

Neurosciences Computationnelles : CM5 L'apprentissage et Mémoire



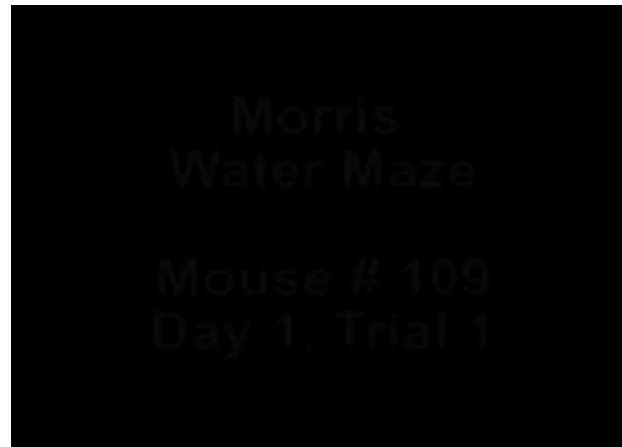
Michael Graupner
(michael.graupner@parisdescartes.fr)

Question

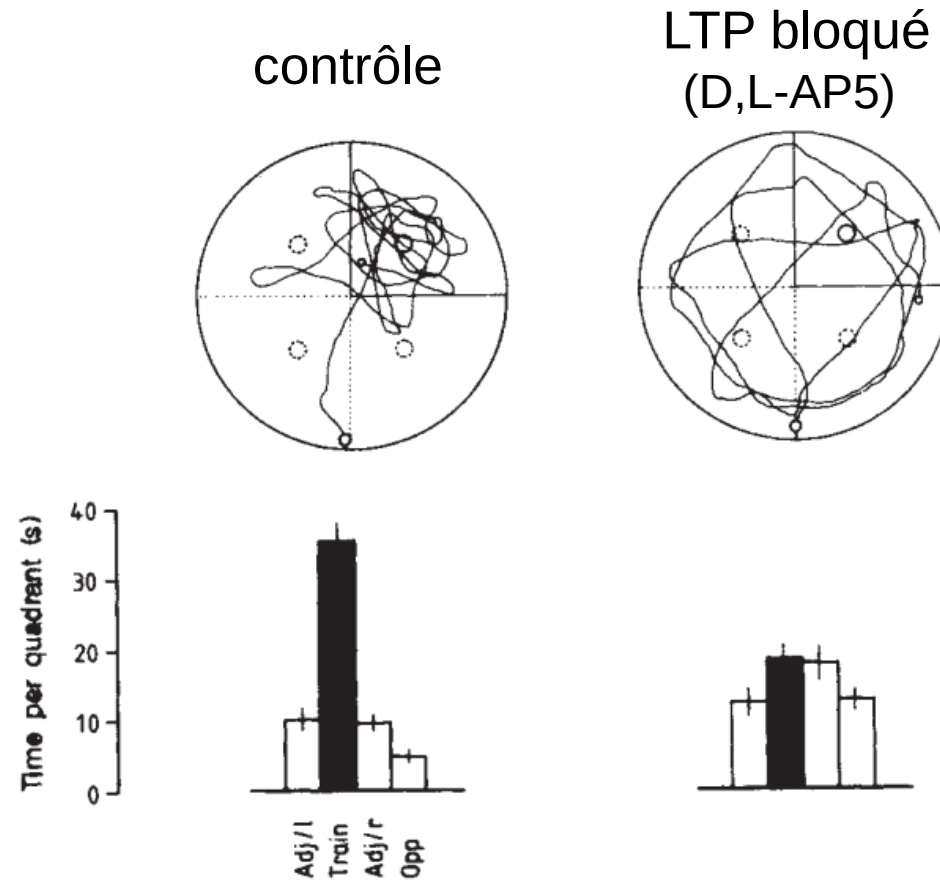
Sur quelle structure cérébrale suis-je en train de faire des recherches?

Pourquoi nous intéressons-nous à la plasticité synaptique?

labyrinthe aquatique de Morris



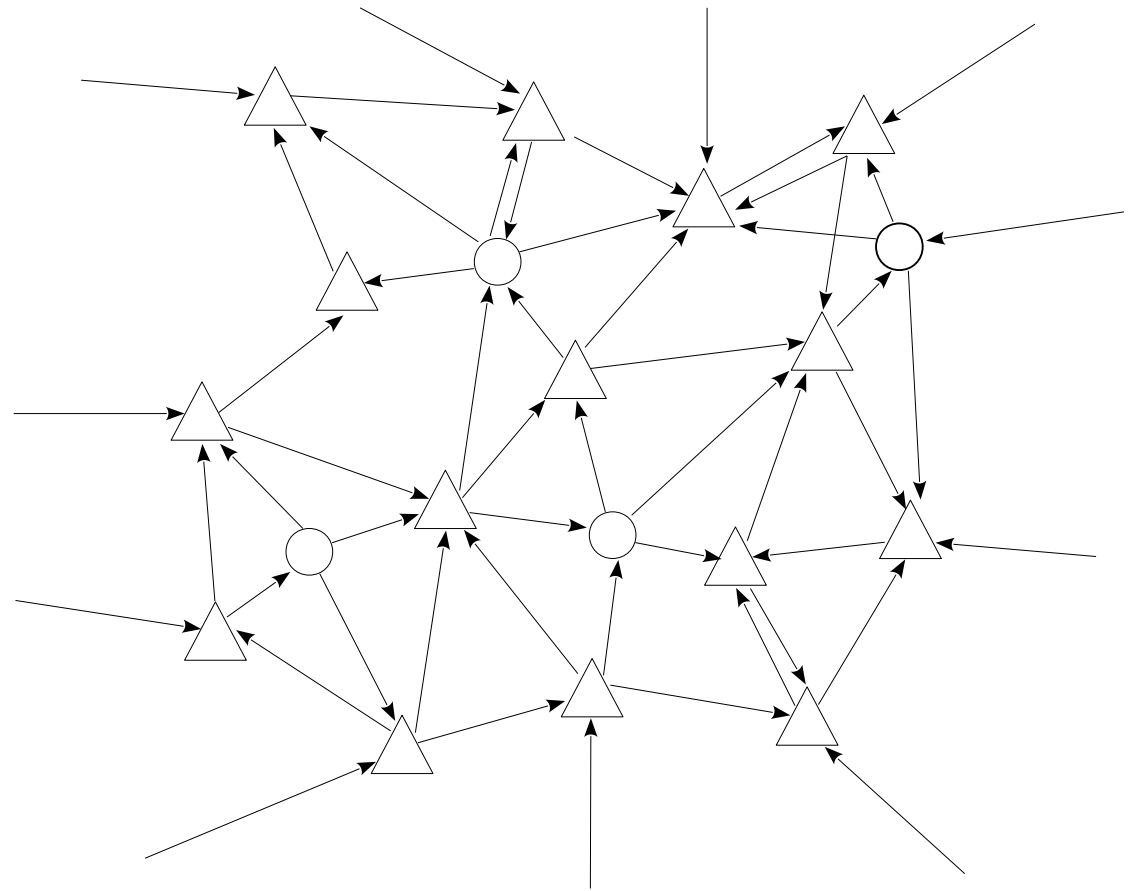
Relation entre le LTP et l'apprentissage/mémoire



- LTP (récepteur NMDA) nécessaire pour apprendre à localiser la plateforme

[Morris *et al.*, 1986]

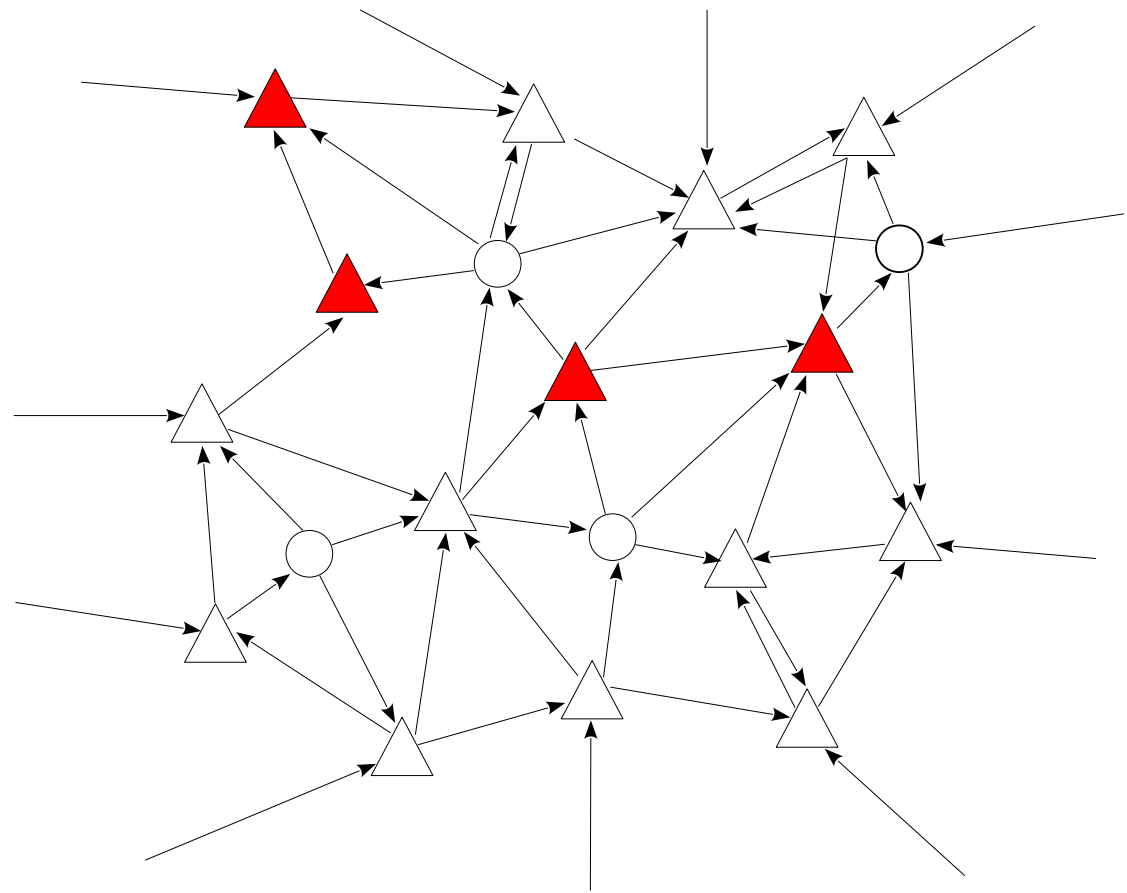
Mécanismes d'apprentissage et de mémoire



Mécanismes d'apprentissage et de mémoire

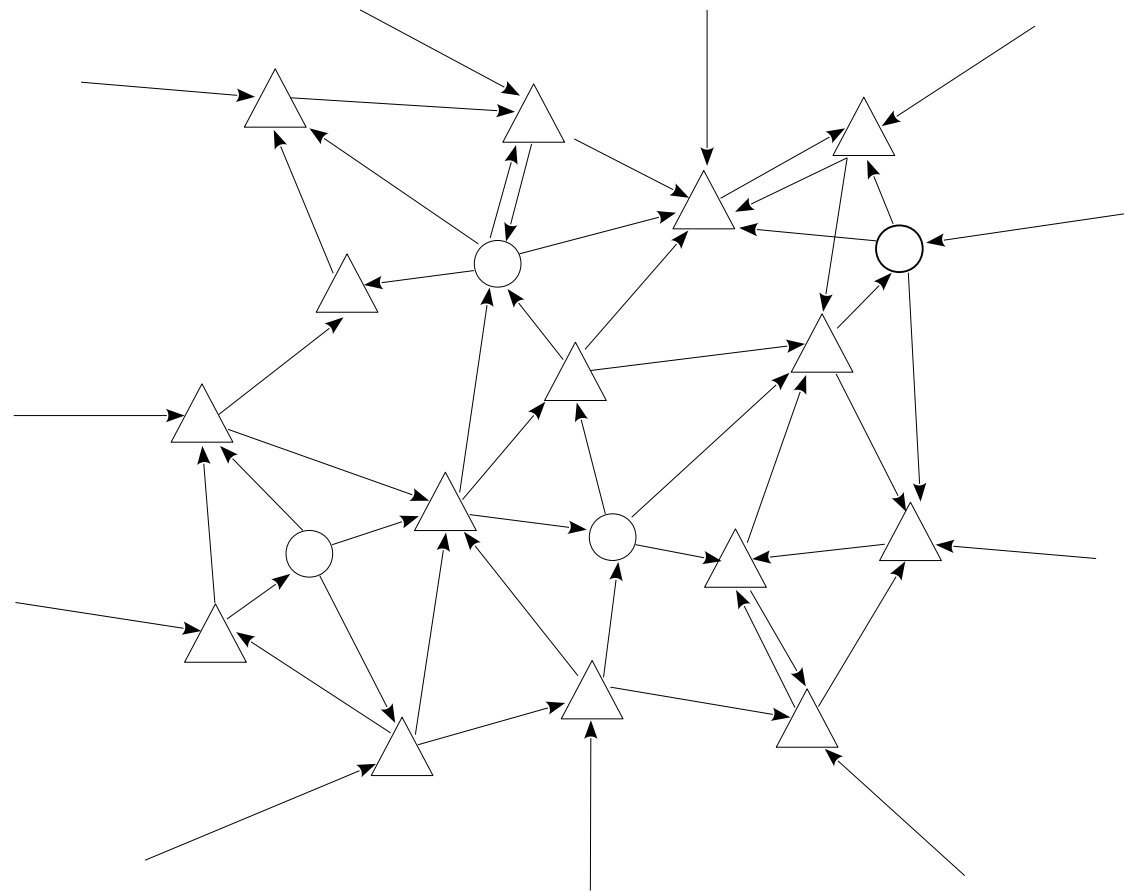
- Les stimuli externes déclenchent des changements d'activité neuronale.

Stimulus A



Mécanismes d'apprentissage et de mémoire

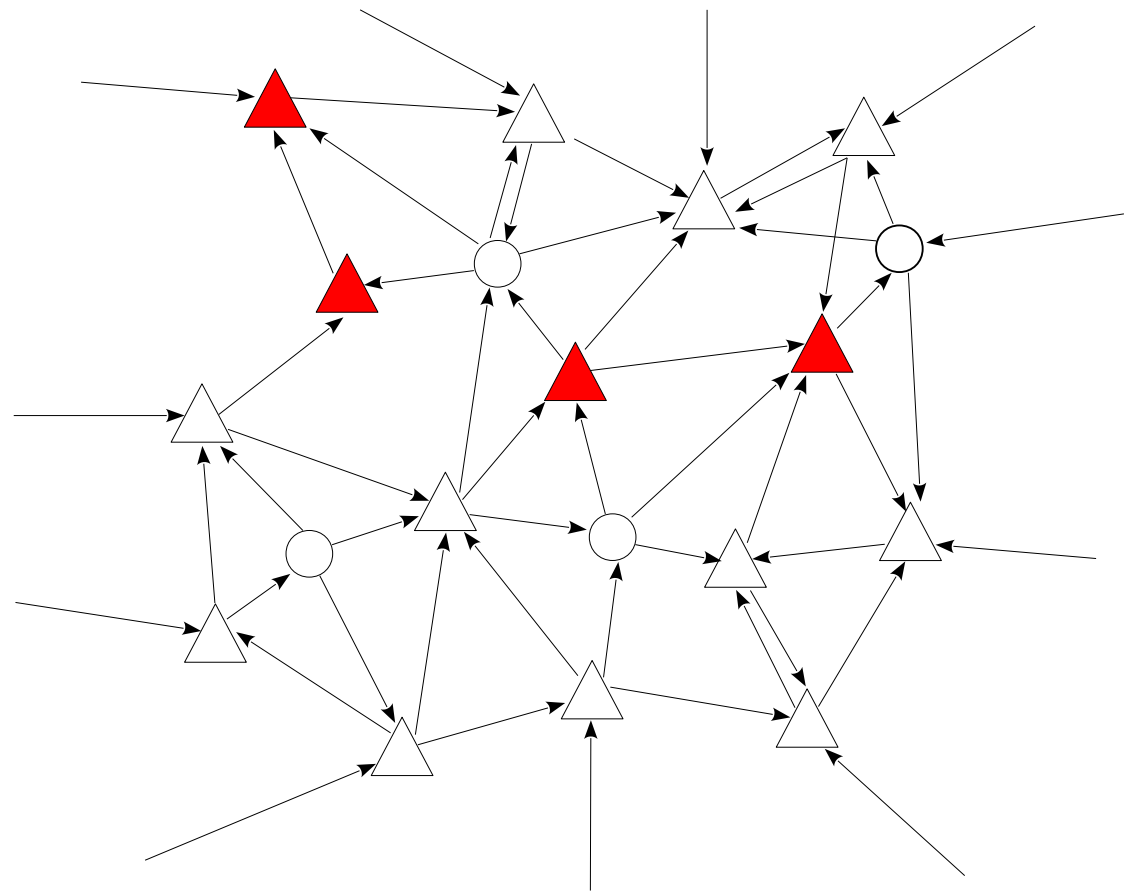
- Si l'activité provoquée par le stimulus ne laisse aucune trace dans le circuit
→ aucun souvenir du stimulus A



Mécanismes d'apprentissage et de mémoire

- Les stimuli externes déclenchent des changements d'activité neuronale.

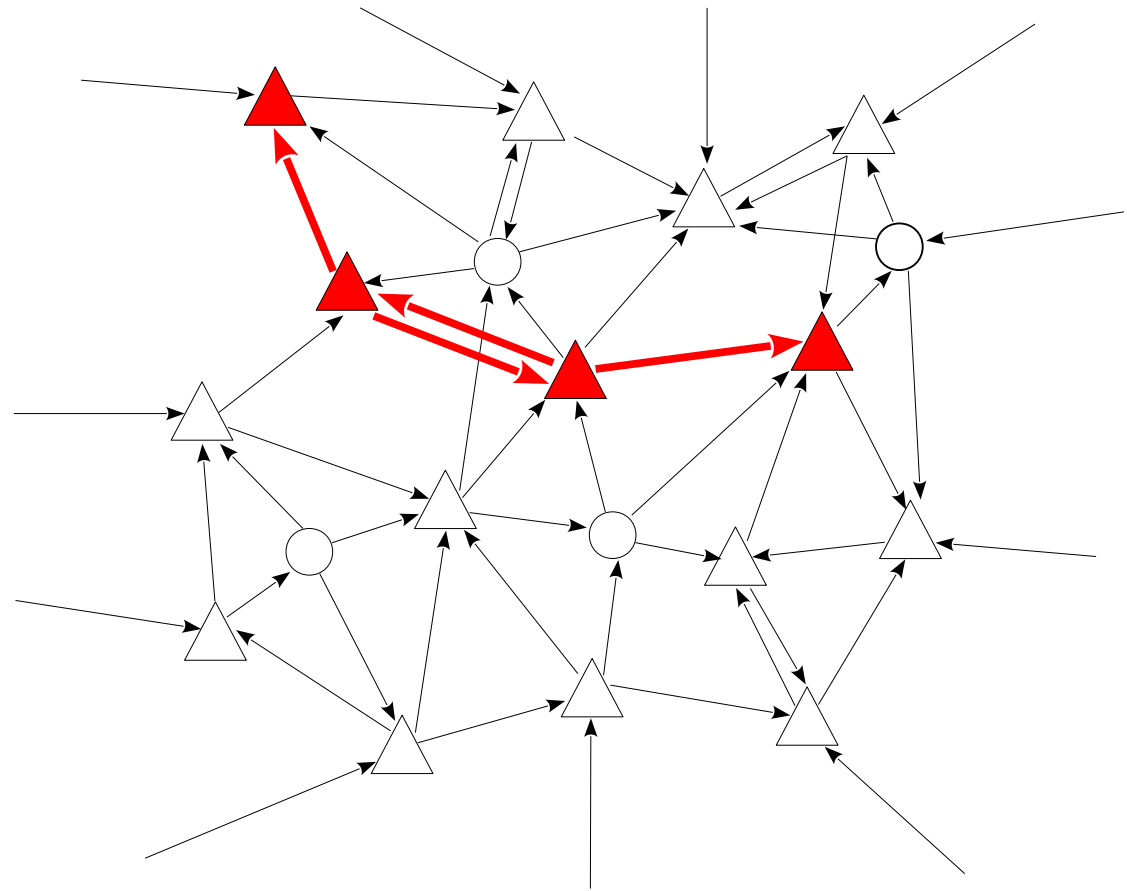
Stimulus A



Mécanismes d'apprentissage et de mémoire

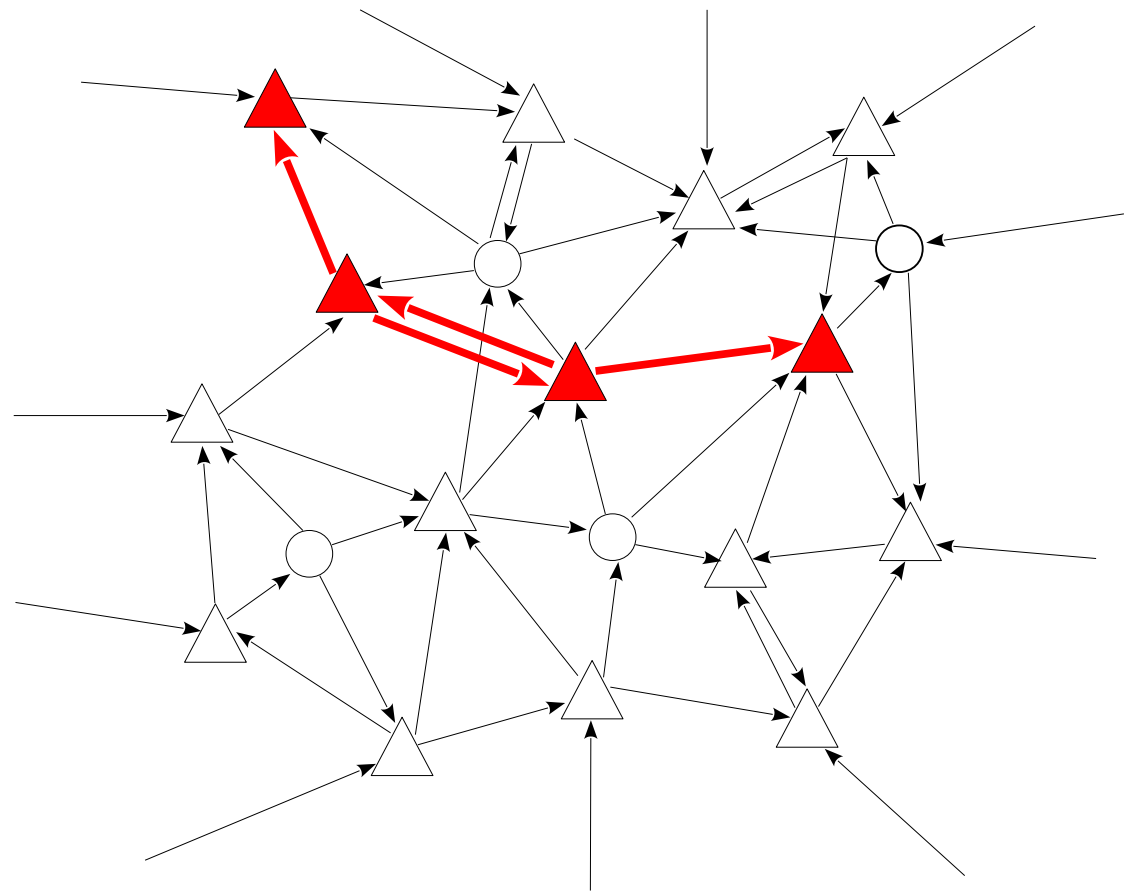
- Changements d'activité → changements dans la connectivité synaptique (plasticité synaptique/structurelle)

Stimulus A



Mécanismes d'apprentissage et de mémoire

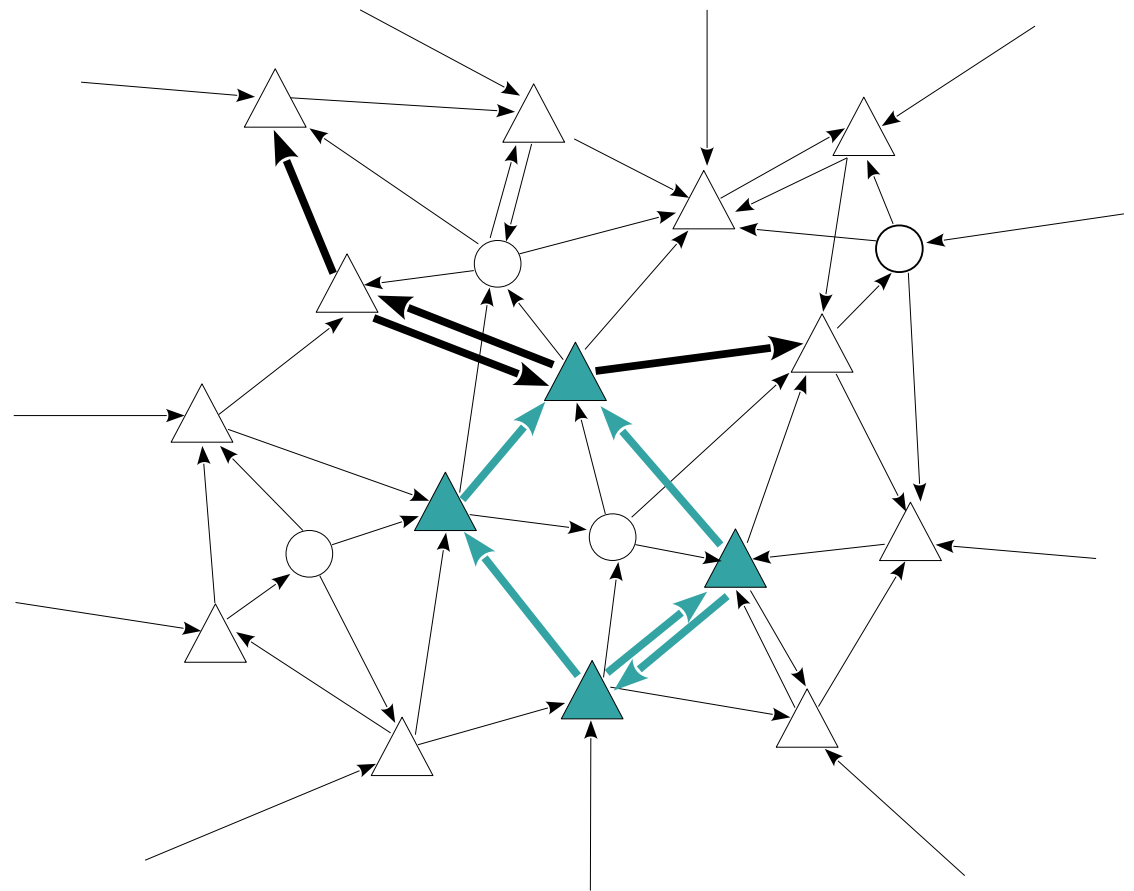
- Changements dans la connectivité synaptique → changements dans l'activité/la dynamique neuronale



Mécanismes d'apprentissage et de mémoire

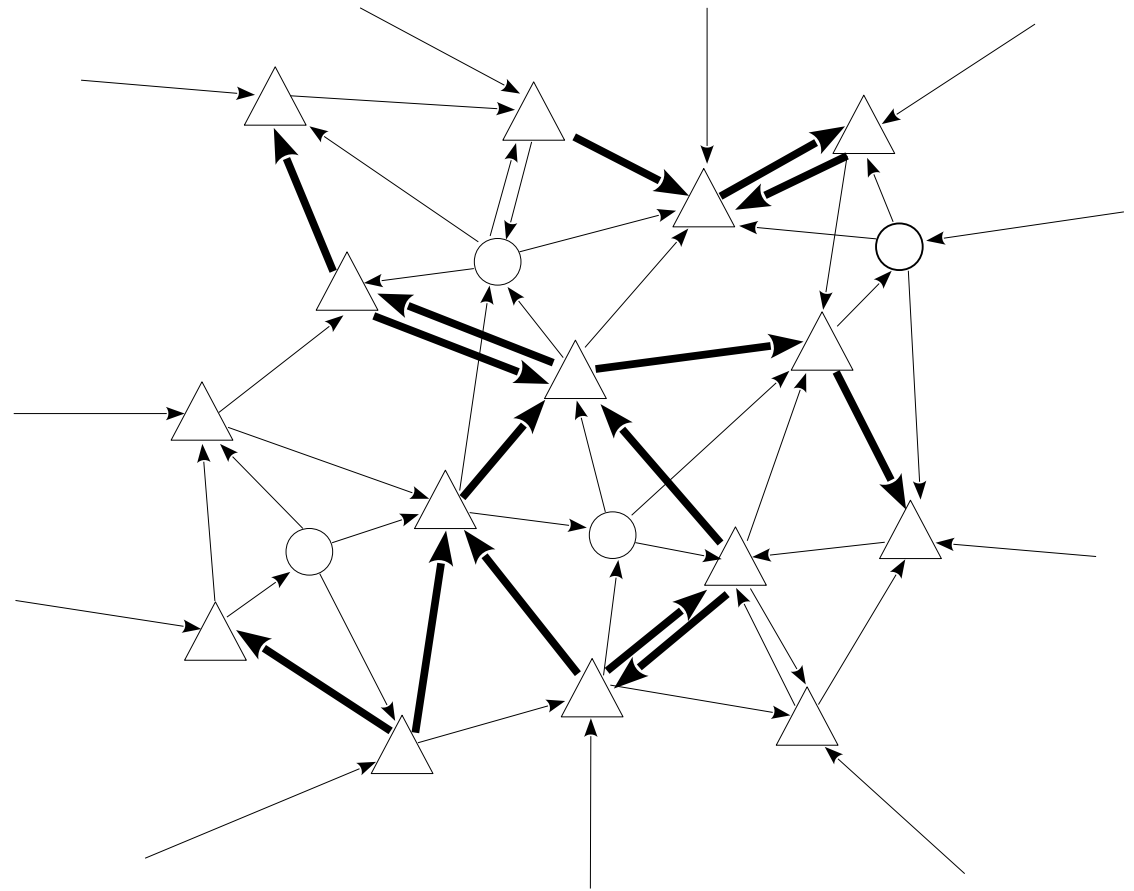
- Un autre stimulus déclenchant une activité dans un sous-ensemble distinct de neurones ...

Stimulus B



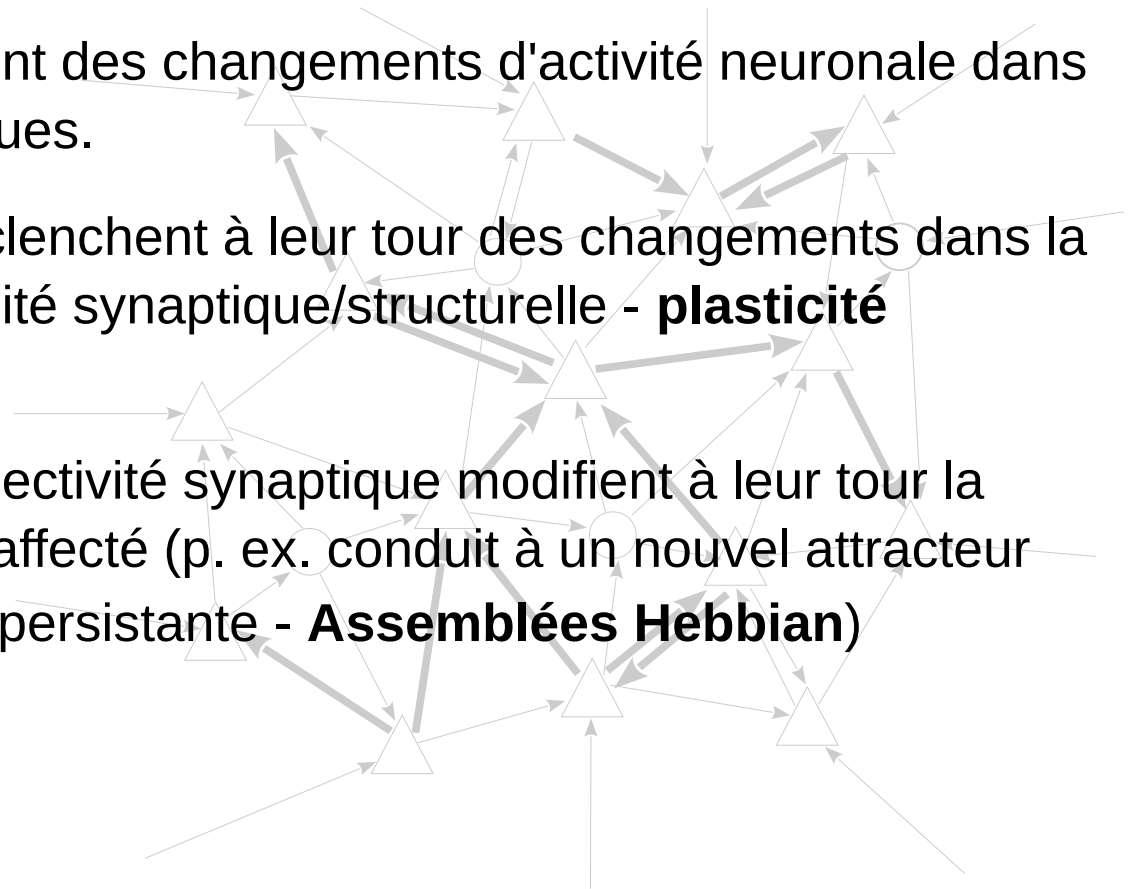
Mécanismes d'apprentissage et de mémoire

- Connectivité synaptique = superposition des traces laissées par les inputs externes

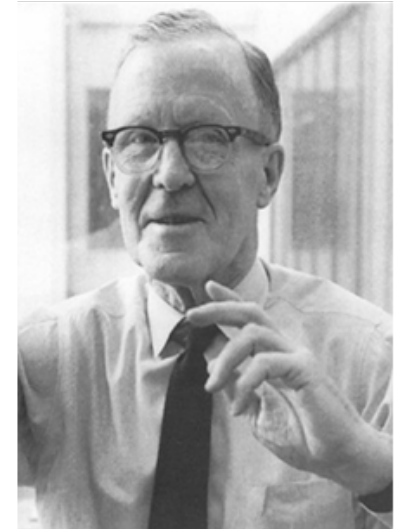
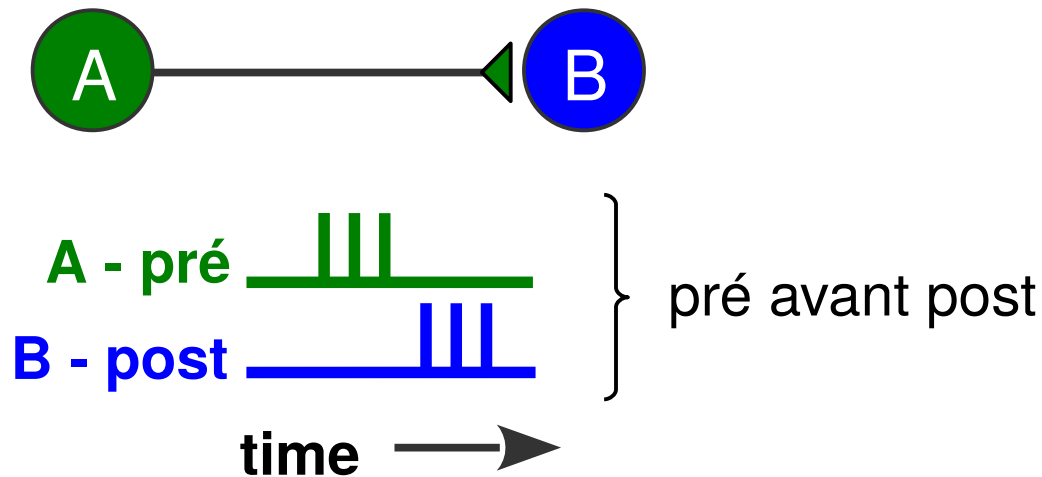


Apprentissage et mémoire - le scénario "Hebbian"

- Des stimuli externes déclenchent des changements d'activité neuronale dans des circuits neuronaux spécifiques.
- Les changements d'activité déclenchent à leur tour des changements dans la connectivité synaptique (plasticité synaptique/structurelle - **plasticité Hebbian**)
- Les changements dans la connectivité synaptique modifient à leur tour la dynamique du circuit neuronal affecté (p. ex. conduit à un nouvel attracteur → activité de période de retard persistante - **Assemblées Hebbian**)



Apprentissage et mémoire - le scénario "Hebbian"



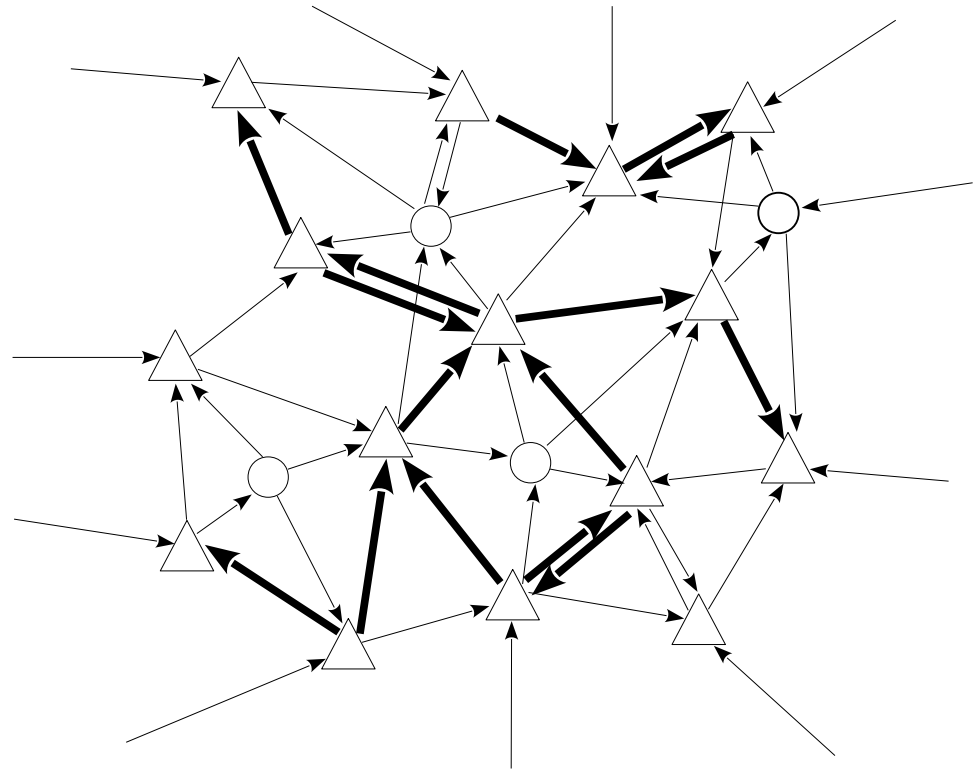
Donal Hebb, 1904 - 1985

“Lorsqu'un axone de la cellule A est assez proche pour exciter une cellule B et qu'il participe de façon *répétée* et *persistante* à sa décharge, une croissance ou des changements métaboliques se produisent dans l'une ou les deux cellules, de sorte que l'efficacité de la cellule A, comme l'une des cellules qui déclanche B, est augmentée.”

[Hebb 1949;
see also Konorski 1948]

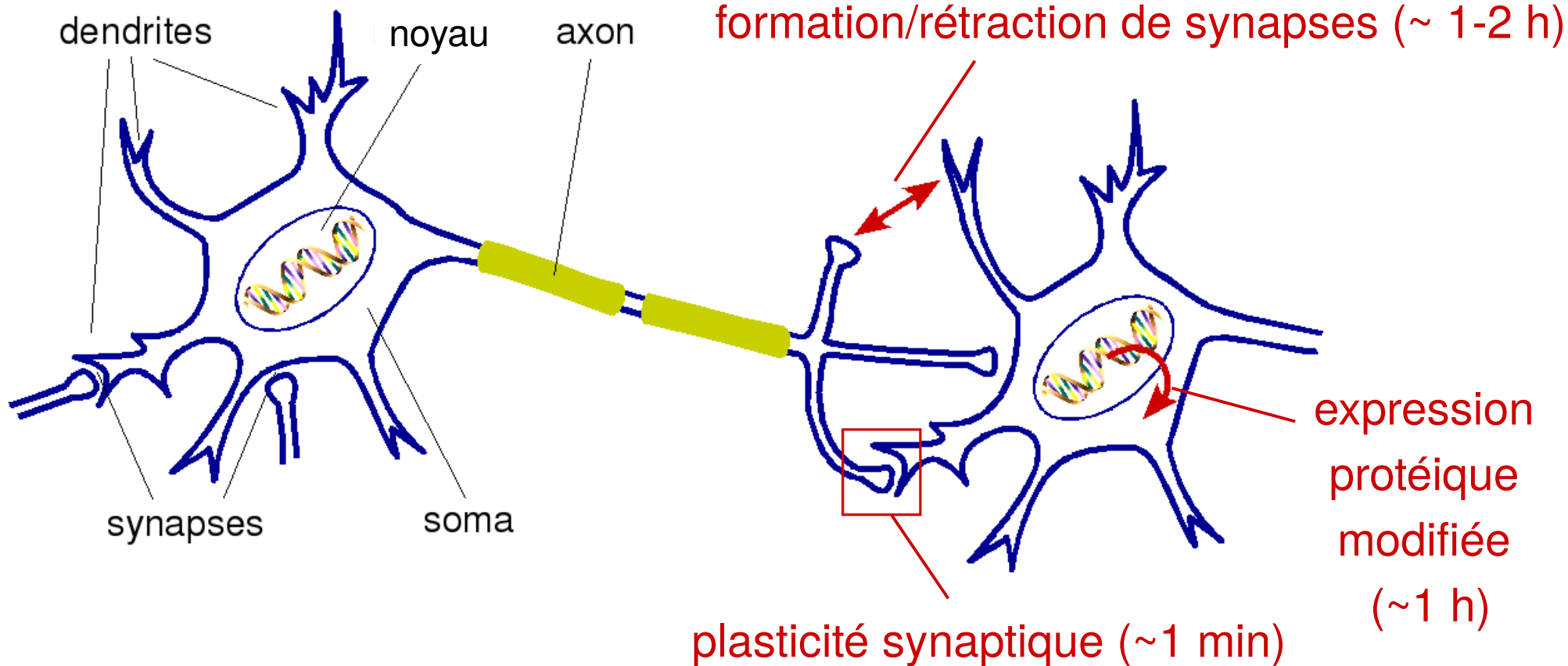
Questions ouvertes

- Quelles sont les règles de plasticité (apprentissage) des circuits corticaux?
- Comment ces règles de plasticité déterminent-elles la matrice de connectivité de ces circuits?
- Comment ces changements façonnent à leur tour la dynamique des circuits?

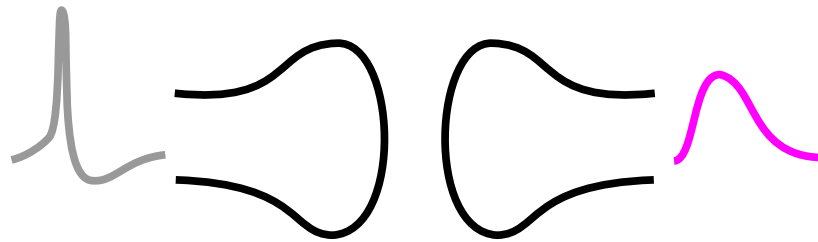


Différentes formes de plasticité

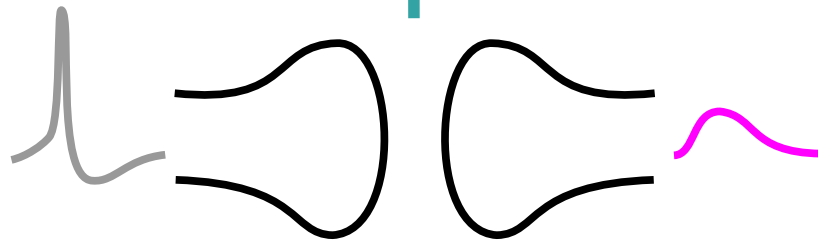
changements liés à l'activité neurale



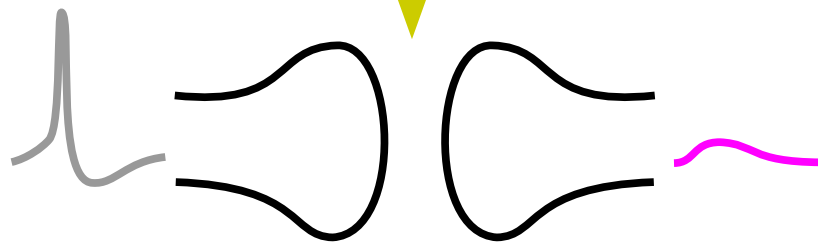
Plasticité synaptique à long terme



potentialisation à long terme (LTP)

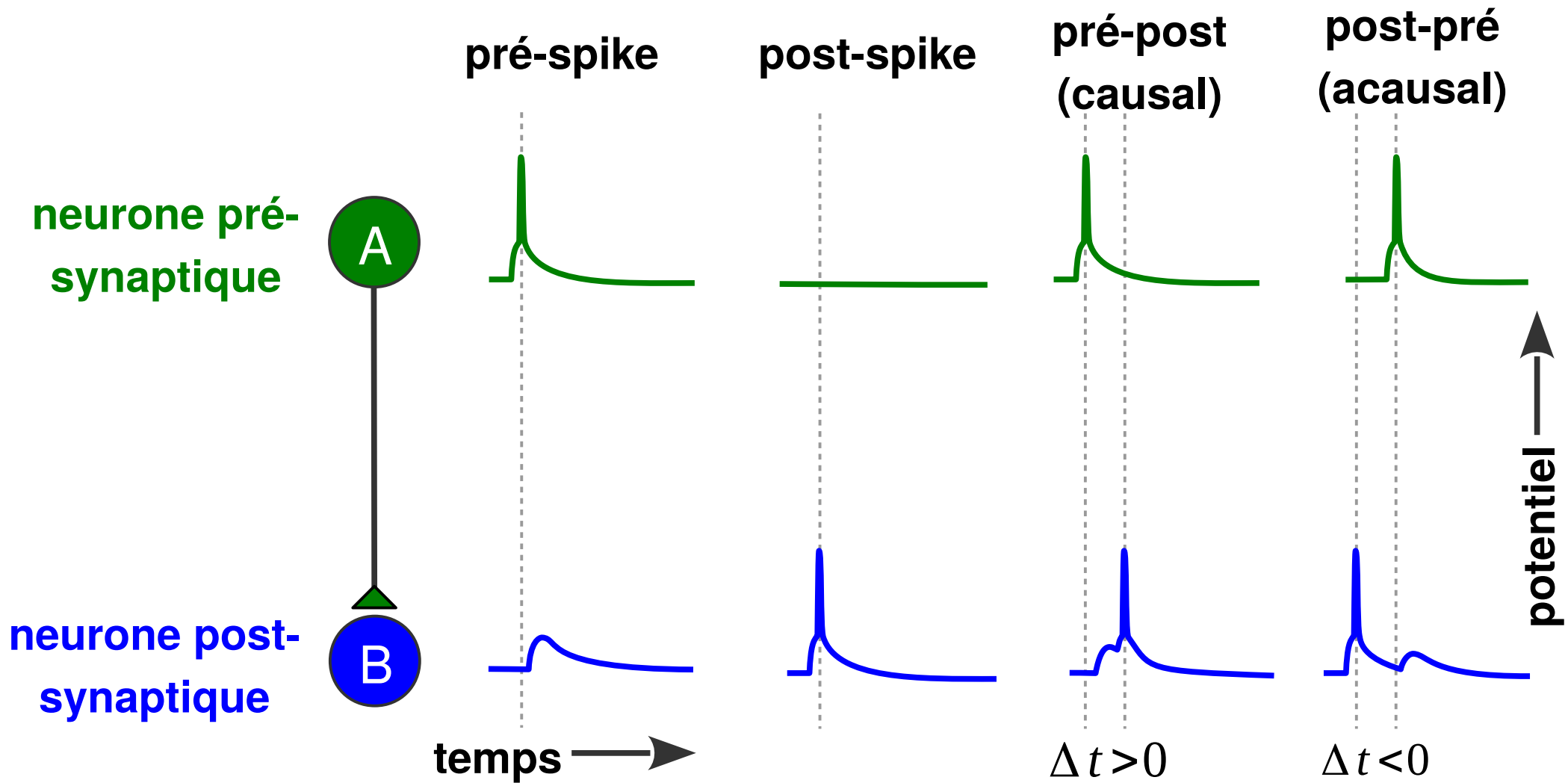


dépression à long terme (LTD)

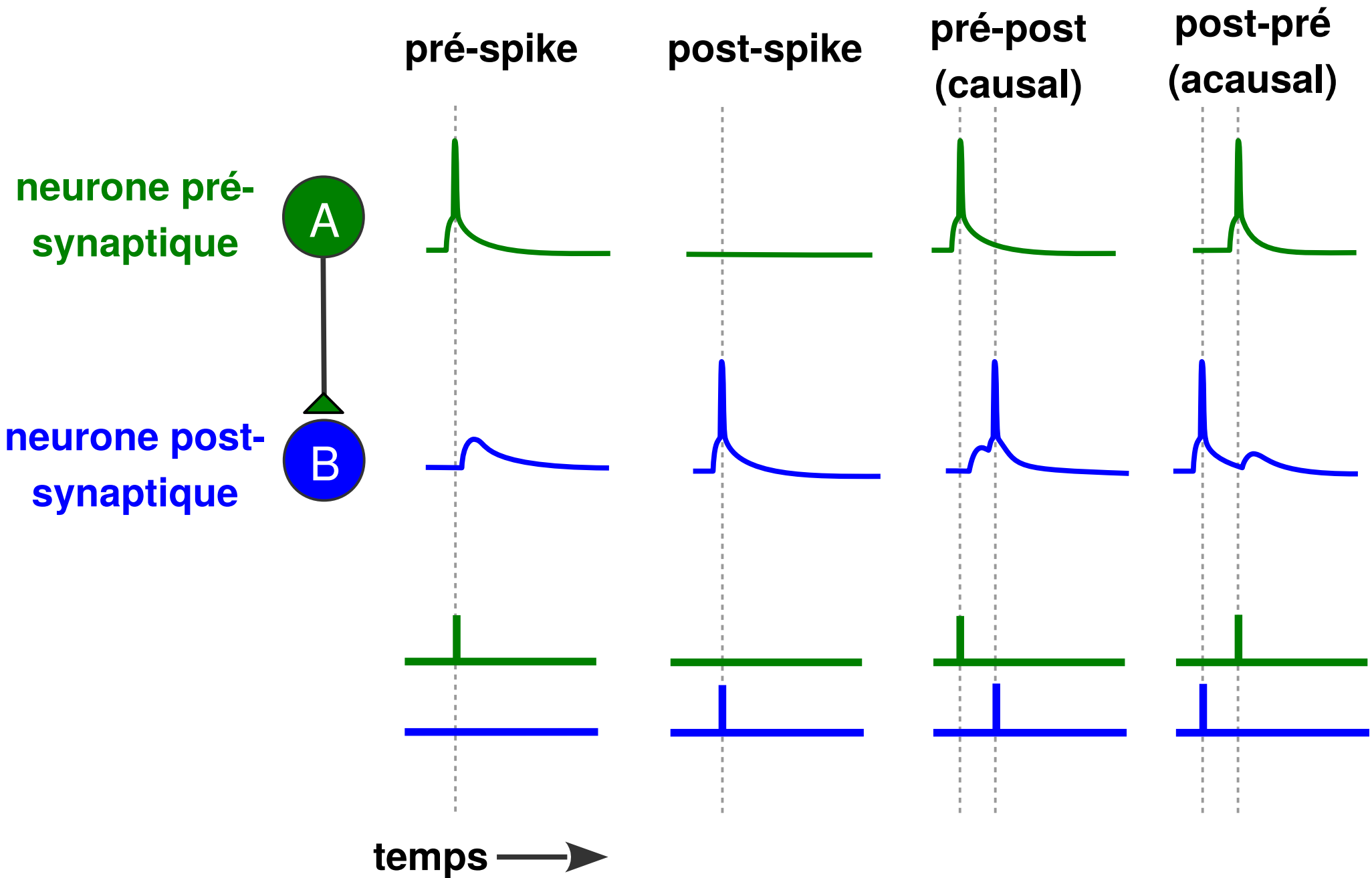


- changement durable (>60 min) en efficacité de transmission
- échelle de temps d'induction ~ 1 min

Timing du spike : nomenclature

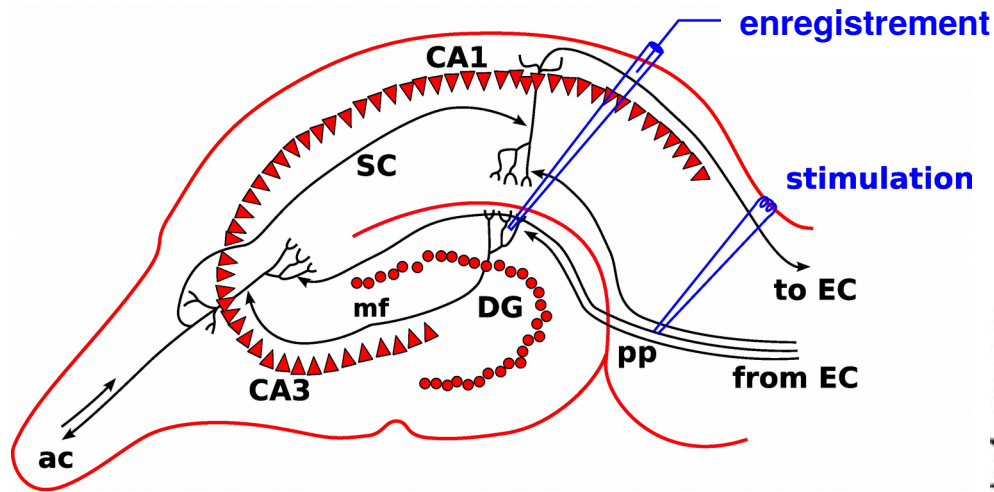


Timing du spike : nomenclature

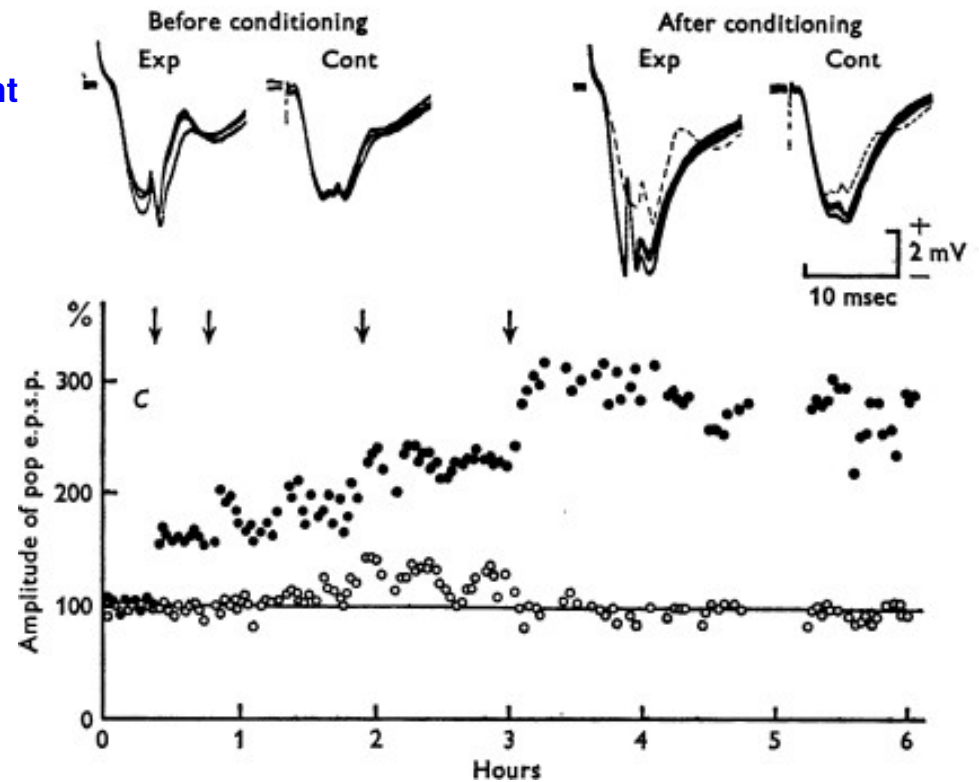


Induction: LTP par stimulation à haute fréquence

hippocampe (*in vivo*)



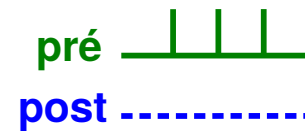
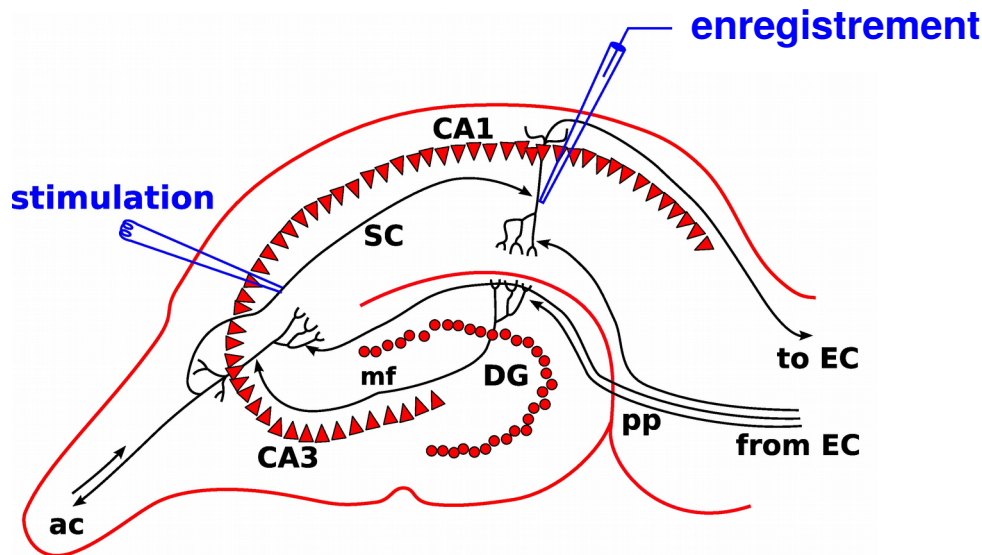
10-20 Hz pendant 10-15 sec
ou 100 Hz pendant 3-4 sec



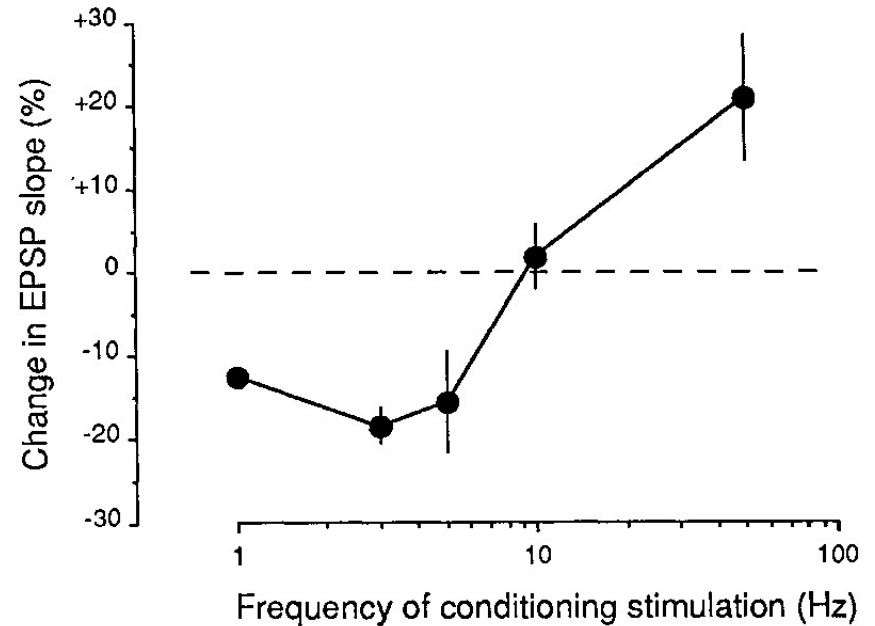
[Bliss and Lømo 1973]

Induction de plasticité: LTD obtenue à basses fréquences

hippocampe (tranches)



900 impulsions à 1-50 Hz

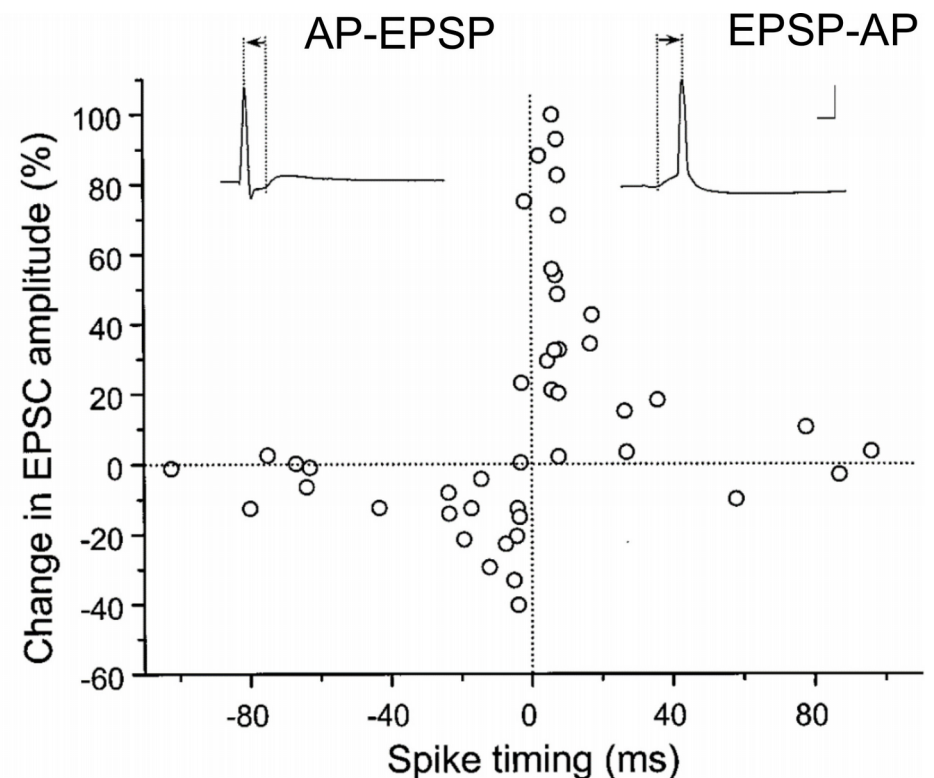
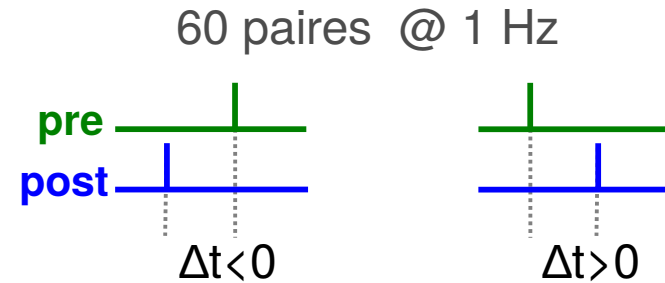
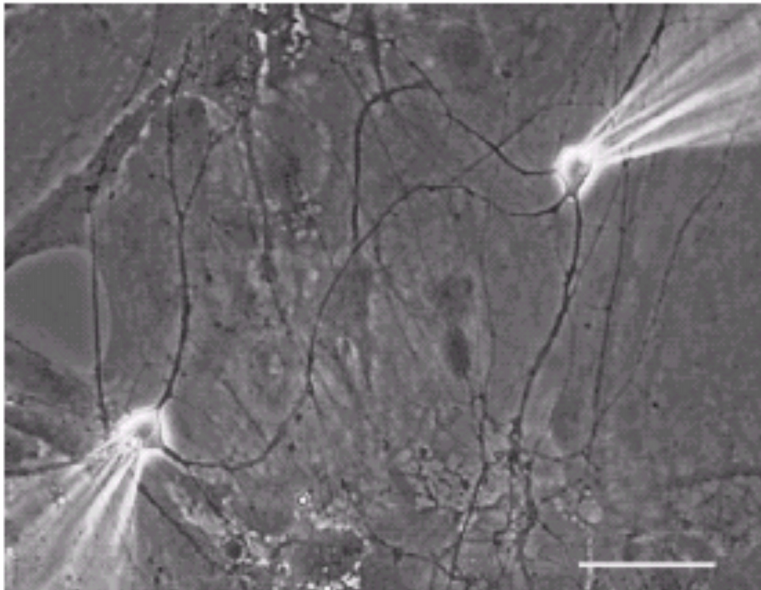


[Dudek and Bear 1992;
Dunwiddie and Lynch 1978]

STDP: plasticité à partir de paires de spikes simples

STDP : plasticité dépendante du moment du spike

cultures d'hippocampes



[Bi & Poo, J Neurosci 1998]

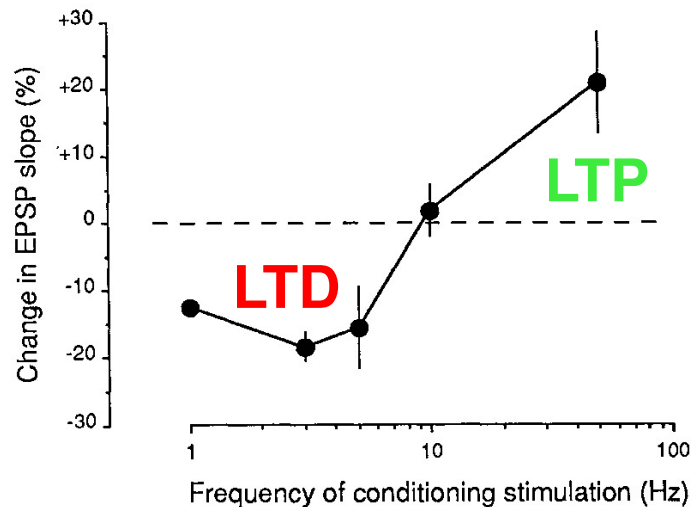
[Magee & Johnston 1997; Zhang et al. 1998; Markram et al. 1997; Sjöström et al. 2001; Feldman 200]

Plasticité dépend de la fréquence, du moment des spikes et combinaison

dépendante de la fréquence



900 impulsions à 1-100 Hz

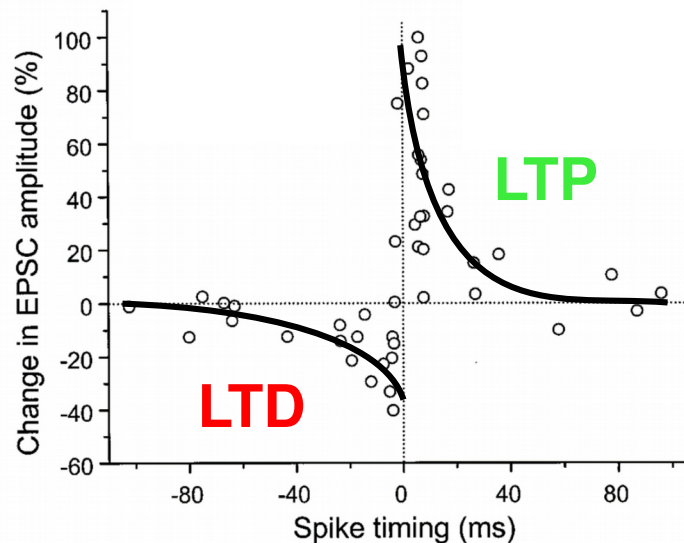


[Dudek and Bear 1992;
Dunwiddie and Lynch 1978]

dépendante du moment des spikes

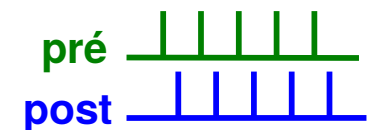


60 paires à 1 Hz

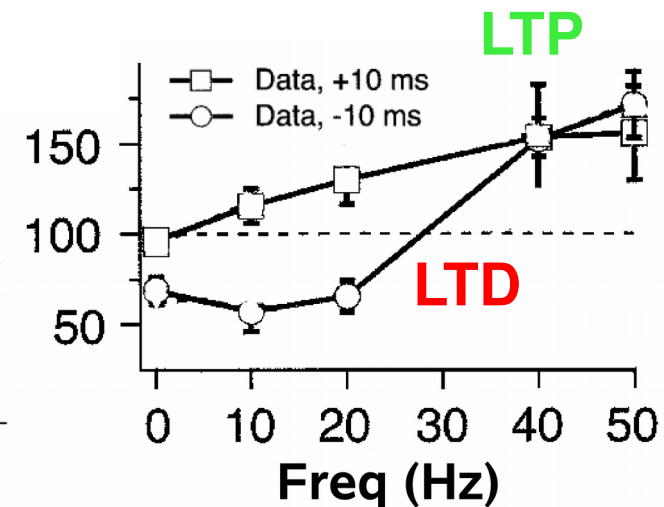


[Bi & Poo *J Neurosci* 1998]

et des combinaisons des deux

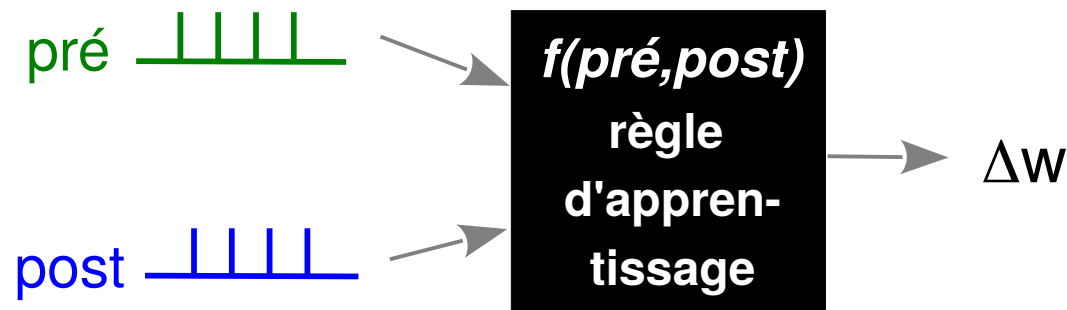
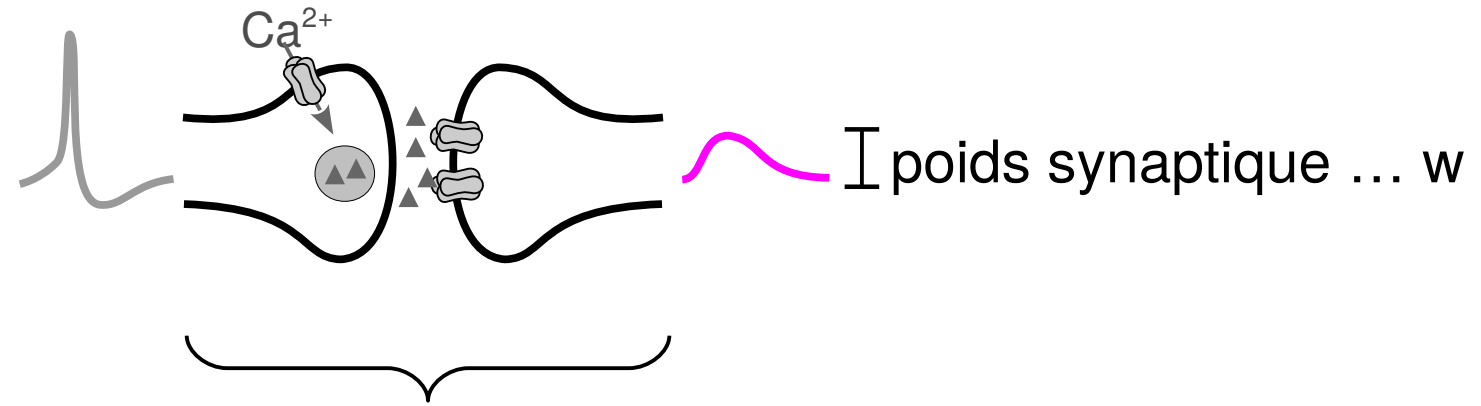


5 paires, 15x à 0.1 Hz



[Sjöström et al. *Neuron* 2001]

Modélisation: traduction des spikes vers les résultats de plasticité



Règles d'apprentissage phénoménologique : taux de décharge

- Règles basées sur le taux de décharge : $\Delta w_{ij} = f(r_i r_j)$

- Pur Hebbian :

$$f(r_i r_j) = r_i r_j$$

- Covariance (Sejnowski 1977) :

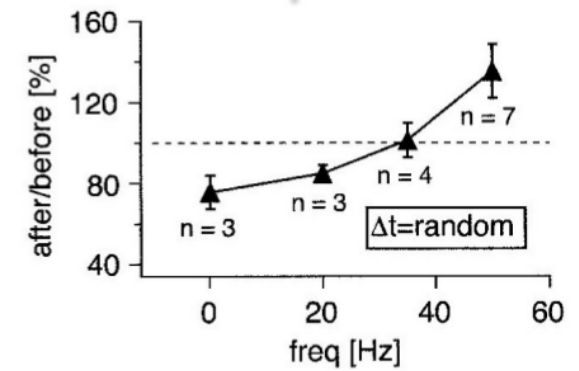
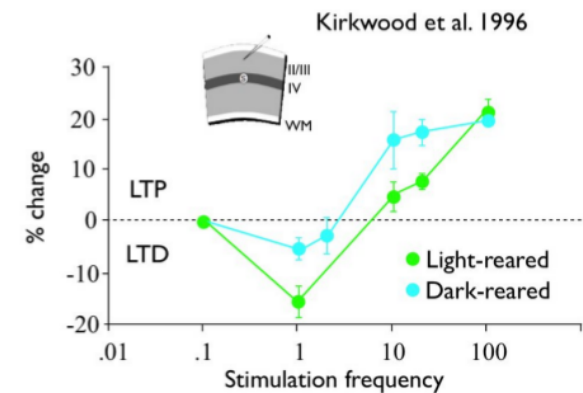
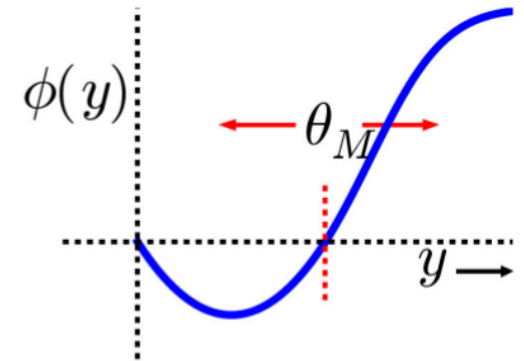
$$f(r_i r_j) = (r_i - \langle r_i \rangle)(r_j - \langle r_j \rangle)$$

- Bienenstock-Cooper-Munro (1982) :

$$f(r_i r_j) = r_i (r_i - \theta) r_j$$

$$\tau_\theta \frac{d\theta}{dt} = r_i^2 - \theta$$

→ seuil adaptatif (méta-plasticité) qui stabilise la règle d'apprentissage



Règles d'apprentissage phénoménologique - STDP

- Règles basées sur le moment du spike : $\Delta w_{ij} = f(\{t_{ik}\}, \{t_{jk}\})$

- STDP standard :

$$f(\{t_{ik}\}, \{t_{jk}\}) = \sum_{k, k'} F(t_{ik} - t_{jk'})$$

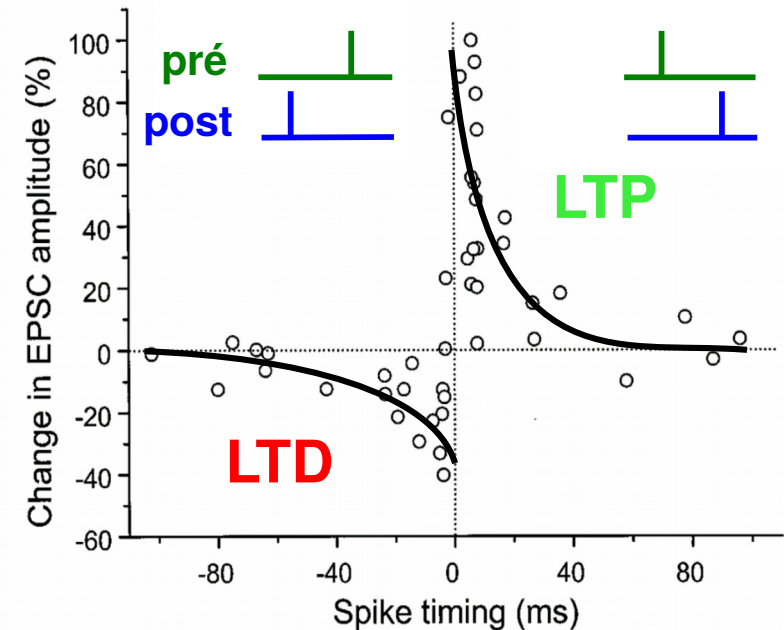
$$F(\Delta t) = \begin{cases} A_+ \exp(-\Delta t / \tau_+) & \Delta t > 0 \\ A_- \exp(-\Delta t / \tau_-) & \Delta t < 0 \end{cases}$$

- Variantes de la règle:

* Additif/multiplicatif

* Toutes les paires de spikes / voisins les plus proches

- **Problèmes** : pas dépendant du taux de décharge
ne résout pas les non-linéarités de plasticité



Modélisation récente de la plasticité

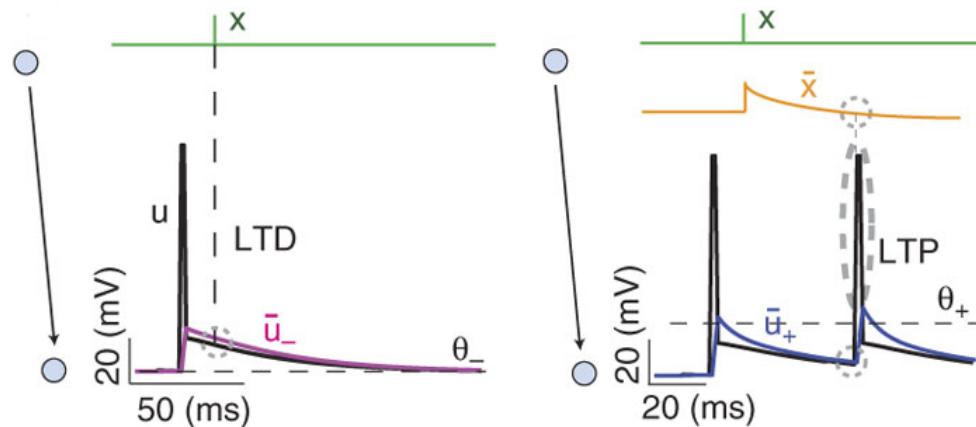
Modèle basé sur les triplets

[Pfister & Gerstner, 2006;
Clopath et al., 2010]



Modèle basé sur le potentiel

[Clopath et al., 2010]



Modèle basé sur le calcium

[Shouval et al. 2002, Graupner & Brunel 2012]

