

# Systemes Evolutifs à Mémoire : Auto-organisation. Apprentissage

*Andrée C. Ehresmann*

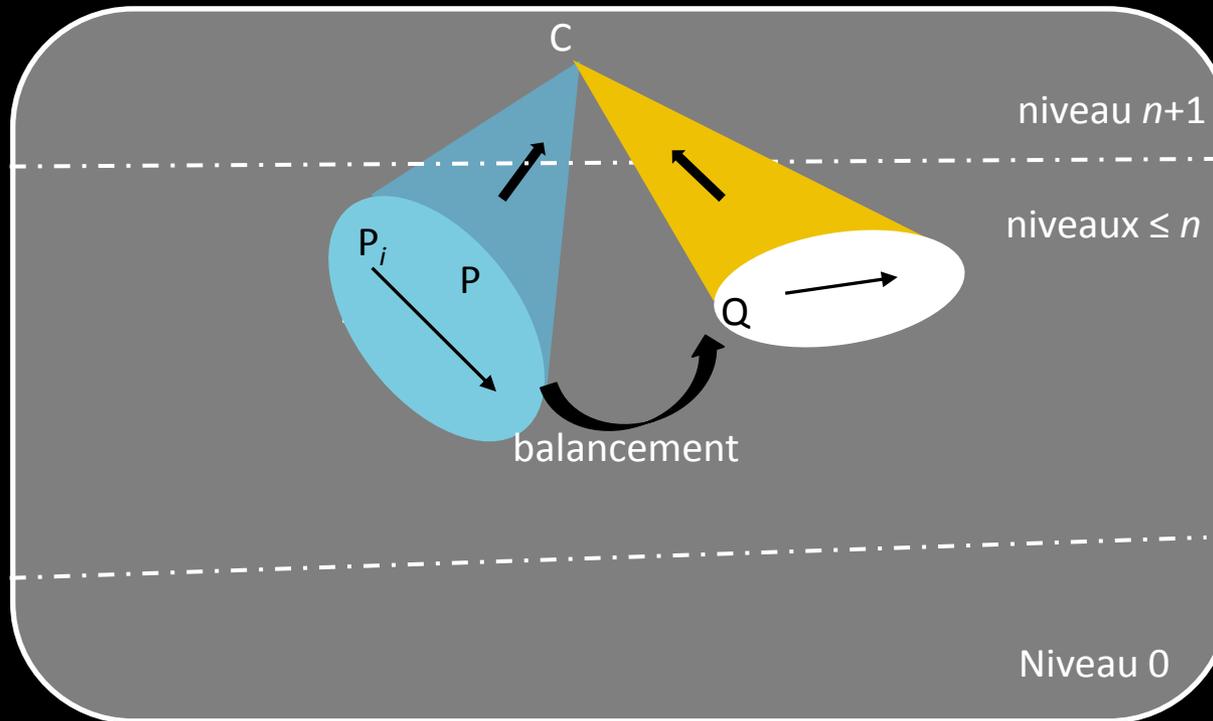
*John Mandereau*

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

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

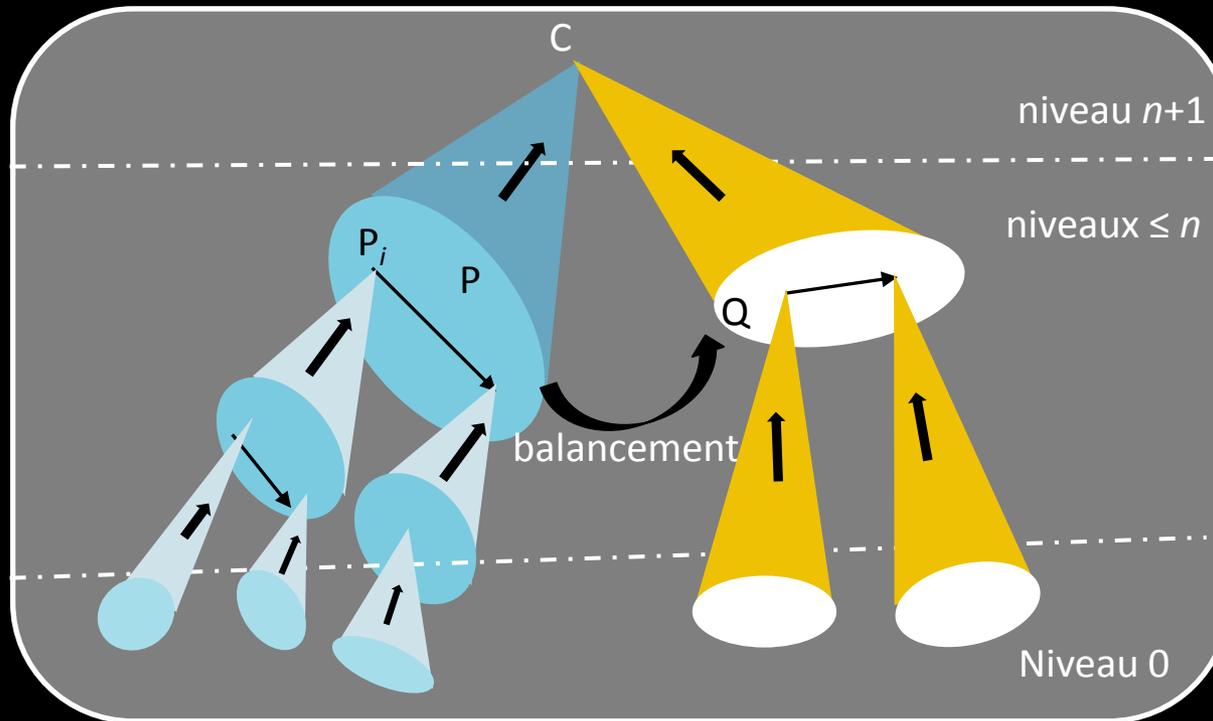
Paris, Séminaire MaMuX, IRCAM Décembre 2011

# HIERARCHIE. MULTIPLICITE. ORDRE DE COMPLEXITE



**Principe de Multiplicité MP.** Il existe des objets  $C$  qui sont  $n$ -multiformes: ils sont colimite de deux patterns  $P$  et  $Q$  de niveaux inférieur à, ou  $= n$  non liés par une gerbe se recollant en l'identité de  $C$  ; le passage de  $P$  à  $Q$  est un *balancement*.

# HIERARCHIE. MULTIPLICITE. ORDRE DE COMPLEXITE

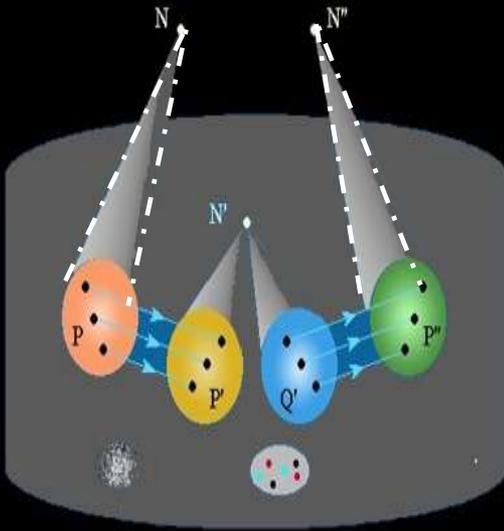


**Principe de Multiplicité MP.** Il existe des objets  $C$  qui sont  $n$ -multiformes: ils sont colimite de deux patterns  $P$  et  $Q$  de niveaux inférieur à, ou  $= n$  non liés par une gerbe se recollant en l'identité de  $C$  ; le passage de  $P$  à  $Q$  est un *balancement*.

*Ordre de complexité* = plus petite longueur d'une ramification jusqu'au niv. 0.

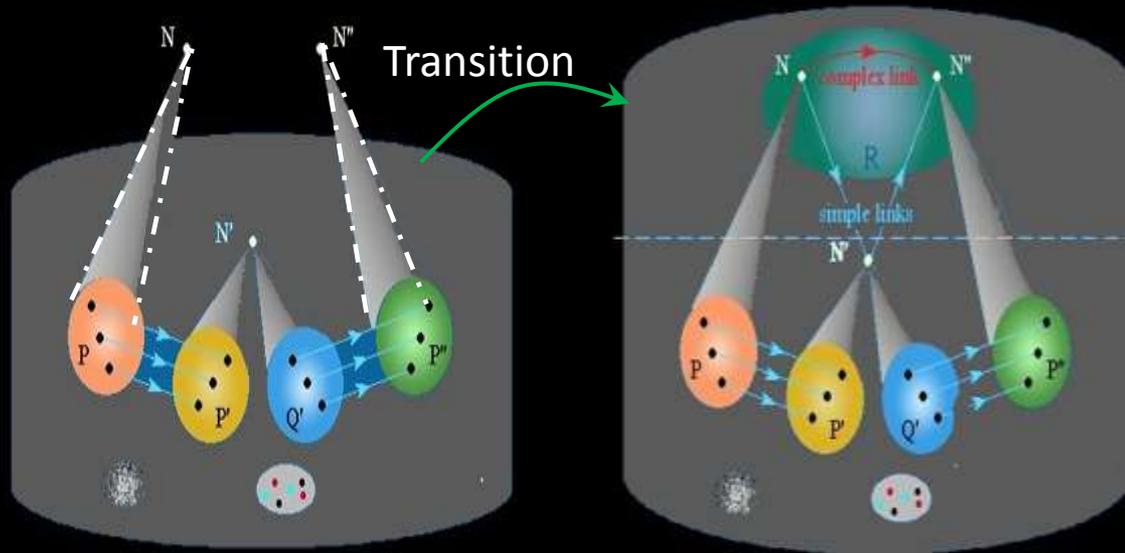
**THEOREME DE COMPLEXITE (EV 1996).** *MP est nécessaire pour qu'il existe des composants d'ordre de complexité  $> 1$ .*

# COMPLEXIFICATION . THEOREME D'EMERGENCE



Changements: addition ou suppression de composants, liage de certains patterns de sorte que des patterns homologues aient la même colimite, préservation de colimites. Dans le cas 'mixte' : adjonction d'une limite projective à un pattern.  
Représentés par la donnée d'une *procédure* avec ces objectifs.

# COMPLEXIFICATION . THEOREME D'EMERGENCE



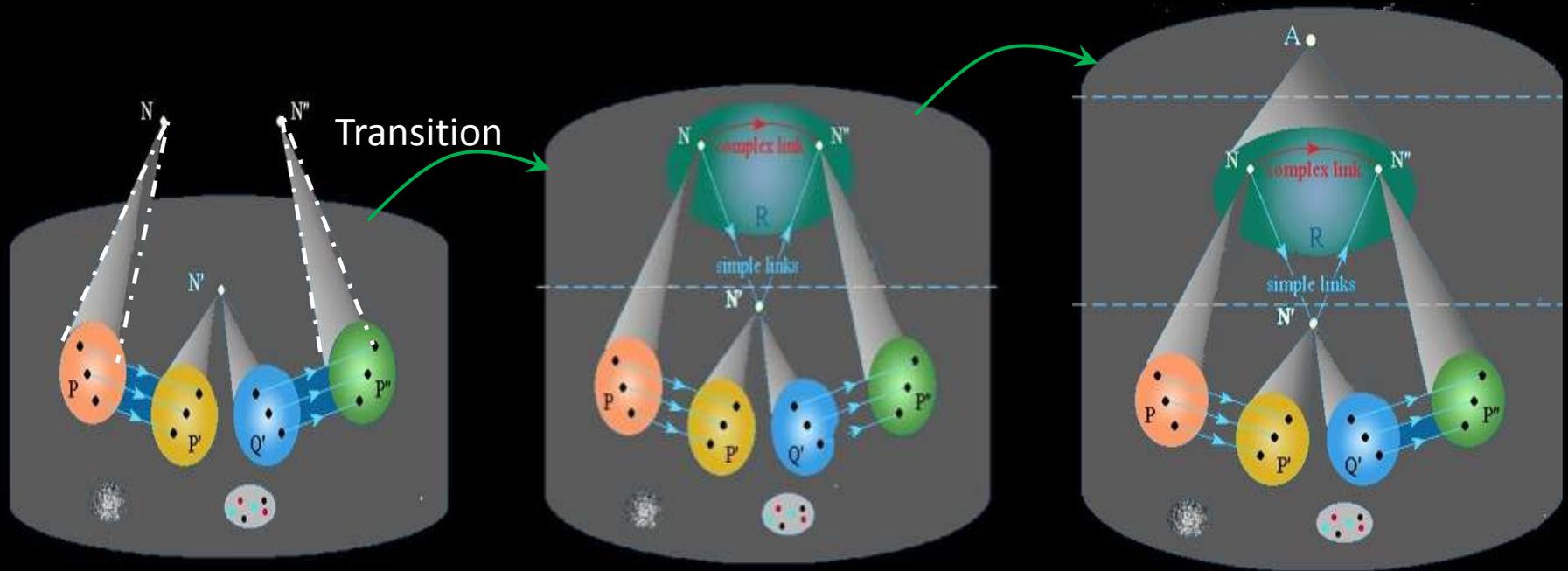
Changements: addition ou suppression de composants, liage de certains patterns de sorte que des patterns homologues aient la même colimite, préservation de colimites. Dans le cas 'mixte' : adjonction d'une limite projective à un pattern.

Représentés par la donnée d'une *procédure* avec ces objectifs.

La nouvelle configuration après ces changements est modélisée par la *complexification* pour cette procédure, construite explicitement.

**THEOREME D'EMERGENCE.** *MP est préservé par complexification et rend possible l'émergence au cours du temps de composants d'ordre croissant.*

# COMPLEXIFICATION . THEOREME D'EMERGENCE



Changements: addition ou suppression de composants, liage de certains patterns de sorte que des patterns homologues aient la même colimite, préservation de colimites. Dans le cas 'mixte' : adjonction d'une limite projective à un pattern.

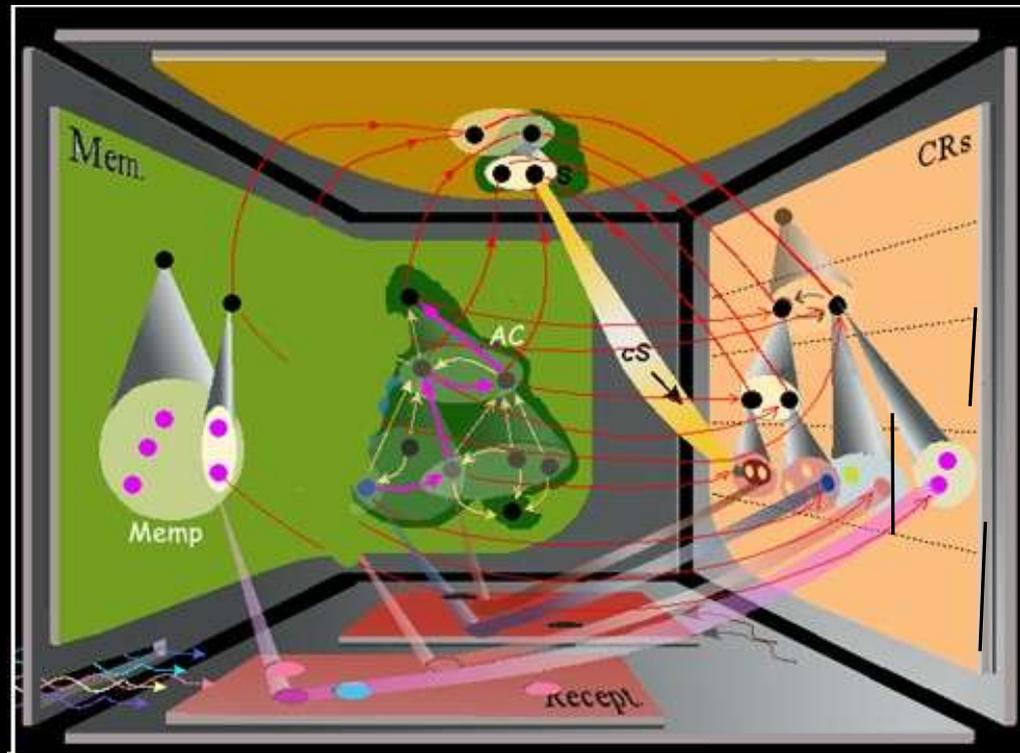
Représentés par la donnée d'une *procédure* avec ces objectifs.

La nouvelle configuration après ces changements est modélisée par la *complexification* pour cette procédure, construite explicitement.

**THEOREME D'EMERGENCE.** *MP est préservé par complexification et rend possible l'émergence au cours du temps de composants d'ordre croissant.*

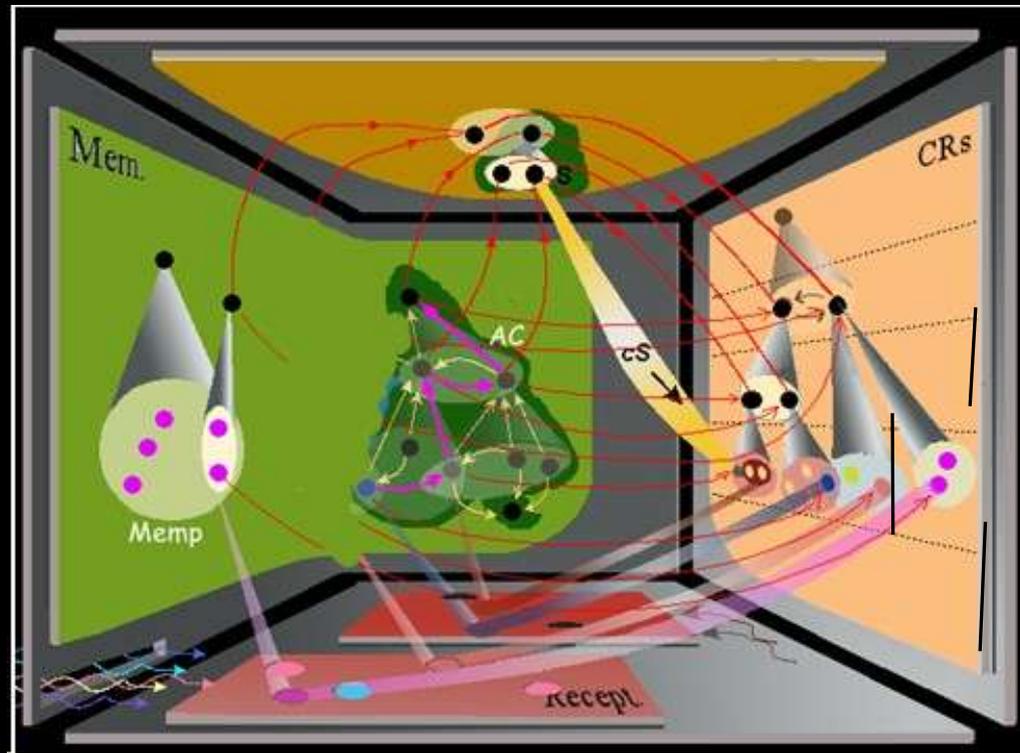
*Une double complexification ne se réduit pas à une seule complexification.*

## SYSTEME EVOLUTIF A MEMOIRE



**SEM** = SHE dont la dynamique est modulée par la coopération/compétition entre un réseau de sous-SE, les *corégulateurs* opérant en parallèle, avec l'aide de Mem, un sous-SHE, représentant une **mémoire** flexible.

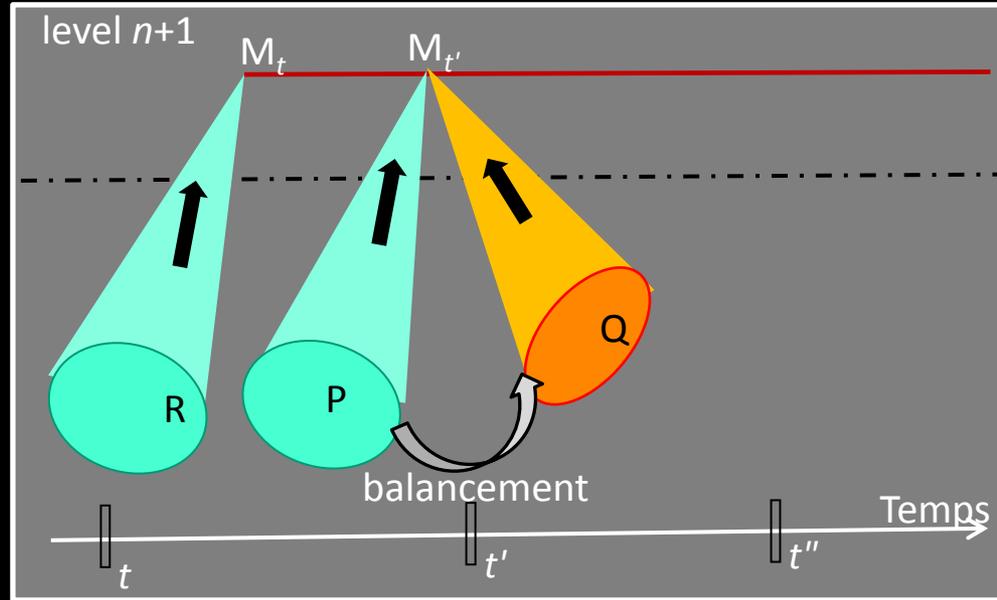
## SYSTEME EVOLUTIF A MEMOIRE



**SEM** = SHE dont la dynamique est modulée par la coopération/compétition entre un réseau de sous-SE, les **corégulateurs** opérant en parallèle, avec l'aide de Mem, un sous-SHE, représentant une **mémoire** flexible.

Un corégulateur CR a sa propre complexité, sa propre échelle de temps discrète et un accès différentiel à Mem, en particulier à ses *procédures admissibles* en relation avec sa fonction. Le *présent actuel*  $I(t)$  de CR en  $t$  est le maximum des délais de propagation des liens dans CR et de Mem vers CR.

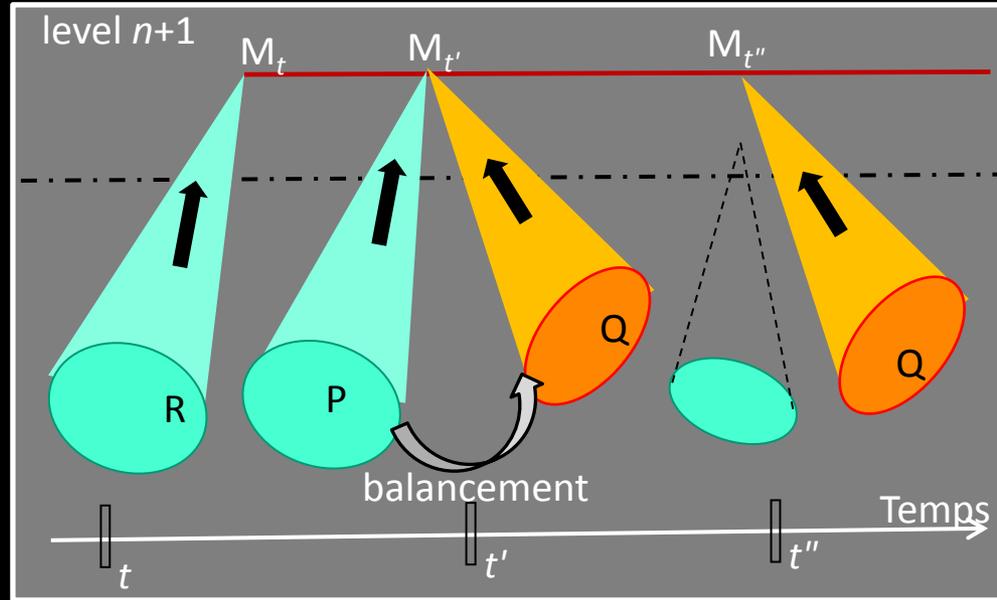
# FLEXIBILITE ET PLASTICITE DE LA MEMOIRE



Un composant de la Mémoire est appelé **empreinte**. C'est un objet multiforme, qui peut avoir différentes décompositions R en  $t$ , Q en  $t'$ ,... éventuellement non-connectées et peut être 'rappelé' via chacun, avec possibilité de balancement entre eux.

M prend une identité propre ---> *Mémoire robuste et flexible*.

# FLEXIBILITE ET PLASTICITE DE LA MEMOIRE

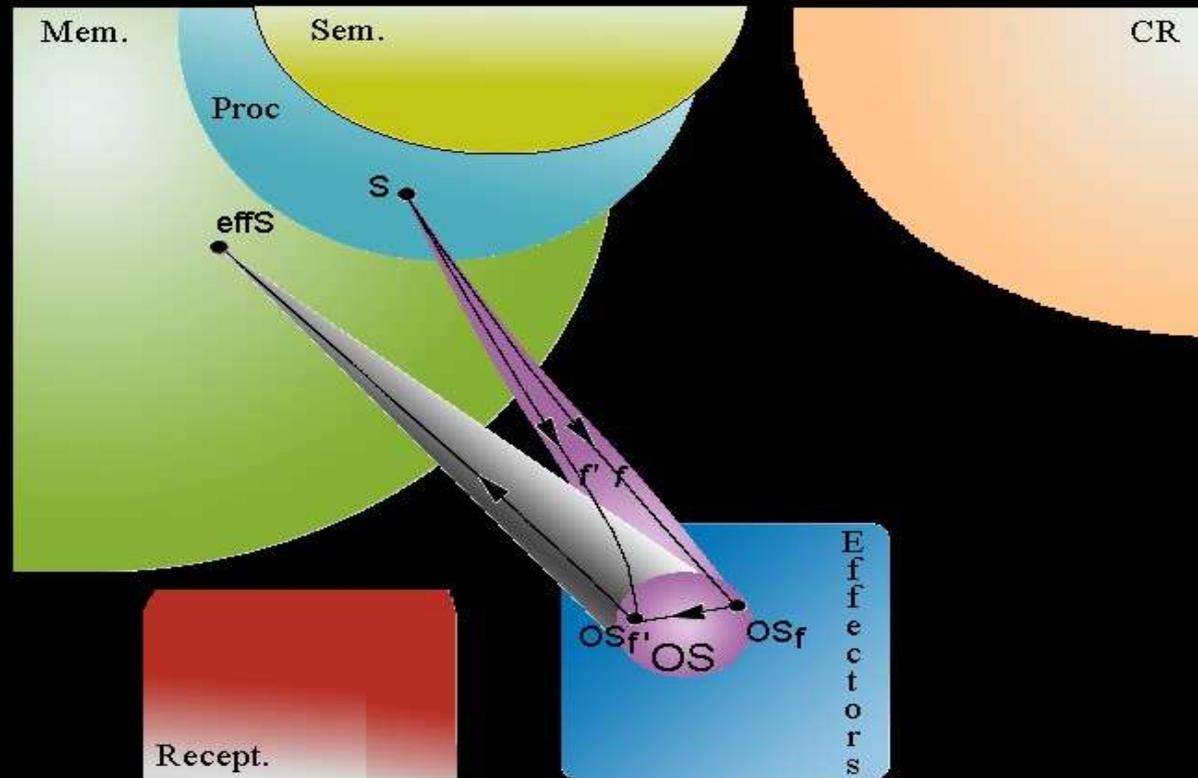


Un composant de la Mémoire est appelé **empreinte**. C'est un objet multiforme, qui peut avoir différentes décompositions R en  $t$ , Q en  $t'$ ,... éventuellement non-connectées et peut être 'rappelé' via chacun, avec possibilité de balancement entre eux.

M prend une identité propre ---> *Mémoire robuste et flexible*.

M peut même se dissocier de R au cours du temps pour s'adapter aux changements ---> *Mémoire plastique*.

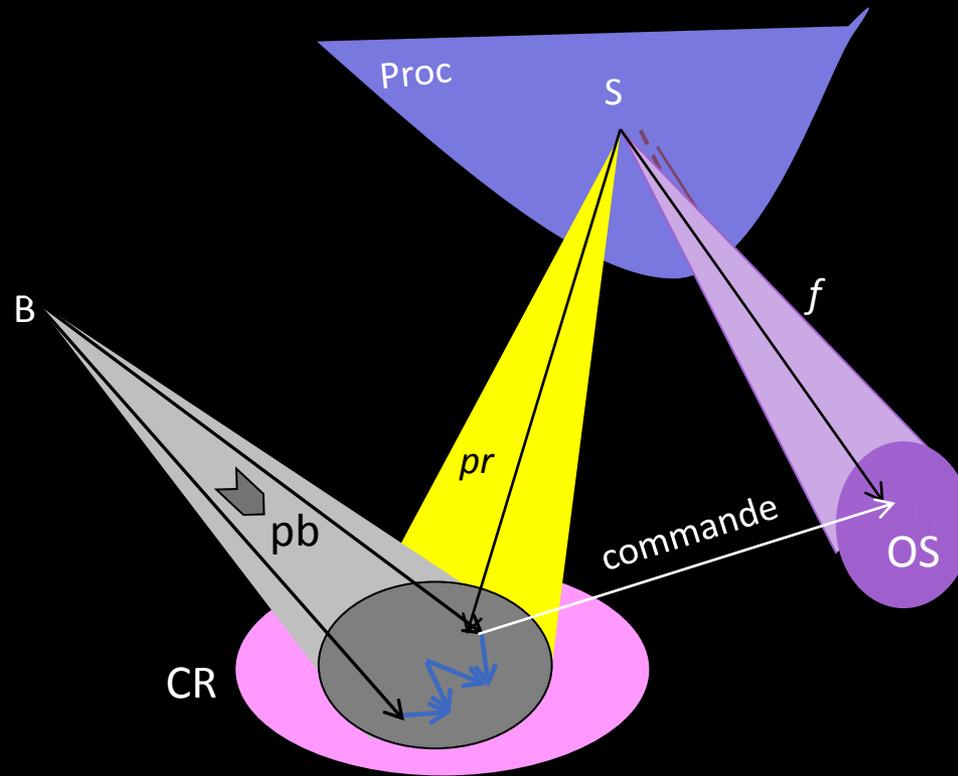
# MÉMOIRE PROCEDURALE



Une procédure est mémorisée par une empreinte  $S$  dans un sous-ES de Mem appelé *mémoire procédurale* Proc ; une telle 'procédure'  $S$  est munie d'un pattern OS d'effecteurs interactifs; un effecteur  $OS_f$  est indexés par un lien  $f$  de  $S$  vers  $OS_f$  appelé *commande* de  $S$  (OS est lui-même mémorisé via sa colimite  $effS$  dans Mem).

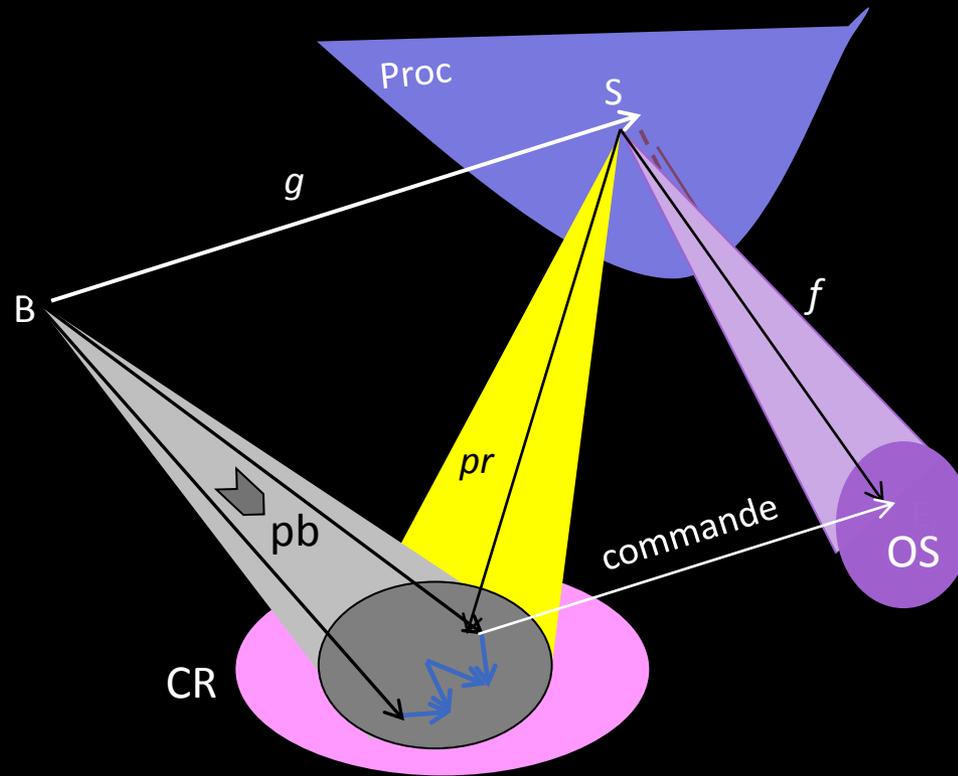
Proc se construit via complexifications mixtes (ajoutant colimites et limites).

# PROCÉDURE ADMISSIBLE PAR UN CR. LIEN ACTIVATEUR



Une *perspective*  $pb$  de  $B$  pour  $CR$  est une gerbe de  $B$  vers  $CR$  (vu comme pattern). A  $CR$  est associé un ensemble de *procédures admissibles*  $S$  pour  $CR$  (dans  $Proc$ ). Une telle  $S$  a une perspective  $pr$  pour  $CR$  et les commandes  $f$  de  $S$  se factorisent via  $pr$ , de sorte que  $OS$  peut être commandé via  $CR$ .

## PROCÉDURE ADMISSIBLE PAR UN CR. LIEN ACTIVATEUR



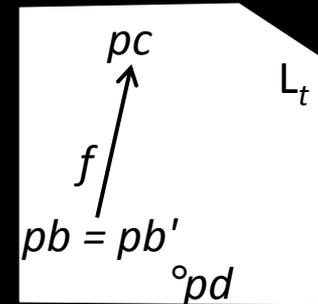
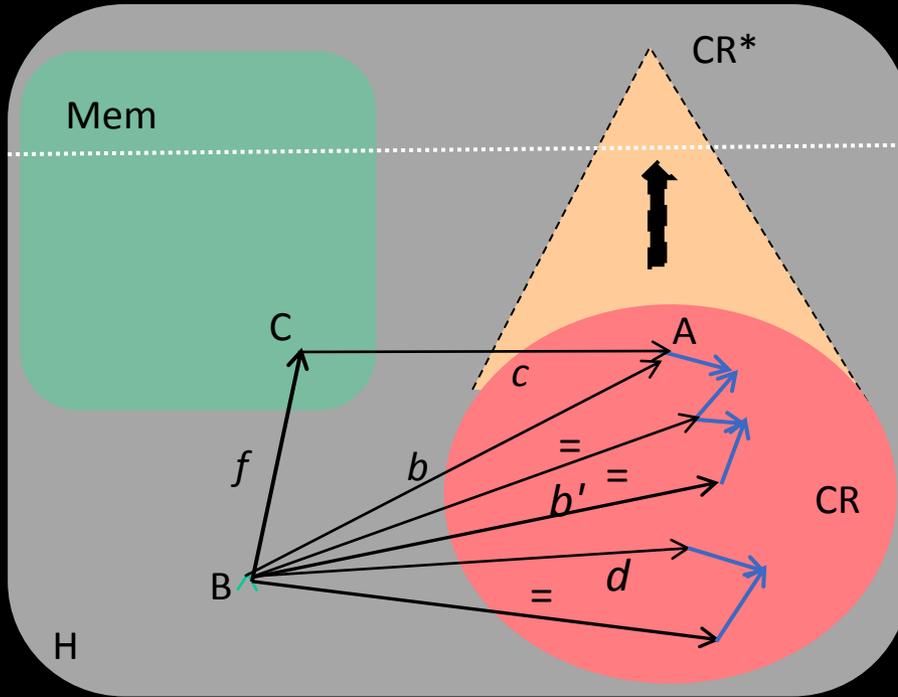
Une *perspective*  $pb$  de  $B$  pour  $CR$  est une gerbe de  $B$  vers  $CR$  (vu comme pattern). A  $CR$  est associé un ensemble de *procédures admissibles*  $S$  pour  $CR$  (dans  $Proc$ ). Une telle  $S$  a une perspective  $pr$  pour  $CR$  et les commandes  $f$  de  $S$  se factorisent via  $pr$ , de sorte que  $OS$  peut être commandé via  $CR$ .

Un lien  $g$  d'une empreinte  $B$  vers  $S$  est appelé *lien activateur* de  $S$ . Son composé avec  $pr$  est une perspective  $pb$  de  $B$  pour  $CR$ . Si  $pb$  et  $pr$  sont simultanément actifs, la force de  $g$  augmente (*Règle de Hebb*).

## EXEMPLE : PROCEDURES D'EXECUTION MUSICALE

Lors de l'exécution d'une pièce musicale ou d'un jeu improvisé, une procédure pour jouer une note donnée, ou une suite de quelques notes, est activée par la musique qui précède ou un geste déclencheur, ainsi que la lecture visuelle ou le rappel depuis la mémoire d'une partition ; les commandes d'une telle procédure consistent à déclencher ou modifier les mouvements pour jouer la ou les notes suivantes.

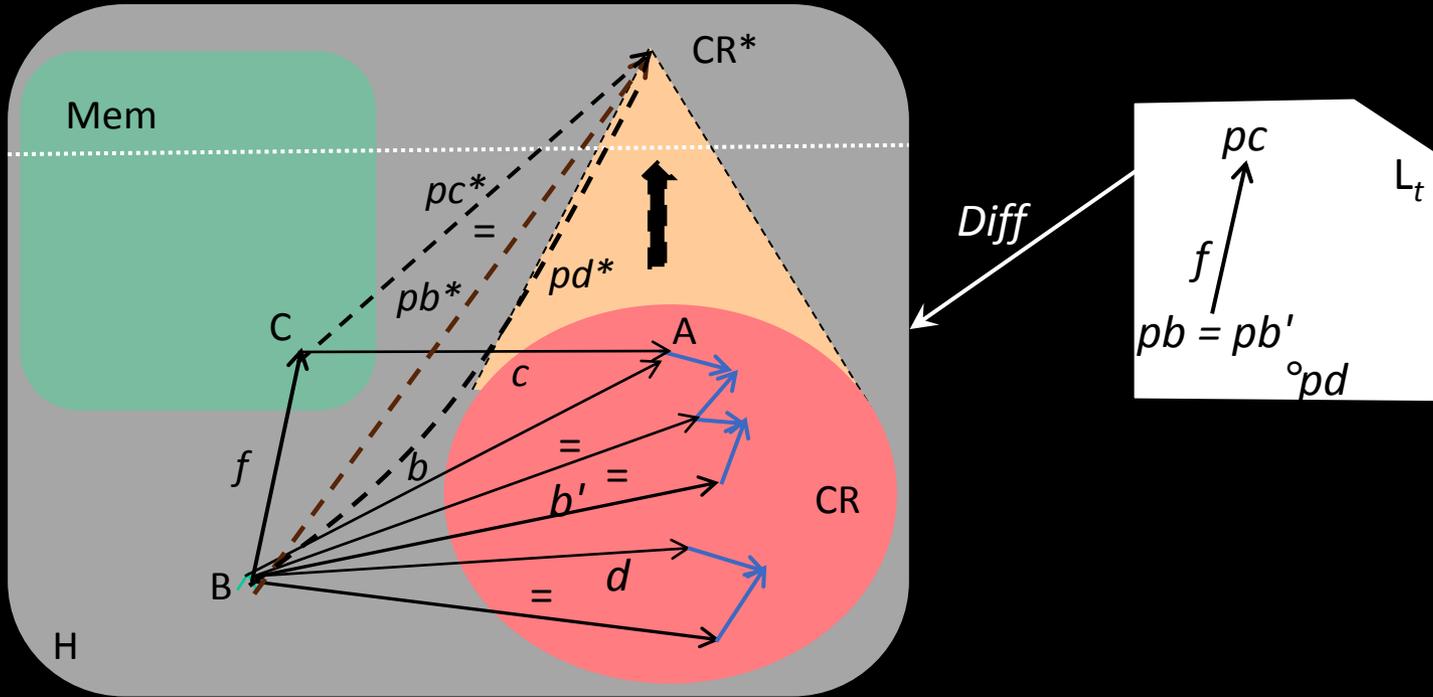
# PAYSAGE D'UN COREGULATEUR



Pour tout  $t$ , le **paysage** de CR en  $t$  est une catégorie  $L_t$  :

- un objet est une perspective  $pb$  d'un composant B du système vers CR  $t$ -activée, au sens qu'au moins un de ses liens (ou *aspect*) est actif et son activation arrive au CR entre  $t$  et  $t + l(t)$ , où  $l(t)$  est le présent actuel de CR ;
- un lien de  $pb$  vers  $pc$  'est' un lien  $f$  de B vers C corrélant les perspectives.

# PAYSAGE D'UN COREGULATEUR



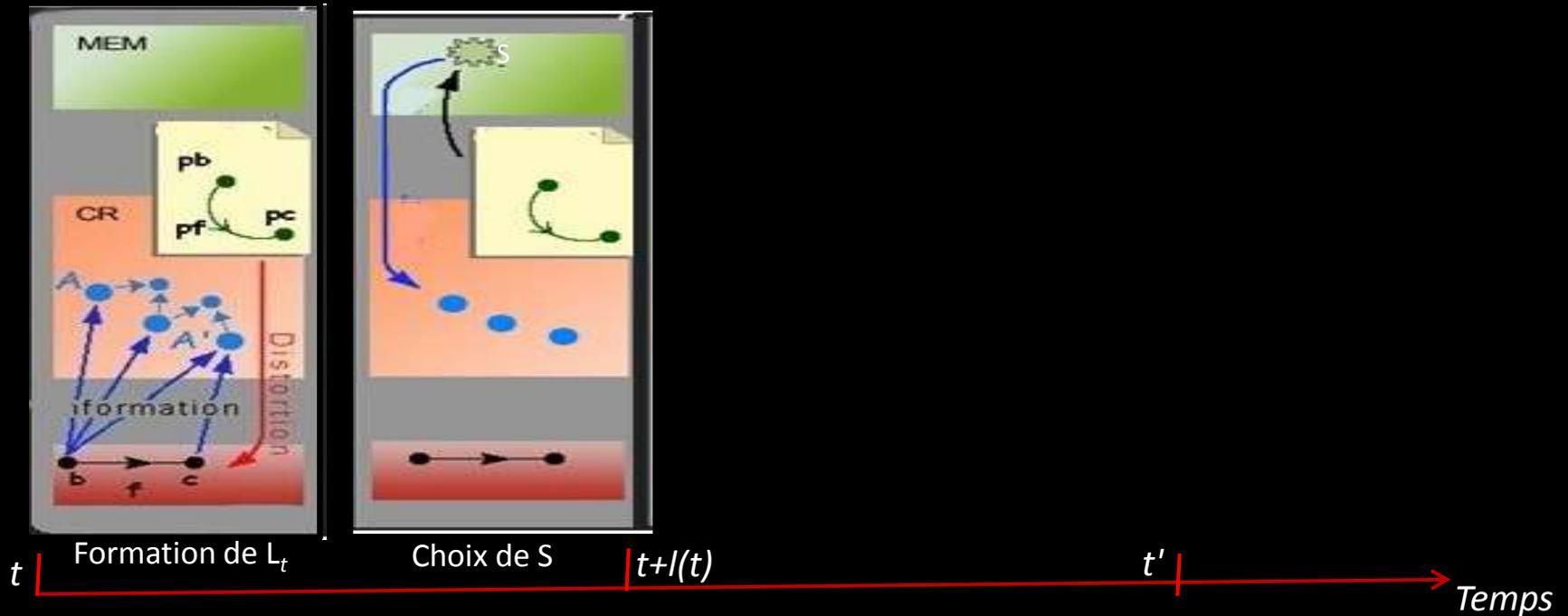
Pour tout  $t$ , le **paysage** de  $CR$  en  $t$  est une catégorie  $L_t$  :

- un objet est une perspective  $pb$  d'un composant  $B$  du système vers  $CR$   $t$ -activée, au sens qu'au moins un de ses liens (ou *aspect*) est actif et son activation arrive au  $CR$  entre  $t$  et  $t + l(t)$ , où  $l(t)$  est le présent actuel de  $CR$  ;
- un lien de  $pb$  vers  $pc$  'est' un lien  $f$  de  $B$  vers  $C$  corrélant les perspectives.

On a un foncteur *différence*  $Diff$  (non injectif) de  $L_t$  vers le système.

Si  $CR$  a une colimite  $CR^*$ , une perspective 'est' un lien actif vers  $CR^*$  factorisé par  $CR$ .

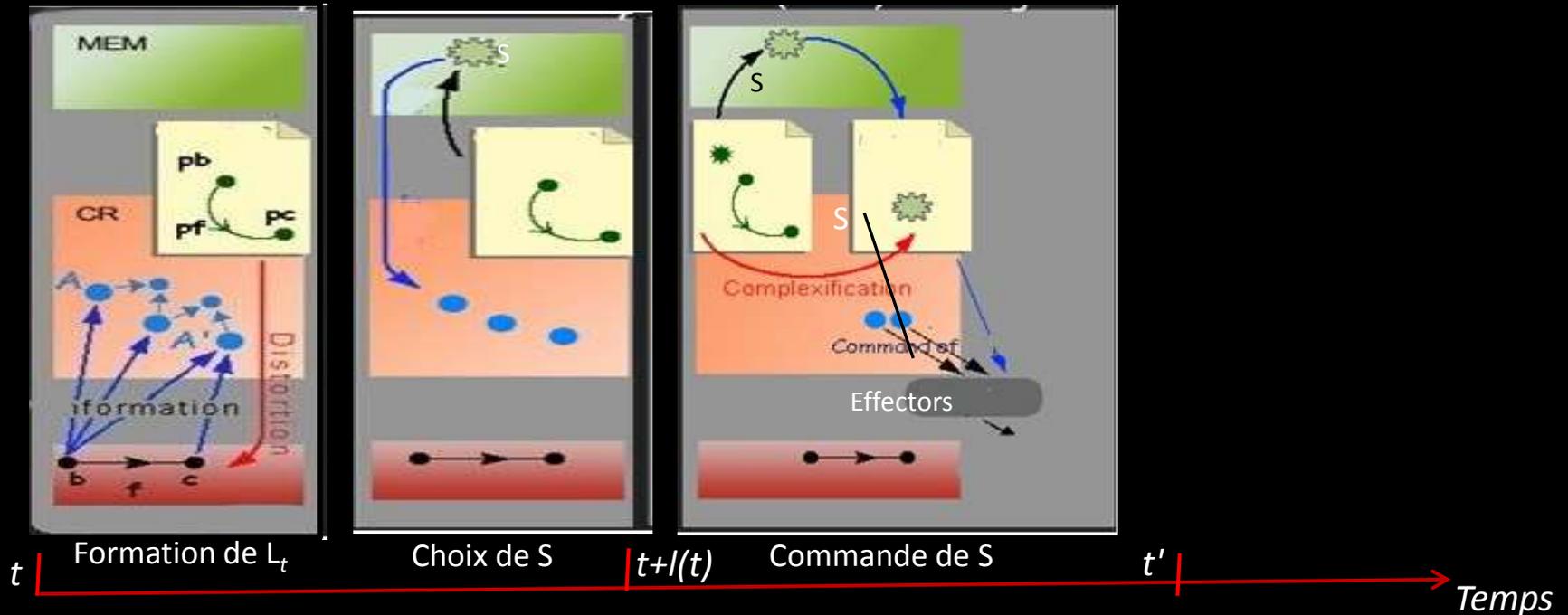
# UNE ETAPE D'UN CO-REGULATEUR CR



L'étape de  $t$  à  $t'$  se divise en phases imbriquées :

- (i) Formation du paysage  $L_t$
- (ii) Choix d'une procédure admissible  $S$  pour répondre, e.g. via un lien activateur de  $S$ . Paysage anticipé  $AL$  = complexification de  $L_t$  relativement à  $S$ .

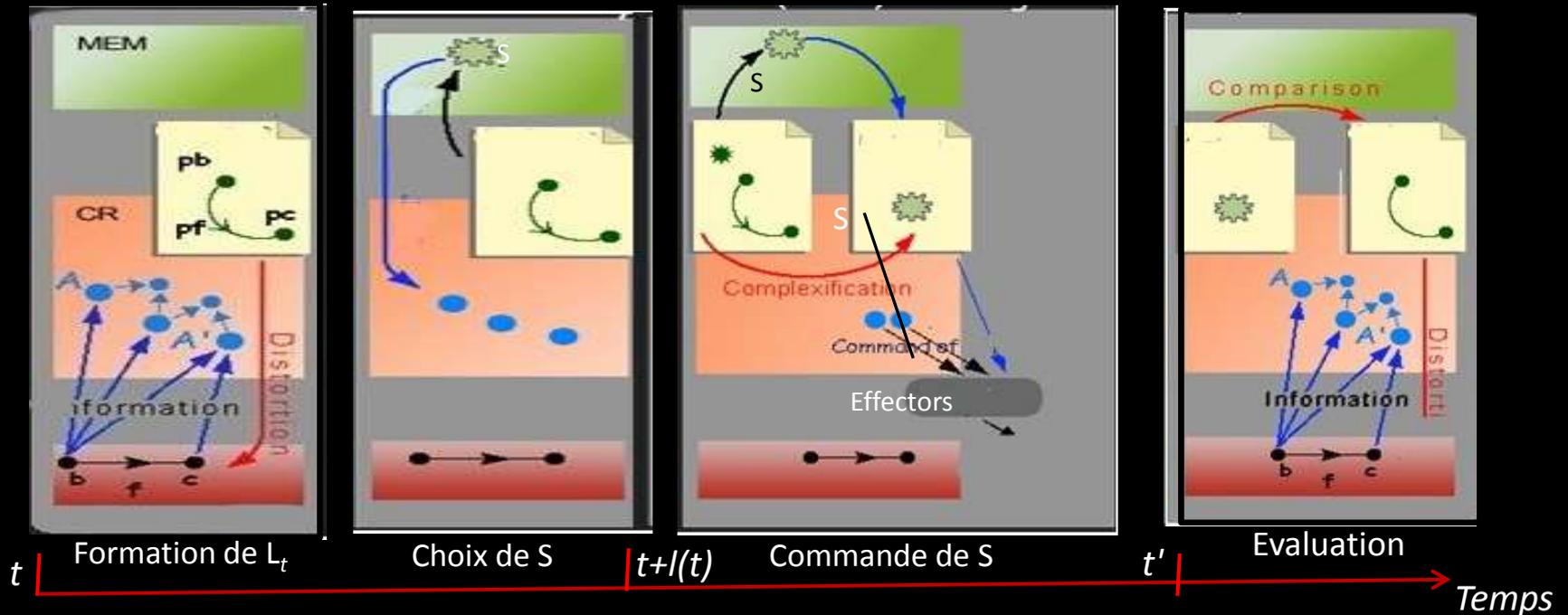
# UNE ETAPE D'UN CO-REGULATEUR CR



L'étape de  $t$  à  $t'$  se divise en phases imbriquées :

- (i) Formation du paysage  $L_t$
- (ii) Choix d'une procédure admissible  $S$  pour répondre, e.g. via un lien activateur de  $S$ . Paysage anticipé  $AL$  = complexification de  $L_t$  relativement à  $S$ .
- (iii) Envoi des commandes de  $S$  aux effecteurs ---> processus dynamique s'étendant de  $t$  à la fin  $t'$  de l'étape (calculable via EDP ou MGS)

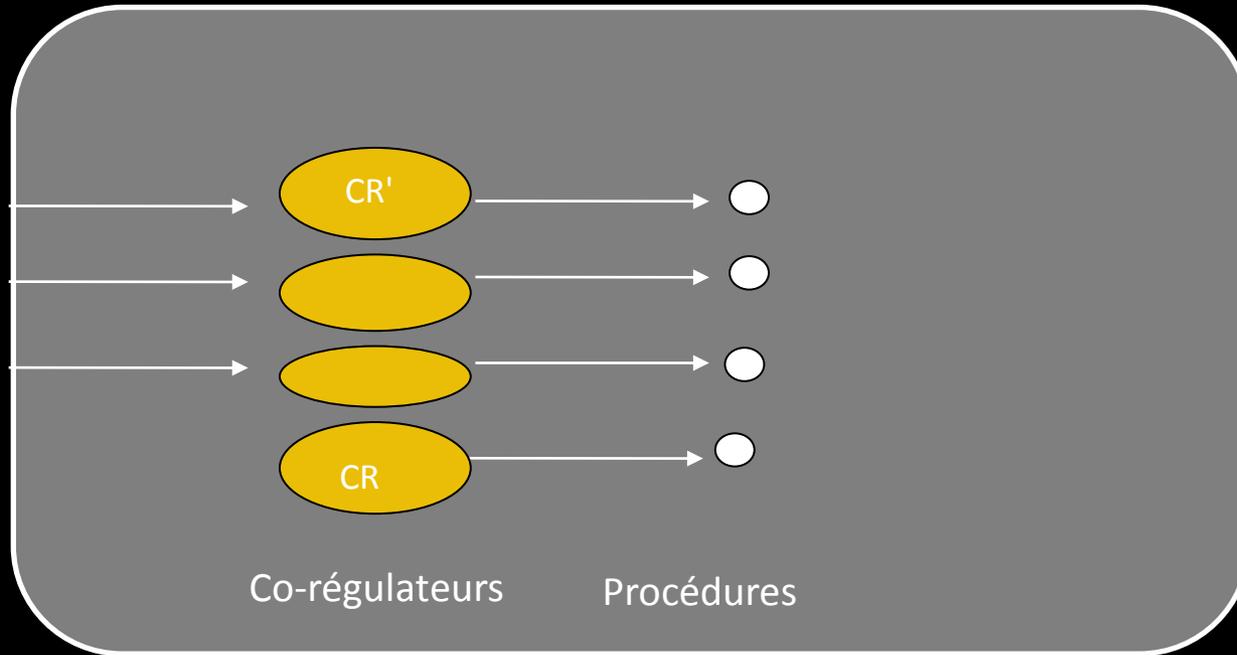
## UNE ETAPE D'UN CO-REGULATEUR CR



L'étape de  $t$  à  $t'$  se divise en phases imbriquées :

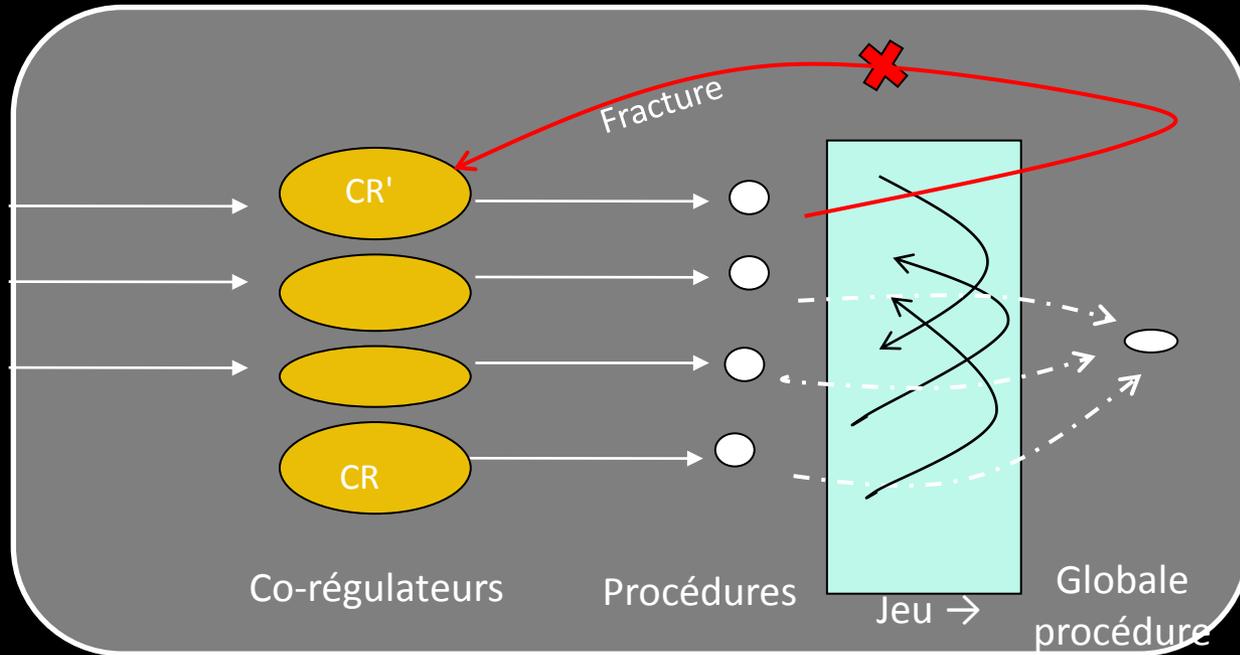
- (i) Formation du paysage  $L_t$
- (ii) Choix d'une procédure admissible  $S$  pour répondre, e.g. via un lien activateur de  $S$ . Paysage anticipé  $AL$  = complexification de  $L_t$  relativement à  $S$ .
- (iii) Envoi des commandes de  $S$  aux effecteurs ---> processus dynamique s'étendant de  $t$  à la fin  $t'$  de l'étape (calculable via EDP ou MGS)
- (iv) Evaluation et mémorisation du résultat en  $t'$   
 ---> *Fracture* si les objectifs de  $S$  not atteints ( $AL$  différent de  $L_t$ ).

## DU LOCAL AU GLOBAL: JEU ENTRE CO-REGULATEURS



Les logiques locales des co-régulateurs étant différentes, leurs procédures en  $t$  peuvent être conflictuelles.

## DU LOCAL AU GLOBAL: JEU ENTRE CO-REGULATEURS



Les logiques locales des co-régulateurs étant différentes, leurs procédures en  $t$  peuvent être conflictuelles.

---> *Jeu entre les co-régulateurs* pour obtenir une procédure globale. MP donne plus de degrés de liberté via balancements. Est-ce calculable ?

---> *Fracture* et, si elle persiste, *dyschronie* pour certains CRs. Elle peut être réparée par un changement de période (ou *re-synchronisation*).

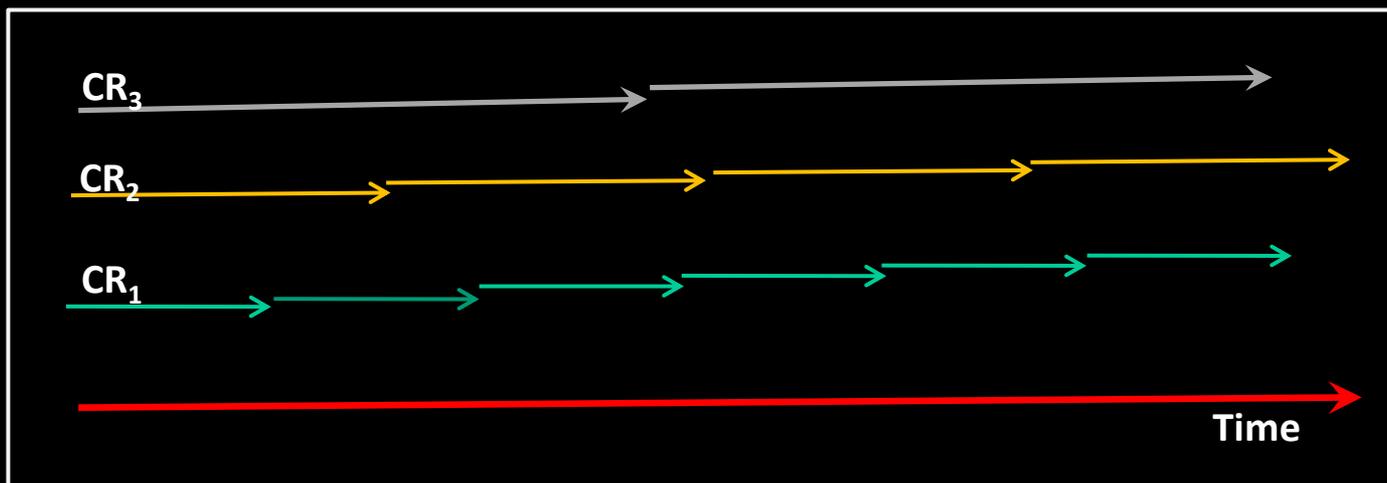
## LOIS DE SYNCHRONICITE

*Contraintes structurales temporelles* d'un co-régulateur CR à respecter pour que l'étape s'achève à temps. Leur non-respect entraîne fracture ou une dyschronie.

$$p(t) \ll d(t) \ll s(t), \text{ ou } s/p \gg s/d \gg 1$$

$d(t)$  = période du CR = longueur moyenne des étapes précédentes,  
 $s(t)$  = plus petit empan de stabilité des composants sur lesquels opère CR,  
 $p(t)$  = plus grand délai de propagation des liens intervenant dans l'étape.

*Comparaison des périodes des divers co-régulateurs* (e.g., horloges internes) à la base d'une "dialectique" entre eux.



# EXEMPLE : INTERPRETATION D'UNE PIECE DE MUSIQUE PAR UN ENSEMBLE

Le système est constitué d'un ensemble de musiciens, qui sont des co-régulateurs, et leurs partitions.

Le paysage de chaque co-régulateur est formé de la vue de sa propre partition de la pièce, et de canaux de communication visuelle et auditive avec le reste de l'ensemble.

Le choix des procédures pour jouer la musique de la partition dépend

- ▶ de la réception de stimuli en grande partie visuels, qui permettent d'anticiper l'exécution des événements musicaux suivants,
- ▶ de la réception de stimuli auditifs — le son produit par l'ensemble — qui permet d'évaluer la bonne synchronisation du musicien avec les autres.

Chaque musicien n'a qu'une vue partielle du système, y compris le chef d'orchestre lorsqu'il y en a un.

Une fracture correspond par exemple à une fausse note, un non respect du tempo ou un décalage.

# EXEMPLE : SYSTEMES INFORMATIQUES COMMUNICANTS ET/OU A RESSOURCES PARTAGEES

Le système est formé de processus qui communiquent entre eux par des canaux.

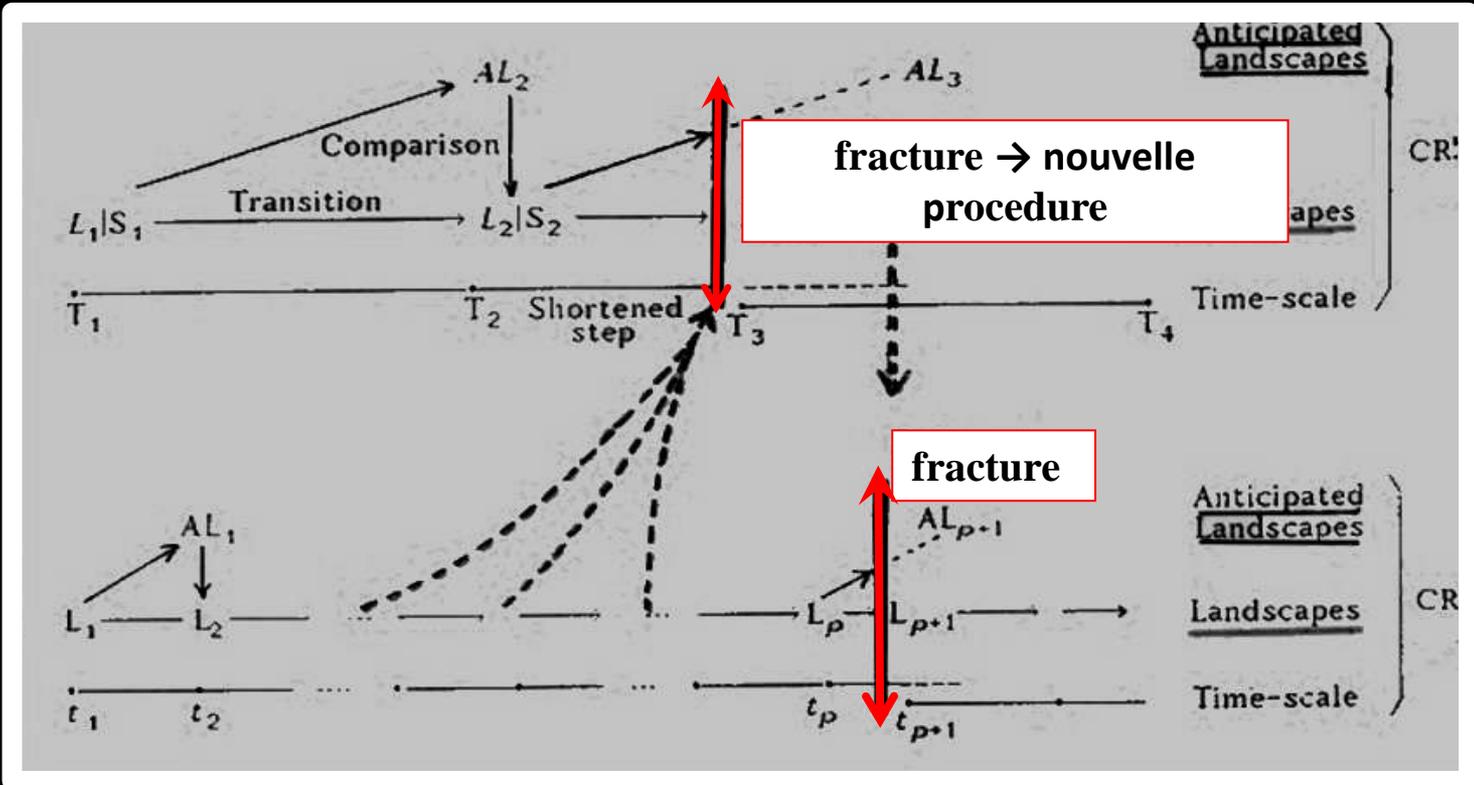
## Exemple ( $\pi$ -calcul)

$$P ::= x(y).P \mid \bar{x}\langle y \rangle.P \mid P|P \mid (\nu x)P \mid !P \mid 0$$

*Les corégulateurs sont les processus, le paysage d'un processus  $P$  est formé des processus avec lesquels  $P$  a des canaux de communication.*

Applications : réseau d'ordinateurs (comme internet), ordinateur avec système d'exploitation multi-tâches faisant fonctionner plusieurs programmes, programme à plusieurs fils d'exécution.

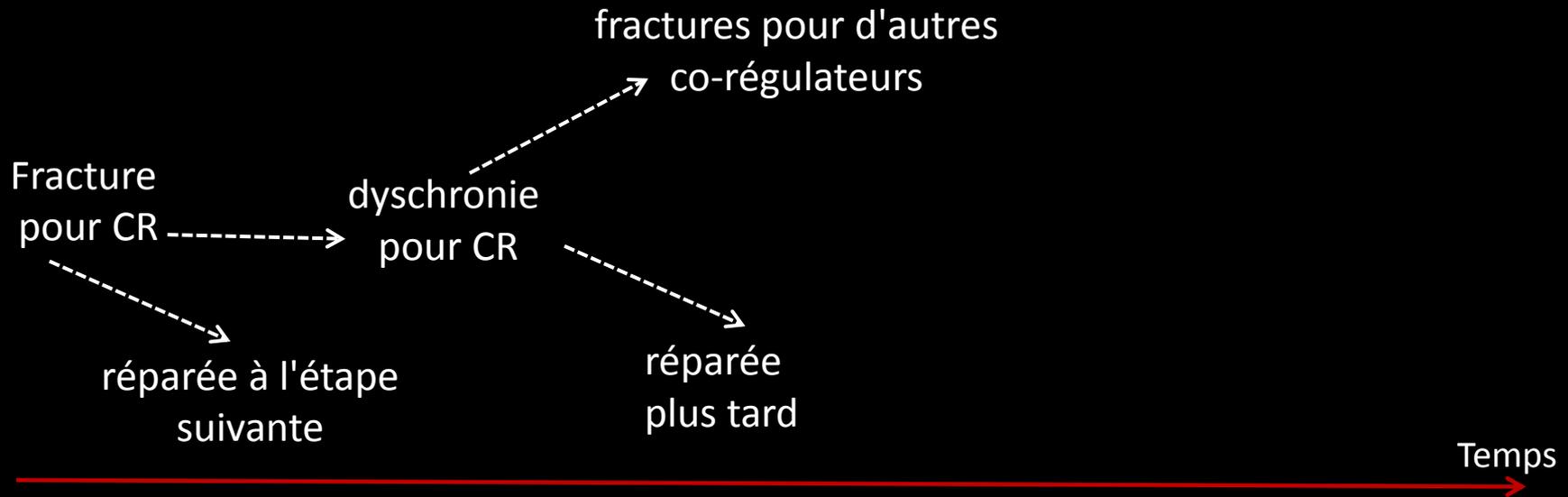
# DIALECTIQUE ENTRE CO-REGULATEURS HETEROGENES



Une accumulation de changements pour un co-régulateur CR de bas niveau peut causer plus tard une fracture à un co-régulateur de plus haut niveau CR'. Sa réponse est une nouvelle procédure qui peut se répercuter à CR via l'imposition d'une procédure causant une fracture.

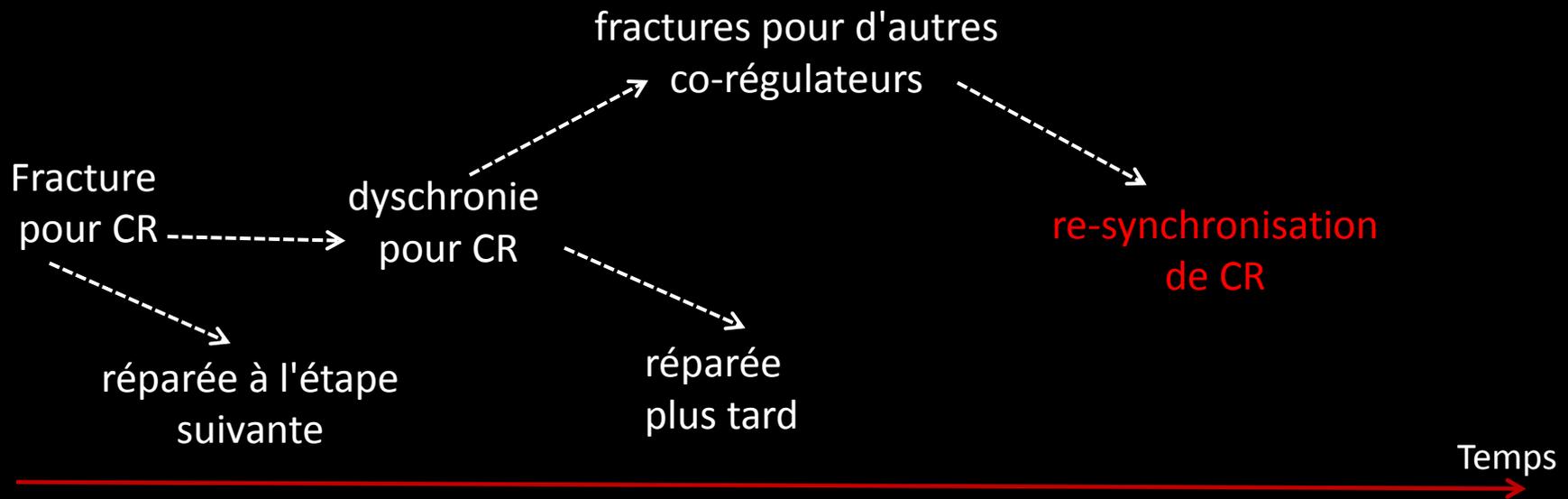
# CASCADE DE DYSFUNCTIONS

Le non-respect des lois de synchronicité conduit à des boucles de dysfonctions entre niveaux



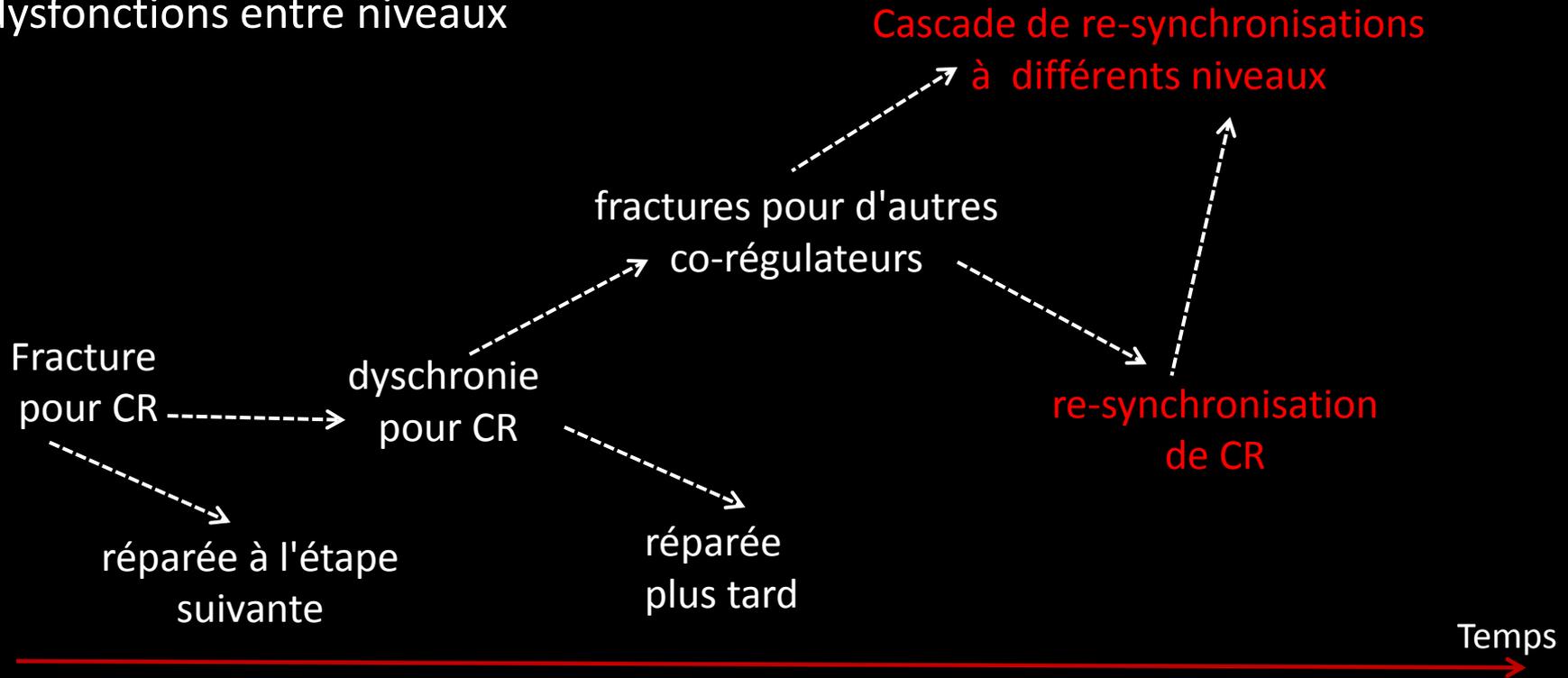
# CASCADE DE DYSFUNCTIONS

Le non-respect des lois de synchronicité conduit à des boucles de dysfonctions entre niveaux



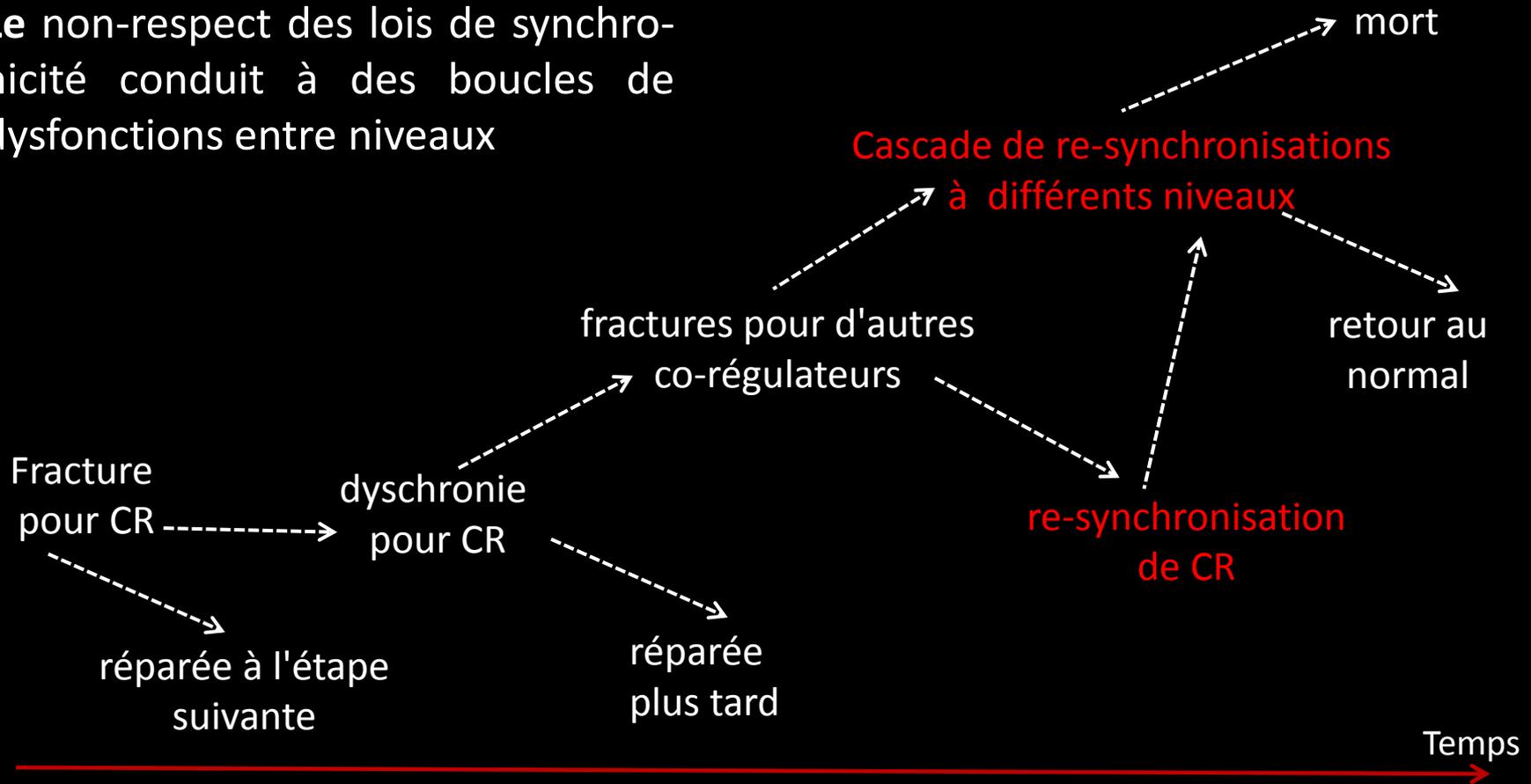
# CASCADE DE DYSFUNCTIONS

Le non-respect des lois de synchronicité conduit à des boucles de dysfonctions entre niveaux



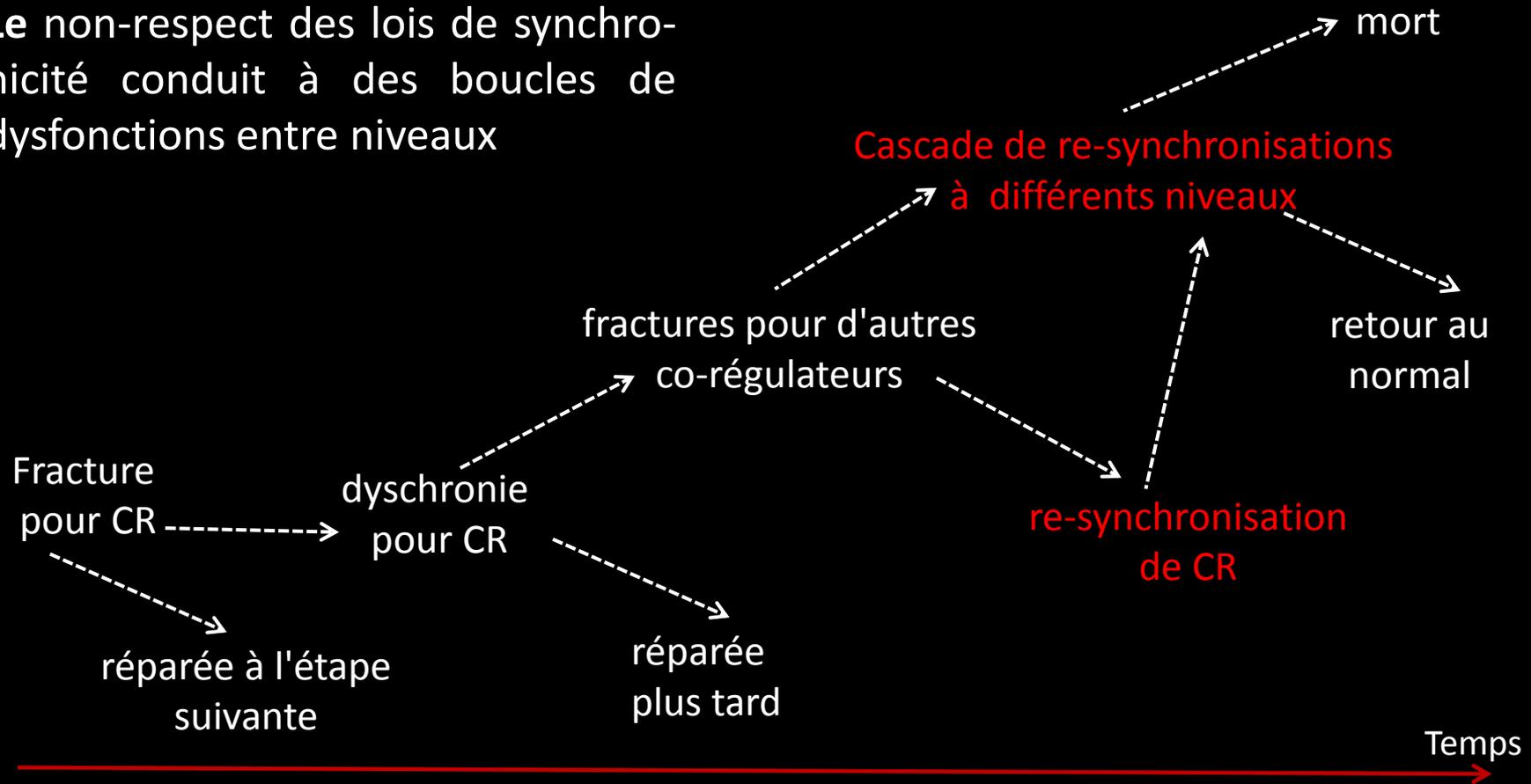
# CASCADE DE DYSFUNCTIONS

Le non-respect des lois de synchronicité conduit à des boucles de dysfonctions entre niveaux



# CASCADE DE DYSFUNCTIONS

Le non-respect des lois de synchronicité conduit à des boucles de dysfonctions entre niveaux



---> Analyse d'évènements complexes dans un SEM.

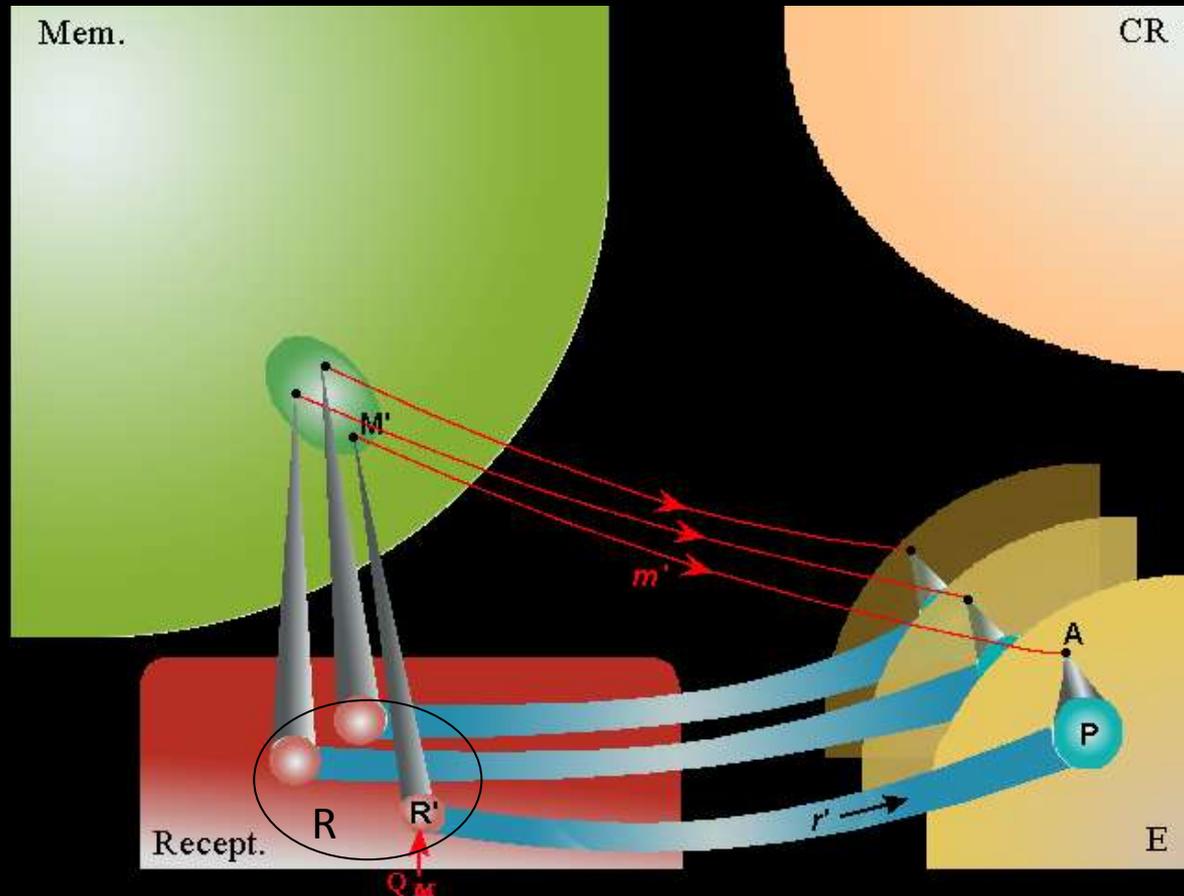
**Application. Théorie du vieillissement par cascade de re-synchronisations** par suite de la diminution progressive des rapports moyens  $s/d$  et  $s/p$  pour différents co-régulateurs de niveaux croissants (EV 1993).

# EXEMPLES DE DYSCHRONIES EN MUSIQUE ET EN INFORMATIQUE

Dans l'exécution d'une pièce musicale ou l'improvisation peuvent intervenir des dyschronies au niveau du rythme (décalage), des hauteurs (mode et accords utilisés). La resynchronisation peut être facilitée par un chef d'orchestre, et en général par une bonne connaissance mutuelle des musiciens.

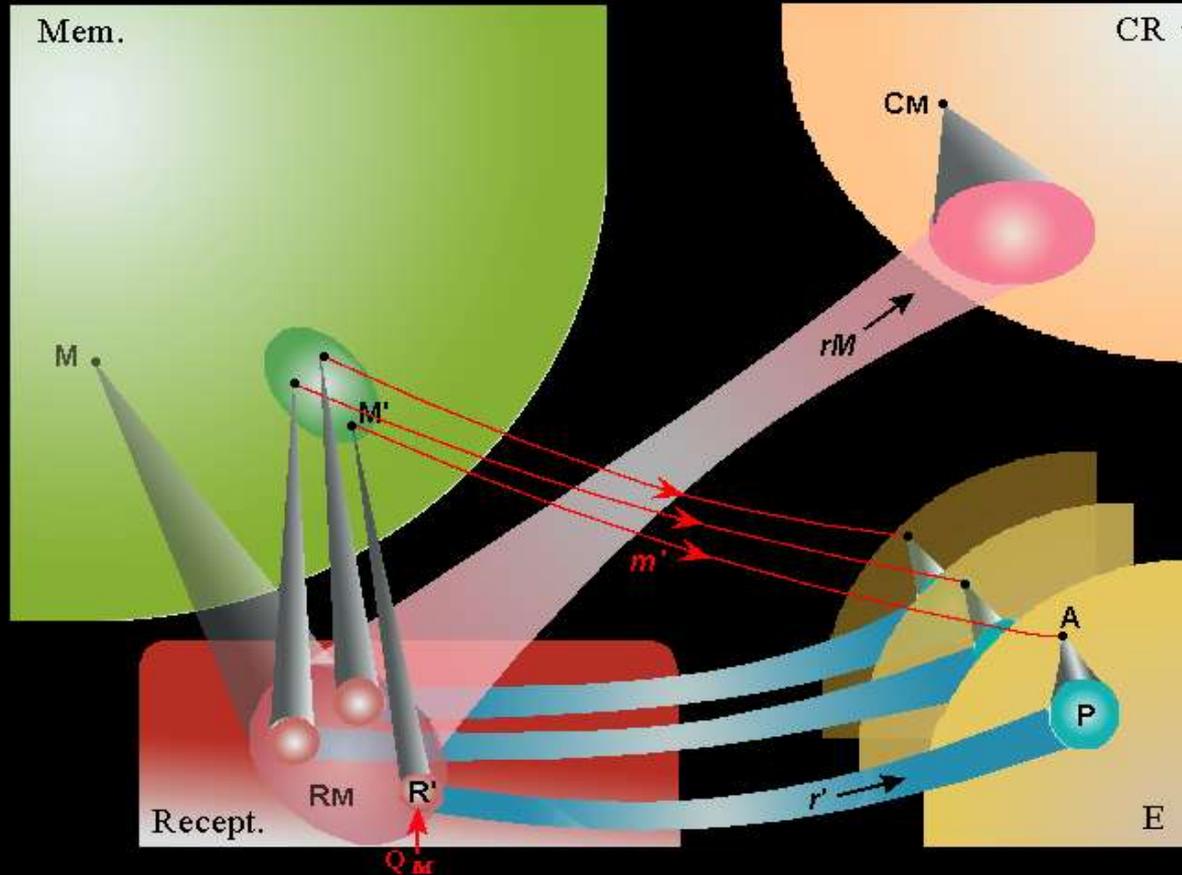
Sur un réseau d'ordinateurs tel qu'internet, des dyschronies peuvent survenir à différents niveaux (lien par câble téléphonique, liaison IP, connexion TCP, échange de données HTTP) et entraîner ou non une cascade de resynchronisations, selon les informations de connexion en mémoire dans chaque composant.

# MÉMOIRE: FORMATION D'UNE CR-EMPREINTE



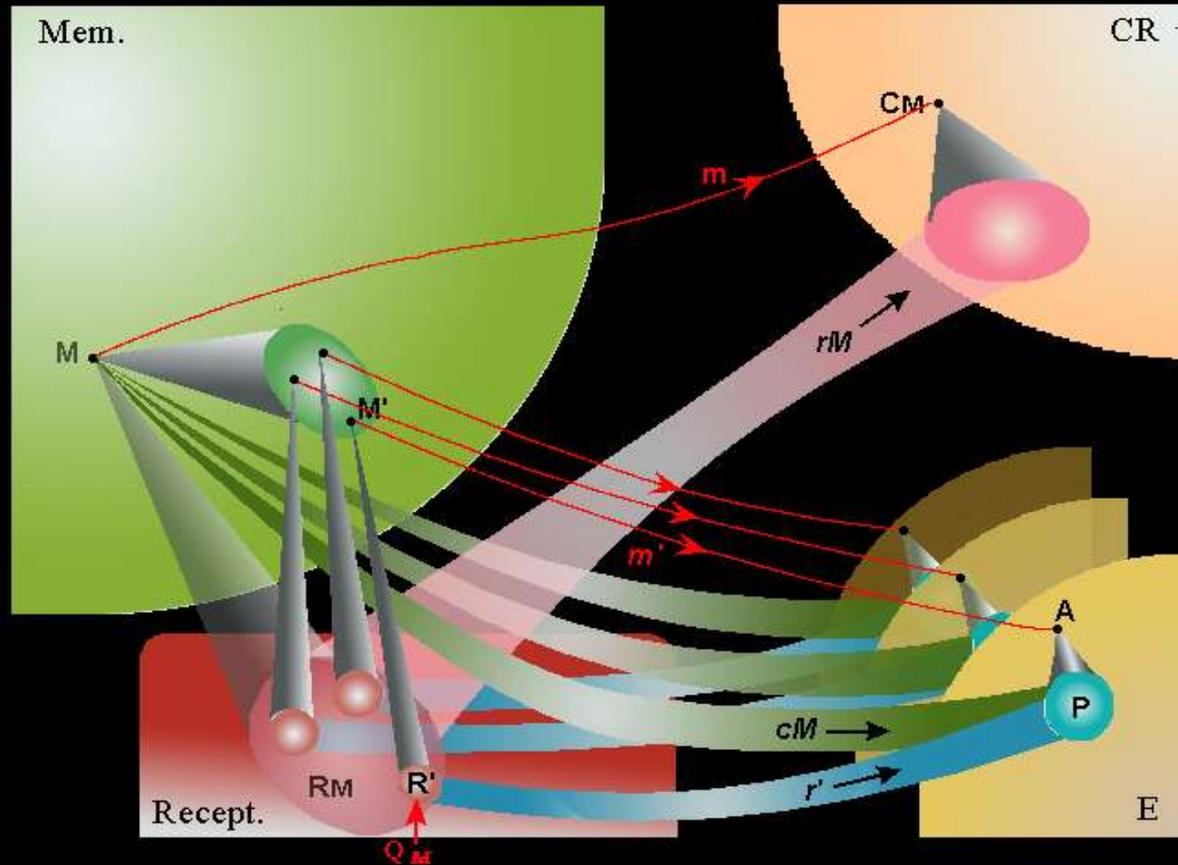
L'activation par un stimulus (externe ou interne)  $Q$  d'un pattern  $R$  de récepteurs se transmet à un co-régulateur  $E$  via un pattern  $r'$  de perspectives d'un sous-pattern  $R'$  de  $R$  ; la procédure de  $E$  est de recoller  $r'$ , ce qui se traduit dans le SEM par la formation d'une colimite  $M'$  de  $R'$ , appelée  $E$ -*empire* de  $Q$  ou de  $R$ . Et de même pour les autres CRs.

# MÉMOIRE: FORMATION D'UNE EMPREINTE



L'*empreinte*  $M$  de  $Q$  est la colimite de  $R$ .

# MÉMOIRE: FORMATION D'UNE EMPREINTE



L'*empreinte*  $M$  de  $Q$  est la colimite de  $R$ .

$M$  est obtenue comme colimite des  $E$ -empreintes relatives aux différents co-régulateurs.

Le rappel de  $M$  peut se faire directement, ou via le rappel de ses différentes  $CR$ -empreintes.

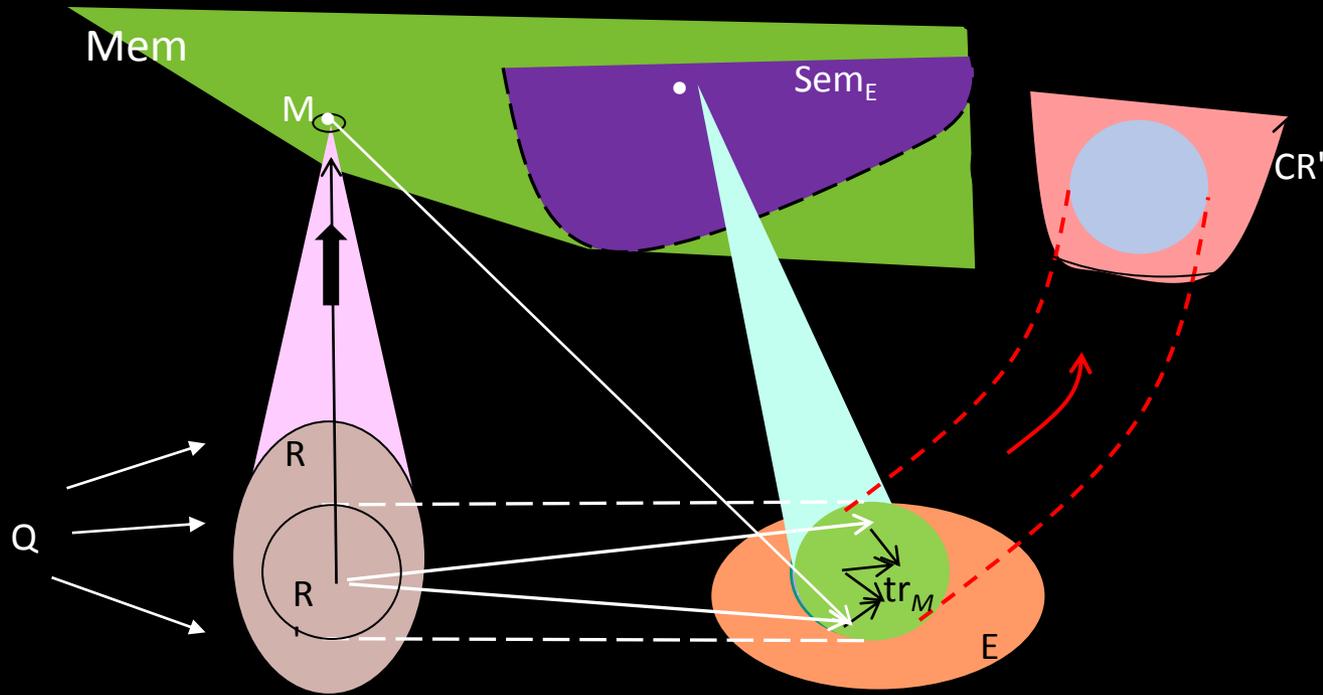
## EXEMPLE : MEMORISATION D'UNE PARTITION

Dans le SEM d'un ensemble de musiciens, chaque musicien mémorise sa partie et mémorise non seulement le contenu de la partition mais aussi des indications d'exécution, qui peuvent être

- ▶ internes : doigtés et autres indications techniques qui ne servent qu'au musicien lui-même ;
- ▶ externes : gestes pour se coordonner avec ses voisins, indications communes à plusieurs musiciens telles que les respirations ou variations de tempo.

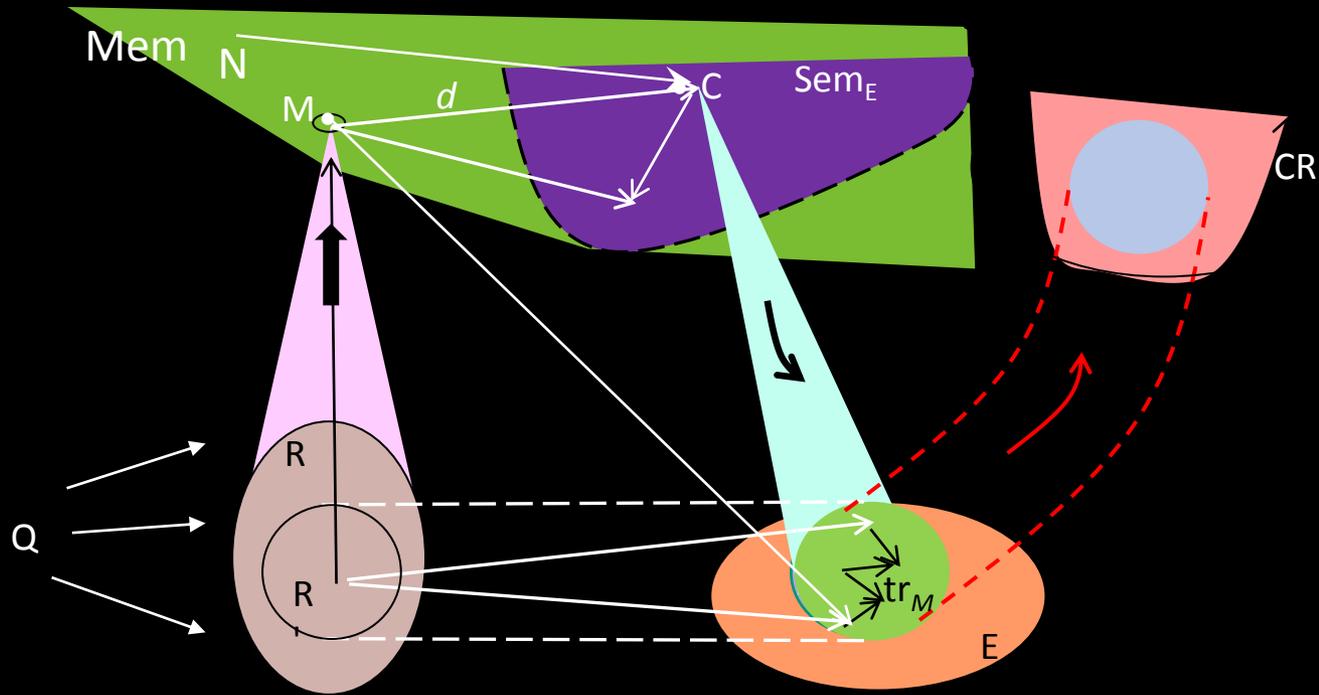
La mémoire globale de l'ensemble "émerge" par colimite de ces mémoires partielles ; lorsque l'ensemble comporte un chef d'orchestre, elle ne se réduit pas à la mémoire de celui-ci, car il ne connaît donc ne mémorise pas toutes les indications d'interprétation des autres musiciens.

# MEMOIRE SEMANTIQUE RELATIVE A CR



La *E-trace* de  $Q$  ou de son empreinte  $M$  est le pattern  $tr_M$  formé des agents recevant un aspect de  $M$  (indexé par cet aspect), avec les liens entre agents corrélant ces aspects.

# MEMOIRE SEMANTIQUE RELATIVE A CR

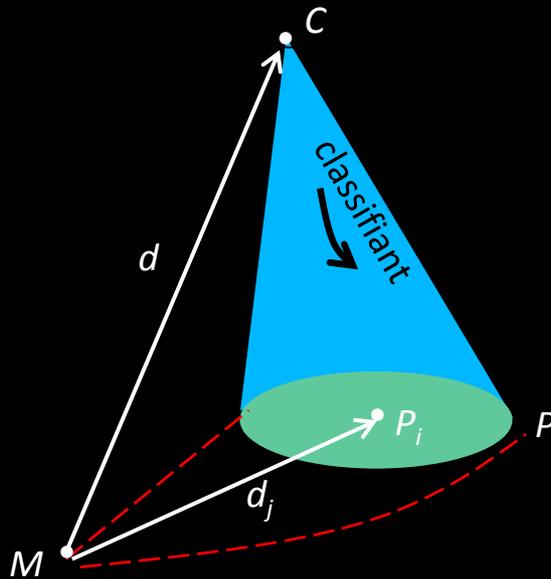


La *E-trace* de  $Q$  ou de son empreinte  $M$  est le pattern  $tr_M$  formé des agents recevant un aspect de  $M$  (indexé par cet aspect), avec les liens entre agents corrélant ces aspects.

Classe de *E-invariance* de  $M$  = ensemble des  $N$  ayant des *E-traces* pro-homologues. Le *E-concept*  $C$  de  $M$  est la limite projective de  $tr_M$ .

Le lien  $d$  de  $M$  vers  $C$  définit  $C$  comme réflexion de  $M$  dans la mémoire *E*-sémantique  $Sem_E$ . Les *instances de*  $C$  sont les  $N$  ayant  $C$  pour réflexion.

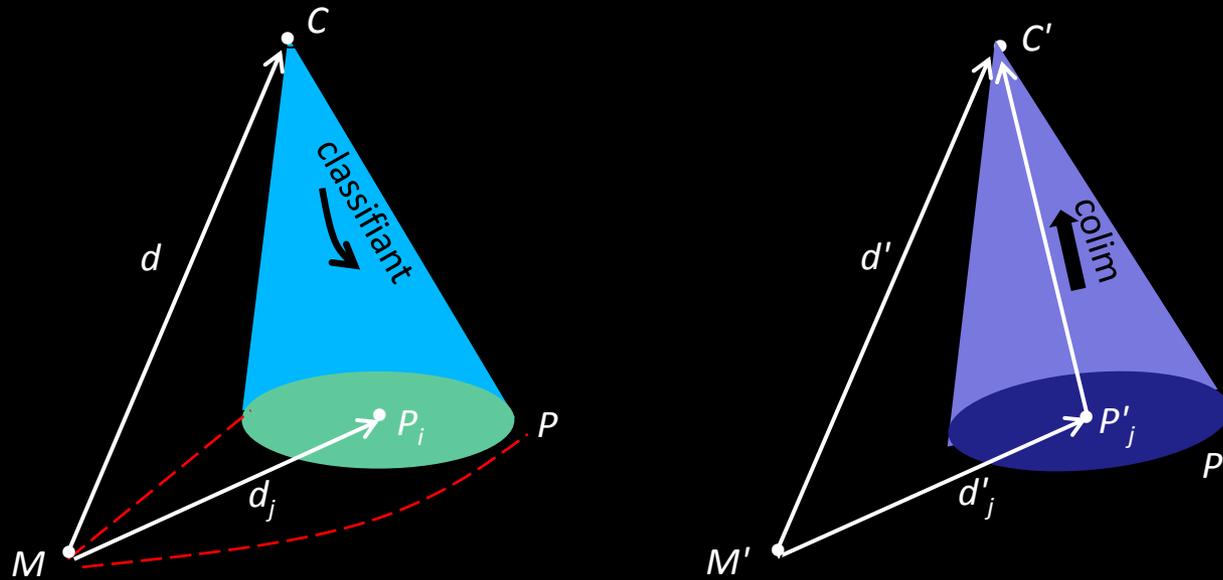
## MEMOIRE SEMANTIQUE. CONCEPTS



La *mémoire sémantique* est construite à partir des  $Sem_{CR}$  pour les différents CR par complexification mixte, ajoutant successivement des concepts construits par limites et colimites :

*Limites* :  $C$  est le *concept* classifiant un pattern  $P$  de concepts  $P_i$ . Une instance  $M$  de  $C$  est une instance de chaque  $P_i$  dont les liens canoniques  $d_j$  vers  $P_i$  forment un lien distribué vers  $P'$  ; ce lien distribué est classifié par le lien canonique  $d$  de  $M$  vers  $S$ .

## MEMOIRE SEMANTIQUE. CONCEPTS



La *mémoire sémantique* est construite à partir des  $\text{Sem}_{\text{CR}}$  pour les différents CR par complexification mixte, ajoutant successivement des concepts construits par limites et colimites :

*Limites* :  $C$  est le *concept* classifiant un pattern  $P$  de concepts  $P_i$ . Une instance  $M$  de  $C$  est une instance de chaque  $P_i$  dont les liens canoniques  $d_j$  vers  $P_i$  forment un lien distribué vers  $P'$  ; ce lien distribué est classifié par le lien canonique  $d$  de  $M$  vers  $S$ .

*Colimites* :  $C$  est le concept colimite d'un pattern  $P'$  de concepts ; ses instances  $M'$  sont toutes les instances des divers  $P'_j$ .

# EXEMPLES MUSICAUX DE CONCEPTS

Le concept d'une œuvre musicale a pour instances ses partitions — chaque copie de partition peut avoir ses propres annotations manuscrites, et il peut exister différentes mises en page — et ses interprétations. En improvisation, l'entraînement entre des musiciens d'un groupe crée des concepts pour des éléments de style (dont les instances sont des motifs ou enchaînements de motifs qui ont des caractères communs), éventuellement une grille harmonique (dont les instances sont les improvisations qui suivent cette grille).

## NOYAU ARCHETYPAL

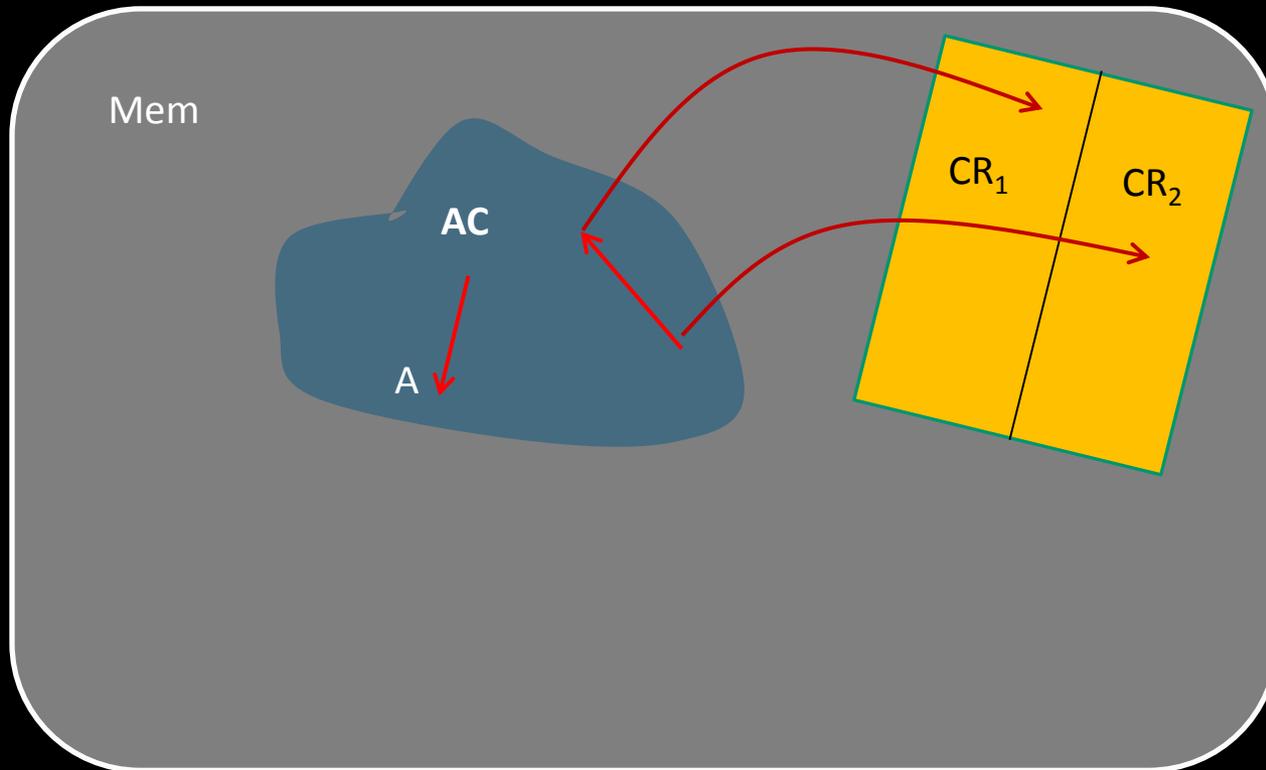


MP permet le développement au cours du temps du ***Noyau Archétypal*** .

AC = sous-système de Mem formé de composants d'ordre supérieur intégrant des empreintes significatives, avec nombreuses ramifications et possibilité de balancements. Les liens entre eux souvent actifs sont de plus en plus rapides et forts (Hebb). Ils forment des *boucles archétypales* qui s'auto-entretiennent longtemps.

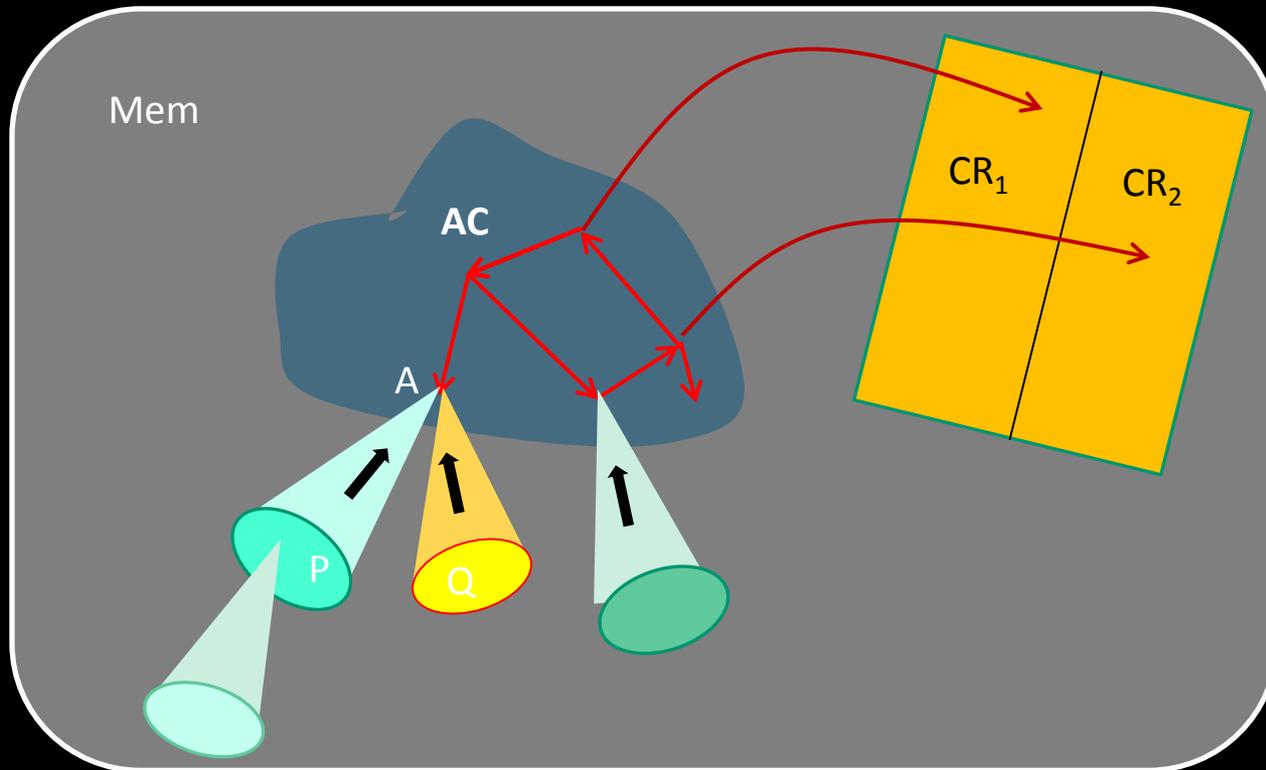
AC représente l'identité complexe du système et agit comme un ***modèle interne flexible***.

# PAYSAGE GLOBAL ET PROCESSUS D'ORDRE SUPERIEUR



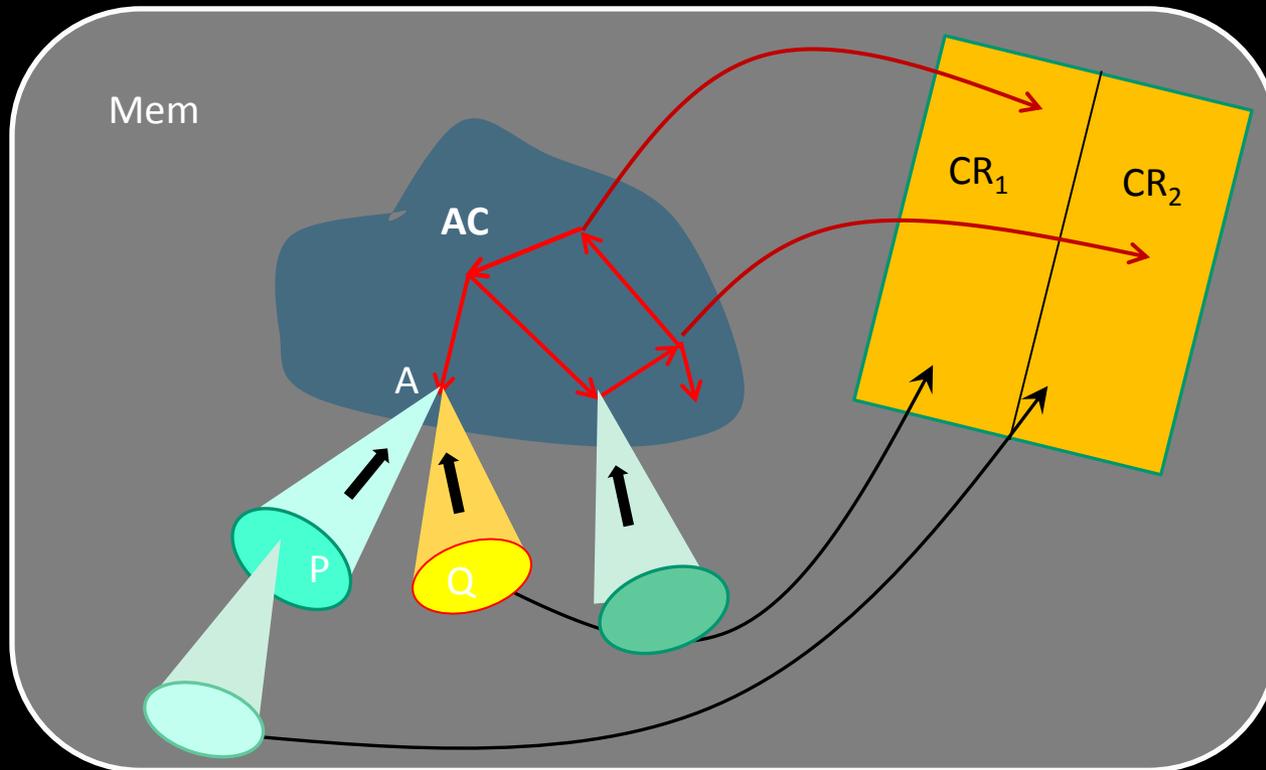
L'activation d'une partie de AC se diffuse via les boucles archétypales.

# PAYSAGE GLOBAL ET PROCESSUS D'ORDRE SUPERIEUR



L'activation d'une partie de AC se diffuse via les boucles archétypales. Elle se propage à une décomposition P d'un A, puis par balancement à une autre, puis à des ramifications.

# PAYSAGE GLOBAL ET PROCESSUS D'ORDRE SUPERIEUR

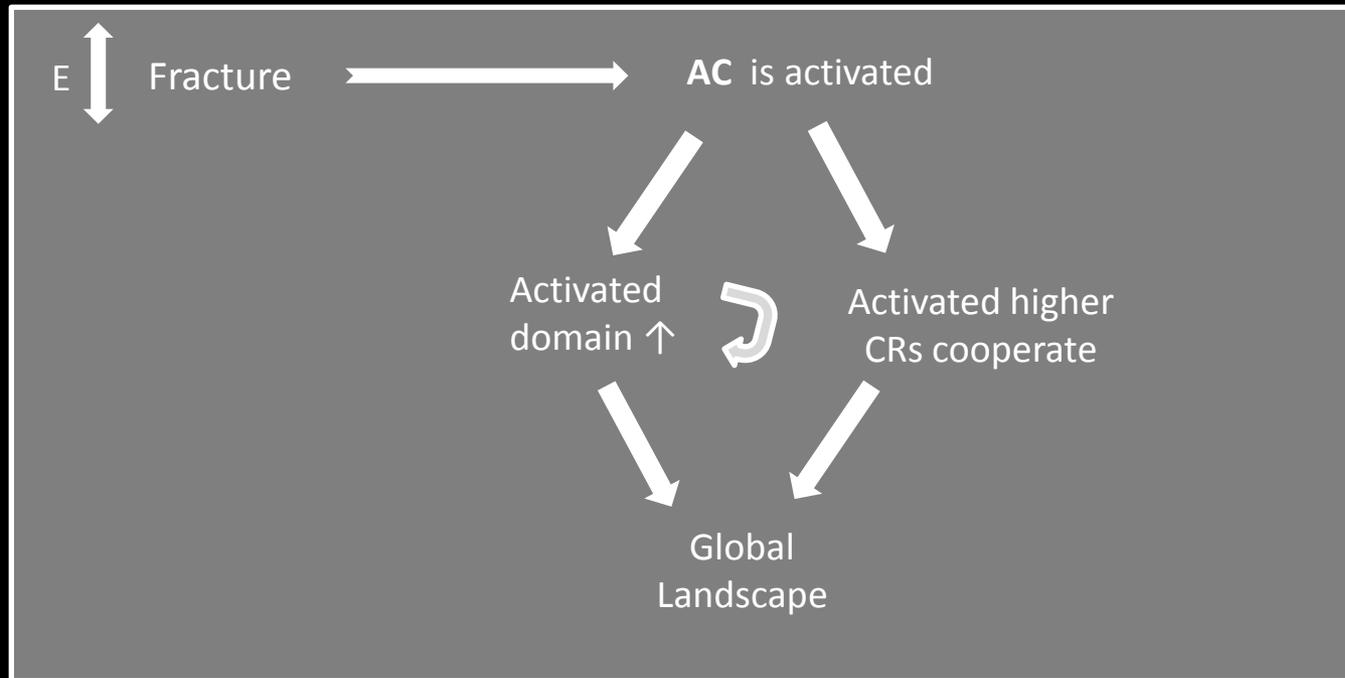


L'activation d'une partie de AC se diffuse via les boucles archétypales.

Elle se propage à une décomposition P d'un A, puis par balancement à une autre, puis à des ramifications.

L'information se transmet à des CR supérieurs liés à AC et permet la formation d'un *paysage global* unissant et étendant leurs paysages et de plus longue durée, dans lequel des processus d'ordre supérieur peuvent se développer.

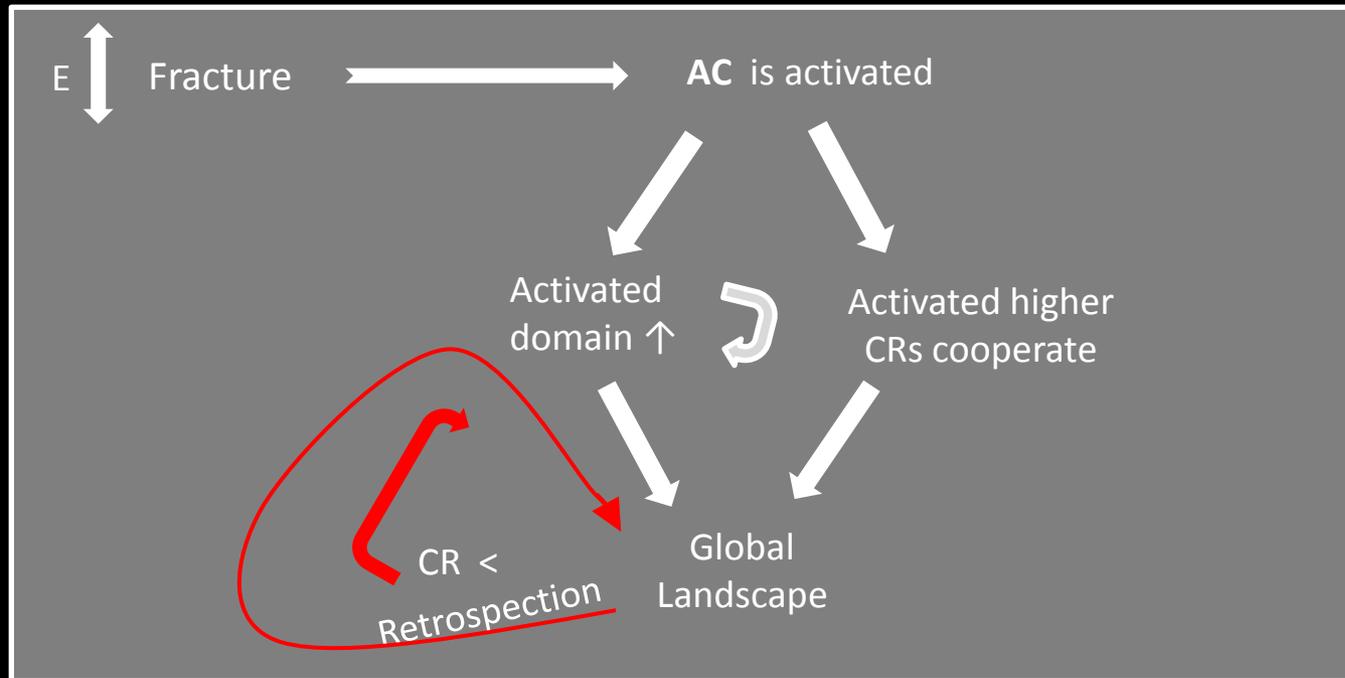
# ANTICIPATION



Un SEM est un *système anticipateur* au sens:

"a system with multiple potential future states for which the actualisation of one of these potential futures is determined by the events at each current time." (Rosen, 1985)

# ANTICIPATION



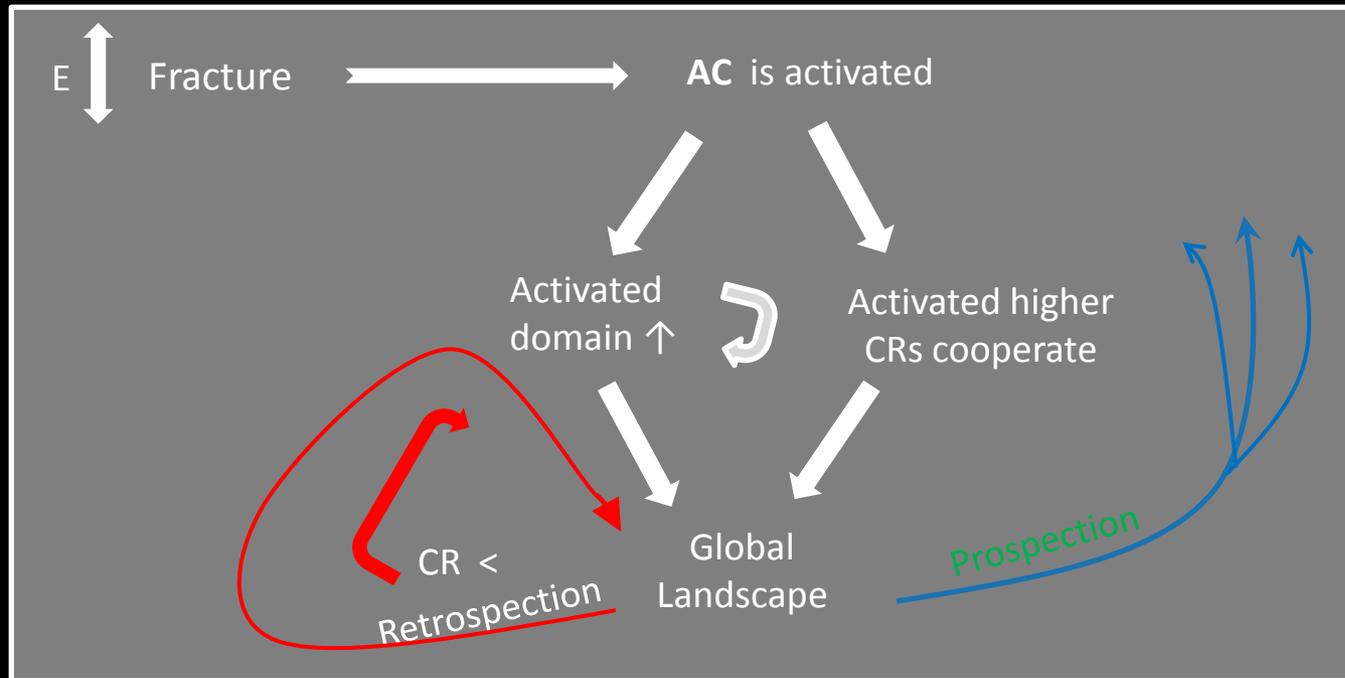
Un SEM est un ***système anticipateur*** au sens:

"a system with multiple potential future states for which the actualisation of one of these potential futures is determined by the events at each current time." (Rosen, 1985)

Un processus anticipatif consiste en :

---> *Rétrospection* pour "faire sens" d'un événement E et trouver ses causes possibles (par 'abduction' au sens de Pierce).

# ANTICIPATION



Un SEM est un ***système anticipateur*** au sens:

"a system with multiple potential future states for which the actualisation of one of these potential futures is determined by the events at each current time." (Rosen, 1985)

Un processus anticipatif consiste en :

---> *Rétrospection* pour "faire sens" d'un évènement E et trouver ses causes possibles (par 'abduction' au sens de Pierce).

---> *Prospection* anticipative pour essayer des suites de procédures possibles et en choisir une.

## EXEMPLE : RETROSPECTION LORS D'UNE REPETITION D'UN ENSEMBLE

Le noyau archétypal d'un ensemble de musiciens qui travaillent beaucoup ensemble contient le vécu de leurs expériences communes, des lieux de travail ou de concert fréquemment utilisés, des réflexes (inconscients) et conventions (conscientes) de communication.

Les fractures telles que les décalages ou attaques ratées peuvent demander de rejouer plusieurs fois le passage d'une pièce en essayant à chaque fois des stratégies différentes.

## POUR PLUS D'INFORMATIONS

*Memory Evolutive Systems: Hierarchy, Emergence, Cognition*  
(Elsevier, 2007)

Sites internet:

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

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

**MERCI**