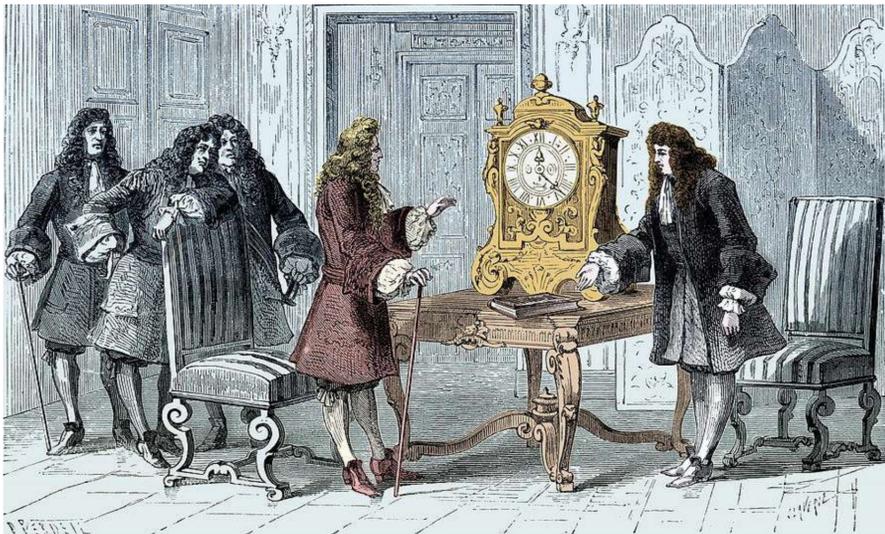


La synchronie des horloges

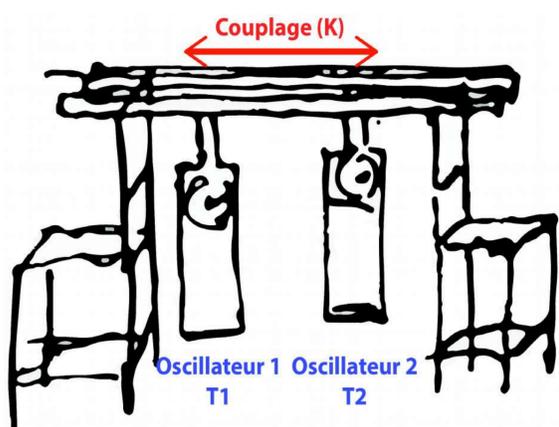
Au XVII^{ème} siècle, des scientifiques de toute l'Europe se confrontent au problème de créer une horloge précise. Christian Huygens (1629-1695) mit au point des horloges à balancier qui ne retardaient que de quinze secondes par jour - un record pour l'époque !



Droits réservés (Wikimedia Commons)

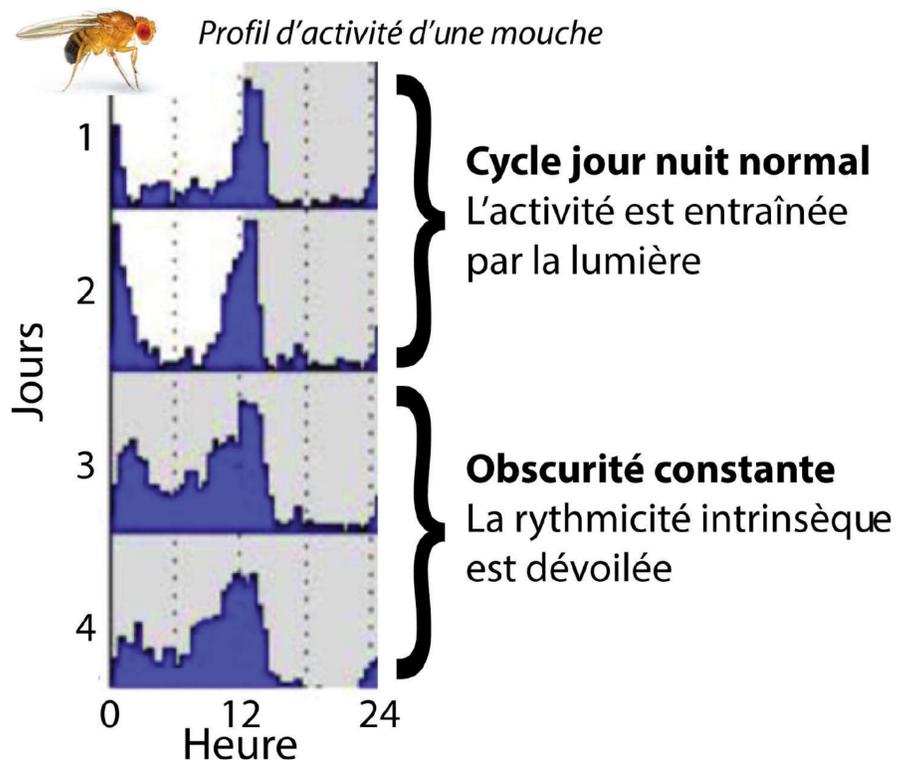
Un jour, il observa le mouvement de deux balanciers juxtaposés sur le mur et découvrit un phénomène surprenant : « *C'est que ces deux horloges étant suspendues l'une à côté de l'autre, à la distance d'un ou deux pieds, gardent entre elles une justesse si exacte, que les deux pendules battent toujours ensemble, sans jamais varier.* » (C. Huygens).

Ce fut la première description d'oscillateurs couplés qui se synchronisent. Grâce à ses expériences, Huygens postula que les deux horloges étaient couplées par de légères vibrations qui se propageaient dans le mur, mais il n'avait pas encore les outils mathématiques pour étudier ce phénomène.



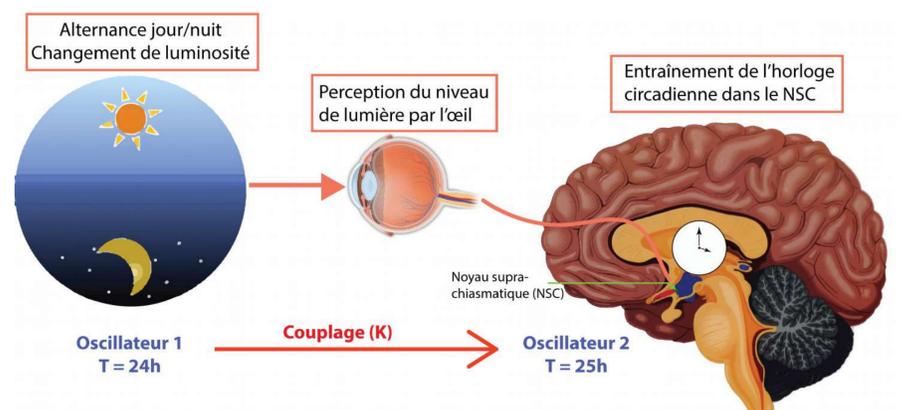
© C. Huygens

Au XX^{ème} siècle, l'étude du **rythme circadien** relança l'intérêt pour la synchronisation. Notre cycle éveil/sommeil suit l'alternance jour/nuit. Si nous nous isolons de cette alternance, gardons-nous une rythmicité ou sommes-nous complètement déréglés ? L'expérience montre que, maintenus sous une luminosité constante, tous les animaux gardent une rythmicité de sommeil/éveil proche de vingt-quatre heures. C'est la preuve que nous avons notre propre horloge biologique interne.



© R. Dubruille et P. Emery (Molecular Neurobiology, 2008)

Cette horloge se trouve dans une zone du cerveau affectée par le niveau de luminosité grâce à l'information que lui envoient les yeux. Ce couplage synchronise l'oscillateur biologique à la rotation de la terre et ajuste notre fréquence interne à vingt-quatre heures.

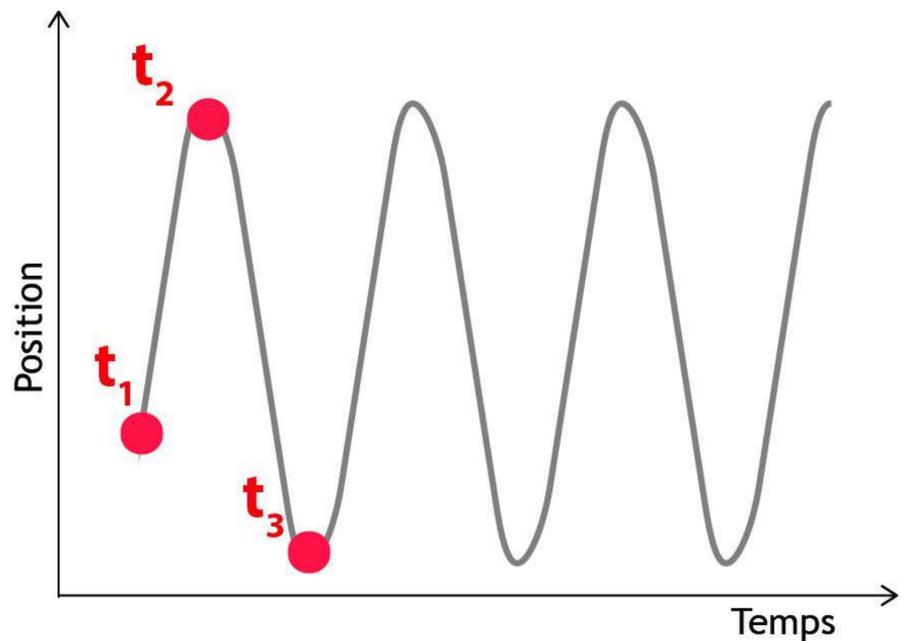
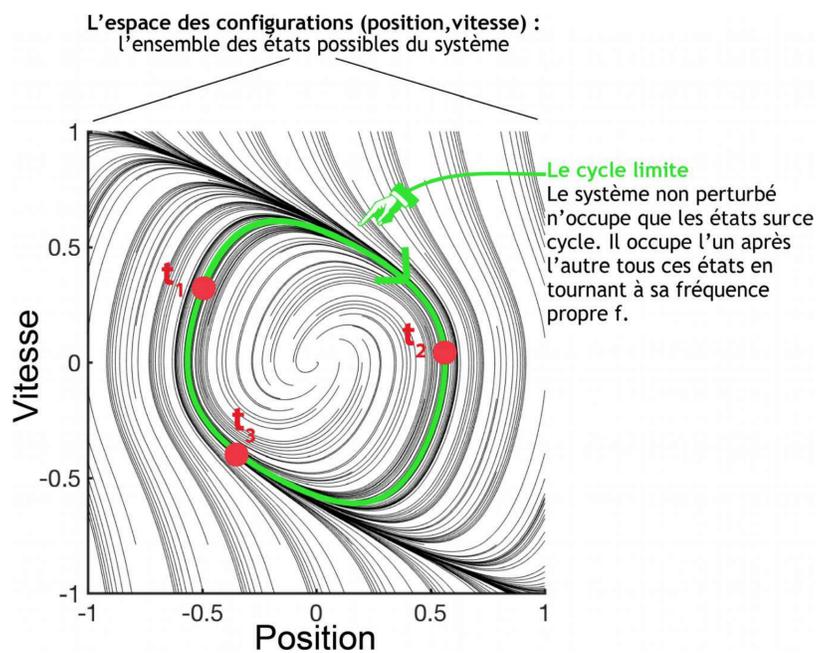


Couplage entre le cycle jour/nuit et l'horloge circadienne dans le noyau supra-chiasmatique.

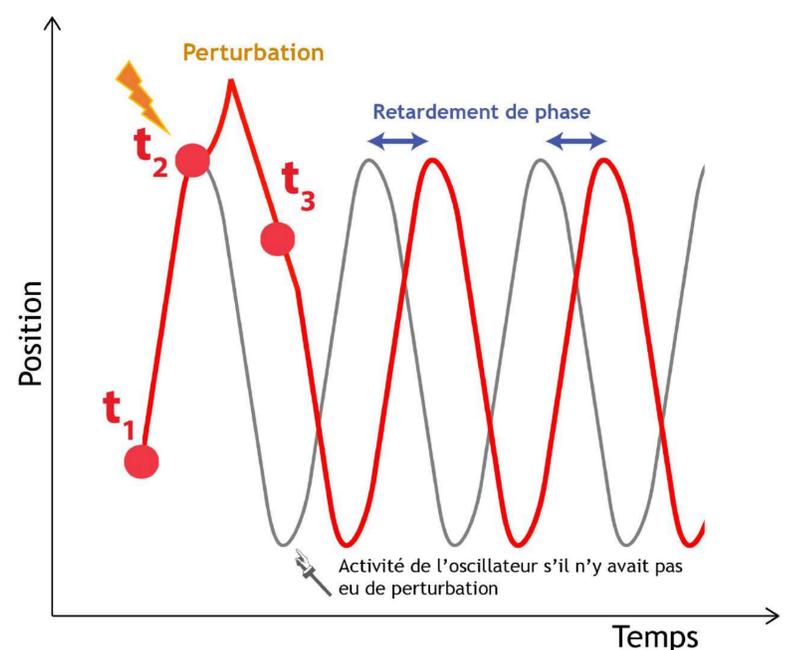
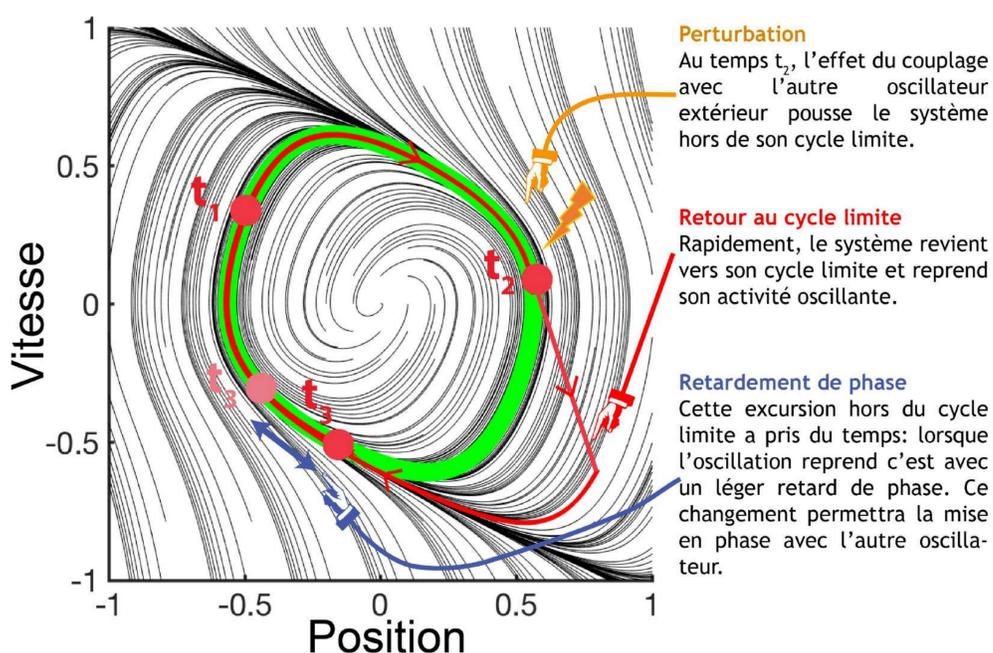
(Droits réservés, Wikimedia Commons)

Comment se synchronisent deux oscillateurs ?

Pour synchroniser des oscillateurs couplés, il est nécessaire de leur fournir de l'énergie (apportée par le poids dans une horloge à balancier, ou par un ressort remonté) pour entretenir les oscillations. De tels systèmes sont difficiles à décrire car leurs équations sont non linéaires : on ne peut pas découper le problème en petits sous-problèmes plus faciles. Pour étudier des systèmes non linéaires, on les visualise souvent non pas dans l'espace et le temps réels mais dans un **espace des configurations** (position, vitesse) : chaque point de cet espace correspond à un état possible du système et on se demande comment celui-ci passe d'un état à un autre.



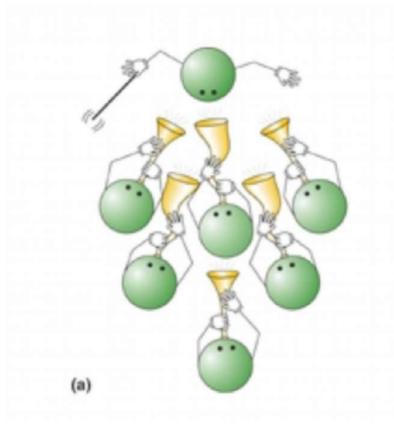
Si l'oscillateur est isolé du monde extérieur, il reste sur un « cycle limite » dans l'espace des configurations et il en fait le tour à sa fréquence propre.



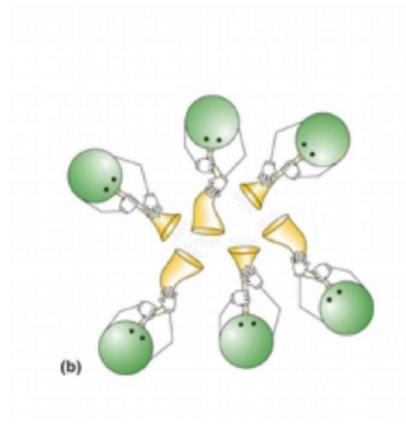
Si on le perturbe, il s'éloigne du cycle, y revient très vite et le parcourt à nouveau. L'amplitude et la fréquence de l'oscillation ne sont pas perturbées mais sa phase a changé : on a retardé ou avancé sa progression autour du cycle. Si, à chaque cycle, l'oscillateur est perturbé par son couplage avec un autre oscillateur, il aura un petit retard ou une petite avance à chaque tour. Ces effets cumulés suffisent parfois pour synchroniser les deux oscillateurs. On peut démontrer que deux oscillateurs vont toujours se synchroniser si leurs fréquences propres sont voisines et si leur couplage est assez fort. Si leurs fréquences propres sont identiques, un couplage extrêmement faible suffit pour les synchroniser.

Synchroniser plusieurs oscillateurs

Le spectacle de lucioles qui clignent de manière synchronisée ou le concert de sauterelles chantant en chœur nous montrent que les oscillateurs se synchronisent aussi dans des populations de centaines voire de milliers d'individus. Si deux oscillateurs couplés se synchronisent presque sans faute, comment peut émerger de ce brouhaha d'oscillateurs différents un seul rythme sans chef d'orchestre ?



Synchronisation centralisée



Synchronisation par couplage mutuel

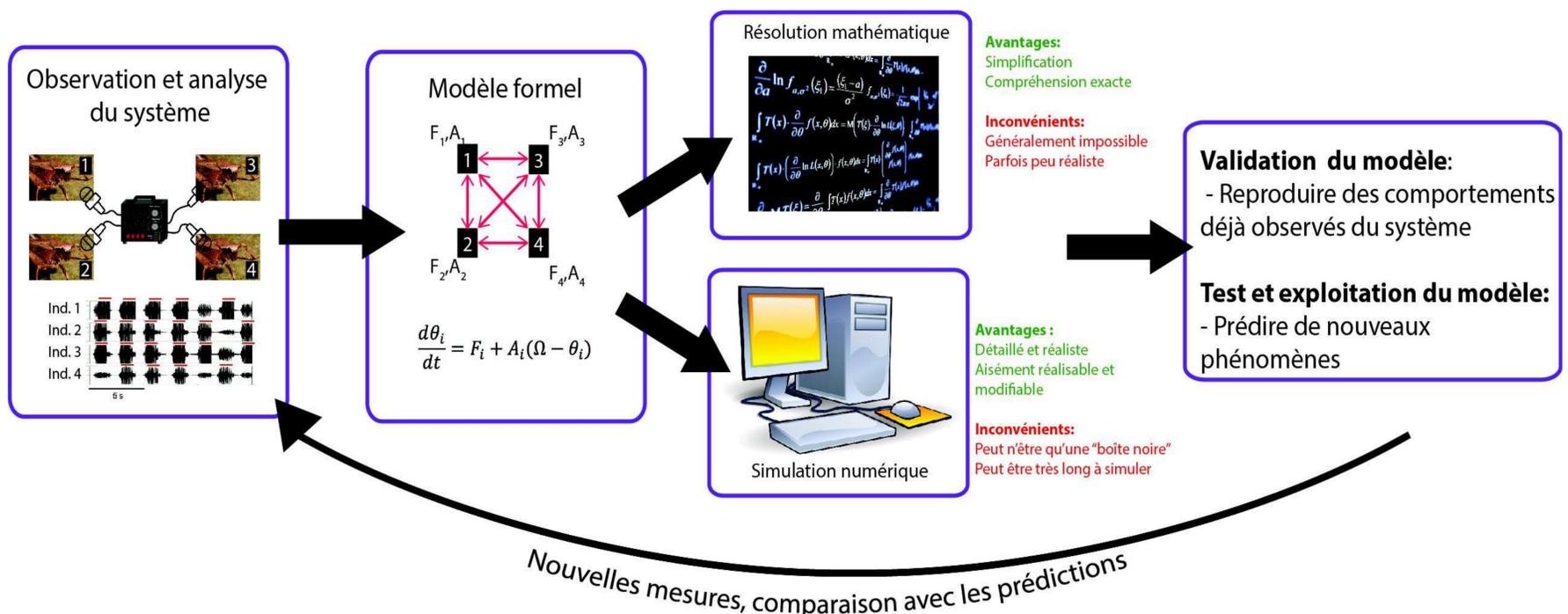


Une luciole allumée (© www.vui.stern.vn)



Un concert nocturne de lucioles (© Robin Meier)

Les populations d'oscillateurs non linéaires sont difficiles à décrire mathématiquement car il faut autant d'équations (couplées) que d'oscillateurs. Yoshiki Kuramoto a simplifié ce problème en se ramenant à des phases aléatoires toutes couplées. Mais ses hypothèses ne sont pas toujours respectées. Par exemple, les cellules cardiaques n'influençant que leurs proches voisins, nous devons recourir à des simulations par ordinateur pour observer le comportement collectif généré par nos équations, et le comparer au monde réel, sans pouvoir le résoudre mathématiquement.

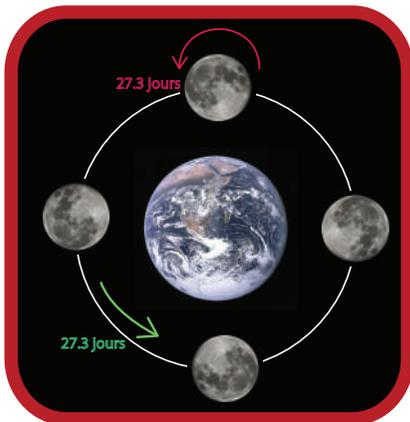


Validation du modèle:
- Reproduire des comportements déjà observés du système

Test et exploitation du modèle:
- Prédire de nouveaux phénomènes

La synchronisation à toutes les échelles !

T = période des oscillations
D = distance entre oscillateurs



© Luc Viatour

T = 27.3 jours
D = 384 400km

La rotation de la Lune sur elle-même et son mouvement autour de la Terre sont deux oscillations synchronisées par leur couplage au champ gravitationnel. Ainsi, nous voyons toujours le même côté de la Lune parce qu'elle tourne sur elle-même et autour de la Terre avec la même période.

La stabilité du réseau électrique d'un pays repose sur la synchronisation de centaines de générateurs électriques dispersés sur tout le continent, qui génèrent notre courant alternatif à 50 Hz.



© NASA / NOAA

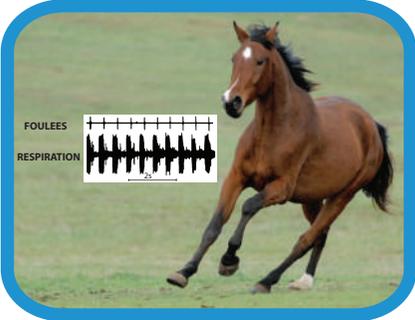
T = 20 ms
D = 100km

T = 1.7 s
D = 2-3m



© Backwell Lab

Les crabes violonistes agitent de façon rythmique leur énorme pince pour attirer les femelles. Plusieurs mâles sur une même plage se synchronisent pour « danser » en rythme.



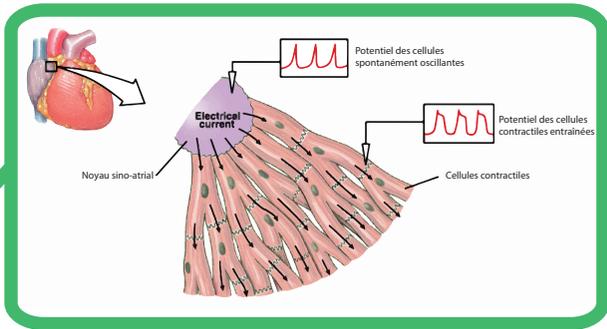
© www.maxpixel.net

T = 0.5s
D = 1m

N'avez-vous jamais remarqué qu'en courant, votre respiration se cale sur vos foulées ? C'est parce que la locomotion et la respiration sont générées par des oscillateurs qui ont tendance à se synchroniser spontanément.

T = 0.8s
D = 10cm

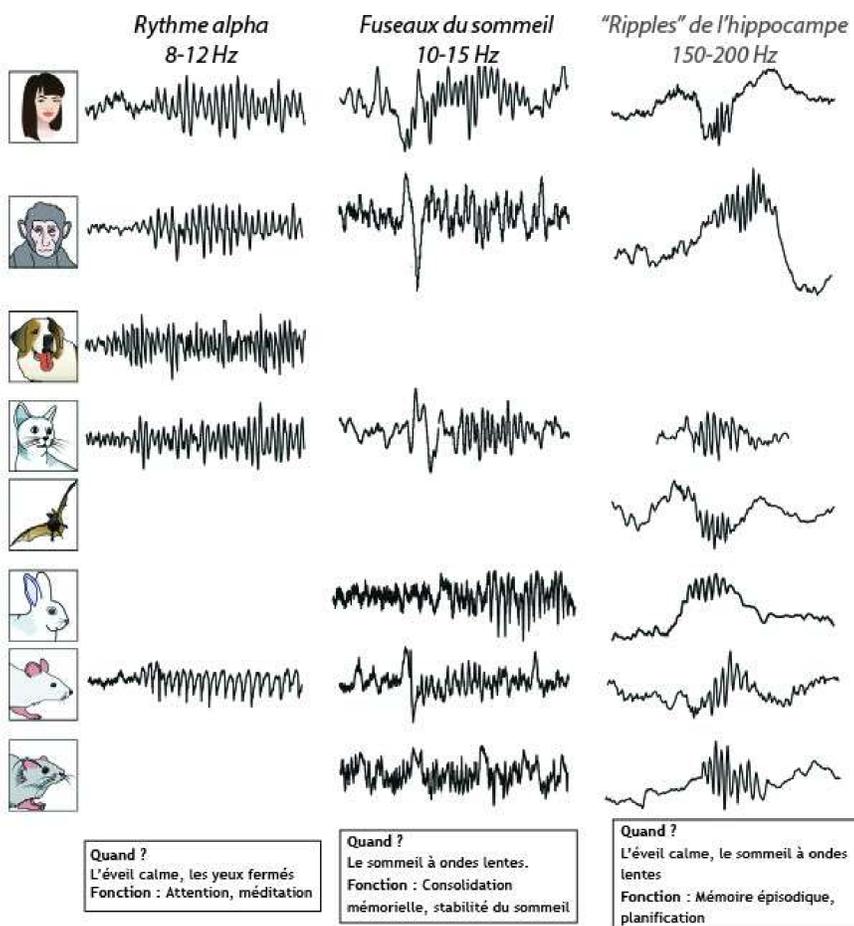
Dans le noyau sino-atrial du cœur, toutes les cellules sont des oscillateurs couplés électriquement. Leurs pulsations se synchronisent pour faire battre sans faute notre cœur environ 2 milliards de fois au cours de notre vie.



© amazon-aws

Les rythmes du cerveau

Comment notre cerveau coordonne-t-il la conversation de 100 milliards de neurones dans le temps et dans l'espace ? Une solution possible à ce casse-tête est la **synchronisation de groupes de neurones à travers des oscillations**. En effet, si l'on enregistre l'activité électrique dans une zone du cerveau pour estimer le niveau de synchronisation des neurones individuels, on observe alors de nombreux rythmes à des fréquences différentes qui correspondent souvent à des états cérébraux différents. Certaines oscillations se retrouvent chez plusieurs mammifères, suggérant un rôle important dans le fonctionnement cérébral.

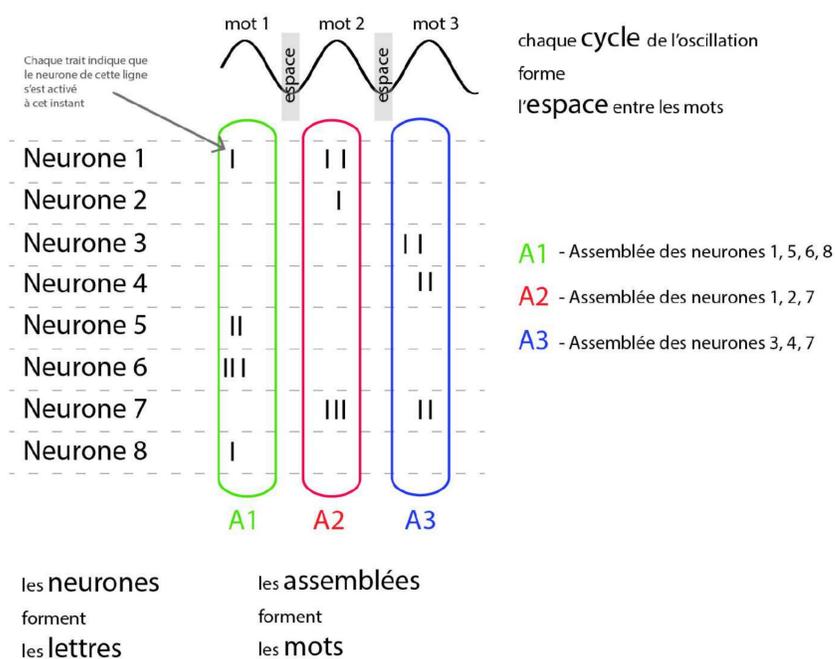


Adapté de Buzsaki et al., Neuron, 2013

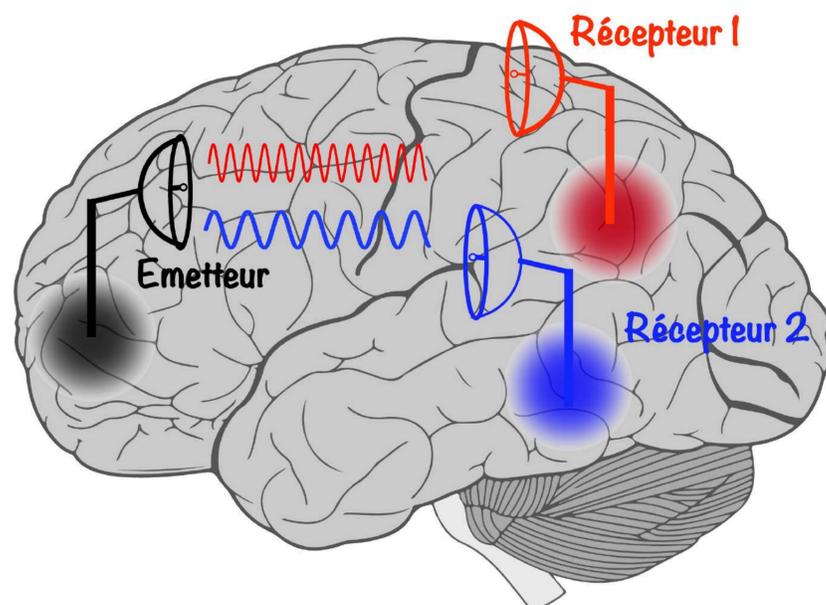
On peut formuler deux hypothèses sur l'organisation de la communication entre neurones.

Hypothèse 1 : la formation d'assemblées de neurones. Comme l'écriture combine des lettres pour former des mots, les oscillations cérébrales permettent de regrouper les impulsions électriques des neurones avec une règle simple : tous les neurones actifs au sein d'un même cycle forment un « mot » qu'on appelle une **assemblée cellulaire**. De même qu'une lettre apparaît dans plusieurs mots, un même neurone peut être actif au sein de plusieurs assemblées.

A chaque instant, les neurones combinent leur activité comme des instruments de musique dans un orchestre. Les neurones actifs au même moment forment une assemblée.



Hypothèse 2 : la communication par bandes de fréquence spécifique. Tout comme un utilisateur de radio ajuste la plage de fréquences pour choisir une station, une zone du cerveau peut modifier son dialogue avec les autres en changeant son activité oscillatoire. Imaginons une région du cerveau qui doit communiquer avec deux autres régions qui ont besoin d'informations différentes. Les neurones dédiés à la première information peuvent être synchronisés à une fréquence donnée et les autres neurones synchronisés à une autre fréquence. Ainsi les deux régions en aval peuvent écouter des informations différentes en se synchronisant à l'une des deux fréquences. Cette forme de communication a l'avantage d'être flexible : pour recevoir d'autres informations, il suffit de modifier la fréquence de synchronisation du groupe de neurones.

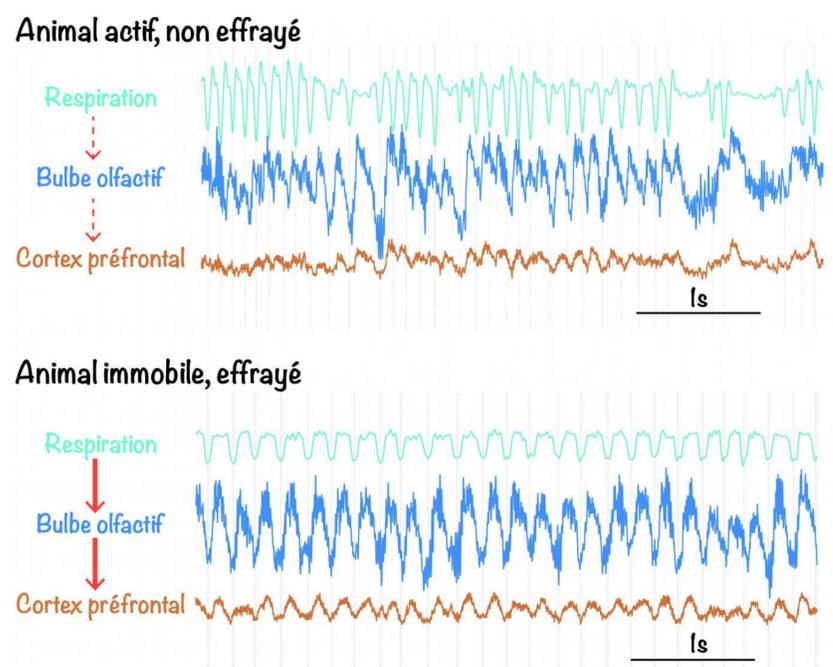


La respiration : rythme du corps et du cerveau

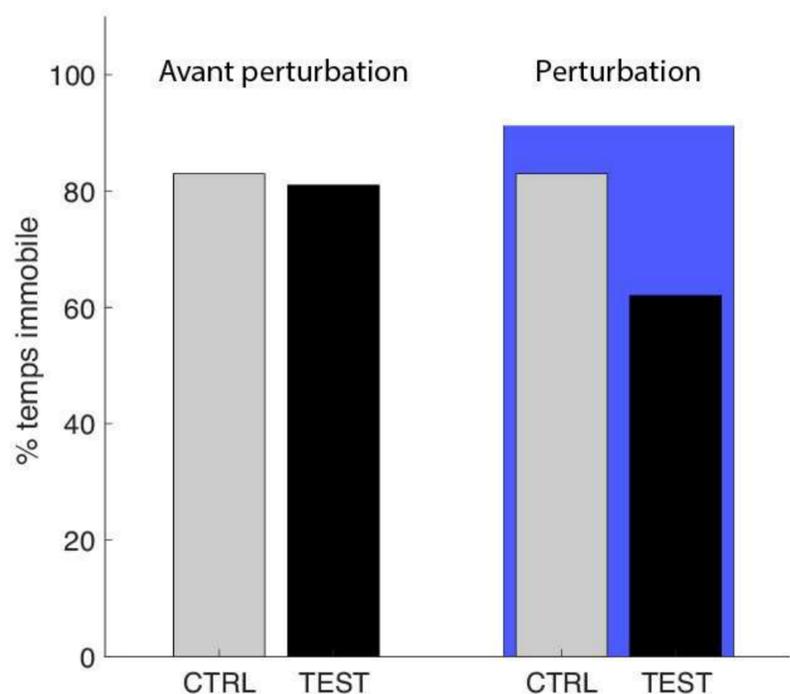
Nos émotions dépendent l'activité de nombreuses zones cérébrales comme l'amygdale et le cortex préfrontal qui doivent organiser leurs échanges d'information. Mais le propre d'une émotion est d'être fortement intégrée avec notre corps : pris de panique, notre cœur s'accélère, accablé de honte, nos joues nous brûlent.

Dans l'équipe MOBS, nous avons relié ces deux aspects de l'émotion dans le cas de la peur chez la souris. Nous proposons que **le rythme respiratoire joue un double rôle** : c'est une manifestation corporelle de l'état de peur, et une activité oscillatoire qui sert de support à la communication entre zones du cerveau.

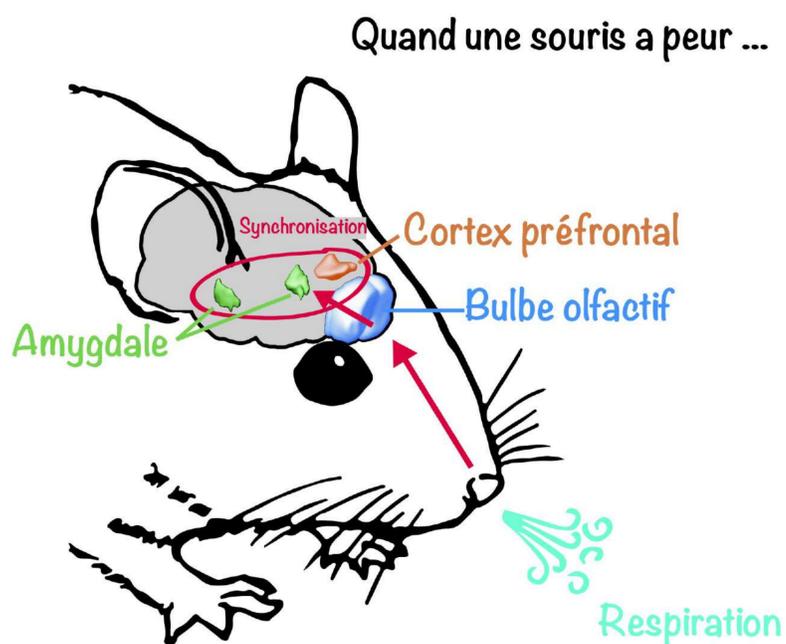
Lorsqu'une souris a peur, elle s'immobilise pour éviter la détection par les prédateurs. Son rythme respiratoire, proche de 4 Hz, est transmis au cerveau via le flux d'air dans les narines qui active le bulbe olfactif. Cette oscillation peut alors synchroniser l'activité dans **deux zones du cerveau importantes pour la peur : le cortex préfrontal et l'amygdale**. Nous avons montré avec nos collaborateurs que le dialogue entre ces deux zones augmente pendant le comportement de peur, grâce à la coordination de leur activité par un rythme commun : **le rythme respiratoire**.



Pour montrer son importance, nous avons perturbé ce rythme à 4 Hz. Nous avons brouillé l'oscillation dans le bulbe olfactif avec une autre oscillation imposée artificiellement. On observe alors que les animaux expriment moins d'immobilité liée à la peur. Le rythme respiratoire est donc essentiel pour engendrer le comportement de peur.



Les souris du groupe test et du groupe de contrôle montrent le même niveau d'immobilité avant la perturbation. Pendant la perturbation de l'oscillation du bulbe olfactif, les souris du groupe test passent moins de temps immobiles. Ceci suggère une atténuation du comportement de peur.



ESPCI

Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle de la Ville de Paris



Laboratoire plasticité du cerveau

5 équipes travaillant avec 3 modèles différents (la mouche, le rongeur et l'homme) pour comprendre comment le cerveau s'adapte et apprend.

Gènes et Dynamique des
Systèmes de Mémoire
Thomas Prétat



Douleur et Adaptation
Neuronale
Sophie Pezet



Interfaces
Cerveau-Machine
François Vialatte

Gènes, Circuits, Rythmes et
Neuropathologies
Serge Birman



Mémoire, Oscillations et
Etats Cérébraux
Karim Benchenane



L'équipe MOBS dirigée par Karim Benchenane



Projet 1 : Créer des souvenirs pendant le sommeil

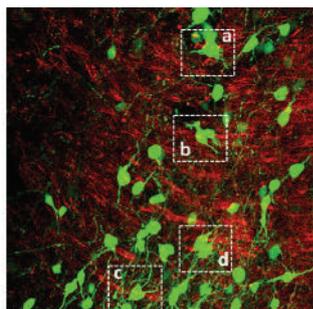
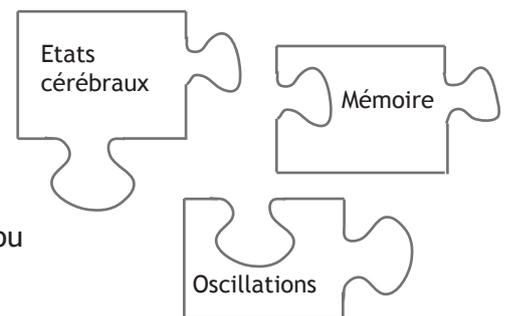
Pendant le sommeil, le cerveau «rejoue» certains souvenirs. Nous pensons que c'est à l'origine de son effet bénéfique sur la mémoire. **Comment fonctionnent les processus de mémoire pendant le sommeil?** Afin de répondre à cette question, l'équipe a mis en place une interface cerveau-machine pour manipuler les souvenirs pendant le sommeil.

Projet 2 : Le rôle des oscillations

Les états cérébraux se caractérisent par leur profil oscillatoire.

Pour les étudier, l'équipe doit relever deux défis :

- identifier et classer les différents types d'oscillations
- modifier les oscillations grâce à des stimulations sensorielles ou cérébrales



Des projections (en rouge) d'une zone corticale sur les neurones (en vert) de l'hypothalamus qui contrôlent l'endormissement. (T. Gallopin)

Projet 3 : Le contrôle cognitif du sommeil

Nous avons tous fait l'expérience d'un contrôle volontaire sur notre sommeil : se forcer à rester éveillé pour finir un projet ou essayer de s'endormir tôt la veille d'un événement important. L'équipe cherche à identifier les régions de haut niveau dans le cerveau qui nous permettent de moduler l'endormissement.