

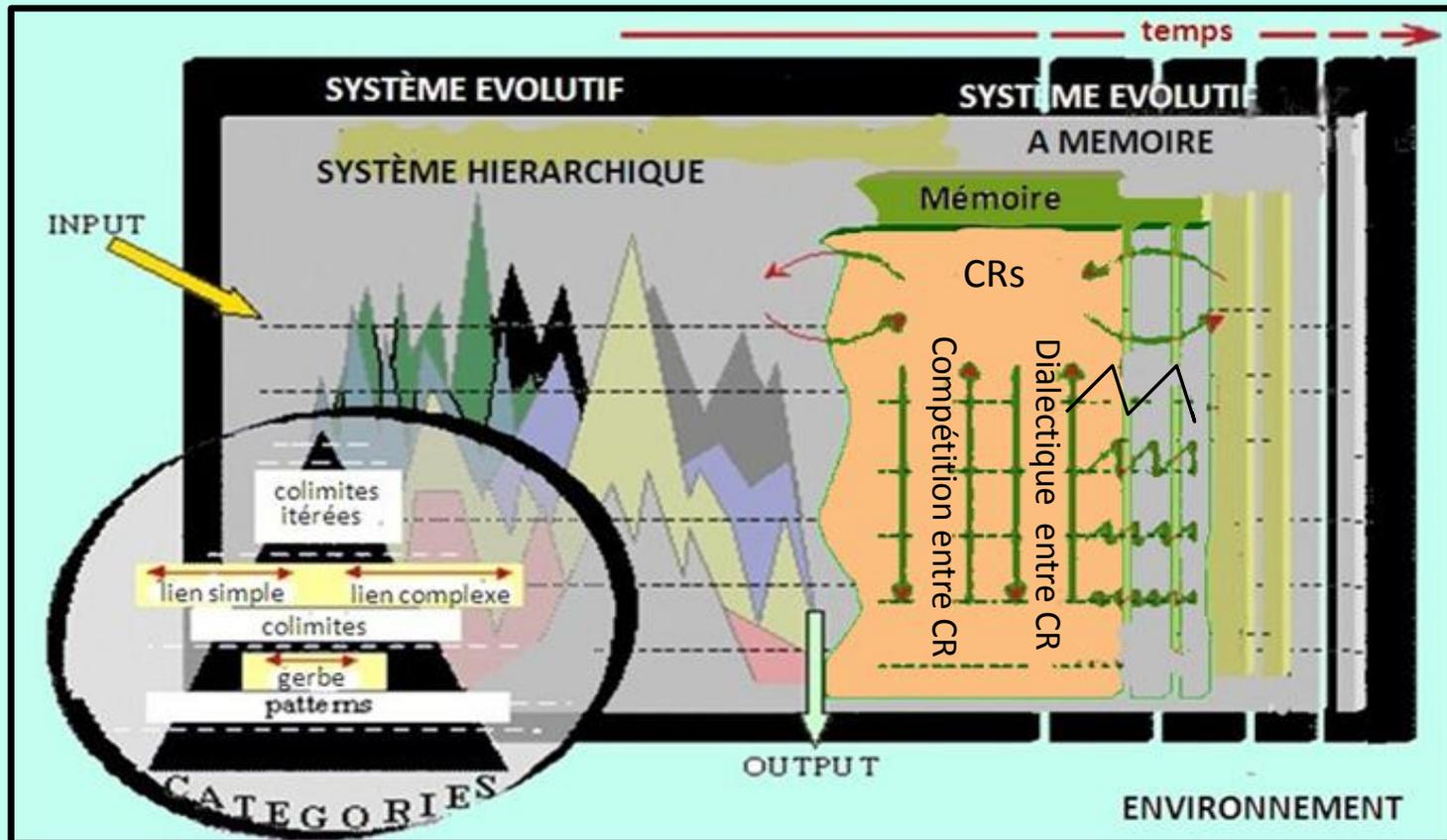
Modélisation d'un système neuro-cognitif à l'aide de Systèmes Evolutifs à Mémoire (Modèle MENS)

by

Andrée C. Ehresmann
(travail en collaboration avec Jean-Paul Vanbremeersch)

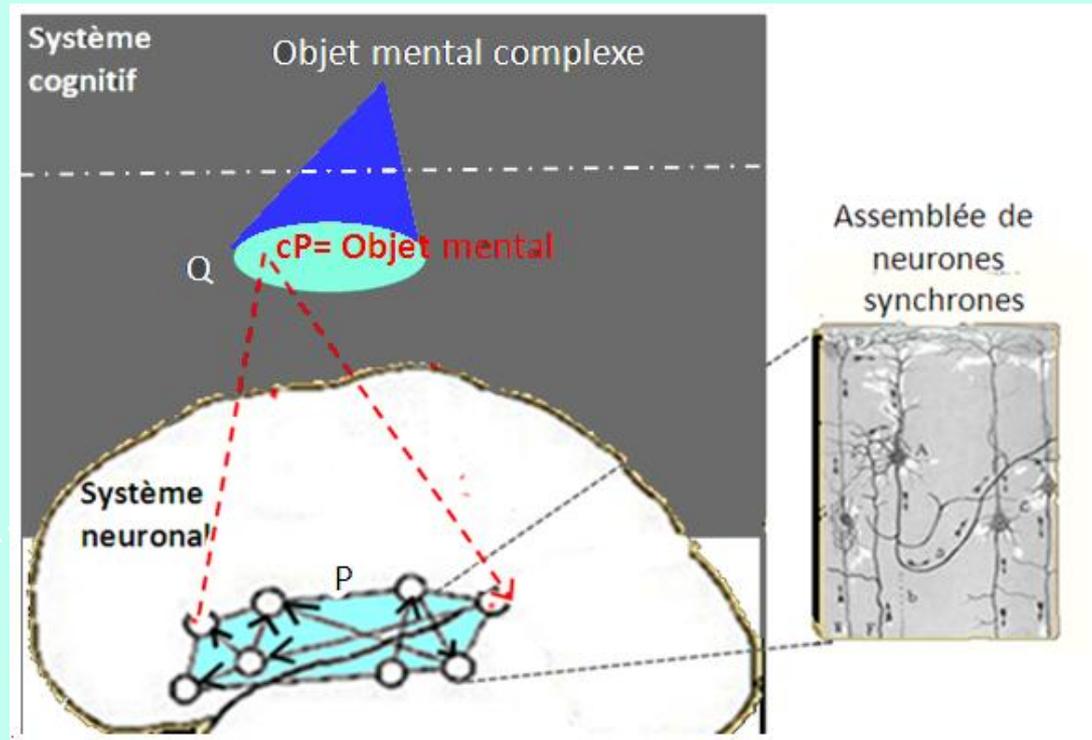
Université de Picardie Jules Verne
ehres@u-picardie.fr
<http://ehres.pagesperso-orange.fr>
<http://vbm-ehr.pagesperso-orange.fr>

SYSTÈME EVOLUTIF A MÉMOIRE



Systèmes sociaux (tels une grande entreprise), biologiques, neuro-cognitifs... sont des systèmes évolutifs, avec une hiérarchie enchevêtrée de composants plus ou moins complexes. Ils sont adaptifs et auto-organisés, leur dynamique étant modulée par les interactions entre une multiplicité de sous-systèmes fonctionnels en coopération/compétition, les *CoRégulateurs*, chacun opérant à son propre rythme avec l'aide d'une *Mémoire* centrale flexible qu'ils aident à développer. Ils seront modélisés par un Système Evolutif à Mémoire (EV 1989-2007).

SYSTÈME NEURO-COGNITIF. MODELE MENS



Le système neuronal d'un animal a pour composants ses neurones, reliés par les chemins synaptiques entre eux.

Un objet mental correspond à l'activation d'une assemblée de neurones synchrones, avec la possibilité que des assemblées différentes P et P', non nécessairement connectées, activent le même objet mental ("degeneracy of the neural code", Edelman, 1989). L'objet mental est modélisé par le *recollement* (ou "liage") cP de P et aussi de P' et appelé *neurone de catégorie*, ou *cat-neurone*.

Les cat-neurones sont les composants du modèle 'dynamique' MENS qui inclut à la fois le système neural et le système mental.

POURQUOI UTILISER DES CATEGORIES ?

OPERATIONS MENTALES	NOTIONS CATEGORIQUES
Distinguer objets et relations Composer des relations	(Multi-)Graphe Catégorie
Mesurer le changement au cours du temps	Foncteur Système Evolutif
Synthèse d'objets complexes Classification	Colimite. Catégorie hiérarchique Limite projective
Former des hiérarchies Propriétés émergentes	Complexification Principe de Multiplicité

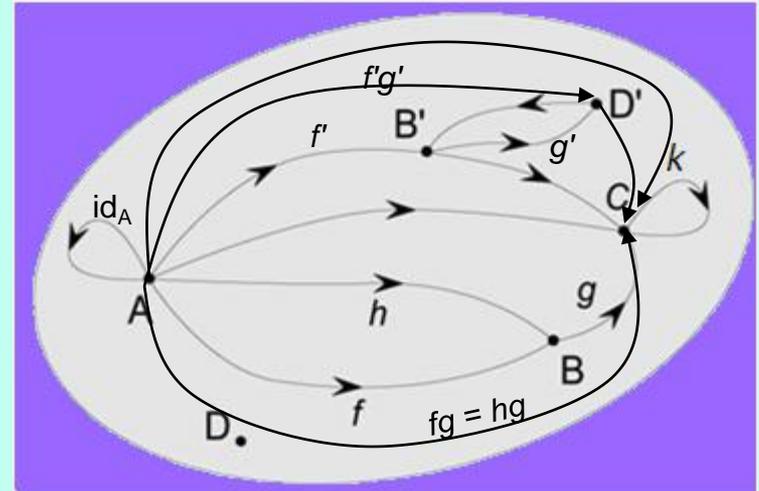
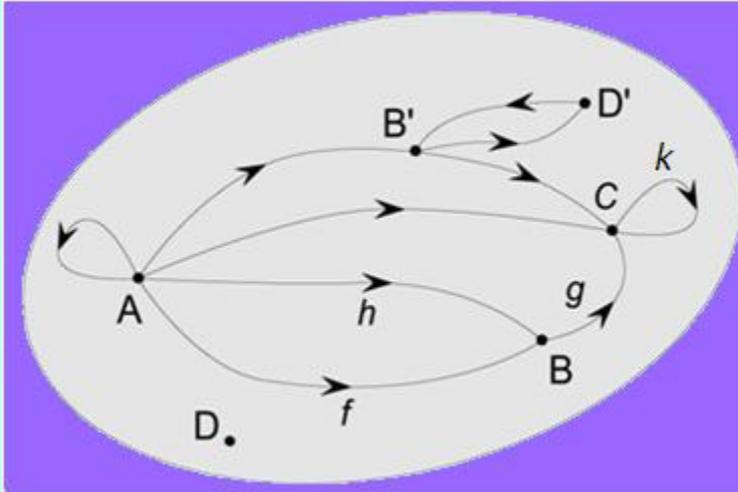
La théorie des catégories donne des outils pour analyser les opérations mentales et étudier :

Problème du Liage : comment de simples objets se lient pour former "un tout qui est plus grand que la somme de ses parties"? Quelles sont les interactions simples et complexes entre des objets complexes ?

Problème de l'Emergence : comment mesurer la "réelle" complexité d'un objet et expliquer la formation d'objets de complexité croissante ?

Auto-organisation : comment la dynamique d'un système est-elle modulée par interactions entre un réseau de dynamiques locales dont les temporalités et complexités sont différentes ?

GRAPHES ET CATEGORIES

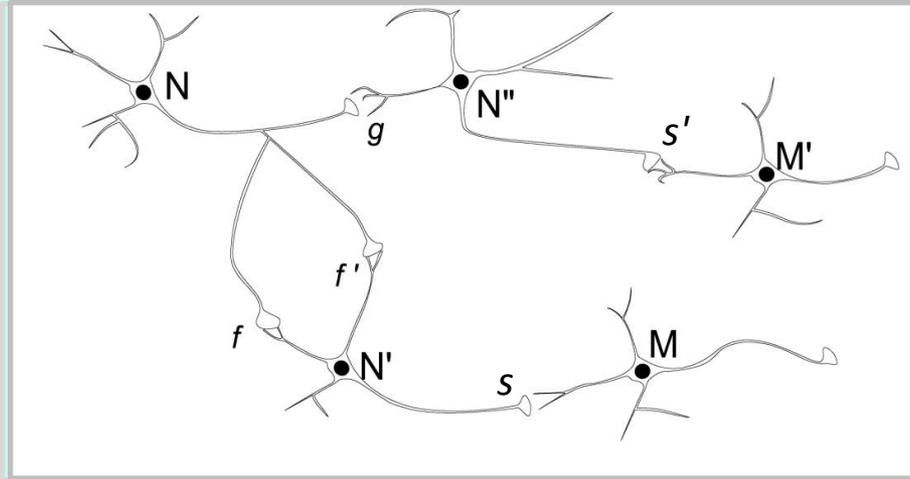


Un *(multi-)graphe* est un ensemble d'objets et d'arêtes orientées (ou *liens*) entre eux. Un *chemin* est une suite (f, g, k) de flèches successives.

Une *catégorie* est un *(multi-)graphe* sur lequel on a donné une loi de composition interne associant à un chemin (f, g) de A vers B une flèche fg de A vers B, cette loi étant associative et tout objet (ou sommet du graphe) ayant une flèche identité. Cette composition permet de définir des classes de chemins "fonctionnellement équivalents" (ils ont le même composé), ce qui est nécessaire pour distinguer une hiérarchie d'objets complexes.

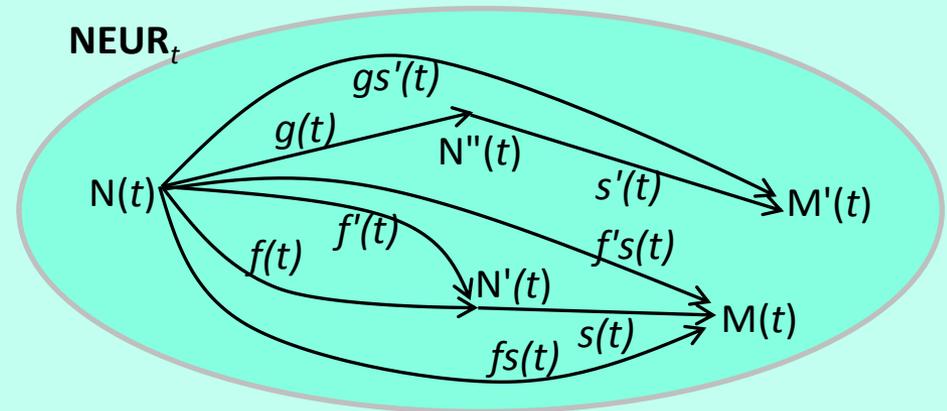
Pour tenir compte de la dynamique, un système ne sera pas modélisé par 1 catégorie, mais par un *Système Evolutif*, à savoir une famille de catégories H_t indexées par le temps, avec des foncteurs partiels 'transition' entre elles modélisant le changement de configuration du système.

GRAPHE ET CATEGORIE DES NEURONES

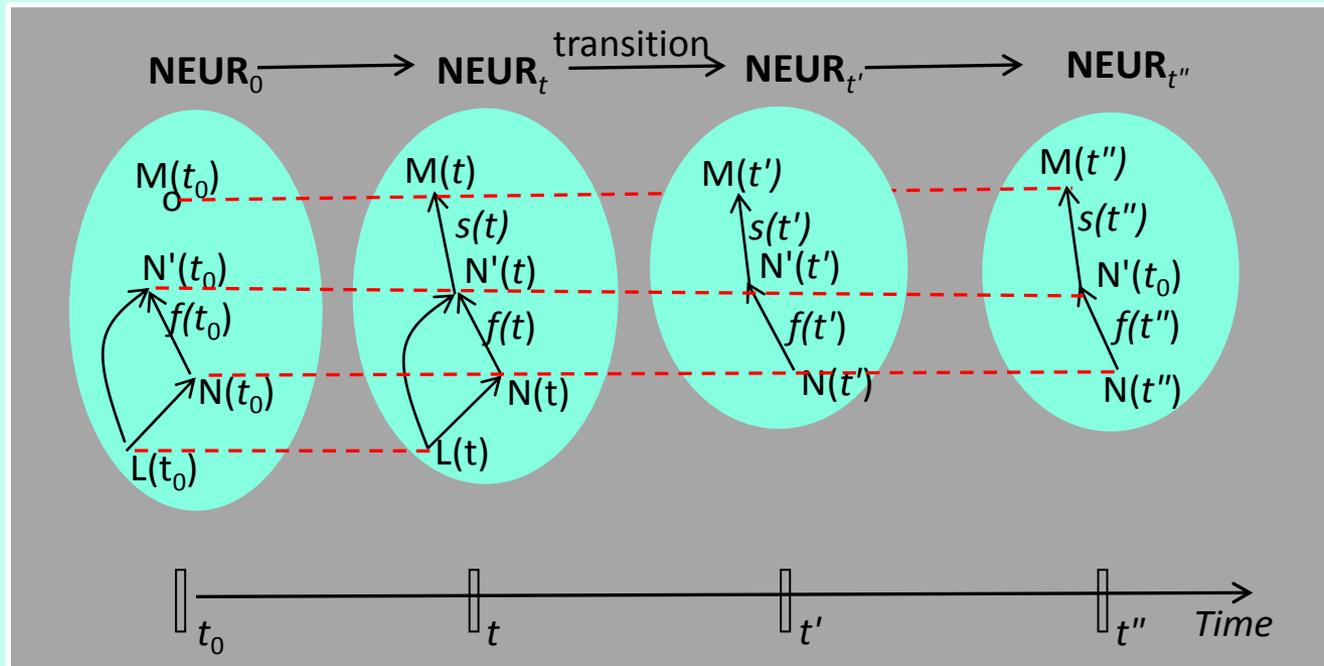


Le *graphe des neurones* à un instant t pour objets les états $N(t)$ des neurones N existant en t (mesuré apr leur activité en t). Une flèche de $N(t)$ vers $N'(t)$ est une synapse f de N vers N' ; elle a un *délagi de propagation* et une *force* (pour transmettre l'activation de N). Cette force varie selon la *règle de Hebb*: la force augment si les activations de N et N' sont corrélées.

La *catégorie des neurones en t* , note \mathbf{NEUR}_t , est la catégorie des chemins de ce graphe. Les flèches dans cette catégorie (ou *liens*) sont les chemins synaptiques, la composition étant la convolution.



LES SYSTÈMES EVOLUTIFS NEUR ET MENS



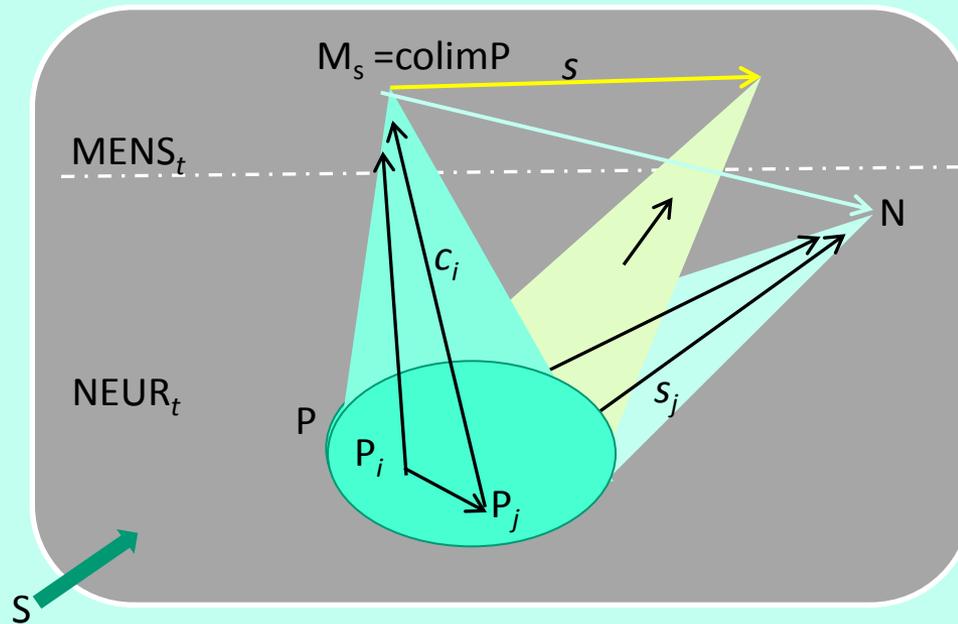
Le système évolutif des neurones NEUR est défini comme suit :

- (i) Pour chaque instant t il a pour *configuration* la catégorie $NEUR_t$ des neurones en t .
- (ii) Le changement entre t et t' est modélisé par un foncteur *transition* d'une sous-catégorie de $NEUR_t$ vers $NEUR_{t'}$ qui relie les états des mêmes neurones et liens aux 2 instants.

Les transitions vérifient une condition de Transitivité, de sorte qu'un *composant*, ici un neurone, est un ensemble maximal d'objets liés par des transitions.

Le système évolutif MENS est déduit de NEUR par une suite de 'complexifications' qui ajoutent des composants, les *neurones de catégorie* (ou *cat-neurones*), représentant des objets mentaux de plus en plus complexes.

CAT-NEURONE COMME COLIMITE

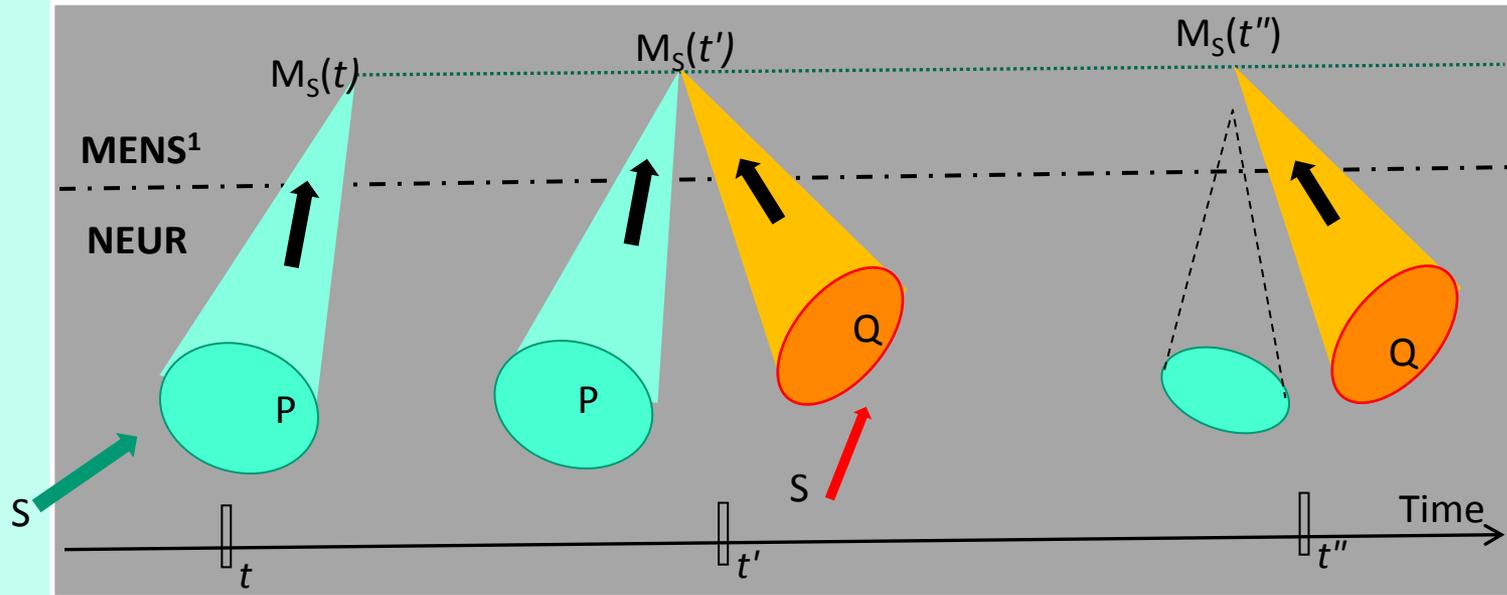


Un simple stimulus en t active synchroniquement une assemblée de neurones, modélisée par un *pattern* P dans $NEUR_t$. Un *pattern* P est une famille d'objets P_i et de liens distingués entre eux. P peut collectivement activer un (cat-)neurone N via un *lien collectif* de P vers N . Un *lien collectif* est une famille de liens s_j de P_i to N , corrélés par les liens distingués de P , de sorte que tous ces liens activent N simultanément.

Par répétition, les liens distingués de P se renforcent (règle de Hebb) et P prend une identité propre. S'il n'existe pas de "neurone de grand-mère" pour S , l'image mentale de S sera modélisée par un cat-neurone (de niveau 1) M_s qui *recolle* P au sens d'être la colimite de P and $MENS$.

Définition. M_s est la *colimite* de P s'il existe un lien collectif (c_i) de P vers M_s au travers duquel tout autre lien collectif (s_j) de P vers un cat-neurone N se factorise en un unique lien s recollant les s_j .

DEGENERESCENCE. MEMOIRE FLEXIBLE

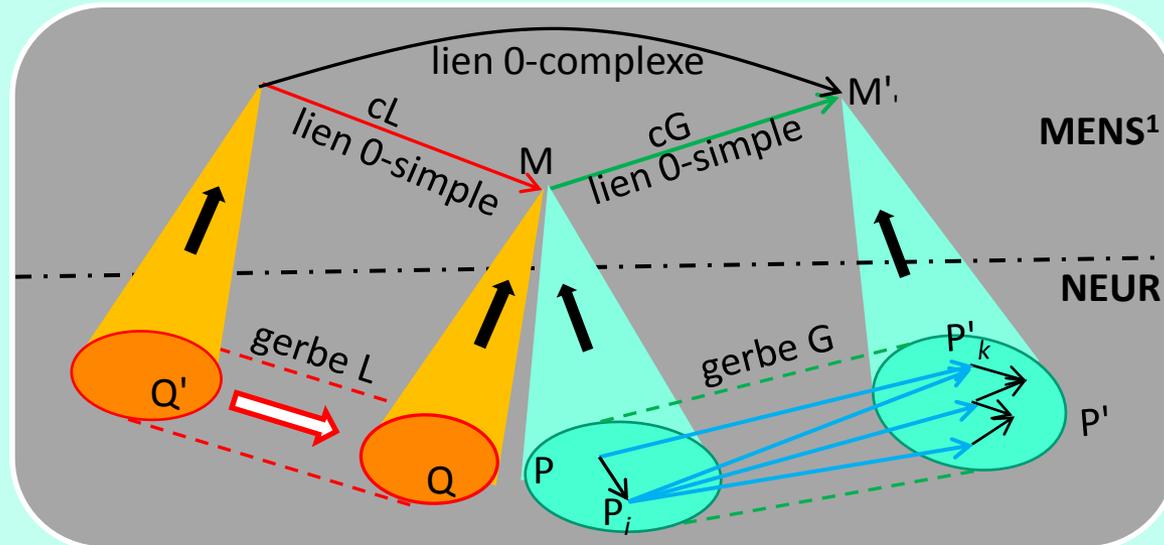


Edelman a insisté sur la *propriété de dégénérescence du code neuronal*, à savoir plusieurs assemblées de neurones, non nécessairement liées, peuvent correspondre au même output.

Ainsi S peut activer, à différents instants, diverses assemblées synchrones non nécessairement interconnectées. Dans NEUR les patterns correspondants P et Q ont le même rôle fonctionnel : il y a une correspondance biunivoque entre leurs liens collectifs vers un même N. Le passage de P à Q est appelé un *balancement*.

Dans MENS, le cat-neurone M_S image mentale de S doit représenter l'invariant commun à ces patterns, et donc est colimite de chacun. Ainsi M_S prend une identité propre, pouvant même se dissocier de P au cours du temps; c'est une mémoire flexible adaptable aux changements. L'*empan de stabilité* de M_S en t est la plus petite période pendant laquelle il 'conserve' l'une ses décompositions qu'il avait en t .

PROBLEME DU LIAGE : LIENS SIMPLES ET COMPLEXES



Dans MENS le *Problème du Liage* revient à définir les liens entre cat-neurones . Il y en a 2 sortes.

1. Si P et P' sont des patterns, une *gerbe* G de P vers P' est un ensemble maximal de liens de chaque P_i vers au moins un P'_k vérifiant:

(i) s'il existe 2 liens dans G issus de P_i ils sont corrélés par un zig-zag de liens distingués de P'.

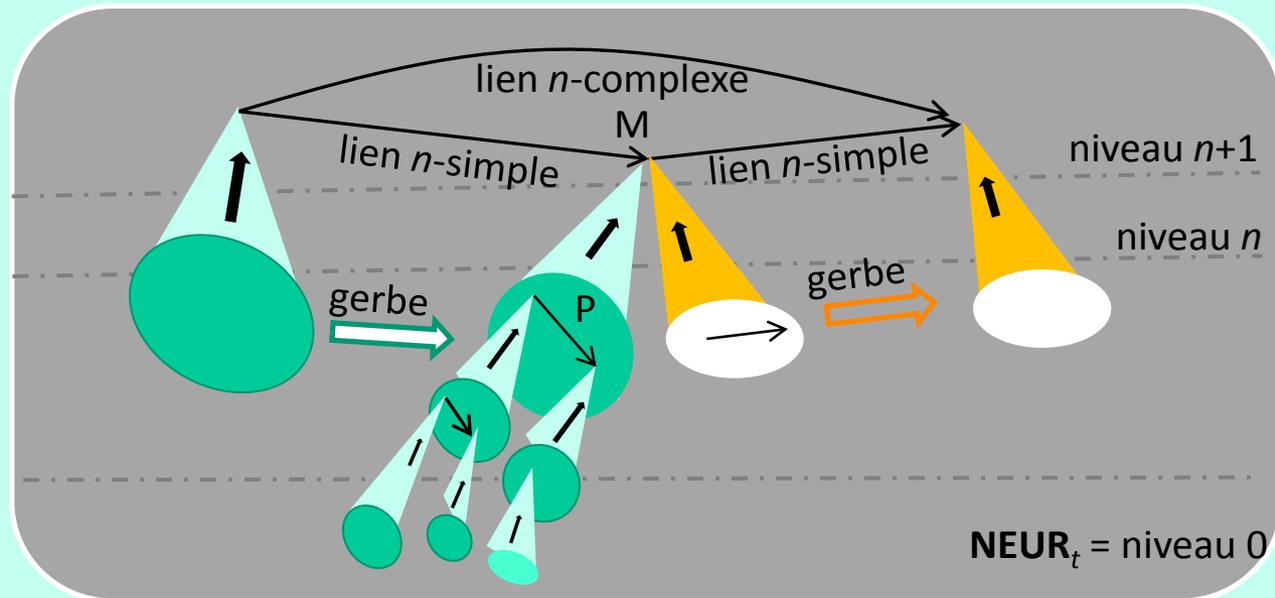
(ii) Les composés d'un lien de G avec un lien distingué de P ou de P' est dans G.

Si P et P' ont des colimites M_S and M_{S'}, la gerbe se recolle en un unique lien cG de M_S vers M_{S'}, dit *lien 0-simple*. Un composé de liens 0-simples recollant des gerbes adjacentes est 0-simple.

2. Un cat-neurone M est *multiforme* s'il est colimite de 2 patterns P and Q *non-interconnectés* au sens: il n'existe pas de gerbe entre eux se recollant en l'identité de M.

L'existence de cat-neurones multiformes (propriété de dégénérescence) entraîne l'existence de liens 0-complexes composés de liens 0-simples recollant des gerbes non adjacentes. Il *émergent* au niveau des cat-neurones.

LA HIERARCHIE DES CAT-NEURONES



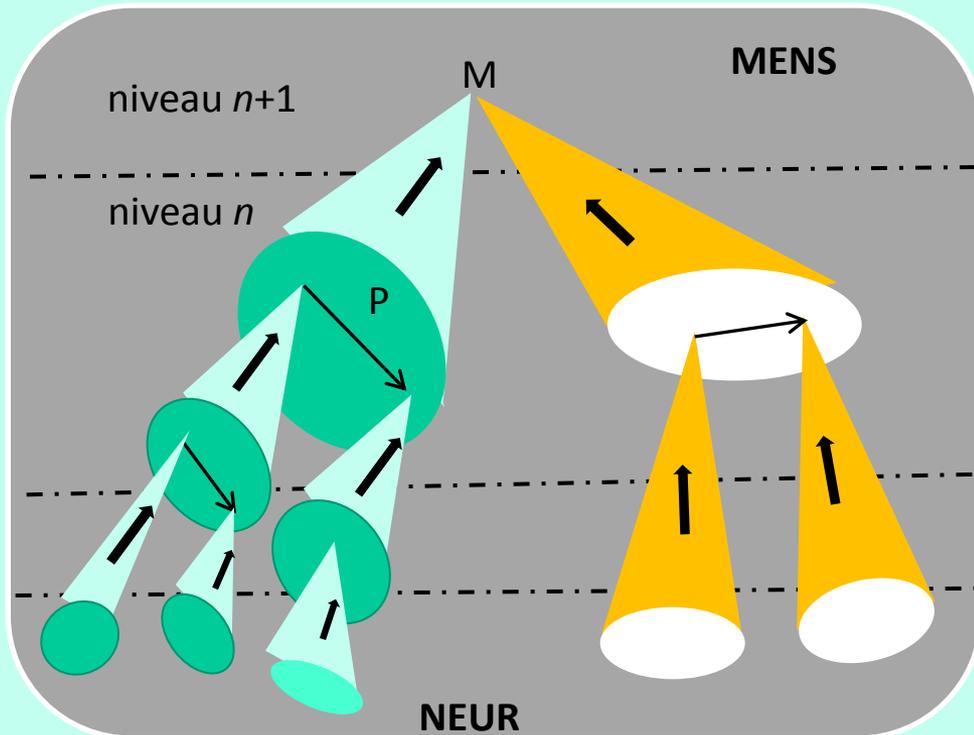
La construction est itérée pour représenter des objets mentaux plus complexes. En y remplaçant les assemblées de neurones par des assemblées de cat-neurones de niveau ≤ 1 , on définit des *cat-neurones de niveau 2* et leurs liens 1-simples et 1-complexes.

Par itérations successives, on obtient une hiérarchie de cat-neurones de niveaux croissants. de sorte que $MENS_t$ est une *catégorie hiérarchique*, au sens : ses objets sont répartis en niveaux, de sorte qu'un objet de niveau $n+1$ est la colimite d'au moins un pattern de niveau $\leq n$. De plus sa hiérarchie est *basée sur le niveau 0* : tous ses liens se déduisent de ceux de ce niveau par des suites d'opération de recollements et compositions de liens.

La propriété de dégénérescence s'étendant, MENS vérifie le

Principe de Multiplicité. Il existe des cat-neurones de niveau n , dits *multiformes*, qui ont des décompositions P et Q de niveaux inférieurs qui sont non-connectées par une gerbe.

ACTIVATION D'UN CAT-NEURONE. ORDRE DE COMPLEXITE



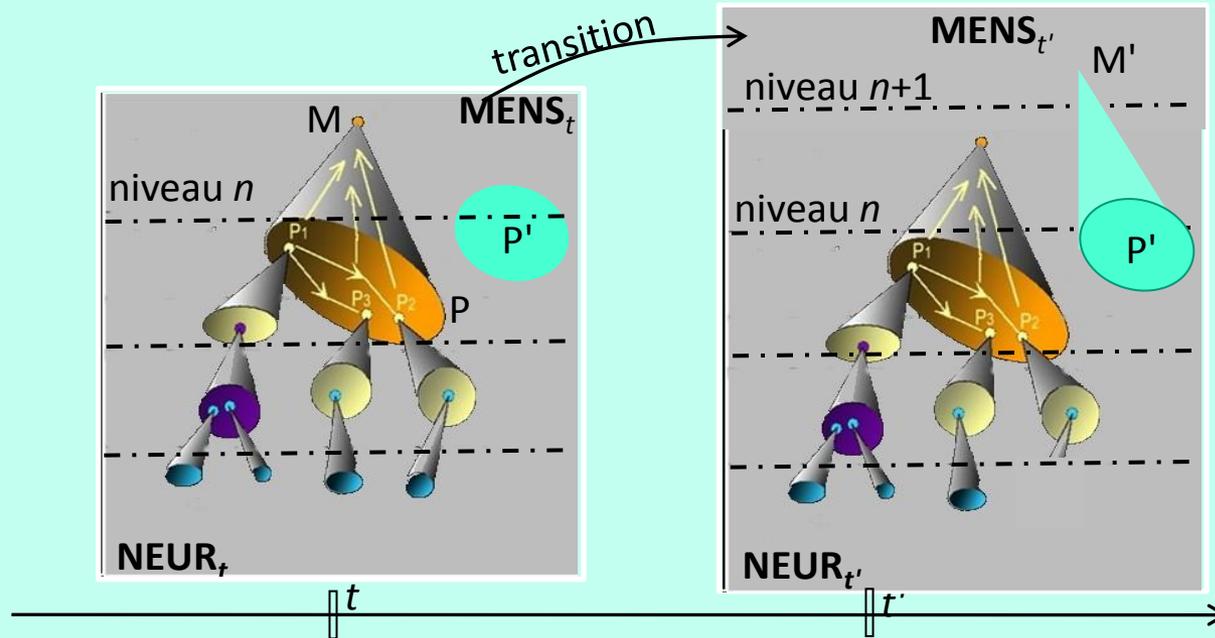
L'*activation* d'un cat-neurone M de niveau $n+1$ consiste en le déroulement d'une de ses ramifications jusqu'au niveau neural : activation d'une décomposition P en assemblée synchrone de cat-neurones de niveaux inférieurs, puis décomposition de chaque P, ... jusqu'à l'*activation physique* d'assemblées synchrones de neurones. A chaque pas, on a choix entre diverses décompositions, éventuellement non-connectées, de sorte que M a *plusieurs réalisations physiques* en hyperassemblées de neurones.

L'*ordre de complexité* de M est la plus petite longueur d'une ramification. Il indique le nombre minimal de pas nécessaires pour l'activation de M.

Théorème. *L'existence de cat-neurones d'ordre de complexité > 1 est une conséquence du Principe de Multiplicité.*

Ainsi le principe de multiplicité (dû à la dégénérescence du code neuronal) est à la base de l'émergence d'objets et processus mentaux d'ordre de complexité croissant.

LE SYSTEME HIERARCHIQUE EVOLUTIF MENS

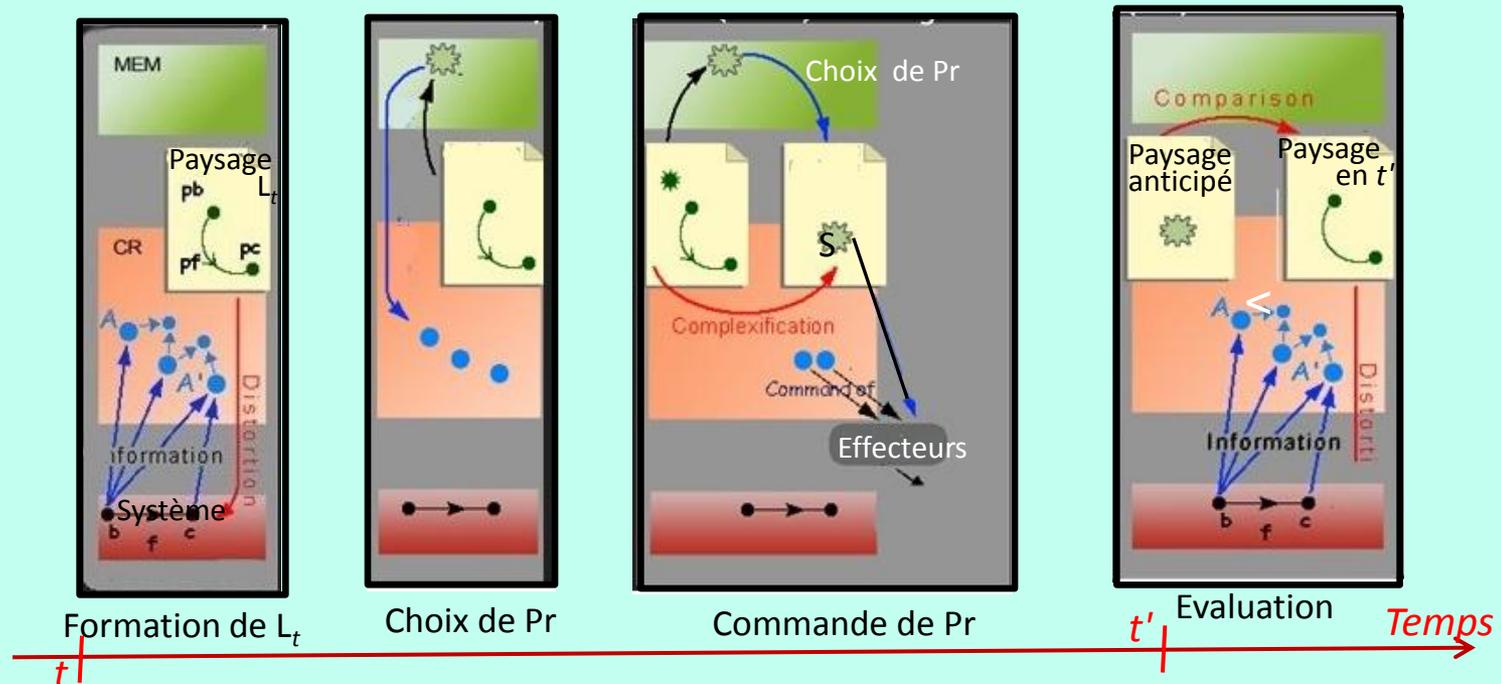


MENS est un système évolutif hiérarchique. La transition de t à t' résulte d'un processus de *complexification pour une procédure* Pr ayant des objectifs des types suivants : adjonction de nouveaux neurones, formation (ou préservation, si elle existe) de la colimite de certains patterns, suppression ou décomposition de cat-neurones. La complexification $MENS_{t'}$ de $MENS_t$ pour Pr est la catégorie où ces objectifs sont remplis de façon optimale. Elle est explicitement construite.

Au cours du temps il peut émerger des cat-neurones (donc des objets et processus mentaux) d'ordre de complexité croissant en vertu du :

Théorème d'Emergence. *Si une catégorie vérifie le Principe de Multiplicité, une complexification le vérifie aussi, et une suite de complexifications peut conduire à l'émergence d'objets d'ordre de complexité strictement croissant.*

UNE ETAPE D'UN COREGULATEUR



Un corégulateur CR opère par étapes selon sa propre échelle de temps discret, avec des objectifs spécifiques à sa fonction. Une étape de t vers t' est divisée en :

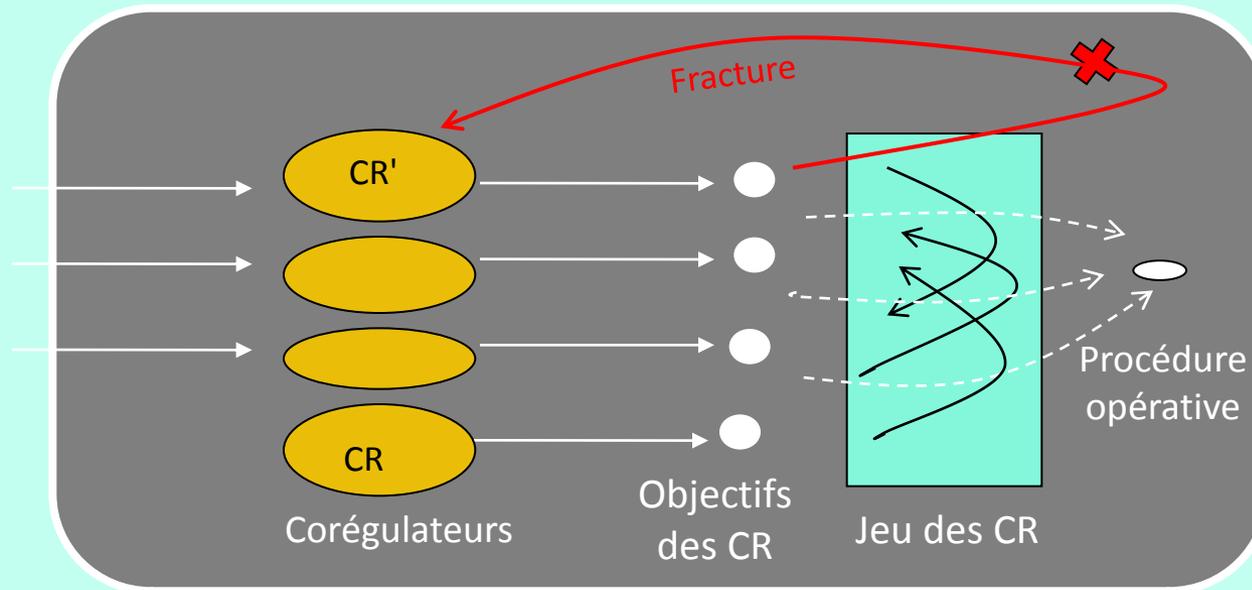
1. *Analyse* : Formation du paysage de CR en t (modélisé par une catégorie L_t) à l'aide des informations partielles accessibles à CR.

2. *Décision* : Choix d'une procédure admissible Pr avec l'aide de Mem ; le paysage anticipé AL à la fin de l'étape est modélisé par la complexification de L_t pour Pr.

3. *Commande* : Les objectifs de Pr sont envoyés aux effecteurs pour être réalisés sur le système. Analytiquement, la réalisation devrait conduire à un attracteur d'un système d'équations différentielles en termes de délais de propagation et forces des liens.

4. *Evaluation* : En t' le résultat (positif or négatif) est évalué par comparaison de AL avec le nouveau paysage ; on parle d'une *fracture* pour CR si les objectifs ne sont pas atteints.

LE JEU ENTRE LES COREGULATEURS



Les différents corégulateurs opèrent séparément via leur propre paysage et à leur rythme.

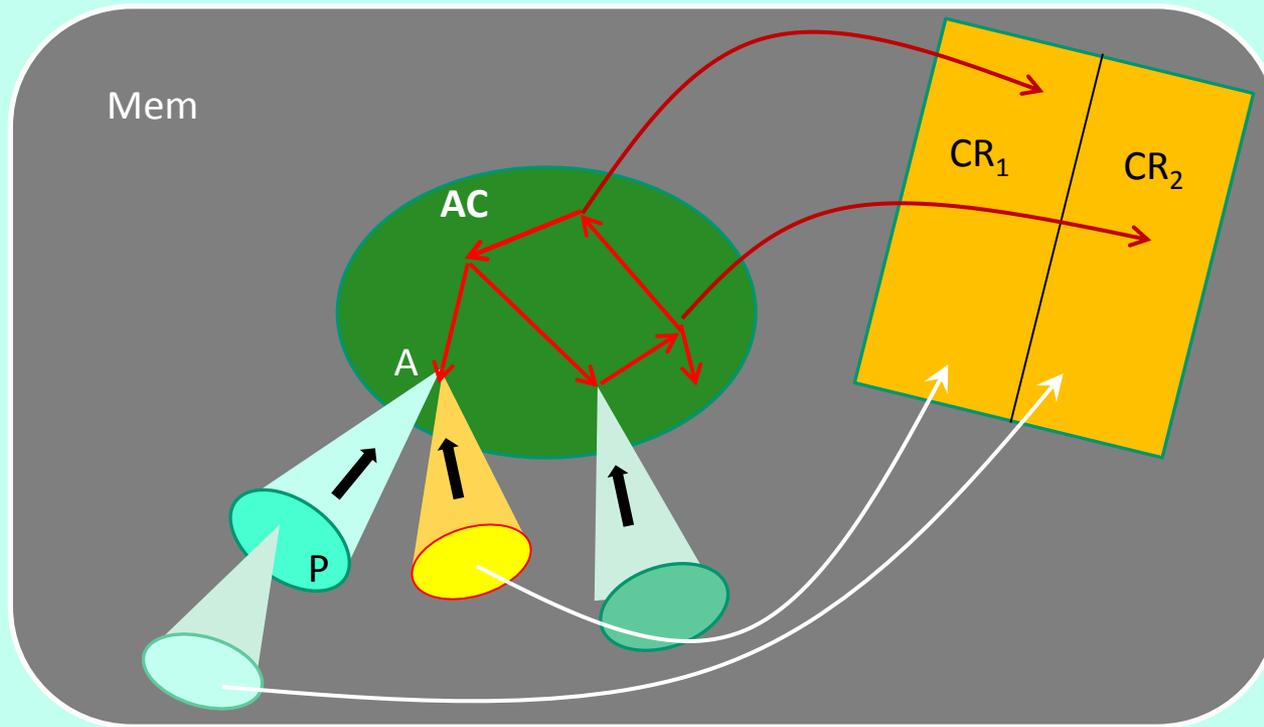
Mais à l'instant t , toutes les commandes de toutes leurs procédures sont envoyées aux effecteurs du système. Si les contraintes qu'elles imposent sont conflictuelles, un processus d'harmonisation, le *jeu des procédures*, est déclenché. Il tient compte des forces des divers corégulateurs et utilise la possibilité de balancements entre décompositions. Il conduit à la procédure opérative qui sera effectivement exécutée par le système; celle-ci peut causer des fractures à un corégulateur dont les objectifs ne sont pas retenus.

Parmi les causes de fracture figurent les *contraintes temporelles* d'un corégulateur CR :

$$p(t) \ll d(t) \ll z(t)$$

où $p(t)$ est la moyenne des délais de propagation des liens dans le paysage, $d(t)$ est la *période* du CR (= moyenne des durées des étapes précédentes) et $z(t)$ est le plus petit empan de stabilité des composants intervenant pendant l'étape.

NOYAU ARCHETYPAL ET PAYSAGE GLOBAL

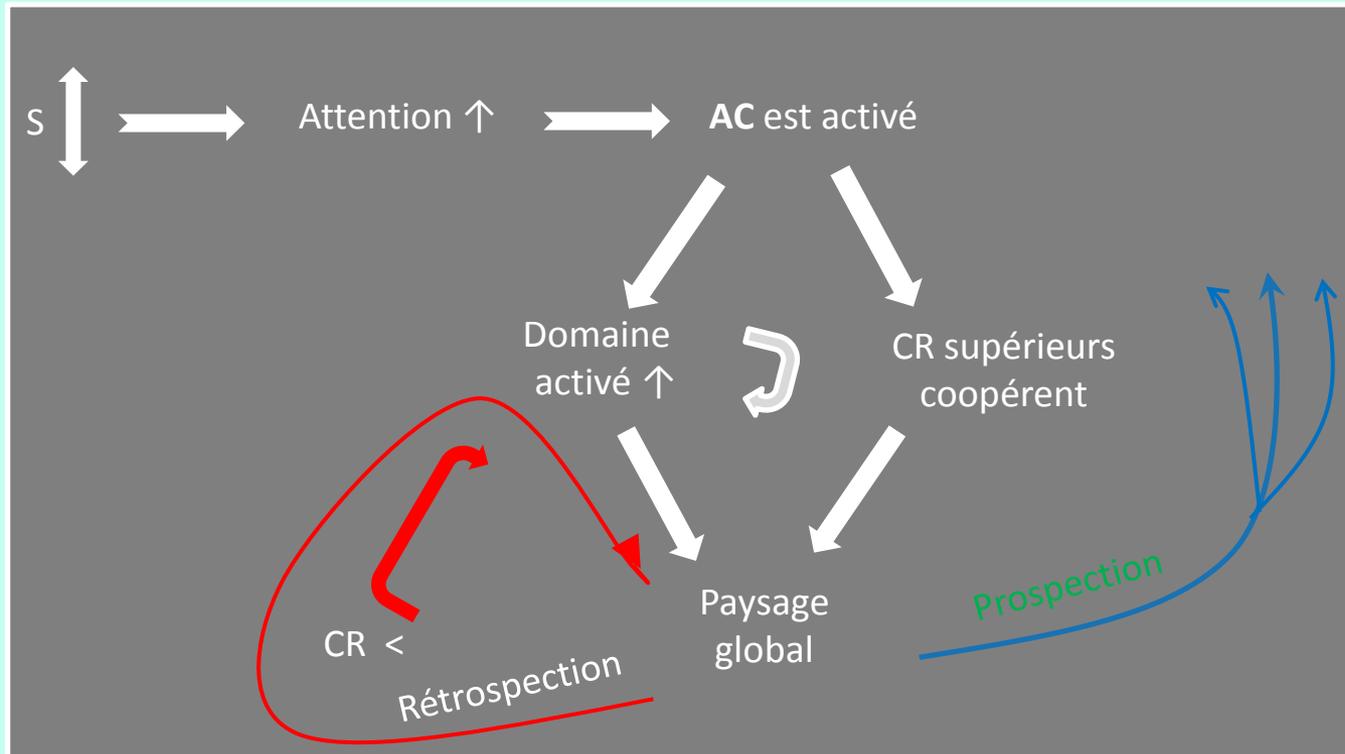


Le *noyau archétypal* AC est un sous-système de MENS dont les cat-neurones intègrent et unissent les expériences récurrentes de toute modalité et les connaissances essentielles au fonctionnement. Ses composants sont d'ordre supérieur, et liés par des liens rapides et forts, qui forment des boucles auto-entretenues.

L'activation d'une partie de AC se propage au travers de ces boucles à un domaine étendu, puis aux ramifications de ses A, avec possibilité de balancements entre décompositions.

Toutes ces informations sont transmises à des corégulateurs liés à AC, dits *conscients*, qui peuvent étendre leurs paysages et les unir en un *paysage global* qui persiste plus longtemps (via AC), sur lequel des processus cognitifs d'ordre supérieur peuvent se dérouler.

PROCESSUS CONSCIENTS. ANTICIPATION



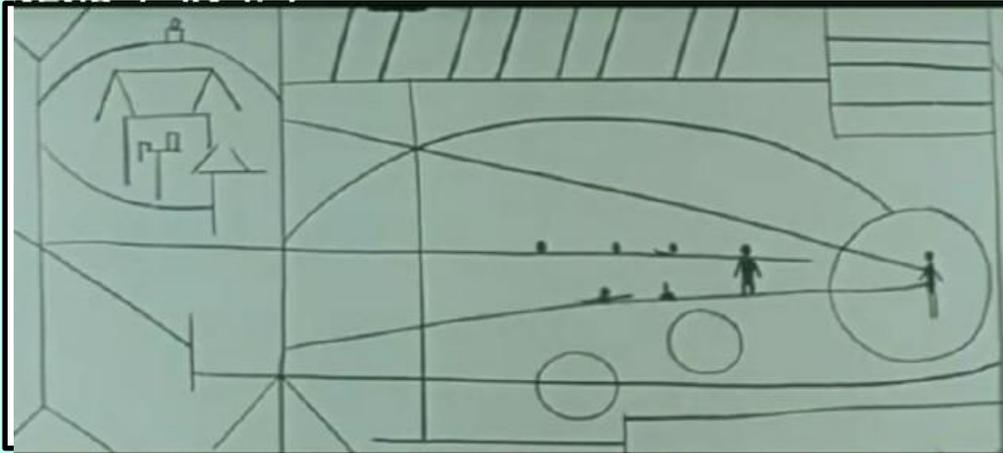
Un évènement imprévu S augmente l'attention, ce qui active une partie de AC, et l'activation en se propageant conduit à la formation d'un paysage global GL dans lequel peuvent se développer des *processus conscients*, caractérisés par l'intégration de la dimension temporelle, via :

Processus de rétrospection (en plusieurs étapes) permettant de rappeler le passé récent à différents niveaux pour analyser S et ses causes possibles (via un processus d'abduction).

Processus de prospection dans GL à long terme, pour construire itérativement des paysages virtuels où différentes suites de procédures (ou scénarios) peuvent être essayées en anticipant leurs résultats sans dommage.

La *pensée* se caractérise par un enchevêtrement de ces 2 processus.

DU FILM DE COUZOT "LE MYSTÈRE PICASSO" (1958)



La réalisation de Pr_1 se fait par étapes, via ces corégulateurs

A chaque étape, l'état actuel du tableau est évalué dans le paysage des CR_v , une procédure est choisie via GL_1 pour le modifier, en tenant compte de la résonance interne (via CR_e), puis appliquée par des CR_m .

D'abord le peintre fait rapidement une esquisse en quelques traits.

Puis il ajoute progressivement divers motifs et personnages

Devant une toile vide, l'activation de AC permet la formation d'un paysage global GL_1 . Des souvenirs liés à une plage et aux techniques picturales y sont retrouvés par rétrospection, puis par prospection, le peintre choisit une procédure Pr_1 à long terme pour peindre une plage, en recrutant des corégulateurs visuels CR_v , moteurs CR_m , évaluateurs CR_e .





Une suite d'évaluations négatives (via CR_e) conduit à des changements plus importants, les couleurs s'assombrissent, des motifs et personnages sont modifiés, supprimés puis rajoutés plus ou moins anarchiquement. Le tableau devient confus.

Le peintre reconnaît qu'il y a fracture dans le paysage global GL_1 par manque de stratégies cohérentes : il parle d'un "drame".

Cette fracture cause une augmentation de l'attention qui réactive AC.





L'activation de AC se propage et déclenche la formation d'un nouveau paysage global, GL_2 où le peintre cherche par rétrospection à comprendre le problème.

Un processus de prospection dans GL_2 conduit alors au choix d'une nouvelle procédure Pr_2 .

Elle consiste à travailler dans des paysages 'virtuels', par collage de petits papiers où des essais sont faits localement, sans toucher au reste.





Bien que la situation ne semble pas s'améliorer extérieurement, le peintre doit la juger autrement (via les CR_e), car il interrompt Pr_2 et forme un nouveau paysage global GL_3

Sur GL_3 il choisit une nouvelle procédure Pr_3 commençant par arracher les collages, de sorte à revenir à la toile telle qu'elle était à l'état précédent les collages.

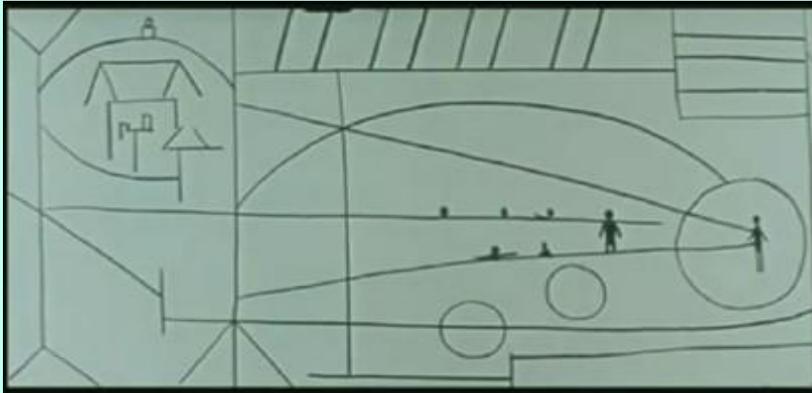




Pr₃ se poursuit par quelques légères modifications, faites rapidement, sans retour en arrière. Le résultat satisfait le peintre, d'où formation d'un dernier paysage global GL₄

La procédure Pr₄ consiste à prendre une toile blanche et à la peindre très rapidement, sans hésitation et sans fracture, juste par addition progressive de motifs. Le tableau final reprend divers motifs essayés précédemment, mais réalisés de manière plus stylisée





CONCLUSION

MENTAL	MENS	CERVEAU
Objet mental simple	(Cat)-neurone (niveau 0) Cat-neurone niveau 1	Neurone Assemblées synchrones de neurones
Algebre d'objets mentaux	Hiérarchie des cat-neurones	H yper-assemblées (= assemblées ⁿ) synchrones de neurones
Emergence	Principe de Multiplicité	"Degeneracy of the neural code" (Edelman)
Self	Noyau Archetypal	"Structural core" du cerveau (Hagman & al.)
Processus conscients	Paysage global Rétro- et pro-spection	"Consciousness loop " (Edelman)

MENS donne un modèle dynamique pour un système neuro-cognitif, montrant comment une hiérarchie d'objets et processus mentaux de plus en plus complexes emerge du fonctionnement du système neuronal, via une suite de recolllements d'assemblées de neurones synchrones.

Il montre comment une partie de la mémoire, le noyau archétypal, joue un rôle essentiel dans le développement de processus cognitifs d'ordre supérieur, jusqu'à la conscience basée sur une intégration du passé et du présent.

POUR PLUS D'INFORMATIONS

1. *Memory Evolutive Systems: Hierarchy, Emergence, Cogni-ion*, Elsevier, 2007.
2. MENS, a mathematical model for cognitive systems, *Journal of Mind Theory* 0-2, 2009
3. Les sites internet suivants contiennent nombre de nos articles :

<http://ehres.pagesperso-orange.fr>

<http://vbm-ehr.pagesperso-orange.fr>

MERCI