

# Champs de neurones

## Sciences Cognitives, Master 2 Recherche

Nicolas P. Rougier

INRIA  
Institut National de Recherche  
en Informatique et Automatique

Nancy, Novembre 2011

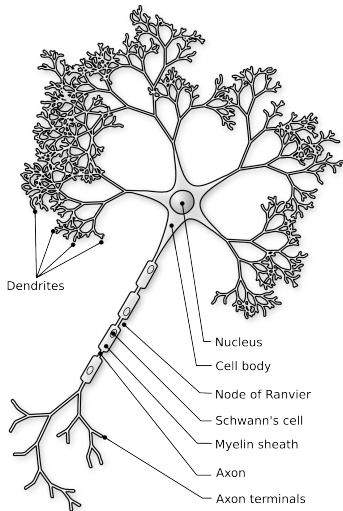
# Plan

- ① Des impulsions aux populations
- ② Le lien avec la cognition
- ③ Champ de neurones
- ④ Etude de la cognition

# Des impulsions aux populations

# Le neurone biologique

- Un neurone est une cellule excitable qui peut transmettre de l'information via des connections (synapses) à d'autres neurones.
- Il existe plusieurs types de neurones (pyramide, panier, Purkinje, etc.) avec différentes fonctions (sensoriels, moteurs, interneurones, etc.)
- Les neurones sont connectés et forment des réseaux.



# Le cerveau humain

- Le cerveau humain comprends entre 50 to 100 milliards de neurones (à peu près)
- Le nombre moyen de connexions pour un neurone est estimé à 10 000.
- $1\text{mm}^3$  de cortex  $\approx$  1 milliard de connexions



# Différents type modèles de neurones

## Modèles biophysiques

Modèles très détaillés cherchant à modéliser finement les processus biologiques.

- Intègre et tire
- Intègre et tire à fuite
- Hodgkin-Huxley
- FitzHugh-Nagumo

## Modèles connectionistes

Modèles simplifiés cherchant à résoudre des problèmes (via apprentissage).

- Perceptron multi-couches
- Réseaux de Hopfield
- Cartes de Kohonen

## Modèles cognitifs

Modèles computationnels qui cherchent à comprendre la cognition.

- PDP++/Emergent (Parallel Distributed Processing)
- NEST

# Modèles biophysiques: Hodgkin Huxley

(Hodgkin Huxley, 1952)

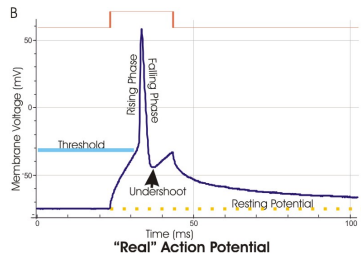
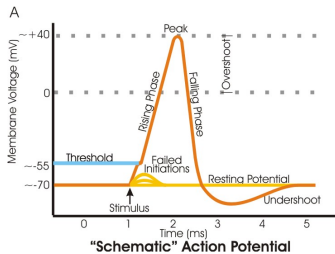
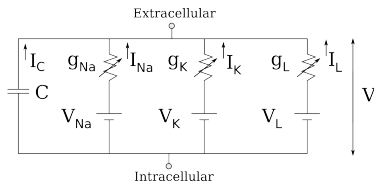
Le modèle de Hodgkin-Huxley est un modèle basé sur la conductance où le potentiel de membrane  $I_m(t)$  est décrite à l'aide des équations suivantes:

$$I_m(t) = I_C + I_{ionic}$$

$$I_C = C_m dV(t)/dt$$

$$I_{ionic} = I_{Na} + I_K + I_L$$

$$= g_{Na}(V)[V(t) - V_{Na}] \\ + g_K(V)[V(t) - V_K] \\ + g_L(V)[V(t) - V_L]$$



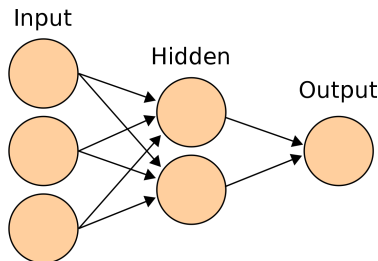
# Modèles connectionnistes: le perceptron multi-couche

(Le Cun, 1985), (Rumelhart et al., 1986)

La sortie scalaire  $y$  d'un neurone est une fonction pondérée ( $w_i$ ) des entrées.

$$(x_i): y = \varphi \left( \sum_{i=0}^n w_i x_i \right)$$

- Réseau "feedforward"
- Apprentissage via la rétro-propagation du gradient
- Approximateur universel



Reconnaissance de la parole ou des images, classification, approximation de fonctions, prediction, etc.

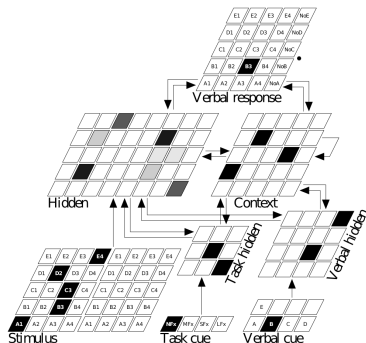


# Modèles computationnels: PDP++

(McClelland & Rumelhart, 1986), (O'Reilly, 2001)

PDP++ promeut une approche parallèle et distribuée et considère plusieurs principes comment les règles de propagation, d'activation, d'apprentissage, etc.

- Un modèle du cortex préfrontal qui peut expliquer le contrôle cognitif
- Apprentissage basé sur l'erreur
- Apprentissage basé sur la récompense



(Rougier et al., 2005)

# Des impulsions aux populations

## Quelle approche pour l'étude de la cognition ?

- Les modèles biophysiques sont difficiles à maîtriser avec de larges populations  
→ Projet "blue brain" <http://bluebrain.epfl.ch/>
- Les modèles connexionnistes sont orientés vers l'apprentissage automatique  
→ La plausibilité biologique n'est pas la préoccupation première
- Les modèles cognitifs peuvent être trop statiques  
→ L'incarnation exige des modèles réellement dynamiques

## Comment alors faire le lien avec la cognition ?

## Le lien avec la cognition

# Le lien avec la cognition

(Schöner, 2008)

Les mêmes principes qui gouvernent les processus de bas-niveau continuent à fonctionner au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ceux-ci.

La compréhension de la cognition ne peut donc être séparée de la compréhension

- des processus sensori-moteurs
- de l'immersion des modèles dans des environnements réels
- de l'historique comportemental du système

# Le principe de continuité

(Schöner, 2008)

## Espace continu

Il n'y a pas trace au niveau comportemental et cognitifs des discontinuités du codage neural.

- Les processus cognitifs sont basés sur des dimensions continues (sensorielles et motrices)
- Des catégories discrètes émergent de ce continuum

## Temps continu

La nature discrète des impulsions ne passe pas à l'échelle du comportement.

- Les processus cognitifs sont temporellement continus
- Des états stables existent dans ce continuum

# La malédiction de l'homoncule

## L'homoncule

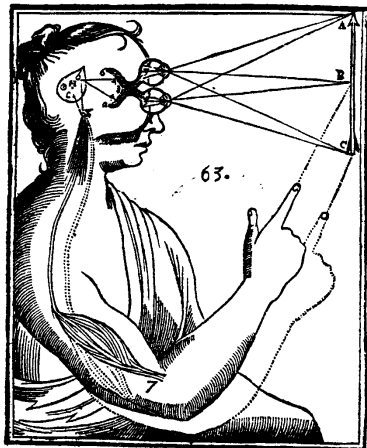
Pour Descartes, l'esprit immatériel contrôle le corps

## Le coordinateur central

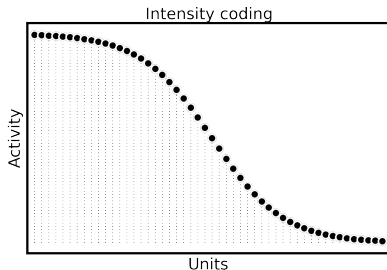
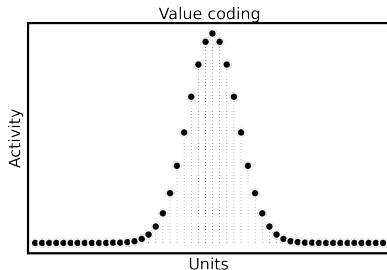
Baddeley & Hirsh, 1974 ont proposé un modèle de la mémoire de travail contrôlée par un coordinateur central.

## Le superviseur central

Le perceptron multi-couche ou bien les cartes de Kohonen requièrent l'intervention d'un superviseur pour coordonner les activités.



# Encodage neural



- Le codage en valeur se définit par une réponse maximale pour une valeur donnée.  
→ (Georgopoulos et al., 1982)
- Le codage en intensité se définit comment une variation monotone d'activité.  
→ (Ballard, 1986; Guigon, 2003)

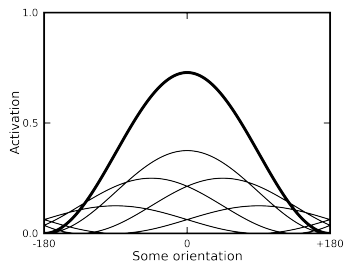
# codage en population

## Coage grossier

- Les neurones corticaux semblent réglés sur une large gamme de valeurs.
- L'information est échantillonnée de façon très large.

## Modèle additifs

Distribution de l'activité d'une population = somme des activités individuelles modulée par leur courbe de réponse respective.

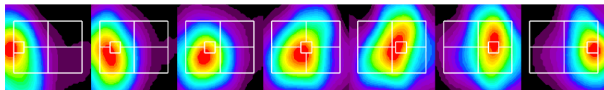




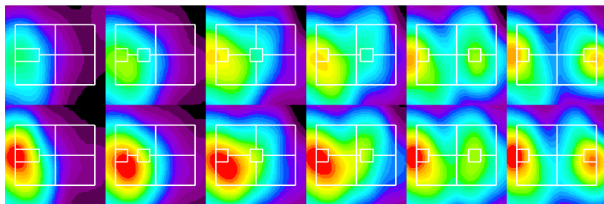
# Quelques faits biologiques

Enregistrement dans l'aire visuelle A17 du chat (Jacker et al. 1999).

Evolution temporelle de l'activité



Interaction entre deux stimuli



# Champ de neurones

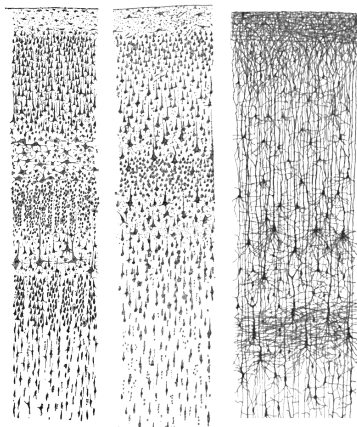
# Le cortex cérébral

## Structure laminaire

- Couche moléculaire layer I
- Couche granulaire externe II
- Couche pyramidale externe III
- Couche granulaire interne IV
- Couche pyramidale interne V
- couche multiforme VI

## Structure régulière

- Mini colonnes
- Hyper colonnes
- Modules corticaux



Figures par Santiago Ramon y Cajal  
(1852-1934)

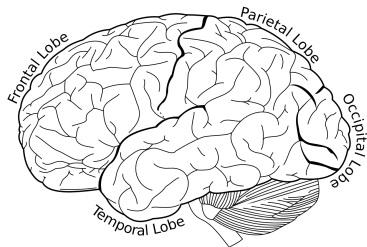
# Le cortex cérébral

## Structure topographique

- Frontal
- Occipital
- Pariétal
- Temporal

## Structure modulaire

- Aires sensorielles (V1, A1, etc.)
- Aires motrices (M1, SM1, etc.)
- Aires associatives



# Analogies avec les gaz

La température est une grandeur physique qui peut se définir comme une mesure de l'agitation thermique des particules au point d'équilibre thermique.

## Modélisation complexe

- Modélisation de l'ensemble des particules
- Mesure des mouvements individuels
- Moyennage et extraction de la température

## Modélisation simple

Supposons que l'on possède un thermomètre...

# Une brève histoire des champs de neurones

- 1956 R.L. Beurle, "Properties of a mass of cells capable of regenerating pulse", *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 240:55–94.
- 1972 H.R. Wilson and J.D. Cowan, "Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons", *Biophysical Journal* 12:1–24.
- 1973 H.R. Wilson and J.D. Cowan, "A mathematical theory of the functional dynamics of nervous tissue", *Kybernetik* 13:55—80.
- 1977 S.I. Amari, "Dynamics of pattern formation in lateral-inhibition type neural fields", *Biological Cybernetics*, 27:77–87.
- 1999 J.G. Taylor "Neural 'bubble' dynamics in two dimensions: foundations", *Biological Cybernetics*, 80:393–409.

# Champs de neurones dynamiques

## Définition

Les champs de neurones sont des macro-modèles qui décrivent l'évolution spatio-temporelle de variables telles que le taux de décharge moyen d'une population de neurones.

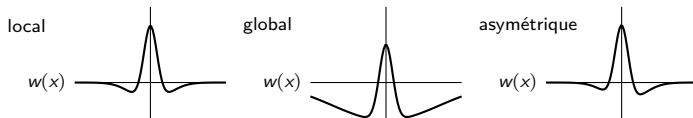
## Equation

Soir  $u(x, t)$  le potentiel de membrane d'un neurone à une position  $x$  au temps  $t$ ,  $f$  une fonction de transfert et  $w$  un noyau d'interaction latéral. L'évolution de  $u(x, t)$  est donné par:

$$\underbrace{\tau}_{\text{constante de temps}} \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \underbrace{-u(x, t)}_{\text{affaiblissement}} + \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} w(y) f(u(x - y, t - \frac{|y|}{v})) dy}_{\text{interactions latérales}} + \underbrace{l(x)}_{\text{entrée}} + \underbrace{h}_{\text{seuil}}$$

# Champs de neurones dynamiques

## Exemples de noyaux



## Comportement dynamique

Dans le cas général, les DNF sont difficiles à étudier d'un point de vue mathématique. En 1977, S.I. Amari publia un article fondateur du domaine pour le cas unidimensionnel et en 1999, J.G. Taylor étendra ces résultats aux autres dimensions.

- Motifs spatio-temporels périodiques.
- Régions localisées d'activité (bulles)
- Vagues



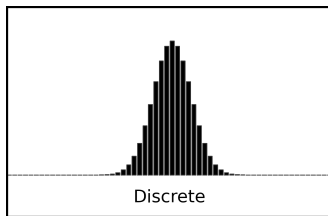
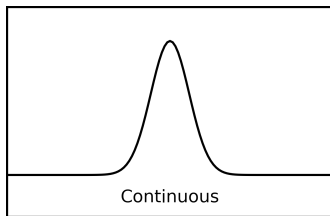
# Champs de neurones dynamiques

De la théorie mathématique continue...

$$\tau \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = -u(x, t) + \int_{-\infty}^{+\infty} w(y) f(u(x - y, t - \frac{|y|}{v})) dy + I(x) + h$$

... au monde numérique discret

$$\tau \frac{\Delta u(x, t)}{\Delta t} = -u(x, t) + \sum_{i=1}^{i=n} w(y) f(u(x - y, t)) \Delta y + I(x) + h$$



# Etude de la cognition

# Approche computationnelle

(Marr, 1982)

“Trying to understand perception by studying only neurons is like trying to understand bird flight by studying only feathers: It just cannot be done. In order to understand bird flight, we have to understand aerodynamics; only then do the structure of feathers and the different shapes of birds' wings make sense.”

David Marr, 1982

# Approche computationnelle

(Marr, 1982)

## Niveau computationnel

- Quel est le but du calcul ?
- Pourquoi est-ce approprié et quelle est la logique derrière

## Niveau algorithmique

- Comment implanter ce calcul ?
- Quelles sont les représentations des entrées et des sorties ?
- Quel est l'algorithme permettant la transformation ?

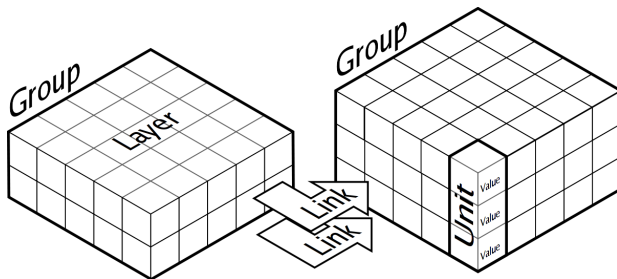
## Niveau mécanique

- Quels sont les mécanismes nécessaires ?
- Comment instancier physiquement représentations et algorithme ?

# Calculs distribués, numériques, asynchrones et adaptatifs

<http://dana.loria.fr>

L'idée est de considérer les neurones au niveau de la population et de prendre comme unité de décision un groupe de neurone dont les activités sont corrélées (bulle).



Le paradigme computationnel de DANA est donc fondé sur la notion d'unité qui est un ensemble de valeurs scalaires qui peuvent varier dans le temps sous l'influence des autres unités et de l'apprentissage. Chaque unité peut-être connectée avec n'importe quelle autre unité (y compris elle-même) via un lien pondéré. Un groupe est un ensemble d'unités homogènes.

# Calculs distribués, numériques, asynchrones et adaptatifs

<http://dana.loria.fr>

## 4 propriétés principales

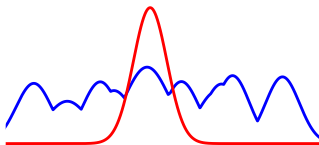
- Distribué → Par de superviseur
- Asynchrone → Pas d'horloge
- Numerique → Pas de symboles explicites
- Adaptatif → Apprendre quelque chose

## Incarnation

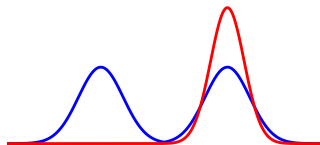
Un modèle doit être incarné dans un corps en interaction avec le monde réel afin que des propriétés puissent émerger de cette interaction.

# Nouveau regard sur les champs de neurones

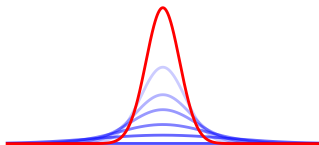
Quelques propriétés



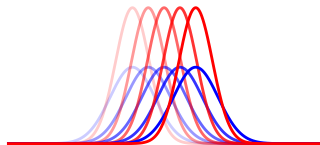
Contraster



Sélection



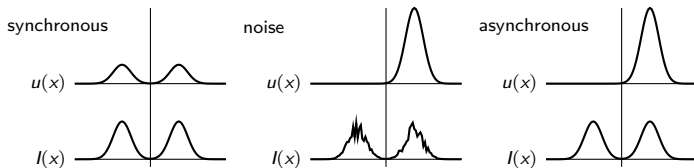
Mémoire



Suivi

# Conclusion

Comment le système prend-il une décision ?





# Bibliographie

- Wilson, H. and Cowan, J. (1972). *Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons*. Biophysical Journal 12, 1-24.
- Amari, S. (1977). *Dynamic of pattern formation in lateral-inhibition type neuralfields*. Biological Cybernetics 27, 77-88.
- Taylor, J. (1999). *Neural bubble dynamics in two dimensions: foundations*. Biological Cybernetics 80, 5167-5174.
- Rougier, N.P. and Vitay, J. (2006). *Emergence of Attention within a Neural Population*, Neural Networks 19, 573-581.

Un introduction aux champs de neurones dynamiques (Schöner & Spencer):

→ <http://www.uiowa.edu/delta-center/research/dft/index.html>