

# LES RYTHMES BIOLOGIQUES

## Que sont les rythmes biologiques ?

Les phénomènes biologiques ne sont pas continus ni constants.

ex :

- Le pouls (rythme biologique de très haute fréquence)
- Le cycle veille-sommeil
- Le cycle oestrien (chez les mammifères femelles)
- Les migrations saisonnières

Il y a des variations qualitatives et quantitatives discontinues et régulières = phénomène rythmique.

### A. DEFINITIONS

**Rythme biologique**= distribution temporelle périodique des phénomènes biologiques tant physiologiques que comportementaux.

**Chronobiologie**= étude de l'organisation dans le temps des êtres vivants (discipline récente = 1950)

### B. METHODE D'ENREGISTREMENT

#### Méthodes classiques de l'éthologie

Observation directe : ISS (Instantaneous Scan Sampling)

Relevé du comportement des animaux (plusieurs individus en même temps).

- Avantage : très précise → vision très qualitative de ce que fait l'animal
- Désavantage (ou inconvénient ...) : lié à un suivi d'un observateur (fatigue). Au niveau quantitatif, on est limité.

#### Méthodes spécifiques en chronobiologie : méthodes automatisées

- **ACTOGRAPHIE** = méthode de mesure de l'activité
  - En labo chez beaucoup de rongeurs. Rare dans cage connectée à PC qui va comptabiliser le nombre de tours en continu. → enregistrement sur de courtes ou longues périodes.
  - Avantage : données automatisées
  - Désavantage : mesure d'un seul individu (ne peuvent pas être ensembles).
- **TELEMETRIE**= mesure de la distance parcourue par un procédé acoustique.
  - Sur le terrain chez rongeurs ou en labo. Implantation intrapéritonéale. Méthode invasive. On regroupe des données comportementales et physiologiques (dans la cage, il y a une plaque réceptrice qui suit tous les déplacements de l'animal).
  - La température corporelle est en général enregistrée (ou le rythme cardiaque).
  - En conditions naturelles : le télémètre est placé sur l'animal comme un collier. Méthode non invasive. Les Données comportementales sont reçues pas une antenne relai.

- **ACTIMETRIE** = mesure des mouvements à l'aide d'un accéléromètre. Surtout chez l'homme : activité du bras pour savoir s'il y a des troubles (sommeil). Homme → animaux (primates)
- **TRAJECTOMETRIE** : mesure de la distance parcourue par suivi vidéo.

Ex : comme le TP avec les caillies.

- Intéressant pour faire des déplacements de groupe. Les animaux se reposent tous ensemble les uns contre les autres.

### C. METHODES D'ANALYSE

Représentation graphique :

**Actogramme** : évaluation de l'activité en fonction du temps.

Fig 1 : rongeurs

C'est une représentation particulière : on comptabilise par exemple le nombre de tours effectué par les animaux toutes les 10 min. tous les jours sont également représentés

Fig 2 : on fait des moyennes sur plusieurs jours.

Caractérisation paramétrique :

Fonction sinusoidale qui est la représentation théorique d'un rythme

**Période** = intervalle de temps qui sépare deux points identiques du cycle = durée d'un cycle appelée  $t(\tau)$

La période est l'inverse de la fréquence :  $t = 1/f$

**Phase** = état instantané du cycle. Elle permettra de comparer la phase d'un individu avec son environnement.

**Amplitude** = différence entre le milieu et la valeur max ou le milieu et la valeur min.

**Acrophase** = moment où la valeur max est atteinte.

Bathyphase = moment où la valeur min est atteinte.

**Bilan :**

Les rythmes sont mesurables directement ou automatiquement. Ils sont caractérisables par rapport à des paramètres mathématiques. La période permet de discriminer les différents types de rythmes.

## Les rythmes de période égale ou proche de 24h

### A. EN CONDITIONS NATURELLES

Les organismes vivent selon des cycles cellulaires.

La rotation de la terre sur elle-même :  $T = 23h56min, 4sec$

- L'alternance jour/nuit guide nos rythmes.
- Le nyctémère = espace de temps de 24h comprenant un jour et une nuit.  
Rythme journalier = rythme nyctéméral

La **photopériode** : répartition dans la journée, entre la durée de la phase lumineuse (photophase) et la durée de la phase obscure (sectophase ?)

Conditions photopériodiques :

→ LD= Light Dark (LD 12 :12 ou LD 14:10) (14= lux / 10 = obscurité)

Rythme journalier chez la caille → activité diurne

Chez le rat, c'est le contraire → actions locomotrices la nuit

**Bilan :**

Rythme journalier d'activité (ainsi que physiologique)

Tous les comportements ne suivent pas le même rythme.

Les espèces ont des rythmes différents

(cf cours « fonction des rythmes journaliers »)

## **B. EN CONDITIONS CONSTANTES**

= conditions de libre cours (free running)

**DD = obscurité constante**                      **LL= lumière constante.**

Est-ce que les animaux vont montrer une arhythmie s'ils sont en LL ou en DD ?

Ex : Ecureuil volant

→ On le met en DD, à T° constante et hygrométrie constante

→ On le met en isolement social et phonique durant 25 jours.

On remarque qu'il y a une alternance entre phase d'activité et d'inactivité. Il montre un rythme qui n'a pas de période de 24h mais de 23h30.

On démontre alors l'existence d'un **rythme circadien** = rythme endogène dont la période est comprise entre 20 et 24h (rythme produit par l'animal lui-même).

→ Cela prouve bien l'existence d'une horloge biologique

Cette période circadienne est comprise entre 20 et 28h. cette valeur dépend de l'espèce (est spécifique).

Ex : le hamster double son activité sur 48h.

Il n'y a donc pas de règles, ce rythme est propre à chaque espèce.

Cette période varie en fonction **de l'individu** :

- Variabilité interindividuelle :

Fig 5 : en DD, on constate une grande variabilité interindividuelle pour des animaux de la même espèce dans les mêmes conditions

- Variabilité intraindividuelle :

La période circadienne varie en fonction de l'état physiologique de l'animal

Ex : arrivée à maturité sexuelle → production de stéroïdes

Cette période varie en fonction des **conditions environnementales** :

Fig 8 : conditions constantes successives

Pour l'animal, avoir l'info DD est différent que d'avoir l'info LL → modification du rythme en LL.

- Les rythmes circadiens sont le fruit d'une horloge interne. La période varie quand même en fonction de l'état de l'individu ou des conditions environnementales.

## C. DETERMINANTS DES RYTHMES CIRCADIENS

### 1) *Facteurs génétiques*

Variabilité interindividuelle : certains animaux n'ont pas de rythme (65% rythmés, 35% arythmiques).

On prend les extrêmes : sélection divergente bidirectionnelle.

A partir d'une population d'origine (enregistrement de l'activité en DD):

Cailles rythmées → F1 (lignée R) → cailles rythmées

Cailles arythmiques → F1 (lignée A) → cailles arythmiques.

- On a donc un **déterminisme génétique** de ce phénotype circadien.

### 2) *Facteurs environnementaux*

Présence de la mère : maternés vs non maternés

Caractéristique rythmique de la mère :

Chez la caille, on remarque que les mères rythmées ont 90% des petits qui présentent un rythme circadien vs 60% pour les mères non rythmées. On voit là l'influence maternelle : une mère apporte une structure de ce rythme mais que, selon le phénotype circadien de la mère, ne va pas influencer de la même manière les petits.

On a ici une transmission non génétique des caractéristiques rythmiques maternelles.

Déterminants des rythmes circadiens.

- Les déterminants génétiques ont été mis en évidence chez la drosophile, les souris et la caille.
- Les déterminants environnementaux (influences sociales) sont sujets à moins de travaux :
  - ✚ Effets de la mère durant les premiers stades de vie postnatale (oiseaux/mammifères)
  - ✚ Effets du rythme de la mère durant la phase prénatale (mammifères)

## D. SYNCHRONISATION DES RYTHMES CIRCADIENS A L'ENVIRONNEMENT

### 1) *L'alternance jour/ nuit*

Effet de l'alternance jour/nuit sur le rythme circadien :

On fait un transfert de conditions constantes en conditions photopériodiques.

En LD, le rythme persiste avec une période de 24h imposée par l'alternance jour/nuit → phénomène de **synchronisation externe** ou entrainement.= le fait que l'organisme soit synchronisé avec son environnement. (le rythme n'est alors plus de 22h30 comme on a vu précédemment)

On définit ainsi les facteurs de l'environnement comme des **synchroniseurs** (ou *Zeitgeber* ou Agents entrainants).

Reinberg (1980) :

**Synchroniseur** = Tout facteur cyclique de l'environnement capable de modifier un ou plusieurs paramètres d'un rythme biologique (période, phase, acrophase...)

L'alternance jour/nuit va être un facteur important

**Synchronisation externe :**

- ✚ Le cycle exogène (cycle de l'environnement : ici alternance jour/nuit) impose sa période au rythme endogène (circadien).
- ✚ Le cycle exogène impose une relation de phase fixe avec le rythme endogène. (= faire correspondre le cycle de l'animal avec le cycle de l'alternance jour/nuit).
  - ✓ Ex : pour un diurne, il faut que sa phase active soit pendant la photophase.

Est-ce que c'est vraiment le rythme endogène qui favorise la synchronisation avec l'environnement ?

- La fonction du rythme est elle de synchroniser ?
- Synchronisation rythmés vs non rythmés ?

Si on a un individu avec un phénotype rythmé, il est bien synchronisé avec l'alternance jour/nuit.

Si on a un individu non rythmé au niveau circadien, il s'ajuste au bout d'une journée.

- ➔ Cela veut dire que la synchronisation de l'individu à son environnement va être facilitée par la présence de ce rythme circadien. Si on n'a pas d'horloge interne, on a plus de mal à s'ajuster.

Chez le pinson :

On mesure l'activité locomotrice chez deux individus.

A gauche, on transfère de condition constante à des conditions photopériodiques

A droite, on fait des décalages de phases (l'animal est toujours en condition photopériodique mais on bouge les horaires) ➔ on fait même une opposition de phase complète entre les deux individus.

Si l'animal n'avait pas d'horloge interne, l'animal serait complètement rythmé par l'alternance jour/nuit. En effet, son horloge interne met plusieurs jours avant de s'ajuster à l'alternance.

si on fait le transfert quand il est en phase active, il s'ajuste vite alors que si on le fait pendant sa phase de repos, il va mettre plusieurs jours à s'ajuster.

Pulse de lumière :

L'animal (souris ici) peut être synchronisé avec une heure seulement de lumière par jour : le cycle exogène appliqué ici est appelé le pulse de lumière.

Ici, c'est le passage lumière ➔ obscurité, qui va être une information déterminante pour l'animal car c'est une nocturne (chez les diurnes, c'est l'inverse).

Le **cycle lumineux** est le principal synchroniseur chez les homéothermes. D'autres facteurs environnementaux peuvent jouer le rôle de synchroniseur.

## 2) Les cycles journaliers de température

On a mis des drosophiles dans 6 conditions différentes de température.

Valeur minimale : 10°C

Valeur maximale : 26°C

C'est le même cycle pour tous les groupes mais il est calé différemment.

Le pic d'éclosion varie d'un groupe à l'autre et se fait au moment du minimum de T° (10°C)

Donc le pic d'éclosion est synchronisé avec la température la plus basse. Dans ce cas là, la température devient le synchroniseur le plus fort.

→ Il a été montré qu'un cycle avec un écart de 0,9°C suffit à entrainer le rythme du lézard.

La température est un puissant synchroniseur chez les hétérothermes.

On a testé le cycle de température chez des homéothermes (singe écureuil) :

Les animaux ne réagissent pas de la même manière :

Les individus 1 et 2 montrent un rythme de 24h et leur phase d'activité correspond à la phase de faible température (16°C) : ils ont bien été synchronisé par ce cycle de température exogène.

L'individu 3 ne présente pas de cycle de 24h ; il essaie d'entrainer son activité sur le cycle exogène mais n'y arrive pas : c'est la coordination relative.

Chez les homéothermes, le cycle de température est un faible synchroniseur.

En effet, un cycle avec un écart de 30°C est nécessaire pour synchroniser le rythme du moineau.

Le rythme de température doit être plus ample pour synchroniser les homéothermes (non, ce cours n'est pas du tout une longue suite de répétitions).

### 3) Les cycles d'alimentation

Les animaux (ici, moineau) ont été mis en condition de lumière constante et ont été enregistré durant une année.

On leur applique des régimes alimentaires différents. Tout d'abord 12h de disponibilité alimentaire et 12h de restriction, puis 16h de disponibilité, puis 20h et 8h.

L'individu montre bien une activité synchronisée avec ce cycle alimentaire sauf pour la condition où il y a 20h de disponibilité alimentaire où les animaux ne sont plus ajustés sur 24h. 20h de disponibilité est donc trop pour synchroniser les animaux.

Chez les souris, il semble y avoir plusieurs horloges internes : une alimentaire et une alternance jour/nuit. Chez certaines espèces elles se dissocient alors que la plupart du temps, elles fonctionnent ensembles.

Le cycle de disponibilité alimentaire est un synchroniseur. Une restriction alimentaire peut entrainer totalement ou partiellement le rythme circadien selon les espèces.

### 4) Les cycles sociaux

On va avoir les partenaires sociaux, sexuels et les congénères familiaux.

#### **Effet des cycles sociaux sur les rythmes :**

Pour le départ de la chasse, les chauves souris vont commencer à s'activer au début de la nuit. Toutes ces activités peuvent donner des informations aux autres chauves souris pour se synchroniser.

Les scientifiques ont isolé des chauves souris dans des caves durant 50 jours et ont enregistré leur activité : sans référence temporelle, l'animal est en free running.

Autre expérience : l'animal est mis dans une cage opaque et on le met dans la grotte où il y a la colonie (il entend l'agitation quotidienne des autres). Dans ces conditions, l'animal présente un cycle de 24h calé sur la colonie. Les informations acoustiques qui émanent de la colonie sont importantes pour la synchronisation du rythme circadien.

➔ L'activité des partenaires sociaux synchronisent l'activité circadienne.

### **Effet des cycles sexuels sur les rythmes :**

Artificiellement, on applique un cycle journalier : on envoie un chant de mâle compétiteur (moineau). 3/10 sont entraînés totalement. 7/10 sont entraînés partiellement.

### **Effet des cycles maternels sur les rythmes :**

La lapine met bas dans un terrier. Les lapereaux naissent immatures et la femelle ne reste pas avec eux et va venir une fois par jour les allaiter.

Très vite, les lapereaux anticipent l'arrivée de la lapine. Le 11<sup>ème</sup> jour, les expérimentateurs ont empêché la lapine d'allaiter. Les lapereaux ont tout de même gardé leur rythme

### Synchroniseurs sociaux :

Les synchroniseurs sociaux ont des effets qui varient selon les espèces. Les effets sont puissants si le milieu est contraignant.

## **Les rythmes de période égale ou proche d'un an**

### **1) EN CONDITIONS NATURELLES**

Rythme saisonnier hormone/ comportement

Chez le chevreuil on a des pics de testostérone en juillet et août. Au mois de septembre, tous les animaux ont les testicules qui régressent.

La femelle est en oestrus (moment de l'ovulation) pendant 24 à 48h.

On a des corrélations entre hormones et comportements (co variations annuelles). La testostérone va donc expliquer le comportement territorial.

Chez les rongeurs :

Il y a toujours une saisonnalité de la reproduction. La mauvaise saison est ici passée sous forme d'hibernation qui se traduit par un repos sexuel complet.

Certaines espèces hibernent mais d'autres (les oiseaux) migrent.

Cycle annuel d'un oiseau de zone tempérée :

Hiver :

- Comportement : regroupement hivernal,

Printemps début :

- Physiologie : mue pré-nuptiale (changement de plumes), accumulation lipidique
- Comportement : hyperphagie pré-migratoire, migration

Printemps suite :

- Développement gonadique (sur les aires de reproduction)

- Comportement : établissement d'un territoire puis accouplement

Eté :

- Comportement : soin aux jeunes
- Physiologie : régression gonadique

Automne :

- Comportement : hyperphagie prémigratoire, migration
- Physiologie : mue postnuptiale, accumulation lipidique

Cycle annuel d'un oiseau en zone équatoriale :

Hiver :

- Physiologie : mue, accumulation lipidique, développement gonadique
- Comportement : établissement d'un territoire, accouplement

Printemps :

- Physiologique : régression gonadique
- Comportement : soin aux jeunes

Eté :

- Physiologie : mue, accumulation lipidique, développement gonadique
- Comportement : établissement d'un territoire

Automne :

- Physiologie : régression gonadique
- Comportement : accouplement (début), soin aux jeunes

## 2) *En conditions constantes :*

= sans référence saisonnière

- Obscurité constante
- Lumière constante
- Conditions photopériodiques constantes

### Tests chez les spermophiles :

Il a été gardé à 12h de lumière et 12h d'obscurité pendant 26 mois. Il est alimenté en continu à température constante de 21°C, donc aucune référence à la saisonnalité.

On a enregistré la prise alimentaire et le poids, ainsi que les phases d'hibernation.

On constate que même si l'animal n'a pas de référence saisonnière, il va montrer un rythme saisonnier et va hiberner alors qu'il est à 21°C et a accès à de la nourriture (ahh ces spermophiles alors).

Les phases d'hibernation commencent au mois d'octobre, puis en septembre, l'année suivante. Il y a donc un rythme saisonnier mais la période n'est pas de 12 mois mais de 11 mois.

**Rythme circannuel** = rythme endogène dont la période est proche de 12 mois.



Le rythme circannuel a également été mis en évidence chez les oiseaux :

La Fauvette à tête noire a été suivie pendant 8 ans. Les scientifiques ont repérés les mues printanières et on remarque un décalage d'une année sur l'autre : il anticipe de deux mois la mue à chaque fois. Donc ici, le rythme circannuel est de l'ordre de 10 mois.

Rythme circannuel :

- Le rythme apparaît identique en LD, DD ou LD 14 :10
- La période est généralement inférieure à 12 mois.
- Ce rythme a été trouvé chez les mollusques, poissons ...

### 3) Fonction des rythmes circannuels

On a une fonction de synchronisation des hormones internes à l'environnement. Cela va donc servir à l'animal de se synchroniser :

- Facteurs ultimes = facteurs distaux  
= facteurs de l'environnement favorables à la survie des jeunes en couvrant aussi les besoins énergétiques des parents.  
-> température, disponibilités alimentaires..

Donc pour avoir une bonne reproduction, les animaux doivent se synchroniser sur ces facteurs.

- Facteurs immédiats = facteurs proximaux  
= facteurs de l'environnement qui informent de l'évolution des facteurs ultimes
  - Action par anticipation
  - Le premier facteur utilisé pour anticiper est la photopériode.

Synchronisation des rythmes circannuels :

**Photopériodisme** : capacité à mesurer la durée du jour, à discriminer les jours courts, les jours longs, les jours croissants et décroissants.

On arrive alors à discriminer différents types d'espèces :

Chaque espèce, selon la durée de la gestation, va déclencher sa période de reproduction à différents moments :

- Espèces de jours longs : les animaux vont déclencher leur reproduction au solstice d'hiver pour déclencher la gestation au printemps (furet, cheval)
- Espèces de jours courts déclenche la reproduction en jours décroissants pour s'accoupler en jours longs (gestation = 2 mois). Renard
- Espèces de jours courts '2) : déclenchent leur reproduction en été pour commencer la gestation en automne. Cerf

## Les autres types de rythmes

### 1) Le rythme ultradien

**Rythme ultradien** = rythme endogène dont la période est inférieure à 20h.

Cycle ultradien du sommeil : **hypnogramme** ( évolution au cours de la nuit des différents stades de sommeil).

Il y a cinq stades de sommeil :

- Le sommeil orthodoxe (quatre stades) : plus on tombe dans le sommeil profond, plus nos fonctions ralentissent
- Le sommeil paradoxal : phase onirique qui ne dure qu'un temps pour repartir ensuite en stade de sommeil orthodoxe.

Chez l'homme, c'est entre 90 et 120 min.

Chez l'animal, on trouve le rythme ultradien au niveau du comportement :

- Chez la poule, les phases de repos sont de 30 min

Rythme ultradien :

- Période est spécifique
- Indépendante dans conditions lumineuses (30min en LD et en LL)

Parmi les rythmes ultradiens, on va avoir :

- Le cycle des marées : jour lunaire = 24,8h
- 2 marées par jour → rythme tidal (circatidal) = 12,4h

Les scientifiques ont regardé l'activité des crabes sans marée :

On remarque qu'il y a toujours une activité liée au balancement des marées jusqu'à 11 jours mais qu'après, ça disparaît. (rythme bimodal de 12,4h pendant 11 jours)

## 2) *Le rythme infradien*

**Rythme infradien** = rythme dont la période est supérieure à 28h.

Par définition, les rythmes saisonniers et circannuels sont infradiens.

Cycle sexuel chez les mammifères

- Le cycle de température chez la femme (rythme circamensuel : t=28jours)
- Autres cycles sexuels : souris = 3-4jours, chimpanzé : 36 jours

Certains cycles infradiens vont être liés au cycle lunaire (cycle lunaire= 29,5jours)

**Rythme circalunaire**

## CONCLUSION

- Les rythmes sont ubiquistes
- Chaque organisme va présenter de nombreux rythmes de périodes différentes
- Les structures physiologiques et mécanismes à préciser ?
- Valeur adaptative en milieu naturel ?