

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

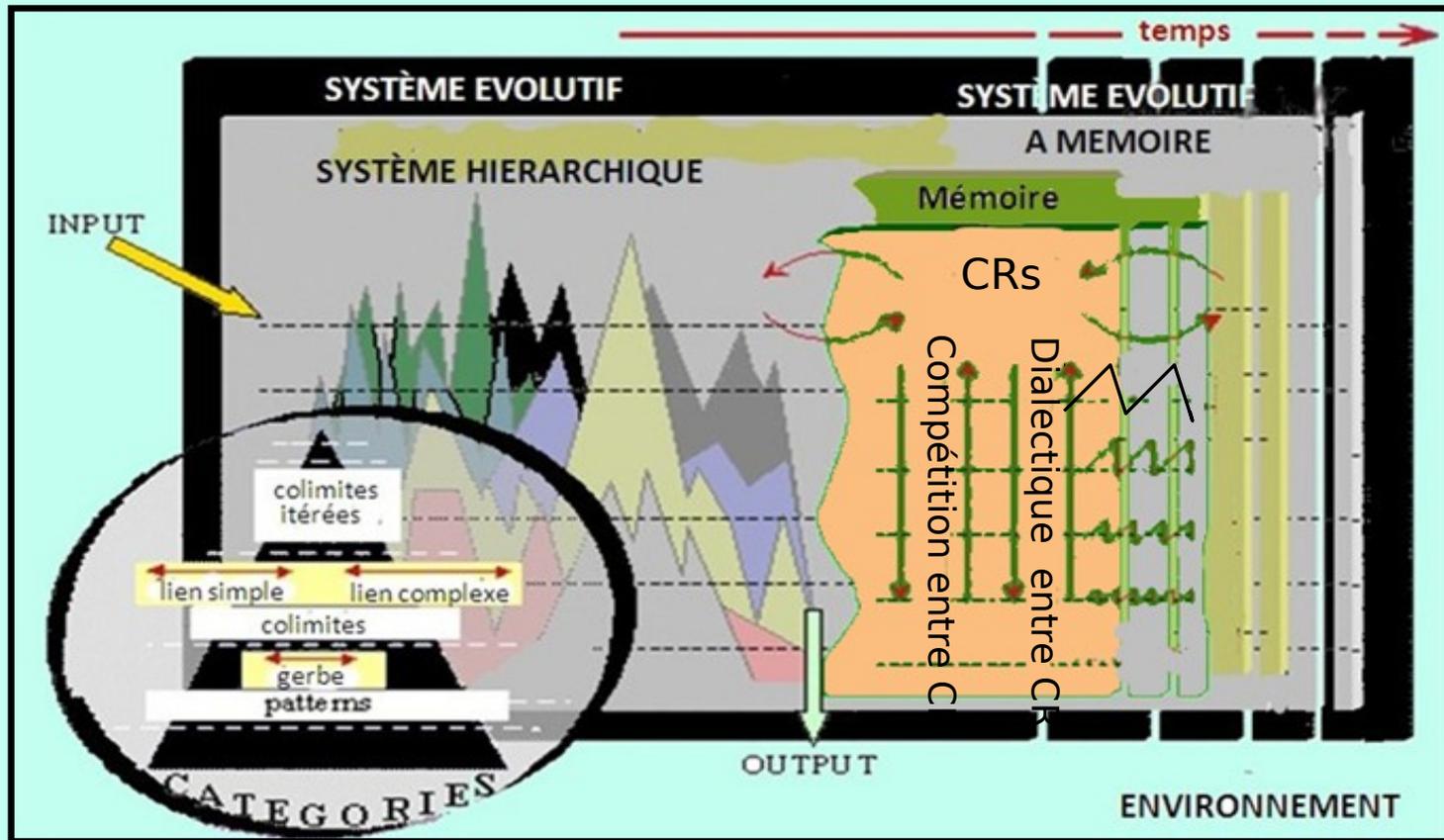
by

Andrée C. Ehresmann

(travail en collaboration avec Jean-Paul Vanbremeersch)

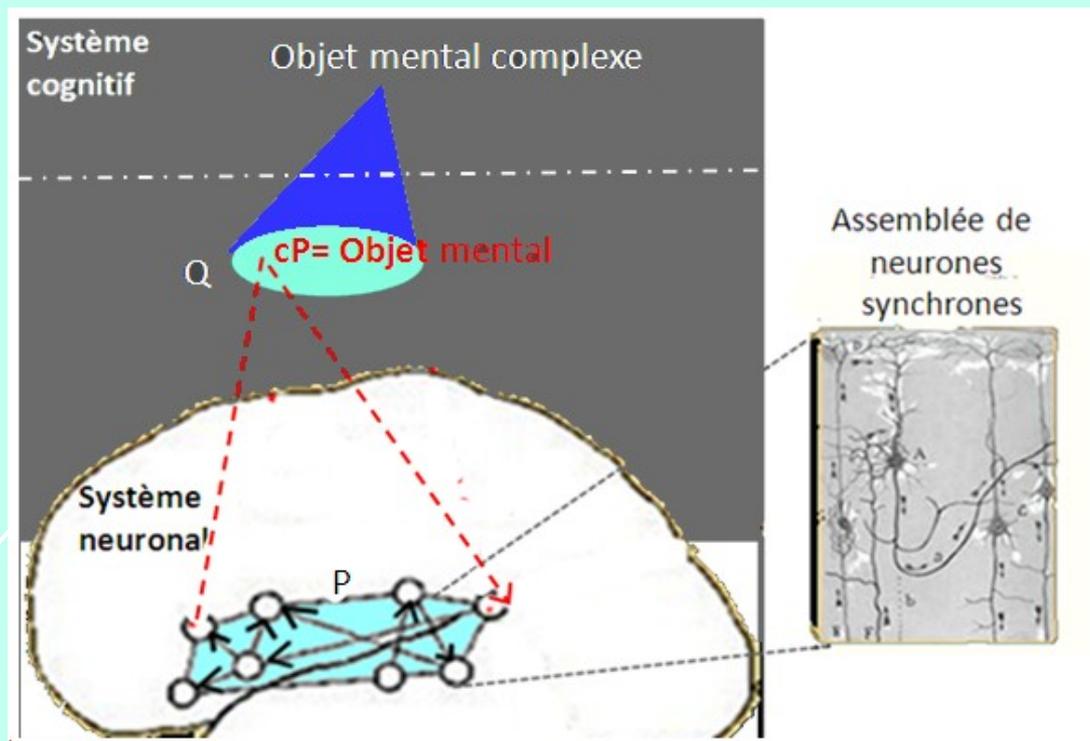
Université de Picardie Jules Verne
ehres@u-picardie.fr
<http://ehres.pagesperso-orange.fr>
<http://vbm-ehr.pagesperso-orange.fr>

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

SYSTÈME NEURO-COGNITIF. MODELE MENS



Le système neuronal d'un animal a pour composants ses neurones, reliés par les chemins synap-tiques 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	Complexification
Propriétés émergentes	Principe de Multiplicité

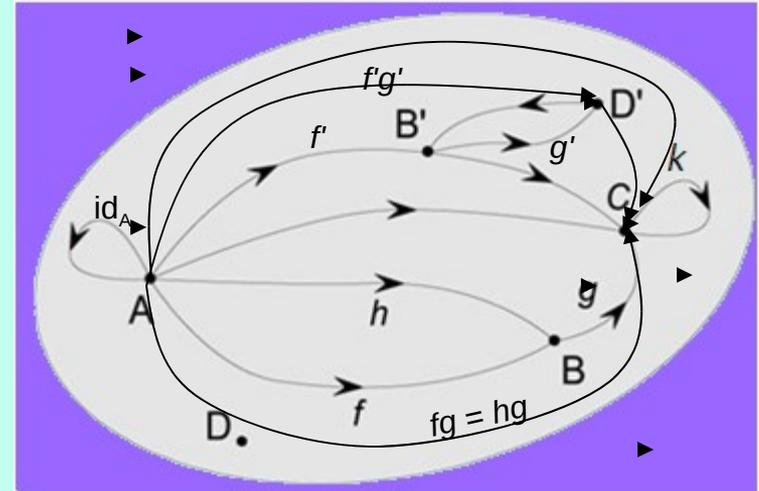
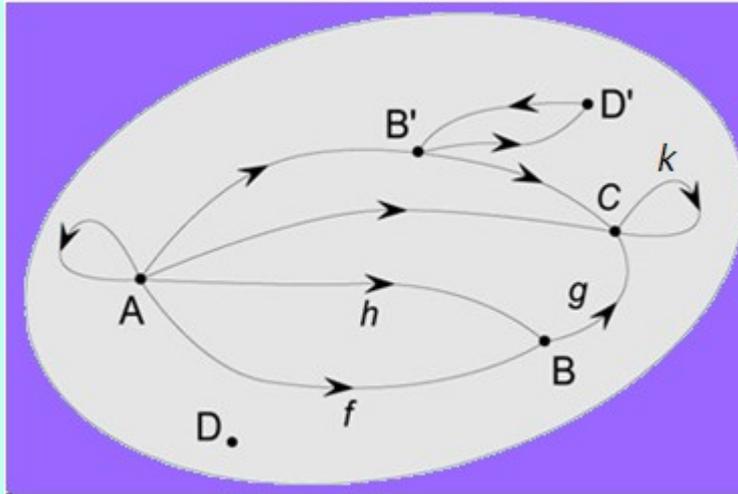
La théorie des catégories donne des outils pour analyser les opérations mentales et étudier :

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

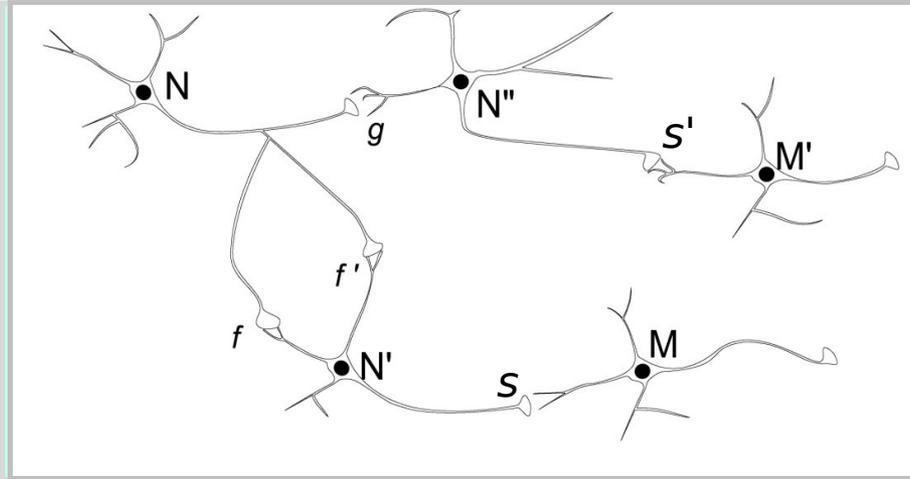


Un *(multi-)graphe* est un ensemble d'objets et d'arêtes orientées (ou *liens*) entre eux. Un *chemin* est une suite (f, g, k) de flèches successives.

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.

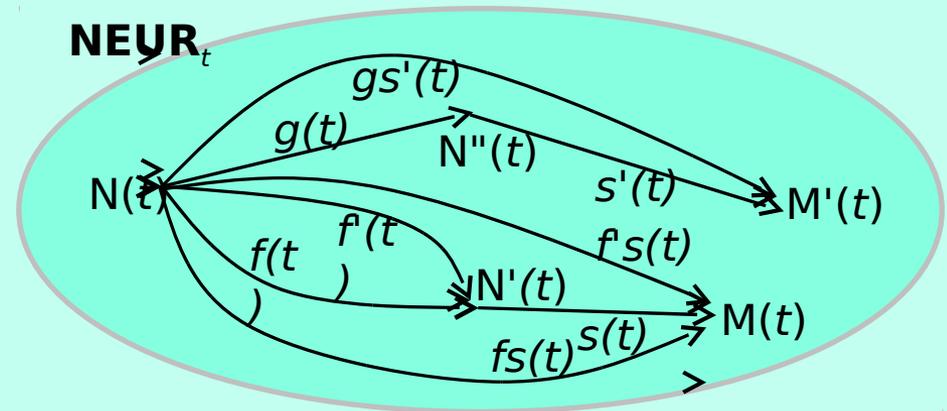
Pour tenir compte de la dynamique, un système ne sera pas modélisé par 1 catégorie, mais par un *Système Evolutif*, à savoir une famille de catégories H_t indexées par le temps, avec des foncteurs partiels 'transition' entre elles modélisant le changement de configuration du système.

GRAPHE ET CATEGORIE DES NEURONES

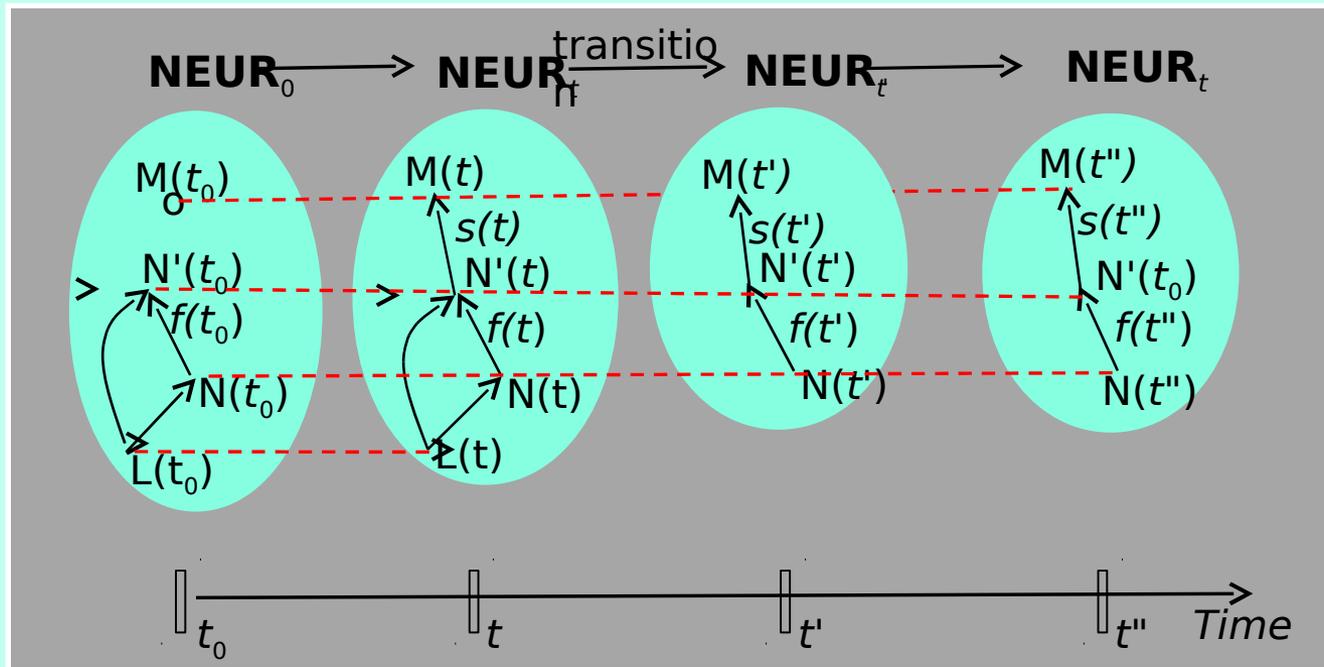


Le *graphe des neurones* à un instant t a pour objets les états $N(t)$ des neurones N existant en t (mesuré apr leur activité en t). Une flèche de $N(t)$ vers $N'(t)$ est une synapse f de N vers N' ; elle a un *délagi de propagation* et une *force* (pour transmettre l'activation de N). Cette force varie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



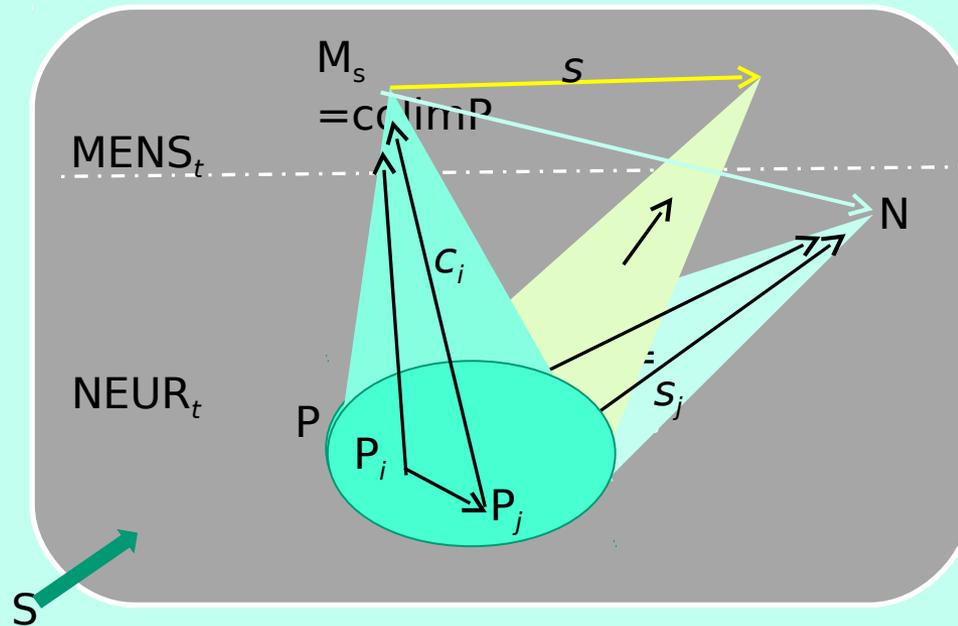
Le système évolutif des neurones NEUR est défini comme suit :

- (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



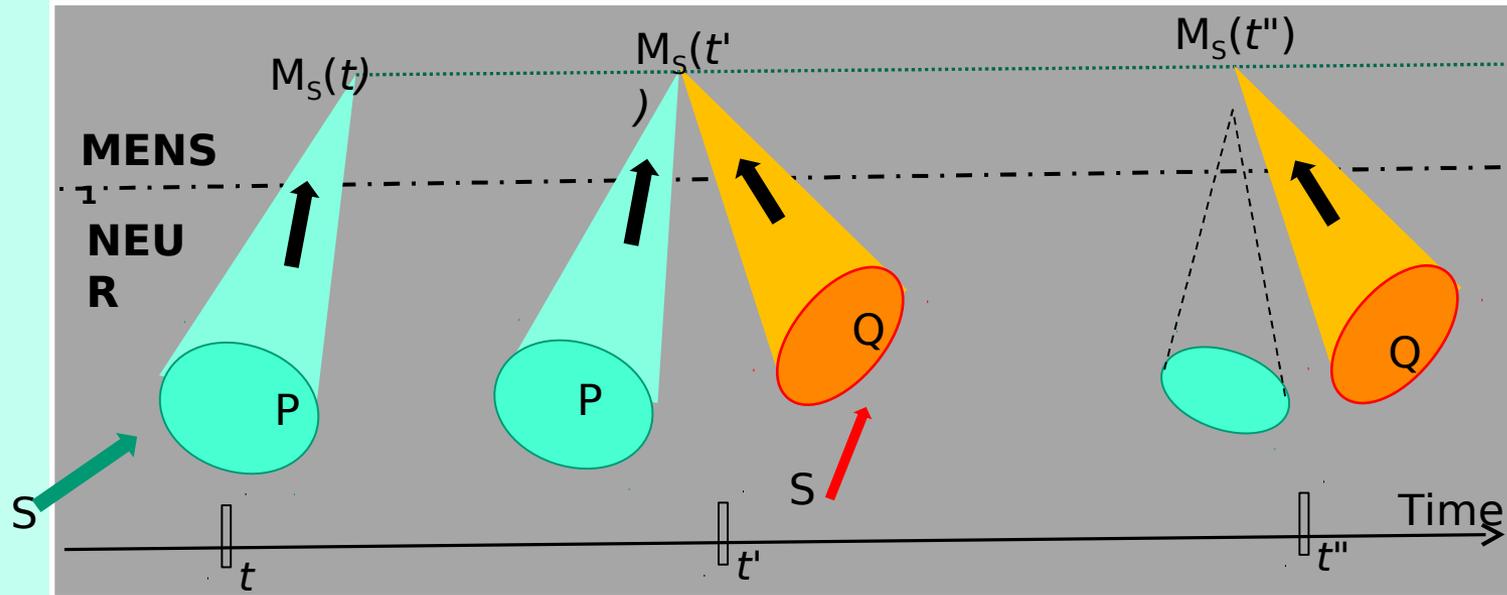
Un simple stimulus en t active synchroniquement une assemblée de neurones, modélisée par un *pattern* P dans $NEUR_t$. Un *pattern* P est une famille d'objets P_i et de liens distingués entre eux.

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_i de P vers N , corrélés par les liens distingués de P . Par répétition, les liens distingués de P se renforcent (règle de Hebb) et P prend une identité propre S si 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

DEGENERESCENCE. MEMOIRE FLEXIBLE

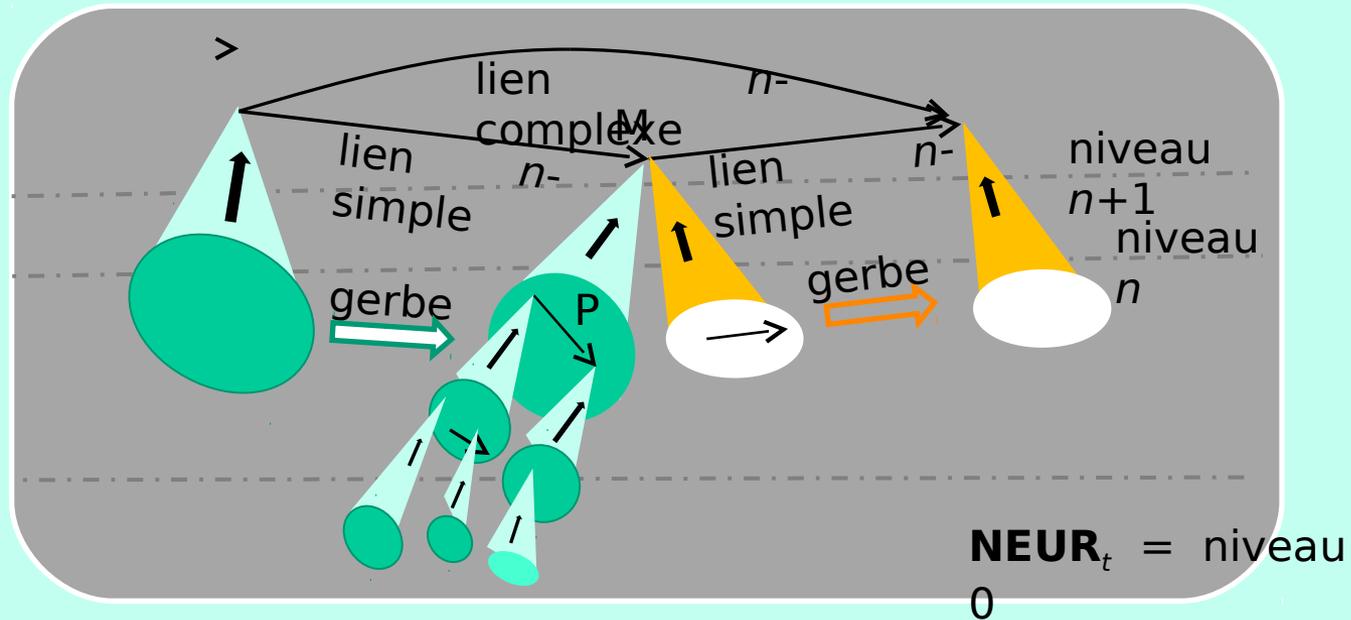


Edelman a insisté sur la *propriété de dégénérescence du code neuronal*, à savoir plusieurs assemblées de neurones, non nécessairement liées, peuvent correspondre au même output.

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 de ses décompositions, qu'il avait en t.

LA HIERARCHIE DES CAT-NEURONES



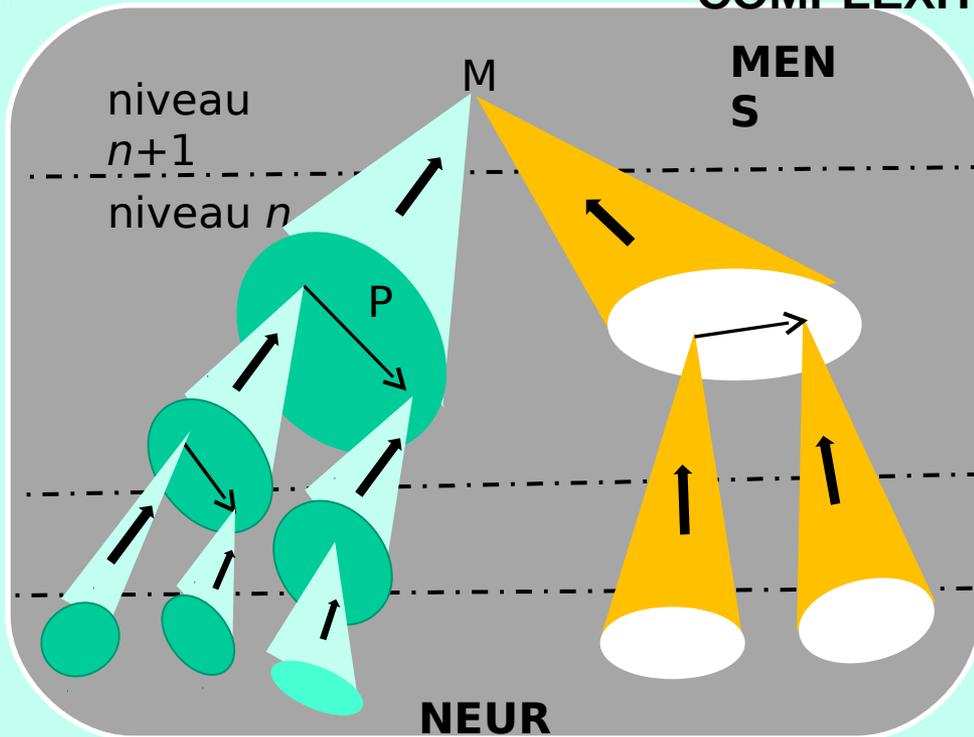
La construction est itérée pour représenter des objets mentaux plus complexes. En y remplaçant les assemblées de neurones par des assemblées de cat-neurones de niveau ≤ 1 , on définit des *cat-neurones de niveau 2* et leurs liens 1-simples et 1-complexes.

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

ACTIVATION D'UN CAT-NEURONE. ORDRE DE COMPLEXITE



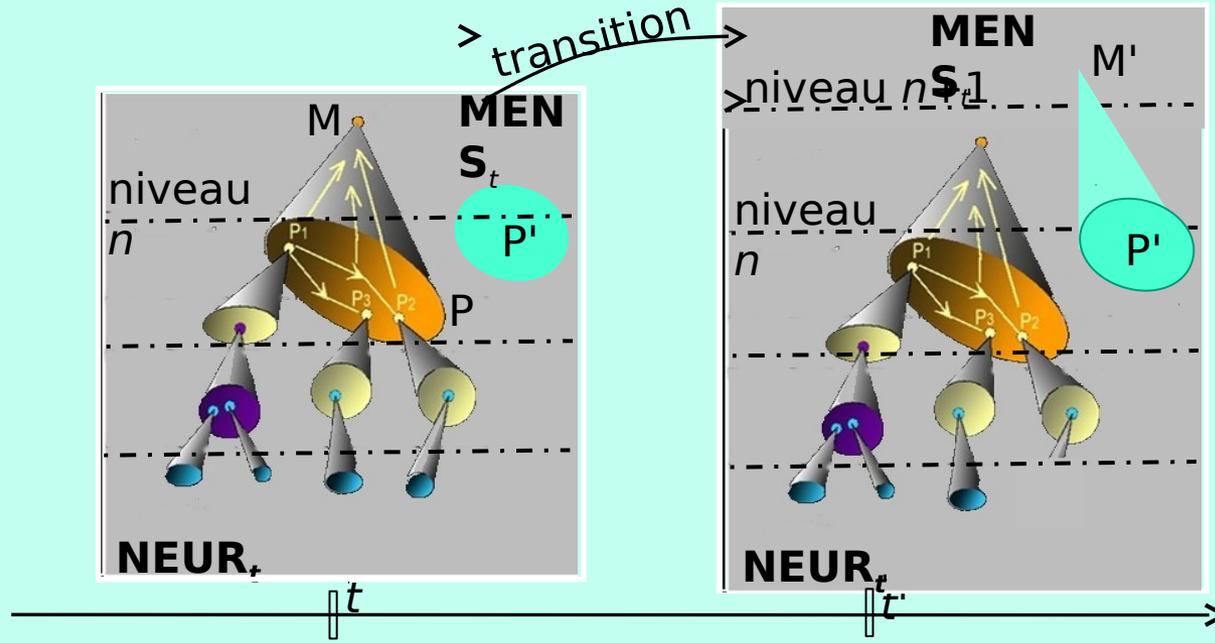
L'activation d'un cat-neurone M de niveau $n+1$ consiste en le déroulement d'une de ses ramifications jusqu'au niveau neuronal : activation d'une décomposition P en assemblée synchrone de cat-neurones de niveaux inférieurs, puis décomposition de chaque P, ... jusqu'à l'activation physique d'assemblées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

L'ordre de complexité de M est la plus petite longueur de sa 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.

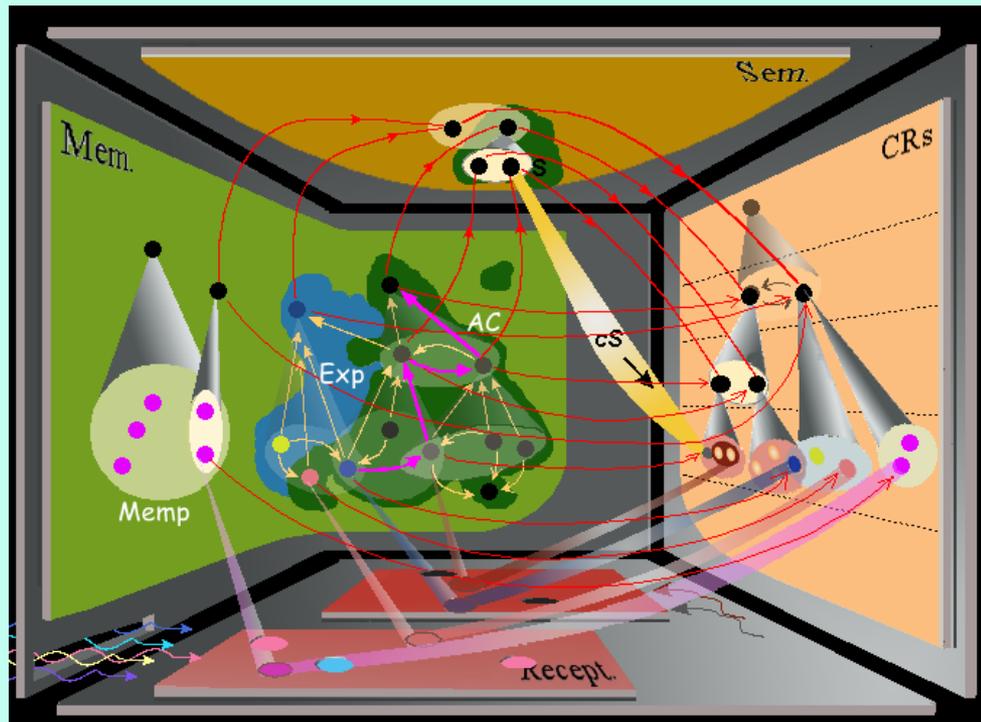
LE SYSTEME HIERARCHIQUE EVOLUTIF MENS



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 :

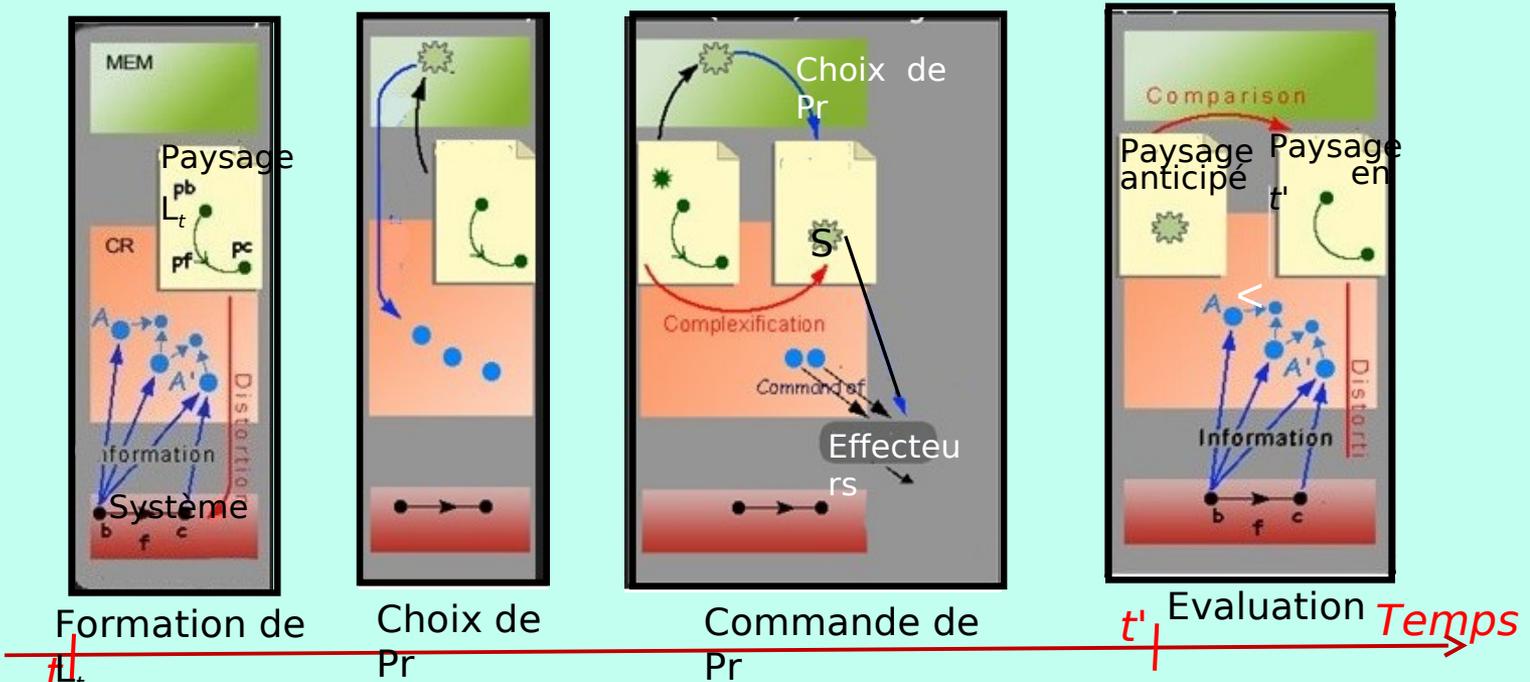
Théorème d'Emergence. Si une catégorie vérifie le Principe de Multiplicité, une complexification le vérifie aussi, et une suite de complexifications peut conduire à l'émergence d'objets d'ordre de complexité strictement croissant.

COREGULATEURS ET MEMOIRE



MENS est *auto-organisé* : la dynamique est modulée par les interactions entre un réseau de sous-systèmes évolutifs les *Corégulateurs*, basés sur des 'modules' fonctionnels du cerveau. Chaque corégulateur CR opère avec ses propres rythme, fonction, et accès différentiel au sous-système évolutif Mem de MENS Memodélin distingué. une *Mémoire Procédurale* dont les cat-neurones, ou *procédures*, ont des liens qui commandent des effecteurs ; une *Mémoire Sémantique* Sem dont les cat-neurones appelés *concepts*, classifient les cat-neurones selon certains attributs ; et un *noyau archétypal* AC jouant le rôle d'un modèle interne plastique. Les liens de propagation et forces des synapses s'étendent aux liens de MENS, et la règle de Hebb s'étend.

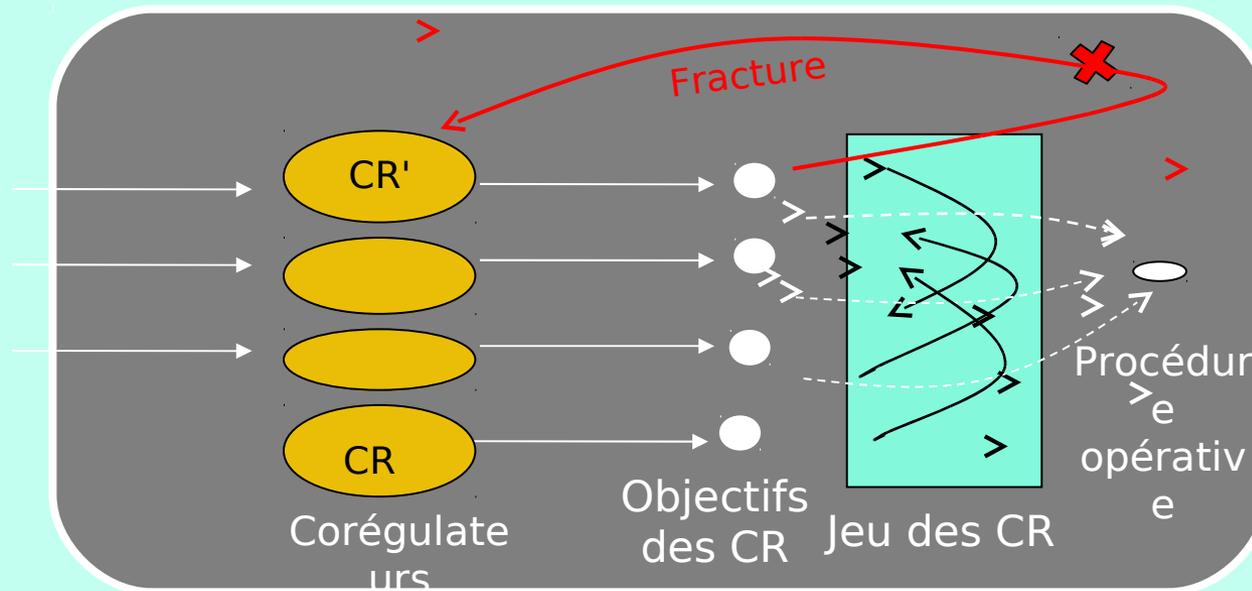
UNE ETAPE D'UN COREGULATEUR



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.
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 CR.
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.
4. **Evaluation** : En fin de l'étape, le résultat (positif ou négatif) est évalué par comparaison de AL avec le nouveau paysage ; on parle d'une *fracture* pour CR.

LE JEU ENTRE LES COREGULATEURS

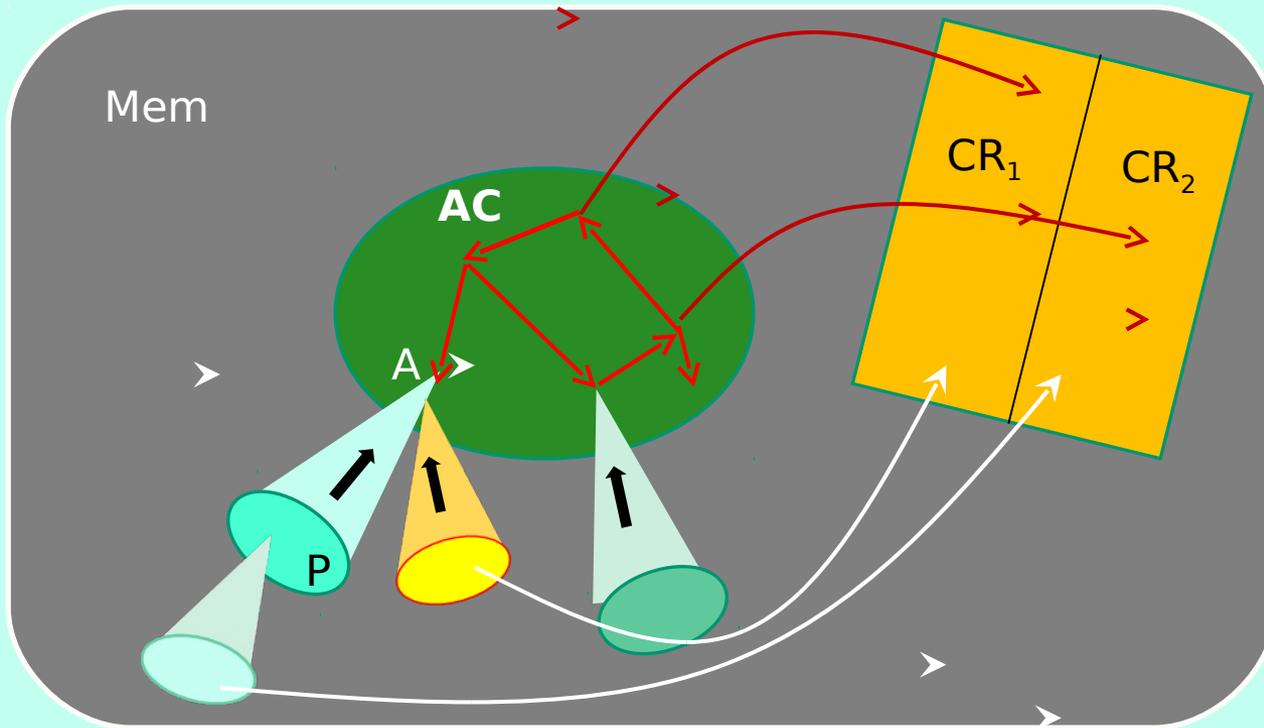


Les différents corégulateurs opèrent séparément via leur propre paysage et à leur rythme. Mais à l'instant t , toutes les commandes de toutes leurs procédures sont envoyées aux effecteurs du système. Si les contraintes qu'elles imposent sont conflictuelles, un processus d'harmonisation, le *jeu des procédures*, 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

NOYAU ARCHETYPAL ET PAYSAGE GLOBAL

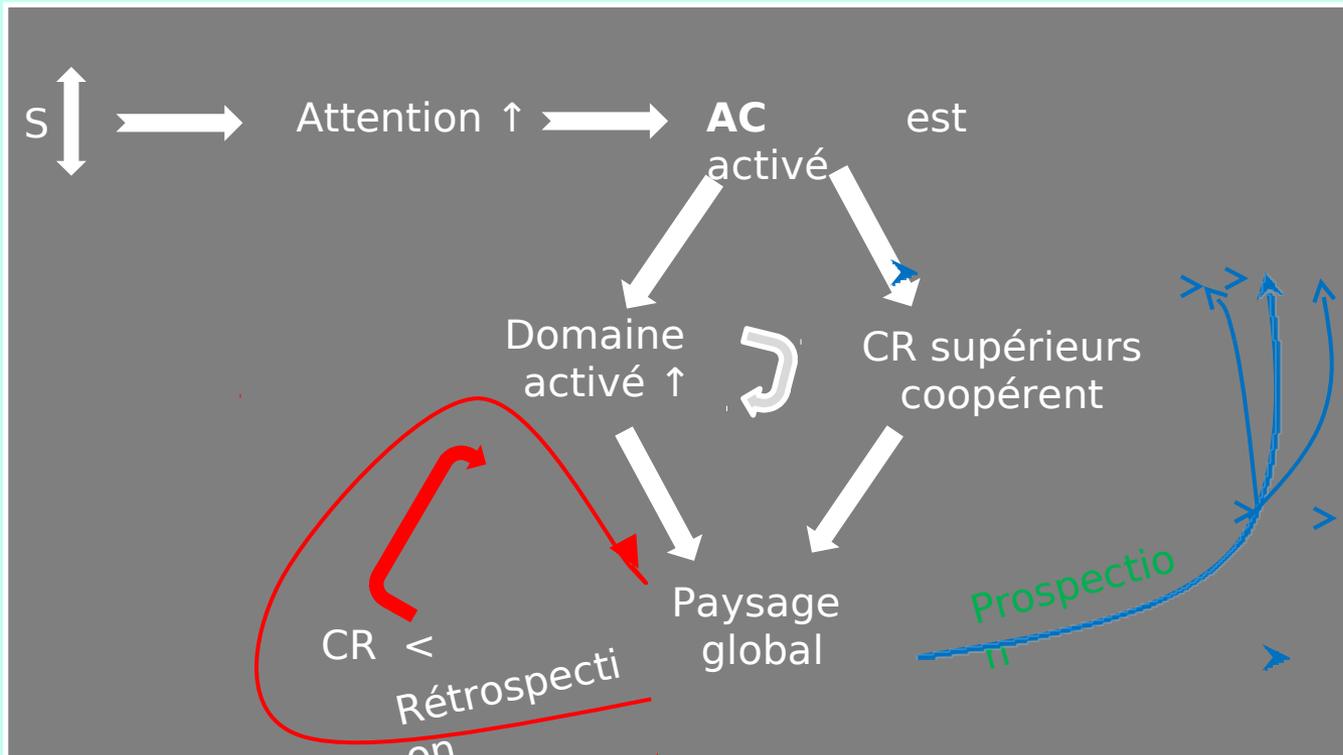


Le *noyau archétypal* AC est un sous-système de MENS dont les cat-neurones intègrent et unissent les expériences récurrentes de toute modalité et les connaissances essentielles au fonctionnement. Ses composants sont d'ordre supérieur, et liés par des liens rapides et forts, qui forment des boucles auto-entretenues.

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 décomposition

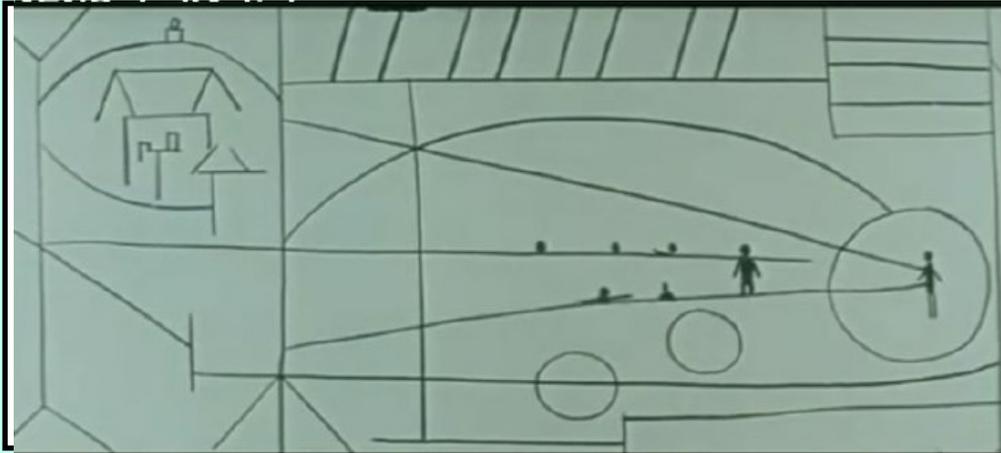
toutes ces informations sont transmises à des corégulateurs liés à AC, dits *conscients*, qui peuvent étendre leurs paysages et les unir en un *paysage global* qui persiste plus longtemps (via AC), sur lequel des processus cognitifs d'ordre supérieur peuvent se dérouler.

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 des *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*), et des *processus de prospective* 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.

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 d'abord le présent fait rapidement via une ER_q puis quelques traits progressivement appliqués par des CR_m 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





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.



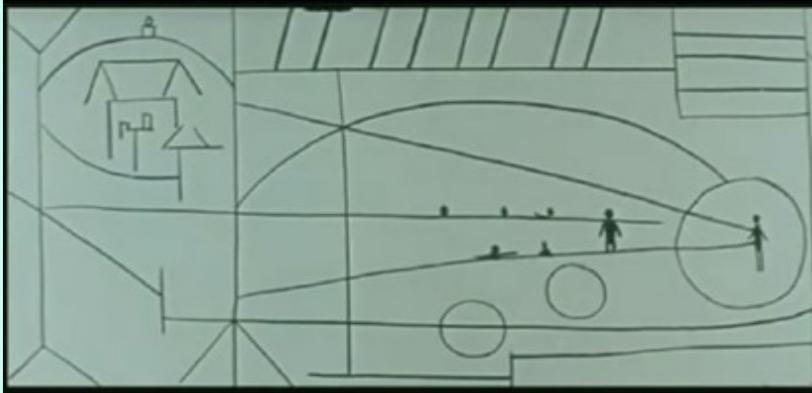


Pr₃ se poursuit par quelques légères modifications, faites rapidement, sans retour en arrière. Le résultat satisfait le peintre, d'où formation d'un dernier paysage global GL₄

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





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	Hyper-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 recollements 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, Cognition*, Elsevier, 2007.

2. MENS, a mathematical model for cognitive *systems*, *Journal of Mind Theory* 0-2, 2009

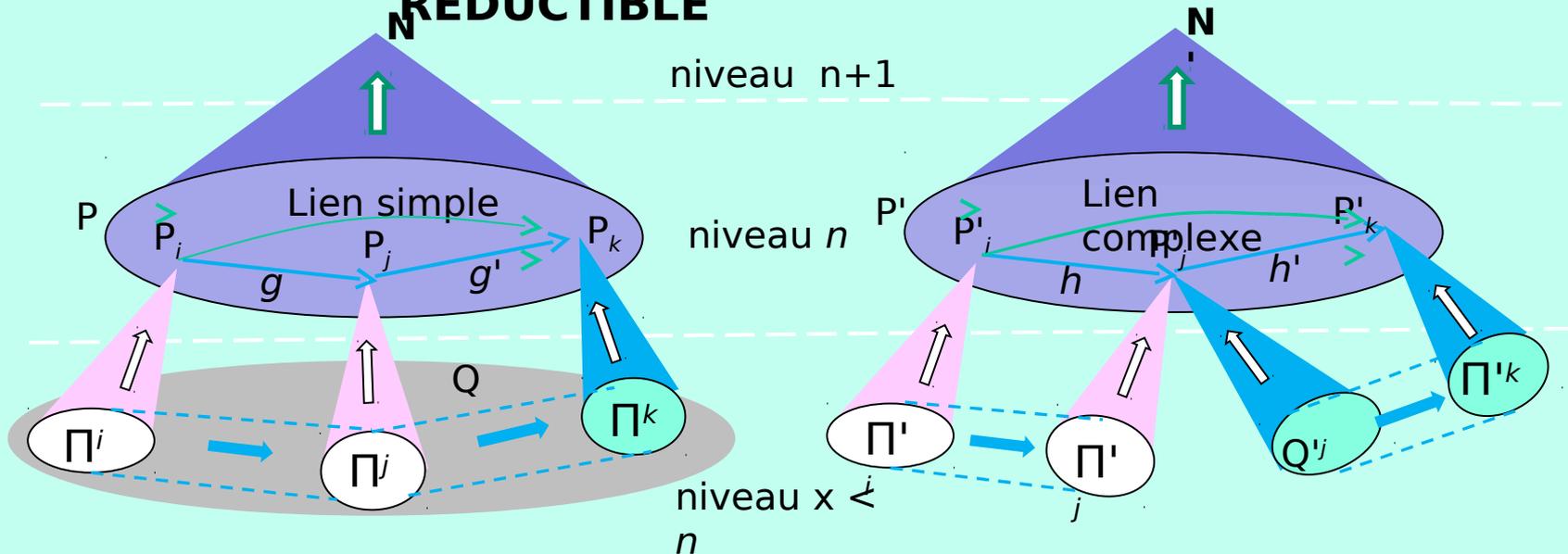
3. Les sites internet suivants contiennent nombre de nos articles :

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

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

MERCI

ORDRE DE COMPLEXITE. OBJET REDUCTIBLE



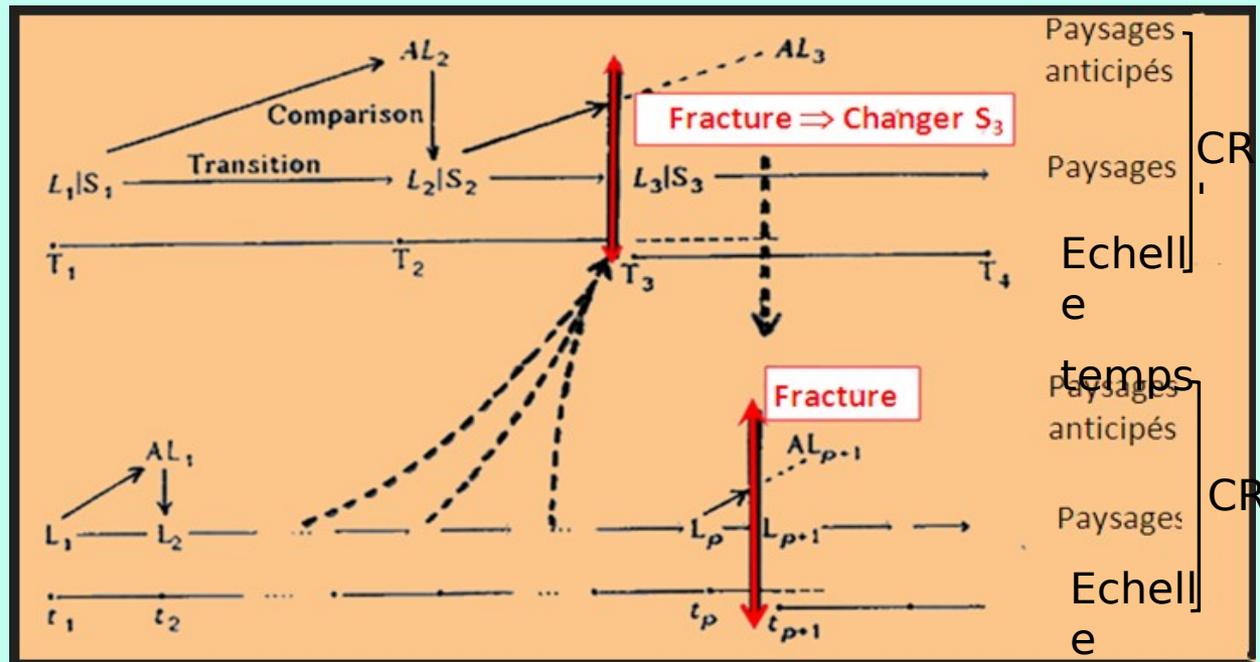
N est m -réductible s'il est la colimite d'un pattern dont les objets sont de niveau $\leq m$. L'ordre de complexité d'un objet N est le plus petit m tel que N soit m -réductible.

Théorème. Un objet N de niveau $n+1$ ayant une ramification $(P, (\Pi^i))$ telle que les liens distingués de P sont (Π^i, Π^j) -simples est $n-1$ -réductible, donc d'ordre de complexité $\leq n-1$.

L'objet N' qui recolle le pattern P' ayant un lien distingué h complexe n'est pas $n-1$ -réductible. Il faut 2 étapes pour le 'reconstruire' à partir des niveaux $< n$.

Théorème d'émergence. Dans une catégorie hiérarchique, le Principe de Multiplicité est la condition pour qu'il existe des objets d'ordre de complexité ≥ 1 .

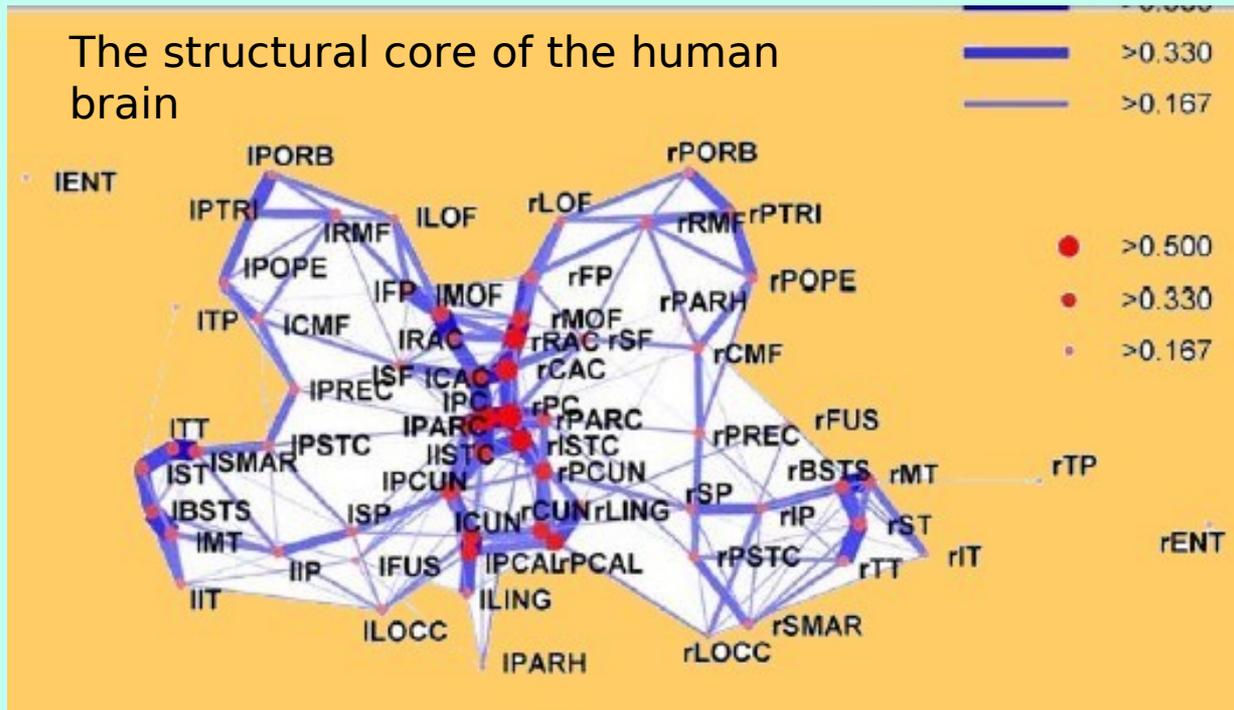
DIALECTIQUE ENTRE CR HETEROGENES



Une fracture non réparée assez rapidement cause une *dyschronie* pouvant nécessiter une *re-synchronisation* par changement de période du CR. Ceci peut se propager à d'autres niveaux :

Une accumulation de changements au niveau d'un corégulateur CR de bas niveau n'est perçue que plus tard au niveau d'un corégulateur CR' de niveau supérieur à étapes plus longues, et peut lui causer une fracture. Celle-ci sera réparée par un changement d'objectifs pouvant rétroagir par une fracture aux niveaux inférieurs, en particulier pour CR, ou même par un changement de période de ce corégulateur. D'où possibilité d'une *cascade de fractures et re-synchronisations*, comme dans notre *Théorie du vieillissement pour un organisme par une cascade de re-synchronisations de CR de niveaux*

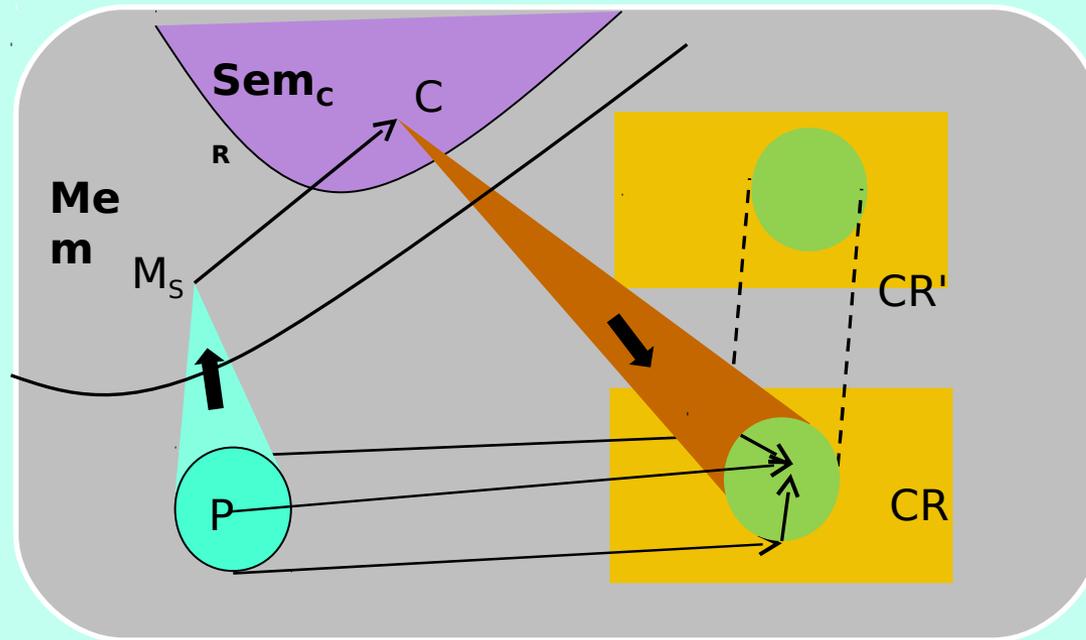
THE NEURAL BASIS OF THE ARCHETYPAL CORE



In 2008, Hagmann & al. have found an integrative part of the brain, they call its *structural core*, with the properties required for generating the **AC** (meaning that the cat-neurons in **AC** have ramifications coming down to this core). They write (PLoS Biology, VoL 6, Issue 7):

" **Our data provide evidence for the existence of a structural core in human cerebral cortex. This complex of densely connected regions in posterior medial cortex is both spatially and topologically central within the brain. Its anatomical correspondence with regions of high metabolic activity and with some elements of the human default network suggests**

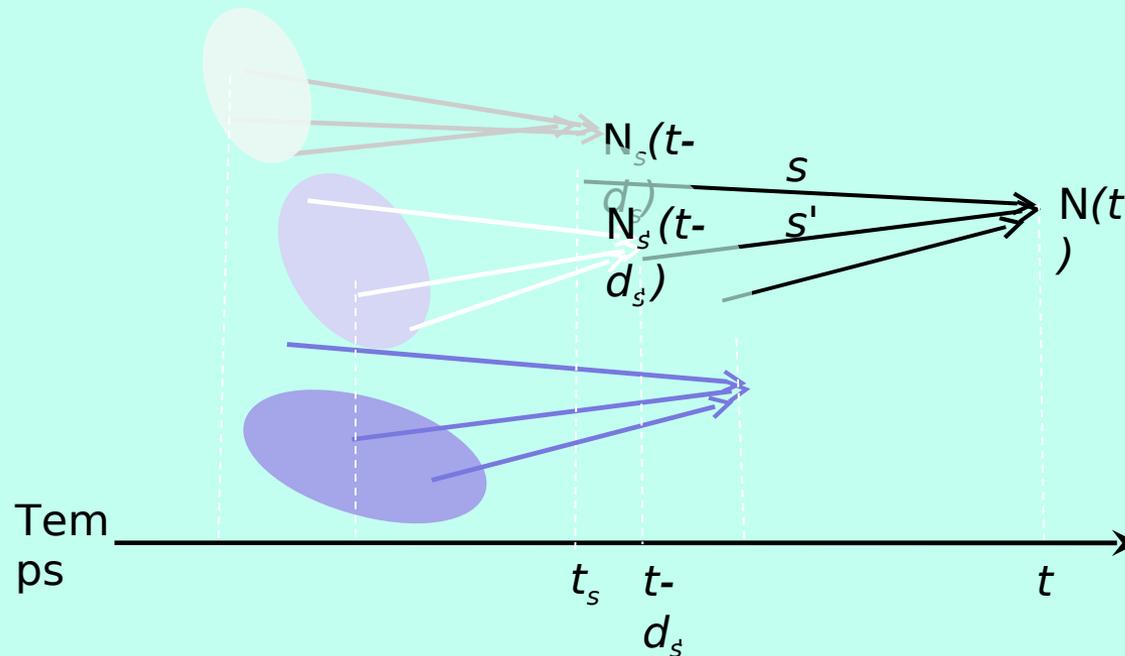
SEMANTIC MEMORY



Mem is divided into an empirical, an episodic and a procedural memory. Higher animals can develop a *semantic memory* **Sem** in 3 steps;

1. Given a coregulator **CR** specialized for some attributes ' e.g., color), recognition of the *CR-similarity* of 2 cat-neurons (or of the mental objects they record) by the (projective) equivalence of their *CR-traces*, the *CR-trace* of **M_S** being the pattern activated in **CR** by a decomposition **P** of **M**.
2. Formation du *CR-concept* correspondant as the *projective limit* **C**, added to **MENS** through a higher coregulator **CR'** observing **CR**. Then **C** is the reflection of **M_S** in the subsystem **Sem_{CR}** of **Mem**, as well as of all the *instances* of **M**.
3. More abstract concepts are obtained by iteratively adding colimits or projective limits of patterns of **CR_i**-concepts for various coregulator **CR**.

DYNAMIQUE DE NEUR



Dans **NEUR**, les patterns d -connexes sont des patterns *polychrones* (ou time-locked) au sens de Izhikevitch, Edelman & Gallo qui montrent que le pattern activé par un stimulus (ou un objet mental) est de cette forme. Et l'activité $n(t)$ d'un (cat-)neurone N en t est donnée par la formule :

$$n(t) = \varphi(\sum_s w_s(t-d_s)n_s(t-d_s) + J(t)).$$

où φ est une fonction sigmoïde, la somme est prise sur toutes les synapses s : $N_s \rightarrow N$ dont w_s dénote la force et d_s le délai de propagation (supposé constant autour de t), et J est un possible input externe (pour les 'récepteurs'). On suppose que la force w_s d'une synapse s varie en suivant une *loi de Hebb*. à

LE MODELE MENS ET SA DYNAMIQUE

Le modèle **MENS** est un SEM obtenu par complexifications successives (mixtes) de **NEUR** recollant certains patterns d -connexes (et w -connexes). Ainsi les pondérations d et w s'étendent à **MENS**, ainsi que la formule précédente.

Il s'ensuit que, si l'on se place dans l'espace des phases (de coordonnées $(n_i, w_s)_{i,s}$ où les n_i sont les activités des différents (cat-)neurones et w_s les forces des liens s entre eux, la dynamique au voisinage de t (disons sur un intervalle $]t-a, t+a[$) est régie par un système d'équations différentielles du type "Cohen-Grossberg-Hopfield avec délais" :

$$dn_i(t)/dt = -n_i(t) + \sum_{s \text{ } N_j \rightarrow N_i} w_s(t-d_s) n_j(t-d_s) + J_i(t)$$

$$dw_s/dt = C \langle n_j n_i \rangle.$$

où J_i est un input externe, C une constant et $\langle n_j n_i \rangle$ signifie qu'on fait la moyenne du produit $n_j(t) n_i(t')$ sur $]t-a, t[$.
Le choix des patterns P qui seront recollés dans la complexification à un instant donné t sera fait via des sous-systèmes particuliers, les *corégulateurs*. Du point de vue dynamique un pattern à recoller sera un pattern d -connexe qui est *activé en t* (au sens que les dérivées en t des activités de ses composants sont > 0) et dont l'activation fait tendre la dynamique vers un attracteur dans l'espace des phases (associé au paysage d'un corégulateur). Ainsi le cat-neurone colimite de P modélise un tel attracteur.