

RÔLE DES CONTRAINTES STRUCTURALES TEMPORELLES DANS LES SYSTEMES COMPLEXES

par Andrée C. EHRESMANN et Jean-Paul VANDREMEERSCH

Université de Picardie Jules Verne
Faculté de Mathématiques et d'Informatique
33 Rue Saint-Leu, 80039 Amiens Cedex 01

RESUME. Les *Systèmes Evolutifs avec Mémoire* ont été introduits par les auteurs comme un modèle mathématique (basé sur la Théorie des Catégories) pour des systèmes complexes, tels des systèmes biologiques ou socio-politiques. Ces systèmes sont ouverts, auto-organisés avec des composants de différents niveaux de complexité, et ils sont capables de s'adapter à l'environnement en mémorisant leurs expériences. Leur dynamique est modulée par les interactions compétitives entre un réseau de Centres de Régulation Internes, chacun opérant à son niveau de complexité et selon sa propre temporalité. Ici on détermine les contraintes structurales temporelles à la base des boucles fonctionnelles régissant la dialectique entre CR.

ABSTRACT. Memory Evolutive Systems have been introduced by the authors as a mathematical model (based on Category Theory) for natural open self-organizing systems, such as biological, sociological or neural systems, in which the dynamics is modulated by the competitive interactions between the global system and a family of internal more or less specialized Centers of Regulation (CR) with differential access to a central hierarchical Memory. Each CR operates at its own complexity level and time-scale, and here we study the inter-level structural temporal constraints which modulate the dialectical functional loops between heterogeneous CRs.

MOTS CLEFS. Système. Hiérarchie. Auto-organisation. Complexité. Synchronisation temporelle.

Les Systèmes Evolutifs avec Mémoire (SEM) représentent un formalisme souple, exploitant à fond la théorie des catégories, pour modéliser des systèmes ouverts, avec une hiérarchie de niveaux de complexité imbriqués, capables de s'adapter à l'environnement, et dont la dynamique est modulée par des interactions compétitives entre des organes de régulation internes agissant en parallèle, mais avec des temporalités plurielles. Leur théorie s'est développée au fil des années, essentiellement en vue d'applications aux systèmes biologiques (exemple: étude du vieillissement [8]) et aux systèmes neuro-naux où ils permettent d'étudier les processus cognitifs d'ordre supérieur (émergence de Sémantique, conscience [6,7]).

Ici le but est double: On donne d'abord un bref aperçu des résultats obtenus avec des renvois précis pour guider dans le méandre des articles [1-8], et, comme on nous l'a souvent demandé, les illustrer par un exemple simple plus concret, celui d'une entreprise (qui paraît bien adapté dans ce Congrès, l'AFCEP privilégiant les échanges Recherche-Industrie). Et surtout nous déterminons les contraintes structurales temporelles qui jouent un rôle essentiel dans la dynamique d'un SEM, grâce à l'introduction de plusieurs indicateurs permettant la mesure du changement.

1. RAPPEL SUR LES SEM.

Rappelons qu'une *catégorie* [11] est un graphe orienté sur lequel on a donné une manière de composer deux flèches successives $f: B \rightarrow B'$ et $f': B' \rightarrow B''$ en une autre $ff': B \rightarrow B''$, de sorte qu'un même composé soit associé à un chemin quelle que soit la manière dont on le décompose ("associativité").

1. - *Organisation hiérarchique* (cf. [1]). L'état du système à un instant donné est modélisé par une catégorie, dont les objets B représentent les composants du système, et les flèches (appelées "liens") leurs interactions (transferts d'informations, d'énergie ou contraintes, relations topologiques). Deux chemins ont le même composé s'ils sont fonctionnellement équivalents.

Un objet B est "complexe" s'il a une organisation interne avec ses propres constituants reliés par des liens spécifiques. Cette organisation est modélisée par un pattern dans la catégorie, formé d'une famille d'objets B_i et de liens spécifiques entre eux, de sorte que B devienne la *colimite* ("limite inductive" [11], aussi appelée *recollement* dans [1]) de ce pattern. Ceci signifie que les liens de B vers tout autre objet B' sont en bijection avec les liens collectifs du pattern vers B' (c'est-à-dire les familles de liens individuels des B_i vers B' qui sont corrélés par les liens spécifiques du pattern).

Le système est *hiérarchique* si ses objets sont répartis en niveaux de complexité croissante, de sorte qu'un objet B de niveau $n+1$ soit la colimite d'un pattern d'objets liés du niveau n ; il s'ensuit que B est aussi une "colimite itérée" (cf. [1]) de patterns de patterns... des niveaux inférieurs, ce qui le dote d'une structure de type "fractal". La hiérarchie est "enchevêtrée" (au sens de Hofstadter [10]), car il y a des liens des niveaux inférieurs aux supérieurs, et vice-versa.

Dans le cas d'une entreprise, les composants seront à la fois les personnels (des directeurs aux ouvriers), les ressources nécessaires aux activités (installations, outillages, stocks,...), les archives, mais aussi, plus abstraitement, les différents services, départements, divisions, bureaux d'étude ou ateliers, avec leurs relations

fonctionnelles qu'il s'agisse des relations hiérarchiques entre personnes, des communications dans un bureau ou une équipe de travail, des transports de matières, des interactions entre produits,... ou des liaisons entre services de l'organigramme. Comme exemples d'objets "complexes": une machine fabriquée à partir de différentes pièces, un stock relativement aux produits qu'il contient, une cellule de machines (9); de même un atelier y figurera à un plus haut niveau que les gens qui y travaillent, en tant qu'individualisant leur action collective (done comme colimite du pattern qu'ils forment); et cet atelier ne sera qu'un des constituants du composant plus complexe représentant le Département Production. L'ouverture du système se traduit par l'existence de relations avec fournisseurs et clients.

2. - *Dynamique par complexification.* Les changements d'états sont représentés par des foncteurs "transitions" entre les catégories d'états successifs, d'où la notion d'un Système Evolutif Hiérarchique (11). Dans les SEM ils consistent en la réalisation de stratégies requérant l'adjonction de nouveaux éléments, la suppression ou la décomposition de certains composants, la formation d'objets plus complexes par recollement de certains patterns.

Ces opérations sont modélisées par le processus de *complexification* d'une catégorie pour une stratégie: On construit explicitement (cf. (1,5)) la catégorie dans laquelle les buts de la stratégie sont réalisés de la manière la plus économique tant algorithmiquement que sous l'angle énergétique. En particulier, recoller un pattern revient à renforcer ses liens spécifiques pour former un nouvel objet complexe d'ordre supérieur (devenant colimite du pattern); celui-ci intègre ses constituants en un tout homogène et actualise leur potentialité à agir ensemble de manière corrélée et synchrone.

Dans l'entreprise, les stratégies viseront l'embauche ou le renvoi de personnels, l'achat de matériel ou de matières premières, la fabrication et la vente des produits finis, la constitution de stocks, la réorganisation des activités par suppression ou création de certains services. La "complexification" permet de décrire leurs conséquences sur l'organisation formelle et le fonctionnement de l'entreprise. Par exemple, elle fixe les liens institutionnels d'un nouveau département avec les autres organes de la société.

3. - *CR et Mémoire* (2-4). La dynamique est contrôlée de manière interne par un réseau de sous-systèmes, appelés *Centres de Régulation* (CR), opérant en parallèle, chacun à son niveau de complexité et selon son échelle de temps spécifique, mais avec des stratégies compétitives (cf. plus loin). Les CR inférieurs sont plus ou moins spécialisés; dans les niveaux supérieurs, on a des CR associatifs, qui coordonnent l'activité de CR inférieurs.

Ces CR ont un accès différentiel à une *Mémoire* centrale, à

la formation de laquelle ils contribuent; elle est représentée par un sous-système hiérarchique du système.

Dans une entreprise, les CR seraient les organes de commande des différentes sections, qu'il s'agisse des simples ateliers, des bureaux d'étude, des services commerciaux, techniques, de production ou de direction. Et la Mémoire représente tant les savoirs nécessaires au fonctionnement que les rapports écrits de toute nature ou les archives.

2. INDICATEURS TEMPORELS MESURANT LE CHANGEMENT

La formation d'un objet complexe (au cours des complexifications successives) donne à celui-ci une existence qui va transcender celle de ses composants, car il conserve son identité dans le changement. Par exemple, les personnels travaillant dans un atelier changeront au cours du temps par suite de départs et d'embauche, mais l'atelier en soi continuera à fonctionner de la même façon.

Pour modéliser cette situation, nous allons associer à un objet complexe 3 indicateurs mesurant le rythme des changements dans sa composition, le premier mesurant sa stabilité, les deux autres les écarts relativement à celle-ci.

Considérons un objet **B** de niveau $n+1$ dans le système à l'instant t ; on dira qu'un pattern d'objets liés du niveau n est *représentatif de B* s'il admet **B** pour colimite; par définition d'un système hiérarchique, il existe au moins un tel pattern (mais il peut en exister plusieurs, cf. III). On définit alors:

1. - *L'empan de stabilité* (cf. [1,5]) de **B** en t , noté $\tau(\mathbf{B}, t)$: c'est la plus longue période τ pendant laquelle il existe un pattern Π représentatif de **B** et tel que les états successifs de **B**, de t jusqu'à l'instant $t+\tau$ non compris, admettent un pattern représentatif qui reste isomorphe à Π . Autrement dit, c'est la plus longue durée pendant laquelle un nombre suffisant de constituants primitifs de **B** subsistent, ou sont remplacés par d'autres jouant exactement le même rôle, de sorte que la "forme" globale de **B** ne varie pas. Cet empan est d'autant plus long que la situation est plus stable. Par exemple, pour un stock de marchandises, il mesure la durée pendant laquelle le flux des marchandises reste constant, les départs étant exactement compensés par les arrivées; il raccourcit si le flux devient irrégulier. Pour un département de l'entreprise, il indique le temps pendant lequel son organisation générale est conservée.

2. - *L'empan de renouvellement* de **B** en t , noté $\rho(\mathbf{B}, t)$: c'est la plus petite durée ρ telle qu'il existe un pattern représentatif de l'état de **B** en $t+\rho$ formé de composants qui n'existaient pas en t et qui ont été introduits dans le système entre t et $t+\rho$. Cet empan mesure la rapidité avec laquelle les constituants sont remplacés. Pour un stock, il

est inversement proportionnel à sa rotation, et il sera avantageux qu'il soit assez court pour éviter que les produits deviennent obsolètes. Par contre dans un service, il y a souvent avantage à ce que ρ soit long, pour qu'il y ait une bonne continuité des opérations et que l'on profite de l'expérience acquise par les personnels.

3. - *L'empan de persistance* de \mathbf{B} en t , noté $\pi(\mathbf{B}, t)$: c'est la plus longue durée π pendant laquelle il existe un pattern représentatif de \mathbf{B} dont les patterns transformés restent représentatifs des états successifs de \mathbf{B} jusqu'en $t + \pi$ (non compris). Il est toujours inférieur ou égal à l'empan de stabilité, et il lui est égal s'il n'y a ni perte ni renouvellement des composants. Pour un stock de marchandises, il correspond à la durée pendant laquelle les produits sont conservés.

Une diminution de π avec augmentation de ρ entraîne une diminution de τ , et traduit une progressive réduction de \mathbf{B} puisque les éléments perdus ne sont pas remplacés rapidement: c'est ce qui se passe dans des périodes de déclin. Une diminution simultanée de π et ρ signifie un fort taux de changement des composants; ceci traduit une grande instabilité si τ diminue aussi, mais peut être avantageux lorsque τ reste constant; par exemple la gestion "Juste-à-temps" des stocks (cf. 19) revient à maintenir une telle rotation rapide des stocks qui permet de les réduire au maximum. Dans les périodes d'expansion, ρ diminuera et π restera constant. Dans les périodes de "croisière", ρ et π s'équilibrent et restent constants de même que τ .

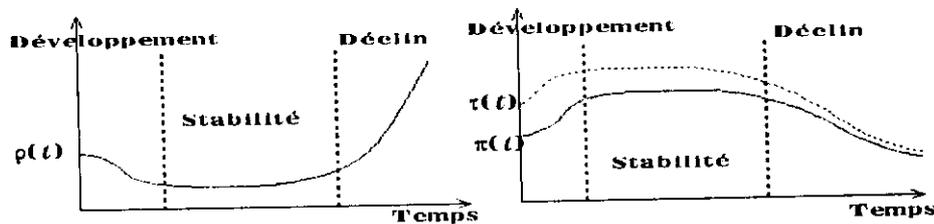


Fig. 1. Evolution des empan (à comparer au cycle de vie commerciale d'un produit dans [12], p. 22)

4. - *Délais de propagation*. Nous utiliserons encore un autre indicateur temporel qui mesure le temps nécessaire au transport ou à la transmission des informations entre composants. En fait, il dépend des empan de renouvellement mais nous le modéliserons directement par un foncteur $p(-, t)$, de la catégorie représentant l'état du système en t , vers le monoïde additif des nombres réels positifs. Autrement dit, on associe à tout lien $f: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B}'$ entre deux composants en t un réel positif, appelé son *délai de propagation*, et noté $p(f, t)$; et si $f': \mathbf{B}' \rightarrow \mathbf{B}''$, on a

$$p(ff', t) = p(f', t) + p(f, t)$$

(où $ff': \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B}''$ est le composé de f et f')

de sorte que le délai de propagation (du composé) d'un chemin est la

somme des délais de ses liens successifs. Le délai de propagation est généralement une fonction croissante de l'empan de renouvellement des objets qu'il relie, et il augmente avec leur niveau de complexité. La formation d'un objet complexe par recollage d'un pattern (par complexification, cf. §1) aura pour effet de diminuer les délais de propagation de ses liens distingués, de sorte que les composants puissent agir synchroniquement.

Dans une entreprise, pour améliorer le rendement, on cherchera à diminuer les délais de propagation à tous les niveaux: accélération des transferts de produits entre stocks et ateliers par une localisation rationnelle des installations, meilleur usage des machines pour éviter les temps perdus par suite de problèmes techniques ou humains, circulation plus rapide des informations entre les différents services. Ceci permettra de diminuer les délais de production et d'augmenter la rotation des stocks, et d'arriver à une "visibilité" plus grande pour une meilleure gestion.

3. CYCLE D'UN CR.

La dynamique du SEM résulte de l'interaction entre les différents CR. Etudions d'abord la situation au niveau d'un CR particulier dont les composants sont appelés agents. Le CR opère par étapes (ou cycles) dont la durée, plus ou moins variable, est déterminée par son échelle de temps propre.

1. - *Déroulement d'une étape* (cf. [2-5]). L'étape se décompose en plusieurs phases plus ou moins imbriquées.

La première phase p_1 "d'analyse-préparation" consiste à recueillir des informations arrivant au CR pendant son "présent actuel", d'où la construction d'une catégorie P , le paysage actuel du CR (cf. [4,5]), qui modélise la représentation interne que ce CR peut avoir du système global et joue le rôle d'une mémoire de travail pendant l'étape. Dans une phase d'évaluation p_2 , les résultats obtenus à l'étape précédente sont évalués en comparant (par un fonctionneur "comparaison") le paysage PA qui y avait été anticipé au paysage actuel P , et les nouveaux objectifs (dont la mémorisation de ces résultats qui vont développer une mémoire procédurale) sont fixés. Dans la phase de "conception-décision" p_3 , les agents du CR (ses composants) coordonnent leur action pour choisir une stratégie Σ sur P en vue de réaliser ces objectifs; pour cela ils recherchent dans la Mémoire les résultats des stratégies utilisées auparavant dans des situations analogues. Dans la phase p_4 de "commande-exécution" le CR met en œuvre cette stratégie en la répercutant aux effecteurs. Le paysage PA' anticipé pour la fin de l'étape est modélisé par la complexification de P pour Σ (cf. §1).

Par suite de la distorsion entre le paysage et le système et de la compétition entre CR, les objectifs recherchés risquent de ne

pas être atteints. Dans certains cas même, il pourra y avoir blocage au cours de l'étape, par manque de stratégie admissible ou par impossibilité de mettre en œuvre la stratégie choisie; on dit alors qu'il y a une *fracture* pour le CR; et on parle de *dyschronie* si cette fracture se répercute sur plusieurs cycles.

Pour un CR d'une entreprise, mettons un service de production, une étape correspond à un cycle de production, et ses différentes phases sont celles usuellement décrites: préparation du travail par recensement des commandes et des approvisionnements (p1); planification du cycle, en tenant compte de l'expérience acquise, pour rattraper des retards éventuels (p2) et fixer des nouveaux objectifs (p3); mise en route de la fabrication (p4). L'importance relative des différentes phases du cycle varie selon les services: les phases d'analyse, conception et décision sont les plus longues dans les CR supérieurs de direction et d'études, alors que l'exécution l'emporte dans les ateliers.

2. - *Contraintes structurales temporelles pour le CR.* Pour que l'étape puisse s'achever dans le temps imparti, il faut que les opérations nécessaires à chaque phase aient le temps d'être effectuées, ce qui impose certaines contraintes temporelles que nous allons préciser pour une étape commençant à l'instant t .

La durée $p(t)$ des phases p1, p2 et p3 dépend des délais de propagation $p(f, t)$ des liens intervenant dans le paysage P , qui mesurent le temps nécessaire pour que les agents A puissent former ce paysage, faire une recherche dans la mémoire MP accessible de P et échanger des communications entre eux pour choisir une stratégie commune. On peut admettre que $p(t)$ est de l'ordre de grandeur de

$$\sup \{p(f, t) \mid f: B \rightarrow A \text{ dans } P, A \text{ dans CR}, B \text{ dans CR ou dans MP}\}.$$

De même la durée $p'(t)$ de la phase p4 dépend des délais de propagation des liens entre agents et effecteurs intervenant dans la stratégie Σ choisie (pour la "traduction catégorique" de Σ , cf. [5]), de sorte qu'elle est de l'ordre de grandeur de

$$\sup \{p(g, t) \mid g: A \rightarrow E, A \text{ dans CR et } E \text{ dans } \Sigma\}.$$

La durée de l'étape doit donc être supérieure à $p(t) + p'(t)$.

Ceci ne suffit pas. Il faut encore que les objets E utilisés dans le paysage et la stratégie soient encore disponibles au moment voulu, c'est-à-dire qu'ils préservent leur stabilité (mesurée par l'empan de stabilité $\tau(E, t)$) jusqu'à la fin de l'étape malgré les changements pouvant affecter leurs constituants. Il faut donc que la durée de l'étape soit inférieure à

$$\tau(t) = \inf \{\tau(E, t) \mid E \text{ dans } P \text{ ou } \Sigma\}.$$

Bien que les durées des étapes puissent être variables, leur ordre de grandeur ne change pas rapidement, et il sera mesuré par la *période* $d(t)$ du CR en t définie comme suit. On suppose que le CR

est relié à un CR du niveau juste supérieur, disons CR', dont les étapes (appelons-les des macroétapes) sont d'un ordre de grandeur supérieur à celui des étapes du CR considéré; par suite, pendant la macroétape de CR' terminée à l'instant t , il s'est déroulé toute une suite d'étapes du CR; par définition, la période $d(t)$ sera la moyenne des durées de ces étapes.

Les contraintes temporelles pour le CR s'énoncent alors: *Pour presque tout t (c'est-à-dire sauf sur un ensemble de mesure nulle), on doit avoir les inégalités suivantes:*

$$p(t) + p'(t) \ll d(t) \ll \tau(t)$$

(où \ll signifie d'un ordre de grandeur inférieur). On aura une dyschronie pour ce CR si ces contraintes ne peuvent pas être respectées pendant plusieurs cycles. Dans ce cas, il pourra y avoir modification ultérieure de sa période (on parle de *dé/resynchronisation*) pour que les contraintes puissent à nouveau être respectées.

Dans une entreprise la période d'un CR à une date donnée t représente la durée moyenne de son cycle: quotidien pour un atelier, pouvant aller à une planification sur plusieurs années pour les services de conception. Cette période est calculée en égalisant les durées des cycles écoulés pendant "l'horizon d'activité" précédant t , lequel est fixé par les décisions des services qui supervisent ce CR. Pour un service de production, les contraintes temporelles relatives aux délais p proviennent des délais de circulation des informations et de préparation du travail, d'approvisionnement, de fabrication ou de transport de produits; celles relatives aux empan τ concernent par exemple la présence d'un nombre adéquat de travailleurs et le maintien de stocks suffisants. Une rupture d'approvisionnement pour une matière première indispensable, ou une panne de machine causera une fracture, et, si elle se prolonge, une dyschronie se traduisant par un ralentissement ou un arrêt momentané du travail.

4. LA DIALECTIQUE ENTRE CR

1. - *Compétition entre les CR.* Jusqu'ici, nous avons étudié la situation du point de vue d'un CR particulier. Mais tous les CR interagissent entre eux de façon plus ou moins coopérative ou conflictuelle pour moduler la dynamique du système global.

A chaque instant, les stratégies qui ont été choisies sur les paysages actuels des différents CR sont répercutées au système avec une certaine distorsion, car les paysages ne sont qu'une représentation partielle du système. Et là toutes ces stratégies entrent en compétition, et éventuellement en conflit, pour les ressources du système; seules certaines pourront être effectivement mises en œuvre, et il y a risque de fracture pour les autres CR. Par exemple, si les machines de deux ateliers tombent en panne au même moment et qu'il n'y a qu'une équipe de maintenance, un des ateliers devra at-

tendre longtemps avant qu'on vienne réparer.

2. - *Classification des fractures.* Dans le modèle catégorique, la classification des fractures se fait par une étude cohomologique utilisant le "paysage total" du SEM obtenu par recollement des différents paysages actuels (cf. 15). Ici, nous allons seulement examiner le rôle des contraintes temporelles sur l'évolution du système. Les problèmes viendront en particulier du fait que les changements structurels ou temporels effectués par un CR ne pourront être connus d'un CR supérieur CR' à plus longue période que par leurs effets accumulés pendant une (macro)étape de CR'.

Si les délais de propagation $p(t)$ des liens vers les agents d'un CR augmentent, les informations reçues sont dépassées, de sorte que leur paysage est impropre et la stratégie choisie Σ risque de ne pas être adaptée; de plus, l'augmentation des p peut entraîner une diminution des emfans de stabilité $\tau(t)$ par ralentissement du renouvellement (ρ augmente), et vice-versa. Par ailleurs lorsque les délais $p'(t)$ vers les effecteurs sont allongés ou que les emfans de stabilité de ceux-ci diminuent, Σ ne pourra pas être appliquée à temps.

Dans tous ces cas, si la situation persiste pendant plusieurs étapes, la première contrainte temporelle (à savoir $p(t)+p'(t) \ll d(t)$) n'est plus vérifiée; cette dyssynchronie pourra être surmontée par une dé/resynchronisation consistant à allonger la période $d(t)$ du CR, à condition toutefois de respecter la deuxième contrainte temporelle $d(t) \ll \tau(t)$. Mais ceci allongera les délais de propagation de ce CR vers les autres CR, risquant d'y répercuter le même scénario; d'où une cascade de dé/resynchronisations, jusqu'au moment où les emfans de stabilité ne le permettront plus. Cette situation caractérise le déclin d'une entreprise, ou le vieillissement d'un organisme [8].

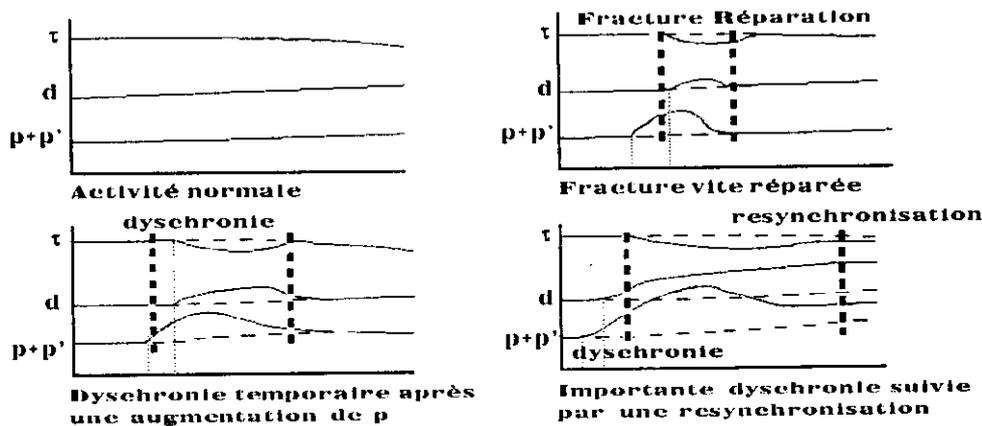


Fig. 2. Différents types de fractures

Au contraire dans les phases de développement, les emfans de stabilité diminuent par suite de renouvellements accélérés (ρ di-

minue), risquant d'entraîner une dysechronie par non respect de la deuxième contrainte. On pourra alors envisager une dé/resynchronisation par diminution de la période, à condition de maintenir la première contrainte, donc limitée par le seuil minimum des délais de propagation. Ici encore, il s'ensuivra une cascade de dé/resynchronisations (exemple: lancement d'un produit nouveau, automatisation).

Ainsi l'imbrication des différents facteurs intervenant dans les contraintes temporelles engendre des "boucles fonctionnelles" entre CR hétérogènes de par leurs niveaux et leurs temporalités, à la base de la "dialectique" entre CR qui caractérise les systèmes complexes et les rend imprédictibles à long terme (cf. [2-4]).

Dans les SEM avec un grand nombre de niveaux de complexité, les contraintes temporelles sont aussi l'un des facteurs intervenant dans le développement d'une *Sémantique* en deux temps: une classification des items "agie" au niveau d'un CR se trouve "réfléchi" au niveau d'un CR supérieur pour former une Mémoire sémantique (cf. [7]). Enfin l'internalisation par un CR de ses contraintes temporelles lui permet une "rétrospection" après fracture pour en rechercher les causes et une "prospection" sur plusieurs étapes (Intégration du passé/futur), processus qui, en accord avec Edelman [1], pourrait caractériser la *conscience* (cf. [5,6]).

REFERENCES

0. G.M. EDELMAN, *The Remembered Present*, Basic Books 1980.
1. A.C. EHRESMANN & J.-P. VANBREMEERSCH, Hierarchical Evolutive Systems, *Bull. Math. Bio.* 49, N° 1 (1987), 13-50.
2. - Modèle d'interaction dynamique entre un système complexe et des agents, *Revue Intern. Systémique* 3-3, Dunod (1989), 315-341.
3. - Hierarchical Evolutive Systems, *Proc. 8th International Conference of Cybernetics and Systems* (Ed. Manikopoulos), New York (1990), Vol. 1, The NJIT Press, Newark 1990, 320-327.
4. - Un modèle pour des systèmes évolutifs avec mémoire, basé sur la théorie des catégories, *Revue Intern. Systémique* 5-1 (1991), 5-24.
5. - Outils catégoriques utilisés dans la théorie des SEM, *Cahiers Top. et Géom. Diff. Categ.* XXXIII (1992), 225-236.
6. - How do heterogeneous levels with hierarchical modulation interact on a system's learning process? in *Advances in Human Systems Research and Information Technologies* (ed. Lasker, Koltzumi & Pohl), University of Windsor 1992, 181-186.
7. - Semantics and Communication for Memory Evolutive Systems, *Proc. 6th Intern. Conf. on Systems Research, Informatics and Cybernetics*, Baden-Baden 1992 (à paraître).
8. - Memory Evolutive Systems: An application to an aging theory, *Proc. 9th International Congress on Cybernetics and Systems* (Ed. Ghosal & Murthy), New Delhi (Janvier 1993), Tata McGraw-Hill Publ. C° 1993, 90-93.
9. R. HALL, *L'excellence industrielle*, InterEditions, 1989.
10. D. HOFSTADTER, *Gödel, Escher, Bach*, InterEditions, Paris 1985.
11. S. MAC LANE, *Categories for the working mathematician*, Springer 1971.
12. C. POURCEL, *Systèmes automatisés de Production*, Cepadues-Ed. 1986.