs, perceptifs ou cognitifs. En voici quelques illustrations dans les domaines du comportement moteur, du changement développemental et du fonctionnement cognitif.

Les travaux effectués par Thelen, Smith et collaborateurs sur l'acquisition des habiletés motrices chez le bébé (Thelen, 1995) ou par Kelso (1995) sur la dynamique des coordinations bimanuelles rythmiques chez l'adulte montrent de manière probante que l'action de l'individu est indissociable de la perception des possibilités d'action qui lui sont offertes et des modifications de l'environnement susceptibles de modifier celles-ci (van Geert, 1998a). Thelen étudie le réflexe de marche du nourrisson dont on sait qu'il disparaît vers 2 mois pour réapparaître environ 6 mois plus tard. Elle constate qu'en manipulant certaines caractéristiques de la situation (par ex., la vitesse d'un tapis roulant sur lequel les jambes du bébé sont en appui, l'immersion des membres inférieurs dans de l'eau, etc.), il est possible de provoquer l'apparition du réflexe de marche chez des bébés l'ayant - provisoirement - perdu.

Ce type d'observation suggère que le réflexe de marche est une propriété émergente de l'interaction des constituants, généraux ou plus spécifiques, assemblés par la tâche et que « la stabilité, les discontinuités et de nouvelles formes d'organisation émergent précisément des interactions complexes entre de multiples forces hétérogènes » (Thelen et Smith, 1994). Les travaux de Kelso sur les coordinations bimanuelles rythmiques conduisent au même type d'interprétation. Kelso met en effet en évidence une dynamique spontanée de coordination (variable collective ϕ), des transitions de phase sous l'effet de l'augmentation de la fréquence du rythme, une plus grande stabilité des patterns intrinsèques et l'existence de mécanismes de compétition et coopération entre dynamiques intrinsèques et information comportementale. De tels résultats apportent de solides arguments en faveur de l'hypothèse selon laquelle la coordination motrice est fondamentalement un système dynamique de formation de patterns en équilibre au bord de l'instabilité.

Smith, Thelen, Titzer et McLin (1999) envisagent dans cette même perspective la célèbre erreur « A-non B » mise en évidence par Piaget chez le nourrisson de 9 mois. La situation expérimentale consiste à placer devant le bébé deux caches A et B, à introduire sous les yeux de l'enfant et à plusieurs reprises, un jouet sous le cache A, puis à placer, toujours de manière visible par le bébé, le jouet sous le cache B. Le bébé commet l'erreur « A-non B » s'il continue à chercher le jouet sous le cache A. Diverses catégories d'explications de l'erreur « A-non B » ont été proposées. Pour Piaget, l'erreur s'explique par l'absence du schème de permanence de l'objet chez le nourrisson. D'autres interprétations ont été suggérées depuis : une mauvaise représentation de l'espace (égocentrique plutôt qu'allocentrique), des capacités mnésiques insuffisamment développées, un défaut exécutif d'inhibition motrice relevant éventuellement d'un défaut d'inhibition cognitive. Smith et ses collègues opposent pour leur part une interprétation dynamique. Les observations effectuées montrent bien comment le geste programmé émerge des interactions complexes entre des processus en évolution, auto-organisés à la fois par les aspects spécifiques à la tâche et par la direction du regard, la position du corps et les actions antérieures du bébé. Les auteurs font en particulier remarquer que la direction du geste programmé repose toujours sur l'input spécifique et la mémoire du passé, les comportements antérieurs agissant comme une contrainte sur la sélection de l'action. La persévérance du geste antérieur, l'erreur « A-non B » serait donc le signe que le bébé n'a pas résolu un problème de satisfaction de contraintes.

La modélisation dynamique proposée par Thelen et Smith cherche à traduire de manière formelle l'idée de changement continu de direction des gestes du bébé en fonction de

diverses influences. L'espace des gestes possibles ou « champ de planification du mouvement » est ainsi représenté par une fonction $u(x,t)$ -tendance du geste, à l'instant t , à s'orienter vers l'endroit x - dont le changement dans le temps dépend de l'état courant du champ de planification du mouvement, d'aspects généraux et spécifiques de la situation, de la mémoire des actions antérieures ou d'interactions compétitives entre les directions empruntées, facteurs dont l'influence évolue elle-même au cours du temps. Les résultats des simulations effectuées montrent qu'il est possible d'observer l'erreur « A-non B » pour certaines valeurs des paramètres de l'équation différentielle qui spécifie l'ensemble de ces relations.

On peut brièvement résumer ce qui caractérise l'étude d'un phénomène psychologique considéré comme une propriété émergente d'un système dynamique. Dans l'exemple précédent, l'analyse porte moins sur ce que pense l'enfant (les processus cognitifs impliqués dans l'erreur « A-non B ») que sur ce qu'il fait, moins sur un élément singulier du système individu/situation/environnement que sur le fonctionnement du système dans lequel des aspects de l'environnement et de la tâche jouent un rôle intégral en même temps que le contexte mental et l'activité de l'enfant. A un niveau local, le fonctionnement de tels systèmes dynamiques est bien sûr infiniment complexe ce qui rend impossible toute réplique et toute prédiction à long terme. A un niveau global cependant, des réorganisations autonomes du système se produisent qui peuvent s'expliquer par l'apparition, liée aux contraintes contextuelles et/ou à des variations spontanées ou aléatoires, de différents attracteurs en compétition jusqu'à ce que l'un d'entre eux -le paramètre d'ordre- l'emporte sur les autres en asservissant le comportement des composantes élémentaires du système (par ex., l'erreur « A-non B » comme comportement émergent des interactions en cours dans des conditions spécifiques).

2.2. La cognition est l'instanciation de systèmes auto-organisés

L'hypothèse dynamique conduit à concevoir la cognition comme l'instanciation de systèmes de formation de patterns d'activité en équilibre au bord de l'instabilité (Kelso, 1995). Certains aspects spécifiques du fonctionnement et du changement cognitifs peuvent ainsi être mis en relation avec des propriétés caractéristiques des systèmes dynamiques non linéaires.

La propriété la plus fondamentale est celle d'auto-organisation. Celle-ci réfère à un processus par lequel un pattern d'activité –une forme, une structure- émerge d'un système complexe, ouvert, qui tend à s'auto-organiser pour produire un comportement adapté. La propriété de causalité circulaire ou processus par lequel chaque événement cognitif est à la fois cause et

produit, sensible au présent et lié au passé, est étroitement liée à celle d'auto-organisation. La rétroaction positive apparaît même comme une condition de l'auto-organisation en amplifiant les relations non linéaires entre les constituants du système. L'ordre ou intégration d'ensemble des constituants du système (le paramètre collectif) émerge alors des liens entre des dynamiques partagées par des événements survenant à différents niveaux d'intégration. Cette propriété d'émergence découle de la non linéarité de l'évolution du comportement du système dans le temps. L'auto-organisation sous-tend ainsi la formation dynamique de patterns provisoirement stables –ou attracteurs-, par couplage récurrent, assemblage de constituants s'ajustant réciproquement et continuellement grâce à la rétroaction positive. Bien que l'instabilité des systèmes dynamiques non linéaires comporte une propriété remarquable de stabilité par rapport à des petites perturbations, ceux-ci sont aussi très flexibles car sensibles aux changements critiques dans l'environnement ou dans la structure du système lui-même. De tels changements peuvent amplifier l'action de la rétroaction positive. L'amplification progressive de certaines fluctuations « critiques » peut alors produire avec le temps un nouvel état stable par couplage de certains constituants endogènes et/ou exogènes du système ; d'anciens patterns d'activité peuvent être éliminés (nucléation), de nouveaux peuvent apparaître soudainement, divers patterns d'instabilité peuvent être observés.

Plus formellement, divers modèles mathématiques peuvent être employés pour étudier les dynamiques non linéaires (voir pour introduction Abraham et Gilgen, 1995 ; Baker, 1995 ; Heath, 2000 ; Murray, 1995 ; Townsend, 1992 ; van Geert, 1994). Certains d'entre eux sont largement utilisés dans les modélisations connexionnistes (par ex., la modélisation des groupes de neurones dans le cadre de la théorie de la résonance adaptative de Grossberg, 1982). D'autres que nous évoquerons plus loin décrivent de manière plus explicite l'activité cognitive, son évolution, en décrivant la relation temporelle entre des états successifs du système par la relation fonctionnelle existant entre un ensemble de propriétés présentes et un ensemble de propriétés passées (par ex., à l'aide d'équations aux différences finies ou d'équations différentielles comme dans le modèle de formation de patterns de Grindrod, 1991).

Appliquées à l'étude d'agents cognitifs comme la coordination, le contrôle attentionnel ou l'intentionnalité, ces idées d'auto-organisation, de formation de patterns, d'attracteur ou de bifurcation offrent au psychologue de la cognition la possibilité de concevoir la stabilité et le changement des conduites comme résultant d'un même « processus dynamique tout autant sensible au contexte, imprévisible et indéterminé qu'organisé et intelligent » (Garson, 1995).

Les outils mathématiques des dynamiques non linéaires permettent aussi de tester ces hypothèses, appliquées à l'étude du fonctionnement et du développement cognitifs, alors même que l'inférence causale des formalisations déterministes est souvent compromise par l'interdépendance entre les variables critiques du système ou par des changements non prévisibles dans les dynamiques de celui-ci.

3. Dynamiques non linéaires en psychologie cognitive : stratégies de recherche

Les applications des systèmes dynamiques non linéaires se sont multipliées ces dernières années en psychologie : un nombre croissant d'articles scientifiques, plusieurs ouvrages collectifs récents (Abraham et Gilgen, 1995 ; Guindani et Salvatori, 1998 ; Robertson et Combs, 1995 ; Sulis et Combs, 1996 ; Tschacher et Dauwalder, 1999) et la naissance en 1997 de la revue scientifique *Nonlinear Dynamics, Psychology and Life Sciences* attestent de cette évolution. Les modélisations actuelles proposent une vision souvent très suggestive des dynamiques qui sous-tendent par exemple la perception (Kruse et Stadler, 1995 ; Skarda et Freeman, 1990), le développement locomoteur (Thelen, 1989, 1995 ; Thelen et Smith, 1994), la construction de l'objet (Smith, Thelen, Titzer et McLin, 1999), l'acquisition du langage (Van Geert, 1991), l'apprentissage (Cooney et Conostas, 1993 ; Vetter, Stadler et Haynes, 1997 ; Zanone et Kelso, 1992), les relations entre cognition et émotion (Lewis, 1995, 1997) ou le fonctionnement et l'évolution des organisations (Guastello, 1995).

Les stratégies de recherche employées sont diverses. Elles peuvent aller d'une simple approche métaphorique dans laquelle on cherche à mettre en perspective des phénomènes psychologiques autorégressifs et certaines propriétés des systèmes dynamiques non linéaires à des modélisations mathématiques plus ou moins sophistiquées. Nous nous limiterons ici à illustrer deux grandes attitudes de recherche. La première, centrée sur des observations empiriques, consiste à évaluer empiriquement la validité de certaines prédictions issues de l'hypothèse dynamique, éventuellement au moyen de méthodes statistiques non linéaires. La seconde, plus centrée sur les modèles, emploie les outils mathématiques des dynamiques non linéaires pour modéliser un processus cognitif de niveau micro ou macro, en simuler le fonctionnement et/ou l'évolution, rapprocher les résultats obtenus de la réalité empirique.

3.1. L'évaluation empirique de prédictions issues de l'hypothèse dynamique

Van der Maas et Molenaar (1992, 1996) testent l'hypothèse de discontinuité dans l'acquisition de la conservation du volume chez des enfants de 6 à 11 ans. La situation expérimentale comporte deux phases : présentation à l'enfant de deux récipients identiques remplis d'une

même quantité de liquide ; transvasement, sous les yeux de l'enfant, du liquide d'un des deux récipients dans un troisième de hauteur et/ou de diamètre différents. L'enfant doit alors indiquer s'il y a « pareil ou pas pareil de liquide » dans le troisième récipient.

Les auteurs proposent une modélisation non linéaire basée sur la théorie des catastrophes (Stewart et Peregoy, 1983). Cette théorie qui prédit des oscillations et des comportements instables dans les phases de transition entre états stables met en relation les bifurcations du comportement du système avec des variables (des paramètres de contrôle) qui pour certaines valeurs critiques « libèrent » la réorganisation spontanée du système. La fionce (modèle à deux paramètres de contrôle) est la catastrophe retenue par les auteurs pour décrire les relations entre Z, l'état du système, et les paramètres de contrôle X (asymétrie) et Y (bifurcation) (figure 1). Dans la région de bifurcation du plan de contrôle défini par les paramètres de contrôle, le système dont les comportements sont représentés par une surface tridimensionnelle peut adopter un comportement instable et deux comportements stables. En dehors de la région de bifurcation, un seul état stable est possible. Selon les valeurs des paramètres de contrôle, le comportement du système passe soudainement d'un premier attracteur stable à un second (bimodalité). On observe avant cette transition de phase une déstabilisation auto-catalytique du système se traduisant par des fluctuations critiques (des essais et erreurs vicariants) puis un ralentissement critique du processus marquant la tendance du système à persister dans l'état stable antérieur.

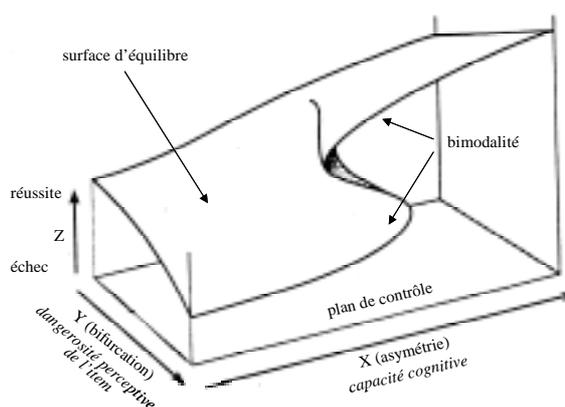


Figure 1 – Modèle en fionce : surface d'équilibre d'équation $Z^3 - YZ - X = 0$.

Les paramètres de contrôle choisis par van der Maas et Molenaar (1996) sont la capacité cognitive de l'enfant (X) et la « dangerosité perceptive » Y de la situation (le contexte perceptif peut plus ou moins induire l'enfant en erreur). Les modes de comportement sont mesurés par la variable dépendante dichotomique Z : échec (non-conservant) vs réussite

(conservant). La recherche d'une durée de 7 mois concerne une centaine d'enfants à qui on administre à plusieurs reprises des items informatisés de dangerosité perceptive variable construits de façon à permettre la distinction des stratégies, règles et opérations utilisées. Les auteurs cherchent à en mettre en évidence des phénomènes comme la bimodalité (non-conservant, conservant), une variabilité anormalement élevée avant un changement brutal de comportement ou de l'hystérèse (changement d'état ne se produisant pas au même moment selon le sens, croissant ou décroissant, des variations d'un paramètre de contrôle).

L'hypothèse du passage brutal de l'état de non-conservant à celui de conservant est testée en répartissant les enfants en 4 groupes : a) non-conservant ; b) transitionnel (i.e., conservant ou non-conservant selon le degré de dangerosité perceptive des items) ; c) conservant ; d) résiduel (i.e., réponses au hasard pour des items faiblement inducteurs). L'examen des courbes individuelles des enfants du groupe transitionnel montre une augmentation brutale, d'une session à une autre, du score de conservation de 24 enfants sur 31. La variabilité interindividuelle est aussi plus élevée chez ces enfants que chez ceux des autres groupes. Des analyses complémentaires menées sur les réponses de ces mêmes enfants suggèrent également qu'ils utilisent des stratégies inhabituelles faisant appel à des formes intermédiaires de raisonnement. Aucun de ces résultats n'est observé chez les autres participants. Le tableau est moins clair cependant pour le phénomène d'hystérésis, testé dans cette étude par contre suggestion (on propose à l'enfant de réfléchir à la réponse opposée à celle qu'il vient de donner), une façon en quelque sorte de juger de la stabilité du comportement adopté en faisant varier l'ordre de présentation des items (de dangerosité perceptive faible à élevée puis de dangerosité perceptive élevée à faible). La bimodalité, le changement brutal d'état ou l'accroissement de la variance au voisinage de la bifurcation constatés dans cette étude (voir Hosenfeld, van der Maas et van den Boom, 1997, pour des résultats comparables à une tâche de raisonnement analogique chez des enfants de 5 à 11 ans) vont néanmoins dans le sens de l'existence d'une discontinuité comportementale (la conservation du volume) reliée au changement continu d'un paramètre de contrôle (la dangerosité perceptive de l'item) c'est-à-dire d'une transition de phase, d'un changement qualitatif dans la dynamique du système.

Les outils mathématiques des dynamiques non linéaires peuvent être également très utiles pour analyser des séries temporelles c'est-à-dire des séquences d'observations répétées chez un même individu. Cooney et Constan (1993) emploient l'analyse des systèmes dynamiques non linéaires pour étudier l'évolution de la performance cognitive avec l'entraînement (la loi puissance classique traite les non linéarités comme de l'erreur). Les données d'observation

sont recueillies chez un sujet adulte à l'aide d'une tâche chronométrique de recherche visuelle dans laquelle il faut indiquer le plus rapidement possible si 4 lettres (les mêmes tout au long de la tâche) appartiennent à la série de 8 lettres présentée à l'écran. Le sujet effectue 250 essais chaque jour, 8 jours de suite. Les résultats obtenus, moyennés en blocs de 4 essais, sont présentés sous une forme habituelle sur la figure 2-a (loi puissance, $R^2=0.97$). On y voit apparaître des irrégularités temporelles dont le caractère aléatoire est interrogé par les auteurs.

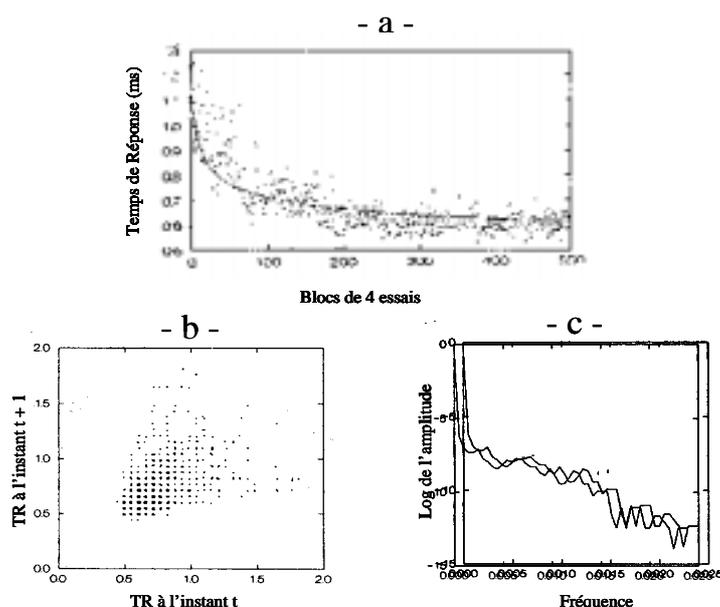


Figure 2 - a) Evolution des latences avec l'entraînement ; b) Carte de premier retour ; c) Spectre de Fourier des latences (d'après Cooney et Constas, 1993, p. 176-178).

L'évolution temporelle du système décrite par la carte de premier retour montre d'abord que certaines régions sont plus visitées que d'autres, ce qui traduit la présence d'un attracteur, ici proche de l'origine (figure 2-b). Ces mêmes fluctuations sont également observées quel que soit le décalage de la série temporelle (propriété d'invariance d'échelle ou auto-similarité). L'analyse spectrale laissant penser que la dynamique du système n'est sans doute pas périodique (figure 2-c), Cooney et Constas estiment enfin la dimension de l'attracteur -le nombre de variables qui gouvernent le pattern comportemental temporel du système- à l'aide d'une technique numérique spécifique à l'analyse des systèmes dynamiques. La complexité de la dynamique sous-jacente étant de l'ordre de 7, les auteurs concluent à l'existence d'un attracteur fractal. Une telle analyse exploratoire ne renseigne bien sûr pas sur la nature des mécanismes sous-jacents. Elle permet d'aboutir cependant à des résultats qui montrent que des variations habituellement traitées comme de l'erreur peuvent ne pas nécessairement en être et sont donc réductibles pour partie.

Sensiblement moins exigeante du point de vue du nombre d'occasions de mesure nécessaire, une autre méthodologie peut être employée pour tester la présence d'un processus dynamique dans des séries temporelles et distinguer la variabilité intra-individuelle informative de l'erreur de mesure (Boker, 2001; Boker et Nesselroade, 2002). Boker prend pour exemple les systèmes auto-régulés dont le comportement d'oscillation autour de l'équilibre est sous-tendu par un double mécanisme de réduction des écarts et d'amortissement progressif de ceux-ci (figure 3a). Ce mécanisme d'auto-régulation peut être représenté par l'oscillateur linéaire amorti d'équation :

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} - \zeta \frac{dx(t)}{dt} - \eta x(t) = 0,$$

où $x(t)$ est la valeur de la variable x à l'instant t , $\frac{dx(t)}{dt}$ et $\frac{d^2x(t)}{dt^2}$ sont les dérivées première (la vitesse) et seconde (l'accélération) de l'écart à l'instant t de la variable par rapport à son état d'équilibre, η la fréquence avec laquelle x tend à osciller et ζ la vitesse avec laquelle x tend à retourner à un état stable après perturbations.

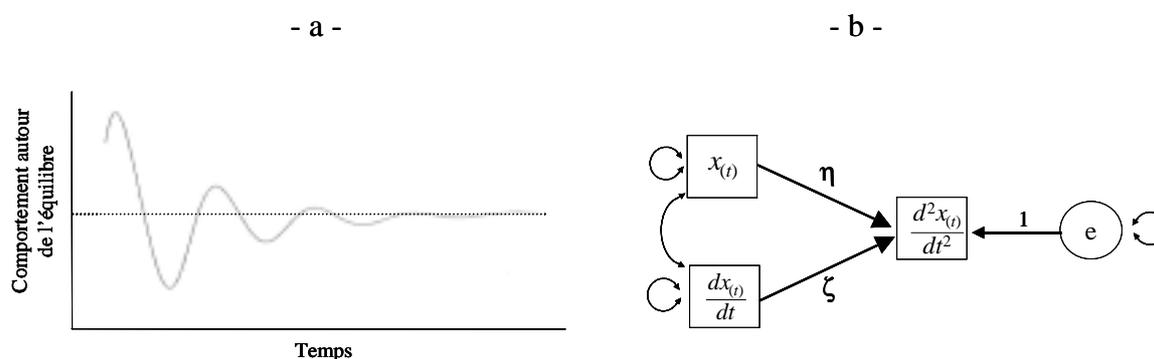


Figure 3 – a) L'oscillateur linéaire amorti comme représentation plausible du comportement d'un mécanisme d'auto-régulation ; b) Graphe du modèle structural dans lequel $\frac{d^2x(t)}{dt^2}$

(mesuré sans erreur) est prédit par $x(t)$ et $\frac{dx(t)}{dt}$ (d'après Baker et Nesselroade, 2002, p. 141)

L'estimation des paramètres est effectuée à l'aide de techniques de modélisation structurale appliquées à des données simulées chez 100 sujets pour 3 occasions de mesure (figure 3b). Les résultats des simulations montrent que si les patterns de variabilité intra-individuelle sont générés par un oscillateur linéaire amorti et que ce dernier est homogène au sein de la population et stationnaire dans le temps, il est possible d'obtenir une bonne estimation des

paramètres du modèle avec un nombre réduit d'occasions de mesure. Un modèle psychologiquement plausible, formalisé par une seule équation générale peut donc rendre compte de patterns de variabilité intra-individuelle (comportements individuels « sensibles » aux conditions initiales) distinguables du bruit présent dans les données.

3.2. La modélisation dynamique de la cognition

Dans d'autres travaux, on a plutôt cherché à construire des modèles dynamiques signifiants afin d'étudier leur comportement à l'aide de techniques de simulation faisant appel aux réseaux neuronaux (Cohen, Dunbar et McClelland, 1990 ; Raijmakers, van Koten et Molenaar, 1996) ou à des méthodes numériques (Eckstein, 1999 ; Mishara, 1996 ; Rabinowitz, Grant, Howe et Walsh, 1994 ; van Geert, 1991, 1994, 1998a,b).

Cohen, Dunbar et McClelland (1990) proposent par exemple une modélisation connexionniste de la performance au test de Stroop, une tâche de contrôle de l'interférence dans laquelle il faut dénommer le plus rapidement possible la couleur de l'encre avec laquelle est écrit un nom de couleur (par ex. le mot rouge écrit en vert). Le principe de base du modèle est que le système cognitif est sensible aux relations de covariation entre l'input et l'output et aux relations spécifiques au contexte de la situation. Dans ce contexte particulier, certains patterns de comportement sont préférés à d'autres et agissent comme des attracteurs des composantes du système, comme si le système voulait les produire plus que d'autres également possibles (lire le mot *vs* dénommer la couleur). Ce que l'organisme connaît ici automatiquement (ce que le mot donne à lire) agit donc comme contrainte sur la sélection de l'action (dénommer la couleur de l'encre). Comment alors guider la sélection de l'action par un attracteur nouveau, une nouvelle combinaison de contraintes spécifiant un contexte unique, tout en évitant simultanément un attracteur profond ? Le système doit résoudre pour cela un problème de « satisfaction simultanée de multiples contraintes » (McClelland et Rumelhart, 1987), la sélection de l'action s'accomplissant au travers d'une dynamique compétitive entre processus. Les résultats de la simulation connexionniste de cette dynamique suggèrent en effet que le contrôle de l'interférence en découle naturellement, un même mécanisme maintenant à la fois l'information pertinente et inhibant l'information non pertinente. Cette simulation conduit aussi à penser que la capacité de contrôle de l'interférence du système n'est pas une donnée première mais qu'elle émerge de l'interaction dynamique entre des tendances en compétition et les processus associés qui sous-tendent les alternatives d'action. C'est donc fondamentalement le système, dans son « tout » c'est-à-dire dans son architecture, son expérience, ses dynamiques, etc., qui constitue la source des limitations de performance.

Van Geert (1991, 1994, 1998a,b) a développé une perspective de travail particulièrement intéressante d'un double point de vue épistémologique et théorique. Elle consiste à explorer par expérimentation numérique les propriétés de modèles formels afin de saisir les propriétés abstraites d'un processus développemental ou d'apprentissage, d'en comprendre les dynamiques sous-jacentes et d'en révéler des propriétés non triviales pouvant être empiriquement observées.

La stratégie adoptée consiste d'abord à spécifier un système dynamique à partir d'une représentation schématique psychologiquement pertinente. Le premier modèle général du développement cognitif proposé par Van Geert (1991) postulait par exemple l'existence d'un seul mécanisme fondamental (la force autocatalytique du système liée à des mécanismes locaux comme une certaine mémoire de l'antériorité et une relative sensibilité au contexte). Des modèles plus récents comme ceux de van Geert (1998a) ou Eckstein (1999) accordent une plus large place aux forces externes au système (e.g., les expériences d'apprentissage de l'individu). Juger qu'un ou deux mécanismes sont suffisants pour « expliquer » un large ensemble de phénomènes mentaux n'exclut bien sûr pas que d'autres variables ne puissent jouer un rôle important dans le développement cognitif. Le chercheur fournit ensuite une description formalisée de la manière avec laquelle il pense que les variables considérées contribuent mutuellement aux changements observés dans le temps. Cette description repose sur l'utilisation d'équations différentielles non linéaires (échelle de temps continue) ou d'équations aux différences finies (échelle de temps discrète) qui comportent un nombre réduit de variables s'influençant mutuellement. Dans la phase dite d'expérimentation numérique, on fait alors varier les valeurs des différents paramètres du modèle (l'amplitude de la force autocatalytique, de la force externe, la nature de la relation fonctionnelle entre variables, etc.) afin d'observer, par exemple au moyen de logiciels comme Phaser (Koçak, 1989), le comportement du système. Le modèle peut être aussi appliqué à des données empiriques et son degré d'ajustement évalué (Eckstein, 1999).

Illustrons rapidement les différentes étapes de cette démarche à propos de l'étude de la variabilité intra-individuelle dans la mobilisation d'une stratégie cognitive. Une stratégie peut en effet être considérée dans le cadre des systèmes dynamiques non linéaires comme une conduite cohérente à un niveau émergent c'est-à-dire comme un attracteur organisant les interactions des composantes du système d'où il émerge et reconnaissable par le comportement de certains paramètres d'ordre. Soient par exemple deux stratégies de comptage additif (compter sur ses doigts, compter mentalement) dont Siegler a pu montrer

qu'elles coexistent chez le jeune enfant en cours d'apprentissage (Siegler et Shrager, 1984). Comment modéliser la variabilité intra-individuelle du choix stratégique « compter sur ses doigts » vs « compter mentalement » ?

Une hypothèse assez immédiate est celle de compétition, d'inhibition mutuelle entre les deux stratégies. Une autre hypothèse également vraisemblable est celle de mobilisation préférentielle de l'une ou l'autre de ces deux stratégies en fonction d'une certaine mémoire du passé (renforcement de l'association) et de certaines caractéristiques spécifiques de l'item (l'item $2+2=?$ rend plus facilement évocable la stratégie de comptage mental que l'item $2+7=?$). Soient C_d (resp. C_m) le niveau d'activation de la stratégie de comptage sur les doigts (resp. de comptage mental), S_{C_d} (resp. S_{C_m}) l'ensemble des aspects spécifiques à l'item contribuant à accroître le niveau d'activation de C_d (resp. de C_m) et a le paramètre mesurant la force d'inhibition mutuelle entre les deux stratégies. Le modèle très simple ci-dessous est une formalisation possible, inspirée de Matsuoka (1984), de ce mécanisme de compétition entre les deux stratégies:

$$C_{dt} = C_{d,t-1} + SC_{dt} - aC_{m,t-1}$$

$$C_{mt} = C_{m,t-1} + SC_{mt} - aC_{d,t-1}$$

Celui-ci exprime l'idée que le niveau d'activation de C_d (resp. C_m) à l'instant t , pour un item donné, est une fonction de C_d (resp. de C_m) à l'instant $t-1$, de la spécificité de l'item en tant que rendant plus probable la mobilisation de la stratégie C_d (resp. C_m) et de la force d'inhibition de C_m (resp. C_d). L'expérimentation numérique permet d'observer des comportements différents du système selon que a est faible, inférieur à 1 (état stable avec coexistence des deux stratégies, l'une ou l'autre étant mobilisée en fonction de la spécificité contextuelle) ou élevé (deux états d'équilibre stables : C_d ou C_m ; un état instable, une petite variation de l'input pouvant produire une augmentation forte et soudaine du niveau d'activation de C_d ou de C_m).

Van Geert (1998a) associe formalisation dynamique et expérimentation dynamique pour étudier les mécanismes généraux susceptibles d'expliquer l'apparition au cours du développement de continuités, de discontinuités provisoires, de multimodalité ou de variabilité. L'idée générale du modèle dont les principes de base sont empruntés à la théorie de Piaget (dialectique entre assimilation et accommodation) et à celle de Vygotsky (dialectique entre niveau de développement actuel et niveau de développement potentiel), est celle de réciprocité des relations entre l'organisme et l'environnement. Le contenu du

domaine interne (règles, schèmes d'action, savoir faire, etc.) est ainsi distingué du contenu du domaine externe tout en lui étant développementalement lié. Le modèle postule aussi que l'effet de l'action sur le développement du système dépend du contenu interne activé (niveau développemental actuel dépendant du contexte) et de la rétroaction positive résultant de l'action ou que les expériences environnementales définies en tant que susceptibles d'activer un certain contenu du domaine interne, doivent rester « développementalement accessibles ».

Formellement, l'organisation du domaine interne à l'instant t est décrite par un ensemble unidimensionnel de contenus (processus, schèmes d'action, etc.) nécessaires à la résolution d'un problème d'un niveau développemental donné. Cet ensemble est inclus dans celui décrivant l'organisation des contenus du domaine externe. Une fonction de poids définit la probabilité d'activation à l'instant t d'un contenu donné pour un niveau développemental donné. Le produit de l'interaction entre les possibilités internes du système et ses conditions externes est spécifié par une fonction dite d'activation de contenu, sorte de filtre qui ne conserve que les contenus activés au sein d'une certaine bande définie par la fonction de poids. Une autre caractéristique importante du modèle réside dans le fait que le niveau développemental des expériences environnementales ne peut dépasser, à une faible zone d'expansion près, un niveau maximum donné (notion de distance optimale). La sensibilité du système au contenu est en outre spécifiée par une distance développementale (point de rencontre, pour un niveau de développement donné, entre une fonction de familiarité et une fonction de nouveauté) où l'effet des expériences environnementales est maximal. Plusieurs autres fonctions correspondant à plusieurs types d'effets développementaux s'ajoutent aux précédentes. Une première fonction dite de « rafraîchissement des poids » a pour rôle de modifier les pondérations associées aux contenus au fur et à mesure que les expériences se succèdent. La fonction dite d'« expansion » formalise la tendance progressive du système à s'adapter aux contraintes de l'environnement (accommodation, zone proximale de développement) par mise à jour de l'ensemble des contenus. Enfin, la fonction de « mise à jour du niveau potentiel » spécifie comment l'état potentiel change en fonction de l'action et de l'expérience. Deux principes sont distingués : un processus constructif dont le produit n'est pas déterminé par le contenu de l'input environnemental et un processus instructif fonction de cet input. La dernière fonction concerne la manière avec laquelle l'environnement spécifie, sélectionne l'étendue du potentiel du système, des expériences qu'il peut vraisemblablement accomplir (environnement neutre, éducatif). A chacune de ces fonctions correspondent plusieurs paramètres. En résumé, le modèle proposé par van Geert tente de formaliser

l'interaction complexe entre des forces « conservatrices », consolidant ou amplifiant l'existant et des forces « progressistes » façonnant le système en fonction des contraintes externes.

Van Geert étudie dans la phase d'expérimentation numérique les propriétés de ce modèle dynamique général. Il l'applique en particulier à l'étude de la variabilité des stratégies cognitives en fixant les valeurs de certains paramètres (degré de compétition entre stratégies, diffusion de l'activation entre contenus, distance optimale, facteur d'expansion, etc.) puis en suivant l'évolution dans le temps du comportement du système.

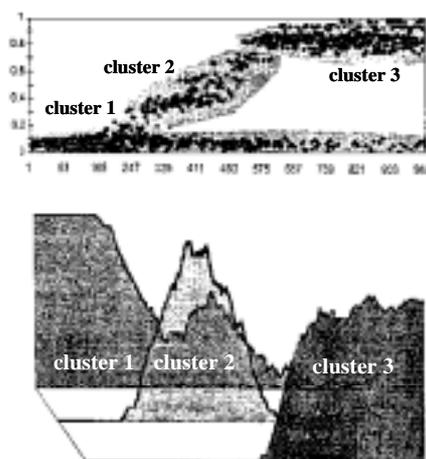


Figure 4 - L'émergence de nouvelles stratégies par simulation numérique (d'après van Geert, 1998, p. 663).

Les résultats de ces simulations (figure 4) montrent bien que plusieurs stratégies cognitives peuvent exister simultanément et que ce phénomène de multimodalité prolongée survient naturellement. Ils renseignent également sur la nature du mécanisme d'émergence d'une nouvelle stratégie. Celle-ci apparaît en effet à un niveau intermédiaire de développement quand l'ancienne stratégie atteint un maximum local (pour ensuite retomber à un niveau développemental moindre) et semble pouvoir être vue comme une ramification de l'ancienne stratégie affectée par des processus de filtrage interne et de façonnage externe. La formation de stratégies écrit van Geert serait donc « une propriété intrinsèque, émergente de ce processus particulier de changement et d'échange avec l'environnement » (1998, p. 663). Les simulations effectuées illustrent également très bien l'idée selon laquelle le développement est un processus de progressions et de régressions provisoires d'amplitude limitée. Elles suggèrent aussi que les mécanismes qui sous-tendent les transitions à court terme (e.g., entre stratégies) ou les changements plus globaux (e.g., entre stades développementaux) sont les mêmes.

4. Conclusion

Les recherches évoquées plus haut nous paraissent témoigner de l'intérêt des systèmes dynamiques non linéaires dans l'étude de la cognition humaine et la modélisation de la formation de patterns en équilibre « au bord de l'instabilité ». Les résultats obtenus suggèrent en effet que le fonctionnement et le développement cognitifs résultent de l'interaction dynamique entre de multiples influences dont certaines peuvent avoir, à un moment donné et à un endroit donné de l'espace des contraintes internes et externes, la capacité à déstabiliser un système dont les dynamiques auto-organisatrices permettent une réorganisation d'ensemble. L'utilisation des systèmes dynamiques non linéaires en psychologie cognitive pose cependant un certain nombre de problèmes d'ordre théorique et se heurte à plusieurs obstacles méthodologiques et pratiques.

On peut tout d'abord se demander si cette direction de travail n'est pas simplement suggestive plutôt que probante. Cette objection n'est sans doute pas sans fondement si le psychologue ne fait que traduire en termes dynamiques un discours sur les faits épistémologiquement moins actuel (par ex., Bütz, 1992, à propos de « la nature fractale du développement du soi »). La valeur heuristique d'une telle re-conceptualisation ne doit cependant pas être négligée dans la recherche de lois explicatives. L'objection paraît moins recevable si la formalisation s'accompagne de tentatives d'opérationnalisation permettant, au-delà de la métaphore, de comprendre autrement les phénomènes étudiés (van der Maas, 1995 ; van Geert, 1996, 1998b). A cet égard, les outils mathématiques des dynamiques non linéaires, bien que souvent d'emploi malaisé pour le psychologue non mathématicien, permettent d'améliorer l'adéquation entre les options épistémologiques du chercheur et ses pratiques de recherche.

Les difficultés rencontrées dans cette perspective de recherche sont multiples. Elles se posent bien évidemment au plan théorique. Jusqu'où par exemple aller dans le parallèle entre systèmes physiques et systèmes cognitifs dans lesquels les processus doivent être inférés ? Quelle est la pertinence psychologique des systèmes dynamiques non linéaires considérés ? Pour quel individu et pour quel niveau développemental ? Pour quelle catégorie de situations ? Quelle interprétation psychologique faire des paramètres abstraits figurant dans les équations spécifiant un modèle donné ? A ces questions et à beaucoup d'autres s'ajoutent celles d'ordre méthodologique comme par exemple l'opérationnalisation des paramètres de contrôle du système ou celle de ses différents attracteurs en termes d'états cognitifs mesurables, les moyens de mettre à l'épreuve des hypothèses spécifiques portant à la fois sur la stabilité et la variabilité d'un événement cognitif donné, etc. Les problèmes à résoudre sans

qu'une solution totalement satisfaisante soit toujours à attendre sont aussi d'ordre statistique. Comment mesurer le changement dans la variabilité, distinguer certaines formes significatives de variabilité de l'erreur de mesure (van Geert, 2002 ; van Geert et van Dijk, 2002) ? Avec quelles méthodes tester le non linéaire et comment effectuer les diagnostics statistiques ? Comment évaluer l'ajustement de modèles qui courent le risque d'être non falsifiables car facilement surdéterminés ? Comment évaluer les modèles de simulation numérique ?

Malgré toutes ces difficultés qui ne se posent pas de la même manière ni avec la même intensité selon la stratégie d'application choisie, les systèmes dynamiques non linéaires apparaissent aujourd'hui comme un cadre de référence utile à la formulation d'hypothèses générales ou plus spécifiques sur les mécanismes qui sous-tendent la stabilité temporaire et la variabilité des conduites cognitives ainsi que sur le rôle de certaines variables et de leurs interactions dans l'émergence de patterns de variabilité intra-individuelle.

Bibliographie

- Abraham, F.D., & Gilgen, A.R. (Eds.). (1995). Chaos theory in psychology. London: Praeger.
- Baker, G.L. (1995). The chaotic pendulum: model and metaphor. In J.M. Gottman (Ed.), The analysis of change (pp. 471-507). Mahwah, N.J.: Erlbaum.
- Boker, S.M. (2001). Differential structural modeling of intraindividual variability. In L. Collins & A. Sayer (Eds.), New methods for the analysis of change (pp. 3-28). Washington, DC: APA.
- Boker, S.M., & J.R. Nesselroade (2002). A method for modeling the intrinsic dynamics of intraindividual variability: Recovering the parameters of simulated oscillators in multi-wave panel data. Multivariate Behavioral Research, *37*, 127-160.
- Bütz, M.R. (1992). The fractal nature of the development of the self. Psychological Reports, *71*, 1043-1063.
- Cohen, J.D., Dunbar, K., & McClelland, J.L. (1990). On the control of automatic processes : A parallel distributed processing model of the stroop effect. Psychological Review, *97*, 332-361.
- Cooney, J.B., & Constan, M.A. (1993). On determining the dimension of discontinuities in human learning and development. In M.L. Howe & R. Pasnak (Eds.), Emerging themes in cognitive development. Vol. 1: Foundations (pp. 154-191). New York: Springer-Verlag.
- Eckstein, S.G. (1999). A dynamic model of cognitive growth in a population : Spatial tasks and conservation. Journal of Mathematical Psychology, *43*, 34-70.
- Garson, J.W. (1995). Chaos and free will, Philosophical Psychology, *8*, 365-374.
- Girardo, M.-D., & Pailhous, J. (1999). Dynamic instability of visuospatial images. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, *25*, 1-22.
- Goldin-Meadow, S., Nusbaum, H., Garber, P., & Church, R.B. (1993). Transitions in learning: Evidence for simultaneously activated strategies. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, *19*, 92-107.
- Goldman, S.R., & Saul, E. (1990). Flexibility in text processing : A strategy competition model. Learning and Individual Differences, *2*, 181-219.
- Grindrod, P. (1991). Patterns and waves: The theory and applications of reaction-diffusion equations. Oxford: Clarendon.

Grossberg, S. (1982). Studies of mind and brain: Neural principles of learning, perception, development, cognition and motor control. Dordrecht: Reidel.

Guastello, S.J. (1995). Chaos, catastrophe, and human affairs: Applications of non-linear dynamics to work, organizations and social evolution. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.

Guindani, F.M., & Salvatori, G. (Eds.) (1998). Chaos, fractals and models. Pavia, Italy: Italian University Press.

Heath, R.A. (2000). Nonlinear dynamics: Techniques and applications in psychology. Mahwah, N.J. : Erlbaum.

Hosenfeld, B., van der Maas, H.L.J., & van den Boom, D.C. (1997). Detecting bimodality in the analogical reasoning performance of elementary schoolchildren. International Journal of Behavioral Development, *20*, 529-547.

Juhel, J. (1997). Fonctionnement des systèmes psychologiques et modélisation de la variabilité. In J. Juhel, T. Marivain et G. Rouxel (Eds.), Psychologie et différences individuelles: questions actuelles (pp. 35-40). Rennes: PUR.

Kelso, J.A.S. (1995). Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior. Cambridge, MA: MIT Press.

Koçak, H. (1989). Differential and difference equations through computer experiments. New York: Springer Verlag.

Kruse, P., & Stadler, M. (1995). (Eds.). Ambiguity in mind and nature. Berlin : Springer.

Lautrey, J. (Ed.) (1995). Universel et différentiel en psychologie. Paris : PUF.

Lautrey, J. (2003). La psychologie différentielle à l'épreuve de la variabilité intraindividuelle. In A. Vom Hofe, H. Charvin, L. Bernaud & D. Guédon (Eds.), Psychologie différentielle : recherches et réflexions. Rennes : PUR.

Lautrey, J., Mazoyer, B., & van Geert, P. (Eds.). (2002). Invariants et Variabilité dans les Sciences Cognitives. Paris : Editions de la Maison des Sciences de l'Homme.

Lewis, M. D. (1995). Cognition-emotion feedback and the self-organization of developmental paths. Human Development, *38*, 71-102.

Lewis, M. D. (1997). Personality self-organization: cascading constraints on cognition-emotion interaction. In A. Fogel, M.C. Lyra, & J. Valsiner (Eds.), Dynamics and indeterminism in developmental and social processes (pp. 193-216). Mahwah, NJ: Erlbaum.

- McClelland, J.L., & Rumelhart, D.E. (1987). Explorations in parallel distributed processing. Cambridge : MIT Press.
- Matsuoka, K. (1984). The dynamic model of binocular rivalry. Biological Cybernetics, 49, 201-208.
- Mishara, B.L. (1996). A dynamic developmental model of suicide. Human Development, 39, 181-194.
- Murray, J.D. (1995). Nonlinear dynamics and chaos. In J.M. Gottman (Ed.), The analysis of change (pp. 419-469). Mahwah, N.J.: Erlbaum.
- Rabinowitz, F.M., Grant, M.J., Howe, M.L., & Walsh, C. (1994). Reasoning in middle childhood : A dynamic model of performance on transitivity tasks. Journal of Experimental Child Psychology, 58, 252-288.
- Raijmakers, M.E.J., van Koten, S., & Molenaar, P.C.M. (1996). On the validity of simulating stagewise development by means of PDP networks : Application of catastrophe analysis and an experimental of rule-like network performance. Cognitive Science, 20, 101-136.
- Reuchlin, M. (1978). Processus vicariants et différences individuelles. Journal de Psychologie, 2, 133-145.
- Robertson, R., & Combs, A. (Eds.) (1995). Chaos theory in psychology and life sciences. Mahwah, N.J. : Erlbaum.
- Siegler, R. (1994). Cognitive variability : A key to understanding cognitive development. Current Directions in Psychological Science, 3, 1-5.
- Siegler, R. (1995). How does change occur : A microgenetic study of number conservation. Cognitive Psychology, 28, 225-273.
- Siegler, R., & Shipley, C. (1995). Variation, selection and cognitive change. In T. Simon, & G.S. Halford (Eds.). Developing cognitive competence : New approaches to process modeling (pp. 31-76). Hillsdale, N.J. : Erlbaum.
- Siegler, R., & Shrager, J. (1984). Strategy choices in addition and subtraction : How do children know what to do ? In C. Sophian (Ed.), Origins of cognitive skills (pp. 229-293). Hillsdale, N.J. : Erlbaum.
- Skarda, C.A., & Freeman, W.J. (1990). Chaos and the new science of the brain. Concepts in Neuroscience, 1, 275-285.

Smith, L., Thelen, E., Titzer, R., & McLin, D. (1999). Knowing in the context of acting : The task dynamics of the A-not-B error. Psychological Review, 106, 235-260.

Stewart, I.N. & Peregoy, P.L. (1983). Catastrophe theory modeling in psychology. Psychological Bulletin, 94, 336-362.

Sulis, W., & Combs, A. (Eds.) (1996). Non linear dynamics in human behavior. Singapore: World Scientific.

Thelen, E. (1989). Self-organization in developmental processes: Can systems approaches work? In M. Gunnar & E. Thelen (Eds.), Systems and development (pp. 77-117). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.

Thelen, E. (1995). Motor development: A new synthesis. American Psychologist, 50, 79-95.

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

Townsend, J.T. (1992). Chaos theory: A brief tutorial and discussion. In A.F. Healy, S.M. Kosslyn & R.M. Shiffrin (Eds.), From learning theory to connectionist theory: Essays in honor of William K. Estes (pp. 65-96). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.

Tschacher, W., & Dauwalder, J.-P. (Eds.) (1999). Dynamics, synergetics and autonomous agents. Singapore: World Scientific.

van der Maas, H.L.J. (1995). Beyond the metaphor ? Cognitive Development, 10, 621-642.

van der Maas, H.L.J. (1998). The dynamical and statistical properties of cognitive strategies : Relations between strategies, attractors, and latent classes. In K.M. Newell and P.C.M. Molenaar (Eds.), Applications of nonlinear dynamics to developmental process modeling (pp. 161-176). Mahwah, N.J. : Erlbaum.

van der Maas, H.L.J., & Molenaar, P.C.M. (1992). Stageswise cognitive development : An application of catastrophe theory. Psychological Review, 99, 395-417.

van der Maas, H.L.J., & Molenaar, P.C.M. (1996). Catastrophe analysis of discontinuous development. In A. von Eye & C.C. Clogg (Eds.), Categorical variables in developmental research : Methods of analysis (pp. 77-105). New York : Academic Press.

van Geert, P. (1991). A dynamic systems model of cognitive and language growth. Psychological Review, 98, 3-53.

van Geert, P. (1994). Dynamics systems of development. London: Harvester Wheatsheaf.

van Geert, P. (1996). The dynamics of Father Brown: Essay review of a dynamic systems approach to the development of cognition and action by E. Thelen and L.B. Smith. Human Development, 39, 57-66.

van Geert, P. (1998a). A dynamic systems model of basic developmental mechanisms : Piaget, Vygotsky, and beyond. Psychological Review, 105, 634-677.

van Geert, P. (1998b). We almost had a great future behind us: The contribution of non-linear dynamics to developmental-science-in-the-making. Developmental Science, 1, 143-159.

Van Geert, P. (2002). Variabilité intra-individuelle et recherche d'une approche nouvelle en psychométrie. In J. Lautrey, B. Mazoyer et P. van Geert (Eds.), Invariants et Variabilité dans les Sciences Cognitives (pp. 334-354). Paris : Editions de la Maison des Sciences de l'Homme.

van Geert, P., & van Dijk, M. (2002). Focus on variability: New tools to study intra-individual variability in developmental data. Infant Behavior and Development, 25, 340-374.

van Gelder, T. (1998). The dynamical hypothesis in cognitive science. Behavioral and Brain Sciences, 21, 1-14.

van Orden, G.C., & Holden, J.G. (2002). Intentional contents and self-control. Ecological Psychology, 14, 87-109.

Vetter, G., Stadler, M., & Haynes, J.D. (1997). Phase transitions in learning. The Journal of Mind and Behavior, 18, 335-350.

Ward, L.M. (1991). Simple reaction times may be chaotic. In G.R. Lockhead (Ed.), Fechner Day 91 (pp. 145-150). Durham, NC : International Society for Psychophysics.

Zanone, P.G., & Kelso, J.A.S. (1992). Evolution of behavioral attractors with learning : Nonequilibrium phase transitions. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 18, 403-421.