

Morphologie et perception

Jean PETITOT

EHESS & CREA, École Polytechnique, Paris, France

petitot@poly.polytechnique.fr

INTRODUCTION

Des phénomènes d'émergence de structures morphologiques peuvent se produire dans les systèmes complexes : de l'interaction complexe (coopérative ou compétitive) d'un grand nombre d'unités "micro" élémentaires émergent des propriétés "macro" et un *changement de niveau d'organisation* en résulte.

L'un des apports scientifiques les plus novateurs et les plus fondamentaux des 30 dernières années a été de fournir des modèles de ces phénomènes. Ils ne concernent plus seulement de l'émergence de *grandeurs* macroscopiques comme la température, la pression ou l'aimantation que l'on trouve en physique statistique, mais bien de *structures morphologiquement organisées*, de patterns. Il existe une relation fascinante entre d'un côté ces structures émergentes macro qui possèdent une organisation en constituants permettant de les décrire de façon relativement économique, et d'un autre côté l'étonnante complexité de leur implémentation qui se trouve distribuée sur un nombre énorme d'unités élémentaires.

Nous nous bornerons dans ce papier à donner deux exemples très différents, l'un physique, l'autre neurocognitif, concernant l'émergence de telles formes organisées dans des substrats matériels. Insistons sur le fait que ces modèles modélisent des systèmes qui sont *singuliers*, en grande partie *contingents* (non concrètement déterministes, i.e. présentant une sensibilité à des variations infinitésimales de leurs paramètres de contrôle, sensibilité produisant des effets de divergence), *historiques*, résultant de processus *d'évolution* et *d'adaptation*, systèmes hors équilibre possédant une *régulation* interne leur permettant de demeurer à l'intérieur de leur domaine de *viabilité* et qui n'ont plus rien à voir avec le déterminisme mécaniste classique.

I. VERS UNE PHYSIQUE DES FORMES

1. Le modèle général de René Thom

C'est René Thom qui a défini le premier de façon à la fois mathématique et générale ce que sont une morphologie et un processus morphogénétique. L'idée fondamentale est de considérer qu'en chaque point w de l'espace W du substrat de la forme il existe une dynamique *locale*, dite dynamique interne, X_w qui définit la physique ou la chimie ou le métabolisme local du substrat. Ce régime local, cet état interne du

substrat, se manifeste phénoménologiquement par des qualités sensibles (couleur, texture, etc.). Les rapports de voisinage spatial entre les différents points w induisent alors des *couplages* entre les dynamiques internes locales. Celles-ci interagissent et des *instabilités* peuvent donc se produire. Cela entraîne des bifurcations des régimes locaux, des brisures des symétries du substrat, brisures qui entraînent à leur tour des discontinuités qualitatives dans l'apparence du substrat. Et ce sont ces ruptures d'homogénéité qui engendrent enfin les formes. L'idée principale est donc de considérer l'espace et le temps non plus comme un simple contenant pour des objets mais *comme un espace de contrôle* permettant de faire interagir des dynamiques internes locales.

Ce point de vue fournit un cadre théorique unitaire à tout un ensemble de travaux. Nous citerons deux exemples, celui des modèles à la Turing et celui des champs continus d'oscillateurs de Pierre Coulet.

2. Equations de réaction-diffusion et structures de Turing

Les équations de réaction-diffusion introduites par Turing en théorie de la morphogenèse permettent de comprendre l'émergence de motifs morphologiques macroscopiques dans les réactions chimiques. Elles couplent des équations cinétiques de réaction décrivant des interactions moléculaires locales et des équations de diffusion décrivant des phénomènes de transport. La diffusion produit de l'uniformisation, elle homogénéise. C'est pas excellence un processus destructeur de morphologies. Mais si le milieu est le siège de réactions chimiques avec catalyse et autocatalyse (les équations différentielles de la cinétique chimique exprimant l'évolution temporelle des concentrations des espèces chimiques sont alors non linéaires) et s'il est loin de l'équilibre thermodynamique (système ouvert) alors il peut y avoir des morphologies spatio-temporelles complexes qui émergent de façon stationnaire et qui sont engendrées par des processus d'auto-organisation. Le caractère explosif de l'autocatalyse se trouve inhibé par d'autres réactifs et suivant les vitesses de diffusion relatives des produits de la réaction les morphologies peuvent être très différentes.

Par exemple si A est un activateur auto-catalytique et si H est un inhibiteur dont la synthèse est catalysée par A , alors à partir d'une situation initiale homogène on peut obtenir des motifs périodiques. Une petite fluctuation de A produit par autocatalyse une pic local de A . Mais cela amplifie aussi la concentration de H localement. Mais si H diffuse plus vite que A , la formation de A ne sera inhibée par H que latéralement et non pas au centre du pic. D'où un pic de A bordé par un manque de A .

Un exemple de système d'équations non linéaires modélisant un tel système sont par exemple :

$$\begin{cases} \frac{\partial a}{\partial t} = \rho \frac{a^2}{h} - \mu_a a + D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \sigma_a \\ \frac{\partial h}{\partial t} = \rho a^2 - \mu_h h + D_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \sigma_h \end{cases}$$

où $a(x,t)$ et $h(x,t)$ sont les concentrations respectives de l'activateur A et de l'inhibiteur H , où les termes non linéaires en a^2 expriment l'autocatalyse de A et la catalyse de H par A , où le terme en $1/h$ exprime l'inhibition de la production de A par H , où les termes linéaires $-\mu_a a$ et $-\mu_h h$ sont des termes de dégradation (les constantes μ sont des durées de vie de molécules et $\mu_a < \mu_h$: H se dégrade plus vite que A), où les termes $D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}$ et $D_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ sont des termes de diffusion avec $D_a \ll D_h$ (H diffuse plus vite que A), et où enfin les termes constants > 0 σ_a et σ_b garantissent que les espèces chimiques A et H restent toujours présentes.

On peut obtenir ainsi des morphologies complexes, par exemple des structures en bandes qui sont des structures localement simples mais globalement complexes possédant des défauts, des points d'arrêt, des dislocations, etc. comme les cristaux liquides (cf. figure 1).

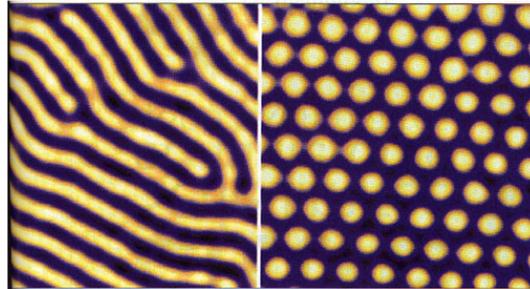


Figure 1. Bandes dans une structure de Turing (d'après De Kepper 1998)

3. Champs d'oscillateurs (P. Coulet)

En analysant les instabilités de champs continus d'oscillateurs, Pierre Coulet a montré comment on pouvait engendrer un nombre considérables de formes de type différents. On considère par exemple des oscillateurs faiblement couplés par leurs relations topologiques de voisinage et soumis à un forçage avec une fréquence voisine du double de leur fréquence propre. La variable locale observée peut être l'amplitude ou la phase de l'oscillateur. L'amplitude de la modulation et l'écart à la résonance sont des paramètres.

En passant à la limite d'un continuum d'oscillateurs dont le paramètre d'ordre (la phase moyenne) Z dépend de la position spatiale, on obtient des équations du type :

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \lambda Z - \mu |Z|^2 Z + \gamma_n \bar{Z}^{n-1} + \nu \Delta Z ,$$

où λ , μ et ν sont des paramètres complexes et γ_n un paramètre réel.

Ces oscillateurs peuvent se synchroniser et se désynchroniser localement. En introduisant de la diffusion, on obtient une très riche variété de patterns spatiaux : turbulence développée, défauts, ondes spirales, cellules hexagonales, réseaux de bandes, etc. (cf. Figure 2).

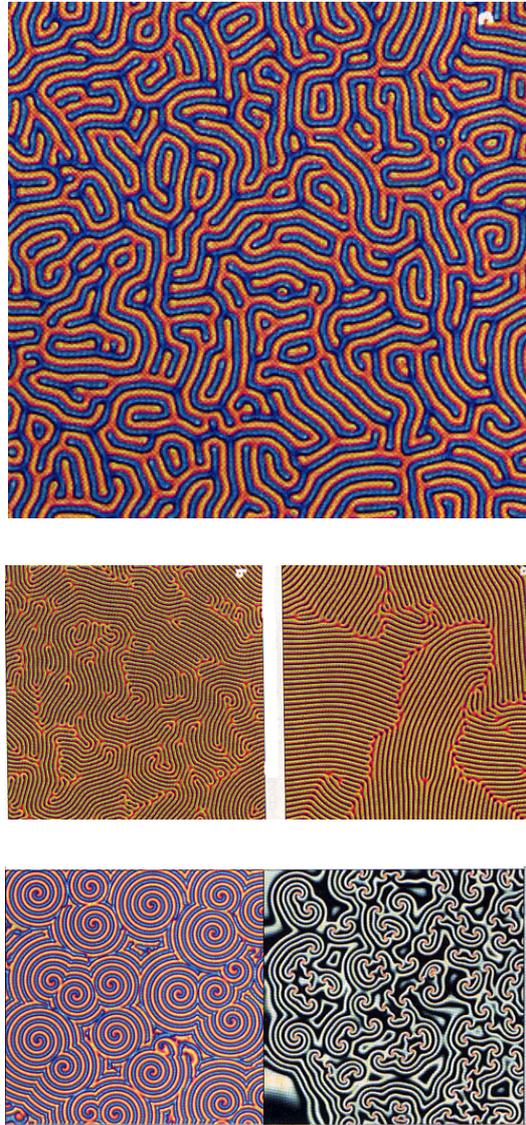


Figure 2. Structures émergentes dans les champs continus d'oscillateurs (d'après Coulet 1992)

4. Patterns

Hans Meinhardt du Max Planck Institut a développé des modèles pour des motifs morphologiques comme ceux des coquilles. La croissance d'une coquille se fait par couches successives d'accrétion de matériau calcifié le long du bord du manteau. L'état de pigmentation d'une cellule est déterminé par la cellule sous-jacente et l'état des cellules voisines. Une coquille peut donc être considérée comme un diagramme

“position \times temps de développement”. Par exemple dans l'espèce *Conus marmoreus*, on peut supposer que l'activateur produisant la pigmentation “noir” se déclenche aléatoirement, s'autocatalyse et diffuse lentement. D'où la formation de triangles noirs. Mais quand la production a duré assez longtemps (donc après un certain délai), l'inhibiteur se déclenche et diffuse rapidement. D'où l'arrêt brutal de la diffusion et “l'extinction” des bases de ces triangles. Mais l'activateur reste actif aux bord de ces intervalles car il a été tardivement déclenché. D'où de nouveaux triangles de diffusion. On obtient ainsi des cascades caractéristiques.



Figure 3. Modèle de pattern (d'après Meinhardt 1995)

II. VERS UNE NEUROCOGNITION DES FORMES.

Les formes ne sont pas seulement des structures organisées émergeant de la physique interne des substrats. Ce sont aussi des structures perceptives et cognitives construites par le cerveau. Grâce aux résultats spectaculaires des neurosciences on commence à comprendre comment le cerveau peut élaborer la géométrie des morphologies visuelles. Nous nous bornerons à un exemple très simple concernant le processus d'intégration des contours à partir de leur représentation distribuée dans le cortex.

Comment, alors que la détection de contour est implémentée de façon terriblement locale et distribuée dans le cortex, des formes macro possédant de la cohérence globale peuvent-elles émerger? Cette étonnante performance résulte d'une part de l'architecture fonctionnelle des aires du cortex et d'autre part de phénomènes dits de binding (de liage) assurant la cohérence.

1. La structure en pinwheels de l'aire visuelle V1

Restreignons-nous à la première des aires visuelles, l'aire V1, où débute le traitement des formes. Le signal rétinien y est analysé par des neurones dont les champs récepteurs possèdent *une préférence orientationnelle*. Trois niveaux d'organisation sont particulièrement importants: la rétinitopie, la structure laminaire et la structure columnaire.

- (i) La rétinotopie signifie qu'il existe des applications de la rétine sur les couches corticales qui préservent la topographie rétinienne. Il existe par exemple une représentation conforme (de type logarithme complexe) entre la rétine et la couche 4C (partie de la couche 4 de V1 où se terminent majoritairement les fibres issues du corps genouillé latéral).
- (ii) La structure laminaire (d'épaisseur environ 1,8 mm) est constituée de 6 couches "horizontales" (i.e. parallèle à la surface du cortex), la plus importante pour notre propos étant la couche 4.
- (iii) La structure columnaire et hypercolumnaire est la grande découverte des Prix Nobel Hubel et Wiesel au début des années 60. Il existe dans l'aire V1 des neurones sensibles à l'orientation, à la dominance oculaire et à la couleur. Ce sont les premiers qui nous intéressent ici. Ils détectent des couples (a, p) d'une position rétinienne a et d'une orientation locale p en a . Par des méthodes sophistiquées d'enregistrement de réponse à des stimuli appropriés (barres orientées traversant le champ récepteur des cellules), on a pu montrer que perpendiculairement à la surface du cortex la position rétinienne a et l'orientation préférentielle p restent à peu près constantes. Cette redondance "verticale" définit les *colonnes d'orientation*. En revanche, parallèlement à la surface du cortex, la position a varie peu dans des domaines où l'orientation préférentielle p varie au contraire de 0° à 180° par pas d'environ 10° tous les $50\text{-}100\ \mu$. Ce regroupement "horizontal" de colonnes définit une *hypercolonne d'orientation* qui est un module neuronal d'environ $500\ \mu\text{-}1\ \text{mm}$.

Des études récentes (années 90) ont montré que ces hypercolonnes s'organisent de façon géométriquement très précise en "roues d'orientation" appelées des *pinwheels*. La couche corticale est réticulée par un réseau de singularités qui sont des centres de pinwheels. Autour de ces points singuliers toutes les orientations sont représentées et ces roues d'orientation locales se raccordent ensuite entre elles. Cette structure est intéressante car elle permet d'implémenter dans des couches corticales de dimension 2 une structure abstraite qui est en fait de dimension 3 : 2 degrés de liberté pour les positions a et un degré de liberté pour l'orientation p (cf. figure 4)

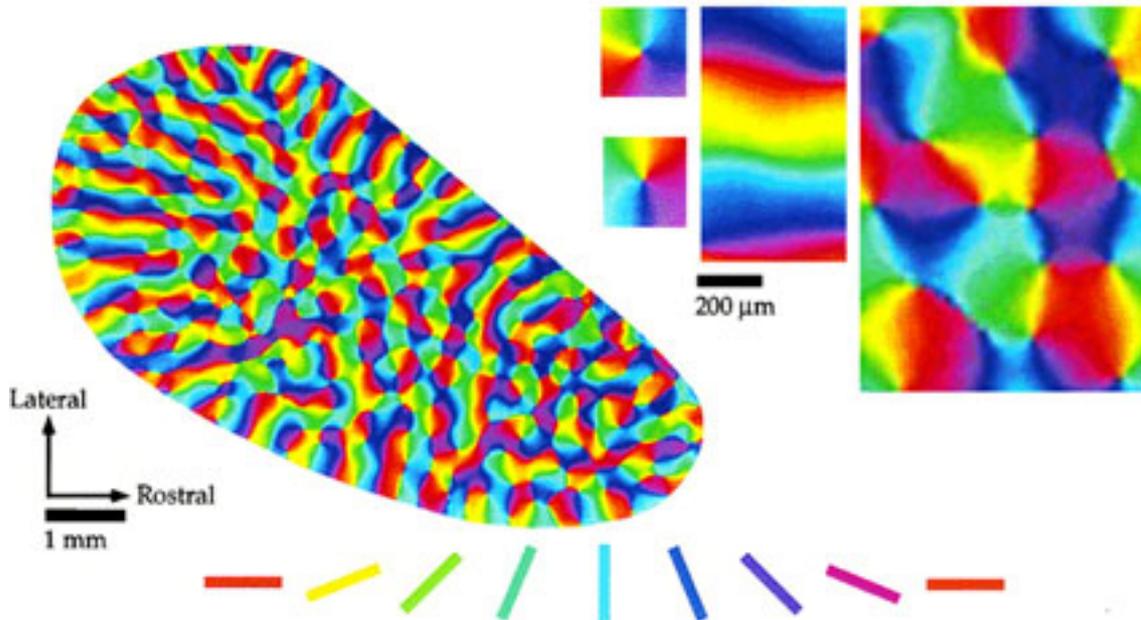


Figure 4. La structure "en pinwheel" de l'aire V1 (d'après Bosking 1997).

À travers cette architecture fonctionnelle, à chaque position a de la rétine R se trouve associé de façon rétinotopique un exemplaire (discrétisé) P_a de l'espace P des directions p du plan. Mathématiquement, une telle structure s'appelle une *fibration* de base R et de fibre P et il existe donc une implémentation neuronale de cette entité géométrique. L'ensemble des "projections" (au sens neurophysiologique) ascendantes des voies rétino-géniculo-corticales implémente la projection (au sens géométrique) $\pi : R \times P \rightarrow R$. Mais cette structure purement "verticale" ne suffit pas. Pour qu'il y ait cohérence globale, il faut pouvoir aussi *comparer* entre elles des fibres P_a et P_b rétinotopiquement voisines. Cela se trouve réalisé à travers des connexions "horizontales" cortico-corticales. Deux types de structures fondamentales ont été découvertes.

On a d'abord découvert que des connexions cortico-corticales relient des cellules de même orientation dans des hypercolonnes voisines. Cela signifie que le système est capable de savoir, pour b voisin de a , si une orientation en a est la même qu'une orientation en b . Autrement dit, les connexions verticales donnent un sens pour le système aux relations entre (a,p) et (a,q) et les connexions horizontales donnent un sens aux relations entre (a,p) et (b,p) .

Mais il y a plus. On a en effet pu montrer que des connexions cortico-corticales à longue portée corrélient à *longue distance* des cellules codant des couples (a,p) et (b,p) telles que p soit l'orientation de l'axe ab . Il s'agit là d'un résultat absolument remarquable de William Bosking montrant que ce que les géomètres appellent la *structure de contact* de la fibration $\pi : R \times P \rightarrow R$ est implémenté neurologiquement.

Cette architecture fonctionnelle de V1 permet de comprendre l'intégration des contours, c'est-à-dire la façon dont un grand nombre de couples (a,p) détectés localement

peuvent s'agréger en une forme globale cohérente? Il s'agit d'un problème typique de Gestalt, problème hautement non trivial puisque, comme le montrent les célèbres expériences de Kanizsa, le cortex est capable d'extrapoler des contours virtuels à très longue distance. Là, le phénomène d'émergence se révèle dans toute sa portée *puisque le contour émergent n'existe même pas dans les données sensorielles*.

2. Le problème du binding et la synchronisation temporelle

En fait ces phénomènes sont des cas particuliers très simples de phénomènes de *liage* (de binding). Le binding est un problème cognitif central, celui de la "constituance" et de la "compositionnalité" des représentations mentales. C'est le problème classique du tout et des parties, le problème dit *méréologique* des structures. Au niveau neuronal, les représentations mentales sont implémentées de façon *distribuée* sur un très grand nombre d'unités élémentaires. Comment éviter la "catastrophe" dissolvant les structures parties / tout dans un chaos pointilliste de l'implémentation? Comment arriver à extraire des constituants possédant une unité individuée? Comment coder leurs liens relationnels?

L'une des hypothèses actuellement les plus discutées — qui remonte à des travaux de Christoph von der Malsburg (1981) — repose sur le *codage temporel fin* des processus mentaux. Elle est que la cohérence structurale, l'unité, des constituants d'une représentation mentale se trouve encodée dans la dynamique de l'activité neuronale sous-jacente, dans ses corrélations temporelles et, plus précisément, dans la *synchronisation* (accrochage de fréquence et de phase) de réponses neuronales oscillatoires. L'idée est donc que la cohérence temporelle rapide (de l'ordre de la ms) code la cohérence structurale. La phase commune des oscillateurs synchronisés implémentant un constituant peut alors servir de label pour ce constituant dans des processus de traitement ultérieurs. D'où aussi le nom de "labeling hypothesis".

Il existe de très nombreuses confirmations expérimentales d'oscillations synchronisées (dans la bande de fréquence γ des 40 Hz) des colonnes et hypercolonnes corticales, la synchronisation étant sensible à la constituance des stimuli et à la cohérence de leurs constituants (travaux de Eckhorn, Charles Gray, Wolf Singer, Peter König, Andreas Engel, 1992).

Ces résultats ont été fort débattus et sont en partie controversés. Certains pensent même qu'ils sont partiellement épiphénoménaux. Il faut dire qu'ils sont fort délicats à obtenir et que de nombreux paramètres y interfèrent. Certaines conditions expérimentales spécifiques renforcent peut-être les oscillations. Qui plus est, ils concernent plus l'individuation des constituants que la structure de leurs assemblages. Mais il valident néanmoins une idée directrice. Même si on simplifie et idéalise celle-ci outrancièrement, elle conduit, comme cela a été le cas avec les réseaux de neurones formels, à des problèmes mathématiques d'une grande difficulté.

En ce qui concerne la modélisation, on montre d'abord que des colonnes corticales peuvent effectivement fonctionner comme des oscillateurs élémentaires. Elles sont constituées d'un grand nombre de neurones excitateurs et inhibiteurs. En moyennant sur ces deux groupes les équations standard des réseaux de neurones, on obtient un système de deux équations (équations de Wilson-Cowan). On montre alors que l'état d'équilibre subit une bifurcation de Hopf lorsque l'intensité du stimulus dépasse un certain seuil.

Ceci dit, le choix des types d'oscillateurs pose lui même un problème complexe. Il existe en effet au moins 3 types différents d'oscillateurs.

1. les oscillateurs harmoniques et leurs variantes (cycles limites uniformes);
2. les cycles d'hystérésis apparaissant dans les systèmes lents/rapides dont la variété lente a une forme normale cubique (cycles de Van der Pol);
3. les cycles limites avec saut discontinu de type firing (décharge).

D'autre part, le choix des formes de couplage présente également des alternatives. A côté des couplages de type *sinus* des différences de phases, il y a des modèles (Mirollo, Strogatz, Kuramoto, 1991) où l'on couple les oscillateurs par des pulses. D'autres modèles de synchronisation ont été proposés, comme les "synfire chains" d'Abeles et Bienenstock (ondes de synchronisation le long de chaînes séquentielles).

3. Modèles d'oscillateurs

Quoi qu'il en soit, la simplification maximale conduit à étudier des réseaux constitués d'un grand nombre N d'oscillateurs F_i dont la fréquence propre ω_i dépend de l'intensité du stimulus à la position i . Soient θ_i leurs phases et $\varphi_i = \theta_{i+1} - \theta_i$ leurs différences de phases. Les équations du système sont du type :

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - H(\varphi_1, \dots, \varphi_{N-1}).$$

Les systèmes les plus courants sont du type :

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \sum_{j=1}^{j=N} K_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

où les K_{ij} sont des constantes de couplage. Ce sont des systèmes typiquement complexes que l'on peut étudier avec des méthodes de physique statistique (travaux de Kuramoto, Daido, etc.) et de dynamique qualitative (travaux d'Ermentrout et Kopell, etc.).

Dans le cas d'une seule constante de couplage et d'une totale connectivité, Y. Kuramoto (1987) a analysé en détail le système :

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \frac{K}{N} \sum_{j=1}^{j=N} \sin(\theta_i - \theta_j).$$

Pour ce faire, il a introduit le *paramètre d'ordre* qu'est la phase moyenne :

$$Z(t) = |Z(t)| e^{i\theta_0(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j(t)}$$

et a étudié le système équivalent:

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - K |Z| \sin(\theta_i - \theta_0) .$$

Si les fréquences ω_i sont tirées au hasard suivant une loi $g(\omega)$ représentant les régularités statistiques de l'environnement (en prenant un repère tournant on peut supposer g centrée sur 0), la synchronisation globale est une *transition de phase* s'effectuant pour la valeur critique $K_c = 2/\pi g(0)$ de la constante de couplage.

Pour le montrer, Kuramoto cherche d'abord des solutions $Z = \text{constante}$. Après avoir classé les oscillateurs en deux groupes:

- (i) le S -groupe des oscillateurs pouvant se synchroniser i.e. satisfaisant

$$\dot{\theta}_i = 0 \text{ et donc } \left| \frac{\omega_i}{KZ} \right| \leq 1$$

- (ii) le D -groupe des oscillateurs ne le pouvant pas parce que

$$\left| \frac{\omega_i}{KZ} \right| > 1 ,$$

il montre que seul le S -groupe intervient dans la synchronisation.

En écrivant que

$$Z = \int_0^{2\pi} n_0(\theta, t) e^{i\theta} d\theta$$

où $n_0(\theta, t)$ est la distribution des phases à l'équilibre au temps t et en écrivant que

$$n_0(\theta, t) d\theta = g(\omega) d\omega \text{ avec } \omega = K |Z| \sin(\theta - \theta_0),$$

il obtient une équation d'auto-consistance $Z = S(Z)$ qu'il développe au voisinage de $Z = 0$. D'où l'équation (qui est une forme normale):

$$\varepsilon Z - \beta |Z|^2 Z = 0$$

$$\text{avec } \varepsilon = \frac{K - K_c}{K_c} , \beta = -\frac{\pi}{16} K_c^3 g''(0).$$

L'analyse de la stabilité des solutions montre que la solution $Z=0$, qui est stable pour $K \approx 0$ (oscillateurs découplés), devient instable à la traversée de $Z=Z_c$.

Kuramoto établit ensuite, sous une hypothèse de quasi-adiabaticité, l'évolution (lente) du paramètre d'ordre Z . Elle est régie par une équation du type :

$$\xi \frac{dZ}{dt} |KZ|^{-1} = \varepsilon Z - \beta |Z|^2 Z .$$

(qui est une version simplifiée, sans diffusion spatiale, du modèle de Coulet évoqué plus haut). Il étudie ensuite les *fluctuations*, en particulier au voisinage du point critique lorsqu'elles deviennent géantes et entraînent la transition de phase.

Ces résultats montrent que la synchronisation est un phénomène typique d'organisation collective émergente.

Une fois mieux comprises les propriétés de synchronisation de tels systèmes d'oscillateurs, on peut construire, sur la base de la "labeling hypothesis", des modèles de fonctions cognitives de haut niveau. Par exemple Erik Lumer (1992) a proposé une

théorie du processus d'*attention* permettant de se focaliser sur un constituant d'une scène perceptive. Elle consiste à extraire la phase d'un groupe synchronisé au moyen d'un "phase tracker" et à l'utiliser comme label.

BIBLIOGRAPHIE

ALVAREZ, L., LIONS, P.L., MOREL, J.M., 1992. "Image selective smoothing and edge detection by non linear diffusion", *SIAM J. Numer. Anal.*, 29 : 845-866.

ATIYA, A., BALDI, P., 1989. "Oscillations and Synchronisation in Neural Networks: an Exploration of the Labeling Hypothesis", *International Journal of Neural Systems*, 1, 2 : 103-124.

BOSKING, W., ZHANG, Y., SCHOFIELD, B., FITZPATRICK, D., 1997. "Orientation Selectivity and the Arrangement of Horizontal Connections in Tree Shrew Striate Cortex", *Journal of Neuroscience*, 17(6) (1997) 2112-2127.

COULLET, P., EMILSSON, K., 1992. "Strong resonances of spatially distributed oscillators : a laboratory to study patterns and defects", *Physica D*, 61 : 119-131.

DE ANGELIS G.C., OZHAWA I., FREEMAN R.D., 1995. "Receptive-field dynamics in the central visual pathways", *Trends in Neuroscience*, 18(10) (1995) 451-458.

DE KEPPEL, P. *et al.* 1998. "Taches, rayures et labyrinthes", *La Recherche*, 305, 84-87.

ENGEL, A., KÖNIG, P., GRAY, C., SINGER, W., 1992. "Temporal Coding by Coherent Oscillations as a Potential Solution to the Binding Problem: Physiological Evidence", *Non Linear Dynamics and Neural Networks* (H. Schuster ed.), Berlin : Springer.

KANIZSA G. (1979), *Organization in Vision : Essays on Visual Perception*, Praeger.

KOPELL, N., ERMENTROUT, G., B. 1990. "Phase Transitions and Other Phenomena in Chains of Coupled Oscillators", *SIAM J. Appl. Math.*, 50, 4 : 1014-1052.

KURAMOTO, Y., NISHIKAWA, I., 1987. "Statistical Macrodynamics of Large Dynamical Systems. Case of a Phase Transition in Oscillator Communities", *Journal of Statistical Physics*, 49, 3/4, 569-605.

LUMER, E. D., HUBERMAN, B. A., 1992. "Binding Hierarchies: A Basis for Dynamic Perceptual Grouping", *Neural Computation*, 4, 341-355.

MARR, D., 1982. *Vision*. San Francisco : Freeman.

Meinhardt, H., 1995. *The Algorithmic Beauty of Seashells*, Berlin, Springer.

PETITOT, J., 1985. *Morphogenèse du Sens. Pour un Schématisme de la Structure*, Presses Universitaires de France, Paris.

PETITOT, J., 1986. "Structure", *Encyclopedic Dictionary of Semiotics*, (Th. Sebeok ed.), II, 991-1022, Berlin, Mouton de Gruyter.

PETITOT, J., 1989. "Forme", *Encyclopaedia Universalis*, XI, 712-728, Paris.

- PETITOT, J., 1990. "Le Physique, le Morphologique, le Symbolique. Remarques sur la Vision", *Revue de Synthèse*, 1-2 : 139-183.
- PETITOT, J., 1992. *Physique du Sens*. Paris : Editions du CNRS.
- PETITOT, J. 1999. Morphological Eidetics for a Phenomenology of Perception, *Naturalizing Phenomenology: Issues in Contemporary Phenomenology and Cognitive Science*, (J. Petitot, F. J. Varela, J.-M. Roy, B. Pachoud, eds.), Stanford University Press.
- THOM, R., 1972. *Stabilité Structurelle et Morphogenèse*, New York, Benjamin, Paris, Édiscience.
- THOM, R., 1980. *Modèles mathématiques de la Morphogenèse*, Paris, Christian Bourgois.
- THOM, R., 1988. *Esquisse d'une Sémiophysique*, Paris, InterEditions.
- TONDUT Y., PETITOT J. (1997), *Géométrie de contact et Champ d'association dans le cortex visuel*, Rapport n° 9725, CREA, Ecole Polytechnique, Paris.
- TURING, A., 1952. "The Chemical Basis of Morphogenesis", *Collected Works*, 4, 1-36, North-Holland, 1992.