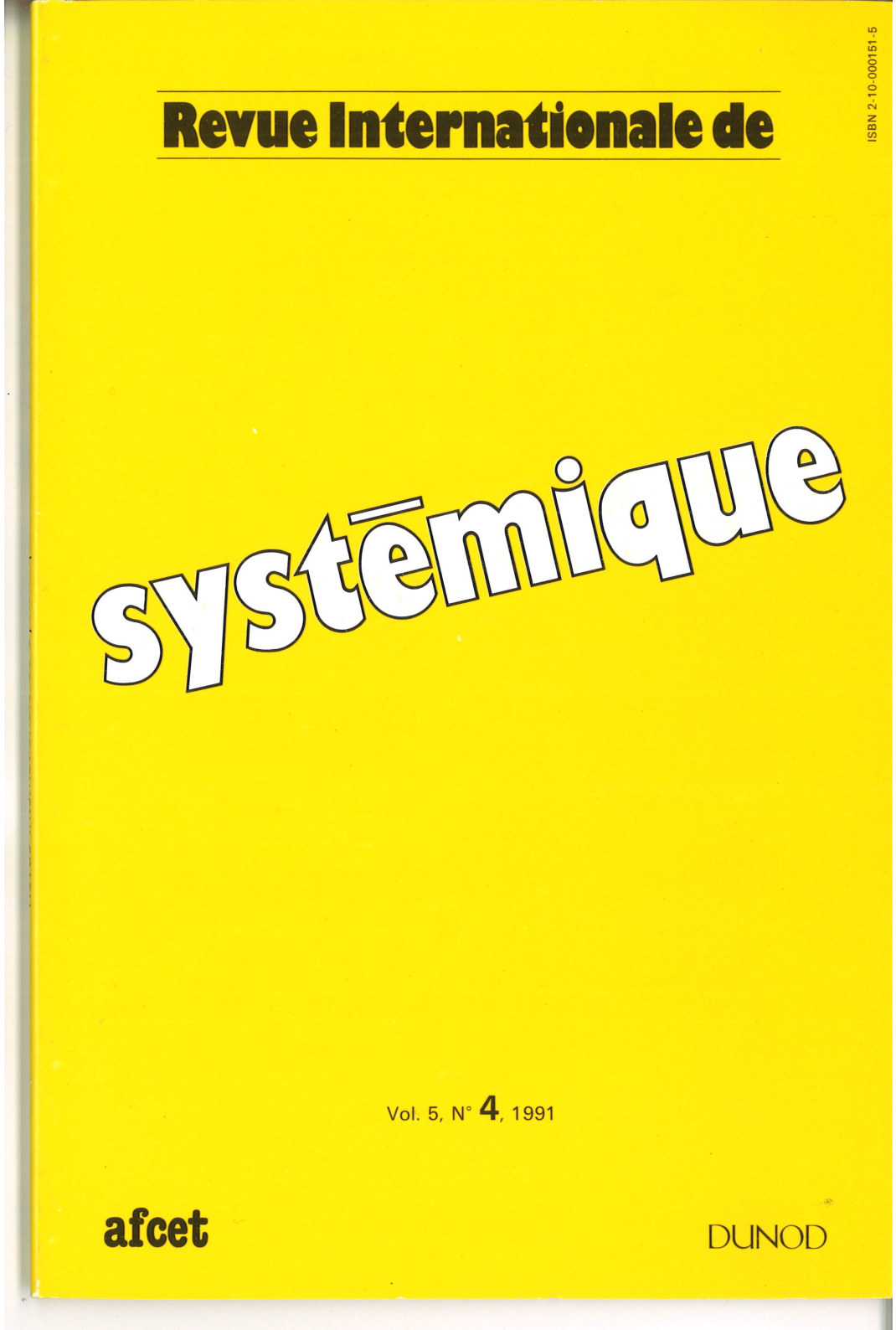

AFSCET

Revue Internationale de systémique

Revue Internationale de Sytémique

volume 05, numéro 4, page 435 - 469, 1991

Utilisation de la logique dynamique du contradictoire pour formaliser les systèmes : vers un paradigme ondulatoire en biologie ?

Bernard Dugué

Numérisation Afscet, août 2017.

Creative Commons

[3] A. PICHOT, Délimitation d'un système: le cas de l'être vivant, 1er *Colloque* Européen de Systémique, Lausanne, oct. 1989, Actes édités par l'*AFCET*.

[4] A. PICHOT, The strange object of biology, *Fund. Sci.*, vol. 8, n° 1, 1987.

[5] A. PICHOT, L'explication historique en biologie, Actes du *VIe Séminaire* de Biologie Théorique de Solignac (sous la dir. de A. Kretzschmar), *Ed. du CNRS*, Paris, 1988.

[6] A. PICHOT, Physico-chimie, biologie, information et connaissance, *Actes du IXe Séminaire* de Biologie Théorique de Solignac (sous la dir. de P. Cruiziat) à paraître dans *Acta Biotheo.*, (Leiden, Pays-Bas).

[7] P. VENDRYES, Vie et Probabilité, *Albin-Michel*, Paris 1942; L'autonomie de l'être vivant, *Maloine*, Paris, 1981.

[8] A. PICHOT, L'être vivant et son milieu extérieur, errance et lieu naturel, *VIIIe Séminaire* de Biologie Théorique de Solignac, 1988, Actes à paraître aux *Ed. du CNRS* (sous la direction de H. Vérine).

[9] A. PICHOT, Éléments pour une théorie de la biologie, *Maloine*, Paris, 1980.

[10] J. VON UEXKÜLL, Mondes animaux et monde humain. Théorie de la signification (1934 et 1940), (traduction Ph. Muller), *Gonthier*, Paris, 1965.

[11] K. GOLDSTEIN, La structure de l'organisme (1934), (traduction E. Burckhardt et J. Kuntz), *Gallimard*, Paris, 1951 et 1983.

[12] V. VON WEIZSAECKER, Le cycle de la structure (1939), (traduction M. Foucault et D. Rocher), *Desclée de Brouwer*, Paris, 1958.

[13] M. MERLEAU-PONTY, La structure du comportement, *P.U.F.*, Paris, 1942.

[14] M. MERLEAU-PONTY, Phénoménologie de la perception, *Gallimard*, Paris, 1945.

[15] A. PICHOT, Petite phénoménologie de la connaissance, *Aubier*, Paris, 1991.

REVUE INTERNATIONALE DE SYSTÉMIQUE
Vol. 5, N° 4, 1991, pp. 435 à 469

UTILISATION DE LA LOGIQUE DYNAMIQUE DU CONTRADICTOIRE POUR FORMALISER LES SYSTÈMES: VERS UN PARADIGME ONDULATOIRE EN BIOLOGIE?

Bernard DUGUÉ[1]

Institut de Biologie Cellulaire et Neurochimie du CNRS

Résumé

En nous basant sur la logique dynamique du contradictoire, élaborée par Stéphane Lupasco, nous montrons qu'une unité de description pourrait être envisageable pour de nombreux systèmes, et en particulier pour les systèmes vivants. Cet article se décompose de la manière suivante: le paragraphe 1 donne un aperçu de la logique dynamique du contradictoire, le paragraphe 2 montre ses convergences avec les philosophies ancrées dans la métaphysique, le paragraphe 3 propose une description des systèmes comme un ensemble de réseaux interactifs, le paragraphe 4 décrit la dynamique associée aux systèmes et leur mode d'interaction, le paragraphe 5 montre quelques illustrations du formalisme à partir de modèles expérimentaux en biologie et physiologie, le paragraphe 6 résume le formalisme ondulatoire par une série d'énoncés.

Abstract

We show it may be possible to describe any system by using the dynamics logics, named logics of contradictory statements, and elaborated by the philosopher Stéphane Lupasco. This paper (1) summarises this logics, (2) shows how it is correlated to metaphysics, (3) propose to describe living systems as multiinteracting networks, (4) intends to give an explanation to the dynamics expressed by living systems and how they interact, (5) gives some evidences of such model, (6) gives a number of rules leading to a "undulatory model".

Introduction: logique du problème et problème de logique

Depuis toujours, les sciences biologiques se sont heurtées aux problèmes de la complexité, tandis que les sciences physiques ont su se doter d'un

1. A 70, Résidence Crespy, avenue Lasserre, 33400 Talence, France.

Rev. intern. systémique. 0980-1472 Vol. 5/91/04/ 435 /35/$ 5.50/© Afcet Gauthier-Villars

ensemble de formalismes mathématiques possédant une forte valeur descriptive et prédictive.

Deux démarches apparemment opposées et contradictoires ont été adoptées pour décrire les systèmes vivants.

(i) Certaines démarches, qualifiées d'analytiques/réductionnistes, sont basées sur une logique non contradictoire, et ont été développées depuis la renaissance, en adoptant une vision mécaniste d'inspiration cartésienne et ancrée dans une causalité linéaire, basée sur l'idée du déterminisme laplacien. (ii) D'autres démarches sont qualifiées d'holistes et se proposent de décrire les systèmes de manière globale, en négligeant l'articulation de leurs éléments.

Si en sciences sociales, les deux conceptions, analytique/individualiste et holiste sont d'importance équivalentes, (Bunge, 1988), en biologie, on peut affirmer que les démarches analytiques ont pris le dessus en raison notamment des succès remportés par la biologie moléculaire, sans pour autant que le conflit entre paradigmes holistes et réductionnistes soit résolu.

En effet, les conceptions analytiques sont souvent incapables de rendre compte de l'émergence de propriétés nouvelles issues de l'interaction entre éléments, et en particulier l'émergence de la vie ainsi que des problèmes associés aux phénomènes de morphogenèse.

Aussi, des modèles holistes ont été développés et ont rencontré un certain succès, comme par exemple la théorie des catastrophes en tant que modèle mathématique de la morphogénèse (Thom, 1987), ou bien les modèles holographiques en neurosciences, (Tabary, 1987), néanmoins, le lien entre ces modèles et les résultats expérimentaux pose des problèmes, peut-être à cause de l'insuffisance de modèles intermédiaires permettant de relier les observations expérimentales et ces modèles généraux.

Notre point de départ sera d'envisager la construction d'un modèle qualitatif permettant de décrire les systèmes compliqués, d'y introduire des concepts holistes, et de décrire les structures vivantes à partir de résultats expérimentaux; pour cela, on s'interrogera sur la possibilité d'utiliser une logique non classique.

Le début du xx^{e} siècle a vu l'émergence de la mécanique ondulatoire, qui se traduit par la double identité de la matière; tantôt onde, tantôt corpuscule. Ce comportement ambivalent de la particule semble échapper à une « description purement aristotélicienne », et a suscité de nombreuses interprétations. Certains ont tenté d'intégrer la particule dans une logique cartésienne, d'autres plus audacieux, envisagent d'insérer la conscience dans les futurs développements des théories quantiques (Chew, 1968; Stapp, 1983; Penrose, 1989); par ailleurs, le philosophe Lupasco a construit une logique « non

aristotélicienne » qui fait appel à un troisième terme, et permet de rendre compte des phénomènes quantiques.

De plus, la possibilité d'un déterminisme absolu laplacien a été remise en cause par le formalisme probabiliste quantique, cette remise en cause du déterminisme classique concerne également la physique macroscopique, depuis la formalisation des phénomènes chaotiques et l'apparition de concepts tels que bifurcation, structure dissipative, attracteur étrange, fractale.

Parallèlement à cette évolution de la physique, des tendances alternatives ont surgi en biologie, psychologie et sciences sociales et proposent un nouveau mode de description des systèmes complexes. Ces démarches nouvelles ont été regroupées sous l'étiquette de « systémiques »; elles ont pour point commun d'admettre qu'il existe des phénomènes qu'on ne peut actuellement comprendre par décomposition analytique. La systémique a été définie comme une troisième voie permettant de concilier réductionnisme et holisme, (Bunge, 1988).

Par ailleurs, on a considéré la systémique comme « un état d'esprit refusant d'enfermer la description d'un système dans un cadre logique défini », (Tabary, 1987). Peut-on en conclure qu'il serait vain de tenter une formalisation généralisable à tous les systèmes, face à l'impossibilité de les décrire d'une manière logique, ou bien affirmer (Laszlo, 1988): « Nous avons des raisons de penser qu'il existe des processus logiques et harmonieux qui sous-tendent l'évolution de la complexité dans l'univers... et nous pouvons espérer un jour proposer un paradigme ultime permettant de relier l'ensemble des connaissances ».

Nous adoptons ce deuxième point de vue et proposons de construire un modèle qui pourrait conduire à une unité de description des systèmes. On sait en effet que démarches analytiques et logique classique ne peuvent être associées pour décrire les systèmes compliqués, nous proposons comme point de départ pour notre étude l'hypothèse suivante: il existe une autre logique susceptible de rendre compte de la dynamique des systèmes et supposons qu'une formalisation de tout système peut être envisagée si l'on passe de la non-contradiction de la logique classique, à une formalisation par la logique du contradictoire qui permet dans les sciences de l'autonomie d'envisager une formalisation rigoureuse ancrée dans une logique à trois termes qui est associée à des propriétés de récursivité. (Le Moigne, 1983).

1. La logique dynamique du contradictoire

Le philosophe Lupasco a développé une logique d'un type nouveau, suite à une réflexion approfondie, d'une part sur la nature contradictoire de l'espace

et du temps révélée par la théorie de la relativité générale d'Einstein; et d'autre part, les résultats troublants de la physique quantique, et en particulier l'existence d'une dualité onde/corpuscule, le principe d'incertitude d'Heisenberg, et le principe d'exclusion de Pauli.

Si Lupasco souligne que les concepts classiques d'espace et de temps ne sont pas adaptés à la description des systèmes naturels, il prolonge son raisonnement en proposant le concept « d'espace-temps de systématisation » pour décrire les systèmes de systèmes, avec l'introduction de la notion de rythme interne; de plus cette logique constitue une grille de lecture pour des phénomènes autres que ceux décrits par la physique quantique (Lupasco, 1951; 1987). Il s'agit en fait d'une formalisation axiomatique d'une logique de l'antagonisme, et nous allons en résumer les points principaux à partir de l'ouvrage de référence : « Le principe d'antagonisme et la logique de l'énergie » (Lupasco, 1951).

1.1. *Les axiomes de base à partir des concepts d'actualisation et de potentialisation*

Ces deux concepts sont à la base de la logique dynamique du contradictoire, et conduisent à la formulation des axiomes de base énoncés par Lupasco :

– Pour tout élément/événement, *e*, il existe un non-élément/non-événement, non-*e* ou $\bar{e}$, qui lui est fonctionnellement et structurellement associé.

– La conjugaison dynamique se formule de la manière suivante : lorsque *e* s'actualise, *e* ne disparaît jamais complètement mais se potentialise. Ainsi, toute actualisation de l'un entraîne la potentialisation de l'autre.

– Il existe deux états : actuel et potentiel, auxquels s'ajoute un état intermédiaire, l'état T, qui correspond à une non-actualisation/non-potentialisation; on peut dire également semi-actualisation/semi-potentialisation.

– Ainsi, *e*, en passant d'un état actuel à un état potentiel, transite nécessairement par un état T, non-actuel/non-potentiel.

– On peut définir, à partir de l'opérateur logique d'implication, $\supset$, une suite d'implications contradictionnelles et réciproques de base :

$$E_a \supset \bar{E}_p,\ \bar{E}_a \supset E_p,\ \bar{E}_t \supset E_t,\ E_p \supset \bar{E}_a,\ \bar{E}_p \supset E_a,\ E_t \supset \bar{E}_t.$$

Ces énoncés peuvent être exprimés par l'axiome suivant :

Tout événement représente une dynamique à laquelle est nécessairement associée une dynamique contradictoire, si bien qu'à toute actualisation dynamique d'un événement, E, est associée une potentialisation dynamique du non-événement, $\bar{E}$.

Ces énoncés de base définissent les lois fondamentales de l'énergie et sont appelés principes d'antagonisme. De plus, lors d'actualisations et potentialisations respectives des vecteurs logiques antagonistes, une non-contradiction relative se développe, sans pour cela devenir infinie; l'actualisation à l'infini correspondant à un cas limite, qui correspond à la logique classique, basée sur la notion de vrai et de faux.

L'exemple le plus significatif souligné par Lupasco pour illustrer sa logique est l'une des relations d'incertitude d'Heisenberg, qui montre que lorsque la position de la particule P se précise, (s'actualise), la quantité de mouvement, Q, s'indétermine, (se potentialise); ce qui peut s'écrire :

$$P_a \supset Q_p, \text{ ou bien, dans le cas inverse, } Q_a \supset P_p$$

Ainsi, position et quantité de mouvement de la particule sont dynamiquement et contradictoirement conjuguées dans le formalisme quantique.

1.2. *Principe d'identité et de diversité*

Les énoncés précédents permettent de déduire une conjugaison contradictoire et dynamique des opérateurs logiques d'identité, I, et de diversité, D, qui s'opposent mutuellement.

Ainsi, si l'on considère deux éléments, A et B, il existe entre eux un lien, (lien positif), si l'opérateur d'identité qui les lie s'actualise, et si l'opérateur de diversité, par conséquent, se potentialise, (I_a et D_p). Inversement, il existe une différence, un non-lien, (lien négatif), entre A et B, si l'opérateur, I se potentialise, et par conséquent, D, s'actualise, (D_a et I_p); de plus, en vertu de l'existence de l'état T, il existe une troisième possibilité, de non-actualisation/non-potentialisation des opérateurs, (I_t et D_t).

1.3. *La logique des opérations pures et les tables de déduction*

Dans les énoncés précédents, l'opérateur d'implication, était considéré comme absolu, or, l'exigence d'autocohérence de cette logique conduit à considérer également un opérateur de non implication, ou implication négative, notée $\bar{\supset}$. Ainsi, les opérateurs $\supset$ et $\bar{\supset}$ seront contradictoirement et dynamiquement conjugués, si bien qu'à une actualisation dynamique de l'implication positive est associée une potentialisation de l'implication négative :

$$(\supset_a) \supset (\bar{\supset}_p) \text{ ou } (\bar{\supset}_a) \supset (\supset_p)$$

Une implication, par le fait qu'elle implique elle-même une implication contradictoire, et qu'elle ne peut s'actualiser à l'infini, se développe ainsi en

une suite transfinie, (transfini étant pris au sens étymologique du terme, c'est-à-dire fini auquel on peut toujours rajouter un élément). Ainsi, par arborescences successives, on peut envisager un développement transfini des implications logiques, dénommées orthodéductions ou paradéductions. Trois types d'orthodéductions sont possibles, elles correspondent à, (i), une actualisation progressive de l'implication positive, (ii), à une actualisation progressive de l'implication négative, (iii), à une actualisation progressive de l'implication contradictoire régie par l'état T.

Les paradéductions sont dites « anormales » et correspondent à des développements non ordonnés des implications positives et négatives.

A partir de ces trois orthodéductions, Lupasco envisage le développement de trois types de matières.

1. L'orthodéduction positive/identifiante constitue la causalité de la matière physique et des théories classiques. Elle est responsable de la tendance exprimée par la matière à évoluer vers l'état le plus homogène possible.

2. L'orthodéduction négative/diversifiante illustre la tendance de la matière à évoluer vers un état le plus hétérogène possible, elle constitue donc la structure de la causalité des systèmes vivants, dont on constate la très grande diversité. Par ailleurs, les particules de spin demi-entier, et notamment les électrons se soumettent au principe d'exclusion de Pauli, et sont soumis à une logique diversifiante, ainsi, Lupasco relie la diversité des systèmes vivants au principe d'exclusion auquel soumettent les électrons, (à ce sujet, consulter l'ouvrage de Lupasco, l'énergie et la matière vivante).

3. L'orthodéduction contradictionnelle correspond à un développement des deux implications semi-actualisées/semi-potentialisées; Elle est à l'origine selon Lupasco d'une troisième matière appelée matière quantique ou psychique, mais également, de la conscience de la conscience.

L'intérêt de cette logique est de concevoir les systèmes comme un ensemble de processus interreliés, et donc de pouvoir accéder à une formalisation logique des systèmes compliqués et d'introduire une structure arborescente, (Lupasco et d'autres ont utilisé la notion de « système de systèmes »), elle permet de plus, de concevoir un système dans son environnement, ce qui présente un intérêt du point de vue de la formalisation car il est manifestement illusoire, tant d'un point de vue expérimental que logique, de concevoir un système isolé.

Enfin, point essentiel pour nous, la logique de Lupasco peut être corrélée aux philosophies métaphysiques, et donc permet de construire une formalisation des systèmes ancrée dans la métaphysique.

2. Liens avec les philosophies d'inspiration métaphysique

2.1. *Logique du contradictoire et philosophies orientales*

Pour développer notre argumentation, nous nous baserons sur l'œuvre imposante d'Aurobindo, dont une synthèse a été publiée sous le titre, *Métaphysique et psychologie.*

2.1.1. La nature contradictoire de la réalité

Lupasco a proposé une nature contradictoire de la réalité, engendrée par une opposition dynamique de deux vecteurs logiques; cette opposition étant équilibrée par l'existence d'un état intermédiaire, l'état T. Or dans la métaphysique d'Aurobindo, il est aussi question d'un jeu mutuel d'existence/équilibrage entre couples d'opposés tels le positif et le négatif, l'unité et la diversité, qui existent l'un par rapport à l'autre et se complètent pour fournir une vision totale :

« La raison humaine a tort d'attacher une valeur distincte et définitive à chaque contradiction prise isolément, ou de se débarrasser de l'une par la négation de l'autre; mais elle a raison de refuser d'accepter comme final, comme dernier mot, les couples d'opposés qui n'ont aucunement été conciliés, ou encore qui n'ont pas trouvé leur source et leur signification en quelque chose qui est par delà leur opposition. » (Aurobindo)

En d'autres termes, la réalité procède par jeux mutuels des forces antagonistes, positif/négatif, unité/diversité, équilibrés par un principe intégrateur qui est au-delà de leur opposition, de même que le principe T de Lupasco équilibre l'actuel et le potentiel, l'identique et le différent.

2.1.2. Les trois modes d'énergie

Les philosophies orientales ont identifié trois modes d'énergie nommés gunas : tamas, rajas, sattva.

La nature tamasique repousse tout ce qui est nouveau, son seul pouvoir est sa faculté de répétition pratique; la nature rajasique peut être double : soit elle est défensive et affirme son individualité face aux différences, à ce qui lui est contraire, soit elle est avide et enthousiaste de choses nouvelles; la nature sattvique est ouverte à la connaissance, et habile à produire des constructions harmonieuses.

Ainsi, le principe tamasique répond à une logique de l'identité, il représente le lieu de dissolution de ce qui est créé par ailleurs, grâce à son pouvoir homogénéisant. Il gouverne donc le comportement de la matière physique, et pourrait être équivalent, dans la science occidentale, au principe de moindre action qui régit le mouvement inertiel des corps. Le principe rajasique répond à une logique de diversification, affirme et défend son individualité, de même

qu'un électron, obéissant au principe de Pauli, affirme son individualité en excluant un autre électron de l'état quantique dans lequel il se trouve. Il peut être associé aux othodéductions négatives/diversifiantes de Lupasco.

Le principe sattvique répond à une logique de l'équilibre, c'est lui qui concilie et qui harmonise le jeu antagoniste des forces homogénéisantes et diversifiantes, il rejoint l'état T, et pourrait être associé à un développement contradictoire semi-actuel/semi-potentiel, des deux vecteurs logiques.

Pour résumer, tamas, rajas, et sattva constituent trois principes/modes d'énergie que l'on peut corréler aux trois types d'orthodéductions de la logique dynamique du contradictoire.

2.1.3. Involution et évolution

Les systémes philosophiques orientaux postulent l'existence de deux dynamiques opposées et contradictoires, l'involution et son action inverse qui est l'évolution.

La possibilité d'évolution d'un systéme est étroitement lié à la nécessité d'une évolution préalable, et de plus, est posée une gradation au niveau des étapes d'involution: «l'évolution est une action inverse de l'involution. Ce qui dans l'involution est le degré ultime, est le premier à apparaître dans l'évolution. Ce qui dans l'involution était originel et venait en premier, est dans l'évolution l'émergence finale et suprême.» Ces concepts sont à rapprocher: (i) de ceux d'ordre implié et ordre déplié introduits par le physicien Bohm, qui postule l'existence d'étapes d'enveloppement et de développement, (Bohm, 1987); (ii) et bien entendu des concepts de potentialisation et d'actualisation postulés par Lupasco.

2.2. *Lien avec les systèmes philosophiques occidentaux*

Le philosophe et théologien du XV^e^ siècle, Nicolas de Cues, propose un système philosophique basé sur une dialectique ternaire, et postule l'unité absolue de couples d'oppositions, unité/diversité, acte/puissance, repos/mouvement, en formulant le principe de la coincidence des opposés «*coincidentia oppositorum*».

Ce principe prend son sens à travers le couple d'opposés *complicatio/explicatio* qui traduisent deux modalités essentielles de l'être, enveloppé et développé, dont l'unité profonde, est régie par un troisième terme, la *copulatio*, (Gandillac, 1942).

Ce troisième terme permet une synthèse qui en dépassant simultanément les termes opposés, les unit l'un à l'autre, et en même temps les nie, ce qui sera formulé plus tard par Hegel avec le concept «d'aufhebung», et rejoint en ce sens l'état T, troisième terme défini par Lupasco. De plus, le couple

actualisation/potentialisation peut être associé au couple *explicatio/complicatio* de Nicolas de Cues mais aussi au couple acte/puissance d'Aristote.

Par ailleurs, ce principe d'union des contraires a été utilisé par d'autres philosophes tels que Hegel, mais aussi Platon qui postule un principe organisateur qui maintient l'équilibre des contraires dans les systèmes vivants, ce principe étant par ailleurs invoqués dans la plupart des métaphysiques orientales.

2.3. *Épilogue*

Selon Heidegger, la métaphysique demeure l'élément premier de la philosophie qui représente un arbre qui croît du sol nourissier de la métaphysique, or, la philosophie de Lupasco apparaît comme ancrée dans la métaphysique, et il semble légitime d'utiliser ses concepts afin de construire un modèle décrivant les systèmes vivants, et susceptible de les interpréter dans leur essence.

En effet, Heidegger affirmait que l'enracinement des sciences dans leurs fondements essentiel comme bel et bien mort, or, utiliser une philosophie ancrée dans la métaphysique pour décrire les systèmes vivants n'est-ce point tenter de réimplanter la biologie dans ses fondements, (Heidegger, 1990), on sait en effet qu'un courant métaphysique (une simple fluctuation pour l'instant...) émerge actuellement dans les sciences de la nature, physique et à un degré moindre biologie, mais aussi dans les sciences de l'homme, (Wilber, 1986), et nous affirmons qu'il est envisageable et nécessaire de fonder une théorie des systèmes ancrée dans la métaphysique.

Par ailleurs, la logique de Lupasco, basée sur une dynamique de vecteurs logiques contradictoires, rejoint la systémique ago-antagoniste présentée comme «une version dynamique des couples d'opposition ne posant pas la primauté du biologique», (Bernard-Weil, 1988). Ainsi, la systémique ago-antagoniste, utilisée comme formalisme pour le discours psychanalytique, et reconnue par Bernard-Weil chez plusieurs philosophes et théologiens, est de nature à légitimer notre approche systémique à partir de la logique de Lupasco, que l'on peut considérer comme ancrée dans la métaphysique et la théologie.

Lupasco a toujours insisté sur la nécessité d'élaborer un formalisme nouveau pour comprendre la réalité profonde des systèmes, mais sa tentative n'a abouti que partiellement; nous venons de montrer par ailleurs que ses axiomes logiques sont corrélés avec de nombreuses philosophies métaphysiques, aussi, notre but sera d'établir les fondements d'une nouvelle conception des systèmes en nous inspirant de ces axiomes, et donc de construire un formalisme original en élaborant dans un premier temps un modèle destiné à décrire les systèmes

vivants, le lien avec la métaphysique ne sera qu'indirect et sera explicité lors de travaux ultérieurs.

3. Architecture des systèmes

3.1. *Notion de système*

Nous proposons la définition suivante: Toute singularité spatiotemporelle suffisamment stable pour être observée, soit directement avec les sens, soit indirectement à l'aide d'instruments sera qualifiée de système de la nature, car il existe également des systèmes théoriques, construits par la raison humaine.

De plus, nous savons qu'un système est nécessairement composé d'éléments qui interagissent entre eux, et qui peuvent être eux aussi des systèmes, aussi le terme de système sera employé pour désigner l'entité étudiée, tandis que le terme élément ou composant sera utilisé pour désigner les parties dont est constitué le système.

D'une manière générale, le niveau de description conditionne l'utilisation des termes, car une entité qui peut être un système dans un contexte, peut devenir, si l'on élargit le cadre de la description un élément, sous-système dans un système qui l'englobe.

3.2. *Classification des systèmes/éléments*

Une classification des systèmes ou éléments s'impose naturellement, et même si elle n'est pas utilisée dans l'immédiat, d'une part, elle s'impose d'un point de vue logique comme démarche première en systémique, d'autre part, elle permet de rendre compte de la réalité systémique dans le cas ou les systèmes en questions sont composés d'éléments variés, tant par la structure que par le niveau hiérarchique de complication, et donc, il est nécessaire d'effectuer un classement, et de commencer par la systématique, avant de poursuivre par la systémique.

Les opérateurs d'identité et de diversité sont utilisés pour classer les éléments/systèmes, et nous postulons que des éléments appartiennent à une même classe s'il existe un lien d'identité suffisamment fort pour les relier, en considérant leur structure et/ou leur fonction.

Inversement, deux éléments n'appartiennent pas à la même classe, s'il existe un non-lien suffisamment fort pour les différencier.

Un archétype sera défini comme le représentant d'une classe d'éléments. Cette définition peut être enrichie par celle formulée par Wilber pour décrire

le développement des niveaux de conscience. Une structure profonde correspond à la définition d'un niveau, et inclut à la fois les formes permises par ce niveau, et ses limites. Une structure de surface correspond à une manifestation particulière de la structure profonde, limitée toutefois par la forme de cette structure profonde, (Wilber, 1979). Ainsi, un système appartient à une classe s'il est une manifestation particulière d'un archétype, (lien d'identification), en restant toutefois à l'intérieur des limites permises par la définition de l'archétype, (lien d'exclusion/non-lien).

Ces définitions sont suffisamment souples pour décrire un système en classant ses éléments, et, selon la problématique envisagée, un choix donné d'archétypes pourra être utilisé. Par ailleurs, elles permettent de définir des classes par arborescences successives, construites en augmentant le degré de définition des archétypes. Par exemple, pour une cellule, on peut définir la séquence suivante: macromolécule, protéine, enzyme, enzyme liant l'ATP, kinase, kinase de type C.

3.3. *Couplages entre éléments du système*

Un élément d'un système interagit nécessairement avec d'autres éléments. Un couplage sera défini comme une interaction dynamique entre éléments qui modifient leurs structures. Ces modifications peuvent être mises en évidence expérimentalement ce qui est le cas de molécules modifiées chimiquement par liaison covalente, dans le cas contraire, où deux éléments sont simplement associés on dira qu'il y a également couplage, même si une modification notable ne peut être détectée, comme par exemple lors de certaines interactions entre molécules par liaisons de Van der Waals.

Considérer une association d'éléments comme un couplage et lui associer un échange d'élément repose en fait sur un fondement physique, à savoir qu'une association provient d'une force, et que toute force repose sur un échange de quantums d'interaction.

3.4. *Réseau horizontal*

Un réseau horizontal appartenant à un système sera défini comme: (i), l'ensemble des éléments appartenant à une même classe, définie par un archétype; (ii), l'ensemble des liens qui existent entre les éléments, et correspondant à un couplage. Cette notion de réseau horizontal traduit en fait l'interaction d'éléments de même niveau hiérarchique, et de plus possédant une structure équivalente.

3.5. *Ensembles de réseaux*

Tandis qu'un système physique peut être défini par une seule classe d'éléments, molécules par exemple; un système vivant, de part sa complexité, comprend plusieurs classes d'éléments, de niveaux de complication divers, définies par plusieurs archétypes, par exemple: molécules, macromolécules, structures supramoléculaires, organites, s'il s'agit d'une cellule. Dans ce cas, un système sera décrit par un ensemble de réseaux horizontaux, superposés les uns sur les autres.

Nous définissons les couplages intra-réseaux, entre éléments d'un même réseau; et les couplages inter-réseaux, entre éléments appartenant à deux réseaux différents.

Toute description d'un système peut être conçue en termes d'ensemble de réseaux horizontaux, et de couplages intra et inter-réseaux, l'intérêt essentiel de cette représentation étant de souligner l'ensemble des liens entre éléments, et de visualiser l'interaction possible entre deux éléments qui sont éloignés, et plus précisément, de concevoir la propagation d'une interaction non pas uniquement comme un déplacement d'élément dans le système, mais comme une transduction relayée par un ensemble d'éléments interagissant successivement, ceci en parcourant horizontalement et verticalement les liens intra et inter-réseaux. (Un exemple simplifié est représenté sur la figure 1.)

4. Dynamique associée aux systèmes

4.1. *Phénomènes de couplages*

Nous introduisons ici les concepts logiques de Lupasco, que nous allons transposer d'une manière particulière pour conceptualiser le couplage entre éléments dynamiques d'un système compliqué.

Nous postulons qu'un lien de nature contradictoire existe entre deux éléments couplés, de plus ce lien est de nature dynamique. Ainsi lorsque deux éléments, E et F, interagissent entre eux, l'un est actualisé, alors que l'autre est potentialisé, et réciproquement, c'est-à-dire qu'un double mouvement d'actualisation-potentialisation s'effectue lors d'un couplage. Plus précisément, lorsque E actualise et interagit avec F, il se potentialise dans F, alors que F se potentialise dans E.

Pour l'instant, on ne peut préciser la nature des phénomènes d'actualisation et de potentialisation, aussi, on apportera une nuance liée à la nature relative de ces phénomènes: lors d'un couplage, E devient plus actuel, tandis que F devient plus potentiel, cette considération nous ouvre la possiblité de représenter un ensemble d'éléments dynamiquement couplés: sur la figure 2, l'élément

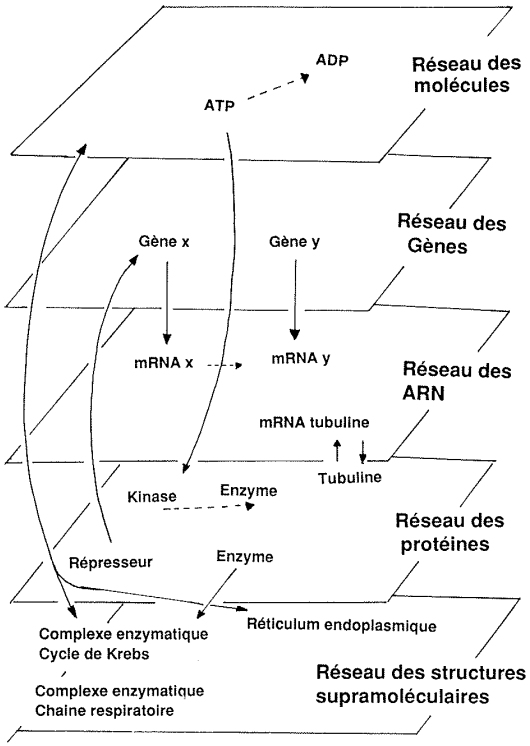

Figure 1. *Exemple de représentation en réseaux d'une cellule, avec quelques éléments: couplages intraréseaux: - - →, couplages interréseaux: →.*

E est considéré comme un objet par rapport à l'élément F, qui appartient à un système compliqué considéré comme sujet dont nous adoptons le point de vue.

Ainsi, tout élément oscille entre deux positions logiques, actuelle et potentielle, et sur la figure 2, pour des raisons de simplification, nous n'avons représenté que la moitié du couplage, l'autre moitié pouvant être envisagée en permutant les concepts logiques actuels et potentiels.

4.2. *Le système vu comme un système de réseaux, étude de l'organisation dynamique interne*

Un système sera examiné d'une part, en considérant ses éléments, nécessairement couplés entre eux, et d'autre part, à travers l'exigence d'autocohérence et d'autonomie associée aux systèmes vivants.

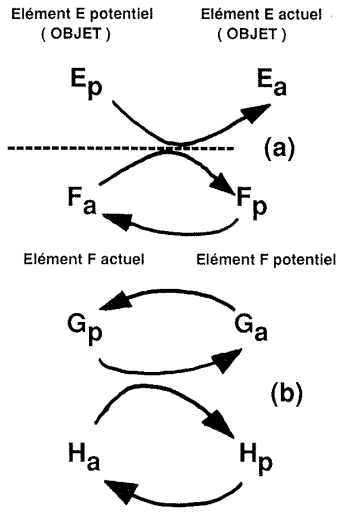

Figure 2. (*a*) *Relation dynamique et contradictoire entre E et F;* (*b*) *la propagation de l'interaction avec l'objet à l'intérieur du système conduit à la séquence suivante :*
Ep → Fp → Gp → Hp → cœur.

Étant donnée le nombre et la complexité des couplages entre éléments et/ou réseaux, un système possède nécessairement des mécanismes et des propriétés permettant d'assurer son autonomie et sa stabilité; le concept de clôture organisationnelle, (Varela, 1989), peut être utilisé pour rendre compte de cet ensemble de propriétés, et d'une manière générale, tout système possède un ensemble de mécanismes lui permettant d'être autonome dans son environnement, conception qui remonte déjà à une cinquantaine d'années, (Vendryès, 1942).

Nous allons concilier les deux propositions formelles énoncés sur les systèmes : (i) couplage dynamique et contradictoire, (ii) autonomie, afin de relier le postulat de couplage dynamique aux propriétés connues des systèmes autonomes.

4.2.1. États internes du système

Étant donné; (i), la diversité des éléments du système; (ii), le nombre important de couplages possibles qui en résulte; (iii), la complexité supplémentaire introduite par le degré variable d'actualisation des éléments; on peut

penser qu'il existe un nombre considérable d'états internes pour le système. Un état interne étant défini par une configuration à un moment donné des éléments du système, en positions relatives actuelles ou potentielles.

4.2.2. Comportements propres du système

Une interaction entre éléments se transmet sous forme d'une dynamique, à travers les couplages internes, et se déplace à l'intérieur du système. Nécessairement, ces dynamiques sont (auto)-organisées d'une manière particulière, afin que le système puisse être stable, une condition suffisante étant qu'elles soient organisées en processus bouclés sur eux mêmes, organisationnellement clos, et formant un ensemble de comportements propres, (Varela, 1986), ce qui lui permet d'exister en tant qu'unité topologique reconnaissable dans l'environnement, mais aussi d'exister en tant qu'unité cohérente, dont la cohérence est régie par une organisation particulière des processus internes dans le système, et répondant à la définition de clôture organisationnelle.

4.2.3. Ondes d'actualisation et de potentialisation

Par le jeu dynamique des couplages qui se produisent au niveau des éléments du réseau, il existe des dynamiques comportant une série d'actualisations, que nous appellerons dynamiques d'actualisation; inversement, des dynamiques comprenant une série de potentialisations seront qualifiées de dynamiques de potentialisation.

Ainsi, nous pouvons ainsi abstraire un ensemble de dynamiques, actualisantes ou potentialisantes; que l'on nommera ondes d'actualisation, et ondes de potentialisation.

Sur la figure 2*b*, la séquence $F_p \rightarrow G_p \rightarrow H_p$ représente une onde de potentialisation, et inversement la séquence $H_a \rightarrow G_a \rightarrow F_a$, une onde d'actualisation.

Par ailleurs, il est nécessaire de bien préciser la notion d'onde afin de ne pas établir de confusion avec l'onde telle qu'elle est conçue par les physiciens, pour lesquels l'onde n'est pas localisée dans l'espace et dans le temps, ainsi, une onde plane monochromatique, définie par une équation reliant paramètres spatiaux et temporels, possède une extension infinie, et les physiciens eux-mêmes considèrent qu'elle n'a en général aucun sens physique, sauf si on superpose ces ondes qui deviennent un « paquet d'ondes », concept associé à la fonction d'onde décrivant une particule. En fait, le concept d'onde, élaboré au XVII^{e} siècle par Huygens, est basé sur la nature vibratoire d'une particule source, mouvement qui se propage ensuite dans le milieu où elle se trouve, et donc, le phènomène de propagation est étroitement lié au phénomène ondulatoire, par ailleurs, ce concept prend une signification autre lorsqu'il s'agit d'un soliton qui n'implique pas de mouvement vibratoire, mais la propagation d'un ébranlement comme par exemple une vague qui déferle

dans un canal. Aussi, nous définissons une onde comme une discontinuité qui se propage, l'onde permet donc de concevoir la nature géométrique et dynamique des événements et processus dans un système, nature géométrique dans la mesure où il y a une propagation dans l'espace, mais aussi nature dynamique dans la mesure où une propagation s'effectue dans le temps. Une telle conception rejoint un formalisme biologique basé sur l'emploi du concept de champ dans le cadre de systèmes hiérarchisés, et sur une description d'une interaction fonctionnelle par le transport (et donc la propagation) d'un signal entre une source et un puits, (Chauvet, 1990).

4.2.4. Cœurs des systèmes

On vient de définir la dynamique des systèmes comme composée d'ondes d'actualisation et de potentialisation, il faut maintenant envisager une organisation géométrique et logique qui permet l'harmonisation de ces ondes qui se propagent au sein du système.

Nécessairement, un système possède une périphérie et un centre, et constitue une unité topologique, sinon, il ne pourrait être reconnaissable dans l'espace et le temps. Sur le système sujet de la figure 2, la périphérie a été positionnée au niveau de l'élément F et l'élément H est représenté au centre que l'on qualifie de cœur. L'élément H, et d'une manière générale tous les éléments associés au centre oscillent entre 2 états, actuel et potentiel, s'il en était autrement, le système sujet ne pourrait que potentialiser les ondes associées aux objets avec lequel il interagit, ce qui pourrait se produire au niveau d'un trou noir, mais certainement pas d'un système vivant! inversement, s'il n'y avait que des actualisations au niveau du centre, on aurait un système purement rayonnant, (ce qui constitue aussi une propriété du trou noir décrit dans le cadre de la gravitation quantique).

Il est raisonnable de considérer le centre, ou cœur comme un point de rencontre d'ondes d'actualisation et de potentialisation, et dans un premier temps, d'attribuer au centre un rôle régulateur et harmonisateur, ce qui constitue ainsi un problème d'intégration des dynamiques locales, problème classique associé à la stabilité des systèmes, (Thom, 1987). Pour des raisons logiques évidentes, les ondes actualisation sont des dynamiques qui se déploient depuis le centre, alors que les ondes de potentialisation convergent vers le centre, et donc, le centre est un lieu géométrique qui est soumis à une contradiction maximale, lieu dont on définira le statut logique dans notre conception comme celui de l'état T, c'est-à-dire semi-actuel et semi-potentiel, ainsi que le défini Lupasco. On peut remarquer qu'une double interprétation de ce statut peut être effectuée, en ce sens que l'état T traduit la rencontre des ondes d'actualisation et de potentialisation, d'où un état d'équilibre, mais le centre en tant que point de convergence d'ondes de potentialisation se

trouve également dans un état de contradiction dans la mesure où les informations contenues dans ces ondes peuvent être elles mêmes contradictoires; mais si ces ondes s'opposent, il est raisonnable de penser qu'une organisation interne au centre fait que la grande majorité des ondes se trouve intégrée, et harmonisée, sinon le système « s'écroulerait sous le poids des contradictions ».

Aussi, le cœur du système est donc défini comme un lieu vers lequel convergent des ondes de potentialisation, et divergent des ondes d'actualisations. On le définit également comme un centre organisateur, doté de propriétés organisatrices, et régulatrices, ainsi que d'autres propriétés que l'on identifiera progressivement.

On propose d'associer un certain degré de conscience à un centre organisateur, conscience physique, vitale, ou bien mentale selon le système considéré, en remarquant que pour Lupasco, l'état T régit la conscience.

De plus, les cœurs/centres organisateurs étant supposé harmoniser les polarités contraires qui sont ainsi transcendées, on dira qu'ils sont régis par le principe de *coincidentia oppositorum* énoncé par Nicolas de Cues; enfin, on peut les percevoir également comme l'âme des systèmes, en adoptant une conception Platonicienne.

4.2.5. Centre organisateur et stabilité dynamique

Certaines propriétés des centres organisateurs peuvent être identifiées en liaison avec le formalisme mathématique établi par René Thom, qui fut l'un des premiers à s'intéresser à la géométrisation de la morphogénèse, en liaison avec les problèmes de stabilité structurelle.

On peut penser que ces centres organisateurs possèdent des propriétés d'attracteurs, car ils sont définis comme étant un lieu de convergence d'ondes de potentialisation, en effet, l'onde de potentialisation décrit une trajectoire dont le point représentatif est attiré vers le lieu géométrique associé au centre.

Inversement, les ondes d'actualisation se déploient à partir de ces centres que l'on peut donc considérer comme des singularités à partir desquelles se développent des catastrophes, (Thom, 1987), ainsi, lorsqu'un ensemble d'ondes d'actualisation émerge du centre, ces ondes sont susceptibles de créer des perturbations dans le système, et ainsi de modifier la dynamique et la morphologie des processus qui entrent au contact de ces ondes, si bien qu'une discontinuité dynamique peut être envisagée au niveau du centre, que l'on peut considérer comme un « point catastrophe », (Thom, 1977).

4.3. *Le système inclus dans un réseau de systèmes, interaction du système avec l'environnement*

On examine ici de quelle manière un système interagit avec un milieu extérieur, et plus particulièrement quels sont les concepts qu'il est nécessaire

d'introduire pour formaliser ces interactions: un système inclus dans son environnement reçoit des «inputs» et exprime des «outputs». Dans cette approche, la question des couplages internes est écartée au profit de l'étude du comportement social du système, et plus précisément, de l'étude des structures dynamiques qui le relient à d'autres systèmes de l'environnement.

4.3.1. Couplages externes

Un système possède nécessairement des composants lui permettant d'interagir avec l'extérieur, avec toutes sortes de systèmes de structures et de complexité variables, on les nomme éléments de couplage externe. Les protéines membranaires d'une cellule, par exemple, constituent des éléments de couplage, et certaines sont plus particulièrement impliquées dans la transmission d'information entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule, comme les récepteurs hormonaux.

Un élément de couplage peut être une structure très complexe, et être doté d'un domaine plus spécifiquement impliqué dans l'interaction avec des éléments ou systèmes externes; ainsi, si l'on reprend l'exemple précédent, la partie fonctionnellement adaptée est le site de liaison de l'hormone, qui est constitué par un ensemble d'acides aminés de la protéine organisés dans une certaine configuration qui permet l'interaction avec l'hormone.

4.3.2. Surface de couplage externe

Une surface de couplage externe sera définie par l'ensemble des éléments du système qui interagissent avec l'extérieur, c'est-à-dire des éléments de couplage externes. L'une des conséquences est que plus un système est compliqué, plus étendue est sa surface de couplage, et si l'on considère que les éléments de couplage sont générés par le système, on en conclut que c'est le système lui-même qui est à l'origine de la multiplicité d'interactions qu'il peut produire.

4.3.3. Nature dynamique des couplages externes

Un couplage externe, de la même manière qu'un couplage interne, est de nature dynamique et contradictoire, ainsi, en adoptant le point de vue du système sujet, l'objet E qui interagit avec le système sera actualisé, alors que l'élément de couplage F sera potentialisé, (*fig.* 2), et inversement si l'on adopte le point de vue symétrique.

4.4. *Le système de réseaux dans un réseau de systèmes, le rôle des ondes dans l'interaction entre systèmes*

En faisant la synthèse des deux points de vue adoptés précédemment, on montre de quelle manière deux systèmes peuvent interagir dynamiquement par l'intermédiaire des surfaces de couplage, et grâce aux ondes qui se propagent d'un système à un autre, pour cela, on définit un système en tant que sujet, et l'autre en tant qu'objet, ce qui permet d'envisager également, en plus de l'interaction entre systèmes, certains processus, cognitifs notamment, liés au système sujet.

4.4.1. Transmission d'un «input» simple

Un input simple correspond à l'interaction d'un objet avec un seul élément de couplage du système. La figure 2 montre que par le jeu dynamique des couplages internes, l'«input» va se transmettre à l'intérieur du système, cet input transite par un élément de la surface de couplage, et ensuite se propage à l'intérieur du système, en empruntant une onde de potentialisation, pour

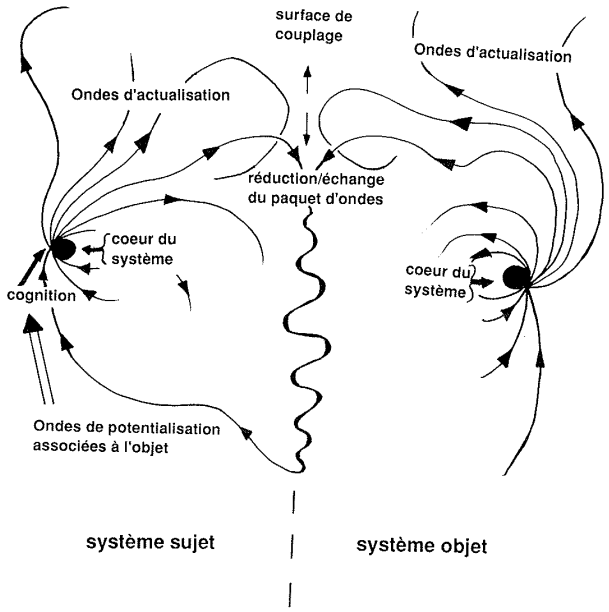

Figure 3b. Modèle ondulatoire: un système sujet interagit avec un système objet qu'il reconnaît, et mémorise.

aboutir au niveau d'un centre organisateur, (*fig.* 3). L'input ainsi transmis se trouve potentialisé au niveau du centre, on peut le considérer comme mis en mémoire.

4.4.2. Transmission d'un «input» complexe

Certains objets vont interagir avec plusieurs éléments de couplage du système, c'est-à-dire, par l'intermédiaire d'une partie de la surface de couplage,

cette partie du sujet dépend bien évidemment de l'objet, et constitue ce que l'on peut appeler la surface cognitive du sujet spécifique de l'objet, en précisant qu'à chaque objet correspond une surface cognitive qui est une structure spécifique que développe le sujet pour interagir avec l'objet. De plus, le point de vue symétrique est tout aussi raisonnable, aussi, la conclusion qui s'impose est de concevoir cette surface de couplage comme développée par le sujet et l'objet.

Du point de vue du sujet, l'interaction avec l'objet prend naissance au niveau de la surface de couplage, et se transmet au sein du sujet par propagation d'ondes de potentialisation en direction d'un ou plusieurs centres organisateurs.

4.4.3. Mécanisme interactif et cognitif

Pour des raisons de symétrie évidente, il est nécessaire d'envisager l'interaction de l'objet et du sujet en les concevant tous deux à partir du modèle ondulatoire: chacun génère des ondes d'actualisation et de potentialisation et interagissent par l'intermédiaire de leur surface de couplage respectives. A ce niveau, les ondes d'actualisation de chacun des systèmes vont se rencontrer.

Il existe donc des conditions, (analogues à celles produisant les phénomènes de résonance), qui autorisent cette interaction, et qui se traduisent ensuite par des processus cognitifs par lesquels le sujet reconnaît l'objet.

Il est important également de préciser qu'au niveau des surfaces de couplage la distinction entre sujet et objet s'effondre, et l'on verra que leur statut logique ne peut être envisagé qu'à partir d'un moyen terme. L'objet, considéré comme autonome par rapport au sujet, ne va pas être englouti au niveau de la surface de couplage, et donc, seule une partie des ondes d'actualisation qui sont associées au développement de l'objet, va interagir et ensuite converger vers les centres du sujet sous forme d'ondes de potentialisation.

Par ailleurs, les ondes en question vont dépendre de l'objet, dans la mesure ou elles se déploient depuis ses propres centres organisateurs, et également du sujet qui génère sa propre surface de couplage, un mécanisme impliquant sujet et objet de produit donc au niveau de la surface de couplage.

Un tel processus, que l'on postule comme étant universel, sera désigné comme «réduction/échange de paquets d'ondes». Sans en préciser les mécanismes intimes, on peut affirmer qu'un tel processus traduit une complémentarité entre sujet et objet, et qu'on peut le comparer à un effet de résonance entre deux dynamiques. Par ailleurs, le terme «réduction» signifie qu'une partie de l'objet interagit avec le sujet, quand au terme «d'échange», il signifie qu'une partie de l'objet existe dans le sujet. En poursuivant notre raisonnement, on considère que les ondes échangées et réduites se propagent

jusqu'au cœur/centre du sujet au niveau duquel se produit le processus cognitif par lequel le sujet reconnaît l'objet, et peut effectuer une représentation de l'objet dans sa conscience.

La figure 3 représente le «modèle ondulatoire de base», qui formalise la structure dynamique d'un système, et son interaction avec l'extérieur. Ce phénomène interactif peut être formalisé mathématiquement: soit deux systèmes dynamiques, sujet et objet, dont ls attracteurs, associés aux centres respectifs, sont respectivement S et O, au moment de l'interaction, c'est-à-dire du couplage, l'attracteur produit $S \times O$ va subir une catastrophe métabolique, et dégénérer en un attracteur de dimension plus faible, (Thom, 1977), ce qui correspondrait à une «réduction du paquet d'ondes».

4.5. *Action, cognition, mémoire*

4.5.1. Dualité comportementale

La génération d'ondes d'actualisation par un système à partir du cœur correspond à son déploiement dans l'espace et le temps, alors que les ondes de potentialisation sont associées aux objets externes qui interagissent avec lui. Ainsi, les ondes de potentialisation permettent au système de connaître le monde extérieur.

On peut ainsi associer actualisation et potentialisation aux deux types de comportements exprimés par les systèmes vivants, et qui de plus sont étroitement imbriqués les uns dans les autres et indissociables: action et perception.

De plus, la mémoire emmagasinée par les systèmes est nécessairement localisée au niveau des centres organisateurs, puisque les ondes de potentialisation qui possèdent l'information relative au monde extérieur convergent vers ces centres.

On distinguera par ailleurs le processus cognitif du processus perceptif, ce dernier est associé à la propagation d'ondes de potentialisation, alors que le processus cognitif s'effectue par des liens qui sont établis, au niveau du centre, entre le champ interne de représentations et les ondes de potentialisation provenant de l'extérieur.

4.5.2. Retour à la logique cusaine

L'interprétation du couple *explicatio/complicatio* (Nicolas de Cues), est susceptible d'éclairer notre réflexion, ainsi éthymologiquement, on peut interpréter le premier terme, que nous avons associé à actualisation, comme la production de plis à l'extérieur, c'est-à-dire un dépliement/déploiement du sujet dans le monde; inversement, *complicatio*, que nous avons associé à potentialisation, signifie compliquer, mais aussi faire des «plis avec», ainsi,

à certains plis déjà existant s'ajoutent de nouveaux plis, ce qui illustre de manière métaphorique l'organisation des processus cognitifs.

Le troisième terme du système de Nicolas de Cues, *copulatio*, représente par ailleurs le couplage entre deux systèmes, et est étroitement associé au couple antagoniste précédent, ainsi, un objet se déplie dans le monde extérieur, puis un couplage fait qu'une partie de l'objet rentre dans le sujet, et ainsi complique le sujet, en s'inscrivant dans le champ de représentations du sujet.

4.6. *La perspective holographique à partir du modèle ondulatoire*

Certains systèmes compliqués, et notamment le système nerveux, ont été envisagé sous l'angle du paradigme holographique, notamment sous l'impulsion de neurophysiologistes tels que Karl Pribam au cours des années 60.

Le mécanisme holographique est basé sur un système élaboré par Gabor, visant à éclairer un objet en utilisant une source laser cohérente, dont un faisceau est réfléchi par l'objet, et ensuite interfère avec un faisceau de référence, l'image obtenue enregistrée sur une plaque photographique, est dénommée un hologramme, dont l'éclairement avec un faisceau de lecture permet, après diffraction du faisceau, de reproduire l'objet en relief. La propriété la plus étonnante de l'hologramme est que, lorsqu'il est fragmenté, un morceau éclairé restituera la totalité de l'objet, avec une définition moindre toutefois, ainsi, chaque point de l'hologramme contient une information sur la totalité de l'objet, mais seul, l'éclairement de l'ensemble restitue avec le maximum de définition l'objet.

Pribam s'interessait aux mécanismes cognitifs, et en particulier aux processus impliqués dans la mémoire cérébrale, s'aperçut que celle-ci n'était pas localisée dans une zone cérébrale bien définie, et que de plus, lorsque certaines zones étaient détruites, la mémoire persistait avec seulement un peu moins d'acuité, aussi eut-il l'idée d'établir un parallèle avec le fonctionnement de l'hologramme.

Si cette conception a été controversée, le paradigme holographique n'en reste pas moins un modèle conceptuel destiné à concevoir dans un système de quelle manière les parties sont reliées au tout, (Tabary, 1987).

Aussi, n'est-il pas inutile d'envisager une conception holographique des systèmes dans le cadre de notre formalisme et en nous basant sur le modèle de la figure 3, et ceci sous un angle double, c'est-à-dire du développement du système à partir des ondes d'actualisation, et des processus mnésiques et cognitifs associés aux ondes de potentialisation. Une mémorisation de nature holographique impliquera la coopération de plusieurs centres organisateurs, et donc, une séparation des ondes de potentialisation associées à un objet, qui convergent vers ces centres; inversement, un déploiement pourra être

envisagé à partir de plusieurs centres, et implique notamment une convergence des ondes d'actualisation déployées à la périphérie du système, on conçoit ainsi la mémorisation holographique, et la morphogénèse holographique (*fig.* 4).

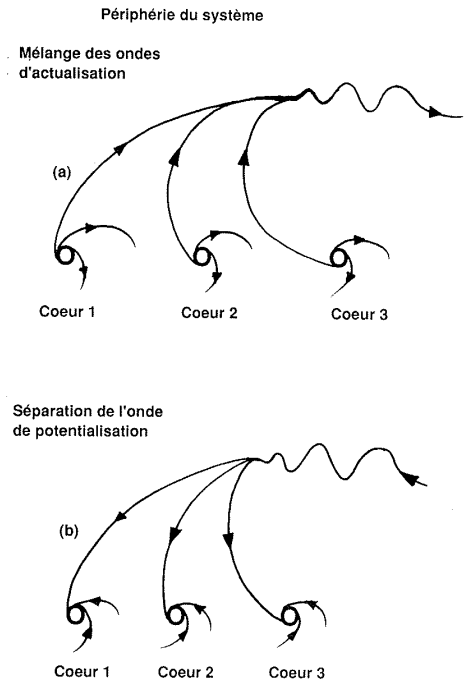

Figure 4. *Modèle ondulatoire holographique.* (*a*) *Morphogénèse holographique;* (*b*) *Mémorisation holographique.*

4.7. *Hiérarchie et arborescences*

Il est également nécessaire d'envisager une hiérarchisation qui est absolument nécessaire si l'on veut décrire les systèmes compliqués. En effet, les systèmes vivants sont composés d'éléments de tailles variables qui constituent des structures hiérarchiquement organisées, par ailleurs, des arguments théoriques ont montré que, à taille égale, des systèmes hiérarchisés évoluent et s'adaptent plus rapidement que des systèmes non hiérarchisés, (Simon, 1973).

L'un des problèmes majeurs en biologie et psychologie est de comprendre le mécanisme d'articulation de ces différents niveaux, aussi, on peut construire à partir du modèle ondulatoire de base, (*fig.* 3), un modèle arborescent que

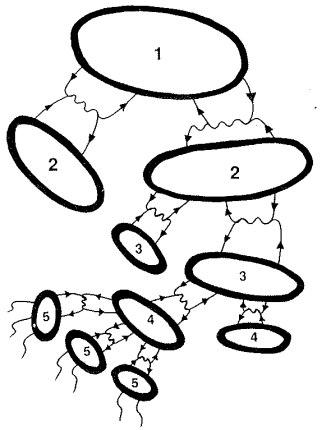

Figure 5. *Modèle ondulatoire arborescent, chaque ellipse représente un centre organisateur qui émet et reçoit des ondes.*

l'on peut qualifier également de modèle vertical, (*fig.* 5). Aussi, on proposera : (i) l'existence de centres organisateurs de niveaux hiérarchiques différents, (ii) le contrôle d'un centre inférieur par un centre supérieur, (iii) les interactions, communications et régulations entre centres s'effectuent par l'intermédiaire d'ondes d'actualisation et de potentialisation, et par le mécanisme dit de « réduction/échange de paquet d'ondes ».

Les systèmes compliqués sont ainsi conçus comme un ensemble de centres organisateurs dotés d'une relative autonomie, et couplés les uns aux autres par l'interaction entre ondes émises et reçues.

5. Illustration du modèle ondulatoire à partir de quelques exemples choisis en biologie et physiologie

On examine ici de quelle manière les systèmes biologiques peuvent être décrit à partir du modèle ondulatoire, et en particulier, quels phénomènes correspondent aux ondes d'actualisation et de potentialisation, et quelles structures peuvent être décrites comme centres organisateurs.

5.1. *L'interaction ligand-récepteur*

L'interaction entre une molécule, substrat ou hormone et une macromolécule, qui est en général une protéine, enzyme ou récepteur, peut être décrite de manière simple à partir du modèle, en effet, si l'on considère le site de liaison de la molécule comme un centre organisateur, on envisage les phénomènes d'association et de dissociation comme deux dynamiques opposées par rapport à ce centre.

L'état lié est correspond à une structure transitoire dans laquelle le ligand est inséré au sein de la macromolécule au niveau du site de liaison, ainsi, lorsque le ligand quitte le récepteur lors d'une dissociation, il s'agira d'une onde d'actualisation, alors que le mouvement inverse, l'association, sera définie comme une onde de potentialisation.

Selon le type d'interaction, le ligand peut ou ne pas être transformé de manière covalente, dans le deuxième cas, cette transformation implique la liaison d'autres ligands, et il se produit une réaction chimique enzymatique.

5.2. *Les ondes métaboliques dans une cellule*

L'ensemble des réactions enzymatiques dans une cellule constituent le métabolisme d'une cellule, et habituellement ce métabolisme est divisé en anabolisme et catabolisme, que l'on oppose habituellement dans la mesure ou l'anabolisme est associé à l'élaboration des structures cellulaires, tandis que le catabolisme est associé à une dégradation des structures, aussi il est tentant de relier les couples d'actualisation/potentialisation et anabolisme-catabolisme, ce qui peut être envisagé si l'on défini préalablement le centre organisateur à partir duquel on se réfère. On peut donc définir une onde catabolique comme une séquence de réactions enzymatiques, (associées éventuellement à des flux diffusionnels) orientées en direction d'un centre organisateur du métabolisme, et inversement une onde anabolique diverge à partir d'un centre.

Un exemple classique est le cycle de Krebs, dans la mitochondrie, qui est catalysé par un complexe multienzymatique si l'on se réfère à de récentes conceptions en enzymologie, (Srere, 1984, 1987; Lyubarev, 1989). En effet, le cycle de Krebs est un lieu de convergence pour les substrats résultant de la dégradation des sucres, lipides, et acides aminés, (ondes cataboliques) mais également un lieu à partir duquel se produit la synthèse de métabolites, comme la néoglucogénèse, que l'on peut interpréter comme une onde anabolique, le centre organisateur étant le complexe multienzymatique responsable du cycle de réaction.

On soulignera que dans le cas du cycle de Krebs, et de bien d'autres séquences métaboliques, il y a correspondance entre les ondes anaboliques/cataboliques, (que l'on a définies à partir du modèle ondulatoire), et réactions anaboliques/cataboliques, (qui sont décrites dans les manuels de biochimie); mais il n'est pas certain que cette correspondance se retrouve dans toutes les séquences réactionnelles. Nous illustrerons cette notion d'onde et de centre métabolique à partir d'un deuxième exemple, en examinant les phénomènes de glycolyse et de néoglucogénèse:

Les molécules de glucose entrent en contact avec une partie de la surface de couplage externe de la cellule, en l'occurence, un transporteur membranaire, qui après basculement, provoque l'entrée du glucose à l'intérieur de la cellule. Ainsi, une onde métabolique de potentialisation se forme, et le glucose diffuse et est pris en en charge par différentes voies métaboliques.

Trois de ces voies ont été très étudiées, et sont associées à une métabolisation préalable du glucose 6-phosphate, par la glucokinase ou l'hexokinase.

Puis, l'on a, (i), une synthèse de glycogène, (ii), une dégradation en métabolites à trois carbones, ou (iii), une poursuite du catabolisme vers le cycle des acides tricarboxyliques, (cycle TCA).

D'après notre modèle, chacune de ces voies doit aboutir à un centre organisateur du métabolisme, et en effet, des arguments sont en faveur de l'existence de tels centres.

Ce sont les complexes multi-enzymatiques dont l'existence est appuyée par de solides arguments expérimentaux, et notamment, par la mise en évidence d'interactions entre enzymes de chaînes métaboliques, ainsi que par des considérations d'ordre cinétique, (Srere, 1984, 1987). Ces complexes ont été dénommés « métabolons », et ont été postulés pour la synthèse du glycogène, la glycolyse, et récemment, pour le cycle de Krebs, dont un modèle ne comprenant pas moins de 10 enzymes organisées en plus de 100 sous-unités, a été formulé, (Lyubarev, 1989).

Au niveau de ces complexes, convergent ondes cataboliques, et divergent ondes anaboliques, ce qui est en accord avec leur rôle de centres organisateurs, et l'étroite association de ces enzymes répond à la nécessité d'articulation des deux types d'ondes métaboliques.

On peut ainsi comprendre le « paradoxe du glucose », (Katz, 1986) qui se traduit par la dégradation préalable du glucose en composés à trois carbones, avant son incorporation dans le glycogène hépatique, et ceci, même chez un animal qui a jeûné. En effet, notre modèle conduit à envisager la diffusion d'une partie du glucose en direction des centres métaboliques, au sein desquels

il est dégradé, (onde catabolique), avant de rejoindre l'onde anabolique pour être finalement incorporé dans le glycogène.

De plus, ces centres organisateurs pourraient posséder une « mémoire métabolique », et bien que peu étudié, un tel phénomène a été mis en évidence pour la fructose-1,6-biphosphatase, qui est un enzyme clé contrôlant la glycolyse, (Soulier, 1988), et inclus dans le complexe glycolytique.

Le métabolisme du glucose a été considéré à titre d'exemple, et de nombreux complexes enzymatiques ont été postulés pour d'autres séquences métaboliques; il se pourrait bien que la régulation du métabolisme soit structurée au niveau de ces complexes, et non à partir d'enzymes en solution, (Srere).

5.3. *Régulation des ondes métaboliques par les ondes calciques*

Une réflexion approfondie sur la régulation du métabolisme à partir de complexes enzymatiques a été développée, (Kurganov, 1986). Cette étude concerne les réactions impliquées dans la glycolyse et la néoglucogénèse, pour lesquelles un complexe comprenant 11 enzymes a été établi. Ce complexe est lié par une « protéine d'ancrage », soit à la membrane plasmique des érythrocytes, soit sur les filaments fins des fibres musculaires; il permet d'une part une régulation très fine des réactions catalysées par chaque enzyme, et d'autre part une étroite adéquation entre l'ATP synthétisé par la glycolyse, et hydrolysé par la tête de la myosine des myofilaments. Ces arguments confirment le rôle de centre organisateur que peut jouer un tel complexe.

Par ailleurs Kurganov postule un rôle régulateur pour la protéine d'ancrage du complexe; en effet, la bande III, protéine de la membrane d'érythrocyte, constitue une cible pour les ions calciums, et peut intervenir au niveau de la régulation d'ensemble du complexe, par l'intermédiaire de la phosphofructokinase qui lui est associée.

Ainsi, l'ion calcium est supposé provoquer un basculement du complexe d'un état inactif vers un état actif, ou plutôt, d'un état à un autre.

Deux types de régulation sont donc postulés, l'une fine, de pemier ordre, permet l'ajustement concerté des réactions enzymatiques individuelles, et donc s'interprète comme une des propriétés intégratives associées à un centre organisateur, l'autre, de deuxième ordre, induite par les ions calciums, concerne la régulation d'ensemble du complexe, régulation qui s'effectue à un niveau plus élevé, à savoir le niveau des structures subcellulaires, et notamment le réticulum endoplasmique.

Dans le cadre de notre théorie, cette régulation ferait intervenir un centre organisateur de niveau supérieur, conformément au modèle arborescent

(*fig.* 5) et effectivement, le réticulum endoplasmique de la cellule pourrait être ce centre.

En effet, il s'agit d'un réseau membranaire intracellulaire, responsable du stockage et de la libération d'ions calcium lors de la contraction musculaire. De même, lors de la réponse cellulaire suite à une stimulation d'un récepteur couplé à la phospholipase C, le réticulum endoplasmique libère son calcium, par l'action de l'inositol-triphosphate libéré par la phospholipase, (Berridge, 1988). De plus, cette libération induit une onde calcique dans la cellule, visualisable par les techniques d'imagerie cellulaire, et Berridge utilise le terme de « train de pics calciques » pour décrire ce phénomène, (le qualificatif de « train d'ondes calciques » peut être également proposé).

Examinons le parallélisme entre les phénomènes observés au niveau des réticulums de deux types de cellules; une cellule excitable, la fibre musculaire, et une cellule possédant des récepteurs couplés à la lipase C :

(i) La migration de l'inositol triphosphate depuis la membrane vers le réticulum peut être comprise comme une onde de potentialisation, générée suite à une stimulation d'un récepteur, élément de couplage externe de la cellule.

De même, l'onde de potentialisation qui migre vers le réticulum de la fibre musculaire est constituée par les ions calcium qui sont libérés suite à une stimulation électrique, par les canaux calciques des tubules T.

(ii) Le réticulum endoplasmique génère des ondes d'actualisation, qui sont les ondes calciques qui se dirigent vers les myofilaments, ou en direction de complexes enzymatiques dans la cellule stimulée par un agoniste.

(iii) Le réticulum possède un rôle d'intégration au niveau de ces deux types d'onde, dans le premier cas, ce rôle se traduit par le phénomène de « calcium-induced-calcium release », dans l'autre cas, c'est une libération de calcium induite par la liaison de l'inositol-triphosphate sur la membrane réticulaire.

Le réticulum répond ainsi à la définition de centre organisateur que nous avons formulée, et de plus, il pourrait être le siège d'une mémoire cellulaire, car un codage de l'information sous forme d'oscillations calciques a été suggéré, (Holl, 1988).

Aussi, voit-on se dessiner une nouvelle problématisation de l'intégration des structures de niveaux hiérarchiques différents, basée sur l'existence de centres organisateurs, générateurs d'ondes d'actualisation, et cibles d'ondes de potentialisation, conformément au modèle arborescent présenté sur la figure 5. Ainsi, les ondes calciques émises par le réticulum aboutiraient au niveau de structures supramoléculaires sous forme d'ondes de potentialisation, et en particulier au niveau de complexes supramoléculaires.

5.4. *Mémoire du neurone*

Les phénomènes de mémoire cellulaire ont été particulièrement étudiés au niveau des neurones, et en particulier, au niveau de l'hippocampe.

Après stimulation électrique à haute fréquence, les neurones de l'hippocampe acquièrent un type de mémoire, dénommée « long-terme potention », se traduisant par une facilitation au niveau de la transmission synaptique

La nature des événements biochimiques impliqués dans cette mémorisation a fait l'objet de nombreuses études, qui ont débouché sur la formulation de trois hypothèses, mutuellement non exclusives, (Kennedy, 1989).

Ainsi, pourraient être impliquées : (i), la kinase de type C, protéine membranaire activée par le calcium et le diacylglycérol, et participant aux phénomènes de transduction d'information associés aux récepteurs couplés à la phospholipase C; (ii), la kinase de type 2, dépendant de la calmoduline et du calcium; et (iii), la calpaine de type 1, qui est une protéase dont l'action nécessite la présence d'ions calcium.

Dans le cadre de notre formalisme, ces trois voies non seulement ne sont pas exclusives, mais représentent trois composantes de l'onde de potentialisation associée à ce phénomène. En effet, ces trois voies vont en commun le calcium, qui participe à de nombreux phénomènes de stimulation cellulaire, et se propage sous forme d'une onde calcique dans la cellule; ainsi, la mise en œuvre des trois protéines invoquées constitue un paquet d'ondes de potentialisation, qui, après séparation, vont converger vers différents centres organisateurs/mémorisateurs du neurone. Ceci permet de plus de préciser la nature holographique de la mémoire cellulaire, qui se trouve ainsi distribuée de manière multiple dans le neurone conformément au modèle proposé, (*fig.* 4).

5.5. *Ondes dans le système nerveux central*

Le système nerveux central est également le siège d'ondes de potentialisation et d'actualisation. On sait que les centres nerveux sont à l'origine de rythmes biologiques, et il y a 75 ans, on attribuait une origine réflexe à ces rythmes. Actuellement, la nature endogène de ces rythmes ne fait aucun doute, ces rythmes sont générés par des unités de neurones, (centres organisateurs probablement), fonctionnant en coopération, et d'une manière redondante, car en effet, la destruction d'une partie de ces unités n'abolit pas ces rythmes qui persistent en étant simplement altérés. Ceci peut s'interpréter, conformément au modèle holographique, (*fig.* 4), comme une manifestation la nature holographique de ces rythmes qui résulteraient de la superposition d'ondes générées par plusieurs unités de neurones.

De plus, certains modèles de réseaux neuronaux mettent en évidence les propriétés autoorganisatrices des tissus nerveux, ce qui se traduit par la synchronisation, et la mise en phase des fréquences générées individuellement par les neurones,, ainsi que l'avait prédit Wiener il y a 30 ans, (Hoppensteadt, 1989), ce qui confirme le paradigme holographique. Outre les corps cellulaires des neurones qui forment la substance grise, le système nerveux central contient également des fibres nerveuses, dont certaines, formées d'axones organisés en faisceaux, forment la substance blanche.

Toute fibre nerveuse est polarisée, elle possède un potentiel de membrane, appelé potentiel de repos, qui se traduit par une différence de potentiel électrique négative entre l'intérieur et l'extérieur de la fibre; lors d'une stimulation, la fibre se dépolarise localement, son potentiel devient positif, et de plus, la positivité se propage le long de la fibre, et donc constitue une onde de dépolarisation.

Ces fibres sont le siège d'ondes de dépolarisation et de sens opposés: (i), les fibres sensitives/afférentes sont le siège d'ondes de potentialisation, (ii), les fibres motrices/efférentes sont le siège d'ondes d'actualisation; en effet, dans une fibre sensitive, le sens de parcours de la dépolarisation est orienté vers les centres nerveux, et inversement pour les fibres motrices.

De plus, les centres intégrateurs du système nerveux correspondent aux noyaux de la substance grise, et d'une manière générale, aux neurones que l'on sait organisés en unités autonomes, ce sont des centres organisateurs qui sont à l'origine de l'intégration des voies afférentes et efférentes, ce qui s'explique par la proximité des neurones dans ces noyaux, qui permet une articulation plus aisée des ondes émises et reçues, de la même manière qu'une proximité des enzymes organisés en complexes supramoléculaires, et couplées par interactions non covalentes, est à l'origine de l'articulation des ondes anaboliques et cataboliques.

De plus, ces centres sont organisés hiérarchiquement, et possèdent une complexité croissante, qui se traduit par une multiplicité des couplages neuronaux, c'est-à-dire des jonctions synaptiques qui permettent aux neurones d'interagir; ainsi au niveau du cortex cérébral, centre nerveux supérieur particulièrement développé chez l'homme, se trouvent des neurones multipolaires, dont les ramifications dendritiques peuvent former plusieurs milliers de synapses avec d'autres neurones. Ces centres nerveux sont le siège d'une conscience de plus en plus structurée et intégrée.

5.6. *Ondes cellulaires chez l'embryon*

Lors du développement précoce de l'embryon au cours de la troisième semaine, on observe un ensemble de processus morphogénétiques connus sous

le qualificatif de gastrulation, au cours de laquelle on observe la migration de cellules ectoblastiques vers un lieu géométrique central qui est la ligne primitive, et qui ensuite migrent pour former un tissu nouvellement différentié, le mésoblaste, cette migration s'exprime ainsi par un mouvement convergent, ondes de potentialisation, et d'un mouvement divergent, ondes d'actualisation.

La ligne primitive peut donc être considérée comme un centre organisateur dans le cadre de notre formalisme, par ailleurs, le territoire cordo-mésodermique, issu de cette ligne, a été qualifié de «centre organisateur», en raison de son pouvoir inducteur qui lui permet de déterminer certains types cellulaires, (Le Moigne, 1989), en effet, au contact de cette structure, les cellules acquièrent un déterminisme qui les conduit à se spécialiser et à migrer dans un lieu géométrique de l'embryon prédéterminé.

De plus, on sait que ce rôle organisateur disparaît peu après la neurulation, phase suivante de l'embryogénèse, pour laisser probablement la place à plusieurs autres centres parmi lesquels on peut imaginer la quarantaine de paires de somites, aggrégats cellulaires issus du mésoderme, et qui apparaissent après la gastrulation.

6. Synthèse: la thèse du modèle ondulatoire, énoncés de base

Une synthèse de l'étude que nous avons présentée est proposée à partir d'une série d'énoncés définissant le formalisme ondulatoire qui vient d'être élaboré.

1. Un système compliqué est composé d'éléments couplés entre eux, et peut être décrit suivant une architecture composée de réseaux mutuellement couplés.

2. Deux éléments couplés sont le siège de dynamiques contradictoires.

3. Tout système comporte un ensemble de cœurs/centres organisateurs.

4. Les systèmes sont le siège de processus dynamiques que l'on défini comme discontinuités, (ondes) qui se propagent: les ondes d'actualisation se déploient à partir du centre/cœur, et les ondes de potentialisation convergent vers le centre/cœur.

5. Les centres organisateurs sont responsables de la régulation et de l'harmonisation de ces ondes, et donc du contrôle interne exprimé par les systèmes.

6. Dans les systèmes compliqués, il existe une hiérarchisation entre les centres organisateurs. Un centre de niveau supérieur intègre et régule le fonctionnement des centres de niveau inférieur, et opère sur eux.

7. Les centres organisateurs possèdent une conscience, ainsi que des propriétés cognitives, mnésiques et intégratives qui dépendent de leur positionnement hiérarchique au sein du système.

8. Un système possède une surface de couplage externe, d'autant plus développée que le système est évolué; elle permet son interaction avec l'extérieur, son unité topologique, et sa stabilité dans un environnement changeant.

9. Deux systèmes interagissent entre eux par l'intermédiaire d'une surface de couplage au niveau de laquelle se produit une « réduction/échange » des paquets d'ondes d'actualisation de chacun des systèmes. Ces « ondes réduites » se propagent sous forme d'ondes de potentialisation, jusqu'à un/plusieurs cœurs, au niveau desquels un système reconnaît l'autre système, et le mémorise ensuite.

10. Une onde de potentialisation peut diverger en direction de plusieurs cœurs, ce qui se traduit par la mémorisation de nature holographique de l'événement associé à cette onde, c'est-à-dire, distribuée au niveau d'une multiplicité de centres organisateurs.

11. Inversement, des ondes d'actualisation issues de plusieurs centres peuvent se mélanger à la périphérie du système, et l'on peut dire que le développement du phénomène associé à ces ondes possède une nature holographique car il est généré par une multiplicité de centres organisateurs.

12. Les centres organisateurs sont le siège des propriétés évolutives des systèmes vivants et sont responsables des mécanismes de diversification, car ils sont soumis à la logique de la diversité.

Les figures 3, 4, 5, représentent les modèles ondulatoires (i) de base, (ii) holographique, (iii) arborescent.

7. Conclusion

A partir de quelques exemples, nous avons constaté que le modèle ondulatoire pourrait fournir un cadre général pour décrire des phénomènes rencontrés au niveau du métabolisme cellulaire, des neurones, du système nerveux central, et de l'embryon. Le paradigme ondulatoire pourrait unifier certaines hypothèses, parfois opposées, et montrer qu'une logique interne au système est à la base de phénomènes qui apparaissent contradictoires si on les interprète dans le cadre d'un paradigme mécaniste et réductionniste, dont une des principales limites réside dans la vision fragmentaire qu'il propose.

A travers les illustrations de ce modèle, on peut voir se dégager son intérêt sur les plans heuristique et descriptif, intérêts qu'il faudra confirmer en

utilisant ce modèle pour formaliser d'autres phénomènes et structures rencontrés dans les systèmes vivants, c'est-à-dire, en identifiant les centres organisateurs impliqués dans un système, les ondes générées, ainsi que leurs intégrations et interactions.

La puissance de ce modèle ne pourra être entrevue que par l'élucidation de problématiques non résolues en biologie, mais pour cela, il faudra approfondir la définition des concepts proposé dans cet article, en y intégrant éventuellement des concepts tels que bifurcation, chaos, attracteurs, interfaces, récursivité..., et en éclaircissant l'un des concepts-clé de ce modèle, celui de « réduction/échange de paquets d'ondes », dont on perçoit l'intérêt pour formaliser le problème de la communication entre systèmes, que l'on peut poser ainsi : « l'observateur peut décrire des entités extérieures que le système lui-même ne peut pas décrire, soit parce qu'il ne peut pas interagir avec elles, soit parce qu'il ne peut pas compenser les déformations qu'elles lui causent », (Varela, 1989). Dans le cadre du modèle ondulatoire, on peut proposer, qu'un système ne peut connaître un système extérieur soit : (i), parce qu'il n'arrive pas à « réduire/échanger » le paquet d'onde qu'il génère : le système ne possède pas de surface de couplage adéquate pour réaliser cette réduction et donc aucune information, (onde) n'arrive au cœur ou bien (ii), le « paquet d'ondes réduit et échangé » est trop important : le système est réduit par excès d'informations, (ondes), que son cœur ne peut intégrer.

Nous terminerons cette étude en soulignant la symétrie du modèle donné en figure 3, qui propose une importance égale entre le sujet et l'objet, ceci bien évidemment si les deux systèmes sont de niveau équivalent; dans le cas contraire, la symétrie est brisée et une hiérarchie apparaît, comme celle représenté sur le modèle arborescent, (*fig.* 5), cette remarque peut être rapproché de certaines conceptions récentes qui tendent à attribuer un rôle hiérarchisant aux brisures de symétrie, (Laforgue), et mériterait d'être développée ultérieurement.

Enfin, on peut souligner la nature fractale du modèle arborescent, (*fig.* 5) qui, par prolongement vers des niveaux inférieurs, chimiques et physiques, permettrait de définir les structures vivantes comme des systèmes dont le centre est partout, et dont l'extension due aux ondes d'actualisation ne peut être évaluée avec précision, or, au xv^{e} siècle, Nicolas de Cues décrivait l'univers comme une sphère infinie dont le centre est partout, et la circonférence nulle part...

Je remercie Monsieur René Thom, Professeur à l'Institut des Hautes Études Scientifiques, pour les critiques et suggestions émises suite à la lecture de la première version de ce manuscript, ainsi que Messieurs Elie Bernard-Weil et

Thiébaut Moulin pour leurs commentaires qui m'ont permis de réaliser la version définitive de cet article.

Bibliographie

S. AUROBINDO, Métaphysique et psychologie, *Albin Michel*, 1988.

E. BERNARD-WEIL, Discours psychanalytique et discours systémique, *Rev. Int. Systémique*, 2, 165-193, 1988.

M. J. BERRIDGE et A. GALIONE, Cytosolic calcium oscillators, *FASEB J.*, **2**, 3074-3082, 1988.

D. BOHM, La plénitude de l'univers, *Editions du Rocher*, 1987.

M. BUNGE, Analytic philosophy of society and social science: the systemic approach as an alternative to holism and individualism, *Rev. Int. Systémique*, **2**, 1-13, 1988.

G. CHAUVET, Traité de physiologie théorique, tome 3, Physiologie intégrative: champ et organisation fonctionnelle, *Masson*, Paris, 1990.

G. F. CHEW, Bootstrap: A scientific idea?, *Science*, **161**, 762-765, 1968.

M. de GANDILLAC, Œuvres choisies de Nicolas de Cues, *Aubier*, Paris, 1942.

M. HEIDEGGER, Questions 1 et 2, *Gallimard*, Paris, 1990.

R. W. HOLL, M. O. THORNER, G. L. MANDELL, J. A. SULLIVAN, Y. N. SINHA et D. A. LEONG, Spontaneous oscillations of intracellular calcium and growth hormone secretion, *J. Biol. Chem.*, **263**, 9682-9685, 1988.

F. C. HOPPENSTEADT, Intermittent chaos, self-organisation, and learning from synchronous synaptic activity in model neuron networks, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **86**, 2991-2995, 1989.

J. KATZ, M. KUWAJIMA, D. W. FOSTER et J. D. Mc GARRY, The glucose paradox: New perspective oncarbohydrate metabolism, *Trends Biochem. Sci.*, **11**, 136-141, 1986.

M. B. KENNEDY, Regulation of synaptic transmission in the central nervous system: Long term potentiation, *Cell.*, **59**, 777-787, 1989.

B. I. KURGANOV, The role of multienzyme complexes in integration of cellular metabolism, *J. Theor. Biol.*, **119**, 445-455, 1986.

A. LAFORGUE, Brisures de symétrie hiérarchisant les niveaux d'organisation, Conférence présentée au 10e séminaire de la Société Française de Biologie Théorique, Solignac, 1990.

E. LASZLO, Evolutionary dynamics in nature and society, *Rev. Int. Systémique*, **2**, 109-121, 1988.

A. LE MOIGNE, Biologie du développement, *Masson*, Paris, 1989.

J. L. LE MOIGNE, Science de l'autonomie et autonomie de la science, Actes du Colloque de Cerisy: L'autoorganisation; textes rassemblés sous la direction de P. Dumouchel et J. P. Dupuy, *Le Seuil*, Paris, p. 521-536, 1983.

S. LUPASCO, Le principe d'antagonisme et la logique de l'énergie, *Hermann*, Paris, 1951, réédition: *Éditions du Rocher*, Monaco, 1986.

S. LUPASCO, L'énergie et la matière vivante Julliard Paris; réédition: *Éditions du Rocher*, Monaco, 1987.

R. LYDIC, Central pattern-generating neurons and the search for general principes, *FASEB J.*, **3**, 2457-2468, 1989.

A. E. LYUBAREV, B. I. KURGANOV, Supramolecular organisation of tricarboxylic acid cycle enzymes, *Biosystems*, **22**, 91-102, 1989.

H. A. SIMON, La science des systèmes, *Epi Editeurs*, Paris, 1974.

R. PENROSE, The emperor's new mind, *Oxford University Press*, Oxford, 1989.

J. M. SOULIER, M. RIVIERE et J. RICARD, Enzymes as biosensor: Hysteretic response of chloroplastic fructose-1,6-biphosphatase to fructose 2,6-biphosphate, *Eur. J. Biochem.*, **176**, 111-117, 1988.

P. A. SRERE, Why are enzymes so big, *Trends Biochem. Sci.*, **9**, 387-390, 1984.

P. A. SRERE, Complexes of sequential metabolic enzymes, *Annu. Rev. Biochem.*, **56**, 89-124, 1987.

H. P. STAPP, Consciences et valeurs dans l'univers quantique, *3e Millénaire*, n° 8, 34-41, 1983.

J. C. TABARY, Le paradigme holographique, *Rev. Int. Systémique*, **1**, 159-180, 1987.

R. THOM, Stabilité structurelle et morphogénèse, *Interéditions*, Paris, 1977.

R. THOM, La théorie des catastrophes et les applications, *Rev. Int. Systémique*, **1**, 225-237, 1987.

F. J. VARELA, Autonomie et connaissance, *Le Seuil*, Paris, 1989.

P. VENDRYES, Vie et probabilité, *Albin Michel*, Paris, 1942.

K. WILBER, A developmental view of consciousness, *J. Transp. Psy.*, **11**, 1-22, 1979.

K. WILBER, Les trois yeux de la connaissance, *Éditions du Rocher*, Monaco, 1986*a*.

K. WILBER, J. ENGLER et D. P. BROWN, Transformation of consciousness, K. Wilber ed., *New Science Library*, Londres, 1986*b*.