

Paradigme dynamique en psychopathologie : la « Théorie du chaos », de la physique à la psychiatrie

L. PEZARD ⁽¹⁾, J.-L. NANDRINO ⁽²⁾

Résumé. Depuis une trentaine d'années, certains développements de la physique ont amélioré notre compréhension de la dynamique des systèmes complexes. Connues sous le nom de « Théorie du chaos » – ou plus sobrement : théorie des systèmes dynamiques non-linéaires –, ces avancées possèdent une généralité qui permet d'envisager leur utilisation dans des domaines autres que ceux dans lesquels elles ont vu le jour. Notre objectif est de montrer qu'elles peuvent devenir des outils importants dans des disciplines telles que les neurosciences et la psychiatrie où les phénomènes étudiés possèdent naturellement une inscription temporelle i.e. une dynamique. L'introduction des concepts de la dynamique non-linéaire dans ces disciplines dépasse la simple métaphore et peut fournir à terme un nouvel éclairage du fonctionnement mental et de ses dérèglements. À partir d'exemples tirés de la littérature, nous montrons comment ces nouveaux concepts permettent un renouvellement des façons d'envisager des problèmes classiques comme l'évolution temporelle des symptômes ou la relation entre le cérébral et le mental.

Mots clés : Chaos ; Dépression ; Etat mental/état cérébral ; Psychopathologie ; Réseaux neuronaux ; Systèmes dynamiques non-linéaires.

Dynamical paradigm in psychopathology : « Chaos theory », from physics to psychiatry

Summary. For the last thirty years, progress in the field of physics, known as « Chaos theory » – or more precisely : non-linear dynamical systems theory – has increased our understanding of complex systems dynamics. This framework's formalism is general enough to be applied in other domains, such as biology or psychology, where complex systems are the rule rather than the exception. Our goal is to show here that this framework can become a valuable tool

in scientific fields such as neuroscience and psychiatry where objects possess natural time dependency (i.e. dynamical properties) and non-linear characteristics. The application of non-linear dynamics concepts on these topics is more precise than a loose metaphor and can throw a new light on mental functioning and dysfunctioning.

A class of neural networks (recurrent neural networks) constitutes an example of the implementation of the dynamical system concept and provides models of cognitive processes (15). The state of activity of the network is represented in its state space and the time evolution of this state is a trajectory in this space. After a period of time those networks settle on an equilibrium (a kind of attractor). The strength of connections between neurons define the number and relations between those attractors. The attractors of the network are usually interpreted as « mental representations ». When an initial condition is imposed to the network, the evolution towards an attractor is considered as a model of information processing (27). This information processing is not defined in a symbolic manner but is a result of the interaction between distributed elements.

Several properties of dynamical models can be used to define a way where the symbolic properties emerge from physical and dynamical properties (28) and thus they can be candidates for the definition of the emergence of mental properties on the basis of neuronal dynamics (42). Nevertheless, mental properties can also be considered as the result of an underlying dynamics without explicit mention of the neuronal one (47). In that case, dynamical tools can be used to elucidate the Freudian psychodynamics (34, 35).

Recurrent neuronal networks have been used to propose interpretation of several mental dysfunctions (12). For example in the case of schizophrenia, it has been proposed that troubles in the cortical pruning during development (13) may cause a decrease in neural network storage ability and lead to the creation of spurious attractors. Those attractors

(1) Laboratoire de Neurosciences Comportementales, Université René Descartes (Paris 5), 45, rue des Saints-Pères, 75006 Paris.

(2) UFR de Psychologie, Université Charles-de-Gaulle (Lille 3).

Travail reçu le 9 février 2000 et accepté le 6 juillet 2000.

Tirés à part : L. Pezard (à l'adresse ci-dessus).

do not correspond to stored memories and attract a large amount of initial conditions : they were thus associated to reality distortion observed in schizophrenia (14). Nevertheless, the behavior of these models are too simple to be directly compared with real physiological data. In fact, equilibrium attractors are hardly met in biological dynamics. More complex behaviors (such as oscillations or chaos) should thus to be taken into account.

The study of chaotic behavior have lead to the development of numerical methods devoted to the analysis of complex time series (17). These methods may be used to characterise the dynamical processes at the time-scales of both the cerebral dynamics and the clinical symptoms variations.

The application of these methods to physiological signals have shown that complex behaviors are related to healthy states whereas simple dynamics are related to pathology (8). These studies have thus confirmed the notion of « dynamical disease » (20, 21) which denotes pathological conditions characterised by changes in physiological rhythms.

Depression has been studied within this framework (25, 32) in order to define possible changes in brain electrical rhythms related to this trouble and its evolution. It has been shown that controls' brain dynamics is more complex than depressive one and that the recovery of a complex brain activity depends on the number of previous episodes.

In the case of the symptoms time evolution, several studies have demonstrated that non-linear dynamical process may be involved in the recurrence of symptoms in troubles such as manic-depressive illness (9) or schizophrenia (51). These observations can contribute to more parcimonious interpretation of the time course of these illnesses than usual theories.

In the search of a relationship between brain dynamics and mental troubles, it has been shown in three depressed patients an important correlation between the characteristics of brain dynamics and the intensity of depressive mood (49). This preliminary observation is in accordance with the emergence hypothesis according which changes in neuronal dynamics should be related to changes in mental processes. We reviewed here some theoretical and experimental results related to the use of « physical » dynamical theory in the field of psychopathology. It has been argued that these applications go beyond metaphor and that they are empirically founded. Nevertheless, these studies only constitute first steps on the way of a cautious development and definition of a « dynamical paradigm » in psychopathology.

The introduction of concepts from dynamics such as complexity and dynamical changes (i.e. bifurcations) permits a new perspective on function and dysfunction of the mind/brain and the time evolution of symptoms. Moreover, it offers a ground for the hypothesis of the emergence of mental properties on the basis of neuronal dynamics (42). Since this theory can help to throw light on classical problems in psychopathology, we consider that a precise examination of both its theoretical and empirical consequences is requested to define its validity on this topic.

Key words : Chaos ; Depression ; Mind/brain problem ; Neural networks ; Non-linear dynamical systems ; Psychopathology.

INTRODUCTION

Cet article reprend le thème d'une conférence prononcée le 18 novembre 1999, à Lille, au cours d'un colloque organisé par ARDIX Médical sous la responsabilité scientifique des Professeurs M. Goudemand et D. Beaune.

L'utilisation, en biologie ou en sciences humaines, de concepts issus de la physique est toujours un exercice qui nécessite une grande prudence épistémologique. En effet, l'importation de concepts d'un domaine vers un autre, pour lequel ils n'ont généralement pas été construits, laisse planer le risque de la métaphore plutôt que de favoriser d'emblée une construction scientifique productive. La théorie des systèmes dynamiques, en partie médiatisée sous le terme de « Théorie du chaos », décrit n'importe quel processus évoluant au cours du temps. Elle peut donc *a priori* s'appliquer dans d'autres domaines que les sciences physiques en fonction de la signification physique des variables dont elle décrit l'évolution. C'est donc à la fois la généralité de son objet (l'évolution temporelle des phénomènes)* et de son formalisme, et les renouvellements dont elle a été l'objet ces trente dernières années qui lui ont donné une nouvelle pertinence pour l'étude de systèmes biologiques, voire humains (26, 36). Le but de cet article est de montrer, à partir de modèles dynamiques explicites et de résultats expérimentaux, que l'utilisation de ces concepts, dans des domaines – comme les neurosciences et la psychiatrie – *a priori* éloignés de celui où ils ont été développés, dépasse la métaphore.

Nous explorerons dans ce qui suit la pertinence de la physique des systèmes dynamiques non-linéaires pour la psychiatrie. Au moins deux échelles de temps sont nécessaires pour rendre compte d'une pathologie mentale. C'est tout d'abord le temps macroscopique de l'évolution des symptômes, celui qu'observe et surveille le clinicien ; c'est la dynamique des formes cliniques. Ensuite, à un niveau plus fin, c'est le temps physiologique des dynamiques neuronales. En faisant l'hypothèse que les activités mentales émergent des dynamiques neuronales (42), ces dernières donneront aussi naissance aux formes cliniques. Nous nous appuyerons sur cette hypothèse pour montrer que la théorie des systèmes dynamiques peut être pertinente pour la description des troubles mentaux. D'un point de vue clinique, la modélisation et l'analyse des processus dynamiques sous-jacents aux pathologies mentales (à ces deux échelles de temps) devraient permettre une meilleure prise en charge des possibilités de décompensation ou de rechute ainsi qu'un suivi des changements liés à des interventions pharmacologiques ou psychothérapeutiques.

Dans la première partie de ce texte, après avoir décrit quelques propriétés générales des systèmes dynamiques, nous verrons que des modèles dynamiques ont été développés pour rendre compte de processus cognitifs et des troubles mentaux. Toutefois, ces modèles – souvent

* « La dynamique est la science de l'effet du temps sur les formes » [R. Thom, cité dans (34)].

trop simples – ne sont pas reliés directement à de véritables validations expérimentales. Nous montrerons dans une seconde partie que des méthodes numériques sont disponibles pour permettre d'analyser les dynamiques complexes. Ces techniques permettent de quantifier les processus dynamiques à l'échelle de temps des variations des formes cliniques et à celle de la dynamique cérébrale. Elles favorisent ainsi la vérification expérimentale des hypothèses dynamiques de l'articulation des activités mentales et cérébrales.

MODÉLISATION DYNAMIQUE DES ACTIVITÉS CÉRÉBRALES ET MENTALES

Après avoir été décrit par des métaphores hydrauliques (Descartes) ou téléphoniques (Sherrington), le cerveau a été considéré comme un ordinateur par bon nombre de chercheurs issus de la « révolution cognitive » (7). Actuellement, l'approche consistant à considérer le cerveau comme un système d'unités massivement interconnectées (*i.e.* un réseau neuronal) semble de plus en plus pertinente. Une telle représentation a permis la mise en place de modèles dont la compréhension se fonde sur les concepts de la dynamique (2, 15, 16). Ces modèles ont retrouvé les idées introduites, dans les années 1970, par René Thom et Christopher Zeeman concernant la possibilité d'articuler sur une base (morpho)dynamique les

niveaux physique (neuronal) et symbolique (cognitivo-comportemental).

Réseaux neuronaux et systèmes dynamiques

Un ensemble d'éléments en interaction dont l'état évolue au cours du temps est décrit mathématiquement par un système dynamique. Les systèmes les mieux connus jusqu'au début de ce siècle étaient les systèmes isolés de leur milieu et évoluant selon des lois simples (*i.e.* des systèmes linéaires). De tels systèmes idéaux sont évidemment des cas exceptionnels dans la nature puisque les systèmes vivants sont des systèmes ouverts à leur environnement et que leur évolution est non-linéaire. La relation du système avec son milieu exerce des contraintes qui le maintiennent loin de l'équilibre. La non-linéarité se traduira, pour sa part, par « des interactions coopératives où la présence d'un élément amplifie sa propre production ou celle d'un autre élément par une loi qui s'écarte de la simple proportionnalité » (26). Ces systèmes peuvent avoir des évolutions qui changent du simple au complexe selon les conditions dans lesquelles ils sont placés (*figure 1*). Il existe ainsi des formes authentiques de complexité, enracinées dans les lois qui régissent les systèmes physiques. Cette complexité, qui avait longtemps été considérée comme spécifique des systèmes biologiques et humains, peut ainsi trouver un nouveau cadre théorique d'emblée pluridisciplinaire.

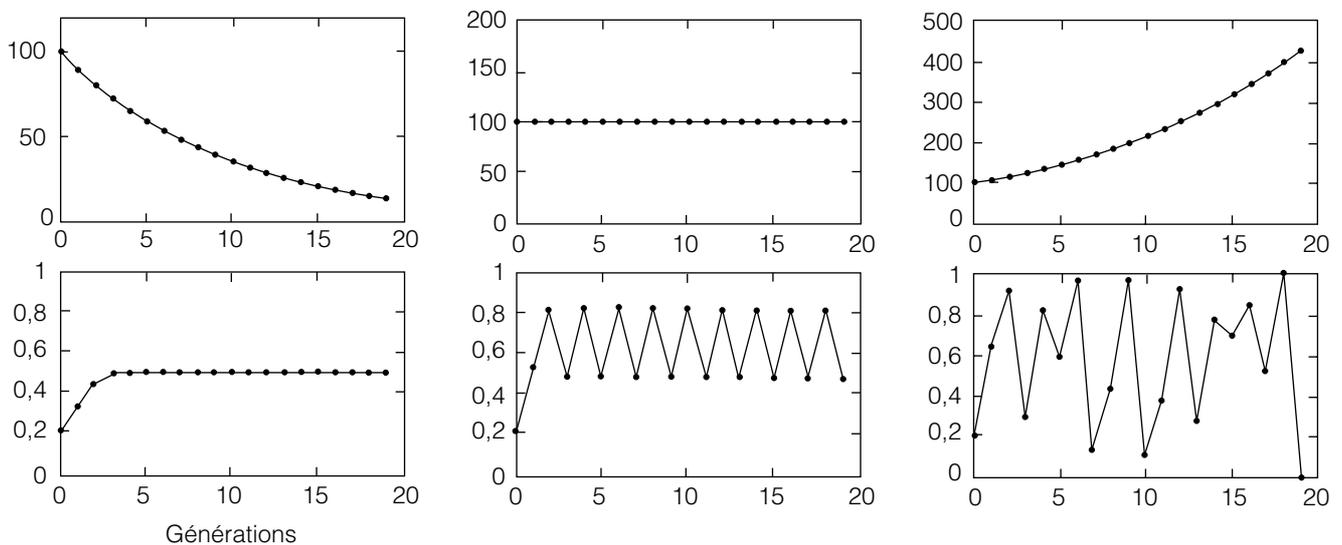


FIG. 1. — Un modèle simple de dynamique des populations.

Première ligne : la population N à la génération $t + 1$ est considérée comme proportionnelle à celle au temps t [modèle linéaire : $N(t + 1) = R.N(t)$]. Dans ce cas, seulement trois évolutions temporelles peuvent être observées : pour $R < 1$ la population décroît, pour $R = 1$ la population reste stable et pour $R > 1$ la population croît exponentiellement.

Deuxième ligne : si l'on prend en compte des facteurs limitant la croissance de la population (une quantité de nourriture finie par exemple), la population x au temps $t + 1$ n'est plus simplement proportionnelle à celle au temps t [modèle non-linéaire : $x(t + 1) = R.x(t).(1 - x(t))$]. Dans ce cas, les évolutions temporelles de la taille de la population sont plus variées que précédemment. Selon les valeurs de R (paramètre de contrôle) la population passe d'évolutions qui tendent vers un équilibre à des évolutions périodiques puis vers des évolutions apériodiques dites « chaotiques » [d'après (18, 23)].

Certains réseaux neuronaux sont des cas particuliers de systèmes dynamiques. Dans ce cas, un système dynamique décrit mathématiquement l'évolution temporelle de l'état d'activité des différentes cellules qui le composent. Chaque état instantané d'activité du réseau est représenté par un point dans l'espace des états du système (appelé aussi « espace des phases » du système). Cet espace représente l'ensemble des états possibles du système. Les variations d'activité du réseau au cours du temps correspondent alors à une trajectoire dans cet espace. Pour un temps assez long, l'évolution du système reste confinée à une portion de l'espace appelée « attracteur » (figure 2). Il existe plusieurs types d'attracteurs :

- le plus simple est un attracteur ponctuel qui correspond à la convergence du système vers un état d'équilibre ;
- dans le cas d'une dynamique périodique, l'attracteur est un cycle dit « cycle limite » ;
- enfin, dans le cas des dynamiques complexes aperiodiques, l'attracteur est un objet fractal (22) dit « attracteur étrange ». Ces évolutions sont dites « chaotiques » car elles sont imprédictibles à long terme.

Dans les modèles de réseaux neuronaux les plus simples, seuls les attracteurs ponctuels sont pris en compte. Ces propriétés permettent d'obtenir des modèles dont les comportements sont aisément compréhensibles. Toutefois, dans le cas des systèmes physiologiques, des dynamiques complexes (oscillantes ou chaotiques) sont en jeu et nécessitent d'autres techniques d'étude.

Réseaux neuronaux et activités mentales

Lorsque l'on impose un état initial à un réseau et qu'on le laisse ensuite évoluer, sa dynamique le mènera spontanément vers un de ses attracteurs. L'attracteur n'est donc pas un état comme les autres : il a un sens particulier pour le système puisque c'est un ensemble stable d'états d'activité. Il peut être ainsi considéré comme un état interne du système (28).

De cette façon, les attracteurs peuvent modéliser des représentations mémorisées permettant de rendre compte du « traitement de l'information » par un système possédant un ensemble d'attracteurs. La présentation d'une forme correspond à la définition d'une condition initiale à partir de laquelle évoluera le système. La stabilisation sur un attracteur est alors considérée comme la reconnaissance de la forme, le processus dynamique étant ici l'analogie du traitement de l'information (11, 27). La reconnaissance ne se fait pas par association de deux entités, l'une représentant l'autre, mais grâce à des propriétés spécifiques de la dynamique du système et en fonction de son état initial (on parle de « mémoires adressables par le contenu »). Il faut noter que ce n'est pas la configuration d'activité qui est importante dans ce type de modélisation mais le fait dynamique, significatif pour le système, de la convergence vers un attracteur.

Dans le cas du système nerveux, les phénomènes d'apprentissage résultent de l'interaction entre les caractéristiques génétiques et les influences de l'environnement sur la connectivité entre les neurones. Dans les modèles de réseaux neuronaux, ces phénomènes sont représentés par la variation des poids des connexions entre les automates. Les valeurs des poids constituent alors les paramètres de contrôle du système.

Dans le cas général, un système dynamique peut avoir un grand nombre d'attracteurs de complexités topologiques différentes : pour un réseau, plusieurs formes mémorisées. Ainsi, l'espace des phases se divise en portions – les « bassins d'attraction » – définies comme l'ensemble des points convergeant vers un attracteur donné. La structure des relations entre les bassins d'attraction dépend de paramètres de contrôle. Les variations de ces paramètres déforment les relations entre les bassins d'attraction. Si la déformation est continue, on conserve la structure de l'espace des phases ainsi que les relations de détermination réciproques des attracteurs. Les dynamiques décrivent alors des comportements qualitativement similaires. Si la déformation est trop importante, le système se déstabilise et change de type de comportement (figure 3). Dans ce cas, la structuration de l'espace des phases est changée. On a alors un autre type de dynamique qui peut, lui aussi, être stable sur un certain domaine de déformation. Des variations de connectivité, dues à des processus de mémorisation ou des modifications de transmission synaptique, peuvent donc entraîner des changements de dynamique pouvant aller jusqu'à des modifications comportementales.

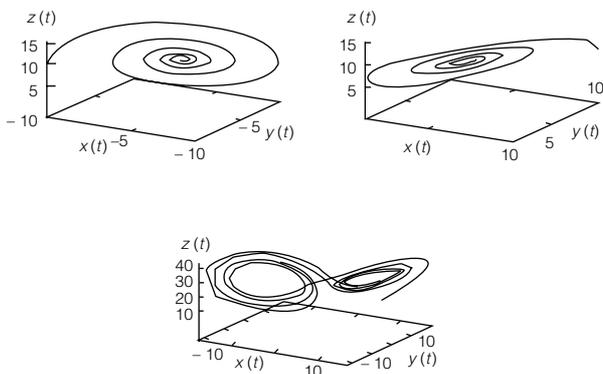


FIG. 2. — Représentation de la dynamique d'un système dans son espace des phases pour un modèle simplifié décrivant les mouvements d'un fluide (système de Lorenz).

En haut : pour certaines valeurs de la contrainte thermique imposée au fluide, le système possède deux attracteurs ponctuels (points fixes). Chaque attracteur représente l'un des deux sens de rotation possible pour les rouleaux de convection. Chaque figure illustre la dynamique de convergence vers un des attracteurs pour des valeurs différentes des conditions initiales. Si la contrainte thermique varie, ces attracteurs se déstabilisent.

En bas : après déstabilisation des attracteurs ponctuels, le système possède un attracteur dit « étrange ». Les deux « ailes » de l'attracteur étrange entourent les points fixes devenus instables. Dans ce cas, le système présente un comportement dit « chaotique » [d'après (5)].

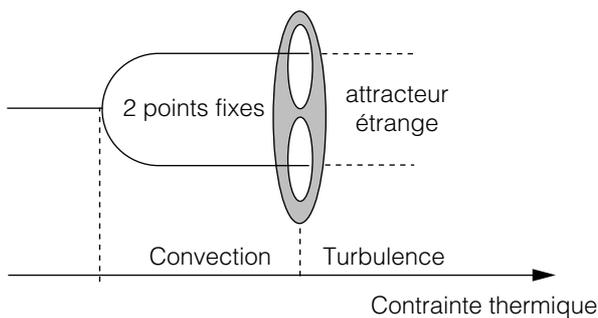


FIG. 3. — Diagramme de bifurcation du système de Lorenz (cf. figure 2).

En fonction des valeurs du paramètre de contrôle (contrainte thermique), le système passe successivement d'un écoulement laminaire à un régime convectif puis à un comportement turbulent. Les deux points fixes stables du régime convectif se déstabilisent pour une valeur critique du paramètre de contrôle donnant naissance à un attracteur étrange. Les attracteurs des comportements convectifs et turbulents sont ceux de la figure 2 [d'après (5)].

Morphodynamique et émergence

Il est possible d'utiliser la théorie des systèmes dynamiques pour décrire les formes comportementales normales ou pathologiques en les considérant comme des morphologies émergent de la dynamique neuronale sous-jacente (28, 47). Plus précisément, le fait qu'un système change de dynamique pour certaines valeurs critiques de ses paramètres de contrôle entraîne le découpage de l'espace des paramètres en zones à l'intérieur desquelles le système se comportera de façon qualitativement identique. Chaque zone définit donc une forme comportementale particulière fondée sur une dynamique sous-jacente. Il existe donc naturellement pour un système dynamique deux niveaux de description : le niveau « microscopique » des variables d'état qui découpe l'espace des phases en bassins d'attraction et le niveau « macroscopique » défini par les zones de stabilité de la forme de la dynamique du niveau inférieur. Le niveau macroscopique est donc intimement lié au niveau sous-jacent tout en conservant une possibilité de description autonome (28). Cette autonomie du niveau de description macroscopique par rapport au microscopique est à rapprocher des phénomènes de transition de phases où l'état solide, liquide ou gazeux possède deux niveaux de description autonomes bien qu'intimement liés l'un à l'autre par la dynamique des molécules.

La démarche globale de la morphodynamique de Thom est d'associer à toute morphologie macroscopique (*i.e.* toute forme observable) une dynamique sous-jacente qui l'engendre. Nous nous référons pour notre part à la dynamique neuronale. Il est aussi possible d'envisager la dépendance des formes psychiques vis-à-vis d'une dynamique sous-jacente sans référence explicite à une dynamique neuronale*. Une telle perspective permet ainsi

* Il n'y a aucune contradiction entre les deux approches ; ni, non plus, d'exclusion de l'une par rapport à l'autre (31).

d'associer deux pensées dynamiques celle de Freud et celle de Thom, la dynamique qualitative et des notions associées (comme l'homologie) offrant des outils puissants pour styliser la psychodynamique Freudienne (34, 35).

Des modèles de réseaux neuronaux, utilisant les propriétés des systèmes dynamiques, ont été développés pour rendre compte des troubles mentaux, sans que leurs auteurs ne se réclament ouvertement des conceptions générales que nous venons d'exposer.

Modélisation dynamique des troubles mentaux

Les variations des paramètres de contrôle d'un réseau de neurones peuvent entraîner des changements de dynamique liés, soit à la complexification des trajectoires dans l'espace des phases, soit à la modification de la structure des relations entre les bassins d'attraction. Ces modifications peuvent servir de modèles pour certains troubles mentaux. Par exemple, l'augmentation du nombre de passages d'un attracteur à un autre peut représenter des successions de contenus mentaux et être ainsi associée à un épisode maniaque où les pensées du patient fuient d'un sujet à un autre (12).

La schizophrénie a fait l'objet d'un certain nombre d'interprétations dans le cadre des systèmes dynamiques. Une première hypothèse stipule que la dynamique sous-jacente à la schizophrénie, en particulier au délire, pourrait être reliée à l'existence d'attracteurs artificiels mis en place lors d'un dépassement de capacité de mémorisation du réseau. Dans ce cas, ces attracteurs ne correspondent pas à des formes apprises et sont donc des représentations déformées de la « réalité ». Toutefois, ces attracteurs parasites attirent plus fortement les trajectoires que ceux représentant des formes apprises (12). Ils absorbent donc toute la dynamique du réseau, *i.e.* l'activité mentale du sujet. Cette représentation est associée à l'hypothèse selon laquelle un trouble du développement diminuerait le nombre de connexions synaptiques chez le patient schizophrène. Cette synaptogenèse anormale aurait pour conséquence de diminuer les capacités de stockage du réseau neuronal ce qui provoquerait la création d'attracteurs « non conformes » responsables de la distorsion de la réalité et du délire chez le schizophrène (13, 14).

Une seconde interprétation suppose que les défauts de généralisation et/ou de prise en compte du contexte chez les patients schizophrènes pourraient être dus à des bassins d'attraction de taille réduite par rapport à ceux du sujet contrôlé. Cette conception considère les transmissions dopaminergique et noradrénergique comme paramètres de contrôles réglant les interactions sous-cortico-corticales et la dynamique cérébrale. Dans ce cas, des stimulations même proches entraîneraient la convergence de la dynamique neuronale vers des attracteurs distincts ; elles seraient alors considérées comme différentes (46).

Ces modèles, bien que séduisants, fournissent des interprétations qui sont toutefois difficilement testables du point de vue de la dynamique neuronale réelle. Ainsi, pour

permettre de combler l'écart qui sépare ces interprétations quasi métaphoriques et les connaissances physiologiques, il est nécessaire de caractériser les dynamiques physiologiques réelles.

DYNAMIQUES PHYSIOLOGIQUES : DES NEUROSCIENCES À LA PSYCHIATRIE

Les modèles évoqués ci-dessus ne prennent en compte que les états d'équilibres comme états dynamiques stables. Dans le cas du cerveau, les dynamiques sont au minimum oscillantes, voire chaotiques, mais les attracteurs ponctuels sont impossibles. Il est donc nécessaire de mettre en place des outils permettant de caractériser des dynamiques complexes telles que les dynamiques chaotiques. Nous verrons dans ce qui suit que ces méthodes existent et que leur application à des problèmes psychiatriques définit des perspectives intéressantes pour une nouvelle approche de ceux-ci.

Comment quantifier les dynamiques complexes ?

Nous avons vu ci-dessus que la dynamique d'un système correspond à sa trajectoire dans son espace des phases. Lorsque celui-ci est inconnu et que les seuls renseignements disponibles sur le système sont des mesures expérimentales (enregistrements physiologiques ou échelles cliniques), il est nécessaire de reconstruire, à partir de données expérimentales, un objet géométrique équivalent à la trajectoire du système dans son espace des phases. La caractérisation de la trajectoire reconstruite permet alors d'obtenir des informations sur la dynamique du système.

La reconstruction de la trajectoire nécessite de passer d'une représentation temporelle de l'évolution de l'état du système (comme sur la *figure 1*) à une représentation géométrique de plus grande dimension (comme sur la *figure 2*). Plusieurs méthodes sont disponibles selon que l'on dispose d'une ou plusieurs séries de mesures. Dans le premier cas, des mesures correctement espacées dans le temps sont utilisées comme les coordonnées d'un point dans un espace multidimensionnel ; dans le second cas, les mesures obtenues simultanément sur plusieurs capteurs sont alors prises comme coordonnées*. Il a été démontré que, dans la plupart des cas, les objets géométriques reconstruits sont équivalents à la trajectoire du système dans son espace des phases (41, 45, 53).

De nombreuses méthodes, encore en plein développement, sont disponibles pour caractériser les trajectoires reconstruites (1, 6, 10, 17). Nous ne détaillerons que les deux principalement utilisées en psychiatrie.

Une première méthode consiste à caractériser la dimension de la trajectoire reconstruite, c'est-à-dire la place qu'elle occupe dans l'espace des phases recons-

* Afin d'obtenir des espaces de dimension suffisante, il est possible d'associer ces deux méthodes.

truit. Dans le cas d'un système stationnaire, les algorithmes utilisés fournissent une approximation du nombre de degrés de liberté du système, c'est-à-dire du nombre de variables nécessaires pour représenter l'état du système et son évolution. Dans le cas de systèmes non stationnaires, comme c'est le cas pour le cerveau, ils caractérisent plutôt des familles d'attracteurs (40). Cet indice géométrique est « statique » car il ne prend pas en compte la façon dont les points évoluent le long de la trajectoire.

Une seconde méthode caractérise, au contraire, la façon dont les points de la trajectoire évoluent les uns par rapport aux autres. Elle fournit ainsi une approximation de la « complexité » de la trajectoire en terme de quantité d'informations créée au cours de l'évolution du système. Un algorithme de prédiction de la trajectoire (44) permet, par la comparaison de l'évolution de points proches dans l'espace reconstruit, d'obtenir une valeur reliée directement à cette caractéristique (52). Cette mesure est, sans doute, l'une des techniques les mieux adaptées pour la caractérisation de la dynamique d'un système aussi peu stationnaire que le cerveau (29, 30). Il est ainsi possible de caractériser la dimension de la trajectoire reconstruite et la quantité d'information engendrée par l'évolution temporelle du système.

À partir d'enregistrements physiologiques (électroencéphalogramme – EEG – ou électrocardiogramme, par exemple), la reconstruction et la caractérisation de la trajectoire permettent d'étudier les variations des caractéristiques de la dynamique physiologique (cérébrale ou cardiaque) en fonction des conditions expérimentales. Ce formalisme a été utilisé dans plusieurs études visant à mettre en évidence les variations de dynamique associées à des troubles physiologiques ou mentaux. Il permet, par ailleurs, de tester la proposition théorique selon laquelle les états mentaux émergent de la dynamique neuronale sous-jacente.

Chaos en physiologie

Certains résultats d'études de systèmes physiologiques faites dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques permettent d'illustrer l'existence de changements de dynamiques liés à l'apparition de pathologies.

En physiologie cardiaque, un rythme simple et régulier (*i.e.* périodique) était, d'après la représentation la plus répandue, considéré comme un signe de bonne santé alors qu'un rythme désordonné (*i.e.* chaotique) supposait un état pathologique. Or, il s'est avéré qu'une dynamique simple menait à une fibrillation et une crise cardiaque, alors qu'un comportement complexe était symptomatique de souplesse et de bonne santé (8). Cette constatation, ainsi que la mise en évidence d'autres troubles de la dynamique des systèmes physiologiques menant à des conditions pathologiques, a confirmé la notion de « pathologies dynamiques » (20, 21). Dans ce cas, la modification des paramètres de contrôle d'un système physiologique sain entraîne un changement de dynamique tel que le système fonctionne dans un mode patho-

logique. Dans le cas des études sur la dynamique cérébrale, il a été montré que la complexité de la dynamique cérébrale diminue dans le cas de pathologies telles que l'épilepsie (3) ou la maladie de Creutzfeldt-Jakob (4).

Ainsi, l'état dit « normal » proviendrait d'une dynamique variée, complexe et instable permettant l'adaptation du sujet à de nouvelles perturbations du milieu (43). En revanche, l'état pathologique serait lié à une diminution de la complexité de la dynamique menant à une perte d'adaptabilité du système. Cette hypothèse correspond à une réponse affirmative à la question : « *Is it healthy to be chaotic ?* » (33). Des processus tels que le vieillissement pourraient aussi être associés à une perte de complexité des dynamiques physiologiques en interaction dans l'organisme (19). En ce qui concerne les troubles mentaux, nous avons étudié, dans ce cadre théorique, la dynamique cérébrale de sujets déprimés.

Dynamique cérébrale et dépression

Afin de tester expérimentalement la proposition selon laquelle des variations de la dynamique cérébrale doivent être concomitantes des variations d'états mentaux, nous avons quantifié la dynamique cérébrale de sujets déprimés et de sujets contrôles. Deux groupes de sujets déprimés ont été étudiés : le premier était constitué de patients présentant pour la première fois un épisode dépressif majeur, le second groupe comprenait des patients souffrant d'un épisode appartenant à une série d'épisodes récurrents. Ces groupes ont été étudiés deux fois : pendant l'épisode de dépression majeure et après amélioration clinique pour les groupes de sujets déprimés (à 3 semaines d'intervalle pour les sujets contrôles). Le but de cette étude était de mettre en évidence les caractéristiques des dynamiques cérébrales associées aux différents états dans lesquels se trouvaient les sujets.

La dynamique cérébrale a été reconstruite à partir de signaux EEG recueillis sur plusieurs sites sur le scalp. Nous avons mesuré la capacité de prédiction de la dynamique cérébrale. Notre mesure permet de caractériser la complexité de l'évolution de la dynamique : plus la capacité de prédiction se dégrade vite, plus la dynamique est complexe.

Nous avons montré que la dynamique cérébrale des patients déprimés est moins complexe au cours de l'épisode dépressif que celle des sujets témoins. Mis en parallèle avec la diminution de complexité de la dynamique cérébrale observée chez des sujets sains dans des tâches contraignantes à réaliser (29), ce résultat suggère que les patients déprimés engagés dans leurs ruminations mentales ont en continu une tâche contraignante à réaliser. Cette contrainte centrerait la dynamique cérébrale sur des comportements moins complexes et ainsi moins ouverts aux perturbations de l'environnement.

L'évolution des caractéristiques de la dynamique au cours du traitement va dépendre de l'histoire de la maladie et de la capacité du sujet à rompre avec la dynamique pathologique en place. Chez les patients présentant des

épisodes dépressifs récurrents, même après traitement antidépresseur et une amélioration clinique objectivée par des échelles cliniques, la dynamique électrique cérébrale reste peu complexe (25). En revanche, pour le groupe de patients présentant pour la première fois un épisode majeur, nous avons observé, après traitement, un changement de dynamique tel que le niveau de complexité devient similaire à celui des sujets témoins. Cette expérience a ainsi permis de mettre en évidence l'existence d'une dynamique spécifique de l'épisode dépressif qui n'évolue que chez des patients non installés sur un mode rigide de comportement (figure 4). L'installation dans la dépression et la récurrence des épisodes induisent donc des changements drastiques dans l'organisation de la dynamique cérébrale (32).

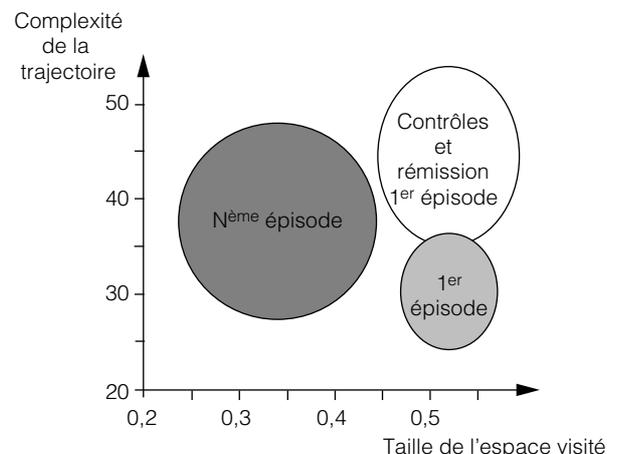


FIG. 4. — Illustration des différents types de dynamiques observés chez des patients déprimés majeurs.

Les caractéristiques de la dynamique cérébrale sont obtenues à partir d'enregistrements EEG multivoies. La complexité de la trajectoire est calculée à partir de la méthode de prédiction. La taille de l'espace visité par la trajectoire est estimée au moyen d'une décomposition en valeurs singulières (proche de l'analyse en composantes principales) de l'ensemble des points reconstruits. Cet indice varie de 0 pour les nuages de points allongés selon une droite (correspondant à un système à faible nombre de degrés de liberté) à 1 pour un nuage de points équiréparti selon les différents axes de l'espace (correspondant à un système à grand nombre de degrés de liberté, voire à un système aléatoire) [d'après (32, 48)].

Cette première échelle de temps qui correspond à l'organisation de la dynamique neuronale suppose une seconde correspondant à la dynamique des formes macroscopiques qui en émergent, *i.e.* la dynamique des formes cliniques et des symptômes. À partir du même formalisme, il est possible de caractériser ces dynamiques macroscopiques.

Dynamique des formes cliniques et soubassement physiologique

La répétition dans le temps des symptômes observés dans certaines pathologies est difficilement analysable. Avant la découverte des dynamiques chaotiques, deux cas étaient pris en compte : leur périodicité (comme par

exemple pour les dépressions saisonnières) ou bien leur caractère aléatoire. Il a toutefois été montré que l'alternance des phases maniaques et dépressives dans la psychose maniaco-dépressive semble suivre une dynamique chaotique (9). Par ailleurs, l'étude de 14 patients schizophrènes pendant plus de 200 jours consécutifs montre que le décours temporel des symptômes suit des processus dynamiques non-linéaires pouvant dans certains cas être interprétés comme chaotiques (51). De telles études permettent l'interprétation du décours des pathologies au moyen d'hypothèses plus parcimonieuses que celles des théories multicausales traditionnelles.

Certaines études ont tenté de quantifier les changements de dynamique au cours de séances psychothérapeutiques. Par exemple, après recodage de l'échange verbal, il est possible de quantifier la complexité de la suite de symboles formant une représentation quantitative de l'interaction entre patient et thérapeute. Au cours d'une séance, il a été ainsi possible de discerner, de façon quantitative, des schèmes reproductibles dans la communication (37). Par ailleurs, il a été montré que les formes de communication évoluant au cours de la séance peuvent être interprétées comme un phénomène d'auto-organisation non-linéaire (50). De tels changements pourraient être reliés à ceux mis en évidence lors de thérapie brève chez une patiente déprimée (39). Dans cette étude, la dynamique cardiaque est corrélée aux principaux thèmes abordés au cours de la séance thérapeutique. Par ailleurs, au cours de 28 séances d'une thérapie brève chez une autre patiente déprimée, des changements de dynamiques ont aussi été observés (38). Les variations des trajectoires de la dynamique du rythme cardiaque correspondraient à des variations d'état mental du sujet.

Dans le cas de la dépression, plusieurs patients déprimés ont été suivis tous les deux jours pendant leur hospitalisation pour un épisode de dépression majeure (49). À partir des mêmes méthodes décrites précédemment, il a été montré une corrélation importante entre les changements des caractéristiques de la dynamique EEG et les changements d'humeur de ces patients. Ces études montrent alors une étroite relation entre les caractéristiques de la dynamique neuronale et l'état mental du sujet. Elles fournissent par ailleurs de nouveaux arguments sur la validité de l'hypothèse de l'émergence du mental par rapport à l'organisation de la dynamique neuronale sous-jacente.

CONCLUSION

Nous venons de passer rapidement en revue certains travaux relevant de la psychopathologie utilisant des méthodes non-linéaires de quantification de la dynamique de systèmes. Il apparaît que l'outil mathématique dont nous disposons nous permet d'articuler les activités mentales et le substrat nerveux, en décrivant les changements de dynamique. L'exemple de la dynamique cérébrale des sujets déprimés qui se différencie des dynamiques des sujets normaux, tant au niveau de leur stabilité que de leur complexité, nous conforte dans l'idée que des réactions

comportementales peuvent correspondre à des formes spécifiques de l'activité cérébrale. Il devient alors possible d'identifier des changements de dynamique à des niveaux différents, qu'ils soient biologiques ou mentaux.

Le jeu des déstabilisations des dynamiques consécutives à des variations de facteurs internes et externes permettrait au système de se réorganiser pour produire un nouveau comportement adapté. La dynamique qui se constitue est alors une forme momentanément stable reliée au conflit entre les contraintes désorganisatrices et l'organisation interne de la dynamique. Dans ce schéma, l'ordre mental n'existe pas en tant que tel. L'entrée dans la maladie n'est qu'un glissement supplémentaire vers une nouvelle organisation dynamique. Cette organisation peut être modifiée par l'intervention d'un agent perturbateur quel que soit le niveau sur lequel il va intervenir (au niveau pharmacologique, comportemental ou mental). Si à tout état mental correspond un état cérébral momentanément stable (54), c'est-à-dire si un attracteur de la dynamique neuronale peut être assimilé à un état mental (47), alors toute modification d'un des niveaux entraîne une modification sur l'autre niveau. Cette position souligne ainsi la non-séparation et la contrainte réciproque entre psyché et soma (24). La thérapie nous permet d'observer ce genre de phénomène : « la prescription d'un psychotrope détermine un changement d'état cérébral et l'amélioration clinique un changement d'état mental » (54). Dans ce cadre, l'action médicamenteuse peut être envisagée comme le générateur d'un déséquilibre du système neuronal, le contraignant à mettre en place une nouvelle auto-régulation : « Le médicament ne répare pas une carence mais contraint un réseau complexe de neurones à un nouvel équilibre » (54).

De la même façon, les changements réalisés au cours d'une psychothérapie vont produire une réorganisation qualitativement comparable ; la contrainte exercée au niveau mental va permettre une modification des niveaux les plus « bas ». Une modification à un niveau inférieur ou supérieur entraîne une déformation de la dynamique générale et contribue à la mise en place de nouveaux types de dynamique dans le cas où la déformation a permis de dépasser une valeur critique. État cérébral et état mental constituent ainsi un seul élément : l'émergence d'une pensée dépend de la forme des interactions neuronales sous-jacentes mais n'en n'est pas distincte*.

Les vérifications expérimentales d'un tel point de vue nécessitent l'utilisation de méthodes développées dans le cadre de la théorie physique des systèmes dynamiques non-linéaires. Les premières études en psychopathologie auxquelles nous avons fait référence ont montré la possibilité d'opérationnaliser ces concepts tant pour l'étude de l'évolution des symptômes que pour celle de l'activité physiologique. Cette conception générale pouvant apporter de nouvelles perspectives sur des problèmes classi-

* « Lorsque nous pensons une pensée, la signification de cette pensée est la forme des processus neurophysiologiques sous-jacents » [Riemann cité par (47)].

ques, nous considérons qu'un examen rigoureux de sa validité théorique et expérimentale en psychopathologie est nécessaire.

Références

1. ABARBANEL HDI, BROWN R, SIDOROWICH JJ *et al.* The analysis of observed chaotic data in physical systems. *Rev Modern Physics* 1993 ; 65 : 1331-92.
2. AMIT DJ. Modeling brain function : the world of attractor neural networks. Cambridge : Cambridge University Press, 1989.
3. BABLOYANTZ A, DESTEXHE A. Low-dimensional chaos in an instance of epilepsy. *Proceed Nat Acad Sci USA* 1986 ; 83 : 3513-17.
4. BABLOYANTZ A, DESTEXHE A. The Creutzfeldt-Jakob disease in the hierarchy of chaotic attractors. *In* : Markus M, Müller S, Nicolis G, eds. From chemical to biological organization, volume 39 of Springer series in synergetics. Heidelberg : Springer Verlag, 1988 : 307-16.
5. BERGE P, POMEAU Y, VIDAL C. L'ordre dans le chaos : vers une approche déterministe de la turbulence. Paris : Hermann, 1984.
6. ECKMANN JP, RUELLE D. Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Rev Modern Physics* 1985 ; 57 : 617-56.
7. GARDNER H. The mind's new science. A history of the cognitive revolution. New York : Basic Books, 1985. Trad fr Peytavin JL. Paris : Payot, 1993.
8. GOLDBERGER AL. Fractal variability versus pathologic periodicity : complexity loss and stereotypy in disease. *Perspect Biol Med* 1997 ; 40 : 543-61.
9. GOTTSCHALK A, BAUER MS, WHYBROW PC. Evidence of chaotic mood variation in bipolar disorder. *Arch Gen Psychiatry* 1995 ; 52 : 947-59.
10. GRASSBERGER P, SCHREIBER T, SCHAFFRATH C. Non-linear time series analysis. *Intern J Bifurcat Chaos* 1991 ; 1 : 521-47.
11. HERTZ J. Computing with attractors. *In* : Arbib MA, ed. The handbook of brain theory and neural networks. Cambridge : The MIT Press, 1995 : 230-4.
12. HOFFMAN RE. Computer simulations of neural information processing and the schizophrenia-mania dichotomy. *Arch Gen Psychiatry* 1987 ; 44 : 178-88.
13. HOFFMAN RE, DOBSCHA SK. Cortical pruning and the development of schizophrenia. *Schizophren Bull* 1989 ; 15 : 477-90.
14. HOFFMAN RE, McGLASHAN TH. Corticocortical connectivity, autonomous networks and schizophrenia. *Schizophren Bull* 1994 ; 20 : 257-61.
15. HOPFIELD JJ. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceed Nat Acad Sci USA* 1982 ; 79 : 2554-58.
16. HOPFIELD JJ. Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. *Proceed Nat Acad Sci USA* 1984 ; 81 : 3088-92.
17. KANTZ H, SCHREIBER T. Non-linear time series analysis. Cambridge : Cambridge University Press, 1997.
18. KAPLAN D, GLASS L. Understanding non-linear dynamics. Berlin : Springer Verlag, 1995.
19. LIPSITZ LA, GOLDBERGER AL. Loss of complexity and aging. Potential applications of fractals and chaos theory to senescence. *J Am Med Assoc* 1992 ; 267 : 1806-9.
20. MACKEY MC, GLASS L. Oscillation and chaos in physiological control systems. *Science* 1977 ; 197 : 287-9.
21. MACKEY MC, MILTON JG. Dynamical diseases. *Ann NY Acad Sci* 1987 ; 504 : 16-32.
22. MANDELBROT B. Les objets fractals. Paris : Flammarion, 1989.
23. MAY RM. Simple mathematical models with very complicated dynamical behavior. *Nature* 1976 ; 261 : 459-67.
24. NANDRINO JL. Comprendre et accompagner la personne dépressive. Interventions psycho-sociales. Paris : Gaëtan Morin Europe, 1999.
25. NANDRINO JL, PEZARD L, MARTINERIE J *et al.* Decrease of complexity in EEG as a symptom of depression. *Neuro Rep* 1994 ; 5 : 528-30.
26. NICOLIS G, PRIGOGINE I. Exploring complexity : an introduction. Munchen : Piper & Verlag, 1989. Trad fr Chanu J. Paris : PUF, 1992.
27. NICOLIS JS. Chaos and information processing. A heuristic outline. Singapore : World Scientific, 1991.
28. PETITOT-COCORDA J. Physique du sens. De la théorie des singularités aux structures sémio-narratives. Paris : Editions du CNRS, 1992.
29. PEZARD L, MARTINERIE J, BRETON F *et al.* Non-linear forecasting measurements of multichannel EEG dynamics. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1994 ; 91 : 383-91.
30. PEZARD L, MARTINERIE J, MÜLLER J *et al.* Entropy quantification of human brain spatio-temporal dynamics. *Physica D* 1996 ; 96 : 344-54.
31. PEZARD L, NANDRINO JL. Dynamique cérébrale et pathologie mentale : vers une approche dynamique de la dépression. *Rev Intern Psychopathol* 1994 ; 15 : 443-58.
32. PEZARD L, NANDRINO JL, RENAULT B *et al.* Depression as a dynamical disease. *Biol Psychiatry* 1996 ; 39 : 991-9.
33. POOL R. Is it healthy to be chaotic ? *Science* 1989 ; 243 : 604-7.
34. PORTE M. La dynamique qualitative en psychanalyse. Paris : PUF, 1994.
35. PORTE M. Pulsion et politique. Paris : L'Harmattan, 1997.
36. PRIGOGINE I, STENGERS I. La nouvelle alliance. Métamorphose de la science. Paris : Gallimard, 1979.
37. RAPP PE, JIMENEZ-MONTANO MA, LANGS RJ *et al.* Toward a quantitative characterization of patient-therapist communication. *Mathemat Biosci* 1991 ; 105 : 207-27.
38. REDINGTON D, REIDBORD S. Chaotic dynamics in autonomic nervous system activity of a patient during psychotherapy. *Biol Psychiatry* 1992 ; 31 : 993-1007.
39. REIDBORD SP, REDINGTON DJ. Psychophysiological processes during insight-oriented therapy. Further investigations into non-linear psychodynamics. *J Nerv Ment Dis* 1992 ; 180 : 649-57.
40. RUELLE D. Diagnosis of dynamical systems with fluctuating parameters. *Proceed Roy Soc London A* 1987 ; 413 : 5-8.
41. SAUER T, YORKE JA, CASDAGLI M. Embedology. *J Statistic Physics* 1991 ; 65 : 579-616.
42. SEARLE J. The rediscovery of mind. Cambridge : The MIT Press, 1992. Trad fr Tiercelin C. Paris : Gallimard, 1995.
43. SKARDA C, FREEMAN WJ. How brains make chaos in order to make sense of the world. *Behav Brain Sci* 1987 ; 10 : 161-96.
44. SUGIHARA G, MAY RM. Non-linear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature* 1990 ; 344 : 734-41.
45. TAKENS F. Detecting strange attractors in fluid turbulence. *Spring Lect Notes Mathemat* 1981 ; 898 : 366-81.
46. TASSIN JP. Schizophrénie et neurotransmission : un excès de traitement analogique. *Encephale* 1996 (Suppl III) : 91-8.
47. THOM R. Stabilité structurelle et morphogénèse. Essai sur une théorie générale des modèles. Paris : InterEditions, Paris, 1977.
48. THOMASSON N, NANDRINO JL, PEZARD L. La dynamique cérébrale du sujet déprimé. « La psychopathologie peut-elle être cognitive ? ». *Encephale* 1998 ; n° HS 1 : 154-7.
49. THOMASSON N, PEZARD L, ALLILAIRE JF *et al.* Non-linear EEG changes associated with clinical improvement in depressed patients. *Non-lin Dynam Psychol Life Sci* 2000 ; 4 : 203-18.
50. TSCHACHER W, SCHEIER C, GRAWE K. Order and pattern formation in psychotherapy. *Non-lin Dynam Psychol Life Sci* 1998 ; 2 : 195-215.
51. TSCHACHER W, SCHEIER C, HASHIMOTO Y. Dynamical analysis of schizophrenia courses. *Biol Psychiatry* 1997 ; 41 : 428-37.
52. WALES DJ. Calculating the rate of loss of information from chaotic time series by forecasting. *Nature* 1991 ; 350 : 485-88.
53. WHITNEY H. Differentiable manifolds. *Ann Mathemat* 1936 ; 37 : 645-80.
54. WIDLÖCHER D. La thérapeutique comme contrainte. *Et Psychothérap* 1986 ; 66 : 247-51.