UNIVERSITE PAUL SABATIER

UE BIOMECANIQUE
Compte Rendu CC1

Trachee des insectes

Élèves :
Aimane SBAI
GregoireLABRID

Enseignant :
Patricia CATHALIFAUD

9 mars 2023

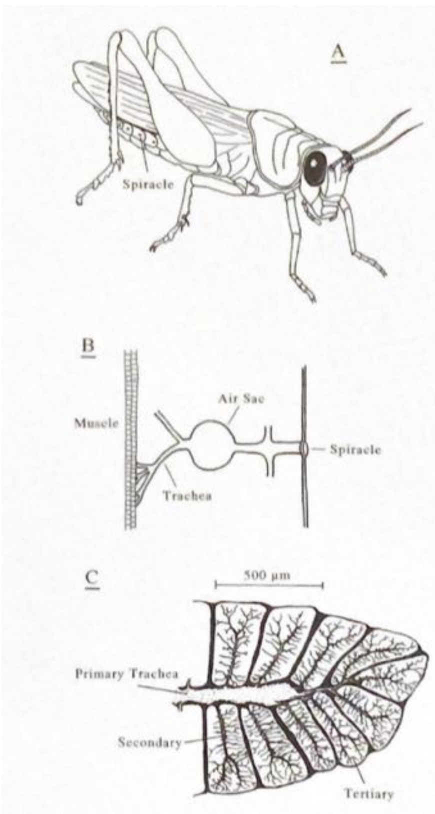
Table des matières

1 Introduction

Contrairement aux petits organismes qui se déplacent lentement, il existe de grands organismes pour lesquels la diffusion pure est primordiale. Dans cette présentation, nous allons étudier ce mécanisme de diffusion en prenant pour sujet les échanges gazeux chez les insectes.

2 La trachée

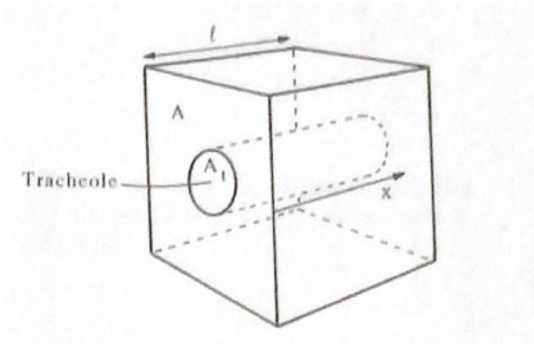
On sait déjà que la viscosité a un impact sur la conception des systèmes respiratoires et que les insectes peuvent aisément pomper de l'air par les plus gros tuyaux de l'arbre tracheal(trachée primaire).
Cependant les tuyaux qui acheminent l'air vers les cellules du corps de l'insecte sont bouchées a leurs extremités et ne permettent donc pas une ventilation actives, ces petits tuyaux constituant les trachée secondaires et tertiaires et les tracheoles peuvent mesurer jusqu'à 0.2 μm de diamètre a leur partie la plus fines et mesurer jusqu'à 1mm de long.
Dans le cas des insectes volant, ces minuscules tubes non ventilés doivent etres capable de fournir de l'oxygenes aux cellules environnante des muscle de vol a un rythme incroyable. A titre d'exemple, les muscle de certains insectes en phase de vol consomment de l'oxygenes de l'ordre de 6.5 moles par m^3 de tissues par secondes, En d'autres termes, chaque mètre cube de muscle consomme l'oxygène contenu dans un mètre cube d'air toutes les 1,3 secondes.



Sur la figure A suivante, on peut voir que l'orifice d'aération des criquets se situe sur l'abdomen, en observant la figure B, on remarque que ces orifices mènent à un sac d'air puis a la trachée avant d'arrivée au muscle, trachée qui se constituent elle-même de plusieurs ramification comme on peut le voir sur la figure C.
Il est légitime de se demander :
Est-ce que la diffusion peut-elle réellement fournir de l'oxygène à cette vitesse ?
Un tel système, pourrait-il fonctionner dans l'eau ?

3 Loi de Fick

Pour répondre à ces questions, les scientifiques, on considérait un modèle simplifié de trachées, de trachéoles et du tissu musculaire environnant, modèle représenter dans la figure suivante :



On sait que chaque trachée tertiaire transmet de l'oxygène à une portion des muscles, le schéma précèdent permet de montrer le système muscle+trachée et a parmi a calculer la taille maximale d'une trachée a l'aide de l'équation de Ficks qui va être explicité par la suite.
Le muscle est représenté par un cube de section A et de longueur l, et la trachéoles comme un tube creux de section A_t.
On appelle ζ le rapport At/A dont Weis-Fogh a montré qu'une valeur typique était de 0,1. X représente la longueur de la trachée, c'est-à-dire que x=0 a l'entrée de la trachée (là ou elle est en contact avec l'aire) et x=l a l'extrémité bouchée de la trachée On considère que le muscle consomme de l'oxygène à une vitesse de M mol.$m-3.s-1$, on prendra comme volume le volume total (trachee+muscles) pour simplifier . Grace a cela on peut donc déterminer la vitesse a laquelle l'oxygène doit s'écouler le long de la trachée a n'importe quel x. Le volume du muscle vaut donc A(l-x) a tout point x et ce même volume de muscles consomme de l'oxygène à un taux de A(l-x)M.
Comme dans ce type de système respiratoire, la diffusivité est très importante il faut donc que tout cet oxygène circule par diffusion à travers les trachées à tout x.
L'équation de Ficks nous dit que la densité du flux d'oxygène le long de la trachée (en moles par surface trachéale combinée par seconde) est proportionnelle au coefficient de diffusion et au gradient de concentration.

D'apres la Loi de Fick :

$$\frac{dm}{dt} = -D * \frac{dC}{dx} * S$$

De plus, si on considère que la vitesse à laquelle l'oxygène est consommé par les muscles est égal a la vitesse a laquelle la trachée fournit cette oxygène on obtient.

D'apres cette derniere équation :

$$\text{A(l-x)M} = \text{-D}_m * A * \frac{dC}{dx}$$

On rearrange pour avoir la concentration d'un cote et le reste de l'equation de l'autre :

$$\Longleftrightarrow -dC = \frac{A(l-x)M}{D_m * A} dx$$

On intègre entre 0 et l pour faire apparaître ΔC qui représente la différence de concentration en oxygène entre l'entrée de la trachée et son bout bouchée

$$\Longleftrightarrow \textstyle\int_0^l \frac{A(l-x)M}{D_m * A} dx$$

$$\Longleftrightarrow \frac{M}{D_m} * \textstyle\int_0^l xdx$$

$$\Longleftrightarrow \frac{Ml^2}{2D_m} = \Delta C$$

Finalement, on peut utiliser cette équation pour déterminer la longueur maximale d'une trachée à ΔC donnée.

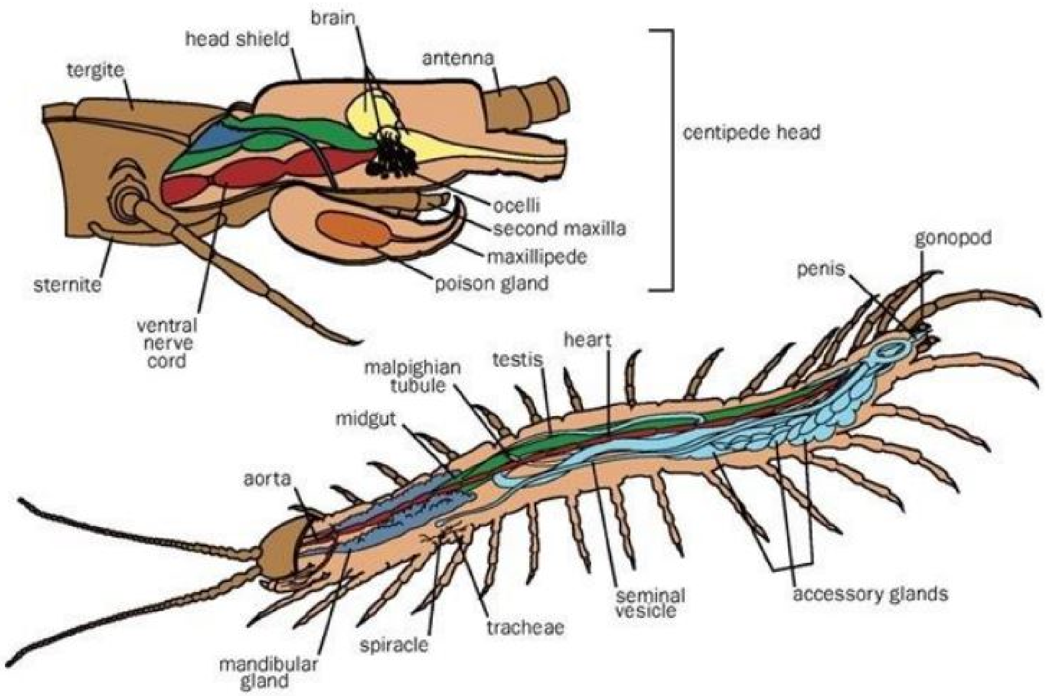
$$\Longleftrightarrow \boxed{\text{l}_{max} = \sqrt{\tfrac{2\Delta C D_m \zeta}{M}}}$$

Grace a cette équation, on peut donc déterminer la longueur max de la trachée d'un insecte grâce à sa « consommation » d'oxygène.

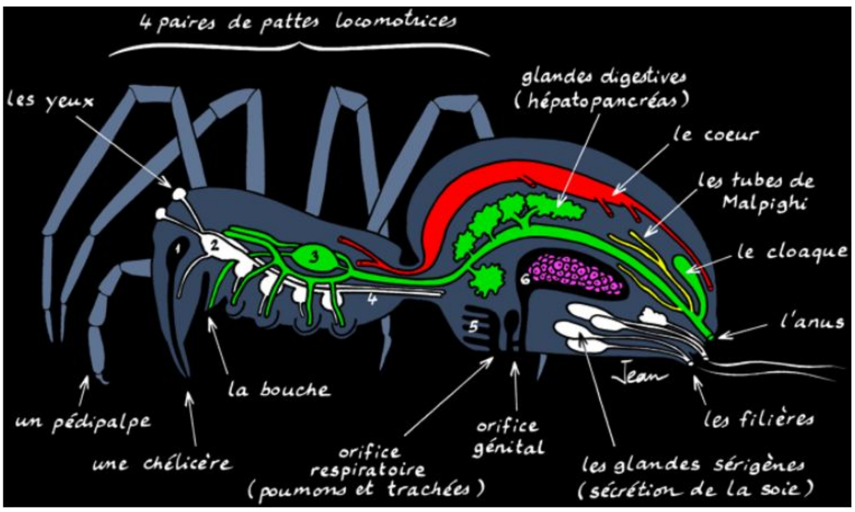
4 Weis-Fogh et organismes marins

Weis-Fogh (1964) rapporte que le muscle de vol des insectes peut éliminer jusqu'à 25% de l'oxygène présent dans l'air.
Ainsi, à 20 degrés celsius, le δC est de 2.3 mole.m-3 , en prenant des valeurs typiques pour les autres paramètres de l'équation (C = 0,1 et M = 6,5), on trouve que la longueur maximale des trachées est d'environ 1,2 mm. Si les insectes devait disposer d'une trachée plus longue pour acheminer l'air au muscle, la diffusion seule ne suffira pas pour fournir l'oxygene aux tissues. C'est a cause de cela que a partir d'une certaine taille les grands insectes doivent faire des mouvement de l'abdomen pour créer une ventilation dans leur trachée primaire Un système respiratoire basé sur la diffusion ne peut pas fonctionner dans l"eau, en effet la constante de diffusion de l'oxygène dans l'eau est 10 000 fois plus petite que dans l'air ce qui induit que la longueur des trachéoles devrait être inférieure à environ 12 m pour pouvoir apporter l'oxygene au tissues respirant a la même vitesse que les muscles de vol. Si les organismes aquatiques devaient compter sur la diffusion pour delivrée l'oxygène aux tissues , ils devraient soit augmenter drastiquement la fraction du tissu consacrées aux tubes respiratoires ou maintenir un métabolisme de base tres lent ou réduire la distance entre le muscle et l'eau. Augmenter la fraction de tissues est impossible étant données le coefficient de diffusion de l'oxygene dans l'eau les muscles serait uniquement composer de trachée et d'aucune fibre si on souhaite que la diffusion suffise au besoin en oxygène. De plus le métabolisme de base des espèces marines et déjà plus lent que ce lui des espece Volante, mais aucune n'a un métabolisme de base 10000 fois plus faible ce qui signifie que les deux première solution pour admettre un système trachéal ne peuvent être remplie de façon satisfaisante Cependant certain organisme, on opte pour la troisième solution et on donc adopter une forme plates pour garder chaque partie de leur corps le plus proche possible de l'eau environnante. ?

En réalité, la plupart des organismes aquatiques ont tout de même, au cours de l'évolution, renoncé à utiliser la diffusion comme unique source d'oxygène et ont développé des systèmes respiratoires convectifs (Mouvement de va-et-vient dans un cul-de-sac grâce à la ventilation pulmonaire.
Le Système respiratoire trachéal a évolué au moins trois fois chez les insectes terrestres chez les uniramiens (mille-pattes),

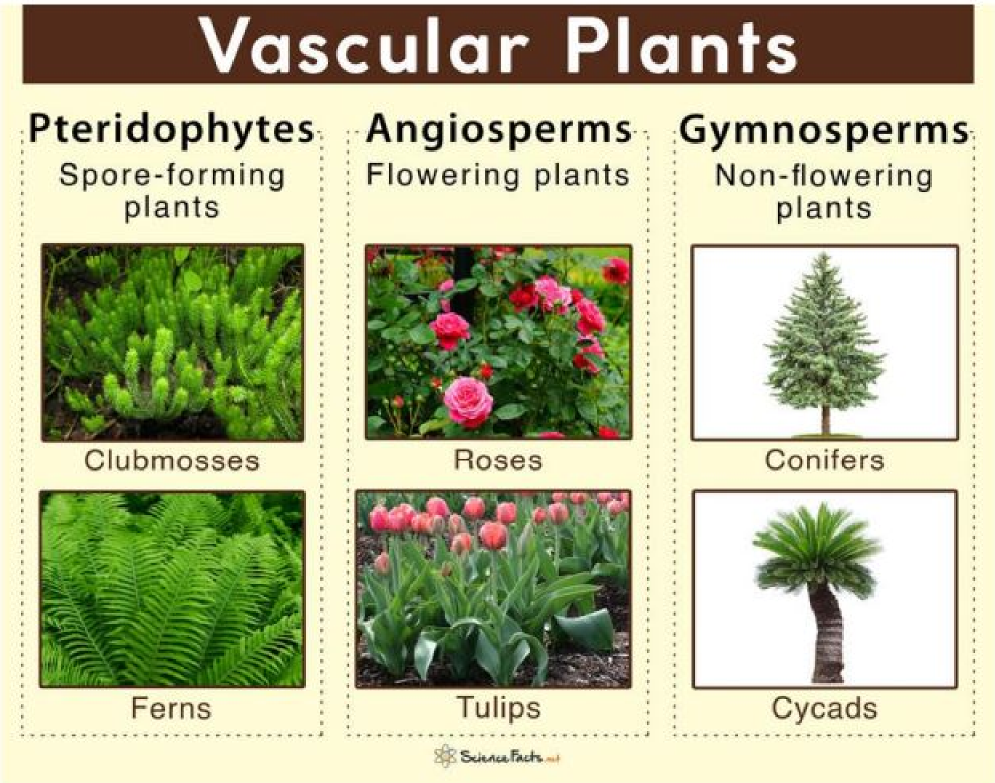


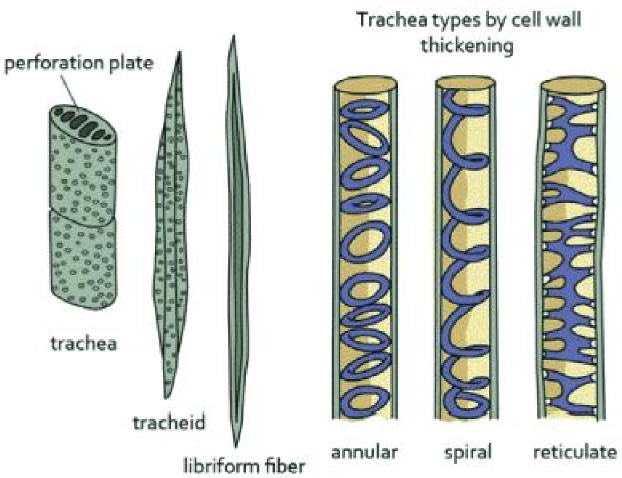
Chez les mille-pattes, on retrouve le même système d'orifices que pour les criquets chez les chélicérates. (scorpions et araignées)



Chez les araignées, on trouve également des trachées situes sur leur ventre qui peut être replié sur elle-même et chez les isopodes. (cloportes)

En A, système respiratoire du cloporte ainsi que chez les plantes vasculaires.





Le système de trachée des plantes vasculaires peut varier avec l'épaisseur de la paroi cellulaire. On peut donc considérer que le potentiel de la diffusion aérienne comme système de transport a été un facteur unificateur parmi les organismes terrestres.

5 Equation de Pickard

Le fait que les trachéoles des insectes puissent avoir des diamètres aussi petits que 0,2 μm soulève une question intéressante.

Quel serait l'effet si les trachéoles étaient encore plus petites qu'elles ne le sont ?

Pickard (1974) s'est penché sur cette question et a montré que toute réduction de la taille des trachéoles réduirait le coefficient de diffusion effectif et la vitesse à laquelle l'oxygène peut être délivré au muscle. Pour être précis, Pickard a proposé que :

$$\boxed{\mathrm{D} = \mathrm{D}_m \frac{1}{1 + \left(\frac{9\pi}{16}\right)\left(\frac{l}{d}\right)}}$$

D'apres Pickard il s'avere que l'une des hypothese prise par Weis-fogh serait incorrect, en effet Weis-fogh a demontrée que la ventilation des trachées et des trachéoles tertiaires chez les insectes est principalement un processus diffusif et que cette diffusion seule est capable de répondre même aux besoins extrêmes en oxygène des muscles de vol mais comme dit precedemment les diamètres des plus petits des trachéoles se sont approchées du libre parcours moyen des molécules d'oxygène mais apres analyse sur ceci il conclut a l'aide de l'hypothese de Kofoed stipulant que le transport et la diffusion peut être facilité dans c'est tubes etroit compare a la diffusion dans des tubes plus large de section similaires. Mais il s'avère que cette hypothèse est fausse cependant selon pickard ça réciproque est bien vrai.
Pickard a donc démontrer qu'une diminution de la taille trachéolaire et une augmentation de la densité trachéolaire sont avantageuse pour l'insecte tant que a (m), le rayon effectif de la trachéole, satisfait l'inégalité $2a/\lambda$ » 1, où λ (m) est le libre parcours moyen de l'oxygène. Malheureusement pour Pickard il n'existe aucune solution exacte au problème de la diffusion d'un gaz réel dans un tube cylindrique de rayon a λ mais heureusement, il existe une théorie approchée due à BOSANQUET(POLLARD et PRESENT, 1948) que pickard a utilisé pour sa démonstration.
Cette théorie suppose « que le nombre de collisions par unité de temps subies par une molécule de gaz est la somme des collisions qu'il subit avec la paroi de son contenant et les collisions qu'il subit avec d'autres molécules. »
Mais d'apres CHAPMAN et COWLING en 1970 le coefficient d'auto diffusion est inversement proportionnel à cette fréquence de collision ,Pickard obtient donc grâce a cela :

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_0} + \frac{1}{D_m}$$

Où Dm le coefficient de diffusion obtenu lors des collisions avec les murs (en $m^2 sec^-1$) est négligeables (lorsque $2a/\lambda$ vers l'infini) et D_0 le coefficient de diffusion qui s'obtient lorsque les collisions intermoléculaires en m2sec-1 sont négligeables (lorsque $2a/\lambda$ tend vers O) . D'après POLLARD et PRESENT en 1948 la forme de D_0 est :

$$\mathrm{D}_0 = \frac{2}{3} * \nu * a$$

Où nu barre (m/sec) est la vitesse moyenne d'une molécule de gaz diffusant et est donné d'après CHAPMAN et COWLING en 1970

$$\nu = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Où k (= 1,381 x 10e^-23 J/K) la constante de Boltzmann, T(en Kelvin) est la température, et m (en kg) est la masse de la molécule. La forme de D_m, pour un gaz diatomique est donnée par CHAPMAN et COWLING en 1970 et est :

$$\mathrm{D}_m = \zeta\lambda\nu$$

Où ζ(sans dimension) est une constante qui dépend du modèle utilisé pour caractériser les collisions intermoléculaires et égal à un tiers dans les théories cinétiques les plus simples la cinétique ainsi, on a :

$$\mathrm{D}\!= \mathrm{D}_m \frac{1}{1 + 3\zeta\left(\frac{\lambda}{2a}\right)}$$

Pour appliquer l'équation précédente, il faut se procurer une valeur pour Dm qui vaut 19 x1O-6 pour de l'oxygène à 25 degrés celsius, trouvez zeta, puis calculez lambda. Selon les méthodes du libre parcours s'appliquent uniquement aux molécules sphériques rigides, donc suite a cela la valeur la plus appropriée de zeta est d'après CHAPMAN etCOWLING :

$$\zeta = \tfrac{3\pi}{16}$$

Donc

$$\lambda = \frac{16}{3\pi}\frac{D_m}{\nu}$$

Et

$$\mathrm{D}\!= \mathrm{D}_m \frac{1}{1 + \left(\frac{9\pi}{16}\right)\left(\frac{\lambda}{2a}\right)}$$

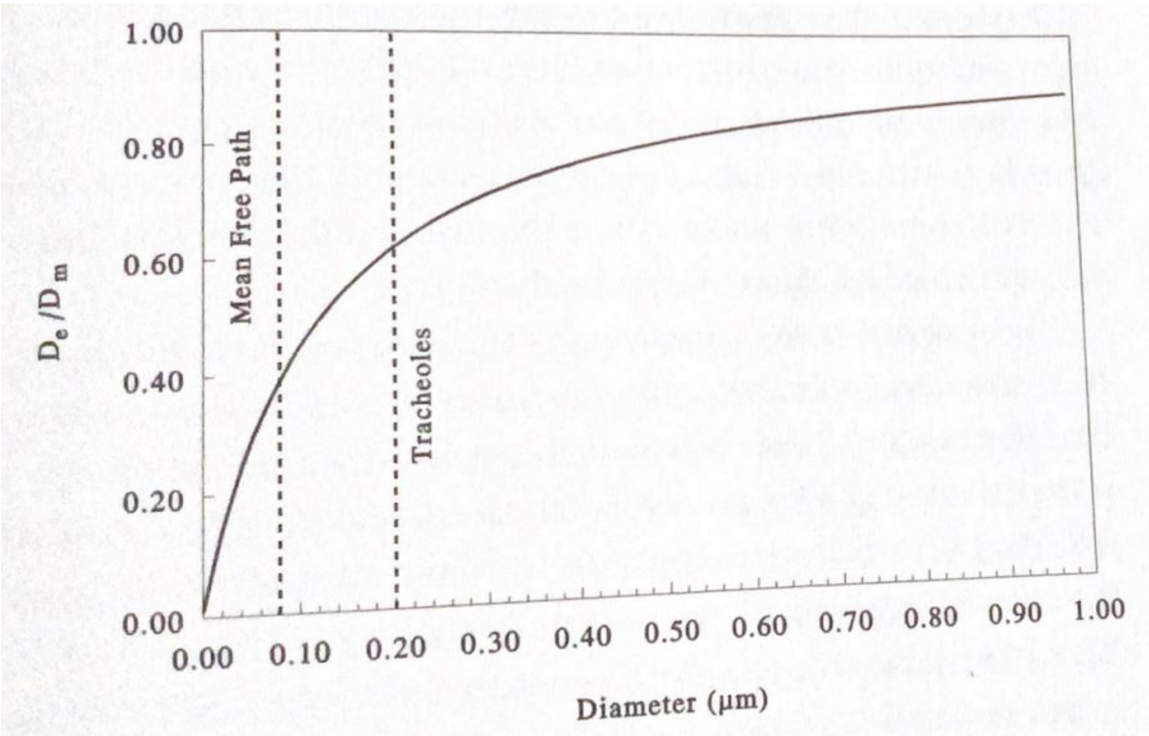
Finalement

$$\mathrm{D}\!= \mathrm{D}_m \frac{1}{1 + \left(\frac{9\pi}{16}\right)\left(\frac{l}{d}\right)}$$

Où De, est le coefficient de diffusion effectif dans la trachéole, l est le libre parcours moyen, et d est le diamètre de la trachéole.

6 Conclusions et ouvertures

Pour conclure voici une représentation graphique de l'expression de Pickard :



On remarque que pour des diamètres inférieurs à environ 0.2 μm (à peu près la taille des trachéoles), le rapport D_e/D_m diminue de plus en plus rapidement et chute fortement au moment où elle passe en dessous du libre parcours moyen des molécules , ce qui suggérerait que la taille minimale des trachéoles a pu être fixée par le libre parcours moyen des molécules dans l'air. De plus concernant la question sur les milieux aquatiques comme le libre parcours moyen des molécules dans l'eau est beaucoup plus petites que le diamètre d'un atome d'hydrogène, aucun tube physique ne pourrait jamais restreindre le coefficient de diffusion dans l'eau de la même manière que les trachéoles le font dans l'air ce qui implique bien qu'un système tracheal semble peu réalisable pour les espèces aquatique.
Il reste intéressant de s'interroger sur les insectes vivant à haute altitude, où le libre parcours moyen est relativement long.

En effet cela induirait il des trachéoles plus grandes ?

7 Bibliographie

¤ Diffusion in insecr wing muscle,The most active tissue known, WEIS-FOGH,Journal of experimental biology, 1964, Vol.41 (2), p.229-256
¤ Transition regime diffusion and the structure of the insect tracheolar system,William F. PICKARD,1974.
¤ http ://what-when-how.com/animal-life/subclass-chilopoda/
¤ https ://hosho.ees.hokudai.ac.jp/tsuyu/top/dct/anatomy.html