

Modèles dynamiques de mémoire

bruno.delord@upmc.fr

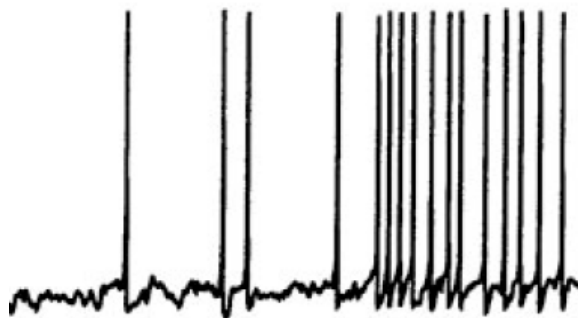
Positionnement

Mémoire dans le système nerveux

Information

Etat d'un système : X

Potentiel membranaire, état moléculaire

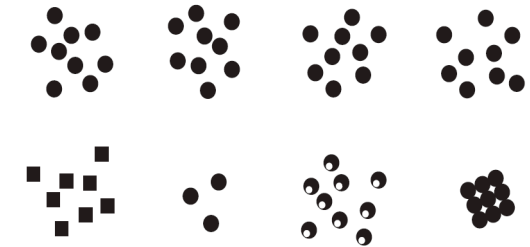


Approche

Niveaux moléculaire, cellulaire, réseau

Systèmes dynamiques

$$dX / dt = F(X)$$



Apprentissage

Modification (ou apparition) d'un comportement (d'une capacité)

Plasticité

Modification de la structure neuronale (p.e. canaux ioniques)

Dépendants de l'expérience (activité neuronale)

Mémoire

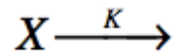
Stockage, maintien, rappel

Indépendant

Type de mémoire, logique d'apprentissage

Mémoire passive comme oubli lent

Processus de disparition d'une quantité



K : constante cinétique
 Probabilité d'évènements unitaires
 (rencontre, réaction, ...)

$$dX / dt = -KX$$

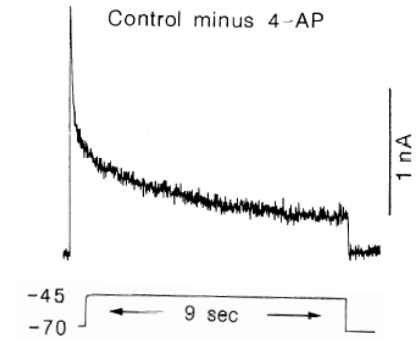
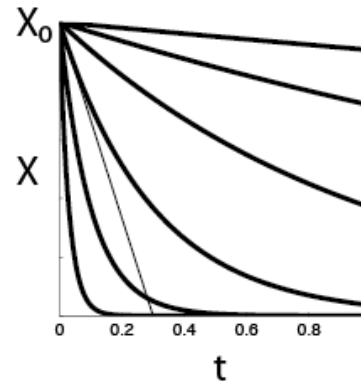
$$X = X_0 \exp(-t / \tau)$$

Constante de temps $\tau = 1 / K$

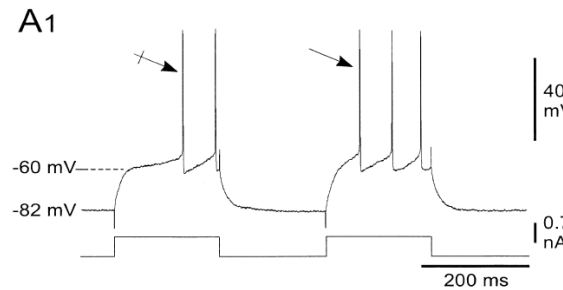
Environnements tortueux
 Réaction de faible propension

$$\downarrow K \rightarrow \uparrow \tau$$

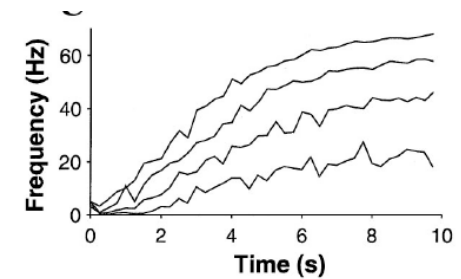
Mémoire à court terme / oubli
 Intégration temporelle des entrées
 Contrôle vitesse anticipation



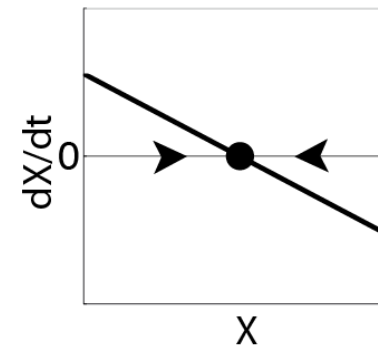
McCormick, 1991



Mahon et al., 2000



Delord et al., 2000



Mémoire à long-terme et turn-over moléculaire

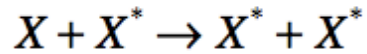
Fraction d'une molécule X altérée (X^*)

Turn-over $X \rightarrow \emptyset, X^* \rightarrow \emptyset$

Renouvellement $\emptyset \rightarrow X$

Bilan $[X] = C, [X^*] \rightarrow 0$

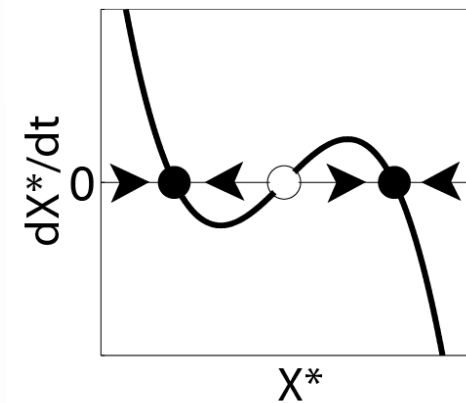
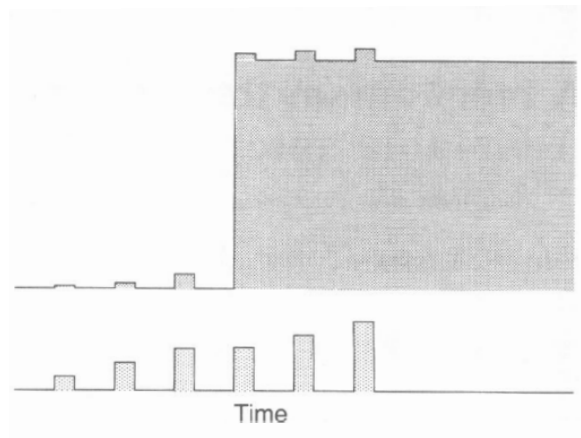
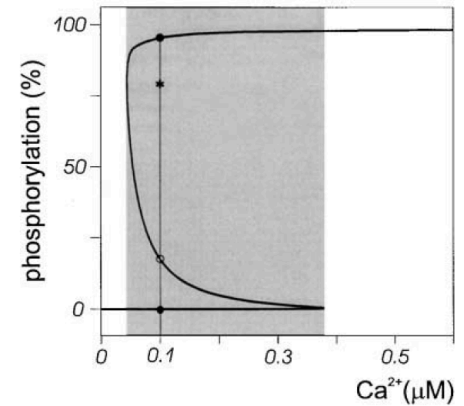
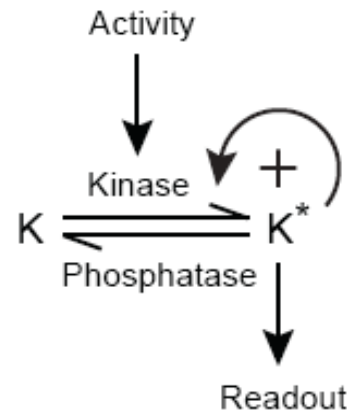
Réaction mnémogénique



(Crick, 1984; Sweatt, 2003)

Auto-phosphorylation de la CamKII
(Lisman, 1985; Zhabotinsky, 2000;
Graupner et Brunel, 2007)

Feedback > 0 non-linéaire
MAPK,
translocation AMPA,
système mTOR



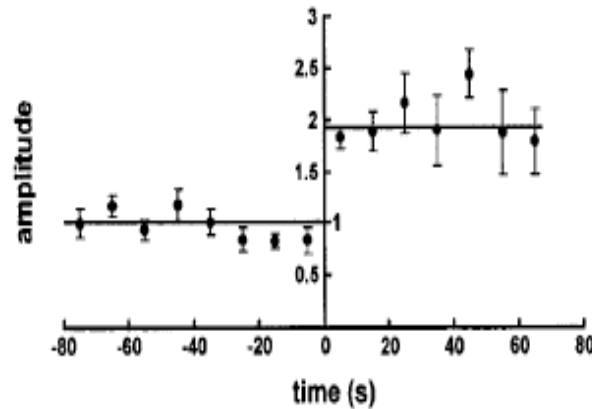
Propriétés et limites de la bistabilité

Propriétés

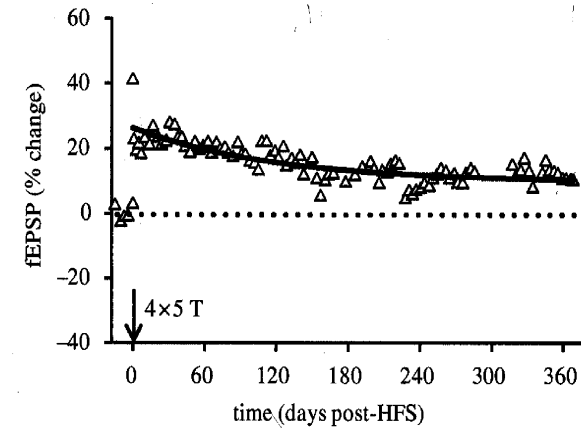
Mémoire binaire

1 bit/synapse

Durée infinie : pas d'oubli



Petersen et al., 1998



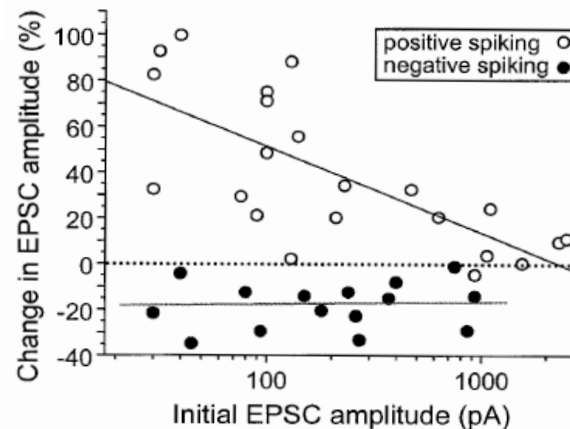
Abraham, 2003

Limites

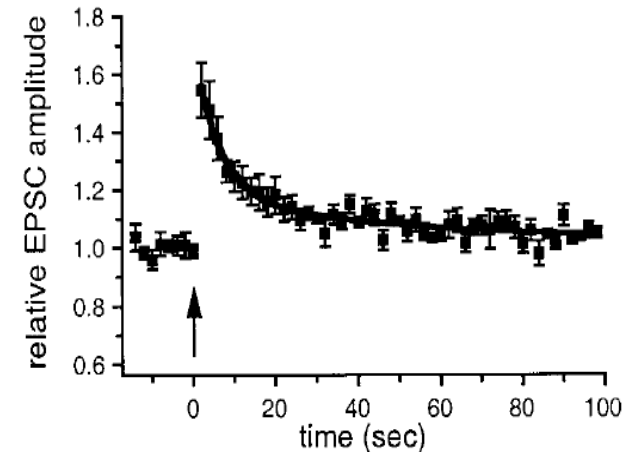
Induction très lente
relativement
in vitro/in vivo

Maintien valeurs gradées

Maintien court-terme



Bi and Poo, 2001

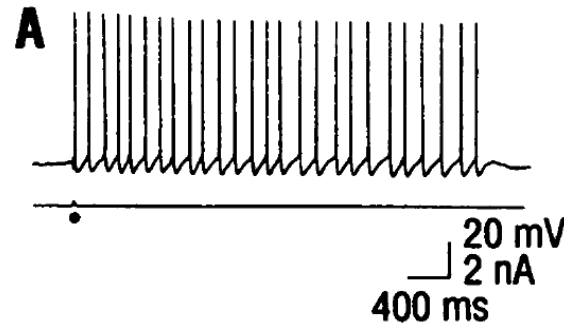


Hempel et al., 2002

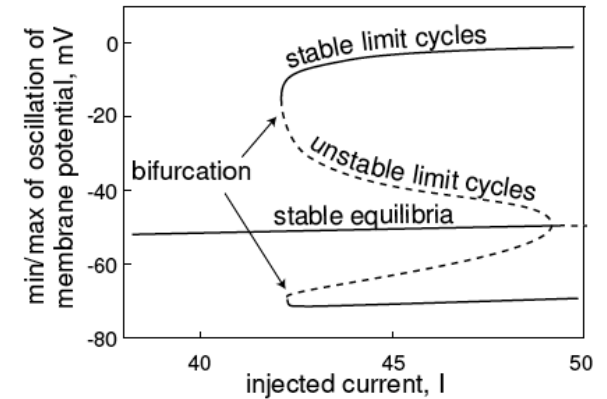
Bistabilité et mémoire à court-terme

Bistabilité point fixe / cycle limite

Bifurcation Hopf sous-critique
+
bifurcation fold



Silva et al., 1991



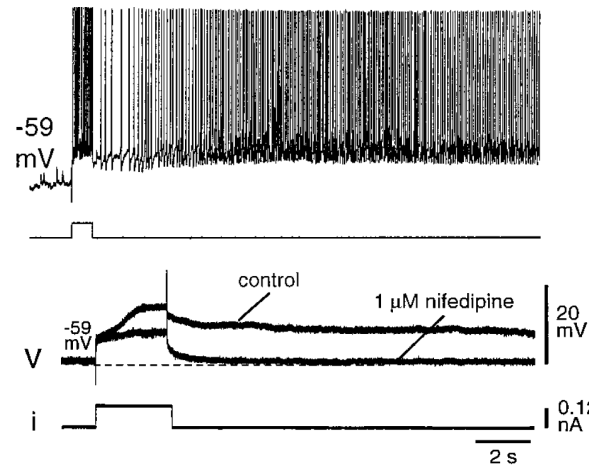
Izhikevitch, 2006

Bifurcation homocline
(« at regular saddle »)

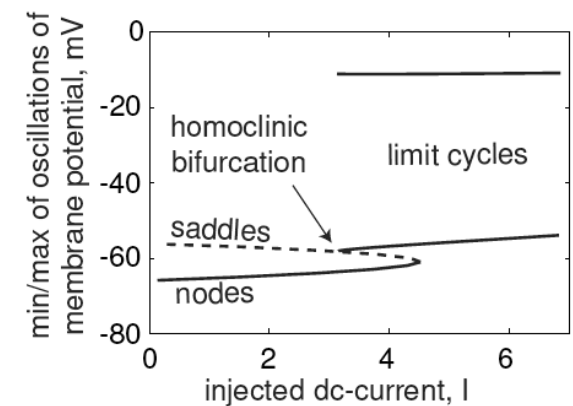
Bistabilité de points fixes

« Plateaux » de potentiel membranaire

Mémoire à court-terme
Maintien d'activité constante
Durée infinie



Morisset and Nagy, 1999

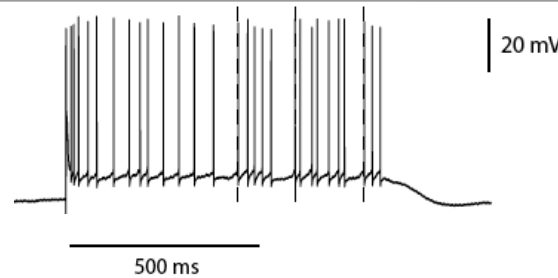


Izhikevitch, 2006

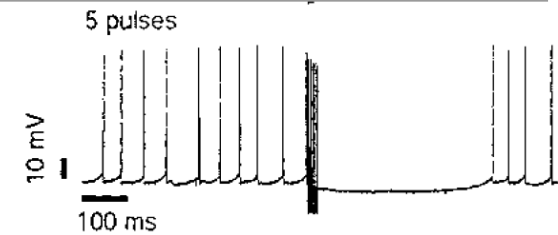
Plateaux et vallées

Dépolarisations/ hyperpolarisations

Durée finie



Rokni and Yarom , 2009

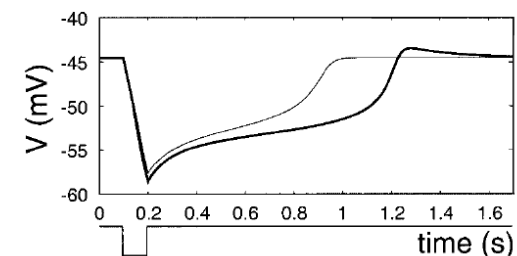
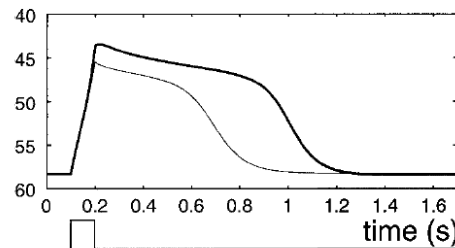


Kreiner and Jaeger, 2003

Cellules de Purkinje (cervelet),
Motoneurones, ...

Proximité d'une zone de bistabilité

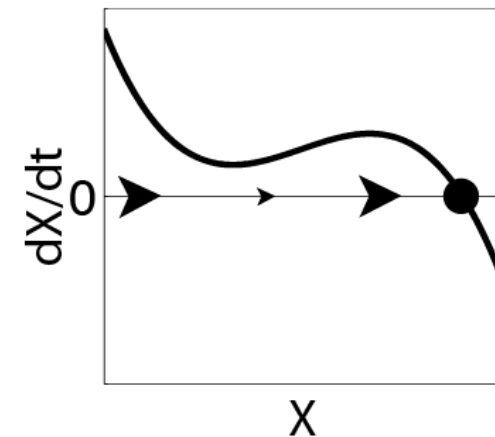
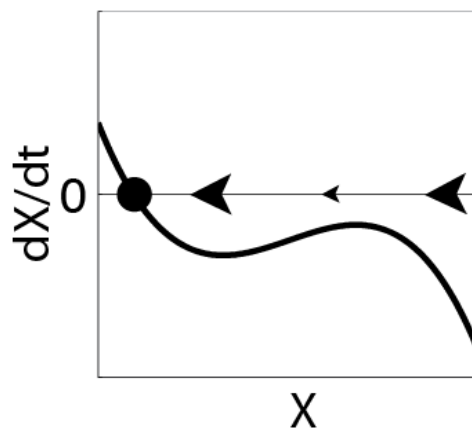
→ Vitesses faibles



Genet and Delord, 2002

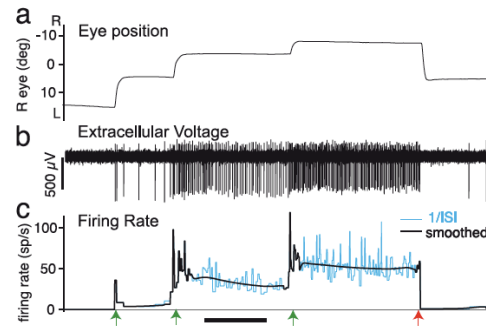
Symétrie plateaux/vallées

Mémoire à court-terme
Amplitude constante
Contrôle de durée par niveau
de stimulation de base (contexte)



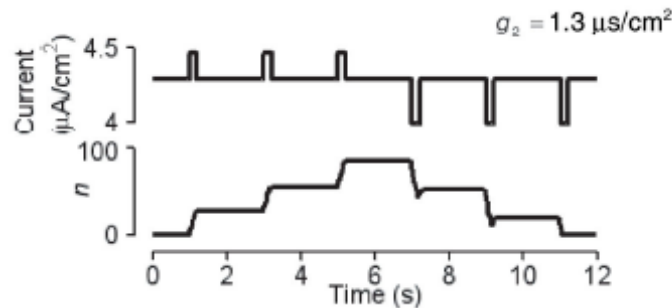
Multi-stabilité

Multi-stabilité en réseau
 Intégration des informations
 Contrôle occulo-moteur
 Mémoire de travail paramétrique

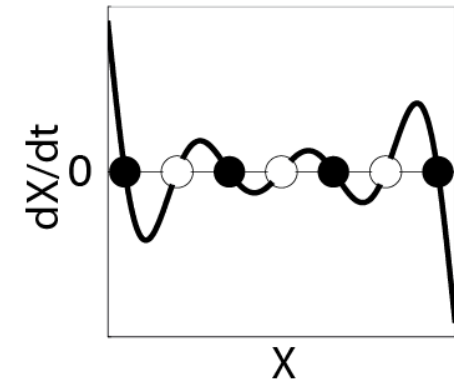


Major et al., 2004

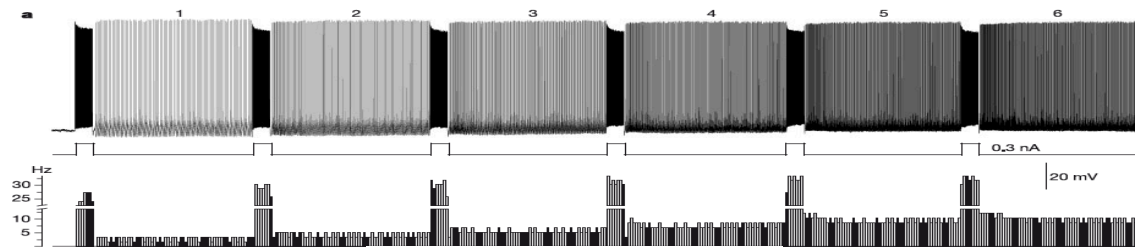
Modèles de réseaux
 Line attractors
 Tuning fin
 (poids synaptiques)
 Bistabilité unités locales
 (dendrites, réseaux)



Koulakov et al., 2002



Neurones individuels
 Modèles phénoménologiques
 (dérivée nulle, τ élevée)
 Origine ?



Egorov et al., 2002

4 s

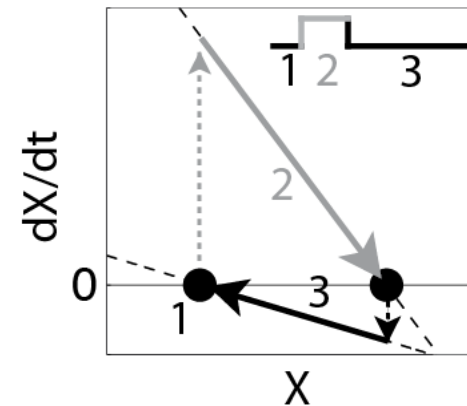
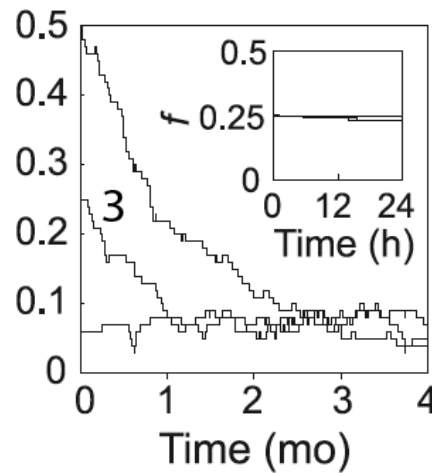
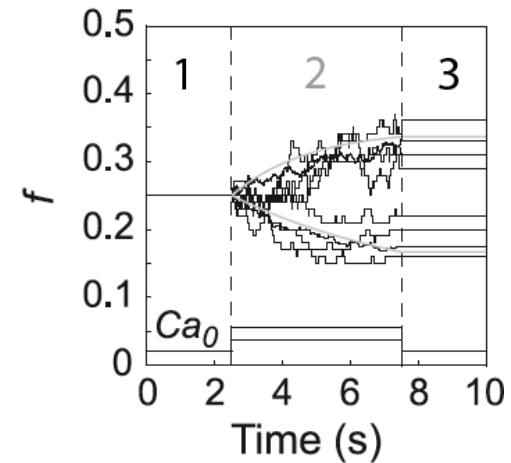
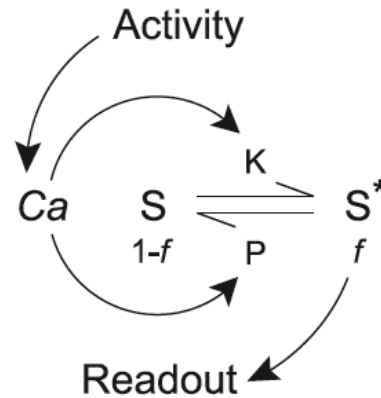
Pseudo-stabilité

Limites modèles bistables
 Rôle maintenance ?(CaMKII)
 Absence de gradation
 Durée infinie

Cycles KP
 dépendants de l'activité(aKP)
 Ubiquité

Gradation (~line attractor)
 1-5 bits

Contrôle de τ / activité
 τ (appr.) ~ 1 s
 τ (mém.) ~ 1 mn-100 ans



Le paradoxe du palimpseste

Parchemin effacé au fur et à mesure de la (ré)écriture

Problème

Dilemme stockage / maintien

Fusi, Drew et Abbott (2005)

Dégradation de mémoire

Face événements de plasticité à taux r (s^{-1})

Architecture en cascade

Etat binaire de conductance (bistabilité)

+

n niveaux de profondeur (probabilités \downarrow)

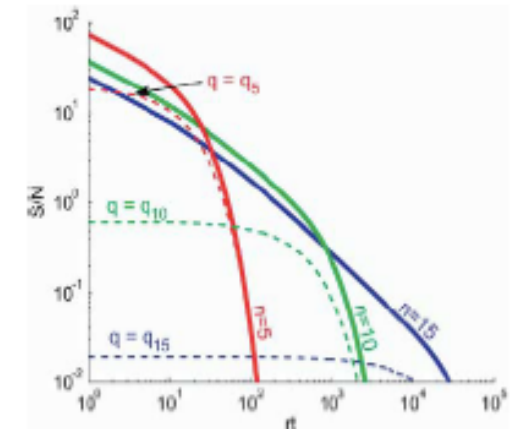
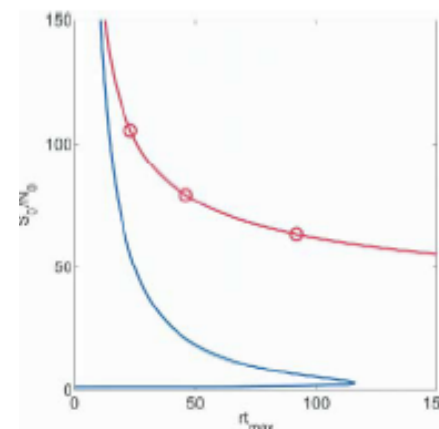
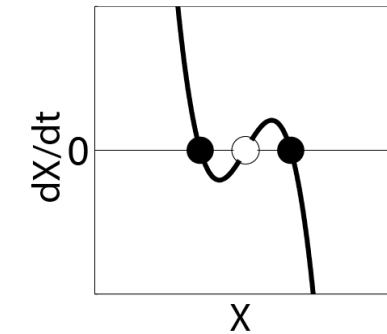
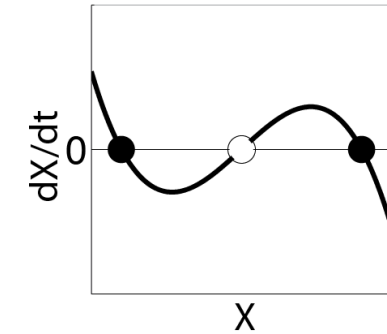
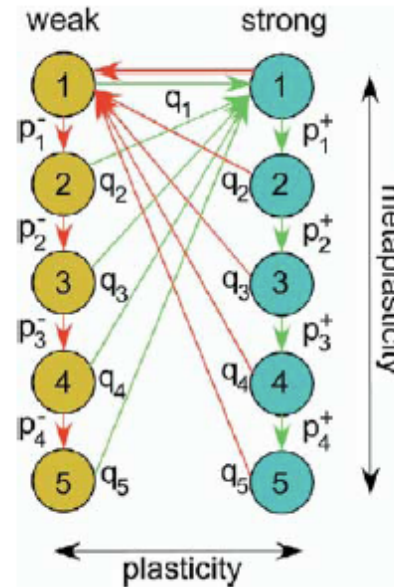
Mémoire

$$S/N \propto t^{-k}$$

lent / décroissance exponentielle

$$n > 10$$

Plausibilité biologique ?



Mémoire et réseau de neurones

Activité neuronale

$$X_i(T+1) = H\left(\sum_j W_{ji}(T) X_j(T) - \theta_i\right)$$

Poids synaptiques

$$W_{ji}(T)$$

Plasticité synaptique

$$W_{ji}(T+1) = \lambda W_{ji}(T) + P_{ji}(T)$$

$$P_{ji}(T) = \alpha X_j(T) X_i(T)$$

(oubli passif + p.e. plasticité Hebbienne)

$$W_{ji}(T) = \lambda^T W_{ji}(1) + \sum_{t=1}^T \lambda^{T-t} P_{ji}(t)$$

Terme dépendant de l'histoire du neurone
→ différentiation des structures et des propriétés
(Interaction environnement+ plasticité)

