

## La respiration des embryons d'oiseaux

### I – Structure de l'œuf

Un œuf d'oiseau possède une coquille rigide en carbonate de calcium assurant la protection de l'embryon. Cette coquille est percée de milliers de pores qui relient ses surfaces externe et interne en permettant le passage de gaz.

Un œuf contient initialement tous les nutriments nécessaires au développement d'un embryon, à l'exception du dioxygène. La surface interne de la coquille est recouverte de deux membranes. Celles-ci évitent une évacuation trop importante de l'eau initialement contenue dans l'œuf (qui pourrait conduire à une déshydratation). En effet, il n'y a aucun apport extérieur d'eau au cours de l'incubation. Or, suite à la consommation des réserves énergétiques de l'œuf (surtout des lipides) il y a une production d'eau métabolique. L'œuf doit alors l'éliminer pour maintenir sa teneur en eau constante. Au fur et à mesure que l'eau est libérée, de l'air pénètre dans la coquille et il s'accumule dans une cavité appelée chambre à air (on la voit en haut sur la figure, entre les deux membranes interne et externe).

L'embryon se développe dans un milieu aqueux. Il existe un organe vascularisé permettant la respiration du poussin nommé membrane chorio-allantoïque. Il est l'équivalent aviaire du placenta chez les mammifères.

D'après Rahn, Ar et Paganelli (1986), pendant ses 21 jours d'incubation, un œuf de poule pesant environ 60 grammes consomme 6 litres d'oxygène ; il rejette 4,5 litres de dioxyde de carbone et il libère 11 litres de vapeur d'eau (soit environ 9 millilitres d'eau c'est-à-dire environ 15 % de sa masse initiale).

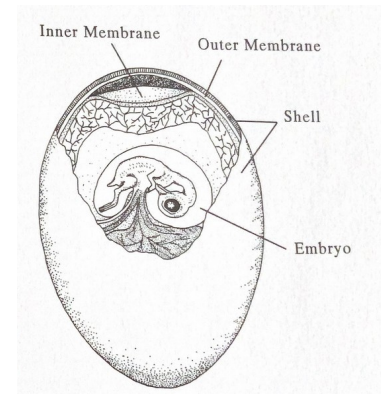


Illustration 1: schéma d'un œuf d'oiseau

Nous allons étudier comment l'air passe à travers la coquille d'un œuf d'oiseau pour permettre le développement d'un poussin.

### II - La diffusion

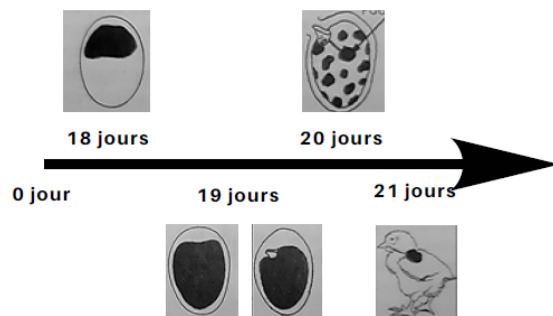


Illustration 2: cycle d'incubation

Les échanges gazeux se produisent à travers les pores grâce au phénomène de diffusion. Ce phénomène est le même que celui observé dans le cas de la trachée des insectes.

Pour un œuf de poule, on observe que l'embryon ne respire que par diffusion les 18 premiers jours de son développement dans l'œuf. Ensuite, il perce la chambre à air puis la coquille et commence à respirer avec ses poumons (par convection).

## 1) Définition

La diffusion est un mouvement de particules à l'échelle microscopique. Il n'y a pas de déplacement macroscopique, contrairement à la convection.

Pour que la diffusion d'un gaz ait lieu entre deux zones, il doit y avoir un gradient de concentration de ce gaz.

Aussi, plus le gradient de concentration est élevé, plus le phénomène de diffusion est important. La diffusion tend à rééquilibrer les concentrations. Le flux des particules est opposé au gradient de concentration. C'est à dire que des molécules d'O<sub>2</sub> se déplacent de la zone la plus concentrée en O<sub>2</sub> vers la zone moins concentrée.

La différence de concentration d'O<sub>2</sub> à travers la coquille d'un œuf d'oiseau est de 2,8 mol / m<sup>3</sup>. En effet, la teneur en O<sub>2</sub> de l'air est de 9,35 mol / m<sup>3</sup> et l'oisillon peut maintenir une concentration d'O<sub>2</sub> d'environ 6,55 mol / m<sup>3</sup>. Cette différence est la même pour toute taille d'œuf (d'après Rahn et Paganelli).

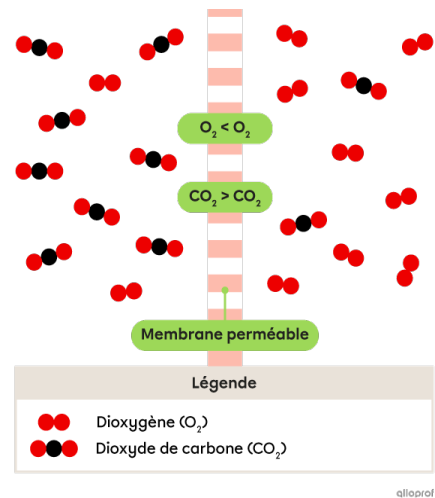


Illustration 3: sur la diffusion

## 2) Loi de Fick

Grâce à la première loi de Fick, on peut exprimer le flux  $\phi$  de dioxygène de l'extérieur vers l'intérieur d'une coquille d'épaisseur  $l$  comme :

$$\phi = D A \frac{\Delta[O_2]}{l} \quad (1) \quad \text{avec}$$

$\Phi$	(en mol/s)	c'est aussi le taux de livraison d'O <sub>2</sub> à l'oisillon
$D$	(en m <sup>2</sup> /s)	coefficient de diffusion du dioxygène dans l'air
$A$	(en m <sup>2</sup> )	surface cumulée des pores
$\Delta[O_2]$	(en mol/m <sup>3</sup> )	différence de concentration d'O <sub>2</sub> entre l'extérieur et l'intérieur de la coquille

Le coefficient de diffusion dépend de la particule qui se diffuse et du milieu dans lequel se produit la diffusion.

La dimension et le nombre de pores varient selon les espèces. Cependant, comme on le voit dans cette équation, c'est seulement leur surface cumulée et leur longueur (égale à l'épaisseur de la coquille) qui déterminent la quantité d'O<sub>2</sub> pouvant traverser la coquille en une seconde et donc la conductance (c'est-à-dire la perméabilité aux gaz) de la coquille.

Une augmentation de l'épaisseur de la coquille entraînerait une diminution du taux de livraison d'O<sub>2</sub> la traversant. Pour que ce taux ne diminue pas, il faut donc que la surface des pores soit plus importante. Une coquille plus épaisse pourrait mieux protéger l'embryon. Cependant, le besoin en O<sub>2</sub> et le fait que l'oisillon doit être capable de percer la coquille peuvent expliquer la fragilité d'un œuf.

### 3) air/eau



Illustration 4: œuf de raie

Le coefficient de diffusion du dioxygène est 10 fois inférieur dans l'eau que dans l'air. Ainsi, pour garder un taux de livraison d'O<sub>2</sub> suffisant, un œuf de poule devrait avoir une surface cumulée de pores huit fois supérieure à sa surface totale. En comparaison avec les œufs des oiseaux, les œufs aquatiques devraient avoir une coquille entièrement perméable au dioxygène, avoir un taux métabolique (besoin en O<sub>2</sub>) beaucoup plus faible et une taille bien plus petite. Nous reparlerons ultérieurement de l'influence de la taille d'un œuf et du taux métabolique sur la diffusion.

On peut prendre l'exemple d'un œuf de raie qui fait 10cm de large mais est aplati avec une enveloppe perméable au dioxygène. Enfin, dans l'eau il faut aussi ajouter un phénomène de convection car la diffusion ne suffit pas à l'apport vital en dioxygène.

## III – Estimation de la surface des pores

Comme expliqué précédemment, l'oiseau requiert une source d'oxygène et un moyen de dissiper le dioxyde de carbone pour se développer. Le phénomène de diffusion permet le passage des gaz via les pores de la coquille. On peut se demander quelle surface de pores est nécessaire pour permettre l'apport vital en dioxygène.

### 1) Modèle de l'œuf sphérique

Tout d'abord, on admet que l'organisme en développement a un taux métabolique  $M$  (en mol/m<sup>3</sup>.s). Ce taux métabolique correspond à la quantité de dioxygène consommée par unité de volume et de temps. On suppose, pour simplifier, que l'œuf est sphérique.

La demande globale du poussin en dioxygène par unité de temps (notée  $B$ , en mol/s) est donc égale au taux métabolique multiplié par le volume de l'œuf :

$$B = \frac{4\pi r^3}{3} \cdot M \quad (2) \quad \text{où } r \text{ est le rayon équivalent de l'œuf}$$

La surface de l'œuf augmente avec le carré de la longueur de l'œuf. Le taux d'utilisation de l'oxygène par l'embryon augmente quant à lui avec la masse de l'embryon ou avec le volume de l'œuf et donc avec le cube de la longueur de l'œuf. Pour illustrer notre propos, les œufs d'autruche, qui peuvent peser 1,5 kg, doivent avoir une surface de pores par surface de coquille plus importante que les œufs des colibris, qui peuvent peser moins de 1 gramme, comme nous le verrons plus loin.

Notons  $\psi = A/S$  le rapport de la surface cumulée des pores  $A$  et de la surface totale  $S$  de l'œuf, et  $ks = l/r$  le rapport de l'épaisseur  $l$  de la coquille et du rayon de l'œuf

L'équation (1) donnant le taux de livraison du dioxygène devient :

$$\phi = D S \psi \frac{\Delta[O_2]}{ksr} \quad (3) \quad \text{où } S = 4\pi r^2$$

Pour la survie de l'oisillon, il est nécessaire que le taux de livraison du dioxygène et le besoin en dioxygène ( $B$ ) soient égaux. En écrivant  $\phi = B$  on trouve une relation nous donnant  $\psi$ , c'est-à-dire la fraction de surface de coquille de l'œuf qui doit contenir les pores :

$$\psi = \frac{M ks r^2}{3 D \Delta[O_2]} \quad (4)$$

## 2) Quelques valeurs

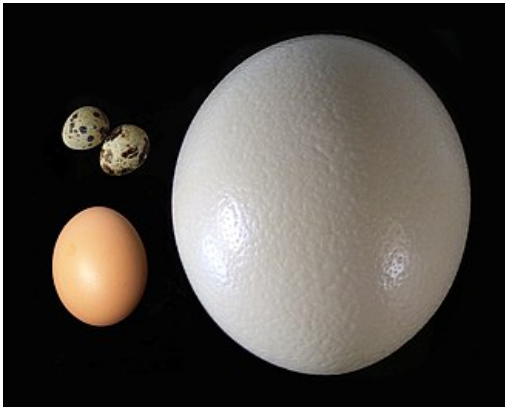


Illustration 5: autruche, poule et caille

Dans le cas de l'œuf d'une poule :

- $k_s \sim 0,02$  ;
- $M(\text{maximal}) \sim 0,006 \text{ mol / m}^3 \text{ s}$  ;
- le rayon d'une sphère à volume équivalent au volume de l'œuf est de 2,3 cm ;
- $\Delta[\text{O}_2] = 2,8 \text{ mol / m}^3$  ;
- $D = 0,176 \text{ cm}^2 / \text{s}$
- En faisant le calcul (4), on trouve le pourcentage de la surface de la coquille qui doit contenir les pores :  $\psi$  (poule) = 0,04 %.

Si on admet que  $k_s$  et  $M$  sont les mêmes pour tous les oiseaux, on trouve que pour un œuf de colibri :

$$\psi (\text{colibri}) = 0,006 \% \text{ avec } r = 3 \text{ mm}$$

et pour un œuf d' autruche :

$$\psi (\text{autruche}) = 0,37 \% \text{ avec } r = 7 \text{ cm}$$

En réalité, le rapport épaisseur sur rayon équivalent  $k_s$  est plus petit pour les œufs plus gros, probablement pour répondre à la nécessité d'avoir une coquille assez fragile pour que le poussin puissent s'échapper. On a donc surestimé la fraction de surface des pores pour une autruche.

On remarque que la surface cumulée des pores est très petite (moins de 1%) devant la surface totale d'un œuf. Cela est possible dans l'air grâce au grand coefficient de diffusion du dioxygène. Cela est aussi nécessaire car de même que les membranes sur la surface intérieure de la coquille limitent les pertes d'eau ; de même une trop grande surface de pores, tout en augmentant la possibilité de diffusion, entraînerait une trop grande perte d'eau.

## IV – Bibliographie

### 1) texte

- Article *Birds' Eggs*
- *1P003\_C5\_Phenomenes\_de\_Diffusion\_2019.pdf* (Université de la Sorbonne)
- *L'organisme dans son milieu*, tome 2 « l'organisme en équilibre avec son milieu », Y. Turquier

### 2) images

- [www.alloprof.qc.ca](http://www.alloprof.qc.ca)
- wikipedia