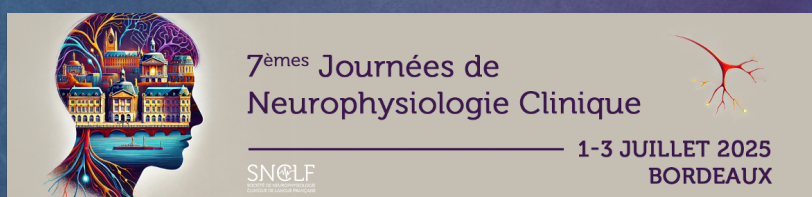


# Modélisation computationnelle dynamique du sommeil

7èmes Journées de Neurophysiologie Clinique  
1-3 juillet 2025 – Bordeaux

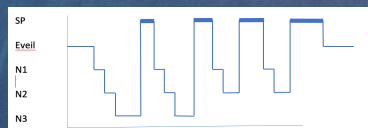
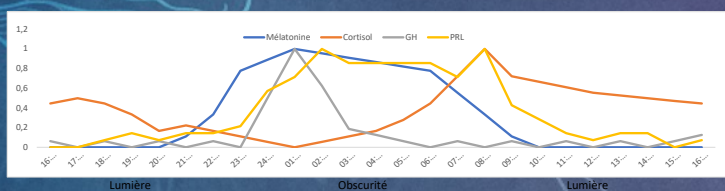


Didier Cugy  
NCEA-SUMS CHU Bordeaux  
didier.cugy@chu-bordeaux.fr  
UHCC Bordeaux  
d.cugy@uhcc-bx.fr

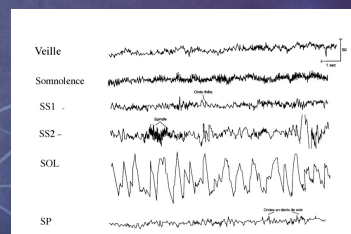
1

## Introduction

- Sommeil : phénomène cyclique et multidimensionnel



Sommeil normal nocturne - d'après : Gronfier & al 2009, Wehr & al 2000

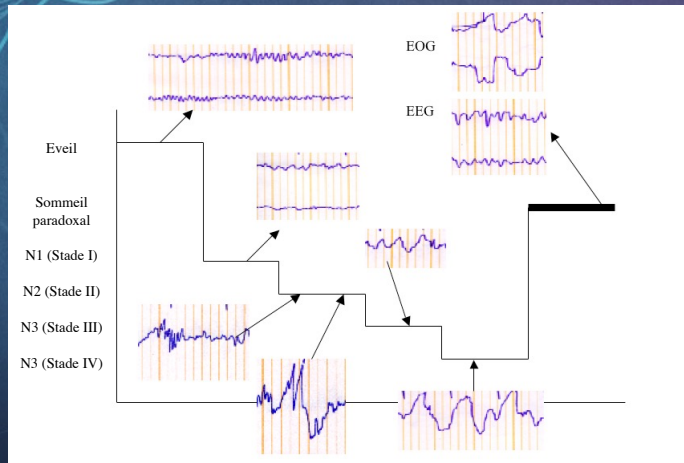


rôle dans les grandes régulations : homéostasie, mémoire, émotions

2

## États de vigilance et EEG

- Éveil, NREM (1-3), REM
- Signatures EEG : ondes lentes, fuseaux, rythmes rapides
- Transitions dynamiques = cibles de modélisation

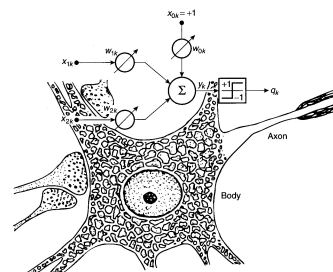


3

## Typologie des modèles

- EEG-centrés
- Homéostasiques / circadiens
- Corticaux multiplexés
- Réseaux neuronaux dynamiques

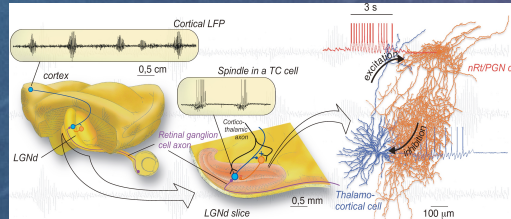
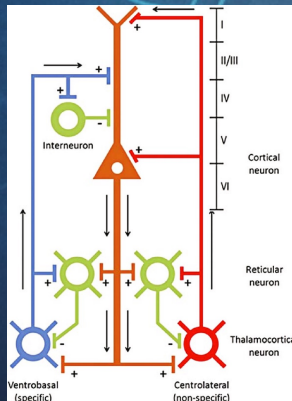
- Approche neuromimétique  
Modèle initial de Mac Culloch et Pitts (1943): le neurone est modélisé comme un système dont la sortie est fonction de la somme pondérée de ses entrées



4

## Modèles EEG-centrés

- Réseaux formels, thalamo-corticaux
- Simulation : fuseaux, ondes lentes
- Générateurs robustes intra-corticaux



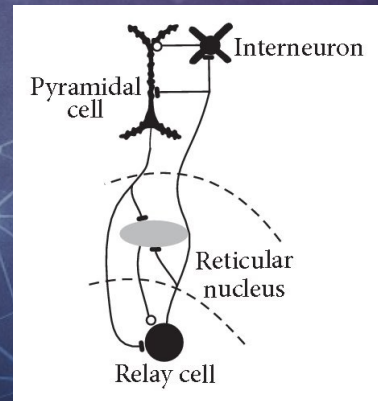
### Feedback inhibition controls spike transfer in hybrid thalamic circuits

Gwendal Le Masson<sup>1</sup>, Sylvie Renaud-Le Masson<sup>1</sup>, Damien Debay<sup>1,4</sup> & Thierry Bal<sup>1</sup>

### Synaptic background activity controls spike transfer from thalamus to cortex

Jakob Wolfart<sup>1,2,4</sup>, Damien Debay<sup>1,4</sup>, Gwendal Le Masson<sup>1</sup>, Alain Destexhe<sup>1</sup> & Thierry Bal<sup>1</sup>

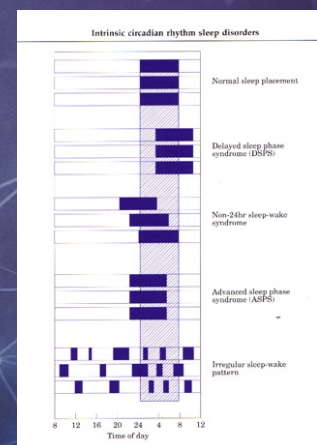
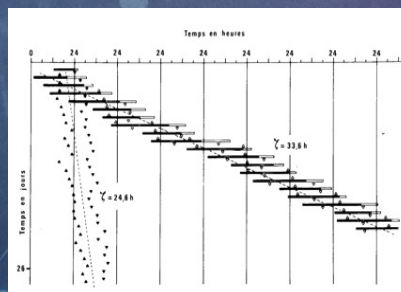
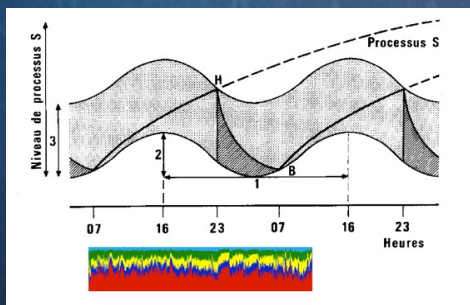
VOLUME 8 | NUMBER 12 | DECEMBER 2005 NATURE NEUROSCIENCE



5

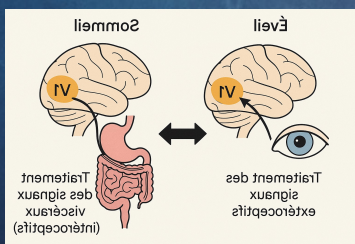
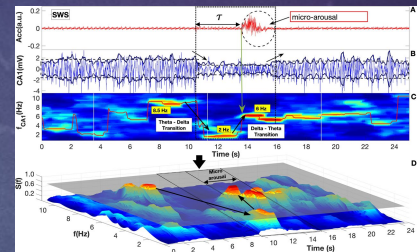
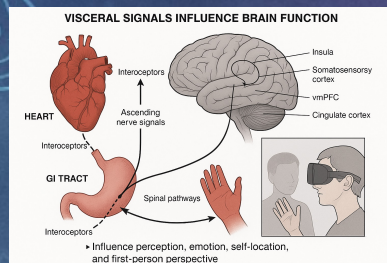
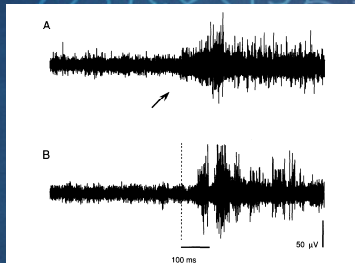
## Modèles homéostatiques et circadiens

- Modèle S-C de Borbély
- Kronauer : oscillateurs de Van der Pol
- Applications : troubles du rythme



6

## Modèles corticaux multiplexés



Aspell, J. E., Marillier, G., Herbelin, B., & Blanke, O. (2013). *Turning Body and Self Inside Out: Visualized Heartbeats Alter Bodily Self-Consciousness and Tactile Perception*. *Psychological Science*, 24(12), 2445–2453

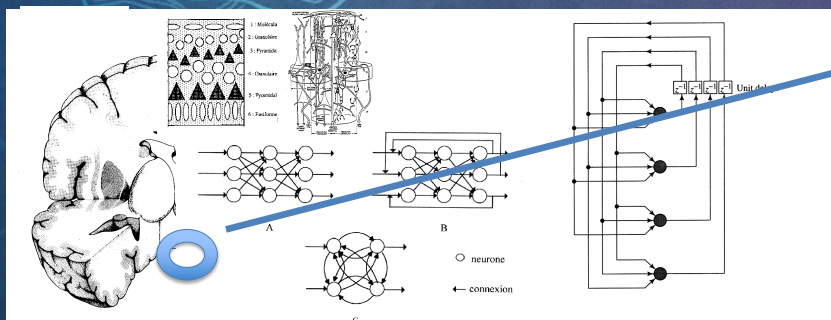
Hippocampal and cortical communication around micro-arousals in slow-wave sleep (dos Santos Lima et al., 2019)

Pigarev & al, Neurogastroenterol Motil (2013) 25, 268–e169

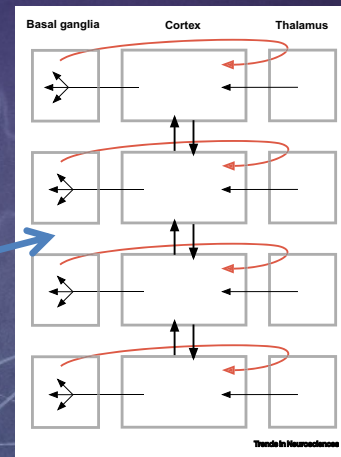
7

## Réseaux neuronaux dynamiques

De l'anatomie aux modèles formels



La mémoire du réseau est constituée par l'organisation des différents neurones composant le réseau et les poids synaptiques associés.

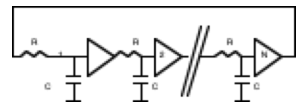
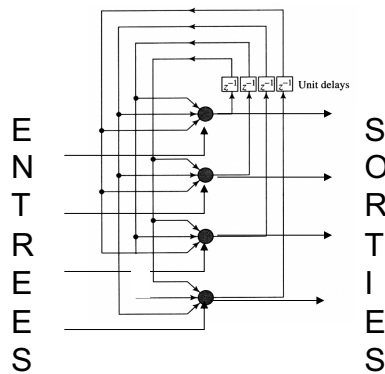


Transformers and cortical waves: encoders for pulling in context across time, [Lyle Muller](#) & al, DOI: [10.1016/j.tins.2024.08.006](https://doi.org/10.1016/j.tins.2024.08.006)

8

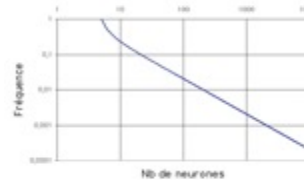
## Vers des modèles intégrés

Réseau de Hopfield déafférenté  
un modèle d'oscillateur à ondes lentes



$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tan\left(\frac{2\pi}{N}\right)$$

$$\tan\left(\frac{2\pi}{N}\right) \approx \frac{2\pi}{N} \quad f = \frac{1}{NRC}$$



9

## Auto-oscillation et loi de Hebb

L'application du modèle d'oscillateur constitué de neurones chaînés les uns aux autres fait qu'il est possible d'appliquer le 2ème principe de la loi de Hebb (Si deux neurones partageant une synapse sont activés de façon asynchrone, alors le poids de cette synapse est diminué - Stent 1973) à ce modèle dans le cas de l'auto-oscillation.

Ceci suggère qu'une fonction de filtrage informationnel par réduction globale des poids synaptiques est vraisemblablement associée au sommeil à ondes lentes et peut être, de façon plus généralisée, aux activités EEG synchrones.

Tononi G, Cirelli C. *Sleep and the price of plasticity: from synaptic and cellular homeostasis to memory consolidation and integration*. Neuron. 2014

La réduction globale des poids synaptiques diminue « l'empreinte mnésique » liée aux apprentissages antérieurs et devrait permettre ainsi d'optimiser la capacité de mémorisation du réseau.

Il pourrait ainsi être associé au sommeil lent une fonction de restauration de la capacité à mémoriser.

■ Vyazovskiy et al., 2008 : diminution de l'amplitude des potentiels évoqués corticaux après sommeil lent = réduction de la force synaptique globale.

■ Gulati et al., 2017 : démonstration chez le rongeur d'un lien entre la qualité du SWS et le réajustement synaptique.

10

## Modèles déterministes ou adaptatifs ?

### Modèles déterministes Contrôlent les données

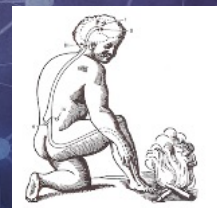
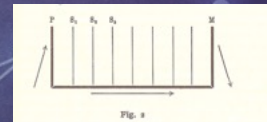
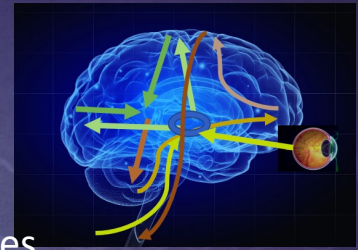
- Basés sur des équations prédéfinies
- Peu sensibles à la variabilité interindividuelle
- Représentations fixes du temps et de la structure

Le sommeil est contrôlé par les structures

### Modèles adaptatifs Pilotés par les données

- Capables d'apprendre à partir de données
- Intègrent des rétroactions, ajustements continus
- Structures modulables sensibles au contexte

Le sommeil témoigne des processus observables dans les structures liées au système



11

## En synthèse : La contrainte énergétique pivot des modèles intégrés du sommeil

### Le cerveau : organe à haut coût énergétique

20 % de la dépense énergétique pour 2 % du poids corporel

Activité continue, même en sommeil : rôle crucial de l'autorégulation

### Le modèle S-C (Borbély) : un équilibre dynamique

Processus **S** : pression de sommeil liée à l'éveil et à l'activité neuronale

Processus **C** : oscillateur circadien modulant la propension au sommeil

➤ Ces deux processus visent à **optimiser les coûts biologiques** de la veille prolongée

### De la plasticité à l'économie synaptique

Modèle de **Tononi et Cirelli** : le sommeil lent comme période de **dépotentiation synaptique globale**

Fonction : réduire le coût métabolique du réseau → **compression synaptique**

➤ Le sommeil est vu comme une **réinitialisation adaptative** du réseau neuronal

12

## Une vision élargie : système dynamique sous contrainte

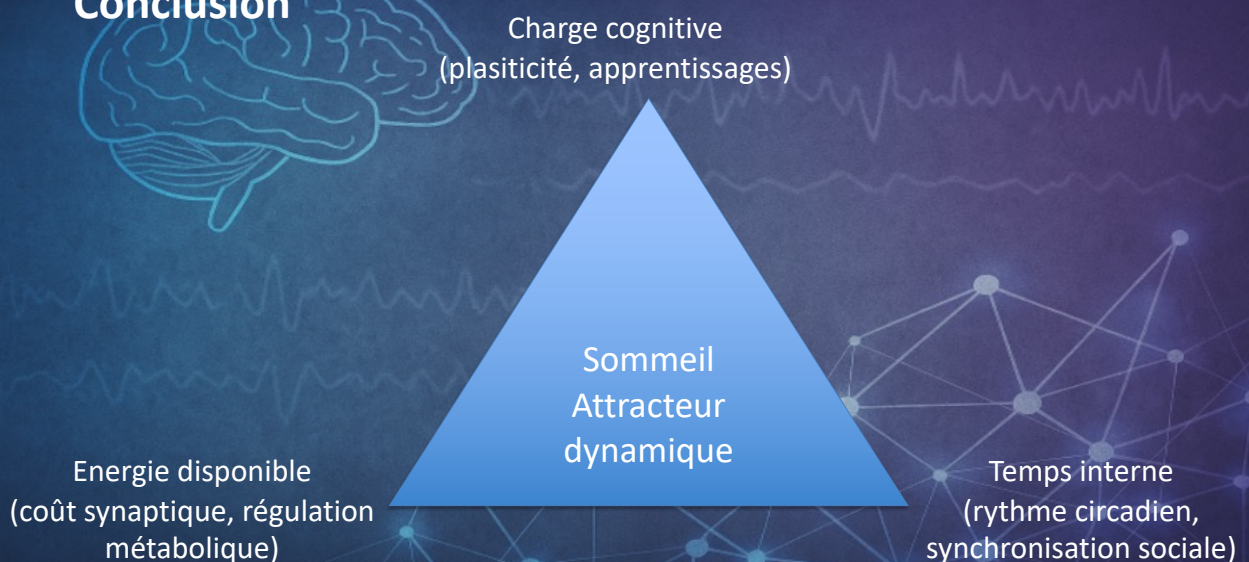
Le sommeil n'est pas uniquement un traitement passif ou une consolidation

Il est **contraint par l'énergie disponible, le temps (circadien), et la charge cognitive**

➤ Vers une modélisation **multi-objectifs** : maintien de l'information, coût énergétique minimal, régularité temporelle

13

## Conclusion



14