

Neurosciences Computationnelles : CM1 Introduction



Michael Graupner
(michael.graupner@parisdescartes.fr)

À quoi sert le cerveau ?



Arbre
pas de neurones

C.elegans
302 neurones

Mouche
1 000 000 neurones

Rat
1 000 000 000 n.

Humain
10 000 000 000 000 n.

Le cerveau génère des mouvements
(=comportement)

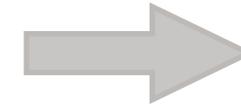
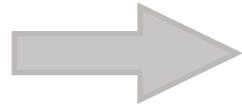
Les cerveaux plus complexes
génèrent une plus grande
variété de comportements

Les cerveaux plus complexes
peuvent apprendre plus de
comportements



Traitement cognitif

stimulus



réponse

En quoi le cerveau est bon ?

			
échecs	1	:	0
scrabble	1	:	0
Jeopardy!	1	:	0
jeux vidéo	1	:	0
Go	1	:	0
Reconnaissance d'objet	1	:	1

Les ordinateurs surpassent les cerveaux dans les tâches impliquant l'exploration de bases de données et d'algorithmes.

En quoi le cerveau est bon ?

Lionel Messi – Barcelona : Getafe CF 2007



En quoi le cerveau est bon ?

RoboCup 2016



En quoi le cerveau est bon ?



foot



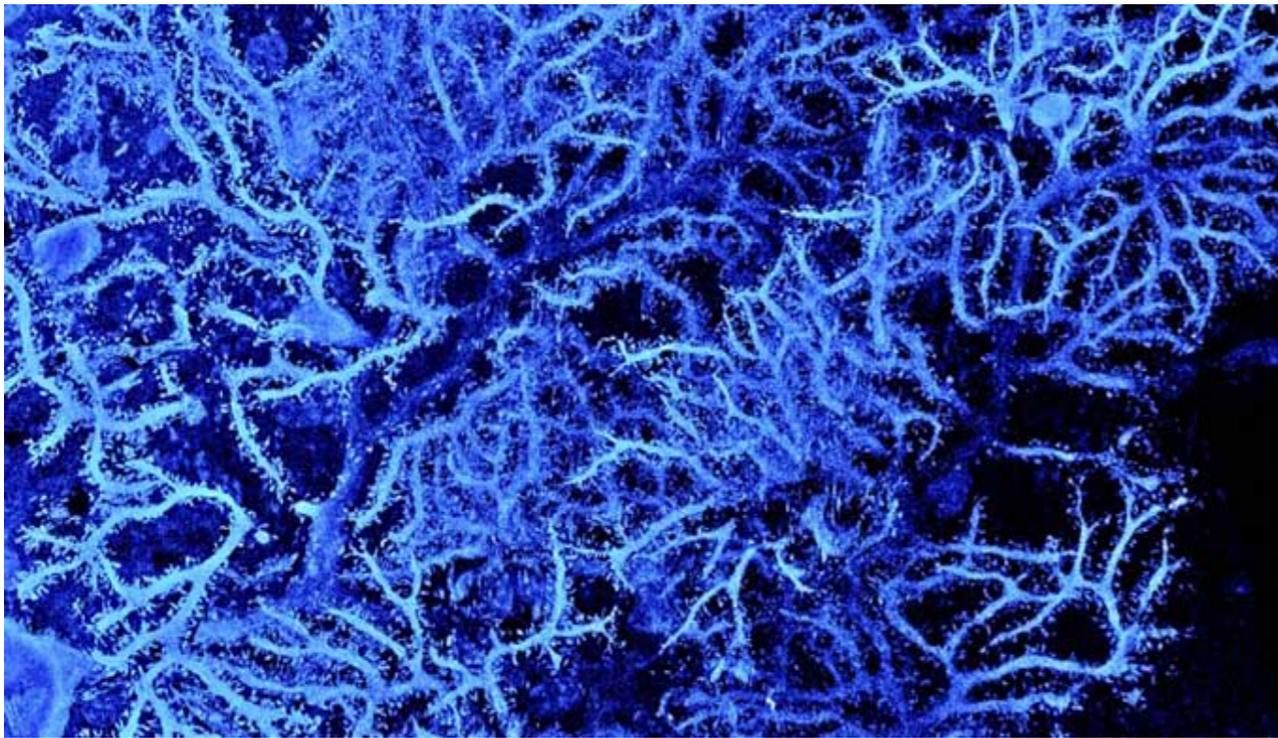
0 : 1

nombreuses
tâches

0 : 1

Les cerveaux sont meilleurs dans les tâches impliquant une interaction avec le monde réel.

Les cerveaux sont des dispositifs informatiques remarquables

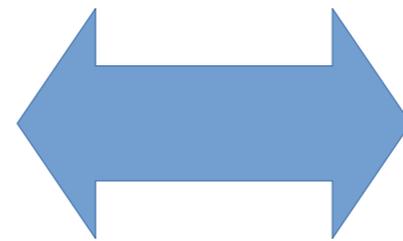


neurone: 10 kB stockage

cerveau: 10 milliard neurones

cerveau: 100 TB stockage

cerveau: 12 W puissance



ordinateur: 5mW/GB

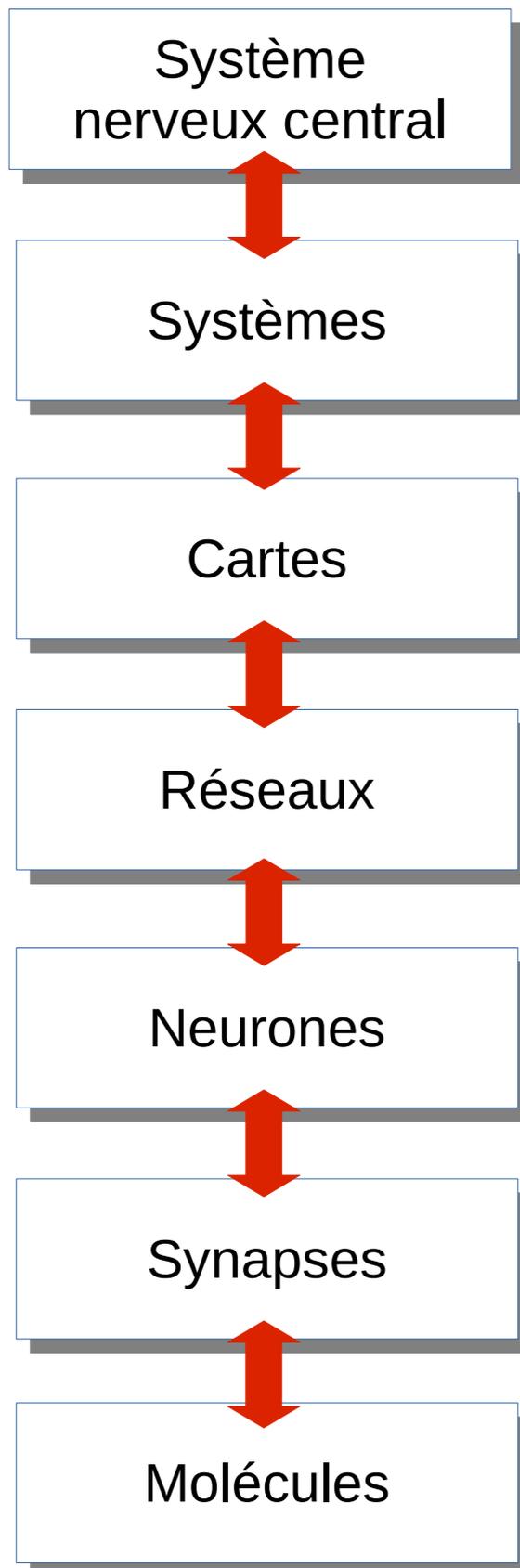
ordinateur (100TB): 500 W

Le cerveau est ~40 fois plus efficace énergétiquement !

Pourquoi modeler le cerveau ?

- pour le comprendre
- pour s'en inspirer
- pour le réparer / l'améliorer

De quoi est fait le cerveau ?



1 m

10 cm

1 cm

1 mm

100 μm

1 μm

1 nm



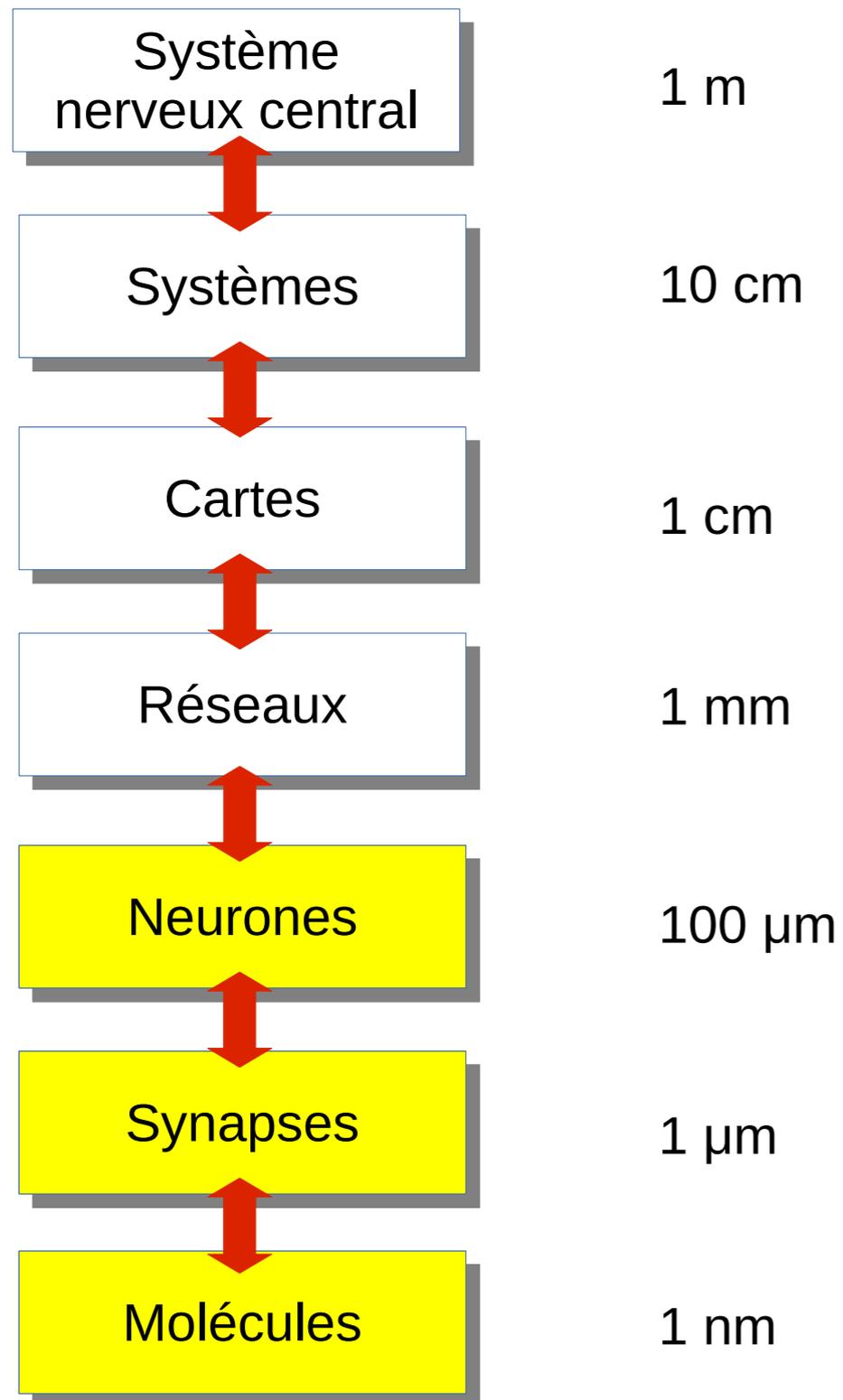
Comment fonctionne le
cerveau?

1. Une approche de physique/ingénierie

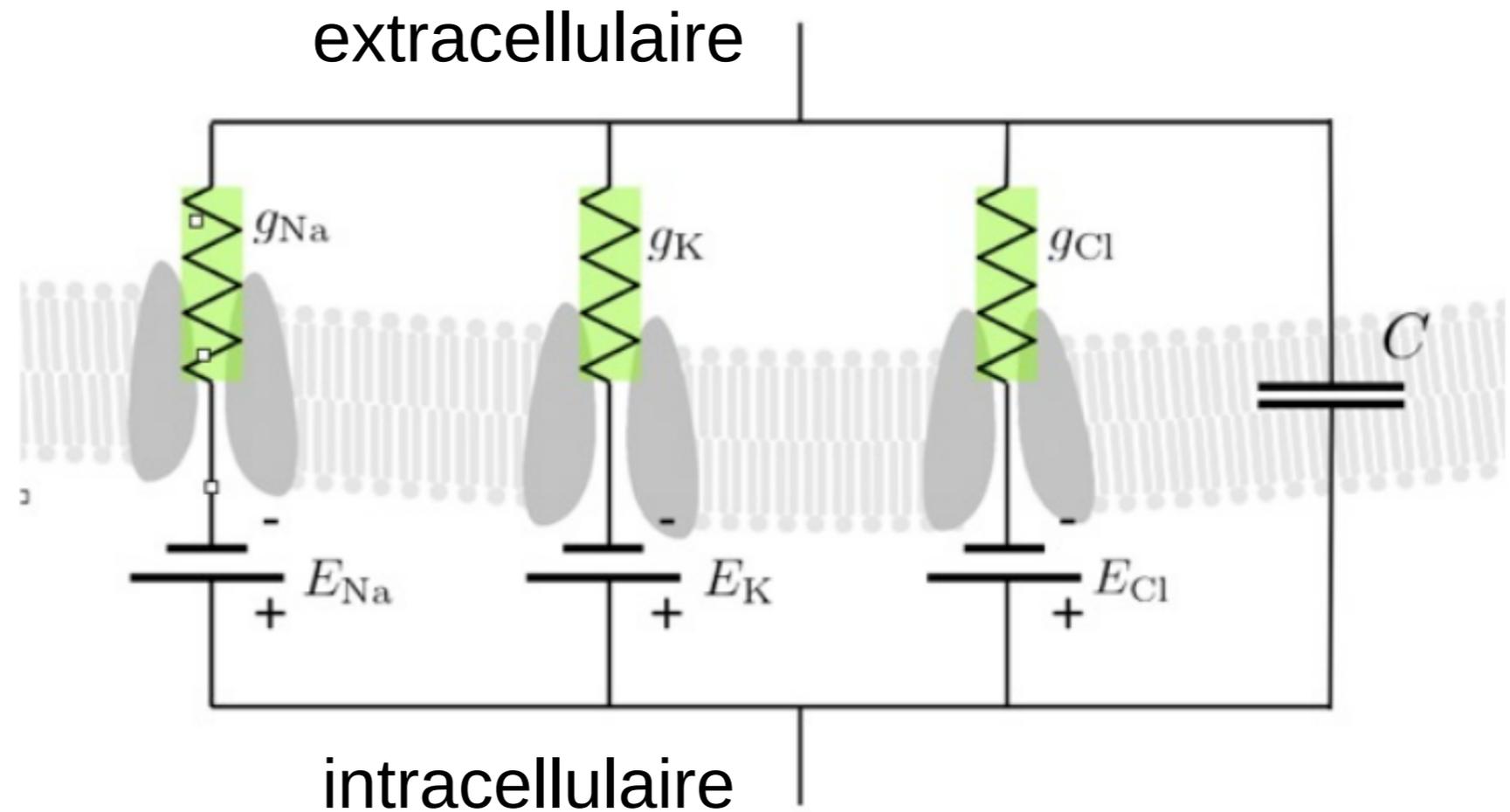
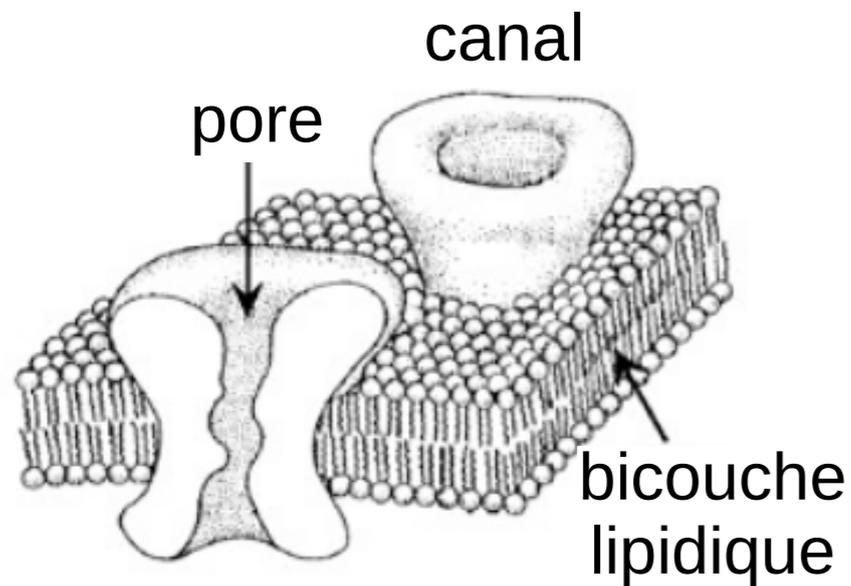
Tout simplement tout reconstruire

- ingénierie inverse ou “reverse-engineering”
du cerveau : “Désassembler” et examiner ou analyser en détail pour découvrir les concepts de base afin de produire quelque chose de similaire

La recherche de mécanismes : Construire un système à partir de pièces



Biophysique du potentiel de la membrane: Modèle Hodgkin-Huxley

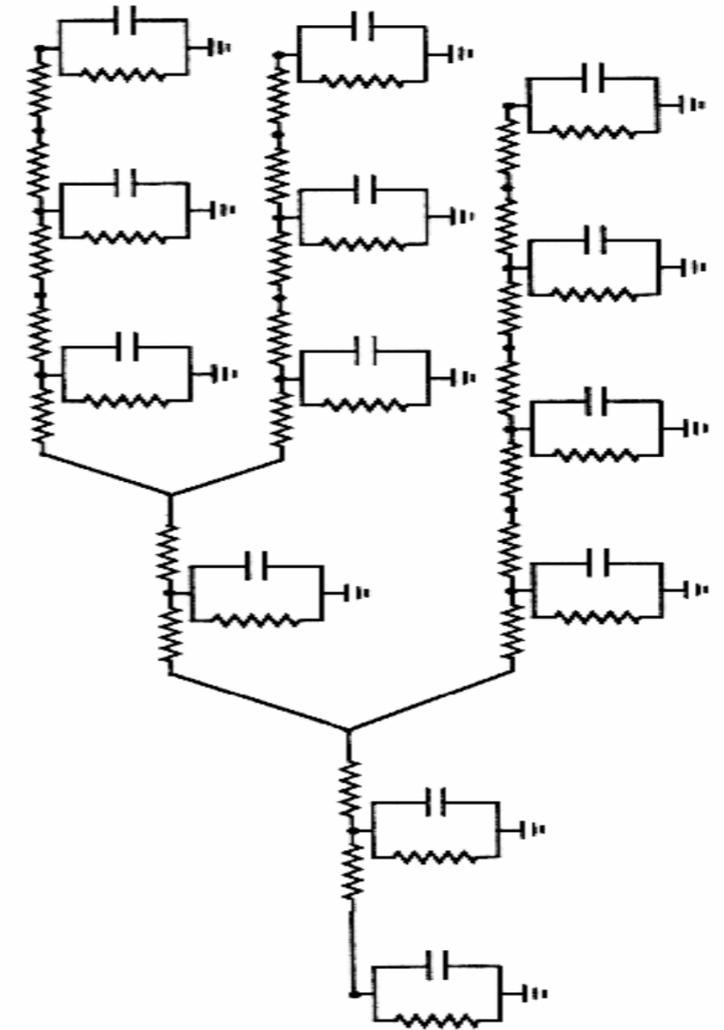
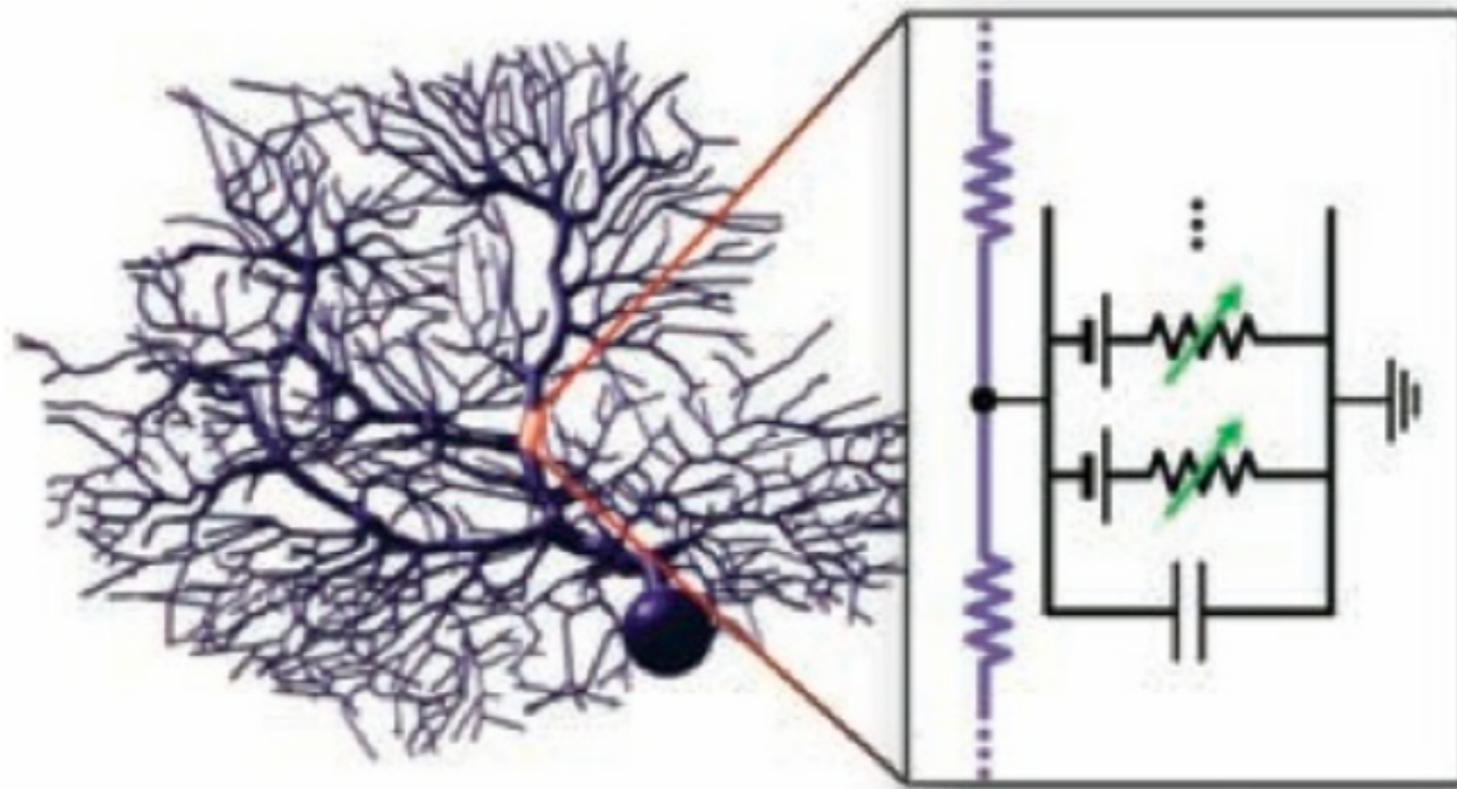


↑ potentiel



Reconstruction des neurones :

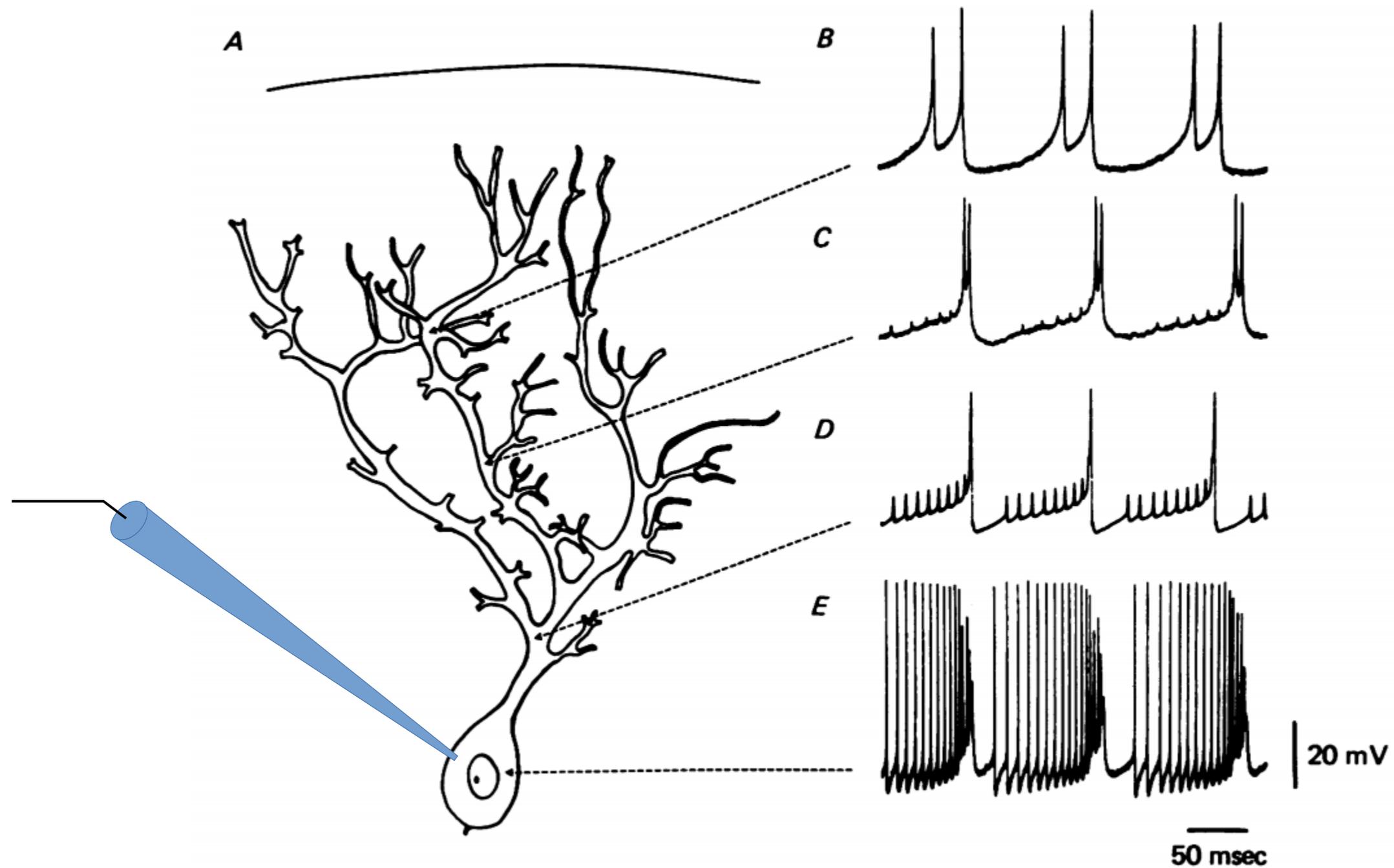
La théorie des câbles de Ralls et la modélisation compartimentée



Modèles compartimentés détaillés des neurones individuels

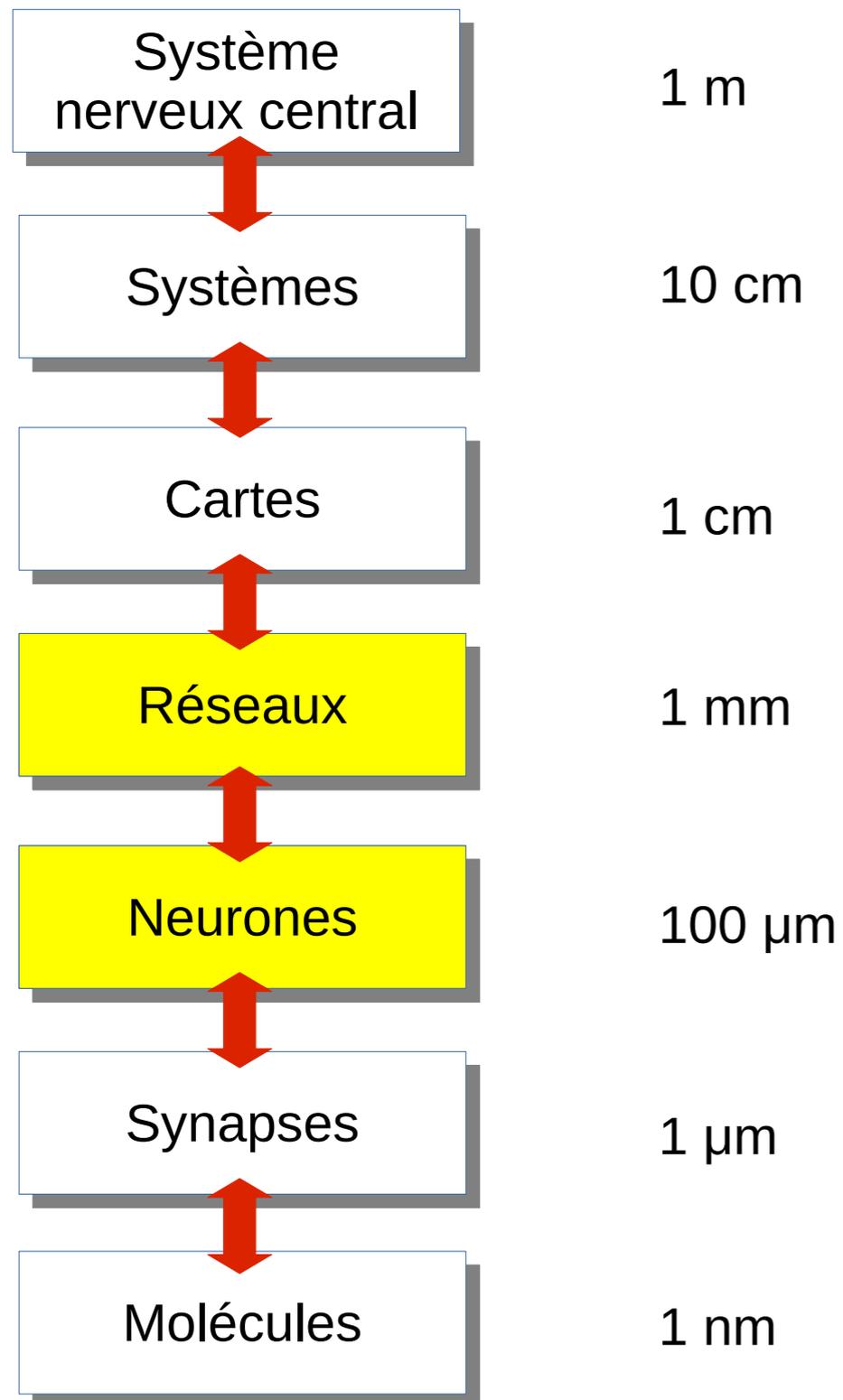
Reconstruction des neurones :

Simulation de la propagation spatiale du potentiel de la membrane



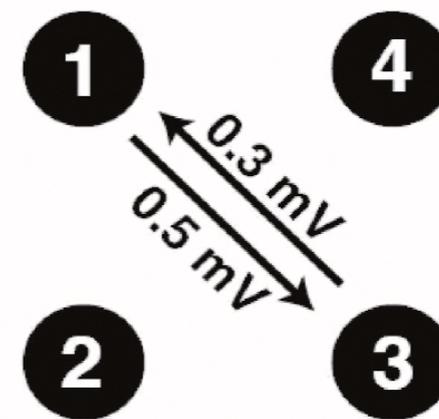
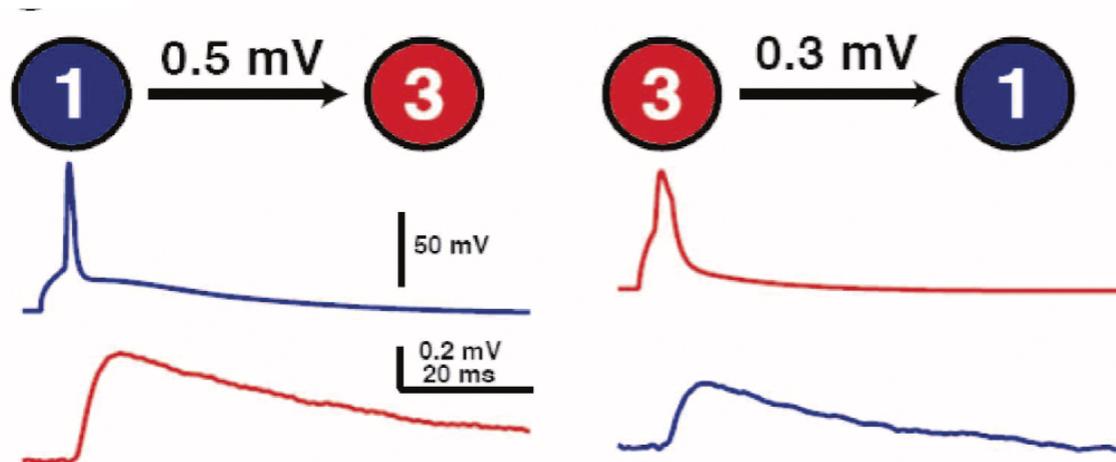
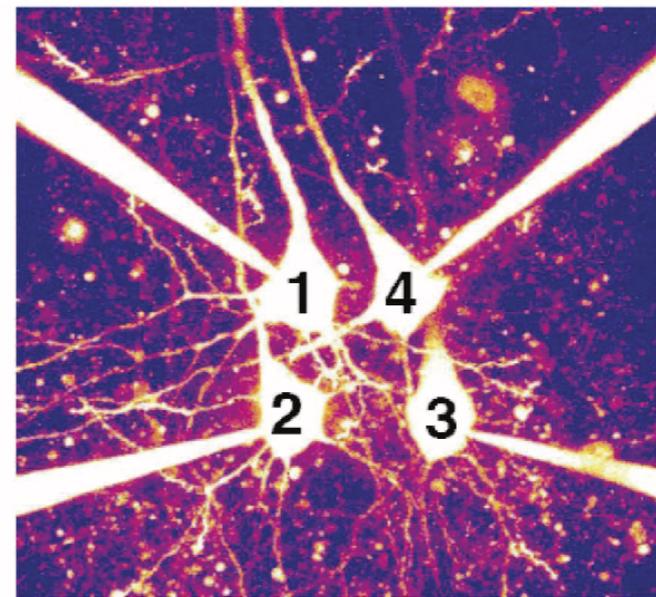
[Llinas & Sugimori 1980]

La recherche de mécanismes : Construire un système à partir de pièces



Reconstruction des réseaux : Enregistrements patch-clamp simultanés

- enregistrements électriques de deux neurones (ou plus) simultanément

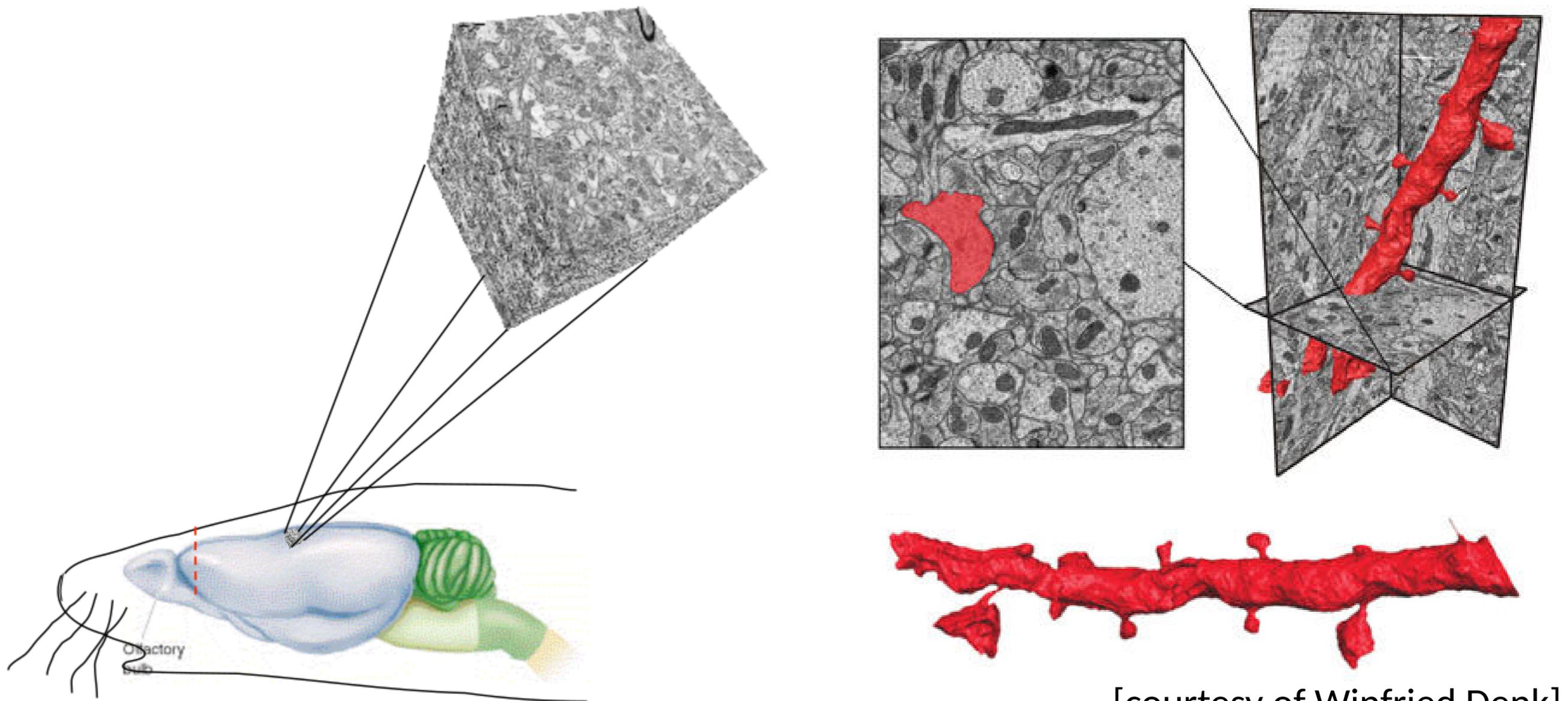


[Song et al. 2005, PLoS Biol]

Résultat : probabilités de connexion et propriétés électriques des connexions

Reconstruction des réseaux : Serial Block-face Scanning Electron Microscopy (SEM)

- Scanner des tranches de cerveau et reconstruire le circuit ...



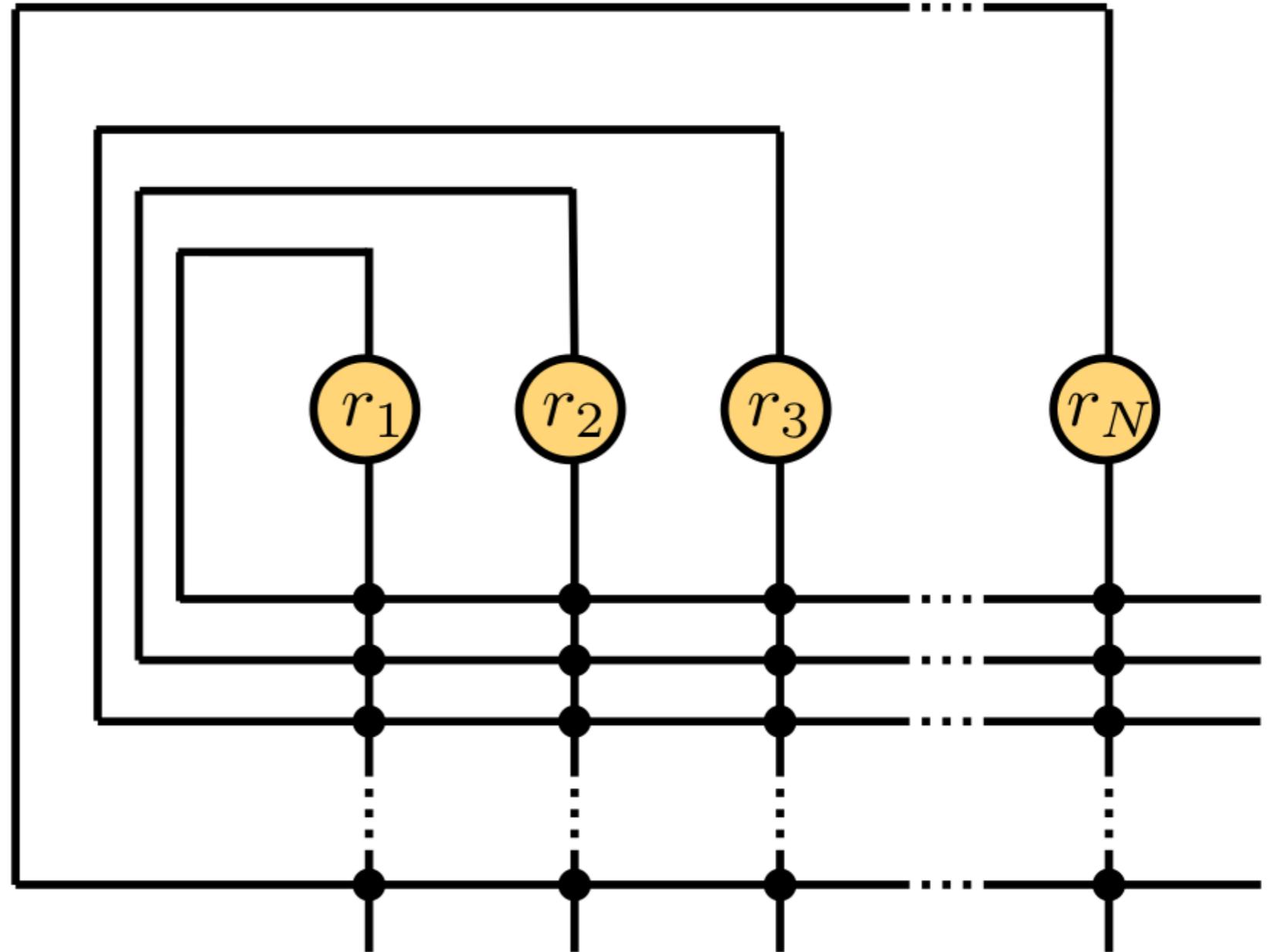
[courtesy of Winfried Denk]

Résultat : Le connectome - une carte complète des connexions neurales dans le cerveau (<http://connectomes.org/>)

Théorie des réseaux neuronaux

Neurones, synapses, connexions \longrightarrow Activité du réseau

$$\dot{r}_i = -r_i + f\left(\sum_{j=1}^N w_{ij}r_j + I_i\right)$$



Dynamique du réseau largement déterminée par la connectivité

$$\dot{r}_i = -r_i + f\left(\sum_{j=1}^N w_{ij}r_j + I_i\right)$$

Dynamique possible :

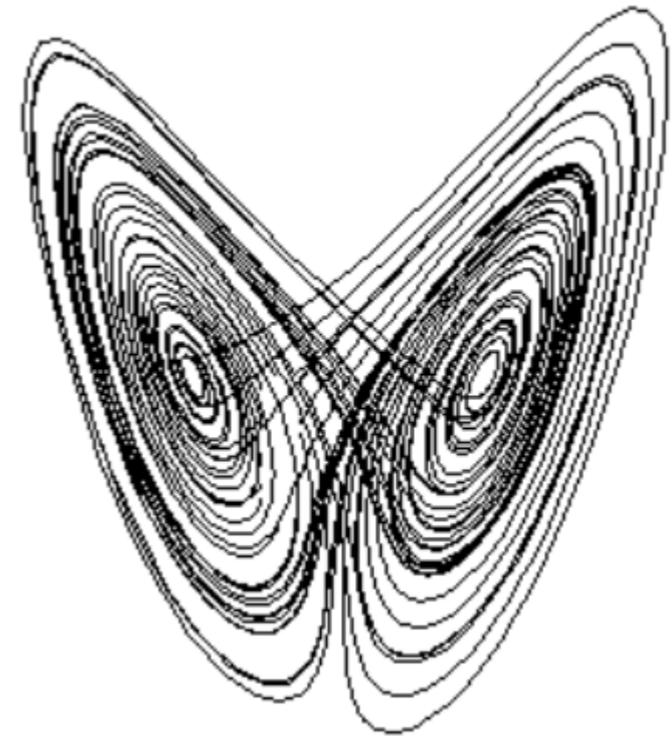
- points fixes stables / instables
- cycles limites
- attracteurs chaotiques

Remarque :

- Différents attracteurs peuvent coexister dans différentes parties de l'espace d'état!

Pour $N \rightarrow \infty$:

- les réseaux neuronaux peuvent tout calculer



Théorie (statistique) des réseaux de neurones

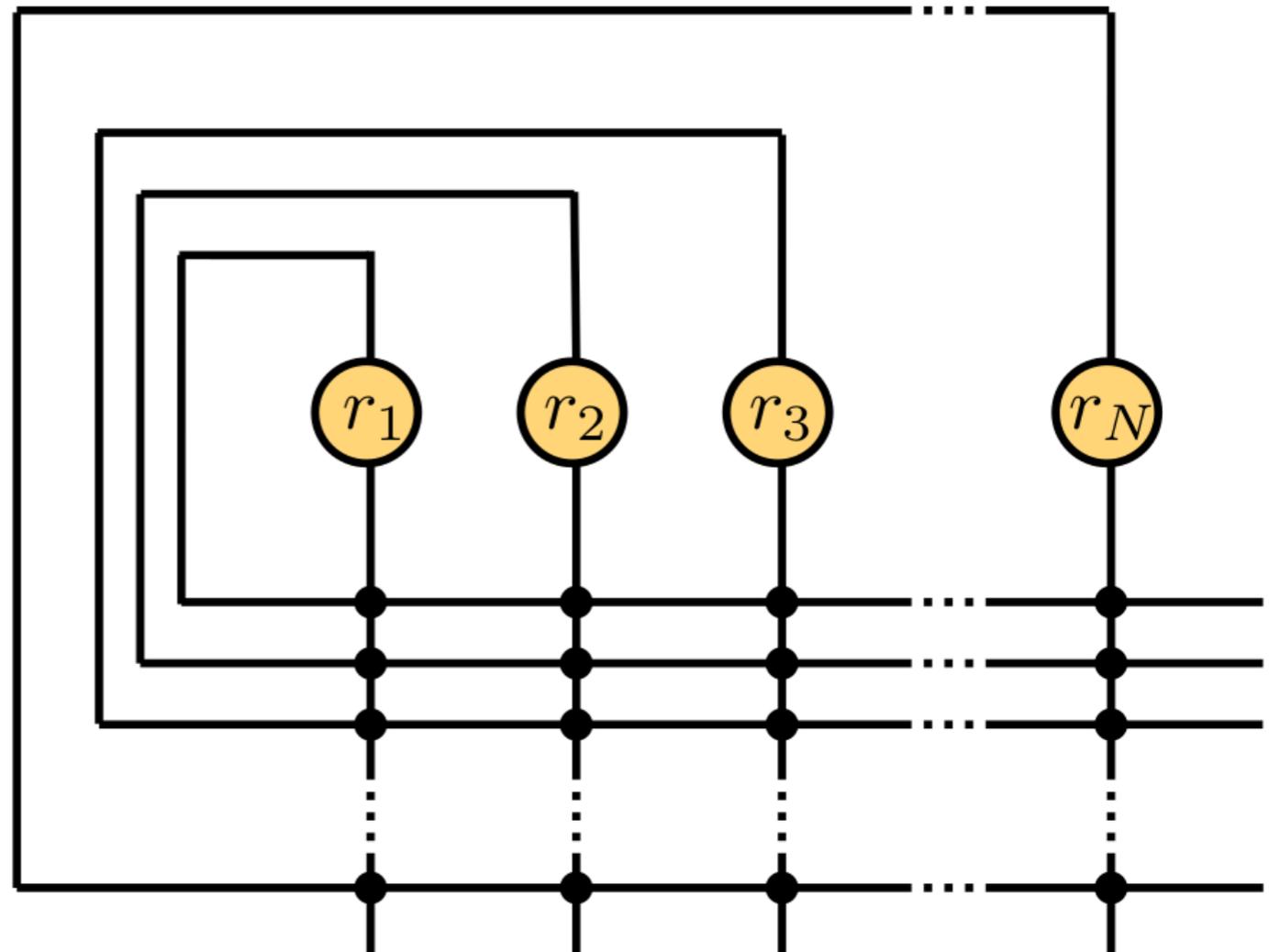
Neurones, synapses, connexions \longrightarrow Activité du réseau

Dans quelles conditions

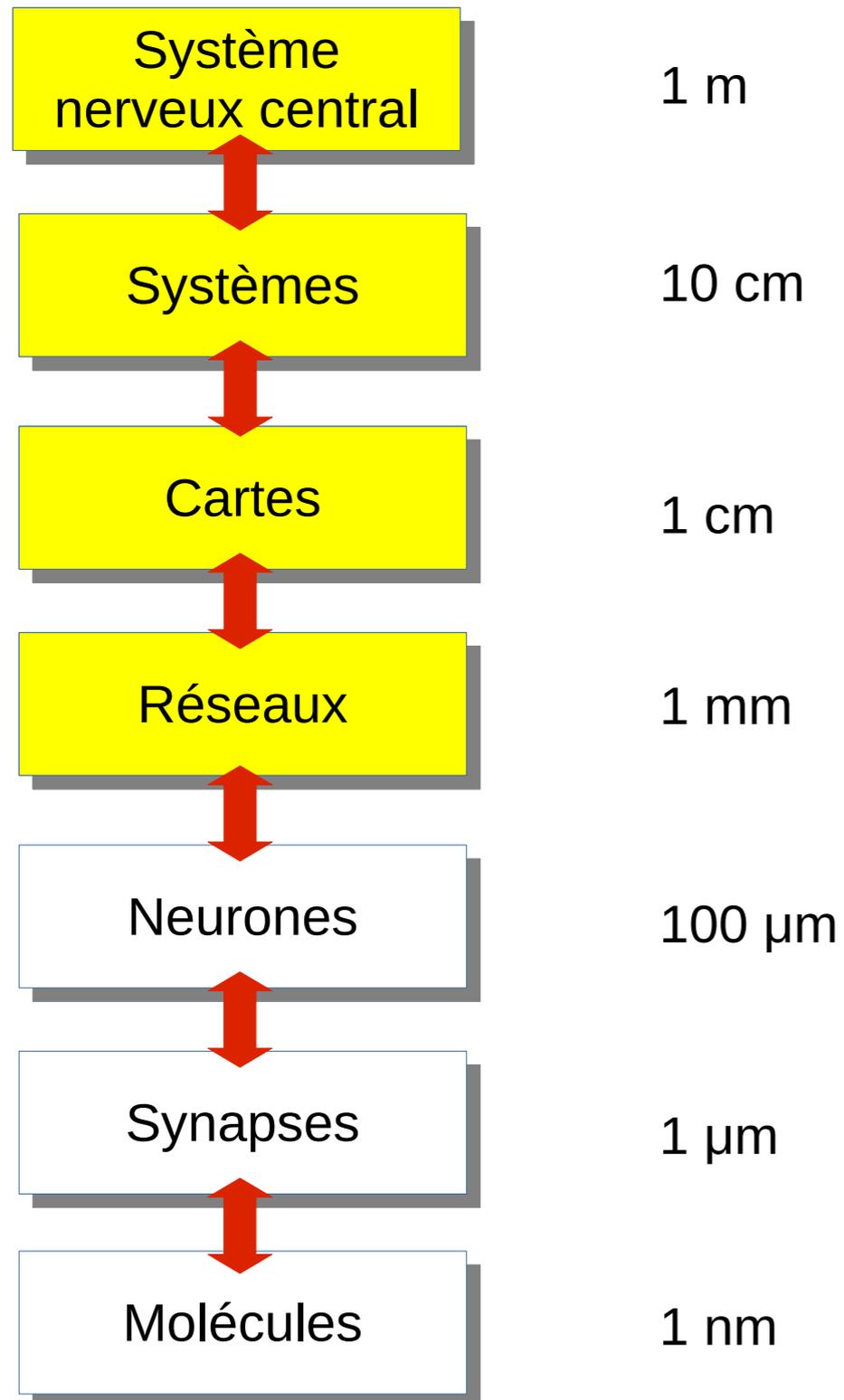
obtient-on :

- points fixes
- activité synchrone
- activité asynchrone
- trains de spikes irréguliers (Poisson)
- oscillations
- motifs spatiaux

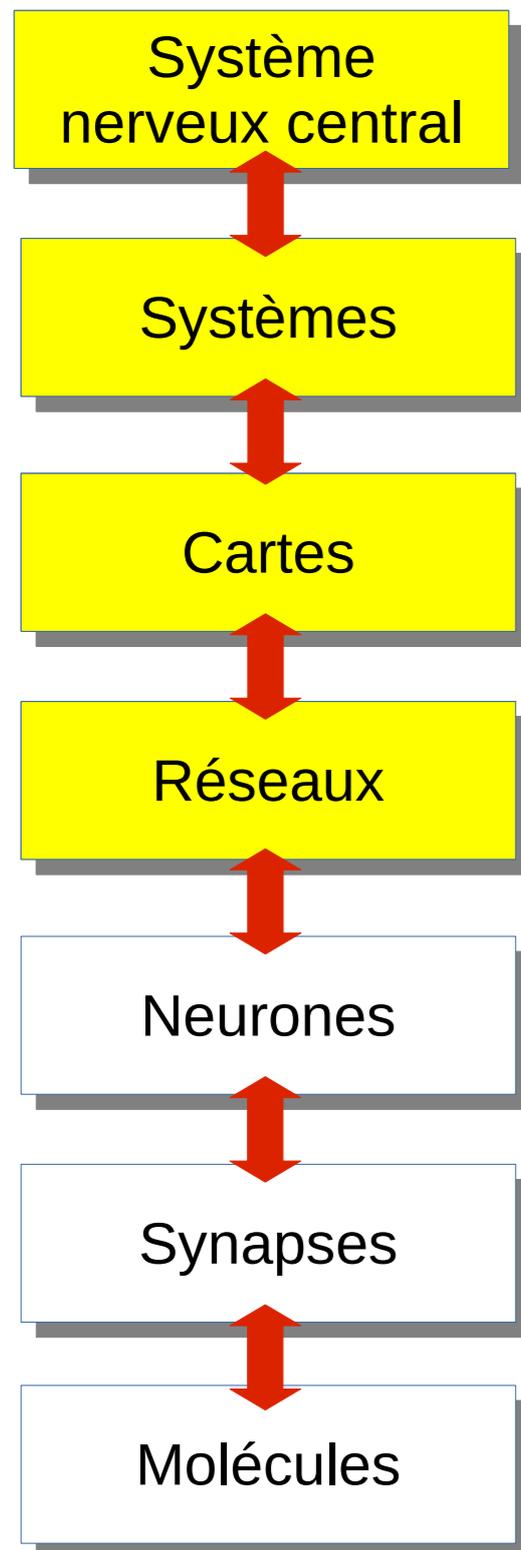
...



La recherche de mécanismes : Construire un système à partir de pièces



La recherche de mécanismes : Construire un système à partir de pièces



1 m

10 cm

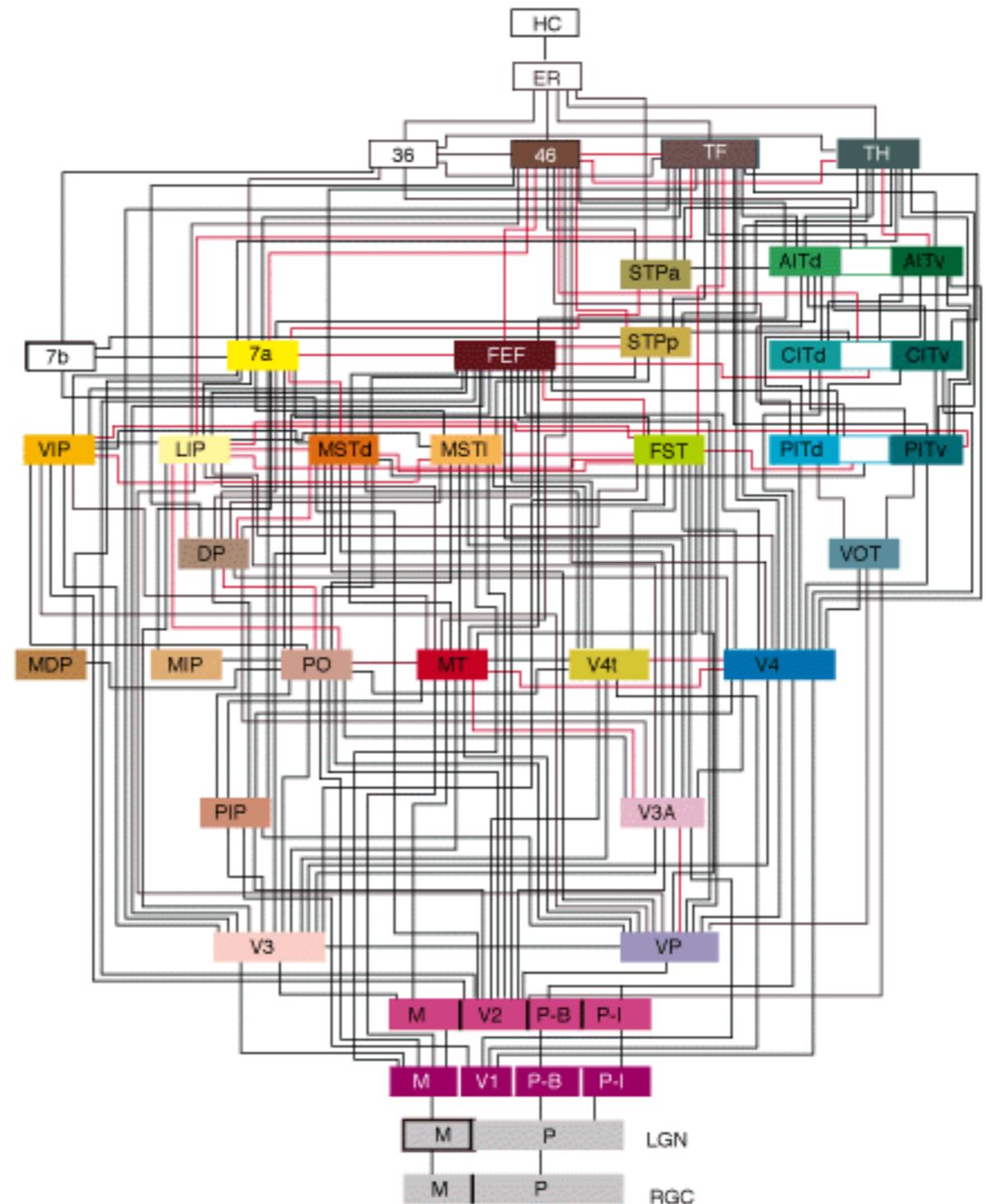
1 cm

1 mm

100 μm

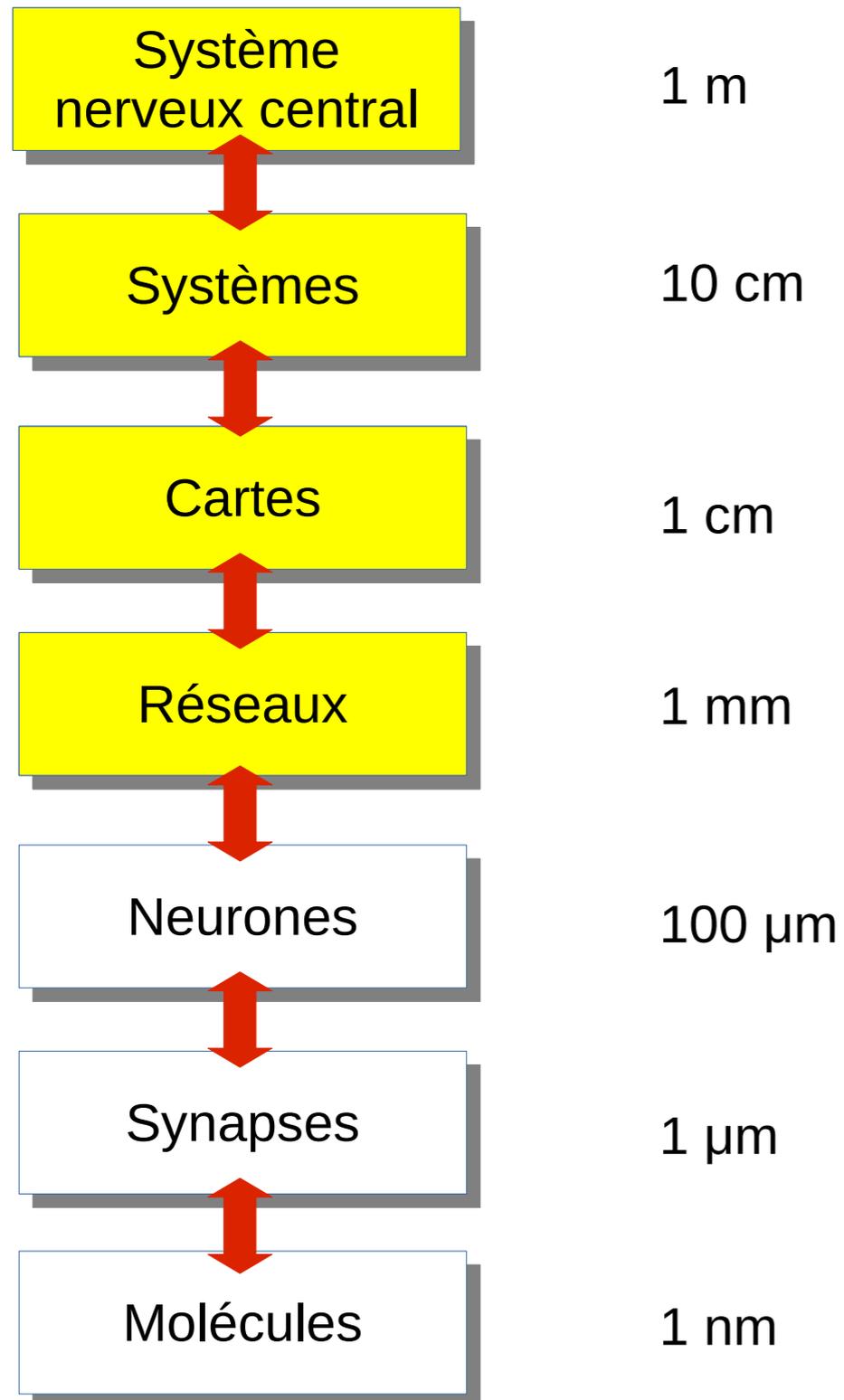
1 μm

1 nm



[Felleman & van Essen 1991]

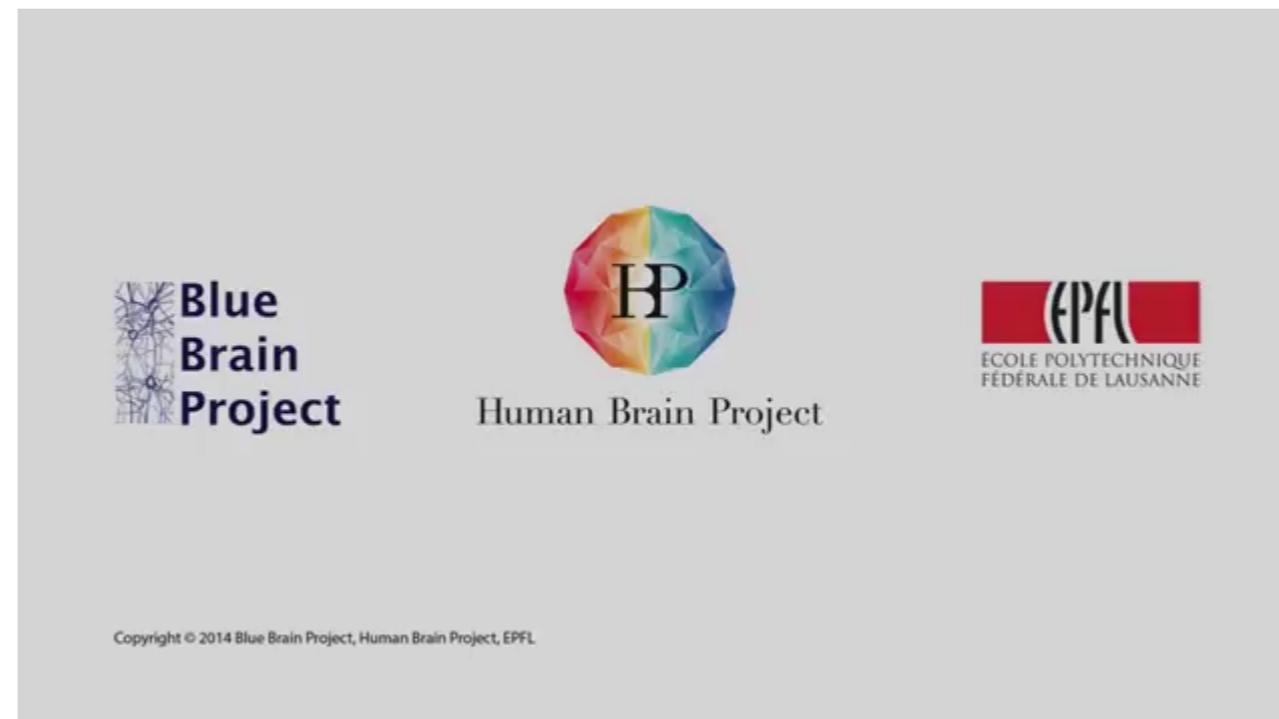
La recherche de mécanismes : Construire un système à partir de pièces



?

Human Brain Project

Aperçu du projet Blue Brain

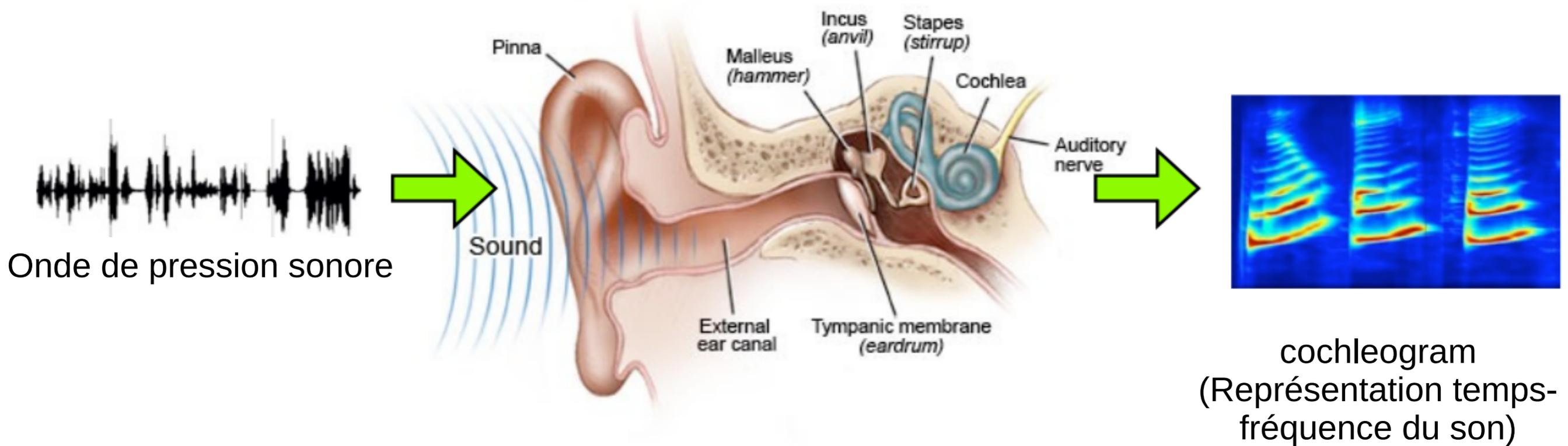


2. Une approche informatique

Étudier les problèmes de calcul

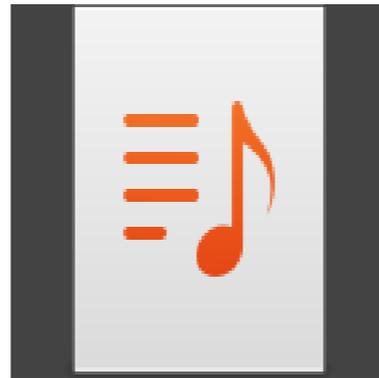
Calcul : Manipuler des informations

l'ouïe (audition)



Représentation de l'information : exemple musical

Exemple de musique : Art Blakey – Mayreh



Représentation de l'information : avec plus ou moins de perte

Comment transmettre un concert de jazz ?

- Partition



- Son



- Enregistrement



- Language

L'autre jour, je suis allé à un concert de jazz avec ce batteur cool.

perte

Pourquoi représenter l'information différemment ?

Exemple de chiffre : vingt-trois

XXIII

Systeme romain

23

Systeme decimal

00010111

Systeme binaire

Les représentations permettent des algorithmes plus faciles

Exemple de chiffres :

XXIII
23
00010111

en ... ?
en multiples de 10
en multiples de 2

Pouvez-vous additionner ces chiffres?

29
+ 33

62

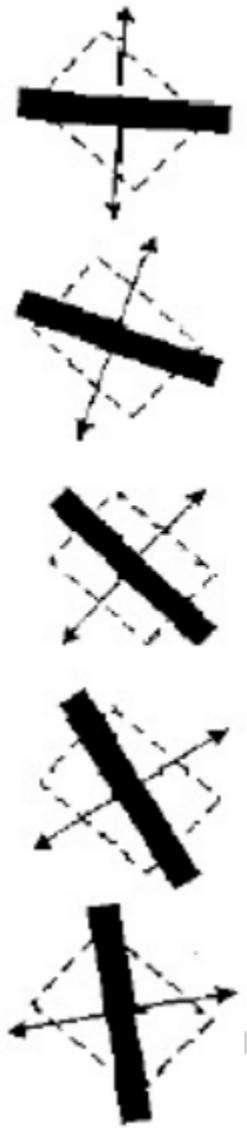
00011101
+ 00100001

00111110

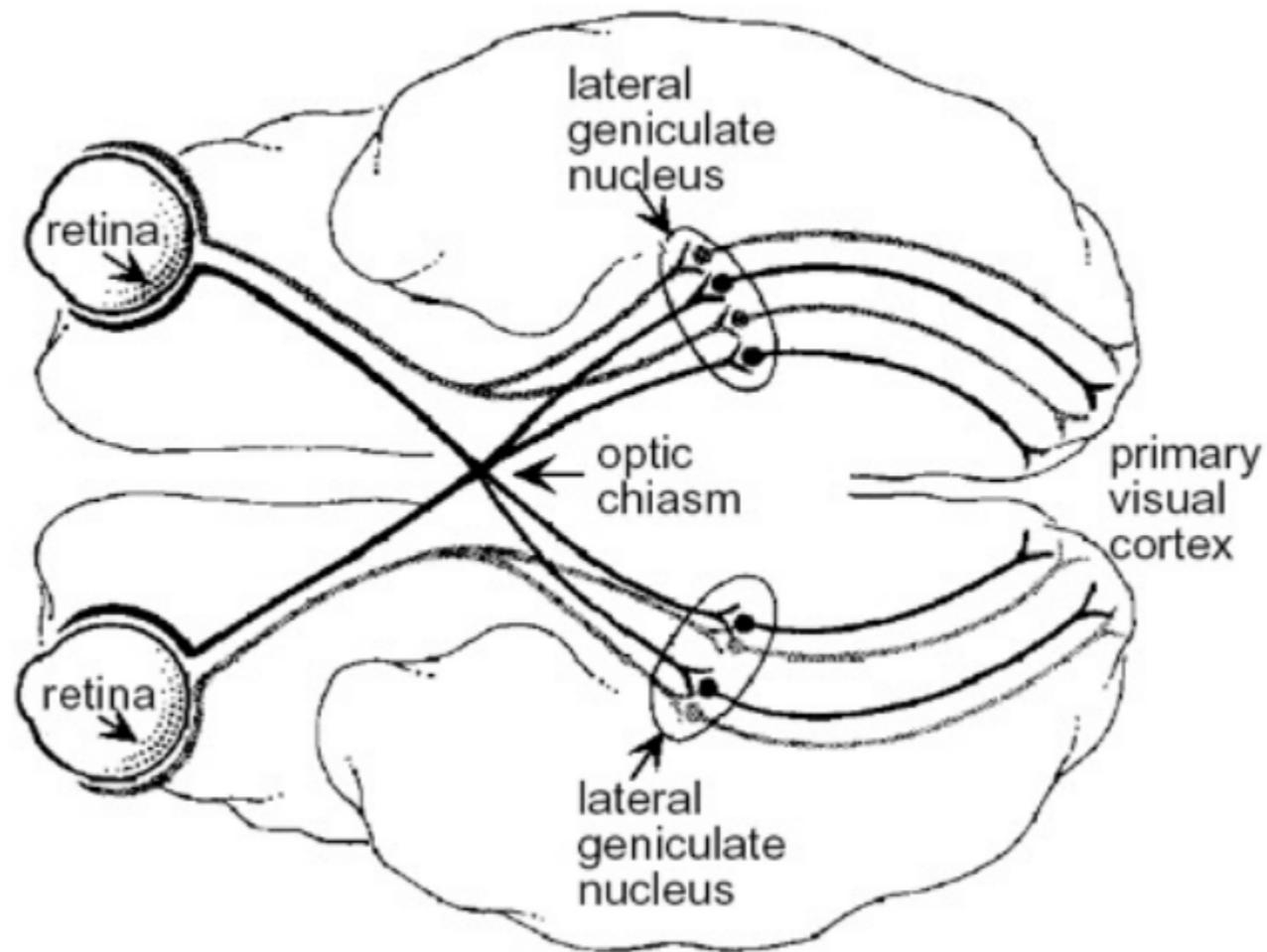
XXIX
+ XXXIII

LXII

L'exemple de représentation le plus célèbre: "détecteurs de bord" dans le système visuel



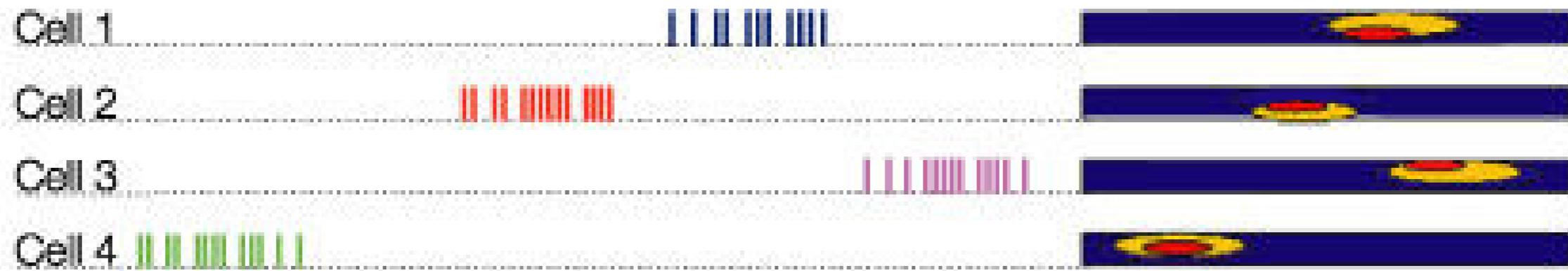
stimulus:
barre noire



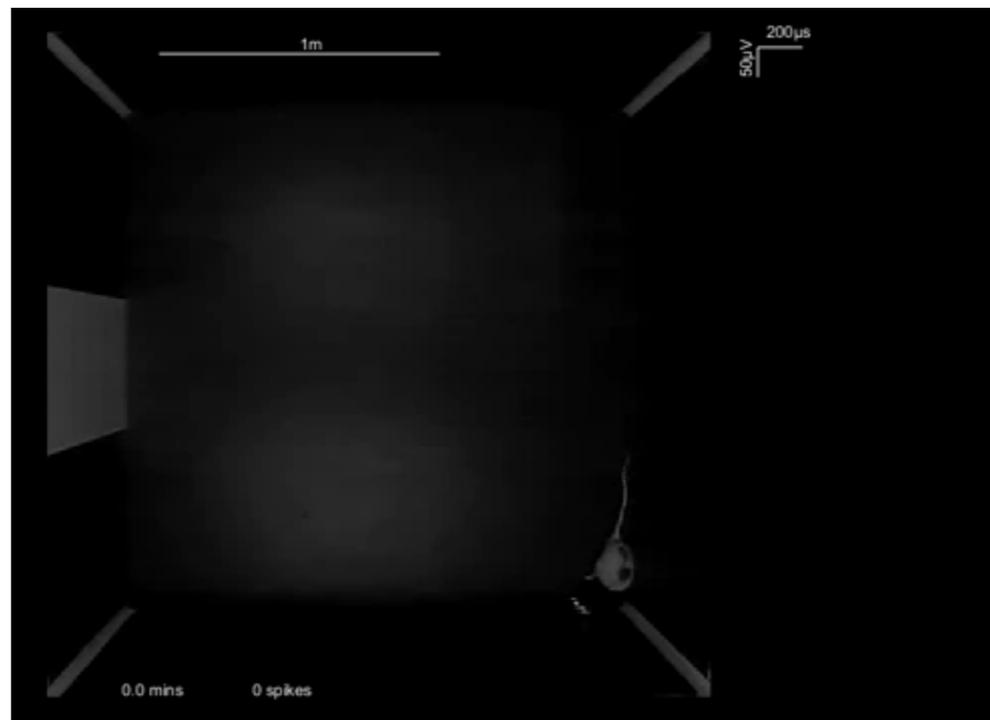
Activité du
neurone dans
cortex visuel
(V1)

Un autre exemple célèbre: “Place cells” dans l'hippocampe

Piste linéaire



Un autre exemple célèbre: “Place cells” dans l'hippocampe



Étudier les représentations dans le cerveau

Travail expérimental

- ♦ Représentations perceptives: vision, audition, odorat, etc.
- ♦ Représentation des variables motrices
- ♦ Représentations d'ordre supérieur: décisions
mémoire à court terme
récompenses
rêves
incertitudes
...

Travail théorique

- ♦ Quantifier le contenu de l'information: recherche du code neuronal, théorie de l'information, ...
- ♦ Comprendre les problèmes de calcul: reconnaissance d'objet, reconnaissance sonore, maximisation de récompense

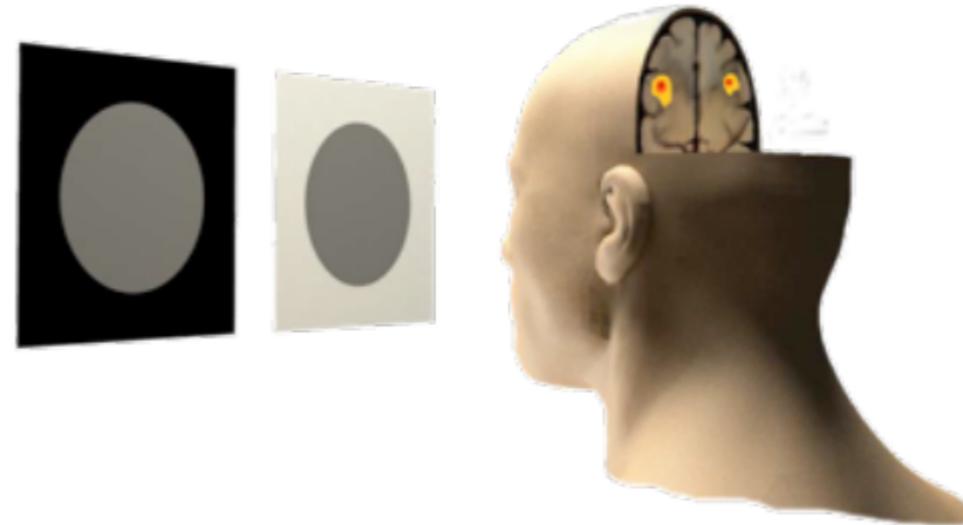
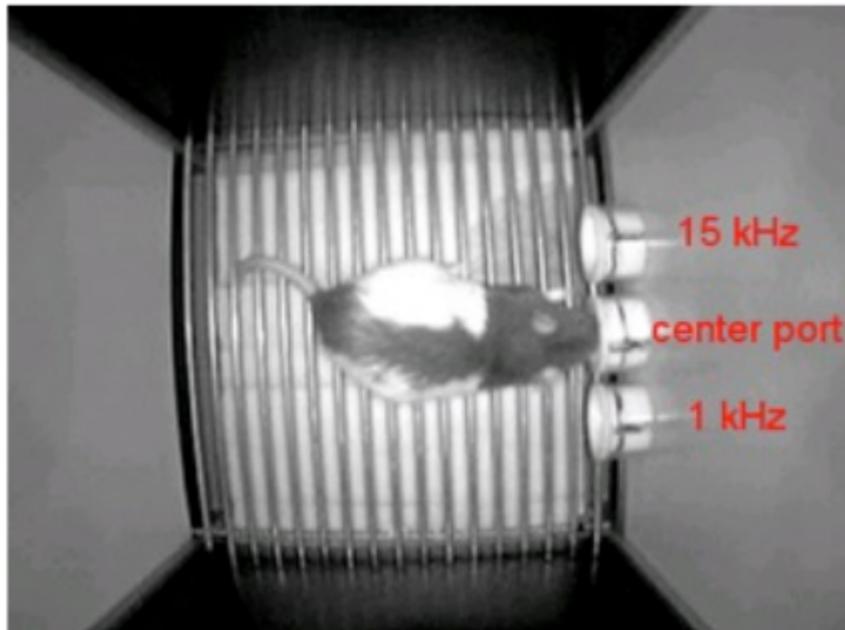
Ce que nous comprenons maintenant

très peu



Ce dont nous avons besoin

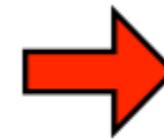
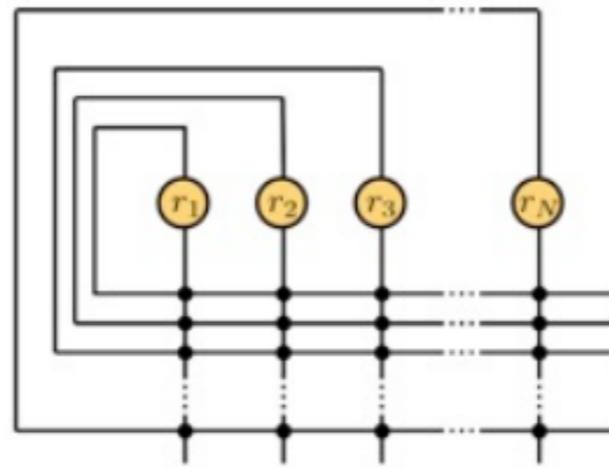
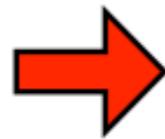
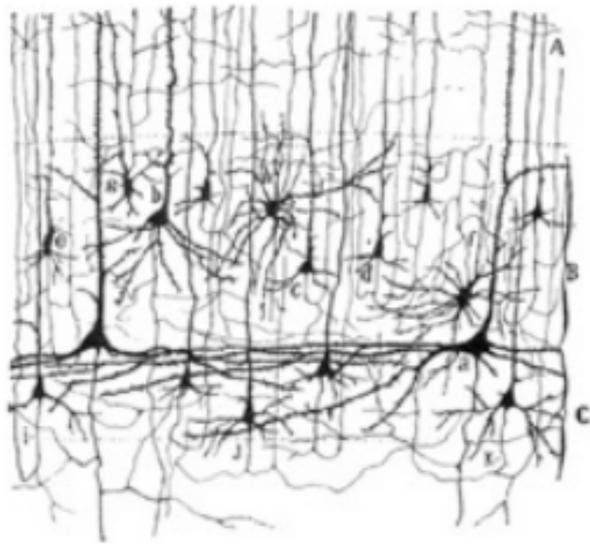
- Biologistes, psychologues



- Pour sonder le cerveau des animaux et des humains
- Concevoir et réaliser des expériences pertinentes
- Analyser et quantifier le comportement humain et animal

Ce dont nous avons besoin

- Physiciens, informaticiens, ingénieurs, mathématicien



$$\dot{r}_1 = -r_1 + f\left(\sum_{j=1}^N w_{1j}r_j + E_1\right)$$
$$\dot{r}_2 = -r_2 + f\left(\sum_{j=1}^N w_{2j}r_j + E_2\right)$$

- Créer des modèles biophysiques des neurones et des réseaux
- Formuler des théories mathématiques du traitement de l'information