

# **EMERGENCE ET TELEOLOGIE**

**A. C. EHRESMANN**  
**et J.-P. VANBREMEERSCH**

PREPUBLICATION 94-1. Février 1994

**UNIVERSITE DE PICARDIE**  
**Amiens**

---

**EMERGENCE ET TELEOLOGIE**

*par A. C. EHRESMANN et J.-P. VANBREMEERSCH*

(Université de Picardie et Centre médical Saint-Roch, Amiens)

**Introduction.**

Le mot 'émergence' est utilisé dans des sens très variés, mettant l'accent selon le cas sur l'apparition de nouveaux objets ou processus, ou sur leur soudaine manifestation pour des observateurs. Le Larousse cite entre autres l'émergence d'organes dans un phylum, mais aussi l'apparition soudaine d'une idée, d'un fait sociologique, économique ou politique, telle l'idée de liberté individuelle au XVI<sup>e</sup> siècle et celle de tolérance au XVIII<sup>e</sup>. Pour le Quillet, la théorie anglo-saxonne de l'émergence est une notion plus ou moins obscure, sorte de préformationnisme, le devenir n'y étant qu'apparent. En Biologie, on parle d'émergence à propos des phénomènes les plus divers, de l'émergence d'une fonction ou d'un organe, à l'émergence d'une espèce...

La notion d'émergence ne semble pas avoir reçu de véritable codification scientifique. Rosen (1985) la définit comme la "manifestation qualitative d'une certaine différence entre ce que le système fait maintenant et ce qu'il faisait dans le passé". Pour M. Bunge (1979), une propriété émergente d'un objet  $x$  est une propriété possédée par  $x$  mais par aucun des composants l'ayant engendré. Pour Kampis (1991), "the logical treatment of a system (and a mechanistic mode of interactions in a system) excludes emergent properties from the system's processes". Ceci vient de ce que les modèles sont soit dirigés vers l'étude de la dynamique 'après émergence', soit au contraire vers le processus même de construction des nouveaux objets; Au premier type se rattachent les modèles classiques en Physique, basés sur la théorie des systèmes dynamiques ou sur la Thermodynamique; certes les équations peuvent mettre en évidence des changements qualitatifs: catastrophes (Thom 1974), ordre émergeant du chaos dans les systèmes dissipatifs (Prigogine 1982), structure ultramétrique sur l'ensemble des attracteurs (Changeux *et al.* 1986); mais ceci reste une description 'après-coup', qui n'incorpore pas la création des nouveaux composants dans la dynamique gouvernée par les données initiales. De même, les modèles de systèmes hiérarchiques (Auger 1989, Klir 1985,...), reposent implicitement sur l'idée que les niveaux supérieurs se forment à partir des niveaux inférieurs et que leur

comportement s'en déduit, mais ils n'étudient ce comportement qu'une fois ceux-ci formés. Pour étudier l'émergence au sens propre, il faut que de nouveaux composants soient 'créés', de manière aléatoire ou contrôlée, et que cette création modifie de façon essentielle le comportement du système. Or les modèles du deuxième type qui s'intéressent au processus même de construction 'par blocs', ou inversement de décomposition, d'un objet (hyperstructures de Baas (1993), automates cellulaires de von Neuman (1966), systèmes-composants de Kampis (1991)), sont le plus souvent de nature morphologique et ne donnent pas une théorie mathématique du comportement dynamique ultérieur du système.

Nous allons montrer que la théorie des Systèmes Evolutifs, introduite en 1986, offre un cadre dans lequel on peut étudier à la fois le comportement dynamique du système et le processus même d'émergence de nouveaux objets avec leurs propriétés spécifiques, ainsi que les interconnexions entre les deux. Les Systèmes Evolutifs avec Mémoire donnent un modèle mathématique (développé dans une série d'articles à laquelle (EV 1993) peut servir de guide), basé sur la Théorie des catégories (Eilenberg & Mac Lane 1945), pour des systèmes naturels auto-régulés, tels des systèmes bio-sociologiques. L'idée générale sera de définir l'émergence d'un objet complexe dans un tel système comme l'apparition d'un nouvel objet par intégration d'une assemblée cohérente d'objets pré-existants; il s'agit soit d'une émergence 'systémique' (l'objet étant matériellement créé), soit d'une émergence 'épistémologique' (l'objet étant seulement détecté par des observateurs directement ou au travers de ses conséquences). Le modèle permet de montrer comment le nouvel objet modifie le comportement du système à court et long terme, initiant par contre coup d'autres formes d'émergence (par classification, par organisation ou par dysfonctionnement).

D'un point de vue technique, nous utiliserons pour cela le processus de 'complexification d'une catégorie relativement à une stratégie', qui mettra aussi en évidence ce que sont les propriétés émergentes d'un tel objet, modélisées par des 'liens complexes' qu'on différenciera des 'liens simples' qui n'apportent pas de réelle nouveauté (§§ 2-5). De plus, par itération de ce processus, on peut construire explicitement une hiérarchie d'objets d'ordre effectivement croissant, qui acquièrent une identité propre (§§ 6-8).

L'émergence devient ainsi partie intégrante de la dynamique du système; elle peut être plus ou moins contrôlée par des Centres de Régulation internes

(CR), dont chacun opère selon son niveau de complexité et sa temporalité propre, et qui interagissent entre eux de manière coopérative et/ou compétitive; il s'instaure une 'dialectique entre CR hétérogènes' qui donne sa spécificité à l'évolution d'un système complexe (§§ 9-10).

Cette émergence par association peut être complétée par une émergence par classification (qui s'y ramène formellement). Toutes deux contribuent à l'enrichissement de l'organisation du système, pouvant conduire notamment à la formation d'une mémoire sémantique, ou de CR supérieurs associatifs, (D-)intentionnels ou 'conscients' (§ 11).

Enfin (§ 12) une analyse de la causalité dans ces systèmes complexes auto-organisés montre en quel sens leur évolution ressort d'un 'réductionnisme émergentiste', de sorte qu'elle reste imprédictible à long terme pour un observateur externe, même si elle est partiellement contrôlable de l'intérieur, à moyen terme, par les visées téléonomiques des CR supérieurs, ceci sans qu'on puisse généralement parler de Téléologie. Une application de ces résultats aux systèmes neuronaux permet de décrire l'émergence de processus cognitifs d'ordre supérieur, et conduit à une nouvelle approche du problème de l'identité entre états mentaux et physiques.

Ce modèle est de portée interdisciplinaire, comme le laissent entendre les quelques exemples concrets dont nous l'illustrons. En Biologie, il rend compte du fonctionnement d'une cellule (EV 1989), du développement d'un organisme jusqu'à une théorie du vieillissement (EV 1993a); du phénomène de spéciation. En Sciences sociales, il met en évidence le rôle des contraintes structurelles et temporelles dans le fonctionnement des sociétés, avec des retombées pour l'organisation des entreprises (EV 1993); et il est utilisé dans un travail récent pour étudier en quoi le droit communautaire européen modifie le droit national (Mansouri & Monti 1994). En Epistémologie, il permet de décrire le développement des théories et conduit à une théorie de l'interdisciplinarité actuellement en cours (Lunca 1993).

Une partie des résultats est annoncée dans (EV 1993b). Le texte a été rédigé de sorte que les parties plus mathématiques (en retrait) puissent être éventuellement omises.

*Amiens, Février 1994*

**Plan.**

1. **Systèmes évolutifs.**
  2. **Emergence par association.**
  3. **Emergence d'objets par complexification.**
  4. **Emergence de liens simples.**
  5. **Emergence de liens complexes.**
  6. **Emergence d'objets d'ordre strictement supérieur.**
  7. **Systèmes hiérarchiques.**
  8. **Emergence de l'identité d'un objet complexe.**
  9. **Emergence relative à des observateurs et/ou acteurs.**
  10. **Rôle de l'émergence dans le comportement du système.**
  11. **Emergence par classification. Emergence organisationnelle.**
  12. **Causes de l'émergence. Téléonomie. Téléologie.**
- Références.**

## 1. Systèmes évolutifs.

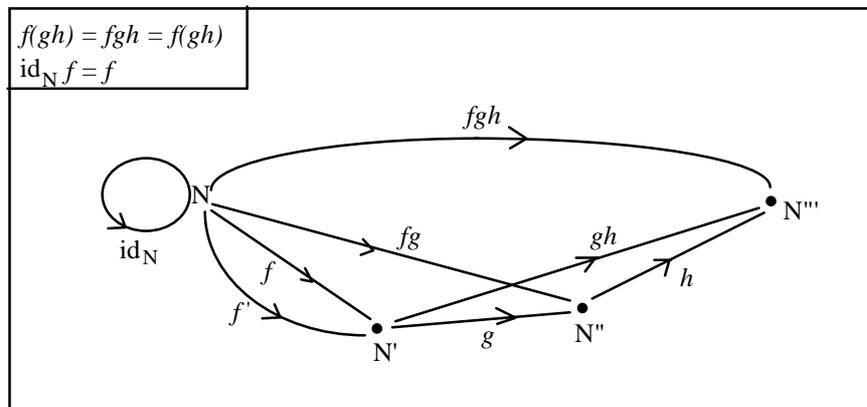
L'état d'un système naturel à un instant donné est déterminé par ses composants et leurs interrelations. Dans un système évolutif, il sera modélisé par une catégorie.

*Une catégorie* (Eilenberg & MacLane 1945) est un graphe orienté, avec éventuellement des flèches fermées et plusieurs flèches entre les mêmes sommets, sur lequel on se donne une loi pour combiner deux flèches successives en une nouvelle flèche, vérifiant les axiomes:

-associativité: un chemin du graphe se combine de manière unique en une flèche, indépendante de la façon dont il est décomposé en suites de 2 flèches,

-identité: chaque sommet  $N$  a une flèche fermée, son identité  $id_N$ , qui se combine avec toute flèche partant ou arrivant au sommet sans la changer.

Les sommets du graphe sont appelés *objets* de la catégorie, ses flèches *liens*.



Les objets de cette catégorie modélisent les différents composants du système, et les liens, les relations entre ceux-ci, qui peuvent être des transferts d'information ou d'énergie, des relations topologiques ou causales, des contraintes.... On considérera les liens partant d'un objet  $N$  comme étant des 'actions' de  $N$ , et ceux arrivant à  $N$  comme étant des 'messages reçus' par  $N$ . La combinaison des liens permet de classer les chemins qui sont fonctionnellement équivalents.

L'état du système varie au cours de son évolution. Pour obtenir la notion de système évolutif, on modélisera le changement d'état entre un instant  $t$  et un instant postérieur  $t'$  par un foncteur entre les états correspondants.

*Un foncteur* d'une catégorie vers une autre est un homomorphisme de graphes compatible avec la combinaison des liens.

*Un système évolutif* consiste en la donnée d'une échelle de temps de référence, pour chacun de ses instants d'une catégorie  $K_t$ , état en  $t$ , et pour tout couple d'instant  $(t, t')$  avec  $t < t'$  un foncteur, dit *de transition*, de  $K_t$  vers  $K_{t'}$ , de sorte qu'il y ait transitivité entre transitions. On suppose de plus que chaque catégorie état  $K_t$  admet un objet 0 qui servira à modéliser les objets ayant disparu en  $t$ .

Dans les systèmes naturels, les liens transmettent les informations avec une certaine force et un certain délai. Pour modéliser ceci, on suppose qu'à chaque lien est associé un réel, son *délai de propagation*, de sorte que le délai du combiné de deux liens soit la somme de leurs délais.

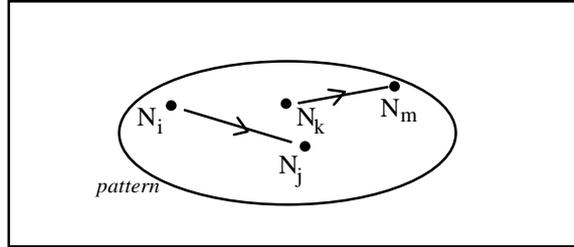
Un exemple fondamental est le système évolutif associé à un système neuronal. Il est construit à partir de la *catégorie des neurones* dont les objets sont les neurones, les liens de  $N$  vers  $N'$  étant les chemins synaptiques entre eux, où deux chemins sont identifiés s'ils ont la même force, c'est-à-dire s'ils transmettent de la même façon l'influx nerveux de  $N$  vers  $N'$ . (Cette catégorie est implicitement considérée dans Zeeman, 1977.)

### 2. Emergence par association.

Pour parler d'émergence par association au sens indiqué plus haut, il nous faut définir la notion d'un objet complexe obtenu par intégration d'un pattern d'objets liés agissant en assemblée cohérente. Comment modéliser ce processus? Pensons à la synthèse d'une protéine: des atomes s'attirent entre eux et s'assemblent en respectant certaines relations topologiques permettant de décrire la conformation spatiale de la protéine. Cette organisation interne de la protéine sera modélisée par un pattern dans la catégorie des atomes et molécules, où les liens sont les relations de covalence, les forces de van der Waals,....., et la protéine en tant que telle y deviendra le 'recollement' de ce pattern.

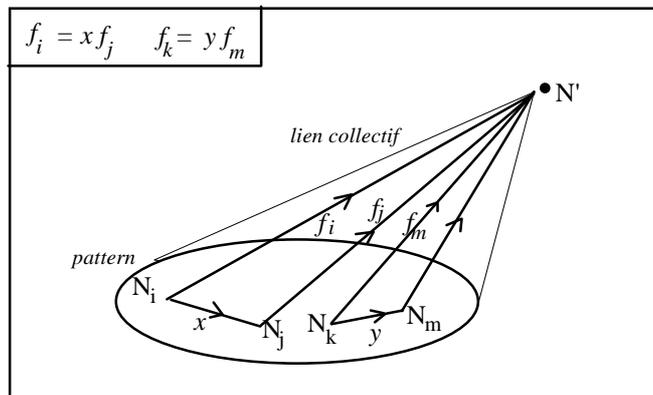
## Ehresmann & Vanbreemsch

Un *pattern* dans une catégorie est formé par une famille d'objets et de liens distingués entre eux.



Considérons dans une catégorie un *pattern* formé d'objets et de certains liens distingués entre eux. En soi, ce *pattern* n'est pas un objet de la catégorie; pourtant il peut émerger de manière fonctionnelle pour certains objets  $N'$  de la catégorie si ses objets exercent une action collective sur  $N'$ , en utilisant leurs liens distingués. Ceci est modélisé par la notion d'un lien collectif ( $f_i$ ) du *pattern* vers  $N'$  (dessiné comme un cône ayant pour base le *pattern* et pour sommet  $N'$ ).

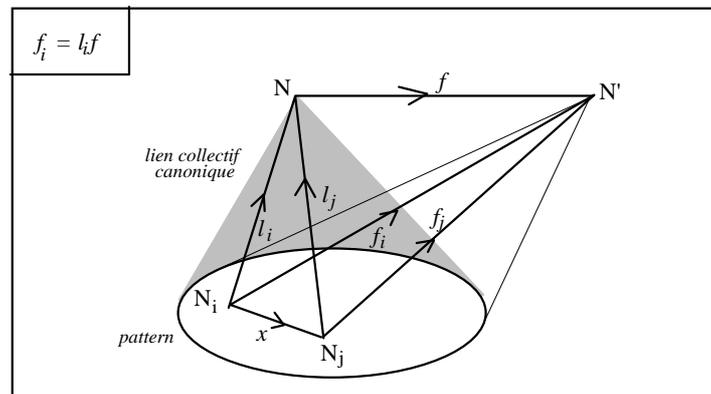
Un *lien collectif* du *pattern* vers un objet  $N'$  est formé par une famille de liens individuels  $f_i$  de chacun des objets  $N_i$  vers  $N'$  telle que, pour tout lien distingué  $x$  de  $N_i$  vers  $N_j$ , on ait  $x f_j = f_i$ .



Par exemple, un groupe de personnes liées par certains intérêts peut coordonner son action pour réaliser un travail particulier qu'elles ne pourraient pas faire séparément. Ensuite les membres du groupe peuvent décider de renforcer leurs liens pour former une assemblée cohérente dont l'action sera institutionnalisée par la création d'une association ayant sa propre identité légale. Cette association sera modélisée par la colimite du *pattern* dans la catégorie des groupes sociaux.

Dans une catégorie, la colimite d'un pattern d'objets liés est un objet  $N$  qui 'recolle' le pattern au sens où il l'intègre (via un lien collectif 'canonique' vers  $N$ ) de sorte que ses actions vers tout autre objet  $N'$  correspondent de façon biunivoque aux liens collectifs du pattern vers  $N'$ . On pourra penser à  $N$  comme étant un objet complexe, admettant le pattern pour organisation interne, c'est-à-dire que le pattern constitue une décomposition de  $N$  en éléments plus simples.

La colimite (aussi appelée *recollement*) d'un pattern est un objet  $N$  tel qu'il existe un lien collectif *canonique* ( $l_i$ ) du pattern vers  $N$  et que chaque lien collectif ( $f_i$ ) du pattern vers un  $N'$  se recolle en un unique lien  $f$  de  $N$  vers  $N'$  vérifiant  $f_i = l_i f$  pour tout  $N_i$ .



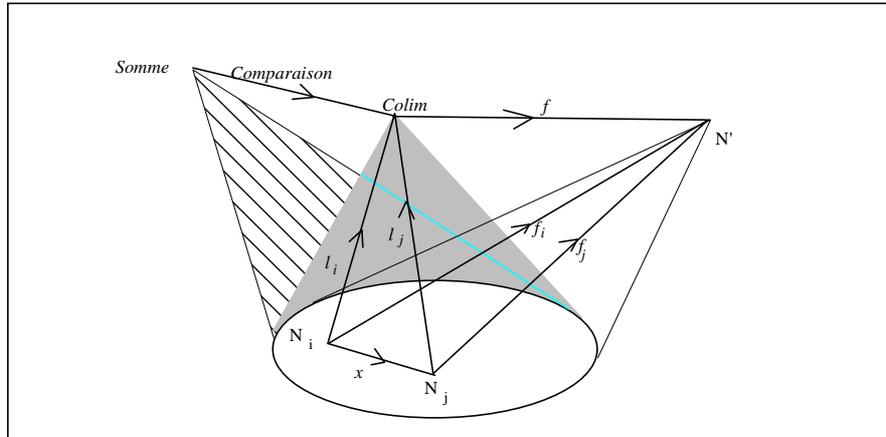
Une telle colimite  $N$  actualise la potentialité des objets  $N_i$  à agir collectivement en respectant leurs liens distingués, de sorte à former une assemblée cohérente. Il n'existe pas toujours de tel objet; mais, dans un système évolutif, il peut s'en former un au cours du temps; cette émergence nécessite que:

- localement les liens distingués des  $N_i$  se renforcent (délais de propagation raccourcis et, dans les systèmes naturels, coût de transmission diminué, avec éventuellement spécialisation de certains de ces objets);

- globalement, un nouvel objet  $N$  se forme et soit détecté par tout objet  $N'$  vers lequel le pattern admettait un lien collectif (la détection se faisant via le lien recollant ce lien collectif).

Les contraintes ainsi imposées à l'assemblée, mais aussi l'efficacité qu'elle acquiert dans son action, peuvent être mesurées en comparant cette colimite au simple amalgame, ou *somme*, des objets  $N_i$ , qui serait la colimite du pattern

obtenu en 'oubliant' les liens distingués entre eux.



La somme classe les actions individuelles des  $N_i$ , tandis que la colimite classe leurs actions collectives en accord avec leurs liens distingués. Le lien 'comparaison' mesure la différence entre elles, et donc factorise les nouvelles propriétés émergeant par recollement. Dans les systèmes naturels, la force de ce lien mesure l'efficacité et le gain de temps gagné par coopération. Un exemple en est donné par l'hémoglobine, qui est un tétramère qu'on représentera par le recollement d'un pattern déterminant sa configuration spatiale; le lien comparaison mesure alors la différence entre le taux d'oxygénation de ses 4 unités séparées et le taux de fixation d'oxygène par le tétramère (Di Cera 1990).

Nous avons dit qu'un pattern peut ne pas avoir de colimite. S'il en a une, elle est unique (à un isomorphisme près). Par contre deux patterns différents peuvent avoir la même colimite; par exemple, dans la catégorie des molécules, un acide aminé est colimite de chacun des codons synonymes qui le codent: on peut aussi penser à une figure ambiguë, qui est à la fois colimite des deux patterns qu'on peut y lire. Si l'on considère la colimite comme étant un objet complexe, ceci traduit le fait que cet objet complexe admet plusieurs décompositions en objets plus simples: ce que la colimite retient du pattern n'est pas sa composition et son organisation, mais sa seule fonctionnalité, laquelle peut être partagée par d'autres patterns plus ou moins différents. Nous verrons que ce *morcellement* (dégénérescence au sens de Edelman, 1989) dans le passage d'un objet complexe à ses décompositions est à la base même de l'émergence de structures d'ordres supérieurs. En particulier, un sous-pattern d'un pattern peut avoir la même colimite que le pattern entier; on dit alors qu'il en est un *sous-système*

*représentatif* (penser au Comité Directeur d'une association); ceci expliquera comment l'organisation interne d'un objet complexe peut varier au cours du temps (les membres de l'association se renouvellent), sans que l'objet lui-même perde sa propre identité.

Dans un système neuronal, le recollement d'un pattern de chemins synaptiques revient au renforcement de ces chemins de sorte que le pattern devienne une assemblée synchrone au sens de Hebb (1949), ou un groupe neuronal au sens de Edelman (1989). Lorsqu'il s'agit de patterns ayant une grande importance pour l'animal, il peut exister un neurone unique N qui 'incarne' l'assemblée, au sens où l'activation de N a les mêmes effets que celle de l'assemblée tout entière; dans ce cas, on parle d'un neurone-pilote. Par exemple dans les aires visuelles, il existe de tels neurones-pilote représentant (un groupe de neurones activé par) des angles (Hubel & Wiesel 1962), ou, chez le singe, un neurone-pilote représentant la main prenant une banane (Gazzaniga 1985). Mais en général, l'assemblée cohérente, tout en ayant une existence fonctionnelle propre, n'a pas de neurone-pilote (il n'y a pas de 'neurone de grand-mère'), et sa composition peut être modifiée dans une certaine mesure sans perturber son fonctionnement. L'émergence et le comportement de telles assemblées sont à la base du développement de processus cognitifs d'ordre supérieur. Nous allons montrer comment ils peuvent être modélisés et étudiés dans le cadre d'un 'processus de complexification' qui consiste à rajouter à la catégorie des neurones de nouveaux objets d'ordre supérieur, appelés *neurones de catégorie*. Un neurone de catégorie représentera une assemblée cohérente n'ayant pas de neurone-pilote (ou plus exactement une classe de telles assemblées cohérentes fonctionnellement équivalentes) comme une entité en soi, au même titre que le ferait un neurone-pilote. Et l'on 'calculera' sur ces neurones de catégorie comme si c'étaient de simples neurones, développant ainsi une véritable "algèbre des objets mentaux" (comme le proposait Changeux, 1983).

### 3. **Emergence d'objets par complexification.**

Dans les systèmes complexes naturels, la dynamique est régulée par les 4 changements archétypaux: naissance/mort, scission/collision; par exemple, pour une cellule, endocytose, exocytose, scission ou synthèse de macromolécules. Ceci est modélisé par le processus de *complexification relativement à une stratégie*, qui

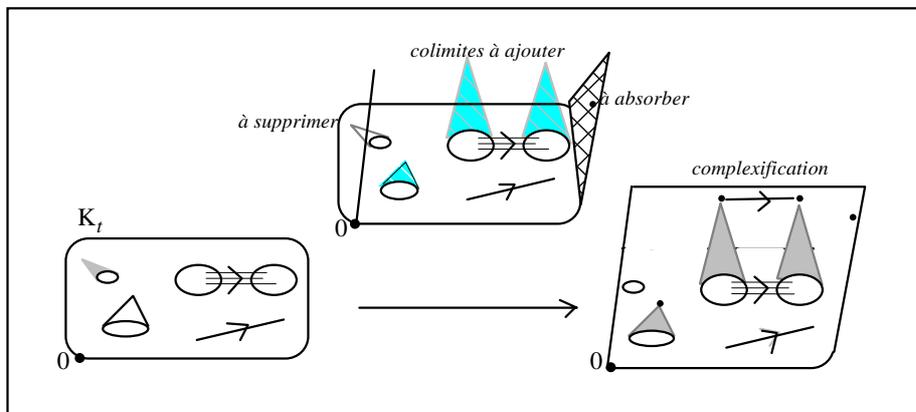
permet en particulier de décrire l'émergence d'un objet complexe au cours de l'évolution par transformation d'un pattern d'objets liés en assemblée cohérente prenant une identité propre.

Considérons la catégorie  $K_t$  état du système en  $t$ , et une stratégie  $S$  sur elle, formée d'éléments externes à absorber, de certains objets et colimites à supprimer, de patterns à recoller.

Une stratégie  $S$  sur une catégorie consiste en la donnée: d'un ensemble d'éléments externes 'à absorber'; d'un ensemble d'objets et/ou de liens de la catégorie 'à supprimer', c'est-à-dire qu'ils seront appliqués sur l'objet 0; d'un ensemble de patterns sans colimite 'à recoller', de sorte qu'ils acquièrent une colimite; d'un ensemble de cônes 'à transformer en colimites', c'est-à-dire que le sommet du cône deviendra la colimite de sa base; d'un ensemble de patterns ayant une colimite 'à décomposer', de sorte que le pattern perde sa colimite.

*Théorème.* Il existe un foncteur de la catégorie donnée vers une catégorie, appelée sa *complexification relativement à la stratégie S*, dans laquelle les buts de  $S$  sont atteints de la manière 'la plus économique' (en tant que solution d'un problème universel).

Nous allons construire explicitement la complexification relativement à la stratégie  $S$ , qui est la catégorie dans laquelle les buts de  $S$  sont réalisés de la manière la plus économique, tant du point de vue algorithmique qu'énergétique. En effet elle est à la base de l'émergence de structures de plus en plus complexes.



- Ses objets seront: tous les objets de  $K$ , qu'on ne demande pas de supprimer, les éléments 'à absorber', et, pour chaque pattern  $\mathbf{P}$  sans colimite 'à recoller', un nouvel objet devenant sa colimite (noté  $\text{colim}\mathbf{P}$ ) et qu'on peut penser comme un objet d'ordre supérieur émergeant par intégration du pattern renforcé en assemblée cohérente, et prenant une identité propre.

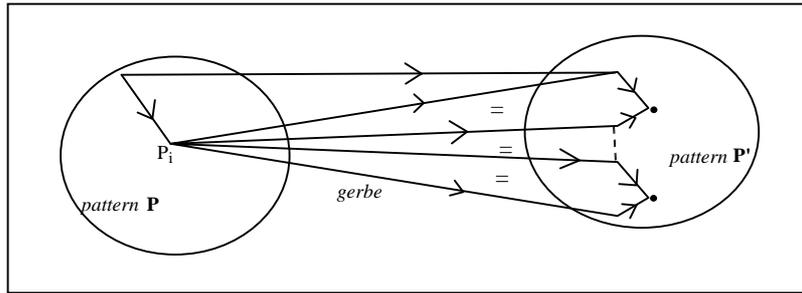
- Les liens sont de 2 types (cf. A. & C. Ehresmann, 1972): des liens 'simples' (en particulier les liens de la catégorie donnée conservés), et des liens 'complexes' obtenus par combinaison de liens simples, et qui modélisent des processus 'non-linéaires' émergents dans la complexification. Nous allons les décrire dans les deux paragraphes suivants.

#### 4. Emergence de liens simples.

Pour construire les liens simples, il faut d'abord définir, dans la catégorie  $K$ , la notion de '*gerbe*' d'un pattern  $\mathbf{P}$  vers un pattern  $\mathbf{P}'$ . L'idée est qu'une gerbe correspond à des interactions entre les composants des deux patterns se coordonnant à leurs actions collectives. Elle est représentée par une famille de liens d'objets de  $\mathbf{P}$  vers objets de  $\mathbf{P}'$ , 'bien corrélés' par les liens distingués des patterns, de sorte que chaque objet de  $\mathbf{P}$  soit lié à au moins un objet de  $\mathbf{P}'$  et que, s'il est lié à plusieurs, les informations ou contraintes transmises à  $\mathbf{P}'$  par ses différents liens soient compatibles. Il s'ensuit que, si  $\mathbf{P}$  et  $\mathbf{P}'$  ont des colimites dans la complexification, la gerbe se recolle en un lien bien déterminé de  $\text{colim}\mathbf{P}$  vers  $\text{colim}\mathbf{P}'$ . Un lien recollant une gerbe est appelé un *lien simple*.

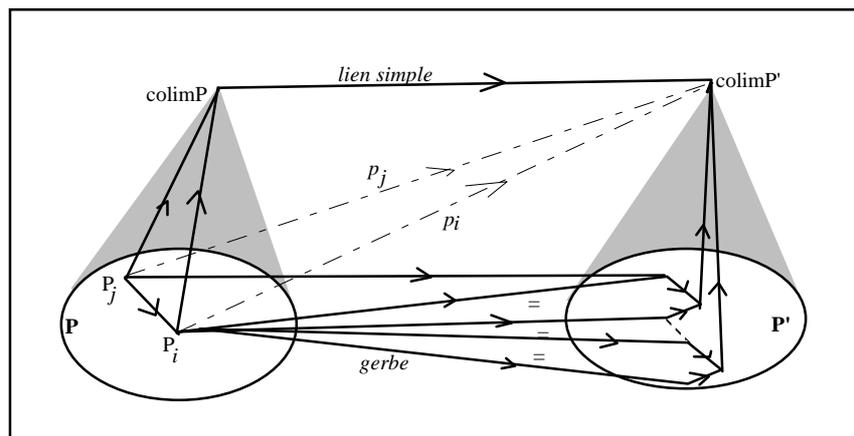
Une *gerbe* de  $\mathbf{P}$  vers  $\mathbf{P}'$  est un ensemble maximal de liens entre les objets de ces patterns vérifiant les conditions suivantes:

1. pour tout objet  $P_i$  de  $\mathbf{P}$ , il existe au moins un lien de cet objet vers un objet de  $\mathbf{P}'$ ; et s'il existe plusieurs tels liens, ceux-ci sont reliés par un zig-zag de liens distingués de  $\mathbf{P}'$  comme indiqué dans la figure suivante.
2. avec un lien, la gerbe contient aussi tout lien obtenu en le combinant à gauche par un lien distingué de  $\mathbf{P}$ , à droite par un lien distingué de  $\mathbf{P}'$ .



*Théorème.* Si  $\mathbf{P}$  et  $\mathbf{P}'$  admettent des colimites dans la complexification, la gerbe se recollera en un lien de  $\text{colim}\mathbf{P}$  vers  $\text{colim}\mathbf{P}'$ , qu'on appellera *lien simple*.

En effet, on montre facilement que tous les liens de la gerbe issus de  $P_i$  ont le même composé  $p_i$  avec les liens canoniques vers  $\text{colim}\mathbf{P}'$ , et que tous ces  $p_i$  forment un lien collectif vers  $\text{colim}\mathbf{P}'$ , lequel doit donc se recoller en un lien de  $\text{colim}\mathbf{P}$  vers  $\text{colim}\mathbf{P}'$  (par la propriété universelle d'une colimite).



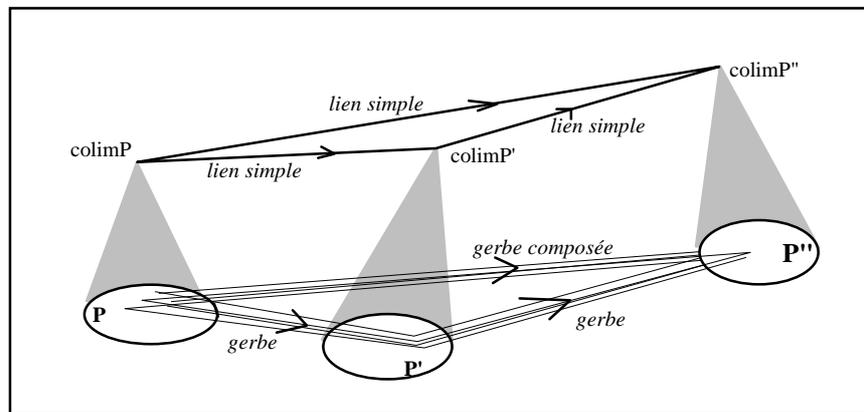
Si les patterns ont des colimites dans la catégorie initiale, alors le lien simple recollant la gerbe existe déjà dans cette catégorie (de par les propriétés des colimites). Si  $\mathbf{P}$  et/ou  $\mathbf{P}'$  sont les bases de cônes spécifiés par la stratégie, les sommets de ces cônes deviennent leurs colimites dans la complexification, et le lien simple est un lien entre ces sommets qui, selon le cas, existe dans la catégorie initiale, ou émerge dans la complexification. Enfin si  $\mathbf{P}$  et  $\mathbf{P}'$  sont des patterns 'à recoller', de sorte que leurs colimites émergent dans la complexification, le lien simple entre elles y émergera aussi.

La construction de ces liens simples entraîne en particulier que, si  $\mathbf{P}'$  est un pattern à recoller, chacun de ses objets (considéré comme colimite d'un pattern réduit à cet objet) va être relié à  $\text{colim}\mathbf{P}'$  par un lien simple 'canonique', et ces liens

canoniques forment le lien collectif canonique de  $\mathbf{P}'$  vers sa colimite. De même, chaque lien collectif de  $\mathbf{P}$  vers un objet  $A$  (nouveau ou ancien) de la complexification se recollera en un lien simple de  $\text{colim}\mathbf{P}$  vers  $A$ .

En combinant les liens de deux gerbes *adjacentes*, disons de  $\mathbf{P}$  vers  $\mathbf{P}'$  et de  $\mathbf{P}'$  vers  $\mathbf{P}''$ , on obtient une gerbe composée, de  $\mathbf{P}$  vers  $\mathbf{P}''$ ; et dans ce cas les liens simples recollant les deux gerbes se combinent en un lien simple de  $\text{colim}\mathbf{P}$  vers  $\text{colim}\mathbf{P}''$ , à savoir le lien simple recollant la gerbe composée.

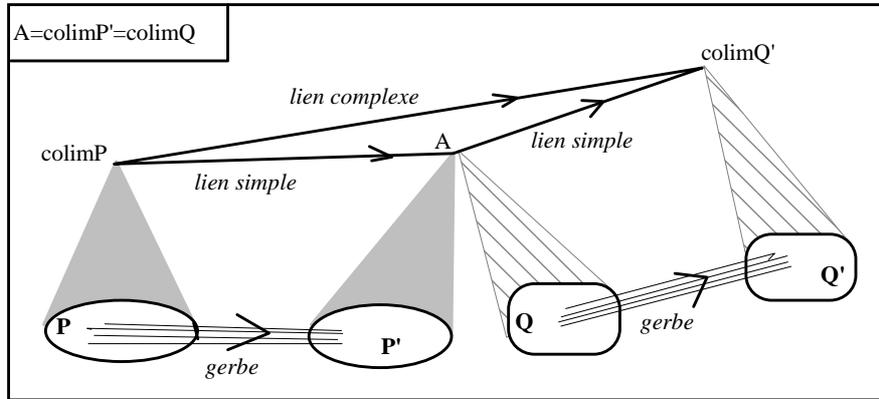
*Proposition.* Le lien qui combine deux liens simples recollant des gerbes adjacentes est un lien simple.



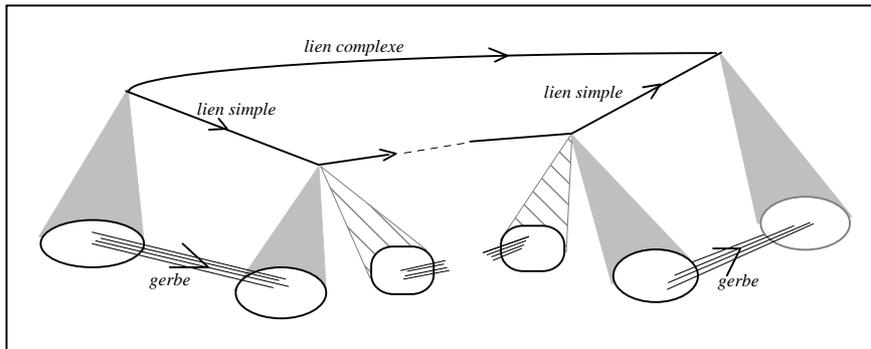
### 5. Emergence de liens complexes.

La complexification contient, en plus des liens simples, des liens qu'on appelle des *liens complexes*, obtenus par combinaison de liens simples. En effet, nous venons de voir que deux liens simples recollant des gerbes *adjacentes* donnent encore un lien simple par combinaison. Mais il peut exister des liens simples adjacents, recollant des gerbes *non-adjacentes*, et qui ne se combinent pas en un lien simple. Ceci vient du fait qu'un objet  $A$  peut devoir être colimite de plusieurs patterns dans la complexification; par exemple, il peut être colimite (à conserver) dans la catégorie initiale d'un pattern  $\mathbf{P}'$ , et la stratégie  $\mathbf{S}$  peut exiger qu'il devienne aussi colimite d'un pattern  $\mathbf{Q}$ . Dans ce cas, si l'on a un lien simple recollant une gerbe de  $\mathbf{P}$  vers  $\mathbf{P}'$ , et un lien simple recollant une gerbe de  $\mathbf{Q}$  vers un pattern  $\mathbf{Q}'$ , pour avoir une catégorie on doit ajouter dans la complexification un lien de  $\mathbf{P}$  vers  $\mathbf{Q}'$  obtenu par combinaison de ces deux liens, bien que celui-ci ne

recolle pas de gerbe.



Plus généralement, il émergera dans la complexification des liens complexes obtenus en combinant une suite de liens simples recollant des gerbes, de sorte que, pour deux gerbes consécutives dans cette suite, la première arrive à un pattern différent du pattern dont part la suivante, ces deux patterns ayant cependant la même colimite.



Les liens complexes peuvent être pensés comme reliant des objets complexes, non pas 'directement', mais par l'intermédiaire d'autres objets. Donnons-en un exemple concret dans la catégorie des groupes sociaux. Considérons des patterns représentant respectivement un groupe de paysans  $P$  et un groupe de consommateurs  $Q'$ . Supposons qu'il se forme une coopérative  $A$ , laquelle est modélisée à la fois comme colimite de son département  $P'$  d'achat et de son service  $Q$  de vente. Chaque paysan porte ses produits au département  $P'$  de la coopérative, et celle-ci, via son service  $Q$ , revend aux différents consommateurs. Ceci forme deux gerbes de  $P$  vers  $P'$ , et de  $Q$  vers  $Q'$ , d'où des liens simples 'offre' de  $\text{colim}P$  vers  $A$  et 'vente' de  $A$  vers  $\text{colim}Q'$ . Ces deux liens

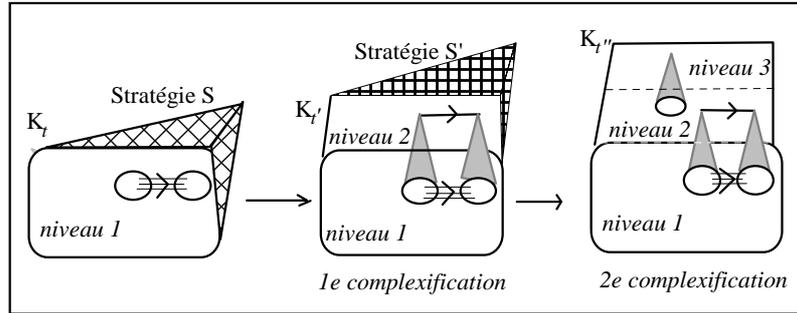
simples se combinent en un lien complexe du groupe global  $\text{colim} \mathbf{P}$  des paysans vers le groupe  $\text{colim} \mathbf{Q}'$  des consommateurs. Ce lien complexe modélise l'opération de vente des paysans aux consommateurs par l'intermédiaire de la coopérative, sans pourtant aucun échange direct d'un paysan à un consommateur. Il s'agit bien d'un lien complexe, et non simple.

Pour des exemples mathématiques, penser à un espace topologique, représenté comme réalisation géométrique de différents complexes simpliciaux; les liens simples correspondant aux applications simpliciales, les complexes à des applications continues.

### 6. Emergence d'objets d'ordre strictement supérieur.

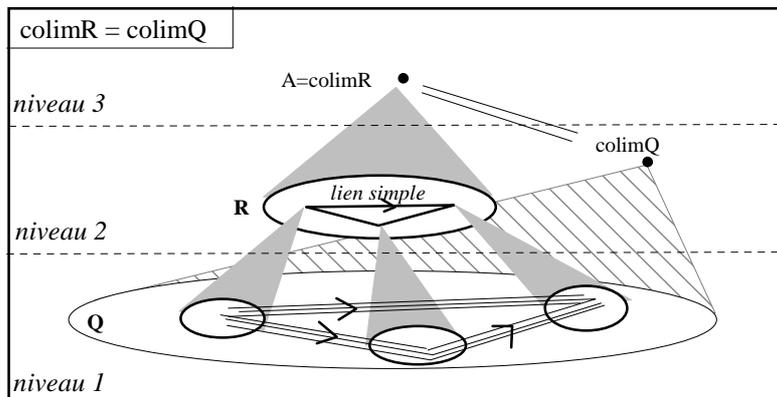
Dans un système complexe naturel, la transition entre deux états consiste en l'émergence de nouveaux objets par absorption ou par association, et en la disparition de composants par suppression ou décomposition d'objets complexes; ce processus a été modélisé par une complexification relativement à une stratégie adéquate (nous reviendrons plus loin sur le problème du choix des stratégies). Or une complexification d'une catégorie fait émerger des objets d'ordre supérieur, à savoir ceux qui recollent un pattern initialement sans colimite. Il semblerait donc que des complexifications successives vont conduire à l'émergence d'une hiérarchie d'objets 'de plus en plus complexes' au cours de l'évolution du système. En est-il 'réellement' ainsi, ou l'ordre d'un tel objet peut-il être 'réduit' en le présentant comme recollement d'un 'grand' pattern de la catégorie initiale?

Pour répondre à cette question, nous allons analyser la situation créée par itération de la complexification d'une catégorie. Nous considérons la catégorie  $K_r$  construite plus haut par complexification de la catégorie  $K_r$  relativement à la stratégie  $\mathbf{S}$ , et une stratégie  $\mathbf{S}'$  donnée sur cette catégorie  $K_r$ ; nous construisons la complexification de  $K_r$  relativement à cette stratégie  $\mathbf{S}'$ . Les objets et liens de la catégorie initiale  $K_r$  seront dits du niveau 1, les objets émergeant dans sa première complexification  $K_r$  par recollement d'un pattern du niveau 1 seront dits du niveau 2; un objet émergeant dans la deuxième complexification (donc dans la complexification de  $K_r$ ) sera dit du niveau 3. Le problème est de savoir si un objet du niveau 3 peut aussi être présenté comme colimite d'un 'large' pattern de la catégorie initiale, auquel cas son ordre de complexité est le même que celui des objets du niveau 2, ou s'il est 'réellement' d'un ordre de complexité supérieure aux objets du niveau 2.



Soit  $\mathbf{R}$  un pattern dans la première complexification  $K_r$  que la stratégie  $\mathbf{S}'$  demande de recoller, et dont chaque objet est d'ordre 2, c'est-à-dire a lui-même émergé dans  $K_r$  comme recollement d'un pattern sans colimite dans la catégorie initiale  $K_r$ . Deux cas se présentent.

1. Considérons d'abord le cas où chaque objet de  $\mathbf{R}$  est colimite d'un unique pattern de la catégorie initiale  $K_r$ , et où les liens distingués du pattern  $\mathbf{R}$  sont des liens simples recollant des gerbes entre ces patterns :

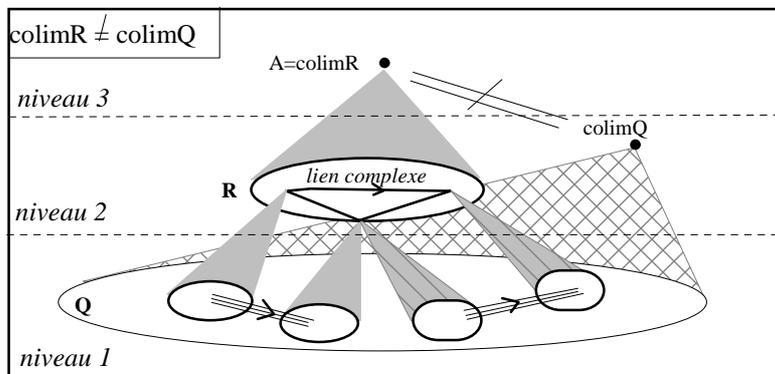


On peut alors construire un pattern  $\mathbf{Q}$  formé par: les liens de ces gerbes que recollent les liens simples de  $\mathbf{R}$ , et par les liens distingués des patterns de la catégorie initiale que recollent les objets de  $\mathbf{R}$ . Le pattern  $\mathbf{Q}$  est entièrement contenu dans la catégorie  $K_r$ , et on montre qu'il a la même colimite que  $\mathbf{R}$ .

Ainsi, dans ce cas, l'objet  $A=\text{colim}\mathbf{R}$ , construit comme étant d'ordre 3 (c'est-à-dire émergeant dans la deuxième complexification  $K_r$  de  $K_r$ ), se 'réduit' à la colimite du 'large' pattern  $\mathbf{Q}$  d'ordre 1. Autrement dit, cet objet  $A$  est 'fondamentalement' du même ordre 2 que les objets de la première complexification, et le fait qu'il ait été présenté seulement dans la seconde n'est qu'un artefact venant de la description donnée.

2. Par contre la situation peut être différente si les liens distingués du pattern  $\mathbf{R}$  sont des liens complexes. Dans ce cas, en décomposant les liens complexes sous forme de combinés de liens simples (que ceux-ci appartiennent ou non au pattern  $\mathbf{R}$ ), et en considérant toutes les gerbes associées à ces liens simples et tous les patterns de  $\mathbf{K}$ , que ces gerbes reliait, on peut encore construire comme plus haut un 'large' pattern  $\mathbf{Q}$  d'ordre 1; mais celui-ci n'aura plus  $\text{colim}\mathbf{R}$  pour colimite.

Ceci signifie que, dans ce cas,  $\text{colim}\mathbf{R}$  est 'essentiellement' d'ordre 3, au sens qu'il n'existe pas de pattern de la catégorie initiale (donc d'ordre 1) dont il devienne colimite.



Il en résulte que des complexifications successives peuvent conduire à l'émergence d'une hiérarchie d'objets d'ordre strictement croissant dès lors que des liens complexes interviennent dans les patterns recollés. Cette situation est analysée dans la section suivante. Elle se présentera au cours de l'évolution d'un système naturel complexe, où les changements se font par étapes, la transition entre deux états successifs étant modélisée par une complexification. Il en est ainsi dans l'évolution de l'univers, des systèmes biologiques, des sociétés, comme le montre Laszlo (1989) qui décrit un tel processus sous le nom de 'convergence' (il refuse le terme de 'complexification', car il considère que le niveau supérieur introduit une certaine simplicité en 'oubliant' les détails), et le rattache à la formation d'hypercycles au sens de Eigen (1979).

Dans le cas de systèmes neuronaux, ceci permet d'expliquer comment vont se développer des processus cognitifs d'ordre supérieur, par complexifications successives de la catégorie des neurones. Ces complexifications introduisent des *neurones de catégorie* d'ordre croissant; alors que ceux du niveau 2 représentent des assemblées de neurones synchrones au sens de Hebb (cf. § 2), ceux des niveaux supérieurs correspondent à des super-assemblées (ou 'assemblées

d'assemblées'), puis des super-super-assemblées,.... La complexité augmente 'réellement' à chaque niveau, et un neurone de catégorie de niveau  $n > 2$  ne pourra pas être réduit à une (large) assemblée synchrone de simples neurones, dès lors que le pattern de neurones de catégorie (pattern du niveau  $n-1$ ) qu'il recolle a certains de ses liens distingués qui sont complexes. Nous verrons plus loin la portée philosophique de ce résultat (cf. § 12).

### 7. Systèmes hiérarchiques.

Dans le système évolutif modélisant un organisme, on distingue différents niveaux: atomique, moléculaire, infra-cellulaire, cellulaire, tissulaire, grands systèmes, les composants d'un niveau étant obtenus par recollement d'un pattern du niveau précédent. Cette propriété caractérise ce que nous appelons un système hiérarchique.

*Un système hiérarchique* est un système évolutif dans lequel les objets sont partitionnés en un nombre fini de niveaux, disons de 1 à  $m$ , de sorte qu'un objet de niveau  $n+1$  soit colimite d'au moins un pattern d'objets liés du niveau  $n$ .

En particulier, on peut construire un système hiérarchique à partir d'une catégorie par itération du processus de complexification, comme étudié au paragraphe précédent, les objets du niveau  $n+1$  étant ceux émergeant dans la  $n$ -ième complexification.

Les différents niveaux d'un système hiérarchique sont 'enchevêtrés', au sens qu'il existe des liens entre objets de niveaux différents, tant dans le sens croissant que décroissant. Un objet de niveau  $n$  joue un double rôle ('Janus'): c'est un objet 'complexe' relativement à une de ses décompositions formée par un pattern de niveau  $n-1$  qu'il recolle; mais en même temps il apparaît comme un objet 'simple' s'il est considéré en tant qu'entité, en particulier relativement à un objet de niveau  $n+1$  à l'organisation interne duquel il appartient (ce qui montre toute l'ambiguïté du mot 'complexe!')

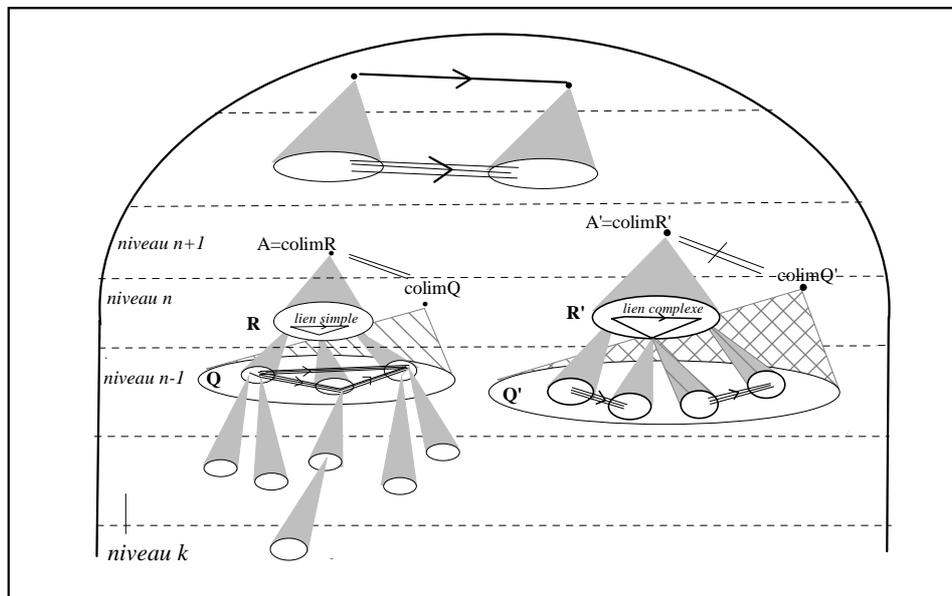
*Le problème du réductionnisme* est de savoir en quelle mesure toute la structure qui émerge à un niveau supérieur est déjà implicitement contenue dans les niveaux inférieurs et ne correspond donc qu'à un déploiement dynamique des

informations fournies par ceux-ci. Par exemple, jusqu'à quel point la biologie moléculaire permet-elle de rendre compte du comportement global de l'organisme? Nous allons préciser ce problème en utilisant les résultats du paragraphe précédent.

Par hypothèse, un objet du niveau 2 est colimite d'(au moins) un pattern d'objets liés du niveau 1 et, par définition d'une colimite, ses 'actions' sur les autres objets du système correspondent aux actions collectives de ce pattern. En ce sens elles sont implicitement contenues dans l'assemblée cohérente du niveau 1 que constitue ce pattern. Peut-on en dire autant des objets de niveau supérieur à 2?

Considérons un objet  $A$  de niveau  $n+1$ , pour  $n > 1$ . Il est colimite d'un pattern  $\mathbf{R}$  d'objets liés du niveau  $n$ . Mais chacun des objets de  $\mathbf{R}$  est lui-même colimite d'un pattern  $\mathbf{P}_i$  d'objets liés du niveau  $n-1$ . On dira que  $A$  est *colimite itérée* des patterns  $\mathbf{P}_i$  via  $\mathbf{R}$ . En 'redescendant',  $A$  se présenterait comme colimite  $(n-k)$ -itérée de patterns du niveau  $k$  via toute une suite de patterns des niveaux intermédiaires.

*Une colimite  $(n-k)$ -itérée* est définie par récurrence: c'est la colimite d'un pattern dont chaque objet est lui-même une colimite  $(n-k-1)$ -itérée.



Ceci signifie que  $A$  admet une sorte de structure fractale (cf. Le Moigne 1990), dont les composants à chaque étage intermédiaire se ramifient eux-mêmes, mais avec en plus des corrélations entre ces ramifications provenant des

contraintes introduites par les liens 'horizontaux' distingués entre ces composants à leur niveau. Ceci donne une grande souplesse de comportement. En effet, nous savons qu'un objet complexe est colimite de toute une classe de patterns fonctionnellement équivalents mais dont chacun représente une décomposition particulière de l'objet. Ici, les composants d'un niveau vont eux-mêmes être multiplement décomposables de cette façon, et ce jusqu'à obtenir des objets et liens de niveau  $k$ . Par analogie avec la Thermodynamique, on pourrait définir *l'entropie d'ordre  $k$  de  $A$*  comme le nombre de telles décompositions ramifiées différentes dont il est colimite itérée. Cette entropie donne une mesure de la flexibilité de  $A$ , au sens du nombre de descriptions fonctionnelles équivalentes qu'on peut en donner. Mais (contrairement à Rosen 1985), nous ne considérons pas que c'est une mesure de la complexité 'réelle' de  $A$ . Pour mesurer cette dernière, il faut chercher la hauteur minimale d'une telle décomposition, à savoir combien d'étages intermédiaires sont 'réellement' nécessaires pour retrouver  $A$  à partir du niveau  $k$  (une question analogue est étudiée par Klir (1985) dans sa théorie de la reconstructibilité).

A la limite ceci se ramène au problème de savoir si, parmi toutes ces décompositions possibles de  $A$  en colimite itérée, il en est une qui 'saute les étages intermédiaires', c'est-à-dire si  $A$  peut aussi être présenté comme une simple colimite d'un 'large' pattern de niveau  $k$  construit de sorte qu'il encode toute l'information fournie par les niveaux intermédiaires; on dira alors que  $A$  est réductible au niveau  $k$ . Nous allons voir que ce n'est pas toujours possible.

Un objet de niveau  $n+1$  sera dit *réductible au niveau  $k$*  (ou  $k$ -réductible), pour un  $k < n+1$ , s'il existe un pattern d'objets liés de niveau inférieur ou égal à  $k$  dont il est la colimite.

Par définition, tout objet du niveau  $n+1$  est  $n$ -réductible. Mais est-il aussi  $k$ -réductible, pour un  $k < n$ ? Nous avons vu au paragraphe précédent que, dans le cas d'une hiérarchie construite par complexifications successives, un objet du niveau  $n+1$  peut ne pas être  $(n-1)$ -réductible dès lors que le pattern du niveau  $n$  qu'il recolle comporte des liens complexes. Ce résultat va être étendu et précisé pour un système hiérarchique quelconque. Pour cela, il faut distinguer différentes sortes de liens dans un tel système.

Etant donnés deux objets de niveau  $n$ , un lien entre eux est dit  *$n$ -simple* s'il

est le recollement d'une gerbe entre deux patterns de niveau  $n-1$ . Il est dit *n-complexe* s'il est obtenu par combinaison de liens  $n$ -simples recollant des gerbes non-adjacentes, de sorte qu'il ne soit pas lui-même  $n$ -simple.

Avec ces définitions, la méthode utilisée au paragraphe précédent est encore valable en y remplaçant partout simple ou complexe par  $n$ -simple ou  $n$ -complexe. Ainsi on montre qu'un objet  $A'$  du niveau  $n+1$  peut ne pas être réductible au niveau  $n-1$  (ni a fortiori à des niveaux inférieurs) s'il est le recollement d'un pattern  $\mathbf{R}'$  du niveau  $n$  dont certains liens distingués sont  $n$ -complexes. Au contraire un objet  $A$  recollant un pattern dont les liens sont  $n$ -simples sera  $(n-1)$ -réductible.

On donne facilement des exemples concrets montrant la différence entre objet complexe réductible ou non-réductible. Par exemple on peut comparer une 'Europe des nations' et ce que serait une 'Europe des peuples' où les nations se fondraient dans une entité plus large. Dans le système modélisant la société occidentale, avec ses individus et ses différents groupes sociaux, la seconde serait, relativement au niveau des individus, une simple colimite; par contre la première est une colimite itérée non réductible à une simple colimite, car tous les liens institutionnels doivent y être médiatisés par les états membres,

Nous n'insisterons pas sur ces exemples évidents, mais nous allons développer un exemple de nature physique plus instructif, qui met bien en évidence la différence entre les notions réductible ou non-réductible au niveau 1. Il s'agit de la comparaison entre la formation d'un cristal et d'un quasi-cristal. On se place dans le système hiérarchique des corps chimiques, avec les atomes et leurs différents liens au niveau 1. En suivant ce qu'écrit Penrose (1992), nous allons voir qu'un cristal et un quasi-cristal se présentent comme des objets du niveau 3, mais le premier est 1-réductible, alors que le second ne l'est pas. En effet, ils se construisent l'un et l'autre de la même façon en 2 étapes:

a) Formation d'agrégats d'atomes s'assemblant selon divers motifs; ces agrégats une fois individués sont représentés sous forme d'objets de niveau 2 recollant le pattern d'atomes correspondant au motif. Remarquons qu'à un tel objet de niveau 2 on peut bien associer (comme l'indique Penrose) une superposition linéaire quantique d'arrangements différents d'atomes, à savoir ses diverses décompositions fonctionnellement équivalentes.

b) Ensuite certains de ces agrégats vont s'assembler pour former des

conglomérats plus grands avec une topologie précise, et la configuration optimale (ayant l'énergie la plus basse) engendrera le (quasi-)cristal (par ce que Penrose appelle la procédure quantique R). Celui-ci émerge donc au niveau 3, comme colimite d'un pattern du niveau 2 représentant le conglomérat, une fois ce pattern transformé en assemblée cohérente par renforcement de ses liens (passage à la configuration optimale). On peut aussi le considérer comme colimite itérée des agrégats intervenant dans le conglomérat, et l'émergence de cette colimite itérée, qui traduit la procédure R, revient encore à actualiser de manière unique la superposition quantique de toutes les décompositions atomiques du (quasi-)cristal.

Mais la différence entre un cristal et un quasi-cristal vient du fait suivant: dans le cas d'un quasi-cristal, la deuxième opération ne peut pas être court-circuitée, car le conglomérat assemble des agrégats de nature différente; au contraire, pour un cristal, il s'agit d'agrégats de même nature, sans apport d'information 'horizontale' supplémentaire, de sorte que le cristal peut être décrit directement comme colimite d'un 'grand' pattern d'atomes. Le cristal est donc 1-réductible, tandis que le quasi-cristal ne l'est pas.

Revenons au problème général de la réduction d'un objet complexe à des niveaux inférieurs. Nous avons étudié le passage entre les niveaux  $n+1$  et  $n-1$ . Pour donner un critère permettant de savoir si un objet du niveau  $n+1$  peut être réduit à des niveaux inférieurs au niveau  $n-1$ , donc si l'on peut 'sauter plusieurs intermédiaires' (et non seulement le niveau  $n$ ), il faut encore raffiner la définition des liens simples, en considérant des gerbes dont les liens sont ou non eux-mêmes simples.

*Un lien  $(n,k)$ -simple* est un lien entre objets du niveau  $n$  défini par récurrence comme suit: Disons qu'un lien est  $(k+1,k)$ -simple s'il est  $k$ -simple, et supposons défini un lien  $(n-1,k)$ -simple; un lien est  $(n,k)$ -simple s'il est le recollement d'une gerbe dont tous les liens sont  $(n-1,k)$ -simples.

*Théorème.* Soit  $A$  un objet du niveau  $n+1$ . S'il est colimite d'un pattern dont tous les liens sont  $(n,k)$ -simples, alors  $A$  est  $k$ -réductible. Dans le cas contraire, il peut ne pas être  $k$ -réductible.

Les liens simples renvoient à des propriétés des objets qu'ils relient dont l'information est directement contenue dans les niveaux inférieurs. Par contre il

n'en est pas de même pour les 'liens complexes' obtenus par combinaison de liens  $(n,k)$ -simples recollant des gerbes non-adjacentes, de sorte qu'ils passent par l'intermédiaire d'objets intervenant simultanément avec deux organisations internes différentes (deux patterns ayant la même colimite). En effet ceux-ci acquièrent toute la richesse et la plasticité introduites au niveau  $n+1$  par les propriétés mixtes provenant de la coexistence de ces deux décompositions et de l'effet de 'balancement' entre elles. Donc les liens complexes, à la différence des liens simples, représentent des propriétés n'émergeant qu'au niveau  $n+1$ . Nous verrons plus loin (§ 12) que ces résultats ont des conséquences importantes du point de vue philosophique, en permettant de préciser la notion de réductionnisme émergentiste proposée par Bunge (1979).

### 8. Emergence de l'identité d'un objet complexe.

Jusqu'ici nous n'avons parlé d'un objet (ou composant)  $B$  d'un système évolutif qu'en spécifiant à quel instant  $t$  on se place. Pourtant implicitement nous pensons que cet objet 'perdure' au cours des changements, du moment de son émergence jusqu'à sa disparition, même s'il y a éventuellement des modifications dans sa composition interne. Ceci pose le problème de l'identité ('Genidentité' au sens de Helmholtz) entre deux 'objets' considérés à deux instants différents: quand pouvons-nous dire qu'il s'agit bien du 'même objet'? Par exemple comment reconnaît-on une cellule en tant que telle?

Dans un système évolutif, les états successifs de  $B$  sont modélisés par les images  $Bt'$  de  $B$  par les foncteurs transition de  $t$  vers  $t' > t$ ; et l'objet, dans sa continuité, serait modélisé par la trajectoire  $\mathbf{B}$  formée de tous ces états successifs (jusqu'au moment où l'état devient 0, ce qui traduit la mort de l'objet). Mais comment son organisation interne va-t-elle évoluer?

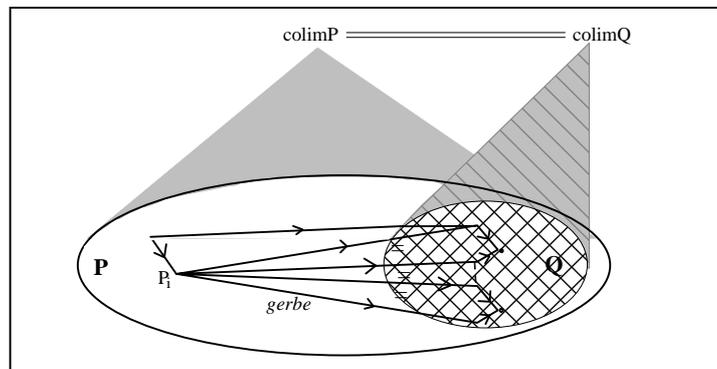
Pour préciser cette question, supposons que  $B$  émerge à l'instant  $t$  comme recollement d'un certain pattern. Au cours du temps, les composants et liens de ce pattern se transforment. Jusqu'à quel point les transformations de  $B$  et de ce pattern restent-elles corrélées? Certes dans des structures très stables, il se peut qu'en  $t'$  le pattern transformé admette encore  $Bt'$  pour colimite. Mais dans les systèmes auto-régulés, il en est rarement ainsi, et l'objet complexe  $\mathbf{B}$  va acquérir une identité propre, indépendante de la variation de ses composants. Par exemple, tous les constituants d'une cellule se renouvellent progressivement sans affecter son existence; les membres d'une association changeront, éventuellement ses

statuts se modifieront, et pourtant si ces changements sont graduels, elle survivra et conservera son identité légale, représentée par son nom.

Pour modéliser cette situation, nous utiliserons la propriété qu'a un objet complexe d'admettre plusieurs décompositions fonctionnellement équivalentes (Rappelons que cette importante propriété de morcellement était déjà à la base de la notion de lien complexe.) Et nous affinerons ce résultat en donnant une condition suffisante (mais non nécessaire!) pour que deux patterns aient la même colimite. Rappelons la définition:

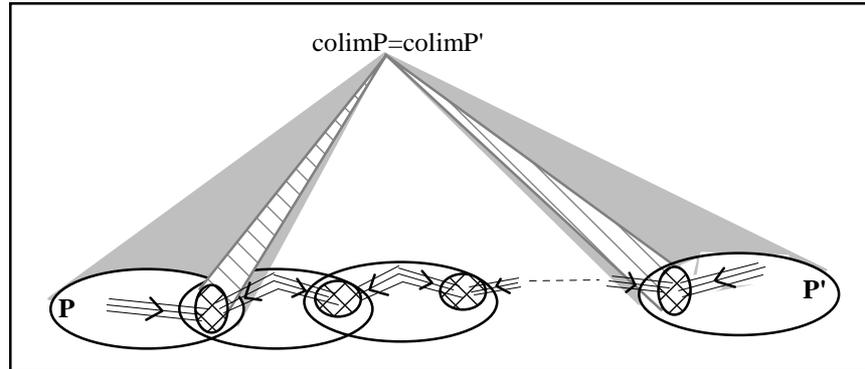
*Un sous-pattern représentatif* d'un pattern **P** est un sous-pattern **Q** de **P** ayant la même colimite que **P**.

En utilisant les résultats du paragraphe 4, on voit qu'il en est ainsi notamment s'il existe une gerbe de **Q** vers **P**, de sorte que chaque objet  $P_i$  de **P** soit relié à au moins un objet de **Q**, et que s'il est relié à plusieurs, ses différents liens transmettent des informations compatibles à **Q**. Un exemple typique est celui des 'représentants' d'une nation: chaque électeur vote pour au moins un représentant, et s'il vote pour plusieurs il les choisit de sorte qu'ils s'entendent sur la politique à suivre.



Par transitivité, deux patterns **P** et **P'** auront la même colimite s'ils sont connectés par une suite de patterns telle que deux patterns consécutifs aient un sous-pattern représentatif commun; d'où le critère:

*Critère.* Les patterns **P** et **P'** ont la même colimite en particulier s'il existe un zig-zag de gerbes les reliant comme indiqué sur la figure suivante, chaque gerbe allant d'un pattern vers un sous-pattern représentatif.

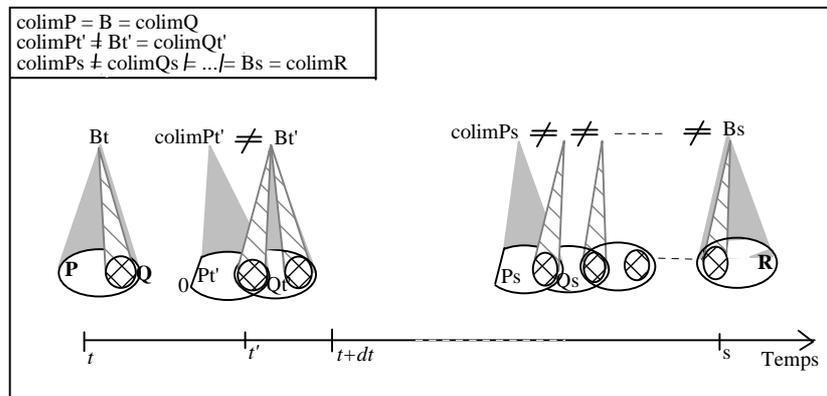


Nous allons appliquer ce critère pour étudier comment un objet complexe qui a émergé par renforcement des liens d'un pattern va prendre la préséance sur ce pattern, et acquérir ainsi une existence propre, indépendante de l'assemblée cohérente qu'il représentait initialement, et ce à condition que le changement de son organisation interne soit assez graduel pour ne pas perturber le fonctionnement.

Considérons un objet  $B$  de niveau  $n+1$  dans un système hiérarchique évolutif. A l'instant  $t$ , son état  $B$  est (par définition des niveaux) colimite d'au moins un pattern  $P$  d'objets liés du niveau  $n$ . A un instant ultérieur  $t'$ , l'objet ainsi que le pattern auront évolué, notons  $Bt'$  et  $Pt'$  leurs nouveaux états. Il se peut que  $Bt'$  soit encore colimite de  $Pt'$ , mais ce n'est pas toujours le cas: entre temps, un grand nombre de composants de  $P$  ont pu être détruits, ou simplement avoir rompu leurs liens à  $B$  (un membre d'une association peut en partir); inversement, de nouveaux objets peuvent s'être reliés à  $B$  (nouveaux adhérents) et avoir pris la place d'anciens composants. Toutefois il y aura une période, l'empan de stabilité de  $B$  en  $t$ , pendant laquelle il existe un sous-pattern  $Q$  représentatif de  $P$  dont les états successifs continuent à représenter une décomposition de niveau  $n$  des nouveaux états de  $B$  (ce qu'on abrège en disant que  $Q$  'reste' une décomposition de  $B$ ). Pour une population de protéines, par exemple, cet empan est relié à la demi-vie.

*L'empan de stabilité* de  $B$  en  $t$  est le plus grand réel  $dt$  tel que, pour tout  $t'$  entre  $t$  et  $t+dt$ , il existe un pattern  $Q$  du niveau  $n$  en  $t$  admettant  $B$  pour recollement et dont les transformés successifs  $Qt'$  continuent à avoir pour colimite le nouvel état  $Bt'$  de  $B$  en  $t'$ .

Lorsque l'empan de stabilité n'est pas trop court,  $B$  change assez lentement pour assurer une continuité temporaire dans sa composition et son organisation interne permettant de reconnaître qu'il s'agit bien du 'même' objet. Pour mesurer le changement dans l'organisation interne  $P$  de  $B$  entre  $t$  et un instant  $s$  très éloigné, il faut comparer le pattern  $P_s$  transformé de  $P$  à un pattern  $R$  représentant une décomposition de  $B_s$  de niveau  $n$ : tous deux sont temporellement reliés par une suite de patterns dont chacun représente une organisation interne (d'un état) de  $B$  entre  $t$  et  $s$ , et dont deux successifs ont des sous-patterns qui se déduisent l'un de l'autre tout en restant des décompositions de  $B$  pendant toute la durée d'un empan de stabilité.



En particulier, supposons que  $B$  a émergé en  $t$  en tant qu'objet d'ordre supérieur représentant l'assemblée cohérente  $P$  prise dans son intégralité (par exemple dans une complexification relativement à une stratégie demandant le recollement du pattern  $P$ ). Jusqu'en  $t+dt$ , l'évolution propre de l'objet  $B$  et celle de l'assemblée  $P$  restent corrélées, mais ensuite elles peuvent dévier. Ainsi  $B$  acquiert une identité complexe propre, indépendante de  $P$ , ses états successifs admettant des décompositions de niveau  $n$  qui se déduisent progressivement les unes des autres par le processus décrit ci-dessus (existence à chaque instant d'une organisation interne conservée temporairement pendant un empan de stabilité). On dira qu'il y a *émergence de l'identité complexe propre de  $B$*  (au niveau  $n$ ).

La variation de l'empan de stabilité renseigne sur la rapidité des changements. Dans les périodes d'équilibre, cet empan est long, alors qu'il est plus court dans les périodes de développement ou de déclin. Ces variations sont étudiées dans (EV 1993), où l'on introduit aussi les empan de renouvellement et

de persistance. La diminution de l'empan de stabilité est utilisée comme marqueur dans la théorie du vieillissement d'un organisme par 'cascade de dé-resynchronisations' proposée dans (EV 1993a).

### 9. Emergence relative à des observateurs et/ou acteurs.

Jusqu'ici nous avons analysé l'émergence d'un objet complexe dans un système évolutif par un processus en 3 phases: Un pattern acquiert une existence fonctionnelle par ses liens collectifs vers certains objets, et se transforme en assemblée cohérente par renforcement des liens distingués entre ses composants; celle-ci émerge en tant que telle en s'intégrant pour constituer un objet d'ordre supérieur; enfin au cours du temps, l'objet complexe ainsi formé se détache de l'assemblée qui l'a engendré et prend une identité propre. Cette émergence peut être qualifiée de *systémique* ('ontologique' dans la terminologie de Bunge, 1979), car elle décrit la formation de nouveaux objets dans le système d'un point de vue formel 'absolu', et sans attribution de causes, ni proximales ni téléologiques.

Mais il faut aussi distinguer une '*émergence relative*', en rapport avec certains observateurs ou agents internes n'ayant que des informations plus ou moins partielles sur le système, et qui vont détecter dans leur paysage des objets qui n'y apparaissaient pas au préalable. Ces objets peuvent venir de se former, mais ils peuvent aussi avoir pré-existé dans le système sans être encore perceptibles pour les agents; par exemple, les galaxies existaient dans l'univers avant l'homme; mais il lui a fallu construire des télescopes assez puissants pour qu'elles 'émergent' dans son paysage. De plus, l'émergence peut être seulement de nature fonctionnelle, comme une assemblée cohérente qui impose des contraintes à un agent par l'intermédiaire d'un lien collectif. Ou elle peut être de nature 'épistémologique', comme dans le cas où l'existence d'une nouvelle association est connue par voie légale.

Pour clarifier cette situation, nous nous placerons dans le cadre des *Systèmes Evolutifs avec Mémoire* (SEM), qui sont des systèmes évolutifs particuliers introduits pour modéliser des systèmes naturels auto-régulés, tels des systèmes biologiques ou sociologiques. Leur dynamique est modulée par les interactions entre des organes de contrôle internes, modélisés par les centres de régulation (CR); ceux-ci opèrent en parallèle, chacun à son niveau et selon sa propre temporalité, et leurs stratégies sont complémentaires et/ou compétitives; les

résultats des stratégies sont mémorisés pour permettre une meilleure adaptation future. Il n'est pas question ici de reprendre l'étude des SEM faite dans une série d'articles (cf. Références); il suffira de rappeler les quelques notions dont nous aurons besoin.

*Un SEM* est un système évolutif hiérarchique sur un temps de référence continu, dans lequel on distingue plusieurs sous-systèmes évolutifs:

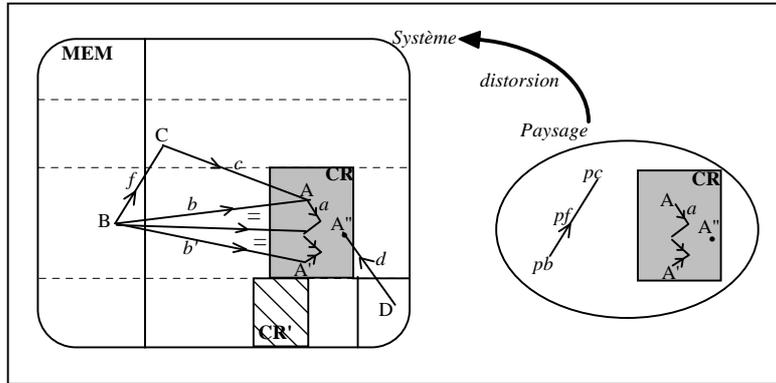
- Une *Mémoire* (Mem) hiérarchique qui se développe au cours du temps,
- Des *Centres de Régulations* internes (CR) dont les composants, appelés agents, ont des niveaux de complexité différents selon le CR; chaque CR a une échelle de temps propre, formée d'une suite d'instantanés particuliers du temps de référence, selon laquelle il opère un processus d'apprentissage par essais-erreurs. Et il a un accès différentiel à la mémoire centrale.

Les CR de niveau inférieur représentent des modules spécialisés en relation avec l'extérieur; dans les niveaux supérieurs, on a des CR associatifs supervisant plusieurs CR inférieurs. Le réseau des CR ne forme pas à proprement parler une hiérarchie, car il peut y avoir plusieurs CR de même niveau, éventuellement avec des temporalités différentes. Penser à l'organigramme des différents départements d'une entreprise.

Chaque CR opère par étapes dont la durée s'étend entre deux instants successifs de son échelle de temps. Le déroulement d'une étape, disons de  $t$  à  $t+d$ , se divise en plusieurs phases plus ou moins concomitantes: formation d'une représentation interne du système, le paysage du CR; recherche sur celui-ci des objectifs à atteindre et choix d'une stratégie admissible; commandes aux effecteurs pour mettre en oeuvre cette stratégie; évaluation du résultat obtenu et sa mémorisation. Nous allons analyser comment ces différentes phases se relient au problème de l'émergence

1. En tant qu'organe d'observation, le CR regroupe les informations sur l'état du système parvenant à ses agents pendant l'étape. Les agents n'ont pas accès directement au système: un objet  $B$  n'est observable qu'au travers de ses liens (ou *aspects*)  $b$  vers le CR, et deux tels liens  $b$  et  $b'$  apportent la même information au CR s'ils sont corrélés par des liens entre agents (on dit qu'ils sont dans la même *perspective*). Le *paysage du CR* en  $t$  est modélisé par une catégorie dont les objets

sont les perspectives  $pb$  d'aspects  $b$  provenant d'objets B du système, d'un niveau assez proche pour être observés pendant le *présent actuel* du CR (première phase de l'étape), et ne variant 'pas trop' pendant l'étape.



Une perspective d'un objet B du système pour le CR est une gerbe du pattern réduit à B vers le pattern formé par le CR; elle est entièrement déterminée par un quelconque de ses liens  $b$ . Le paysage actuel du CR en  $t$  a pour objets les perspectives  $pb$  relatives à des liens  $b$  dont le délai de propagation est inférieur à  $d$ , et qui sont issus d'objets B ayant un niveau voisin de celui du CR et un empan de stabilité supérieur à la durée  $d$  de l'étape. On a un foncteur *distorsion* du paysage vers le système, associant à la perspective  $pb$  l'objet B dont elle est issue.

Le paysage agit comme un filtre; cependant il 'est' le système pour le CR, car la distorsion qu'il introduit relativement à ce système n'est pas discernable par les agents. Un objet ou un lien complexe sera *émergent pour le CR* en  $t$  s'il apparaît dans ce paysage alors qu'il ne figurait pas dans le paysage précédent.

2. Une fois le paysage formé, le CR, en tant qu'organe de régulation, recherche et évalue les stratégies admissibles sur celui-ci, compte tenu des résultats de l'étape précédente et des informations que donne le paysage sur l'état interne du système, les diverses contraintes, et éventuellement les résultats mémorisés de situations antérieures similaires. Une de ces stratégies, disons **S**, est choisie sur ce paysage, les objectifs à atteindre pouvant être déterminés par les agents, ou leur être imposés 'de l'extérieur' (par exemple par un CR supérieur).

3. Le CR transmet des commandes aux effecteurs, toujours à travers le paysage, pour mettre en oeuvre cette stratégie **S**. Le paysage anticipé pour la fin de



propagation moyen  $p$  des divers liens qui interviennent dans le paysage et dans la stratégie, et inférieure aux emfans de stabilité des objets qui y sont utilisés.

### 10. Rôle de l'émergence dans le comportement du système.

Nous venons de voir comment un CR opère sur son paysage et selon sa propre temporalité. A un instant donné, les stratégies en cours dans les différents paysages sont répercutées au système, et y entrent en compétition entre elles et avec les contraintes externes du système. Ce processus est source d'une grande flexibilité dans le comportement global du système. Mais il peut aussi conduire à un dysfonctionnement immédiat ou différé pour certains CR, en empêchant que les objectifs de leurs stratégies soient atteints.

Dans les cas simples, l'équilibre sera rétabli par le CR dès l'étape suivante. Dans d'autres cas, il y a risque de blocage, soit qu'aucune stratégie admissible ne puisse être trouvée sur le paysage, soit que la stratégie choisie par les agents ne puisse pas être mise en oeuvre; on parle alors de *fracture* pour le CR. Et si celle-ci persiste pendant plusieurs étapes, il s'agira d'une véritable *dyschronie*. Fractures et dyschronies peuvent nécessiter une intervention externe au CR (le plus souvent venant d'un CR de niveau supérieur) pour être surmontées.

Montrons comment les processus d'émergence jouent un rôle important pour causer, révéler, ou réparer les dysfonctionnements et fractures. Avant d'analyser le comportement global du système, nous considérons d'abord un CR particulier et son étape décrite au paragraphe précédent.

1. *Rôle négatif de l'émergence.* Il y aura dysfonctionnement si les objectifs de la stratégie  $S$  choisie ne sont pas atteints à la fin de l'étape, ce qui est modélisé par le fait que le foncteur comparaison entre le paysage anticipé PA et le paysage effectivement obtenu à l'étape suivante n'est pas un isomorphisme.

- Ceci peut se traduire par l'émergence dans ce nouveau paysage d'objets non prévus (de sorte que le foncteur n'est pas surjectif), que ce soit une perspective d'un objet du système jusqu'alors non observable par les agents et qui fait irruption dans leur paysage, ou d'un objet qui vient d'émerger dans le système; par exemple entrée dans une cellule d'un antigène.

- Ou au contraire, il peut manquer un objet qui devrait y figurer (objet de

PA appliqué sur 0 par le foncteur), qu'il s'agisse d'un objet du paysage antérieur à conserver, ou d'un objet qui aurait dû émerger comme colimite d'un pattern que la stratégie demandait de recoller; par exemple construction non achevée à temps.

- Ces mêmes processus risquent de causer plus gravement une fracture (c'est-à-dire interrompre l'étape avant sa complétion), éventuellement suivie de dyschronie, par non-respect des contraintes structurales temporelles du CR (cf. plus haut). Ainsi l'émergence (systémique ou seulement relative au paysage) de nouveaux objets ou liens complexes peut empêcher ou ralentir l'accès à une information ou à une ressource indispensable, ou augmenter les délais de propagation. Par exemple, un obstacle bloquant la circulation créera un embouteillage qui ne sera résorbé que lentement; des simulations de cette situation mettent en évidence la forte influence qu'exercent sur le retour au flux normal les temporalités propres aux différents CR (ici, le temps de réaction des conducteurs à la reprise du trafic).

2. *Rôle constructeur de l'émergence.* Au contraire, l'émergence de nouveaux objets ou liens complexes dans le paysage peut avoir pour effet de réparer une fracture ou de surmonter un blocage. Cette émergence, éventuellement suscitée par l'intervention d'agents de niveau supérieur en vue de débloquer la situation, va suffisamment modifier le paysage du CR pour permettre (ou imposer) le choix d'une nouvelle stratégie de réparation. Par exemple, lorsque l'ADN d'une bactérie a subi des dommages importants, le processus de réplication est bloqué par débordement des mécanismes simples de réparation du niveau macromoléculaire; le niveau cellulaire peut alors déclencher le système SOS (Radman 1975) dont les produits, en émergeant dans le paysage macromoléculaire, lui imposent une stratégie de reprise de la réplication sans appariement strict des bases (conduisant éventuellement à une mutation).

Dans ce cas, l'émergence est à double face, ses deux effets pouvant éventuellement être décalés dans le temps: considérée du point de vue du CR qu'elle vient débloquer, elle s'impose 'de l'extérieur' et est 'subie' (même si ses résultats sont positifs). Pour des agents de niveau supérieur qui la suscitent, c'est une émergence 'programmée' (pour recoller un certain pattern) dans leur choix de stratégie; cette stratégie peut n'être que le rappel d'une stratégie mémorisée (comme dans le cas où un mécanisme de réparation déjà utilisé est réactivé), ou être élaborée spécialement pour débloquer la situation. C'est en ce dernier sens que les fractures peuvent avoir un rôle créateur et non seulement destructeur, en

obligeant à une certaine innovation.

Nous venons de considérer la situation du point de vue d'un CR particulier. Nous allons maintenant revenir au système lui-même, et analyser le rôle qu'y jouent les interactions entre les différents CR. Ceci va mettre en évidence divers processus donnant une certaine souplesse mais risquant de conduire à l'émergence (ce mot étant pris ici dans son sens usuel d'apparition!) de fractures. Nous désignons par  $K_s$  l'état du système à un instant  $s$ .

1. *Répercussion au système de la stratégie choisie sur un paysage.* Soit  $CR_i$  un CR particulier. Comme les échelles de temps des CR sont différentes, l'étape de  $CR_i$  en cours à l'instant  $s$  peut en être à l'une quelconque de ses phases; supposons que ce soit la phase de commande (les autres phases n'ayant pas d'effet extérieur au CR). Autrement dit,  $CR_i$  a déjà formé son paysage actuel, disons  $\Pi_i$ , et choisi une stratégie  $S_i$  sur celui-ci; et les commandes de  $S_i$  sont transmises par les agents aux effecteurs au travers du paysage. Mais la mise en oeuvre effective de la stratégie ne va pas se faire sur le paysage (ce n'est qu'une image 'épistémologique' au sens de Vallée); elle doit se faire sur le système lui-même. Ceci est une première cause d'erreurs, car les commandes de  $S_i$  ne seront répercutées à  $K_s$  qu'avec une distorsion (via le foncteur distorsion  $d_i$  de  $\Pi_i$  vers  $K_s$ ): si  $S_i$  impose de recoller un pattern  $Q_i$  du paysage, c'est en fait le recollement du pattern image de  $Q_i$  par  $d_i$  qui devrait émerger dans  $K_s$ ; et de même pour les autres commandes de  $S_i$ . Nous noterons  $S'_i$  la stratégie ainsi répercutée sur  $K_s$ .

2. *Compétition entre les stratégies répercutées.* Les stratégies  $S'_i$  répercutées par les différents CR devraient toutes pouvoir être effectuées sur  $K_s$  pour que les objectifs de ces CR soient atteints. Ceci reviendrait à construire la complexification de  $K_s$  relativement à une stratégie  $S'$  intégrant les  $S'_i$  et éventuellement contenant des commandes propres au système indépendamment des  $CR_i$ , par exemple imposées par des contraintes externes.

La stratégie  $S'$  serait bien déterminée si toutes les commandes des différentes stratégies  $S'_i$  étaient compatibles entre elles, en particulier si les  $CR_i$  opéraient strictement en parallèle, en utilisant des ressources indépendantes les unes des autres. Mais dans un système complexe où les CR interagissent entre eux, il n'en sera pas ainsi. Une partie au moins des ressources (informationnelles ou énergétiques) sont partagées, et il peut y avoir conflit entre plusieurs CR,

disons entre  $CR_i$  et  $CR_j$ . Penser à une entreprise où plusieurs ateliers dépendent d'un même réparateur et qui tombent en panne au même moment.

De plus, et c'est essentiel, les périodes des CR (c'est-à-dire la durée moyenne de leurs étapes) sont différentes, de sorte que l'effectuation d'une stratégie peut s'étendre sur des durées variables. En particulier la période d'un  $CR_i$  de niveau supérieur est d'un ordre de grandeur supérieur à celui d'un  $CR_j$  de niveau inférieur. Il en résulte que toute une suite de modifications sera effectuée au cours des étapes successives de  $CR_j$  se déroulant pendant l'étape en cours de  $CR_i$ , sans que l'information correspondante parvienne au fur et à mesure à  $CR_i$ , vu la longueur des délais de propagation. Ces changements peuvent rendre impossible la mise en oeuvre de  $S_j$ , par exemple, si  $S_i'$  cherche à recoller des objets qui ont été supprimés entre temps sous l'effet des stratégies de  $CR_j$ .

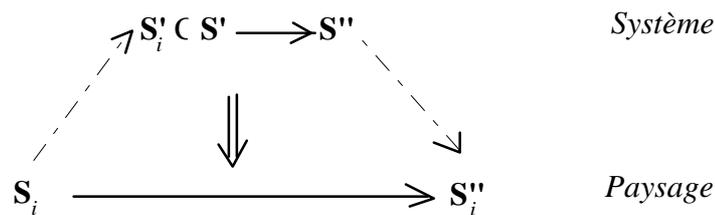
La conclusion est qu'il risque de ne pas exister de stratégie  $S'$  intégrant toutes les commandes répercutées par les différents CR, et dans ce cas la stratégie  $S''$  qui sera effectivement appliquée sur  $K_s$  ne sera qu'un compromis entre elles.

3. *Evaluation du résultat par les CR.* L'effectuation de la stratégie  $S''$  aura généralement des conséquences pour  $CR_i$  autres que celles qu'aurait eues la stratégie choisie  $S_j$ , pouvant aller jusqu'à causer une fracture dans le paysage  $\Pi_i$ . En effet,  $S''$  peut abandonner certaines commandes de  $S_j$ , et, par intégration de commandes extérieures à  $CR_j$ , changer certains aspects du paysage de  $CR_i$ ; par exemple, l'intégration d'informations tactiles à des informations visuelles conduira à affiner la vision d'un objet en permettant d'interpréter certains traits (reconnaissance d'ombres portées,...). Le résultat sera évalué par  $CR_i$  à l'étape suivante, en comparant le paysage qui avait été anticipé (à savoir la complexification de  $\Pi_i$  par  $S_j$ ) avec le paysage  $\Pi_i'$  qui y sera effectivement obtenu. Le passage de  $\Pi_i$  à  $\Pi_i'$  peut être interprété comme la mise en oeuvre d'une stratégie  $S_i''$  au lieu de la stratégie  $S_j$  choisie.

4. *Mémorisation et rappel des stratégies.* L'un des buts de la stratégie  $S_j$  de  $CR_i$  est de mémoriser la stratégie qui avait été utilisée à l'étape précédente et son résultat, afin de pouvoir s'en servir si la même situation se reproduit ultérieurement. Cette mémorisation sera demandée sous la forme d'un objet complexe  $M_i$  recollant les différentes commandes d'effecteurs. Mais après passage à  $S''$ , ce qui sera mémorisé sera un objet  $M$  (qui deviendra part de la mémoire centrale) correspondant à la mémorisation globale de tous les  $M_i$  après répercussion

au système. Et le rappel ultérieur de  $M_i$  se fera via une perspective de  $M$  dans le paysage de  $CR_i$ . Ceci introduit une double cause d'erreurs, dans la formation de  $M$  et dans son rappel 'en tant que'  $M_i$ . Mais il en résulte aussi une certaine flexibilité dans le choix des stratégies.  $M$  est un objet complexe; son rappel sous forme de commandes d'effecteurs pourra s'exécuter via l'une quelconque de ses décompositions ramifiées, et ce selon les contraintes dues aux interactions entre  $CR$ . Ainsi  $M$  joue le rôle d'un 'cadre' (au sens de Minsky, 1986) avec des cases ('slots' correspondant à ses divers composants) pouvant être remplies différemment selon la situation globale. Par exemple une commande générale de 'prendre un objet sur une table' mobilisera des muscles différents selon la taille de l'objet.

Pour résumer cette discussion (et sans tenir compte du rappel éventuel d'une stratégie mémorisée), on a les transitions:



la première ligne concernant le système lui-même et la seconde, au niveau de  $CR_i$ ; en résultant, chaque flèche introduisant une déformation avec risque de fracture pour  $CR_i$ . Si les transitions obliques sont bien déterminées (la première se faisant via la distorsion  $d_p$ , la seconde via le foncteur comparaison qui évalue le résultat dans le paysage), il n'en est pas de même du passage de  $S'$  à  $S''$ , qui conditionne celui de  $S_i$  à  $S''_i$ . Quelles demandes de  $S'$  seront-elles conservées et lesquelles abandonnées? Ou encore dans la compétition entre les  $CR$ , lesquels l'emporteront-ils?

Ces questions n'ont pas de réponse générale, tout dépendant de la structure du système et de son réseau de  $CR$ . Donnons quelques idées à ce sujet.

- Si les  $CR$  forment une hiérarchie de commande (exemple: une armée), les demandes des niveaux supérieurs, qui s'étendent sur un plus long terme, seront prises en considération en premier lieu. Mais il subsistera une certaine souplesse, car les commandes d'effecteurs complexes qui en résultent pourront être exécutées via différentes décompositions ramifiées de ces commandes.

- Dans les systèmes à distribution parallèle (PDP), la situation est plus

rigide, car il existe généralement un CR 'exécutif' central qui est chargé de mettre un ordre de priorité sur les demandes des autres CR agissant en tant que modules parallèles.

- Dans les SEM généraux, la formation de  $S''$  résulte d'une équilibration, par coordination, compétition, interférences et compensations, entre les différentes stratégies des  $CR_i$  ; on parlera de '*jeu des traces*'. Ce jeu doit tenir compte des différentes contraintes tant externes (par exemple accord avec les lois physiques) qu'internes, en particulier des contraintes temporelles des  $CR_i$  (cf. § 9). Il peut reposer sur des pondérations des différentes stratégies  $S_i$ , pour optimiser le coût global pour le système; c'est le cas des choix 'rationnels' faits par un système intentionnel au sens de Dennett (1990, cf. § 11). En termes analytiques, il peut se traduire par la recherche d'attracteurs pour la dynamique globale, comme dans les modèles néo-connexionnistes de systèmes neuronaux basés sur la Thermodynamique (Hopfield 1982, Changeux et al. 1986, ...); remarquons cependant que ces modèles se limitent à une description au niveau sub-symbolique, à durée limitée, et sans prendre simultanément en compte les interactions entre les différents niveaux comme dans un SEM.

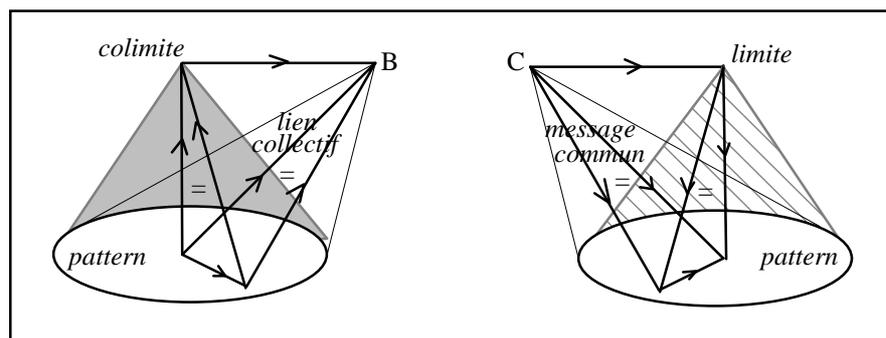
D'une façon générale, dans les systèmes naturels auto-organisés, les stratégies des CR inférieurs à périodes plus courtes l'emporteront à court terme, mais ces CR seront sous le contrôle des CR supérieurs à plus longue période qui leur imposeront des stratégies à plus ou moins long terme, soit pour débloquer une situation, soit pour éviter une fracture à leur propre niveau. Néanmoins il restera toujours une certaine plasticité, donc de l'imprévisible, provenant de la pluralité des décompositions ramifiées d'un objet complexe. Nous avons montré ailleurs comment ce processus conduit à une *dialectique entre CR hétérogènes* de par leur niveau et leur temporalité, qui caractérise le comportement d'un système complexe et montre que toute approximation (ou simulation) par un 'simple' système physique ne peut être valable que "localement et temporairement" (comme le suggérait Rosen 1986). Comme nous l'analyserons plus loin (§ 12), c'est à cette dialectique et éventuellement aux fractures dont elle est responsable (et non aux choix des seuls CR) qu'il faut attribuer les phénomènes d'émergence, que ceux-ci soient de nature systémique ou seulement relatifs à un CR particulier.

### 11. Emergence par classification. Emergence organisationnelle.

Les processus d'émergence analysés jusqu'ici correspondent à la formation ou à la détection d'objets ou liens complexes dans un système, par association de composants plus 'simples'. On peut distinguer d'autres processus d'émergence, de nature classificatoire ou organisationnelle, mais nous allons montrer comment les ramener formellement au cas précédent, à condition de se placer dans un cadre approprié.

L'émergence par association actualise la potentialité pour les objets d'un pattern d'agir en commun. On peut aussi s'intéresser à leur capacité à capter ensemble un message dont chacun ne reçoit qu'une partie, et l'actualiser en un objet classifiant de tels messages. Cette *émergence par classification* se décrit formellement exactement comme dans le cas précédent, sauf qu'il faut 'inverser toutes les flèches'.

*Un message commun* à un pattern, issu d'un certain objet C du système, est une famille de liens individuels de C vers les composants du pattern, corrélés par les liens distingués du pattern. On appelle *limite* (ou *classifiant*) du pattern un objet L qui classe ces messages communs au sens où chacun d'eux se factorise de manière unique au travers d'un message commun 'caractéristique' issu de L. (Du point de vue catégorique, cette limite (projective) s'identifie à la colimite du pattern dans la catégorie 'opposée' ayant les mêmes objets mais des flèches inversées.)



Tout ce qui a été dit à propos du recollement se transpose au cas du classifiant. Ainsi la formation du classifiant d'un pattern se divise en 3 phases: renforcement des liens distingués du pattern permettant de mieux capter des messages communs, émergence par complexification du classifiant en tant que

représentant unique du pattern, ensuite émergence pour ce classifiant d'une identité propre indépendante du pattern qui lui a servi de support (ce qui repose encore sur le fait que deux patterns différents peuvent avoir la même limite). La construction de la complexification décrite auparavant, avec ses liens simples et complexes, s'étend au cas où la stratégie donnée contient de plus des patterns 'à classifier', c'est-à-dire auxquels on ajoutera une limite. Et par itération on peut construire des 'classifiants de classifiants' (limites itérées), admettant de multiples décompositions ramifiées, équivalentes du point de vue de la réception de messages (et non, comme pour les colimites itérées, du point de vue des actions collectives). De même que l'émergence par association, l'émergence par classification peut être systémique, ou seulement relative au paysage de certains agents.

Le classifiant  $L$  classe les messages communs au pattern. Par contre-coup, il contribue aussi à distinguer tous les objets susceptibles de transmettre un tel message à ce pattern, à savoir tous les  $C$  d'où est issu un lien vers  $L$ ; intuitivement ce sont tous les objets qui possèdent la propriété caractéristique que le pattern repère, et donc que  $L$  classe. Ces objets  $C$  et les liens entre eux compatibles avec la transmission de messages communs forment un sous-système du système, qu'on appellera le *domaine de classification* de  $L$  (plus précisément, en considérant  $L$  comme formant un CR à lui seul, il s'agirait de son paysage). On peut dire que l'émergence de  $L$  'internalise' ce sous-système.

De même dans l'émergence par association, on associera au recollement  $A$  d'un pattern le sous-système formé par tous les objets sur lesquels le pattern peut opérer collectivement, et les liens entre eux compatibles avec ces actions; on l'appellera le *domaine d'opération* de  $A$ , et on dira qu'il est 'internalisé' par  $A$ .

Les domaines de classification et d'opération d'un pattern sont des sous-systèmes 'internalisés' (respectivement par le classifiant et le recollement du pattern). Au cours de l'évolution, il peut aussi émerger des sous-systèmes qui, sans être 'internalisés' dans le système, sont caractérisés par une propriété spécifique, et vont jouer un rôle important en modifiant et enrichissant la structure du système. En particulier de tels sous-systèmes peuvent regrouper entre eux des objets ayant préalablement émergé par association ou classification. On parlera à leur endroit d'*émergence organisationnelle*. (En fait, on peut se ramener formellement à une émergence d'un type précédent en se plaçant dans un système plus grand dans

lequel le sous-système deviendra 'internalisé'.) Donnons-en quelques exemples significatifs.

1. *Développement de mémoires spécifiques.* Dans un SEM, la mémorisation de stratégies de plus en plus complexes et de leur résultat (par l'intermédiaire des CR, cf. § 10) conduit à la formation d'une *Mémoire procédurale*, à laquelle les différents CR auront recours dans le choix de leurs stratégies. En particulier celle-ci peut incorporer des *mécanismes de réparation* (tel le système SOS d'une bactérie, évoqué plus haut) qui seront activés au moment d'une fracture, pour permettre de la réparer, éventuellement avec une modification structurelle ou temporelle.

Dans un système neuronal, la formation de classifiants est à la base du développement d'une mémoire sémantique. C'est d'ailleurs ce cas qui a suggéré la notion de classifiant pour décrire la formation d'un concept en deux phases: d'abord différenciation 'agie' d'un pattern d'agents d'un CR inférieur captant un certain type de messages (exemple: dans un CR-couleur, le pattern activé par les objets bleus), puis classification de ceux-ci en un 'CR-concept' (le concept 'bleu') mémorisé (à un niveau supérieur) par le classifiant de ce pattern, dont le domaine de classification représente la classe d'invariance du concept (toutes les représentations d'objets bleus). Ces CR-concepts formeront une *Mémoire Sémantique*, qui s'étend par formation de concepts plus abstraits obtenus comme colimites de patterns de tels concepts 'concrets', liés par des liens complexes.

L'introduction d'une sémantique rend encore plus flexible le 'jeu des traces' entre les stratégies compétitives des différents CR décrit au § 10 (dont nous reprenons les notations). En effet, dans les CR supérieurs, le choix d'une stratégie  $S_i$  pourra être fait sous forme de concept, sans préciser un objet particulier de la classe d'invariance du concept. Il en résulte un nouveau degré de liberté sur le système (pour la formation de la stratégie 'effective'  $S''$ ), en permettant d'en activer l'instance la mieux adaptée compte tenu des stratégies répercutées par les autres CR (cf. EV 1992): ceci donne une double souplesse pour remplir les cases du 'cadre' M qui mémorise la stratégie, provenant d'une part du choix d'une décomposition de M, d'autre part du choix d'une instance particulière des concepts y intervenant.

Les travaux de Psychologie expérimentale (cf. Houdé 1992) mettent bien en évidence les processus d'émergence dans le développement cognitif de l'enfant. D'abord au stade pragmatique, il y a assemblage et mémorisation de groupes

d'éléments 'en contiguïté' (émergence pas association), ce qui est révélé par la réussite aux épreuves d'inclusion de Piaget. Au stade pragmatico-fonctionnel, on voit un début de classification de ceux-ci en classes d'éléments 'substituables', très influencée par le contexte (concept 'agi' sans que sa classe d'invariance soit encore 'internalisée'); enfin au stade fonctionnel, la catégorisation se dégage du contexte et la symbolisation logique se développe (émergence des concepts et de la mémoire sémantique). Houdé propose un 'système polymorphe de calcul et de sens' permettant de dépasser à la fois le constructivisme épistémique de Piaget et celui pragmatique de Varela; comparé à notre modèle, il correspondrait au développement des mémoires procédurale et sémantique, mais en se plaçant au seul niveau d'un CR supérieur 'conscient' (cf. plus loin), sans tenir compte des interactions avec les CR inférieurs.

2. *CR associatifs, intentionnels ou conscients.* Au cours de l'évolution d'un système, il peut y avoir formation de nouveaux CR de niveaux de plus en plus élevés, par regroupement d'objets et liens émergents. Ces CR, à période plus longue, détecteront dans leur paysage des objets préalablement non observables par les autres CR, et ils pourront jouer le rôle de CR associatifs contrôlant des CR inférieurs en suscitant, par leur participation fortement pondérée au 'jeu des traces', l'émergence systémique de nouveaux objets. Un objet A émergent sous l'influence d'un tel CR correspond à une hyperstructure au sens de Baas (1993): dans sa terminologie, les agents du CR seraient les nouveaux 'observateurs' de niveau supérieur, et le pattern que leur stratégie va faire recoller en A définirait les composants de l'hyperstructure et leurs interactions.

Ces CR peuvent développer des aptitudes particulières. Ainsi un CR sera dit *D-intentionnel*, ou système intentionnel au sens de Dennett (1990), s'il agit 'comme si' il était capable d'optimiser son choix de stratégie dans son paysage. Ceci suppose qu'il a un sous-système d'agents 'évaluateurs' (au moins deux, disons + et -), qui permet de classier et comparer selon leur résultat pour le CR les stratégies déjà mémorisées dans des situations analogues et accessibles dans le paysage. Chacun de ces agents classifie un ensemble de stratégies ayant donné un certain résultat; par exemple, le sous-système catégorisé par + sera l'ensemble des stratégies admissibles. La comparaison entre stratégies classifiées par le même évaluateur (disons entre les stratégies admissibles) pourra se faire automatiquement, via la 'force' des liens reliant les stratégies aux évaluateurs.

Lorsque de plus les stratégies sont internalisées dans le paysage par le

classifiant du pattern d'agents qu'elles activent, la comparaison pourra aussi être internalisée dans le paysage; dans ce cas, on parlera d'un *CR intentionnel* (au sens usuel et pas seulement 'comme si'). Dans un système neuronal, cette propriété repose sur la formation de boucles entre la mémoire procédurale et le CR.

Les *CR conscients* sont des CR intentionnels particuliers, qui sont de plus capables d'internaliser la notion de temps. Rappelons (EV 1993b) qu'ils sont caractérisés par la capacité, après fracture, d'étendre leur paysage actuel par rétrospection pour en rechercher les causes, et par projection dans le temps pour choisir des stratégies couvrant plusieurs étapes. Dans un système neuronal, cette propriété repose sur l'existence de boucles fonctionnelles entre différentes aires du cerveau, qui forment ce que Edelman (1989, page 100) appelle 'boucle de la conscience'.

3. *Spéciation*. Donnons encore une rapide application de l'émergence organisationnelle au cas d'un système modélisant les interactions entre différentes espèces dans un écosystème particulier. Au cours de l'évolution, sous l'effet de changements externes et de la sélection naturelle, de nouvelles espèces pourront émerger. Ceci se fera par un processus en 3 étapes: d'abord, au niveau individuel, certains individus vont développer (éventuellement par des processus d'émergence) dans leur organisme de nouvelles caractéristiques comportementales (niveau neuronal), morphologiques (niveau des organes) ou génétiques (niveau infra-cellulaire). Ces individus pourront former une population qui, par suite de circonstances externes (par exemple dans un isolat) s'homogénéise en une assemblée cohérente. Enfin celle-ci se transforme en une nouvelle espèce par transmission héréditaire. La nouvelle espèce pourra être définie 'extensivement' par ses membres. Mais on peut aussi la définir 'intensivement' par ses traits caractéristiques, morphologiques ou génétiques, qui seront représentés par le classifiant d'un pattern approprié. Ce processus de spéciation peut conduire à ajouter un nouveau niveau de complexité au système des êtres vivants (par exemple lorsque *Homo sapiens* est apparu).

### 12. Causes de l'émergence. Téléonomie. Téléologie.

Dans ce qui précède, nous avons montré comment des composants et des liens de plus en plus complexes peuvent émerger dans un SEM, sous l'effet combiné des choix successifs de stratégie des différents CR et du jeu des traces entre elles. Nous n'avons pas étudié comment se font les choix ni quels facteurs ou

lois règlent leur pondération. Certes ceci dépendra de la structure particulière du système considéré. Cependant ce problème pose des questions générales, de nature philosophique, sur les causes conduisant à l'émergence de ces processus complexes, et sur la manière dont est déterminée leur évolution à long terme. En particulier, quand pourrait-on parler de *téléologie* dans un SEM?

Rappelons qu'en Philosophie, l'explication téléologique à partir du tout s'oppose à l'explication mécaniste à partir des parties, la première étant de nature conceptuelle et se rapportant au but ou à l'intention, et la seconde de nature matérielle et reliée aux causes/effets. Aristote distinguait 4 sortes de causalité: cause matérielle, formelle, efficiente et finale; il n'accordait cette dernière, ou téléologie, qu'aux êtres organisés, alors que les stoïciens l'étendent à la nature entière, ce que contestent les épicuriens. Pour Kant, il faut distinguer: une causalité externe, l'homme attribuant faussement ce qui a une certaine utilité pour lui à la nature, laquelle est indifférente; et une causalité interne se traduisant en rapports de convenance entre les différentes parties d'un organisme et avec le tout. Ainsi le "jugement téléologique" n'a un usage objectif que s'il s'agit d'un organisme ou d'une oeuvre d'art, car ce sont les seuls cas où les parties ne se comprennent qu'à partir du tout

La Science a cherché à évacuer la téléologie de son discours. Pour Renan "Le problème de la cause finale nous échappe et nous déborde: il se résout en poème". Les systèmes physiques ne sont soumis qu'aux causes matérielles et efficientes, éventuellement formelles, mais non aux causes finales; Rosen (1986) dit que c'est en cela qu'ils sont moins généraux que les systèmes auto-organisés où il faut aussi tenir compte des causes finales. Pour ces derniers, la cybernétique a introduit la notion de *téléonomie* qui retient "l'idée de finalité tout en remplaçant la notion de "cause finale" par une causalité à boucles intelligibles" (Piaget 1967). Ainsi Monod (1970) parle de téléonomie au sujet des "objets doués d'un projet qu'à la fois ils représentent dans leurs structures et accomplissent par leurs performances".

Qu'en est-il dans un SEM? Rappelons que les attributions causales étant des réponses à des questions implicites sur des différences (Mackie 1974), elles dépendent de quel point de vue les questions sont posées. Il faut donc examiner la situation selon les différents acteurs/observateurs et période considérés.

1. *Point de vue formel.* Les changements introduits par une complexification, en particulier l'émergence de nouveaux objets, auront pour cause matérielle l'état initial du système, pour cause formelle la stratégie choisie, pour cause efficiente sa mise en oeuvre. Il n'y a pas de cause finale tant qu'on se restreint à l'aspect formel; pour en déceler une, il faudrait rechercher les objectifs ayant conduit au choix de la stratégie.

Si l'on considère maintenant les changements introduits par toute une suite de complexifications, les causes vont être plus difficiles à analyser, même sans rechercher une cause finale. Ainsi, peut-on dire que la cause matérielle est l'état initial? Ceci est vrai pour la première complexification, mais elle introduit de nouveaux objets et liens, et ceux-ci rentrent dans les causes matérielles de la deuxième complexification; et ainsi de suite. De même le choix des stratégies successives et leur effectuation font intervenir des éléments ayant émergé précédemment. Ainsi les causes matérielle, formelle et efficiente sont entrecroisées entre elles et avec leurs effets (mais cf. 3 plus loin). L'impossibilité de faire initialement une liste de tous les composants du système, puisque sa composition varie au cours du temps, est une des caractéristiques qui distingue les systèmes complexes auto-organisés des systèmes étudiés en Physique. Ceci empêche de ramener leur étude à celle des modèles usuels de systèmes dynamiques (sauf comme une approximation valable à un niveau particulier, et à plus ou moins court terme, cf. § 10 et EV 1989), lesquels décrivent l'évolution en termes d'observables fixés une fois pour toutes.

2. *Cas d'un CR particulier.* Ici la causalité doit être analysée sur le paysage, et non sur le système lui-même. De plus les agents du CR opèrent à la fois en tant qu'observateurs et acteurs.

a) Considérons d'abord le changement au cours d'une étape. Si les objectifs poursuivis sont atteints, le paysage obtenu à la fin de l'étape sera la complexification du paysage initial relativement à la stratégie choisie par les agents. Du point de vue des agents, le changement du paysage sera donc attribué au choix de cette stratégie. Si ce choix a été imposé aux agents par des contraintes structurelles ou temporelles de nature générale, sans qu'ils internalisent ces contraintes (comme ce sera le cas dans les CR inférieurs), il ne saurait être question de cause finale à leur niveau. Par contre si le choix est fait (implicitement ou 'intentionnellement') par le CR, la cause finale sera relative aux objectifs poursuivis par les agents. En particulier, si le CR est D-intentionnel (cf. § 11), on pourra parler de téléonomie à

son égard, même si le choix est fait sans en avoir internalisé les causes. Si c'est un CR intentionnel, c'est-à-dire (§ 11) qu'il internalise les stratégies, ses objectifs peuvent réellement être considérés comme cause finale des changements; le mot téléologie semble cependant peu approprié tant qu'il s'agit du court terme (une étape). Pour qu'il y ait téléologie au sens propre, il faudrait un CR conscient, ayant fait un choix s'étendant sur plusieurs étapes.

b) Si au cours de l'étape le résultat attendu n'est pas atteint, le dysfonctionnement constaté par le CR (via le foncteur comparaison, cf. § 9), pouvant aller jusqu'à une fracture, aura pour cause matérielle la distorsion entre paysage et système, laquelle n'est pas mesurable par les agents (mais peut leur être révélée par ce dysfonctionnement même), pour causes efficiente et formelle la dialectique entre les différents CR avec le jeu des traces. Pour parler de cause finale de l'échec au niveau des agents, il faudrait que ceux-ci l'attribuent à des agents externes bien caractérisés, comme pourrait éventuellement le faire un CR conscient. Rappelons qu'une des caractéristiques des CR conscients (§ 11) est justement leur capacité à rechercher les causes d'une fracture (par extension et rétrospection de leur paysage).

c) La situation est plus confuse sur plusieurs étapes. La différence entre un paysage initial et le nouveau paysage après une longue suite d'étapes provient de l'accumulation des changements étape après étape. Si les stratégies successives des agents ont réussi, on a une suite de complexifications, et nous avons vu plus haut qu'il est alors difficile de démêler les causes matérielle, formelle et efficiente, même du seul point de vue formel. Si le résultat global provient du choix d'une stratégie à long terme par un CR conscient, il semble justifié de parler de téléologie. Eventuellement, on pourrait parler de téléonomie dans le cas d'un système D-intentionnel dont les choix optimaux successifs ont été réalisés.

En conclusion: il n'y aura pas de cause finale relativement aux CR inférieurs. Pour parler de cause finale, il faut déjà que le CR ait une certaine intentionnalité et soit capable de mener à bien ses stratégies sur son paysage, ce qui demande qu'il puisse, dans une certaine mesure, imposer ses choix au système malgré les interactions avec les autres CR. Il pourra éventuellement être question de téléonomie pour un CR D-intentionnel, et même de téléologie pour un CR conscient, mais toujours sur une durée plus ou moins limitée.

3. *Cas du système entier.* On se place ici du point de vue d'un observateur (non acteur) externe au système et qui en verrait globalement l'évolution.

a) A un instant donné, la stratégie effectivement implémentée résulte du jeu des traces entre les différentes stratégies répercutées par les CR (et qui en sont à des stades différents d'effectuation). Nous avons vu (cf. fin § 10) que la façon dont l'équilibration se fait entre ces stratégies n'est pas universellement codifiable, et qu'elle dépend de la structure du réseau des CR, avec éventuellement un certain aléatoire. On ne peut donc pas espérer en déterminer les causes générales. Le fait même qu'un compromis soit atteint, permettant au système de fonctionner (avec éventuellement des fractures pour certains CR) permet-il de parler de causalité interne au sens de Kant, ou de téléonomie pour le système?

b) Les causes de l'évolution du système sur une longue durée (qui peut d'ailleurs ne pas être longue relativement à l'échelle de temps de certains CR de niveau supérieur) sont encore plus difficiles à démêler que pour un CR. En effet, les changements accumulés, en particulier l'émergence de processus complexes, proviennent d'une suite de complexifications, mais où le 'choix' des stratégies dépend à chaque fois d'un jeu des traces plus ou moins indéchiffrable. Au mieux pourrait-on dire que la cause formelle est le processus de complexification 'en soi' et le jeu des traces; la seule persistance malgré le changement d'un système auto-organisé pourrait être qualifiée de téléonomie au sens où Monod (1970) a introduit ce terme. En tous cas, le mot de téléologie ne semble pas adapté, sauf si le jeu des traces est entièrement dirigé par les visées téléologiques de CR conscients.

Si on applique ceci à la Théorie de l'Evolution, considérer que l'évolution résulte du jeu des traces qui opère une certaine équilibration interne entre les stratégies des divers CR (ici les espèces d'un écosystème) se rapproche plus des théories de co-évolution du type 'hypothèse de la Reine Rouge' (Van Valen 1973, Kampis 1991) que du point de vue de certains néo-darwiniens qui semblent considérer l'évolution entièrement dirigée par la sélection naturelle agissant comme agent externe.

c) L'évolution à long terme peut conduire à la formation de niveaux de complexité croissante, par émergence d'objets et liens de plus en plus complexes non-réductibles aux niveaux inférieurs. En analysant leur comportement, nous allons essayer de mieux comprendre l'entrecroisement des causes matérielle, formelle et efficiente, et en particulier de mesurer jusqu'à quel point l'information est déjà contenue dans l'état initial (que nous prendrons pour niveau 1), même si on ne peut la déployer que pas à pas (comme dans l'ordre implicite de Bohm, 1983).

Considérons un objet  $A$  de niveau  $n+1$  non-réductible au niveau 1; son comportement est entièrement déterminé, et même de manière constructible, à partir de la donnée d'une quelconque de ses décompositions ramifiées jusqu'au niveau 1; mais cette constructibilité est de nature 'géométrique' (ou 'morphologique'), et non algorithmique.

Plus précisément, quand on descend seulement au niveau  $n$  précédent, les propriétés de  $A$  se déduisent d'une manière 'linéaire' de celui-ci (simple recollement d'un pattern du niveau  $n$ ), et on pourrait alors parler d'algorithme; et même donner un algorithme ne dépendant pas du pattern utilisé, car toutes les décompositions en un pattern de ce niveau sont fonctionnellement équivalentes. Autrement dit, la cause matérielle est bien contenue dans le niveau  $n$ .

Par contre quand on veut descendre jusqu'au niveau 1, les contraintes imposées par les liens 'horizontaux' complexes coordonnant les composants des niveaux intermédiaires influencent d'une manière 'non-linéaire' le comportement de  $A$  (colimite  $n$ -itérée non-réductible à une simple colimite). Ceci provient du fait que, dans les liens complexes, intervient un effet de 'balancement' entre deux décompositions différentes (cf. § 7). C'est au travers de ce balancement que s'introduit une certaine ambiguïté, qui n'est pas toujours contrôlable; selon le cas, il sera structurellement imposé ('nécessité'), ou contrôlé par des agents, ou purement aléatoire ('hasard', ou 'bruit' selon Atlan 1979), ou résultant du jeu des traces ('téléonomie'). Quoiqu'il en soit, on arrive bien par étapes à une réduction au niveau 1, mais en tenant compte des propriétés émergeant au passage de chaque niveau intermédiaire. On a ainsi un modèle mathématique précis de la notion de *réductionnisme émergentiste* proposée par M. Bunge (1979).

En conclusion, pour le système, la propriété de morcellement apparaît comme la cause formelle de l'enchevêtrement des causes matérielles et efficientes, et elle intervient autant dans l'émergence de la complexité, que dans le choix des stratégies et le jeu des traces, ou dans l'effectuation des stratégies. La cause matérielle se trouve bien dans le niveau 1, mais elle y est 'cachée' et il faut savoir l'en extraire. La cause efficiente repose sur les processus de complexification, de jeu des traces, et de morcellement. Ceci pourrait caractériser un système téléonomique, et expliquer son imprédictibilité à long terme pour un observateur externe, même s'il est partiellement contrôlable 'de l'intérieur' par les CR supérieurs. Par contre nous réserverons le terme de téléologie au cas de systèmes contrôlés par des CR conscients, dans un environnement assez stable pour mener à bien leurs objectifs. Remarquons que notre modèle incorpore à la fois les visées

éventuellement conflictuelles des différents CR, sans en gommer les différences. Il n'est pas question d'une synthèse entre points de vue différents, mais d'un modèle permettant la coexistence de ceux-ci (comme le demande Bernard-Weil) et tenant compte de leurs interactions.

Appliqué au cas d'un système neuronal, le réductionnisme émergentiste décrit plus haut conduit à une approche nouvelle du problème philosophique de *l'identité entre état mental et état physique du cerveau*. En effet, un état physique, tel qu'il pourrait être vu par imagerie cérébrale, ne correspond qu'à l'activation d'une simple assemblée de neurones (donc représentée par un neurone de catégorie de niveau 2). Mais un état mental, tel un processus cognitif complexe, est représenté par un neurone de catégorie de niveau supérieur, non-réductible à une simple assemblée de neurones, bien qu'ayant des décompositions ramifiées jusqu'au niveau des neurones. Au travers d'une telle décomposition, ses propriétés émergent d'une manière bien précise des états physiques du cerveau, et on peut donc parler d'un *monisme émergentiste* au sens de Bunge (1979). Néanmoins dans cette descente il faut tenir compte de l'effet de 'balancement' entre deux décompositions différentes d'une même colimite (par exemple, deux lectures différentes d'une même figure ambiguë). Certes celui-ci est un 'événement' physique, mais que nous ne saurions identifier à un 'état' physique: *les états mentaux émergent de manière constructible des états physiques mais ne leur sont pas identiques*. Ce balancement, qui peut être d'origine aléatoire (dû au 'bruit' cérébral) ou contrôlé, donne sa plasticité au fonctionnement cérébral. Remarquons que cette description justifie le rapprochement fait par Penrose (1992) entre formation d'un quasi-cristal et développement cérébral: tous deux correspondent à l'émergence d'objets complexes d'ordre supérieur non-réductibles. Ce balancement pourrait être influencé par les phénomènes quantiques que Eccles (1986) a mis en évidence; mais alors qu'il les interprète comme une possible action du mental sur le physique, pour nous il s'agirait au contraire d'un processus permettant au mental d'émerger du physique.

**Références.**

- P. Auger (1989), *Dynamics and Thermodynamics in hierarchically organized systems*, Pergamon Press.
- N.A. Baas (1993), Emergence and higher order structures, in *Proc. Intersymp'93*, (Baden-Baden 1993), à paraître.
- M. Bunge (1979), *Treatise on basic Philosophy*, Vol. 4, Reidel, Dordrecht.
- J.-P. Changeux (1983), *L'homme neuronal*, Fayard, Paris.
- Changeux, S. Dehaene & G. Toulouse (1986), Spin-glass model of learning by selection, *Proc. Natl. Acad. Sc. USA* 83 (pp. 1695-1698).
- E. Di Cera (1990), *Il Nuovo Cimento* 12D (p. 61).
- D. Dennett (1990), *La stratégie de l'interprète*, NRF Gallimard, Paris.
- J.C. Eccles (1986), Do mental events cause neural events...? *Proc. R. Soc. Lond.* B227 (pp. 411-428).
- G.M. Edelman (1989), *The remembered past*, Basic Books, New York.
- A. Ehresmann & C. Ehresmann (1972), Categories of sketched structures, ré-imprimé dans *Charles Ehresmann, Oeuvres complètes et commentées*, Partie IV-1, Amiens (1984).
- A.C. Ehresmann & J.-P. Vanbremeersch (abrégé en EV) (1987), Hierarchical evolutive systems..., *Bull. of Math. Bio.* 49 (1) (pp. 13-50).
- EV (1989), Modèle d'interaction..., *RIS* 3 (3) (pp. 315-341).
- EV (1991), Un modèle mathématique des systèmes..., *RIS* 5 (1), (pp. 5-25).
- EV (1992), Semantics and Communication..., dans *Proc. 6th Intern. Conf. on Systems Research* (ed. Lasker), University of Windsor.
- EV (1993), Rôle des contraintes..., dans *AFCET 93* (pp. 103-112).
- EV (1993a), MES, an application to an aging theory, dans *Cybernetics and Systems*, Tata McGraw Hill Pub., New Delhi (pp. 190-192).
- EV (1993b), Emergent properties for complex systems, in *Proc. Intersymp'93*, (Baden-Baden 1993), à paraître.
- M. Eigen & P. Schuster (1979), *The hypercycle: a principle of natural organization*, Springer.
- S. Eilenberg & S. Mac Lane (1945), General theory of natural equivalences, *Trans. AMS* 58 (pp. 231-294).
- M.S. Gazzaniga (1985), *The social brain*, Basic Books, New York.
- D.O. Hebb (1949), *The organization of behaviour*, Wiley, New York.
- J.J. Hopfield (1982), Neural networks..., *Proc. Natl. Acad. Sc. USA* 79 (pp. 2554-

- 2558).
- O. Houdé (1992), *Catégorisation et développement cognitif*, PUF, Paris.
- D.H. Hubel & T.N. Wiesel (1962), Receptive fields..., *J. Physio.*160 (1), (pp. 106-154).
- G. Kampis (1991), *Self-modifying systems in Biology and Cognitive Science*, Pergamon Press.
- G.J. Klir (1985), *Architecture of general systems problem solving*, Plenum..
- E. Laszlo (1989), *La cohérence du réel*, Gauthier-Villars, Bordas, Paris.
- M. Lunca (1993), *An epistemological programme for interdisciplinaryisation*, polycopié, Univ. Utrecht.
- J.-L. Le Moigne (1990), *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, Paris.
- J.L. Mackie (1974), *The cement of the universe*, Oxford Univ. Press.
- B. Mansouri & G. Monti (1994), *Le juriste national et le droit commun européen*, en préparation.
- M. Minsky (1986), *The society of mind*, Simon & Schuster, New York.
- J. Monod (1970), *Le hasard et la nécessité*, Ed. du Seuil, Paris.
- J. von Neuman (1966), *The theory of self-reproducing automata*, Univ. of Illinois Press, Chicago.
- R. Penrose (1992), *L'esprit, l'ordinateur et les lois de la Physique*, InterEditions.
- J. Piaget (1967), *Biologie et connaissance*, Gallimard, Paris.
- I. Prigogine & I. Stengers (1982), *La nouvelle alliance*, Gallimard, Paris.
- M. Radman (1975), SOS repair hypothesis, dans *Molecular mechanisms for repair of DNA*, Plenum Press, New York (pp. 355-367).
- R. Rosen (1985), *Anticipatory systems*, Pergamon, New York.
- R. Rosen (1986), *Theoretical Biology and complexity*, Academic Press.
- R. Thom (1974), *Modèles mathématiques de la morphogenèse*, Col. 10/18, Paris.
- R. Vallée (1986), Subjectivité et systèmes, dans *Perspectives systémiques*, L'Interdisciplinaire, Limonest (pp. 43-53).
- L. van Valen (1983), A new evolutionary law, *Evolutionary Theory* 1 (1-30)
- E.C. Zeeman (1977), *Catastrophe Theory, selected papers*, Addison-Wesley.

Toute la correspondance est à adresser à :  
Mme Ehresmann, Faculté de Mathématiques et d'Informatique  
33 rue Saint-Leu, 80039 Amiens Cedex.