

BIOL 3633

**CONCEPTS DE
PHYSIOLOGIE ANIMALE COMPARÉE I**

NOTES DE COURS

Par Stéphan Reeb

**Département de biologie
Université de Moncton
Moncton, N.-B.**

**Première édition partielle 1992
Première édition complète 2016
Dernière révision 2024**

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1	La littérature en physiologie animale comparée	4
Chapitre 2	Quelques principes de base	6
Chapitre 3	Métabolisme	12
Chapitre 4	Énergétique de la locomotion	32
Chapitre 5	Thermorégulation: tolérance aux écarts de température	36
Chapitre 6	Thermorégulation: principes de base	43
Chapitre 7	Thermorégulation: systèmes d'échange à contre-courant	61
Chapitre 8	Thermorégulation: ectothermie	66
Chapitre 9	Thermorégulation: torpeur et hibernation	72
Chapitre 10	Examen I – exemples de questions des années passées	76
Chapitre 11	Respiration: principes de base	86
Chapitre 12	Respiration: le milieu aquatique	92
Chapitre 13	Respiration: le milieu terrestre	95
Chapitre 14	Respiration: transport des gaz dans le sang	105
Chapitre 15	Circulation: principes de base	113
Chapitre 16	Circulation: anatomie et fonction des circuits.	116
Chapitre 17	Circulation: physiologie cardiaque	133
Chapitre 18	Circulation: effets de la gravité	141
Chapitre 19	Circulation et respiration: adaptations à la plongée	145
Chapitre 20	Examen II – exemples de questions des années passées	152
Chapitre 21	Digestion: nutriments	163
Chapitre 22	Digestion: anatomie fonctionnelle du système digestif	174
Chapitre 23	Digestion: appétit et choix de nourriture	188
Chapitre 24	Osmorégulation: principes de base	192
Chapitre 25	Osmorégulation: le milieu aquatique	199
Chapitre 26	Osmorégulation: le milieu terrestre	206
Chapitre 27	Osmorégulation: organes et systèmes excréteurs	210
Chapitre 28	Examen III – exemples de questions des années passées	215

Pages à étudier en préparation de chaque cours :

Cours # 1 : Aucune (plan de cours)

Cours # 2 : p. 6 – 11

Cours # 3 : p. 12 – 17

Cours # 4 : p. 18 – 31

Cours # 5 : p. 32 – 35

Cours # 6 : p. 36 – 42

Cours # 7 : p. 43 – 51

Cours # 8 : p. 52 – 60

Cours # 9 : p. 61 – 71

Cours # 10 : p. 72 – 75

Cours # 11 : p. 6 – 83 (révision)

Cours # 12 : p. 6 – 85 (EXAMEN 1)

Cours # 13 : p. 86 – 91

Cours # 14 : p. 92 – 98

Cours # 15 : p. 99 - 104

Cours # 16 : p. 105 – 112

Cours # 17 : p. 113 – 132

Cours # 18 : p. 133 – 140

Cours # 19 : p. 141 – 151

Cours # 20 : p. 86 – 162 (EXAMEN 2)

Cours # 21 : p. 163 – 173

Cours # 22 : p. 174 – 187

Cours # 23 : p. 188 – 198

Cours # 24 : p. 199 – 205

Cours # 25 : p. 206 – 214

Semaine d'examens : p. 6 – 228 (EXAMEN 3)

Chapitre 1

La littérature en physiologie animale comparée

Livres de vulgarisation scientifique:

1. Gould, J.L. et C.G. Gould. 1989. Life at the edge. W.H. Freeman, New York. QH 311 L645.
2. Heinrich, B. 1984. In a patch of fireweed. Harvard University Press, Cambridge, Ma. (Les activités d'un physiologiste des insectes). QL 31 H42 A33.
3. Heinrich, B. 2003. Winter world. Harper Collins, New York. QL 753 H45.
4. Marchand, P.J. 2013. Life in the cold: An introduction to winter ecology (4th ed.). University Press of New England, Hanover. 0QH 543.2 M37
5. Schmidt-Nielsen, K. 1998. The camel's nose. Island Press, Washington. QP 26 S 33 A3. (Une autobiographie de ce célèbre physiologiste). QP 26 S33 A3
6. Widmaier, E.P. 1998. Why geese don't get obese (and we do). W.H. Freeman and Co., New York.

Manuels:

1. Bradshaw, D. 2003. Vertebrate ecophysiology: An introduction to its principles and applications. Cambridge Univ. Press, Cambridge. QL 739.2 B725
2. Eckert, R., D. Randall, W. Burggren et K. French. 1999. Physiologie animale: Mécanismes et adaptations. De Boeck, Paris. QP 31.2 E 2414.
3. Moyes, C.D., et P.M. Schulte. 2006. Principles of animal physiology. Pearson Education Inc., San Francisco. QP 31.2 M69.
4. Hill, R.W. 2016. Animal physiology. Sinauer, Sunderland (Mass.) QP 33 H54.
5. Schmidt-Nielsen, K. 1998. Physiologie animale: Adaptation et milieu de vie. Dunod, Paris. QP 31 S 35.
6. Sherwood, L., H. Klandorf, et P.H. Yancey. 2005. Animal Physiology: from genes to organisms. Thomson Brooks/Cole, Belmont. QP 31.2 S54

Pour une audience scientifique plus spécialisée:

1. Burton, R.F. 1994. Physiology by numbers: An encouragement to quantitative thinking. Cambridge Univ. Press, Cambridge. QP 40 B98.
2. Davenport, J. 1992. Animal life at low temperature. Chapman & Hall, London. QH 653 D38.
3. Mrosovsky, N. 1990. Rheostasis. Oxford Univ. Press, New York. QP 90.4 M76.
4. Schmidt-Nielsen, K. 1984. Scaling: Why is Animal Size so Important? Cambridge Univ. Press, Cambridge. QL 799 S 34
5. Wharton, D.A. 2002. Life at the limits: Organisms in extreme environments. Cambridge Univ. Press, Cambridge. QL 45.2 W53

Quelques revues scientifiques en physiologie:

American Journal of Physiology	QP 1 A447
Canadian Journal of Physiology and Pharmacology	QP 1 C352
Canadian Journal of Zoology	QL 1 C353
Comparative Biochemistry and Physiology	QP 1 C646
Experimental Biology	QH 301 R498
Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology	QP 1 J69
Journal of Experimental Biology	QH 301 J687
Journal of Experimental Zoology	QL 1 J687
Journal of General Physiology	QP 1 J691
Journal of Physiology	QP 1 J692
Journal of Zoology	QL 1 J692
Physiological Reviews	QP 1 P359
Physiological Zoology	QL 1 P359
Physiology and Behavior	QP 1 P362

Chapitre 2

Quelques principes de base

Physiologie:

La physiologie est l'étude du fonctionnement des organes et des systèmes (= appareils), comme le système respiratoire par exemple, ou sanguin, digestif, excréteur, etc. On pose essentiellement la question : Comment ça marche? La physiologie étudie l'intérieur du corps mais reconnaît que les adaptations internes peuvent être fonction du milieu extérieur dans certains cas.

« comparée »:

Se dit d'une méthode d'étude où on se base sur la comparaison entre espèces pour mieux comprendre les adaptations à l'environnement. Par exemple, pour comprendre les adaptations physiologiques qui aident à économiser l'eau, on compare une espèce du désert (où l'eau est rare) avec une espèce non-désertique. Cette approche est similaire à la méthode expérimentale, où l'on compare souvent un groupe témoin (contrôle) avec un groupe expérimental afin de mieux comprendre les effets du traitement expérimental.

On peut aussi comparer plusieurs espèces du désert entre elles pour voir si elles partagent les mêmes adaptations, ce qui supporterait l'idée que ces adaptations sont en fonction du désert.

Homéostasie (= homéostasie): Principe énoncé par le français Claude Bernard au 19^{ème} siècle, reformulé par l'américain Walter Cannon en 1929.

Le principe dit qu'un paramètre à l'intérieur du corps tend à rester constant autour d'un point de référence en dépit des variations qui surviennent à l'extérieur du corps. On parle alors d'un « milieu intérieur stable ».

Exemple: La température du corps est maintenue stable aux alentours de 37 °C chez les mammifères et de 40 °C chez les oiseaux.

Q Pouvez-vous penser à d'autres paramètres qui auraient tendance à demeurer stable dans un corps?

Rétroaction (= *feedback*):

Situation où un système de contrôle change le niveau d'une variable, et la variable a elle-même un effet sur le système de contrôle.

Rétroaction négative: Effet contraire. Si la variable augmente trop au-dessus d'un point de référence, le système de contrôle la rabaisse. Si la variable baisse trop en-dessous du point de référence, le système de contrôle la remonte.

Exemple : La température d'une chambre contrôlée par un thermostat connecté à une chaufferette et à un climatiseur d'air.

La rétroaction négative (= rétro-inhibition) est le principal mécanisme de contrôle utilisé par l'homéostasie.

Exemple : La température stable de notre corps contrôlée par notre hypothalamus qui déclenche le frisson ou la transpiration.

Rétroaction positive: Effet « boule de neige ». Si la variable monte, le système de contrôle la fait monter encore plus. Si la variable baisse, le système la fait baisser encore plus.

Il y a peu de cas en physiologie.

Exemple : L'appétit qui vient en mangeant.

Rhéostase :

La rhéostase est un cas spécial d'homéostasie. Tout comme dans l'homéostasie le paramètre physiologique est maintenu autour d'un point de référence, mais dans la rhéostase ce point de référence, au lieu d'être fixe, fluctue ou change de façon temporaire. Une analogie dans le monde physique serait les systèmes contrôlés par des rhéostats ou des thermostats programmables.

Anorexie lors de l'incubation : Chez plusieurs espèces d'oiseaux, seule la femelle incube, pendant 2-3 semaines, et elle perd du poids lors de cette période. Il est raisonnable de faire l'hypothèse que cette perte de poids est due au fait que la femelle ne peut pas quitter le nid aussi souvent qu'elle le voudrait afin de trouver de la nourriture.

Q

Imaginez une expérience, avec des canards domestiques en laboratoire, pour tester l'hypothèse en question. (Ne tournez pas la page tout de suite!)

Mais même si la femelle peut se nourrir à volonté sans quitter le nid (parce qu'en laboratoire on lui donne de la nourriture juste à côté du nid), elle perd quand même du poids!

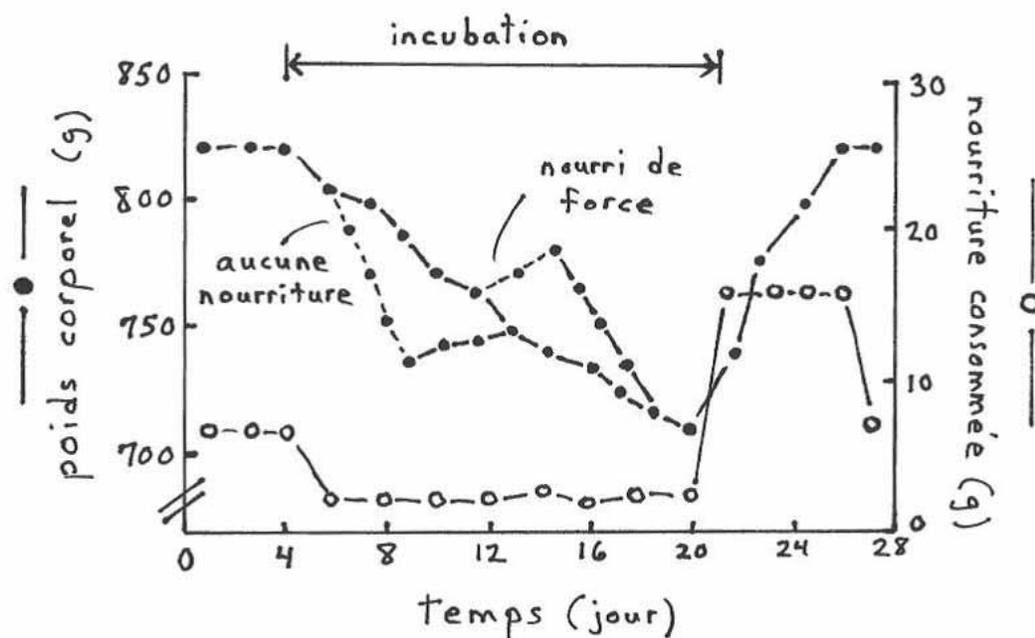


Figure 2.1 : Évolution temporelle du poids corporel et de la consommation de nourriture d'un canard femelle, ayant libre accès à la nourriture, en période d'incubation.

La conclusion est que la femelle est programmée pour perdre du poids pendant l'incubation. L'avantage est qu'il y a alors beaucoup moins de conflit entre la prise de nourriture (qui, en nature, demande de quitter le nid) et l'incubation (qui, forcément, requiert de rester au nid). Étant programmée pour perdre du poids, la femelle a moins d'appétit et donc n'a pas besoin de quitter le nid très souvent. Elle peut mieux incuber.

La femelle ressent moins d'appétit parce que le point de référence de son poids corporel diminue pendant l'incubation (un cas de rhéostase). On sait que le point de référence change parce qu'après qu'on ait forcé la femelle à s'en éloigner (en la nourrissant de force, par exemple, ou en la privant complètement de nourriture; voir graphique ci-haut), la femelle change sa prise de nourriture pour revenir au poids qu'elle aurait eu si on l'avait laissé tranquille.

Cette expérience a été faite par des Canadiens : Sherry, D.F., N. Mrosovsky, et J.A. Hogan, 1980, Weight loss and anorexia during incubation in birds, *Journal of Comparative Physiology and Psychology* 94 : 89-98.

Q Voici d'autres cas de rhéostase, de changements temporaires ou cycliques d'un point de référence physiologique. Dans chaque cas, imaginez une expérience pour mesurer le changement dans le point de référence, et devinez quel est l'avantage pour l'animal d'avoir ce changement dans le point de référence :

Le cerf mâle perd du poids pendant la période de rûte.

Certains oiseaux nordiques perdent du poids tout au long de l'hiver.

Les oiseaux engraisent (prennent du poids) avant la migration.

Les mammifères hibernants engraisent (prennent du poids) avant l'hibernation.

Notre température corporelle varie sur une base de 24 h, étant un peu plus basse la nuit et un peu plus élevée le jour.

Un dernier exemple de rhéostase : la fièvre est une augmentation de la température corporelle quand on est malade (donc l'augmentation est temporaire). Cette augmentation est programmée; elle reflète une augmentation du point de référence de notre température corporelle. L'avantage est que beaucoup des agents pathogènes qui causent des maladies se reproduisent moins bien à des températures plus élevées que 37 °C. Donc, à une température corporelle plus élevée, le système immunitaire peut éliminer les microbes plus vite que ceux-ci réussissent à se reproduire.

C'est donc dire que la fièvre, contrairement à ce qu'on pourrait penser, est bénéfique! C'est bon pour un corps malade de devenir plus chaud. Ce qui est dangereux, c'est quand la fièvre dure trop longtemps (> 3 jours) ou est trop élevée (> environ 42 °C). C'est à ce moment-là qu'il faut prendre des médicaments, dits « anti-pyrétiques » (« pyro » = feu), qui font baisser la fièvre.

Souvent, le point de référence n'arrive pas à rester élevé. Il monte, puis revient à la normale, puis remonte à nouveau, etc. Quand les gens fiévreux ont le frisson, c'est que leur point de référence vient de monter et ils essaient de réchauffer leur corps. Quand ces mêmes personnes quelques heures plus tard transpirent, c'est que leur point de référence vient de retomber et elles essaient de le rejoindre à nouveau en se refroidissant.

Il existe aussi la fièvre « comportementale » : Les reptiles malades cherchent activement (c'est un comportement) des milieux plus chauds que ceux qu'ils préfèrent habituellement.

Acclimatation :

Maintien de l'homéostasie par des moyens plus statiques (= qui durent plus longtemps), à plus long terme, que les moyens utilisés en premier lieu. Deux exemples :

Respiration à haute altitude : Quand on monte à haute altitude, là où il y a moins d'oxygène, on devient essoufflé pour compenser (le manque d'oxygène dans l'air est compensé par un plus grand apport d'air dans les poumons). Ça, c'est le moyen utilisé en premier lieu. Mais au bout de quelques jours en altitude, on arrête d'être essoufflé. Notre corps s'est acclimaté! Il a eu recours à des moyens plus statiques, qui ont pris quelques jours à se développer, lui permettant de compenser pour le manque d'oxygène. Ces moyens sont (1) la manufacture d'un plus grand nombre de globules rouges (transporteurs sanguins d'oxygène) et (2) une angiogénèse, c'est-à-dire le développement de nouveaux vaisseaux sanguins pour amener le sang et son oxygène plus près des cellules que d'habitude.

Activité des poissons : Un poisson qu'on met dans de l'eau plus froide que son milieu habituel diminue son niveau d'activité parce que sa température corporelle diminue. Mais au bout de quelques jours, son niveau d'activité revient à la normale. Il s'est acclimaté en produisant des enzymes qui fonctionnent mieux à la nouvelle température plus froide.

Attention : acclimatation \neq adaptation.

L'adaptation est une caractéristique qui appartient à une espèce ou une population plutôt qu'à un individu. Elle est apparue grâce à l'évolution sur plusieurs générations et se trouve donc dans le génome. Par exemple, les lamas (une espèce montagnarde) viennent au monde avec une hémoglobine qui s'associe mieux avec l'oxygène, et cette hémoglobine vient d'un gène particulier. On dira que les lamas sont bien adaptés à l'altitude, pas acclimatés.

Attention : acclimatation \neq habitude .

L'habitude est un terme réservé à l'étude du comportement. Elle indique une élévation du seuil de réponse de l'individu suite à une exposition prolongée à un stimulus. Par exemple, les bruits de circulation nous réveillent la nuit les premières fois dans notre nouvel appartement, mais pas par la suite. On s'est habitué au bruit, pas acclimaté.

Exercices :

- Q** 1) Les situations suivantes représentent-elles une acclimatation, une adaptation, ou une habitude?
- Il y a plusieurs années, au début de leur utilisation, les pesticides à base d'organophosphates réussissaient à tuer la plupart des moustiques, mais de nos jours il y a beaucoup de populations de moustiques qui sont résistantes aux organophosphates.
 - Dans le territoire d'un bruant à gorge blanche (un oiseau), vous faites jouer un enregistrement du chant d'un autre mâle. Au début le mâle propriétaire du territoire répond agressivement en émettant son propre chant et en volant autour du haut-parleur, mais au bout d'une demi-heure il se tranquillise et ne répond plus beaucoup.
 - Pendant les semaines qui précèdent une compétition, un coureur de longue distance s'entraîne en altitude dans le but de développer plus de globules rouges dans son sang, ce qui lui sera bénéfique lorsque viendra le jour de la compétition.
 - Grâce à une mutation spéciale du gène concerné, les populations sédentaires de choquemorts (un poisson, *mummichog* en anglais) qui vivent le long des côtes de Terre-Neuve produisent deux fois plus d'une certaine enzyme que les populations sédentaires de cette même espèce qui vivent au large de la Floride, ce qui compense pour le plus faible taux en eau froide de la réaction chimique catalysée par cette enzyme.
 - La densité de mitochondries dans les muscles d'une espèce de poissons est différente dépendamment que tu échantillones une même population en été ou en hiver.
- Q** 2) Aussitôt que le niveau de glucose monte trop haut dans notre sang, notre pancréas libère plus d'insuline qui permet l'absorption du glucose par les muscles, ce qui ramène le niveau de glucose sanguin à la normale. Ceci est un exemple de (choisissez la meilleure réponse) :
- Acclimatation
 - Habitude
 - Processus homéostatique
 - Point de référence qui change temporairement
 - Physiologie comparée
- Q** 3) Vrai ou faux (et si faux, pourquoi?)
- Une des différences entre rhéostase et homéostase est que la rétroaction négative n'est pas impliquée dans les cas de rhéostase.
 - La fièvre est une manifestation de maladie et il faut la combattre par tous les moyens possibles.
 - La physiologie étudie comment les organes et les systèmes sont faits.
- Q** 4) Décrivez une expérience que vous pourriez faire pour illustrer les bénéfices de la fièvre comportementale avec un lézard.

Chapitre 3

Métabolisme

Énergie: L'énergie peut être définie comme étant la capacité de faire un « travail », c'est-à-dire de changer les choses (changer leur position, vitesse, température, forme).

Anciennement mesurée en calories (cal, 1 calorie = la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température de 1 g d'eau de 14.5 à 15.5 °C), l'énergie est maintenant mesurée, selon le système international d'unités, par le joule (J) ou le kilojoule (kJ, égal à 1000 J). 1 J est l'énergie nécessaire pour faire subir à un objet de 1 kg une accélération de 1 m/s² sur une distance de 1 m.

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

Attention à la différence entre calorie et Calorie : la Calorie (C majuscule), aussi appelée « grosse calorie » ou « calorie alimentaire », est souvent utilisée dans le monde de la nutrition et de la médecine pour exprimer la quantité d'énergie dans la nourriture.

$$1 \text{ Calorie} = 1000 \text{ calories}$$

Métabolisme: Tout animal obtient de l'énergie (sous forme de nourriture) et dépense de l'énergie (sous forme de travail). L'ensemble des réactions chimiques par lesquelles l'énergie est puisée, transformée, et utilisée à l'intérieur du corps s'appelle le métabolisme. Puisque toute réaction utilise ou libère de l'énergie, une autre définition de métabolisme est tout simplement l'ensemble des réactions chimiques à l'intérieur du corps.

Q Entre une tortue et un colibri, quel est l'animal qui a le métabolisme le plus élevé?

Q Et entre un animal actif et un animal endormi?

Q Et entre un mammifère qui a froid et un mammifère confortable (sachant que la plupart des réactions biochimiques dégagent de la chaleur comme sous-produit de réaction)?

Anabolisme: Ensemble des réactions de synthèse à l'intérieur du corps.

Ex : Les stéroïdes « anabolisants » sont des analogues de testostérone (une hormone) qui stimulent la synthèse des protéines formant les muscles.

Catabolisme: Ensemble des réactions de dégradation à l'intérieur du corps.

Ex. : Les réactions qui brisent les vieilles protéines de notre corps sont un exemple de réactions « cataboliques ».

Métabolisme aérobie (aussi appelé, plus correctement, métabolisme oxydatif):

La plupart des animaux obtiennent de l'énergie en oxydant (en brisant par l'intermédiaire d'un vol d'électrons) les glucides, protéines, et graisses contenus dans leur nourriture. Le voleur d'électrons est ultimement l'oxygène, et l'oxygène est souvent obtenu à partir de l'air; on parle donc de métabolisme aérobie. (Aéro = air, mais pensez aux poissons... il y a de l'oxygène dissous dans l'eau, et cet oxygène est utilisé par les poissons, donc les poissons font eux aussi du métabolisme aérobie, même s'ils ne sont pas dans l'air; c'est pourquoi le terme « métabolisme oxydatif » est préférable).

Les réactions d'oxydation prennent place dans les mitochondries des cellules.

Le principal substrat oxydé est habituellement le glucose (un glucide).

Les principaux produits finaux de ces réactions d'oxydation sont:

- l'eau (appelée « eau métabolique », qui est utile pour le corps);
- le CO₂ (qui est inutilisable par le corps, lequel s'en débarrasse par expiration);
- l'ATP (la forme sous laquelle l'énergie est entreposée).



Q Pourquoi un animal doit-il manger?

Q Pourquoi un animal doit-il respirer?

Q Pourquoi est-ce qu'on perd connaissance, ou même qu'on meurt, lorsqu'on manque d'oxygène?

¹ Réalisez que cette équation est une simplification, une vue d'ensemble. Il y a beaucoup d'intermédiaires de réaction. Dans vos cours de biochimie, vous explorerez les intermédiaires qu'on trouve dans la glycolyse anaérobie, la réaction transitoire, le cycle de Krebs (= cycle de l'acide citrique), et la chaîne respiratoire. De plus, le nombre de molécules d'ATP produit a le potentiel d'être aussi élevé que 38, mais dans les faits il est seulement 30 ou 32 parce qu'un certain nombre de protons qui sont pompés au travers des membranes mitochondriales reviennent en passant ailleurs que dans les « portes tournantes » (ATPase) qui prennent l'énergie des protons pour en faire de l'ATP.

Métabolisme anaérobie (aussi appelé, plus correctement, métabolisme glycolytique):

Il est aussi possible d'obtenir de l'énergie en brisant le glucose par un ensemble de réactions appelées glycolyse. Ces réactions n'exigent pas d'oxygène, et on parle alors de métabolisme anaérobie (le préfixe « an- » ou « a- » veut dire « contraire de », ou « absence de »).

Ces réactions prennent place dans le cytoplasme des cellules, pas dans les mitochondries.

Les principaux produits finaux de ces réactions sont :

- l'ATP;
- l'acide lactique (chez les animaux et certaines bactéries);
- l'éthanol et le CO₂ (chez les plantes et les unicellulaires).

L'acide lactique est un produit dangereux car il abaisse le pH du corps, ce qui nuit à l'action des enzymes. Certains organismes spécialisés dans le métabolisme anaérobie réduisent ce problème (1) en changeant l'acide lactique en éthanol, (2) en possédant beaucoup de substances tampons dans leurs tissus, ou (3) en ayant des enzymes qui fonctionnent bien à un pH plutôt bas.

Exemples intéressants d'organismes à métabolisme anaérobie (permanent ou temporaire):

Des levures (champignons microscopiques) produisent l'alcool (éthanol) des vins et des bières à partir des sucres contenus dans le jus de raisin (vin) ou dans des grains germés (bière).

D'autres levures, à partir de sucres (mélasse, par exemple) ajoutés à la farine, produisent le CO₂ qui forme des bulles dans la pâte à pain, la faisant lever (gonfler).

Des bactéries (lactobacilles) produisent l'acide lactique qui donne le goût sur au yogourt et à la crème sure. (lact = lait; vous savez maintenant d'où vient le nom « acide lactique »)

Un bivalve, lorsque fermé, ne peut utiliser que le métabolisme anaérobie car il n'y a plus d'eau oxygénée qui circule en lui.

Une carpe ou une tortue qui passe l'hiver enfouie dans la boue au fond d'un lac ou d'une rivière ne peut utiliser que le métabolisme anaérobie car elle n'a pas accès à l'oxygène.

Organismes anaérobiques obligatoires : meurent en présence d'oxygène.

Organismes anaérobiques facultatifs : survivent en présence d'oxygène, mais ne l'utilisent pas.

En termes de production d'ATP, le métabolisme aérobie est 16 fois plus efficace que le métabolisme anaérobie pour puiser l'énergie des nutriments (16 fois plus d'ATP est formé à partir d'une même molécule de glucose). Par contre, le métabolisme aérobie requiert l'établissement d'un système de transport pour l'oxygène, et il est 1.8 fois plus lent.

Q

Utilisez l'analogie d'une Corvette vs une Toyota (vitesse, consommation d'essence) pour illustrer la différence entre la performance du métabolisme aérobie vs anaérobie.

Taux métabolique: Le taux métabolique (= TM) est la quantité d'énergie produite ou utilisée par unité de temps. On peut le mesurer de plusieurs façons:

- 1) En mesurant l'énergie contenue dans la nourriture et l'eau ingérées par unité de temps et en soustrayant l'énergie contenue dans les excréments et l'urine produits par unité de temps. Le contenu énergétique est mesuré en brûlant ces substances dans une bombe calorimétrique.

Une bombe calorimétrique est une petite chambre de combustion complètement fermée et entourée d'une couche d'eau. On y fait brûler complètement l'échantillon dont on veut connaître le contenu énergétique. Plus la température de l'eau autour de la chambre monte, plus il y avait d'énergie dans l'échantillon. Il va sans dire qu'il faut calibrer la bombe : il faut au préalable y faire brûler des échantillons dont on connaît déjà (par d'autres moyens plus compliqués) la valeur énergétique, et mesurer quelle hausse de température de l'eau on obtient.

On peut aussi se servir d'une bombe calorimétrique dans des études de nutrition animale. Par exemple, on peut comparer le contenu énergétique des grains de maïs, et des plantes des marais, et déterminer ainsi s'il vaut mieux (en termes d'énergie) pour les bernaches canadiennes de se nourrir dans les champs agricoles ou dans les marais.

- 2) En mesurant la quantité de chaleur dégagée par l'animal dans un calorimètre, par unité de temps. Ceci est basé sur le principe que toute réaction biochimique dégage de la chaleur.

Un calorimètre ressemble à une bombe calorimétrique : c'est une petite chambre entourée d'eau. La différence est qu'on y place un petit animal entier, on lui donne de l'air, et on ne le brûle pas! On mesure plutôt la hausse de température de la couche d'eau et aussi de l'air (incluant la chaleur de la vapeur d'eau expirée par l'animal) dans la chambre. Plus le métabolisme de l'animal est élevé, plus il dégage de chaleur, et plus la température de l'eau et de l'air augmente.

Cette méthode n'est pas très précise pour les animaux à bas métabolisme (qui ne dégagent pas beaucoup de chaleur), à moins d'avoir un calorimètre très sophistiqué.

Il faut aussi s'assurer que l'animal enfermé reste calme (ce qui n'est pas toujours évident) car le niveau d'activité peut influencer le taux métabolique.

- 3) En mesurant la quantité d'oxygène consommé par unité de temps. Cela ne fonctionne que pour le métabolisme aérobie. En général, 1 L d'oxygène reflète la production de 20.08 kJ d'énergie.

Cette méthode, appelée respirométrie, est très populaire; c'est pourquoi le taux métabolique est souvent exprimé en mL (ou L) d'oxygène consommé par minute (ou heure). Les techniques pour mesurer la consommation d'oxygène sont très variées, mais suivent en général deux patrons :

- a) Comparer la concentration en oxygène de l'eau (organismes aquatiques) ou de l'air (organismes terrestres) qui entre dans les organes respiratoires de l'animal versus celle de l'eau ou de l'air qui en sort. Calculer la différence. Tenir compte du débit de l'eau ou l'air, car il faut éventuellement exprimer la différence par unité de temps. En anglais la technique s'appelle « *flow-through respirometry* ».

- b) Mesurer la baisse de volume d'un réservoir d'air à partir duquel l'animal inspire, et dans lequel il expire, et qui contient un absorbant de CO_2 . La baisse de volume en fonction du temps correspond à la consommation d' O_2 par unité de temps, et donc au taux métabolique. Le « respiromètre de Benedict » est un exemple d'appareil utilisé pour cette technique.

Q Pourquoi faut-il qu'il y ait un absorbant de CO_2 ?

- 4) En utilisant de l'eau doublement marquée, c'est-à-dire de l'eau qui contient un isotope radioactif d'hydrogène (^3H) et un isotope radioactif d'oxygène (^{18}O). Cette méthode est pratiquement la seule qui peut être utilisée sur un animal sauvage vivant dans son milieu plutôt qu'en laboratoire.

- a) On capture un animal; on lui injecte de l'eau doublement marquée; on attend quelques heures pour que l'eau marquée se répande uniformément dans tout le corps; on prend un échantillon de sang; on relâche l'animal.
- b) On amène l'échantillon de sang au laboratoire et, grâce à la radioactivité qui est émise, on mesure la concentration en ^3H et en ^{18}O . On extrapole à la quantité totale du corps.
- c) Après plusieurs jours, on recapture l'animal et on prend un autre échantillon de sang. On mesure la concentration en ^3H et en ^{18}O de ce nouvel échantillon. On extrapole au corps.

Q d) La concentration en ^3H sera plus basse dans le deuxième échantillon que dans le premier. Pourquoi? (En d'autres mots, comment l'animal a-t-il perdu de l'hydrogène?)

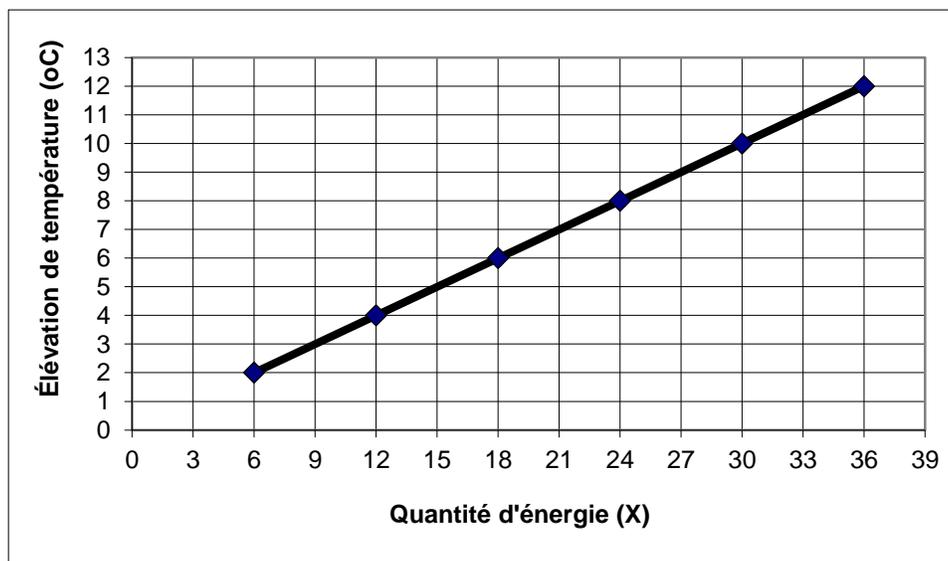
Q e) La concentration en ^{18}O sera elle-aussi plus basse dans le 2^e échantillon. Pourquoi?

Q f) Avec cette information, peut-on calculer la quantité de CO_2 produit par jour par l'animal?

Q g) Avec cette dernière information, peut-on calculer le taux métabolique?

Exercices:

- Q 1) Le graphique suivant représente la courbe de calibration d'une bombe calorimétrique:



- a) Remplacez « X » par le nom des unités de mesure appropriées (s'il y a plus qu'une possibilité, choisissez n'importe laquelle).
- b) Lors de mesures prises avec cette bombe calorimétrique, un échantillon de 5 g d'excrément de rat de laboratoire élève la température de l'eau par 6 °C. Un échantillon de 7 g de moulée élève la température de 12 °C. En une semaine, mon rat de laboratoire (qui pèse 100 g) consomme un total de 70 g de moulée et produit 15 g d'excréments (oublions l'urine dans le cadre de cette question). Quel est son taux métabolique (n'oubliez pas les unités de mesure)? Montrez vos calculs.

- Q 2) Un animal inspire 356 mL d'air par minute et en expire la même quantité. La concentration d'oxygène est de 21 % (volume / volume) dans l'air inspiré et de 16 % dans l'air expiré. Quel est le taux métabolique de l'animal?

Tableau 1: Énergie libérée et oxygène consommé dans le métabolisme oxydatif de divers substrats.

Substrat oxydé	Énergie contenue (kJ/g)	Quantité d'O ₂ pour oxyder complètement (L O ₂ par g de substrat)	Énergie libérée par litre d'O ₂ (kJ)	Quotient respiratoire : $\frac{\text{CO}_2 \text{ formé}}{\text{O}_2 \text{ utilisé}}$
Sucres (= glucides)	17.57	0.84	20.92	1.00
Graisses (= lipides)	39.33	2.00	19.66	0.71
Protéines (brisées en urée)	17.99	0.96	18.83	0.81
Protéines (brisées en acide urique)	17.78	0.97	18.41	0.74

- Q** Quelle partie de ce tableau explique pourquoi les animaux qui doivent entreposer de l'énergie à long terme (ex.: oiseaux avant la migration, mammifères avant l'hibernation) engraissent?
- Q** Comment feriez-vous, de façon simple et rapide, pour savoir si le régime alimentaire d'un animal contient surtout des glucides ou des lipides, même si vous n'avez pas accès à sa nourriture?
- Q** Trois pages plus haut (page 15) il est écrit que « en général, 1 L d'oxygène mène à la consommation de 20.08 kJ d'énergie ». Qu'est-ce que cela vous dit sur les sources d'énergie « moyennes » des animaux?

Facteurs pouvant influencer le taux métabolique:

- Q** Imaginez des paramètres qui pourraient influencer le taux métabolique (TM) d'un animal :
- Poids de l'animal (un gros animal consomme plus d'O₂ qu'un petit)
 - Niveau d'activité de l'animal (un animal actif consomme plus d'O₂ qu'un inactif)
 -
 -
 -
 -
 -
 -

Taux métabolique spécifique: Défini comme étant la consommation d'énergie (ou d'oxygène) par unité de temps et par unité de poids corporel. Exprimé, par exemple, en mL d'oxygène par minute par gramme de poids corporel (mL O₂ / min / g).

Taux métabolique de base: C'est le taux métabolique mesuré dans certaines conditions standardisées, afin de minimiser l'impact de certains paramètres confondants. Ces conditions sont :

- Animal à jeûn depuis 24 h.
- Animal éveillé mais inactif.
- Température neutre pour l'animal.
- Animal non stressé.

Le taux métabolique standard est le taux métabolique de base d'un animal ectotherme (ex. : invertébré, poisson, amphibien, reptile) en spécifiant à quelle température il a été mesuré.

Taux métabolique de terrain : C'est le taux métabolique d'un animal en nature, donc dans des conditions non-standardisées. En général, le taux métabolique de terrain est 3 × plus élevé que le taux métabolique de base.

Q D'après vous, par quelle technique peut-on connaître le TM de terrain?

Q D'après vous, est-il possible d'avoir un TM inférieur au TM de base?

Pour avoir une idée des besoins énergétiques d'un animal (par exemple, ses besoins totaux en nourriture), on regarde son taux métabolique. Mais pour avoir une idée de l'efficacité avec laquelle son corps utilise l'énergie, il vaut mieux regarder le taux métabolique spécifique. On pose une question du genre : est-ce que 1 g d'éléphant consomme autant d'énergie que 1 g de souris? Le Tableau 2 à la prochaine page montre que le TM augmente avec le poids corporel, mais que le TM spécifique, lui, diminue avec le poids corporel. Un éléphant entier utilise plus d'énergie qu'une souris, mais 1 g d'éléphant utilise moins d'énergie que 1 g de souris!

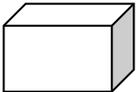
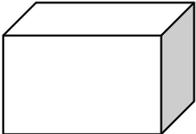
Peut-on quantifier cette relation entre le TM ou le TM spécifique et le poids corporel? Dans les pages qui suivent, nous allons regarder comment on peut mesurer (quantifier) la variation de différents paramètres en fonction du poids corporel. L'utilité ultime de faire ceci est de pouvoir éventuellement estimer et prédire un paramètre quelconque d'un animal juste à partir de son poids corporel. Un de ces paramètres à prédire sera le taux métabolique.

Tableau 2: Quantité d'oxygène consommée par des mammifères de différentes grosseurs.

Animal	Poids corporel (g)	Taux métabolique (mL O ₂ /h)	Taux métabolique spécifique (mL O ₂ /h /g)
musaraigne	5	36	7.40
souris	25	41	1.65
spermophile	96	99	1.03
rat	290	250	.87
chat	2 500	1 700	.68
chien	11 700	3 870	.33
mouton	42 700	9 590	.22
humain	70 000	14 760	.21
cheval	650 000	71 100	.11
éléphant	3 833 000	268 000	.07

Relation entre le métabolisme et la grosseur de l'animal:

Pour bien comprendre cette section, il nous faut d'abord examiner le concept de relation isométrique (isométrique = même forme générale, bien que la grosseur de la forme puisse varier):

	<u>Dimension linéaire</u>	<u>surface</u>	<u>volume</u>
	1	1	1
	2	4	8
	3	devinez!	devinez!

Q

Il est intéressant d'établir la relation entre certaines variables et le poids corporel. L'important est l'exposant associé à « poids corporel ».

- Si l'exposant est 1:

ex.: variable A est proportionnelle au poids¹

variable A est proportionnelle au poids

On peut dire que les gros animaux ont proportionnellement autant de A que les petits;

ou

si un animal est 2× plus gros, il a 2× plus de A.

On peut aussi dire que la variable A est une variable déterminée surtout par le poids de l'animal (ex.: volume sanguin).

- Si l'exposant est > 1:

ex.: variable A est proportionnelle au poids^{1.1}

On peut dire que les gros animaux ont proportionnellement plus de A que les petits.

ou

si un animal est 2× plus gros, il a $2^{1.1} = 2.14$ × plus de A. (Voir exemple à la page suivante.)

- Si l'exposant est < 1:

ex.: variable A est proportionnelle au poids^{0.8}

On peut dire que les gros animaux ont proportionnellement moins de A que les petits.

ou

si un animal est 2× plus gros, il a $2^{0.8} = 1.74$ × plus de A.

Si l'exposant rattaché à la variable étudiée se rapproche de 0.67 (2/3), on peut alors dire que la variable est déterminée surtout par la surface de l'animal ou de ses organes, car on a déjà vu que la surface varie en fonction du poids corporel à l'exposant 0.67.

- Si l'exposant est 0: Pas de relation. La variable étudiée reste constante, peu importe le poids corporel.

- Si l'exposant est < 0: Les gros animaux ont tout simplement moins de A que les petits. (Exemple à la page 25.)

EXEMPLE:

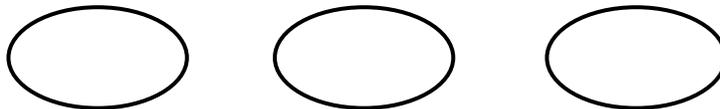
Chez les mammifères terrestres, la masse du squelette est proportionnelle au poids^{1.1}.

Puisque $1.1 > 1$: les gros mammifères ont des squelettes proportionnellement plus pesants que les petits mammifères.

Cette pesanteur additionnelle vient du fait que plusieurs os, en particulier ceux des pattes, sont proportionnellement plus larges, pour mieux supporter le poids additionnel.

À mesure qu'on passe d'un corps d'espèce plus petite à un corps d'espèce plus grosse, la masse augmente au cube de l'augmentation linéaire, tandis que les surfaces augmentent au carré (rappelez-vous des notions de relation isométrique). Or, la masse doit être supportée par les os, et la capacité de support d'un os dépend de la surface de sa coupe transversale. Donc, si l'os gardait la même forme, la masse du corps augmenterait plus vite (au cube) que la capacité de support de l'os (au carré). Les os ne pourraient plus supporter le corps! Il faut donc que les os ne gardent PAS la même forme. Il faut que leur largeur augmente proportionnellement plus (ce qui augmente plus leur surface de coupe transversale). Ceci est très évident quand on compare les squelettes de gros et petits animaux : pour une même dimension linéaire, les os des gros animaux sont proportionnellement plus larges que les os des petits animaux (surtout les os qui supportent le poids du corps, comme les os des pattes). Par exemple, quand un éléphant et une vache sont représentés à la même hauteur, la différence de largeur de leurs os des pattes est évidente. Cette largeur démesurée chez les plus gros animaux se traduit par une masse du squelette plus grande que ce à quoi on s'attendrait si la relation était parfaitement isométrique. L'exposant est plus grand que 1.

- Q** Chacune des formes ci-dessous représente grossièrement le corps (thorax et abdomen) d'un éléphant, une vache, et une fourmi. Faites-vous une image mentale de ces animaux, et puis dessinez leurs pattes.



- Q** Chez les baleines et les poissons, l'exposant est 1 plutôt que 1.1. Pourquoi?
- Q** Les géants de science-fiction (ex. : un homme haut de trois étages) peuvent-ils avoir la même forme que nous?
- Q** Comment les fourmis parviennent-elles à porter sur elles des objets aussi lourds que leur propre corps?

FINALEMENT, LA VARIABLE QUI NOUS INTÉRESSE:

Le taux métabolique de base (en mL O₂ / h, ou en kcal / h) s'avère être proportionnel au poids^{0.75}. Ceci s'appelle la Loi de Kleiber (et c'est rare d'avoir des lois universelles en biologie).²

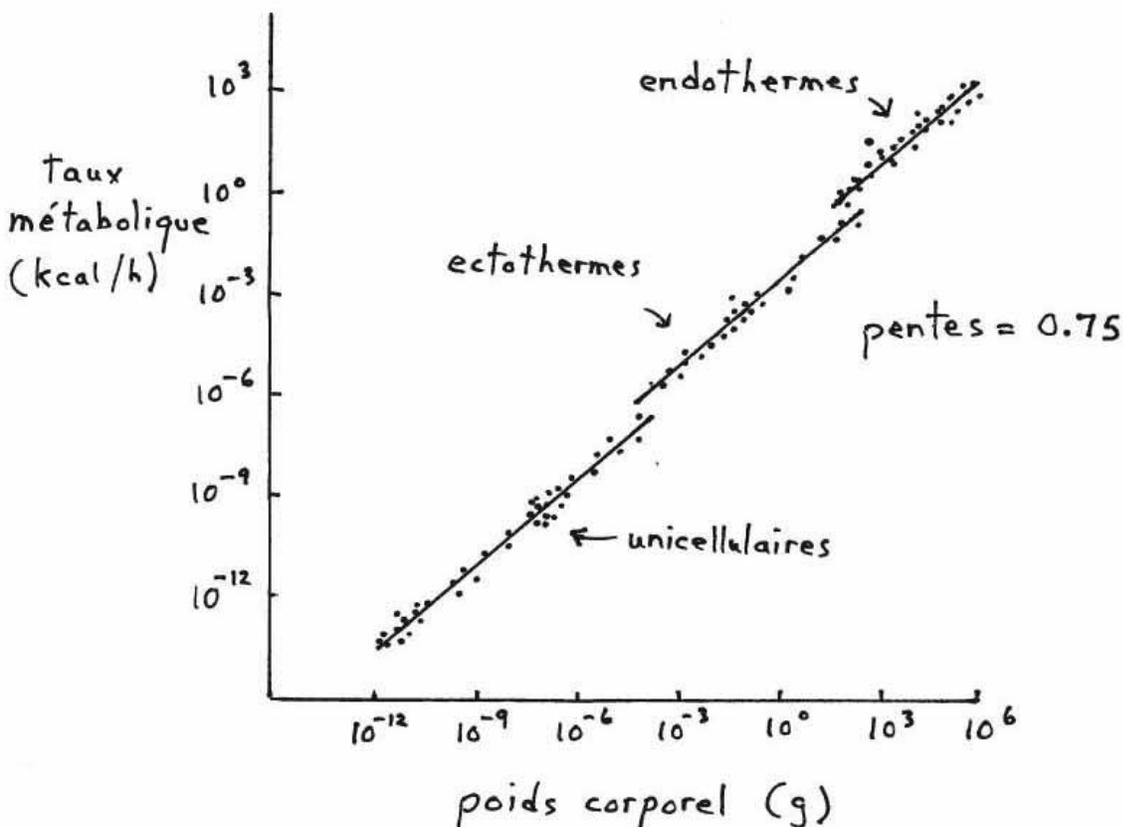


Figure 3.2 : Taux métabolique de différentes espèces en fonction de leur poids corporel adulte.

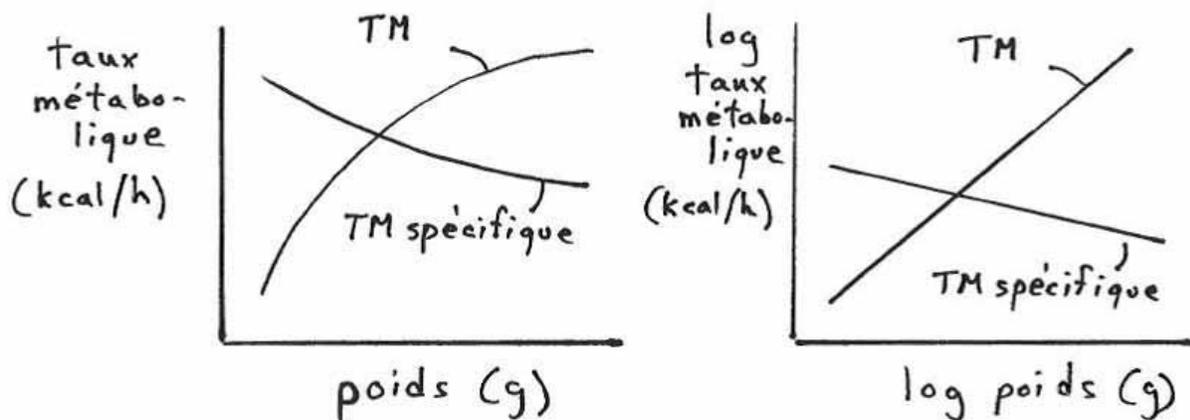
(Ectotherme correspond à « animal à sang froid ». Endotherme correspond à « animal à sang chaud ». On s'en parle dans un futur chapitre).

Remarquez qu'il s'agit d'un graphique log-log. Les pentes sont toujours **0.75**.

Donc, si un animal est 2× plus gros qu'un autre, il consomme $2^{0.75} = 1.68\times$ plus d'O₂.

Ce qui veut dire qu'un animal qui est 2× plus gros qu'un autre n'a pas besoin de 2× plus de nourriture! Il a besoin de seulement 1.68× plus. Un animal qui est 3× plus gros qu'un autre n'a pas besoin de 3× plus de nourriture; il a besoin de $3^{0.75} = 2.28\times$ plus de nourriture. Il en a besoin de plus, en termes absolus, mais pas autant qu'on pourrait le penser. Proportionnellement (c'est-à-dire, par g de poids corporel, ou par rapport à son poids corporel total), il en a besoin de moins, en fait.

² Mais notez qu'à l'intérieur de plusieurs groupes phylétiques (seulement les oiseaux, par exemple), l'exposant varie entre 0.6 et 0.9. La valeur 0.75 pourrait être l'exposant qui unit plusieurs régressions qui chacune ont une pente différente. De plus, si on considère le taux métabolique de terrain plutôt que de base, l'exposant semble être 0.8 plutôt. Donc, pas si universelle, la loi!



Le taux métabolique ($\text{mL O}_2 / \text{h}$) est proportionnel au poids corporel $^{0.75}$.

Il en découle mathématiquement que le taux métabolique spécifique ($\text{mL O}_2 / \text{h} / \text{g}$ de poids corporel) devrait être proportionnel au poids corporel $^{-0.25}$. Et c'est effectivement ce qu'on mesure. D'autres paramètres reliés conceptuellement au TM spécifique, mais plus faciles à mesurer, comme la fréquence cardiaque ou la densité moyenne de mitochondries dans les cellules, semblent elles-aussi varier d'une espèce à l'autre en fonction du poids corporel à l'exposant -0.25 .

Intéressant: Vous vous rappelez que la surface d'un objet est reliée au poids de cet objet par un facteur 0.67, un chiffre relativement près de 0.75. Le taux métabolique d'un animal serait-il influencé beaucoup par des procédés de surface, tels que la perte de chaleur (à la surface du corps) ou l'échange des gaz respiratoires (à la surface des organes respiratoires) ou l'absorption des substances nutritives (à la surface des intestins)?

La ligne de régression qui décrit la relation entre le taux métabolique et le poids corporel vous permet de prédire la consommation d'oxygène moyenne d'un animal de poids donné. Mais si vous mesurez la consommation réelle d'un groupe d'espèces et vous obtenez toujours la même déviation par rapport à la normale, vous pouvez commencer à poser des questions intéressantes :

- Q Sur la figure de la page précédente, les points qui correspondent aux cétacés (baleines, dauphins, marsouins, etc.) sont toujours au-dessus de la ligne de régression (un cétacé consomme plus d'oxygène qu'un autre animal endotherme moyen de poids comparable). Pourquoi?
- Q Devinez si les points correspondant aux groupes d'animaux suivants ont tendance à être au-dessus ou en-dessous de la ligne de régression de tous les animaux :
- Espèces de l'Arctique
 - Espèces du désert
 - Espèces cavernicoles
 - Oiseaux (comparé aux autres endothermes)
 - Marsupiaux (comparé aux autres mammifères)

Exercices:

- Q** 1) Une souris de 25 g a besoin de 3 g de nourriture par jour pour survivre. Combien de nourriture, au minimum, doit-on donner à un rat de 250 g pour qu'il survive? Une fois votre réponse atteinte, comparez les besoins respectifs en nourriture en termes de % du poids corporel.
- Q** 2) Vous êtes un ou une biologiste travaillant sur les ours. Votre spécialité est l'ours noir mais ces temps-ci vous travaillez sur l'ours polaire. Vous vous apprêtez à anesthésier un ours polaire mâle afin de pouvoir lui poser un collier-émetteur sans qu'il vous arrache un bras. Vous allez utiliser la drogue M-99 (étorphine). Dans le passé, vous aviez l'habitude d'utiliser 2.9 g d'étorphine pour un ours noir de poids moyen (180 kg). Vous vous trouvez ici en face d'un ours polaire de 400 kg. Quelle dose d'anesthésiant devriez-vous utiliser?
- Q** 3) Une espèce de rongeur pèse 40 g et sa densité moyenne de mitochondries par cellule est 80. Devinez quelle est la densité moyenne de mitochondries par cellule chez un rongeur de 100 g.
- Q** 4) Vous pratiquez la pêche au saumon. Votre plus grosse prise à vie est un saumon atlantique qui mesurait 0.7 m de long et pesait 3.2 kg. De retour de vacances, un de vos amis vous raconte qu'il a attrapé un saumon de 1.1 m, mais cela ne vous donne pas une très bonne idée de sa taille parce que vous avez l'habitude de décrire vos prises en termes de poids. Pouvez-vous faire la conversion en poids à partir de 1.1 m?

- Q** 5) Vous gardez un animal en laboratoire et vous le nourrissez uniquement avec des lipides (graisses). A l'aide d'un respiromètre spécial, vous mesurez que cet animal expire 5 mL de CO₂ par heure. Quelle est son taux de consommation d'énergie (utilisez le système d'unités international)? Indice : référez-vous au tableau 1 à la page 18.

- Q** 6) Considérez les données suivantes prises sur quatre mammifères:

poids de l'animal (kg)	log poids	volume du poumon (mL)	log volume
0.5	-0.301	25.66	1.409
1.5	0.176	82.23	1.915
5.0	0.699	294.62	2.469
20.0	1.301	1280.69	3.107

Utilisez ces données pour prédire le volume du poumon d'un mammifère de 12 kg.

- Q** 7) Un poisson mesure 100 cm de long et a besoin de 15 g de nourriture par jour. De combien de nourriture par jour un poisson de même forme mais de 60 cm de long a-t-il besoin?

- Q** 8) Quand on installe des petits pièges pour capturer des souris vivantes, on met du beurre de *peanut* dans le piège. C'est pour les attirer dans le piège (la souris entre dans le piège, ce qui déclenche une porte qui se referme, et la souris est capturée vivante). Mais les biologistes expérimentés savent qu'il faut en fait mettre beaucoup de beurre de *peanut* dans le piège. Pourquoi? (Indice : les pièges ne sont pas inspectés à toutes les heures; souvent on les installe au début de la nuit – les souris sont nocturnes – et on les inspecte seulement le lendemain matin.)
- Q** 9) La testostérone est une hormone produite par les mâles et elle stimule grandement l'anabolisme, incluant chez l'être humain. Pouvez-vous expliquer pourquoi les hommes, en moyenne, préfèrent dormir avec moins de couvertes (ou avec la fenêtre plus grande ouverte) que les femmes?
- Q** 10) Devinez laquelle des espèces de mammifères suivantes est reconnue pour manger une fois et demie son propre poids corporel en nourriture à chaque jour?
- a) Musaraigne b) Chat c) Éléphant d) Vache
- Q** 11) Un poisson est captif à l'intérieur d'un dispositif expérimental en forme de tuyau. L'eau entre à l'extrémité du tuyau où se trouve la tête du poisson et sort à l'extrémité où se trouve la queue, avec un débit de 800 mL / min. La concentration d'oxygène est de 0.015 ml d'oxygène par litre d'eau dans l'eau qui entre, et 0.011 mL / l dans l'eau qui sort. Quel est le taux métabolique de ce poisson? Montrez vos calculs.

Q 12) Un animal a un taux métabolique de 12.9 mL d'O₂ par minute. Il a un taux métabolique spécifique de 0.16 mL d'O₂ par gramme par minute. Il produit 11.6 mL de CO₂ par minute. Sa fréquence respiratoire est de 25 respirations par minute. Utilisez ces données, en tout ou en partie, pour calculer le quotient respiratoire de l'animal.

Q 13) Certains respiromètres servent à mesurer la consommation d'oxygène par des insectes. Ils sont très simples. Il s'agit d'une grosse éprouvette fermée par un bouchon. Le bouchon est transpercé par un tube millimétré, et ce tube est lui-même bouché par une goutte d'huile. L'insecte repose sur un grillage à l'intérieur de l'éprouvette, et en-dessous du grillage il y a une substance poudreuse. À mesure que l'insecte respire, le volume d'air à l'intérieur de l'éprouvette diminue, et donc la goutte d'huile dans le tube millimétré descend, et connaissant l'échelle sur le tube millimétré on peut donc quantifier la diminution du volume d'air par unité de temps, et de là on peut connaître la consommation d'oxygène de l'insecte par unité de temps. Expliquez à quoi sert la substance poudreuse dans le fond de l'éprouvette, et qu'est-ce qui arriverait si elle n'était pas là.

Q 14) Qu'est-ce qui est faux dans le paragraphe ci-dessous?

La technique de l'eau doublement marquée utilise des isotopes radioactifs d'hydrogène et d'oxygène. L'eau doublement marquée est injectée dans l'animal au temps A, un échantillon de sang est pris peu de temps après (temps B), et un autre échantillon de sang est pris quelques jours plus tard (temps C). En comparant la concentration d'isotopes radioactifs d'hydrogène dans les échantillons entre les temps C et B, on estime la perte d'eau par l'animal. En comparant la concentration d'isotopes radioactifs d'oxygène dans le corps de l'animal entre les temps C et B, on estime la perte d'eau ET de CO₂ par l'animal. De là on peut calculer la production de CO₂ par l'animal par unités de temps, et de là, si on connaît le quotient respiratoire, on peut calculer la consommation d'oxygène par l'animal. Cette technique est la seule qui nous permet de mesurer le taux métabolique de base d'un animal sauvage en nature.

- Q** 15) Lequel ou lesquels des énoncés suivants est (sont) vrai(s) :
- a) 1 calorie = 1000 Calories.
 - b) 1 Calorie = 1 kilocalorie.
 - c) 125 calories = 0.125 Calorie.
 - d) 1 Cal = 4.184 J.
- Q** 16) Vous mesurez le taux métabolique de base, le taux métabolique spécifique, et le taux métabolique de terrain d'un écureuil, utilisant les mêmes unités de mesure d'énergie. Laquelle des trois valeurs que vous obtiendrez sera la plus basse, et laquelle sera la plus haute?
- Q** 17) Qu'est-ce qui arrivera à la concentration d'oxygène dans un contenant fermé auquel on ajoute un organisme spécialisé dans le métabolisme glycolytique?
- a) Elle va diminuer.
 - b) Elle va augmenter.
 - c) Elle ne va pas changer.
 - d) Elle va diminuer et par la suite augmenter.
 - e) Elle va augmenter et par la suite diminuer.
- Q** 18) Vous examinez au microscope des cellules du foie et des cellules du pancréas. Vous remarquez que les cellules du foie présentent une plus grande densité de mitochondries que les cellules du pancréas. Lequel des énoncés suivants est le plus consistant avec votre observation?
- a) Le foie a une activité métabolique plus grande que le pancréas.
 - b) Le foie remplit un rôle plus important que le pancréas.
 - c) Par unité de poids, le pancréas consomme plus d'oxygène que le foie.
 - d) Les cellules du pancréas font plus de métabolisme glycolytique que les cellules du foie.

- Q** 19) Quelqu'un consomme régulièrement une drogue qui est reconnue pour « stimuler le métabolisme ». Si cette personne ne change pas sa quantité de nourriture consommée à chaque jour, par rapport à quand elle ne prenait pas la drogue en question, son poids va :
- a) Augmenter.
 - b) Diminuer.
 - c) Rester sensiblement le même.
- Q** 20) Quelqu'un consomme régulièrement une drogue qui est reconnue pour « stimuler le métabolisme ». À comparer à quand elle ne prenait pas la drogue, qu'est-ce qui va arriver à son appétit?
- Q** 21) Vous voulez savoir si la production de sons (coassements) par une grenouille mâle en période de reproduction est énergétiquement coûteuse. Quelle expérience, et avec quel équipement, allez-vous faire? Vous avez le droit de travailler en laboratoire; si vous décidez de le faire (ça serait une bonne idée, parce que ça serait plus facile), demandez-vous comment on pourrait éliciter une grenouille captive à vocaliser, et même à vocaliser à différentes intensités (fréquence de coassements par minute). À quoi pourrait ressembler le graphique des résultats que vous allez obtenir?
- Q** 22) Pourquoi n'est-il pas économique d'élever de petits mammifères pour leur viande (on élève des cochons ou des vaches, pas des souris ou des rats)? Et pourquoi est-ce qu'il peut être économique d'élever des poissons aussi petits que des rats pour leur viande?

Chapitre 4

Énergétique de la locomotion

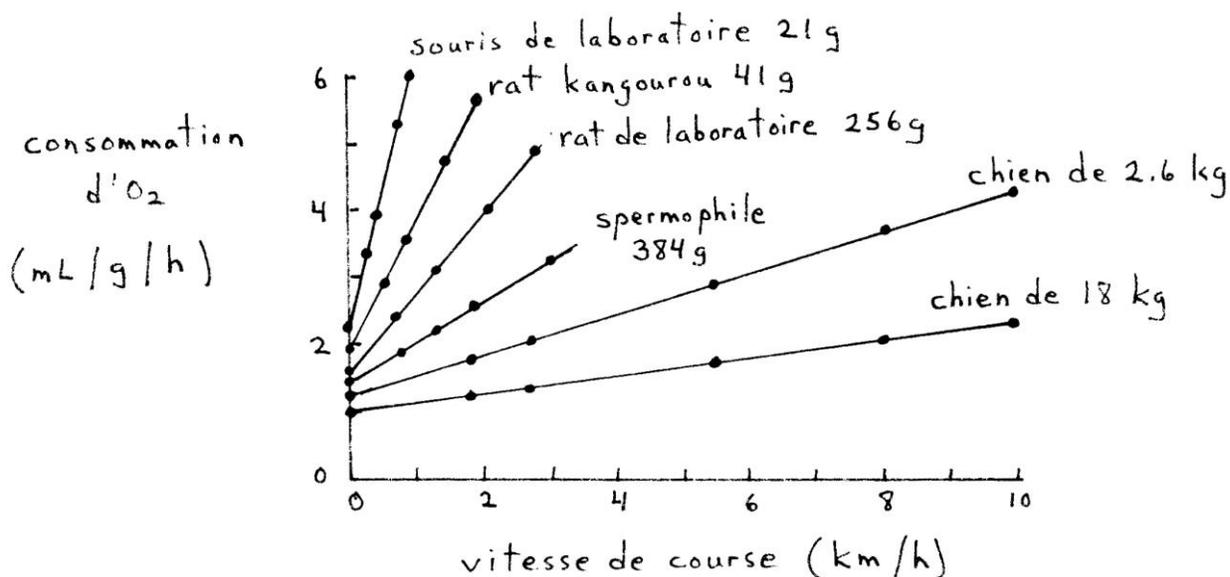


Figure 4.1: Taux métabolique spécifique de divers animaux courant sur un tapis roulant.

En termes d'énergie dépensée par km parcouru par g de poids corporel, vaut-il mieux courir vite ou lentement? S'il faut courir 1 km le plus économiquement possible, la vitesse est-elle importante?

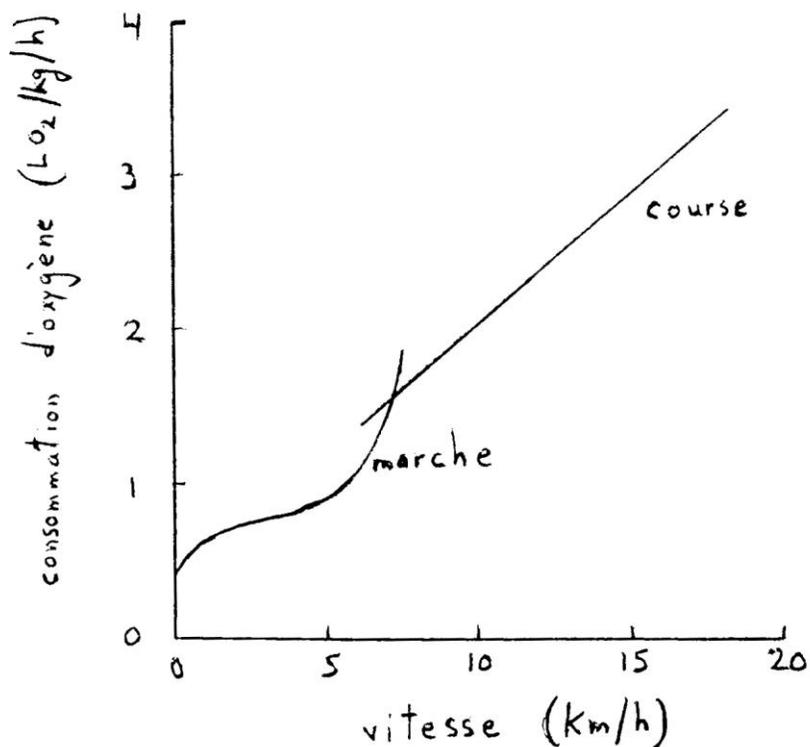
Pour répondre à une question de ce genre avec les données du graphique ci-dessus, il y a un truc. La pente d'une droite, par définition, est $\Delta y / \Delta x$. Ici, quand on regarde les unités de mesure des axes du graphique, la pente représente $\Delta \text{ml O}_2/\text{g/h}$ divisé par $\Delta \text{km/h}$. Les « /h » s'éliminent, donc la pente représente des $\text{ml O}_2/\text{g/km}$, ce qui est exactement ce que la question demande.

Donc, prenons le chien de 18 kg, par exemple. Sa dépense d'énergie par g de poids corporel et par kilomètre parcouru à une vitesse de, disons, 8 km/h est en fait la pente de la droite qui unit le point à $v = 8 \text{ km/h}$ avec le point à $v = 0 \text{ km/h}$ (c'est-à-dire, sa dépense d'énergie quand il court à 8 km/h par rapport à quand il ne court pas).

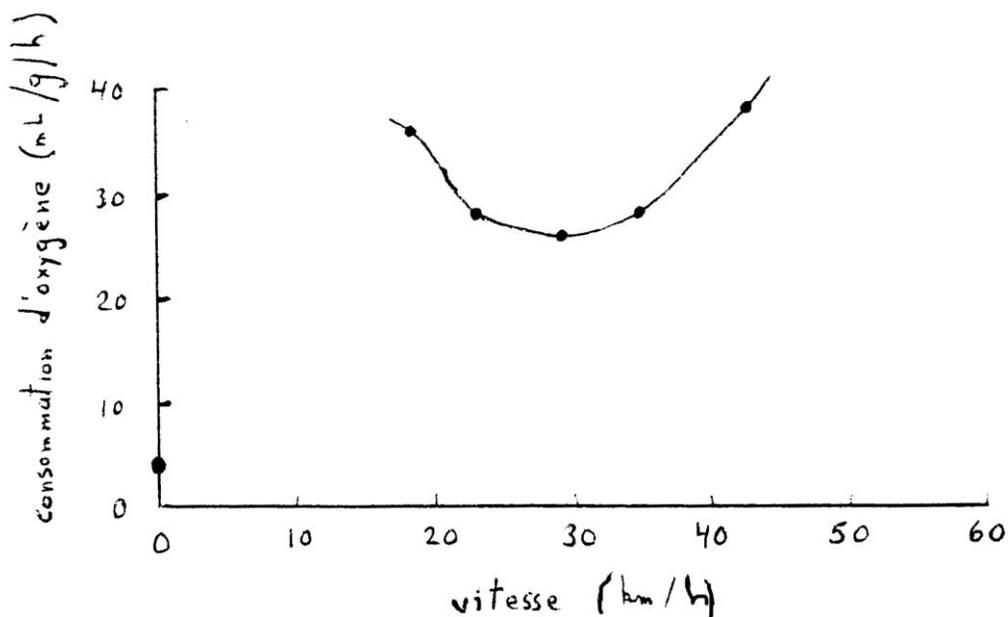
Il est facile de voir que pour un même animal, tous les points sont sur une même droite, et donc la pente des droites qui unissent $v = 0$ avec $v = 2$ ou 3 ou 6 ou 8 est toujours la même. Ce qui revient à dire que peu importe si l'animal court vite ou lentement, sa dépense d'énergie par kilomètre parcouru sera toujours la même.

Q Toujours en termes d'énergie dépensée par km parcouru par g de poids corporel, vaut-il mieux être un gros animal ou un petit animal?

- Q Considérez le graphique suivant, lequel montre la consommation d'oxygène d'un être humain qui marche ou qui court à différentes vitesses. En termes d'énergie dépensée par km parcouru par g de poids corporel, vaut-il mieux pour un être humain de marcher ou de courir?



- Q Considérez maintenant le graphique suivant, lequel montre la consommation d'oxygène d'un oiseau qui vole à différentes vitesses dans un tunnel à vent. A quelle vitesse cet oiseau doit-il voler pour minimiser le coût énergétique de voler une distance donnée?



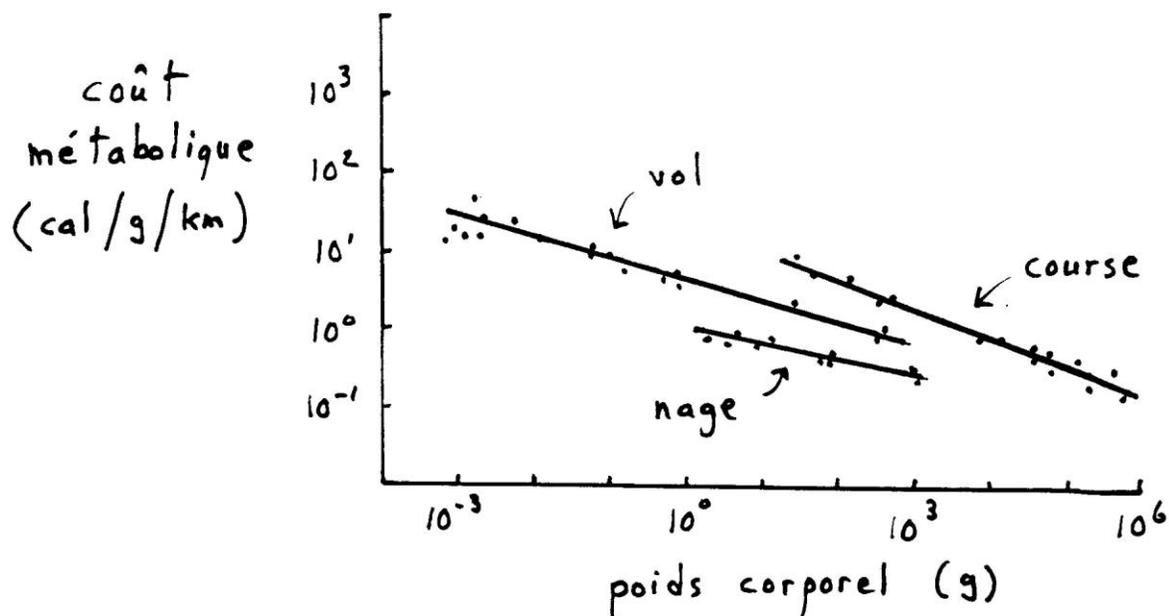


Figure 4.2 : Coût énergétique de parcourir 1 km pour diverses espèces animales caractérisées par différents modes de locomotion.

Pour un même poids donné, les animaux nageurs dépensent moins d'énergie par kilomètre parcouru que les animaux qui volent, lesquels en retour en dépensent moins que les animaux coureurs.

La raison est que lorsqu'un coureur (ou marcheur) se déplace, il faut aussi qu'il combatte la gravité. Par exemple, quand on marche, il faut commencer par élever notre pied contre la gravité. Puis quand le pied atterrit à la fin d'un pas, il faut dépenser de l'énergie pour amortir la chute de notre corps. Ces mouvements de bas en haut et de haut en bas pendant qu'on se déplace ne contribuent pas directement à nous déplacer vers l'avant, mais ils coûtent de l'énergie quand même. La plus grande dépense d'énergie des coureurs vient de la dépense accrue d'énergie pour combattre la gravité lors de leurs déplacements.

- Q** Pourquoi est-ce que les poissons (nageurs) sont ceux qui dépensent le moins d'énergie lors de leurs déplacements?
- Q** Pourquoi est-ce que les oiseaux sont intermédiaires? (Indice : Regardez « Effet Bernoulli » sur l'internet, et pensez à la forme des ailes d'oiseaux.)

À noter certains cas spéciaux:

Humain et canard qui nagent:

La dépense d'énergie d'un humain ou d'un canard qui nagent sous l'eau est très grande, encore plus grande que celle d'un coureur de même poids, en fait. C'est donc dire que l'absence d'effet gravitationnel dans le cas des poissons n'explique pas tout sur l'économie de leurs déplacements. Il faut aussi avoir des adaptations spécifiques à la nage, comme une forme hydrodynamique pour bien fendre l'eau et minimiser sa résistance aux déplacements, du mucus sur le corps pour minimiser la friction avec l'eau, des mouvements ondulatoires du corps pour pousser sur l'eau, etc. Les humains et les canards n'ont pas ces adaptations au même point que les poissons.

Serpent:

Un serpent terrestre qui se déplace dépense moins d'énergie qu'un coureur de même poids. Reposant directement sur le sol et n'élevant pas son corps lors des déplacements, un serpent ne dépense pas d'énergie additionnelle à combattre la gravité quand il avance. Tout ce qu'il lui faut, ce sont des adaptations spéciales pour minimiser la friction avec la terre, ce que lui donne ses écailles.

Kangourou:

Un kangourou qui se déplace (bondit) dépense beaucoup moins d'énergie qu'un coureur de même poids. C'est parce qu'il a un truc pour économiser l'énergie dans le combat contre la gravité. Quand il atterrit, ses pattes postérieures se plient forcément au niveau du talon, et cela étire le tendon d'Achille. Ce gros tendon est élastique, il a beaucoup tendance à revenir à sa longueur normale. Donc, quand le kangourou s'élance pour son prochain bond, l'ouverture des pattes postérieures est facilitée par le tendon étiré qui tend à revenir à sa longueur normale. C'est comme si le kangourou était sur des échasses à ressort (« *pogo stick* ») : l'énergie entreposée dans le « ressort » (le tendon) quand le kangourou atterrit est redonnée lors de l'élévation suivante, ce qui fait que le kangourou n'a pas besoin de dépenser autant d'énergie pour s'élever contre la gravité.

Cycliste:

- Q** Un cycliste dépense beaucoup moins (environ 3× moins) d'énergie qu'un coureur de même poids. En fait, il en dépense aussi peu que les poissons nageurs de même poids. Certainement, vous êtes maintenant capables d'expliquer pourquoi.....

Question à réflexion :

- Q** La baleine bleue (le plus gros mammifère au monde) est une très bonne nageuse. L'éléphant (le plus gros mammifère terrestre au monde) n'est pas un bon coureur. Pourquoi serait-il difficile ou dangereux pour un éléphant de courir?

Chapitre 5

Thermorégulation: tolérance aux écarts de température

Le Q_{10} :

La plupart des procédés physiologiques s'effectuent de façon plus rapide et plus grande à mesure que la température s'élève. La relation entre la vitesse du procédé et la température se mesure par le Q_{10} .

Définition de Q_{10} : Rapport entre le taux d'un procédé à une température T et à T - 10 °C.

$$Q_{10} = \frac{\text{taux à T}}{\text{taux à T-10 °C}} \quad \text{ex. : } \frac{\text{mL O}_2 / \text{h consommé à } 23.5 \text{ °C}}{\text{mL O}_2 / \text{h consommé à } 13.5 \text{ °C}}$$

On peut calculer le Q_{10} même si on ne bénéficie pas d'un intervalle d'exactly 10 °C :

$$Q_{10} = \left(\frac{\text{taux 1}}{\text{taux 2}} \right)^{10 / (T_1 - T_2)} \quad \text{où } T_1 \text{ est la température du taux 1}$$

T_2 est la température du taux 2

Pour la plupart des procédés physiologiques, le Q_{10} est approximativement 2. Le procédé double à chaque augmentation de 10 °C. Par contre, cela n'est vrai qu'à l'intérieur de certaines limites de température. Si la température est beaucoup trop basse, les enzymes qui catalysent les réactions biochimiques n'ont plus assez d'énergie pour fonctionner, et si la température est beaucoup trop haute les enzymes commencent à se dénaturer (se briser). Ceci nous amène au sujet suivant:

Limites de température pour la vie active:

La vie active (donc, on ne compte pas les cas de diapause ici) n'est possible que si les réactions biochimiques dans le corps peuvent se faire. Or, les enzymes qui catalysent ces réactions ne fonctionnent pas à toutes les températures. Les limites sont approximativement -2 °C et +50 °C.

Ces limites sont définies pour la Vie en général. Chaque espèce animale a un bagage différent d'enzymes, et chaque bagage a sa propre température optimale de fonctionnement. Chaque animal a une température corporelle préférée à laquelle l'ensemble de ses enzymes fonctionnent en harmonie. Si la température du corps dévie trop de cette norme préférée, l'animal meurt parce que les réactions biochimiques ne se font plus en harmonie à l'intérieur de son corps.

Exemples d'animaux qui préfèrent le froid (parce qu'ils ont des enzymes performantes au froid):

- Les trématodes sont des poissons de l'Antarctique bien adaptés au froid. Ils meurent de chaleur à 6 °C !
- Les salmonidés (saumons, truites) préfèrent les eaux de rivière ou le fond des lacs, là où la température est plus froide.
- Les insectes de l'Arctique.

Exemples d'animaux qui préfèrent le chaud (parce qu'ils ont des enzymes performantes au chaud):

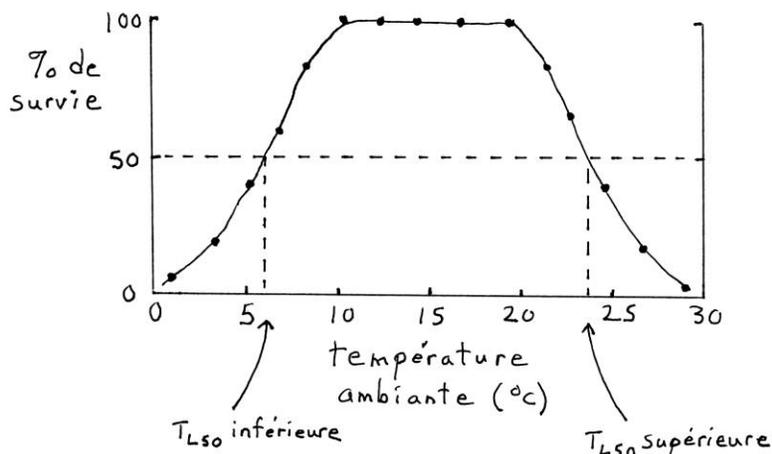
- Le poisson *Cyprinodon diabolis* vit dans des sources d'eau thermales (34 °C) dans le sud-ouest des États-Unis. Il peut survivre jusqu'à 43 °C, un record pour les poissons. C'est une température infernale! (Regardez à nouveau le nom latin de l'espèce.)
- Les insectes du désert.

La T_{L50} :

La T_{L50} (« température létale 50 ») est la température ambiante à laquelle 50% des individus testés meurent (ou 50% survivent, ce qui revient au même). Il y a habituellement une T_{L50} inférieure (mort de froid) et une T_{L50} supérieure (mort de chaleur).

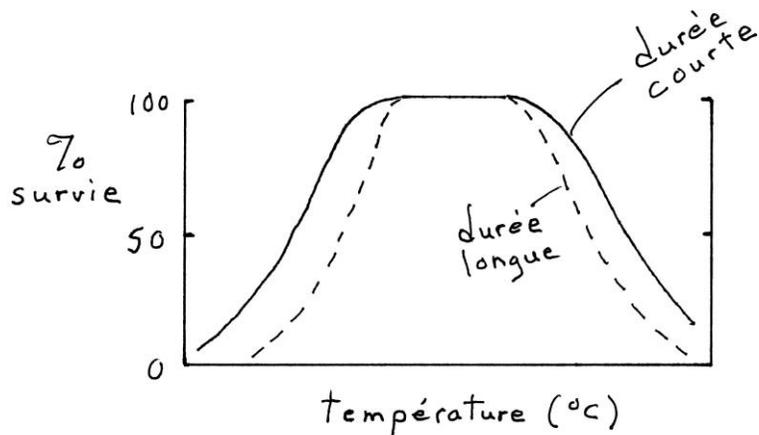
Un concept similaire, en écotoxicologie, est la D_{L50} , la dose d'un poison ou d'un contaminant environnemental à laquelle 50% des individus testés meurent. La D_{L50} est toujours une seule valeur, supérieure (on ne peut pas mourir par manque de poison!). Il faut cependant spécifier la voie d'administration du poison/contaminant (contact externe, ingestion, injection) car cela peut influencer l'efficacité du poison/contaminant.

Manière expérimentale de trouver la T_{L50} :



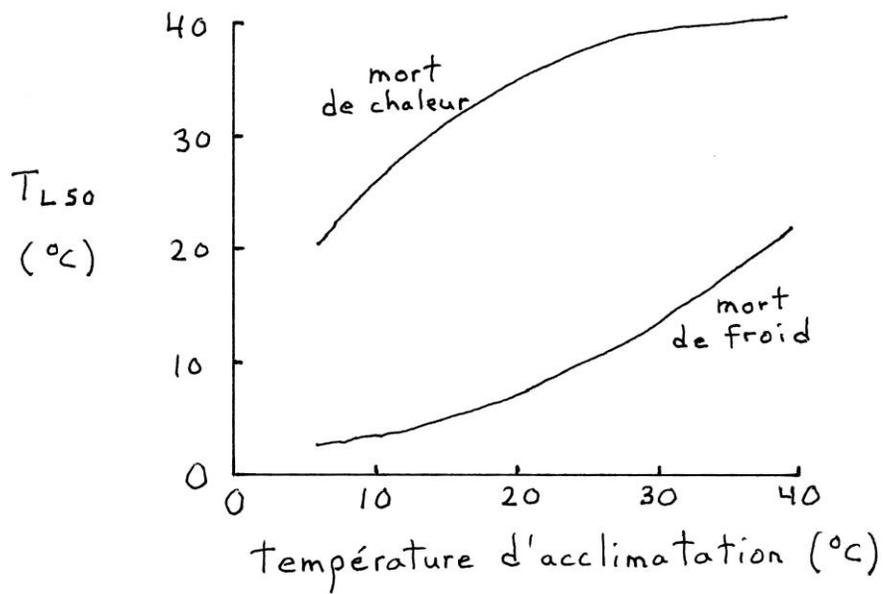
La T_{L50} varie d'une espèce à l'autre, mais même pour une même espèce elle peut varier d'une expérience à l'autre, dépendamment de:

La durée d'exposition à la température testée: L'animal survit moins bien à des températures extrêmes quand il y est exposé plus longtemps.



La température à laquelle l'animal était gardé et s'était acclimaté avant l'expérience:

Un animal acclimaté (pas nécessairement adapté!) au froid présentera des T_{L50} plus basses qu'un animal acclimaté au chaud.



La tolérance au gel:

En hiver, quand la température de l'environnement s'abaisse en-dessous du point de congélation, certains animaux comptent sur leur métabolisme élevé pour réchauffer leur corps (mammifères, oiseaux), d'autres recherchent des endroits où la température demeure au-dessus de 0°C (exemples : poissons dans le fond d'un lac à 4°C, vers de terre qui s'enfoncent sous la couche de sol gelé), mais d'autres, étonnamment, laissent la température de leur corps baisser sous 0 °C. Est-ce que leur corps (lequel est fait à plus de 75% d'eau) gèle? Pour certains, la réponse est non; pour d'autres, la réponse est oui, partiellement.

Surfusion (« supercooling »):

L'eau gèle parce que des cristaux de glace se forment (et ce sont ces cristaux qui sont mortels, car ils brisent les organites des cellules). Mais pour que les cristaux se forment, il faut que les molécules d'eau soient alignées de façon spéciale les unes avec les autres. Cet alignement est spontané si des cristaux de glace ou des particules de poussière sont déjà présents, ou si l'eau bouge beaucoup. Si on peut éviter ces deux conditions (ce qui est très difficile), on peut super-refroidir l'eau jusqu'à -40 °C sans qu'elle gèle (et même plus bas si l'eau contient des solutés).

Certains animaux ont adopté cette stratégie pour empêcher le gel. Certains reptiles peuvent être super-refroidis jusqu'à -8 °C, certains insectes jusqu'à -50 °C.

Cette stratégie n'est pas rare mais elle est instable. Si l'animal vient en contact avec un morceau de glace, cette glace permet spontanément l'alignement des molécules d'eau super-refroidies et l'animal gèle instantanément, et meurt. Il y a des poissons marins dans l'Arctique qui vivent en état de surfusion dans de l'eau à -1.8 °C. Cette eau n'est pas gelée à cause de son contenu en sels, mais à sa surface il y a de la glace (en provenance de glaciers) qui flotte. Les poissons doivent rester dans le fond de l'eau pour éviter le contact avec la glace.

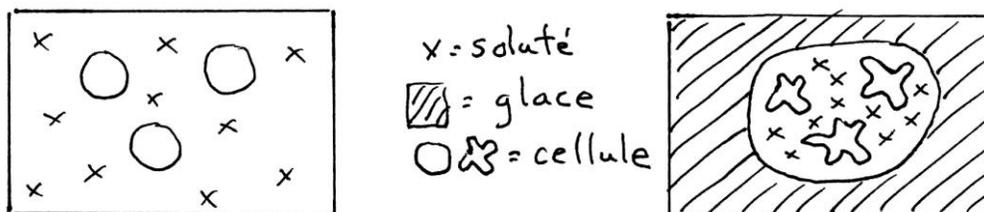
Utilisation d'antigel:

Certaines substances ont la propriété d'empêcher la formation ou la croissance de cristaux de glace en empêchant les molécules d'eau de s'aligner correctement et en recouvrant les cristaux déjà existants. Ce sont des antigels. Certains animaux synthétisent ces substances (du glycérol chez les insectes, des protéines ou glycoprotéines chez les poissons marins qui vivent en surface) et les répandent dans tout leur corps. (Dans les labos de physiologie, on se sert aussi du glycérol pour garder en vie – pour empêcher de geler – des cellules gardées au congélateur.)

Antigel et gel partiel:

Certains animaux confectionnent de l'antigel qu'ils entreposent dans leurs cellules pour empêcher que des cristaux de glace ne se forment et brisent les organelles. Par contre, ils laissent une bonne partie (jusqu'à 65%) du liquide interstitiel (= à l'extérieur des cellules) geler.

Le liquide interstitiel ne peut pas entièrement geler parce qu'à mesure qu'il gèle, les solutés qui s'y trouvaient s'accroissent de plus en plus dans la partie qui est encore liquide autour des cellules, augmentant ainsi l'osmolarité, et l'eau quitte alors les cellules par osmose. Ces cellules finissent par se déshydrater. La capacité des cellules à supporter la perte d'eau détermine la température minimale que l'animal peut tolérer.



Cette stratégie de gel partiel est adoptée par beaucoup d'espèces canadiennes: grenouille des bois, rainette crucifère, rainette faux-grillon, jeunes tortues peintes (peut-être), et de nombreux insectes et larves d'insectes. Ces animaux partiellement gelés, au toucher, apparaissent durs comme un bloc de glace. Il va sans dire qu'il n'y a plus de respiration et plus d'apport sanguin.

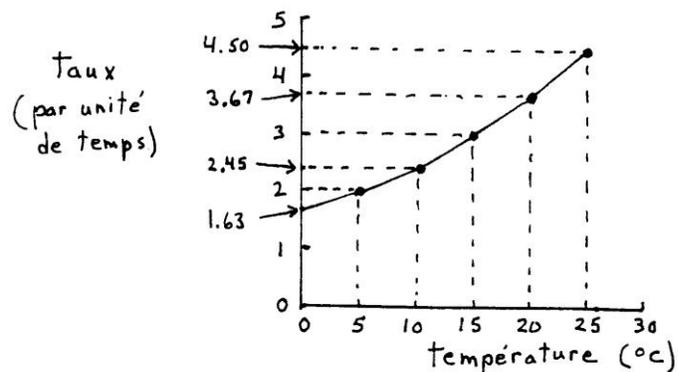
Q Comment alors les cellules de leurs corps survivent-elles (obtiennent de l'énergie)?

Exercices:

Q 1) Un animal consomme 5 mL d'oxygène par heure à 10 °C, et 13 mL à 25 °C. Quel est le Q_{10} de la consommation d'oxygène chez cet animal entre 10 et 25 °C?

Q 2) Quel est le Q_{10} d'un procédé physiologique chez un animal qui s'est acclimaté à la nouvelle température dans laquelle vous l'avez placé?

- Q 3) Le graphique suivant illustre le taux d'un procédé physiologique en fonction de la température à laquelle ce procédé prend place. Déterminez le Q_{10} à partir de ce graphique (montrez votre calcul).



- Q 4) Faites un graphique, selon les règles de l'art, qui montre l'évolution du taux métabolique d'un lézard en fonction de la température ambiante entre 5 et 45 °C, sachant que l'animal consomme 20 mL d'oxygène par heure à 25 °C, et que le Q_{10} pour le taux métabolique de cette espèce est normalement de 2. Mettez des chiffres sur vos axes qui permettront de vérifier que votre graphique illustre bel et bien un Q_{10} de 2 à partir des données fournies ici.

- Q 5) Les grenouilles qui tolèrent le gel accumulent beaucoup de glucose dans leurs cellules avant de geler. Imaginez trois avantages possibles résultant de cette accumulation de glucose dans les cellules.

- Q** 6) Vous lisez un article scientifique qui rapporte les résultats d'une étude visant à déterminer la T_{L50} d'une espèce de grenouille. L'étude a été faite au Nouveau-Brunswick. Dans la section « Matériel et Méthodes », vous lisez que les chercheurs ont commencé par trouver le taux de survie d'un groupe de 10 grenouilles à 5 °C, puis le taux de survie d'un autre groupe de 10 grenouilles à 10 °C, et ainsi de suite par intervalles de 5 °C jusqu'à un dernier groupe testé à 35 °C. Chaque groupe était capturé en nature juste avant d'être utilisé pour le test à une température donnée. L'expérience a duré de mai jusqu'à octobre 2014. Trouvez-vous que cette expérience a été bien faite?
- Q** 7) Certains insectes sont très pointilleux quand vient le temps de choisir un endroit où passer l'hiver, dans un état d'inactivité ou de diapause. Ils n'acceptent que des endroits qui sont très secs. Pourquoi?
- Q** 8) Complétez par « plus élevé », « moins élevé », ou « égal ».
- Au-dessus de la T_{L50} inférieure, le taux de mortalité est _____ qu'en-dessous.
 - À des températures tellement faibles que les enzymes n'arrivent plus à fonctionner, le Q_{10} est _____ que la valeur normale de 2.
 - Lors d'un test de T_{L50} , si la durée d'exposition à une température ambiante est plus longue, la T_{L50} inférieure mesurée est _____ que si la durée est courte.
 - Un Q_{10} de 0.7 indique que le paramètre mesuré devient _____ à mesure que la température ambiante s'élève.
 - L'osmolarité autour des cellules d'un tissu partiellement gelé est _____ que si le tissu n'était pas gelé du tout.
 - Le point de congélation d'un tissu en état de surfusion est _____ que dans son état normal.

Chapitre 6

Thermorégulation: Principes de base

Nomenclature:

Thermorégulation: Régulation de la température du corps.

Température du corps: Habituellement mesurée en profondeur près des organes abdominaux.

En pratique, on la mesure avec un thermomètre placé sous la langue, ou, plus communément avec les animaux (qui pourraient casser le thermomètre avec leurs dents), avec un thermomètre inséré dans le rectum ou le cloaque. Ces endroits anatomiques sont richement vascularisés (= beaucoup de vaisseaux sanguins) et le sang à ces endroits est à la même température que dans la cavité abdominale.

Une autre méthode, utile sur le terrain, est la télémétrie. On implante un émetteur radio dans la cavité abdominale de l'animal. Le signal radio varie en fonction de la température interne et peut être capté à distance par une antenne, ou en continu par un enregistreur (« *data logger* ») attaché à l'animal (il faut alors recapter l'animal pour lui enlever l'enregistreur et télécharger les données).

Homéothermes: Se dit des animaux qui maintiennent (« homéo » = stable) la température de leur corps au voisinage d'une valeur moyenne, comme par exemple:

mammifères monotrèmes:	30-31 °C
mammifères marsupiaux:	34-36 °C
mammifères euthériens:	36-38 °C
oiseaux:	39-41 °C
mammifères hibernants:	0-5 °C (lors de l'hibernation)

Comme ces valeurs sont habituellement plus élevées que la température du milieu, on décrit souvent ces animaux comme étant « à sang chaud ».

Ils gardent leur corps plus chaud que le milieu extérieur par l'intermédiaire de la chaleur dégagée par leurs très nombreuses mitochondries (lorsque les mitochondries ne sont pas occupées à faire de l'ATP, elles dégagent de la chaleur plutôt). Puisque cette source de chaleur est interne, on parle aussi alors d'organismes "endothermes" (« endo » = interne).

Poïkilothermes: Se dit des animaux dont la température corporelle est variable (« poïkilo » = variable). On parle ici de reptiles, amphibiens, poissons, invertébrés. La température corporelle est très influencée par celle de l'environnement ambiant (on parle alors d'ectothermie; « ecto » = externe) et est souvent plus basse que celle des mammifères et des oiseaux (on parle donc d'animaux « à sang froid »). Ils sont incapables de se réchauffer "de l'intérieur" parce que leur métabolisme est trop lent (plus faible densité de mitochondries dans leurs cellules).

En résumé: Homéothermes \approx endothermes \approx à sang chaud \approx haut métabolisme
(grosse fournaise interne)

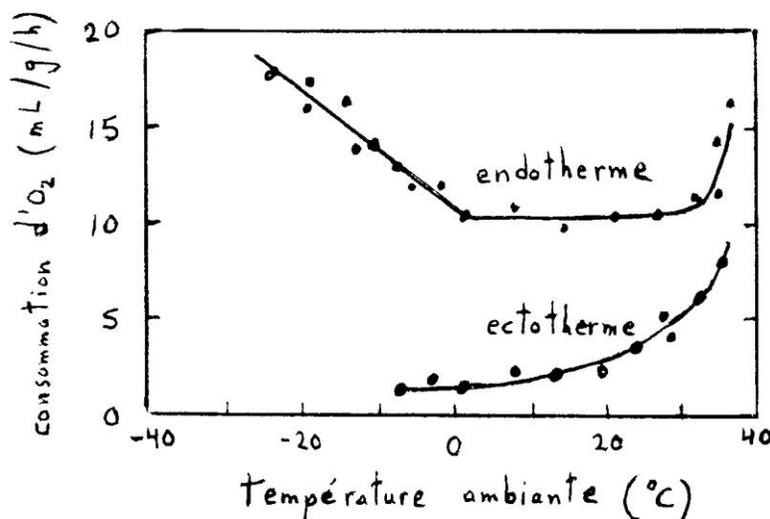
Poïkilothermes \approx ectothermes \approx à sang froid \approx métabolisme plus bas
(pas de grosse fournaise interne)

(Attention, le symbole \approx veut dire « plus ou moins la même chose que ». Les définitions justes des termes ne sont pas exactement les mêmes, mais dans les faits les termes font référence aux mêmes espèces animales.)

- Q Pour un même poids corporel, un mammifère monotrème a-t-il besoin d'autant de nourriture qu'un mammifère euthérien (placentaire)?
- Q Les mammifères ont toujours un métabolisme relativement élevé, avec une exception. À quel moment de leur vie certain (lesquels?) mammifères ont-ils un métabolisme très bas?
- Q Vrai ou Faux? Les poïkilothermes sont incapables de thermoréguler.
- Q Regarder le graphique de la page 24. Comprenez-vous pourquoi la droite des endothermes est au-dessus de la droite des ectothermes, même pour un même poids corporel?
- Q Que veulent dire les préfixes suivants : homéo-, poïkilo-, endo-, ecto- ?
- Q Comme l'indique leur température corporelle plus élevée, les oiseaux ont un métabolisme un peu plus élevé que les mammifères. Qu'est-ce qui pourrait bien nécessiter tant d'énergie aux oiseaux?
- Q Les températures corporelles de mammifères que je donne à la page 43 sont pour des adultes. Pensez-vous que les températures corporelles des jeunes en croissance sont les mêmes?

Coût énergétique de l'homéothermie:

La thermorégulation comportementale que pratiquent les poïkilothermes est relativement peu coûteuse. Par contre, la thermorégulation physiologique des homéothermes, elle, est coûteuse (il faut dépenser de l'énergie pour maintenir une fournaise interne!). Examinons la relation entre la température ambiante et la consommation d'O₂ d'un endotherme et ectotherme de même poids :



Remarquez comment la consommation d'O₂ est beaucoup plus grande pour l'endotherme que pour l'ectotherme. L'endothermie (la fournaise interne – la très grande densité de mitochondries), ça demande beaucoup d'énergie, et donc beaucoup de nourriture. Mais il y a des avantages à être endotherme, à avoir de nombreuses mitochondries et donc un corps toujours chaud :

- Grande activité aérobie pouvant être maintenue plus longtemps;
- Grande activité possible la nuit, quand il fait plus froid;
- Grande activité possible dans les climats plus froids;
- Grande activité cérébrale;
- Possibilité de donner des soins parentaux plus intenses, pour plus longtemps.

Q Pensez à un reptile « moyen ». Est-il capable de faire les choses ci-dessus?
Comment se compare-t-il à un mammifère moyen à ce sujet?

Zone de thermoneutralité : Concept propre aux endothermes. C'est l'étendue des températures ambiantes auxquelles un endotherme n'a pas besoin de dépenser de l'énergie additionnelle (élever son métabolisme) pour maintenir sa température corporelle stable.

Q Dans le graphique ci-haut, quelle est la zone de thermoneutralité?

- Q** Sur le graphique de la page précédente, la forme de la courbe pour les ectothermes vous rappelle-t-elle quelque chose qu'on a vu au chapitre précédent? Pouvez-vous expliquer cette forme?
- Q** Pourquoi y a-t-il relativement peu de mammifères qui vivent dans les déserts?
- Q** Pourquoi les reptiles peuvent-ils souvent survivre pendant des semaines sans manger?
- Q** Pourquoi la zone de thermoneutralité des homéothermes se trouve-t-elle souvent sous la température corporelle normale du corps? En d'autres mots, comment se fait-il qu'un homéotherme avec une température corporelle normale de 37 °C doit dépenser de l'énergie pour se refroidir lorsque la température ambiante est aussi à 37 °C ?

Pour minimiser le coût physiologique de la thermorégulation, les homéothermes vont souvent adopter les mêmes stratégies peu coûteuses des poïkilothermes (adaptations comportementales ou anatomiques). Nous étudierons ces stratégies en plus de détail un peu plus loin.

Dans les pages suivantes, examinons les principes physiques qui régissent la perte (ou le gain) de chaleur d'un objet à un autre.

La conduction:

La conduction est le transfert direct de chaleur d'une molécule à une autre lorsque ces deux molécules sont en contact. Les deux molécules n'ont pas besoin d'être semblables, tant et aussi longtemps qu'elles sont en contact.

- Posez votre main sur la table. De la chaleur est transmise de votre peau à la table par conduction.
- Laissez votre main libre dans l'air frais. De la chaleur est transmise de votre peau aux molécules de gaz dans l'air par conduction.
- Mettez une poêle sur un rond chauffant. La chaleur est transmise du rond chauffant à la base de la poêle, et de la base de la poêle au reste de la poêle, par conduction.

La quantité de chaleur qui passe d'un objet à un autre par conduction est définie par l'équation:

$$Q = k A \left(\frac{T_2 - T_1}{L} \right)$$

où Q = le taux de transfert de chaleur (par unité de temps, puisque c'est un taux)

k = le coefficient de conductivité thermique (ce qui varie selon les substances)

A = la grandeur de la surface d'échange entre les deux objets

T = la température de l'objet 1 (T_1) et de l'objet 2 (T_2)

L = la distance entre les deux points où T est mesuré

Mettez une poêle sur un rond chauffant et tenez le manche de la poêle. Vous allez sentir la chaleur moins vite (la chaleur sera retransmise au manche moins rapidement) si :

- Le manche est en plastique plutôt qu'en métal (K plus faible pour le plastique).
- La base du manche est mince plutôt que large (A moins élevé).
- Le rond chauffant est réglé à « *low* » plutôt qu'à « *high* » ($T_2 - T_1$ est moins élevé).
- Vous tenez le manche au bout complètement plutôt que près de la base (L plus grand).

Les animaux peuvent contrôler la quantité de chaleur qu'ils échangent avec l'environnement en contrôlant k , A , T , ou L .

Contrôle du coefficient de conductivité k:

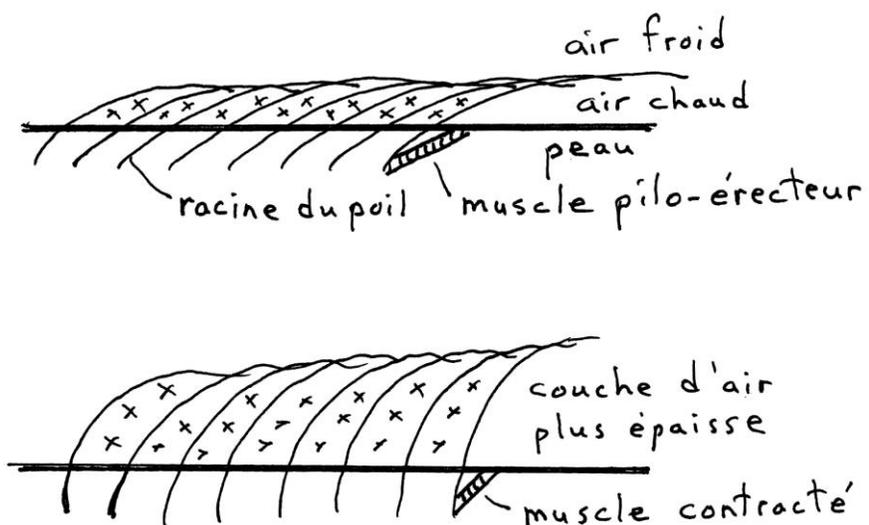
Si un animal veut diminuer la quantité de chaleur échangée avec l'environnement, il doit se séparer de l'environnement avec une substance qui a un faible k (qui conduit mal la chaleur; en d'autres mots, un isolant thermique). En nature, le meilleur isolant est l'air ($k = 0.000057$).

Fourrure et plumage:

Les poils de fourrure ou les plumes du plumage se superposent et forment une barrière qui emprisonne une couche d'air isolante entre le corps et l'environnement.

Les animaux nordiques (ou aquatiques) ont des poils ou des plumes plus denses et plus longs pour former une meilleure barrière et mieux emprisonner la couche d'air isolante.

L'érection des poils ou des plumes, jusqu'à un certain point, épaissit la couche d'air isolante et protège mieux du froid. C'est pourquoi les animaux qui ont froid s'ébouriffent les poils ou les plumes.



Chair de poule :

Les petites bosses sur notre peau quand on a froid sont une déformation causée par la contraction des petits muscles pilo-érecteurs reliant notre épiderme avec la racine de nos poils, dans le but de redresser nos poils et épaissir la couche d'air isolante. Ce n'est qu'une réaction vestigiale hérité de nos ancêtres évolutifs qui avaient une fourrure. Nous, la chair de poule ne nous sert plus à rien parce que nos poils sont devenus trop courts et minces pour emprisonner une couche d'air autour de notre corps.

Q

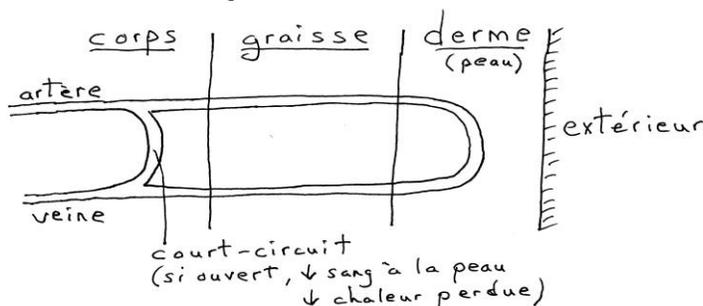
Dans quelle autre situation a-t-on la chair de poule, et quel lien faire avec la vie des animaux à fourrure?

Neige: La neige est aussi un bon isolant, mais pas à cause de la neige comme telle. L'isolation vient plutôt des innombrables petites pochettes d'air emprisonnées entre les flocons de neige. C'est d'ailleurs pourquoi la neige « molle » isole mieux que la neige compactée : il y a plus de pochettes d'air dans la neige molle.

- Les igloos, avec leurs murs de neige, gardent bien la chaleur.
- Empiler de la neige à la base des murs de maison aide à conserver la chaleur.
- Les petits mammifères sous la neige en hiver sont bien isolés du froid.
- En hiver, les gélinottes et les sizerins creusent des tunnels dans les bancs de neige et y passent la nuit, ou même le jour quand il fait très froid.

Q Devinez quelle est la propriété commune des isolants suivants : la mousse qu'on place dans les murs de nos maisons; la douillette (édredon) qui recouvre notre corps quand on dort; le manteau d'hiver rembourré avec des plumes de duvet d'oiseau?

Graisse : Un autre bon isolant est la graisse. La graisse a un « k » relativement faible. Cet isolant est surtout utilisé par les mammifères marins (lesquels n'ont presque pas de poils) et par les humains. La graisse est sous-cutanée, située entre la peau et le reste du corps. Pour que cette couche de graisse remplisse bien son rôle isolant, il ne faut pas que trop de sang chaud se rende à la peau, à l'extérieur de la couche de graisse. Il y a donc souvent un court-circuit entre artères et veines périphériques pour contrôler la quantité de sang envoyé à la peau, et la minimiser quand on veut conserver sa chaleur.



Q La graisse sert aussi de réserve d'énergie à long terme. Comme réserve d'énergie la graisse est très utile pour les chameaux, car dans le désert il est possible que l'animal passe plusieurs jours sans accès à la nourriture. Les chameaux ont donc beaucoup de graisse. Mais ils répartissent cette graisse localement dans une ou deux bosse(s) sur le dos plutôt qu'en une couche uniforme autour du corps comme les baleines. Pourquoi?

Eau : L'eau a un « k » relativement élevé (0.0014); elle conduit bien la chaleur. Un animal qui a chaud et qui veut perdre beaucoup de chaleur dans son environnement devrait s'exposer à de l'eau plus froide. On le sait bien : se baigner dans l'eau nous rafraichit.

Contrôle de la surface d'échange A:

Un animal qui veut perdre de la chaleur parce qu'il a trop chaud devrait maximiser la surface de son corps exposé à l'environnement (en autant que l'environnement ne soit pas plus chaud que la température du corps). Nous, quand on a chaud, on expose notre peau, et on ouvre les bras.

À l'inverse, un animal qui a froid veut minimiser la perte de chaleur et doit minimiser la surface d'échange entre son corps et l'environnement. Cela équivaut à adopter une position recroquevillée, ou à avoir une anatomie où le rapport surface/volume est minimisé.

Le rapport surface/volume: La production de chaleur est un procédé de volume : la chaleur est produite par l'ensemble de nos cellules. Mais la perte de chaleur, elle, est un procédé de surface : c'est à travers la surface corporelle que la chaleur se perd à l'environnement. Le rapport surface / volume du corps est une mesure indirecte de la perte de chaleur par rapport à sa production. En d'autres mots : la proportion de la chaleur produite qui se perd à travers la surface du corps.

Grosseur du corps : Plus la grosseur corporelle augmente, plus le rapport S/V diminue (à mesure qu'un corps grossit, S augmente au carré tandis que V augmente au cube, donc S/V devient plus faible).

Chez les animaux plus gros, il y a proportionnellement moins de la chaleur produite qui est perdue (S/V plus faible). Chez les petits animaux, il y a une plus grande proportion de la chaleur produite qui est perdue (S/V plus grand).

Forme du corps : La forme qui minimise le mieux le rapport S/V est la sphère.

La forme qui maximise le mieux le rapport S/V est une feuille plate. Un long tube mince a aussi un rapport S/V plutôt élevé.

Q Le prof a un corps long et mince. A-t-il tendance à être frileux?

Q Les belettes ont un corps long et cylindrique pour pouvoir poursuivre leurs proies (souris) dans leurs terriers. Les belettes ont-elles tendance à avoir plus faim ou moins faim qu'un autre mammifère de même poids?

Q Il existe des poissons et des reptiles de forme plate (ex. : poisson-plat) ou allongée (ex. : serpents, anguilles), mais pas de mammifères de cette forme (sauf belettes). Pourquoi pas?

La loi de Bergmann (1847):

« Plus on se rapproche des pôles, plus les espèces d'une même famille sont grosses. »

Cette « loi » est vraie dans certains cas (ex. : ours, manchots, oiseaux de proie, Père Noël) mais il y a trop d'exceptions pour vraiment parler de « loi » (considérez par exemple le renard arctique vs renard roux, hermine vs belette, lemming vs capibara).

La loi suit bien la prédiction qu'on pourrait faire basé sur des considérations de rapport surface/volume et de conservation de chaleur, mais elle se heurte à des notions de disponibilité de nourriture qui viennent brouiller les cartes. Oui, en termes de conservation de chaleur, il vaut mieux être plus gros à mesure qu'on se rapproche des milieux polaires froids, mais les milieux polaires présentent souvent moins de nourriture, et dans ce cas c'est mieux d'être petit (moins de besoins absolus en nourriture).

La loi d'Allen (1877):

« Plus on se rapproche des pôles, plus les extrémités corporelles (museau, oreilles, queue, pattes) des animaux sont courtes et compactes. »

Énoncé bien supporté par les observations, surtout chez les mammifères (regardez la forme d'un renard arctique), mais aussi, tel que démontré plus récemment, chez les oiseaux (pattes plus courtes et becs plus courts chez les populations nordiques).

La loi suit bien la prédiction qu'on pourrait faire basé sur des considérations de rapport S/V. Les extrémités plus compactes présentent un rapport S/V plus faible. Une plus faible proportion de la chaleur contenue dans le volume de ces structures est perdue à travers leur surface, ce qui est utile dans un environnement froid.

Les structures anatomiques particulières:

- Q Les fennecs (renards du désert) ont des grandes oreilles. Pourquoi?
- Q Les mammoths avaient des oreilles beaucoup plus petites, par rapport au reste de leur corps, que les oreilles d'éléphants asiatiques ou africains. Pourquoi?
- Q Les stégosaures avaient de grandes plaques sur le dos. Pourquoi?

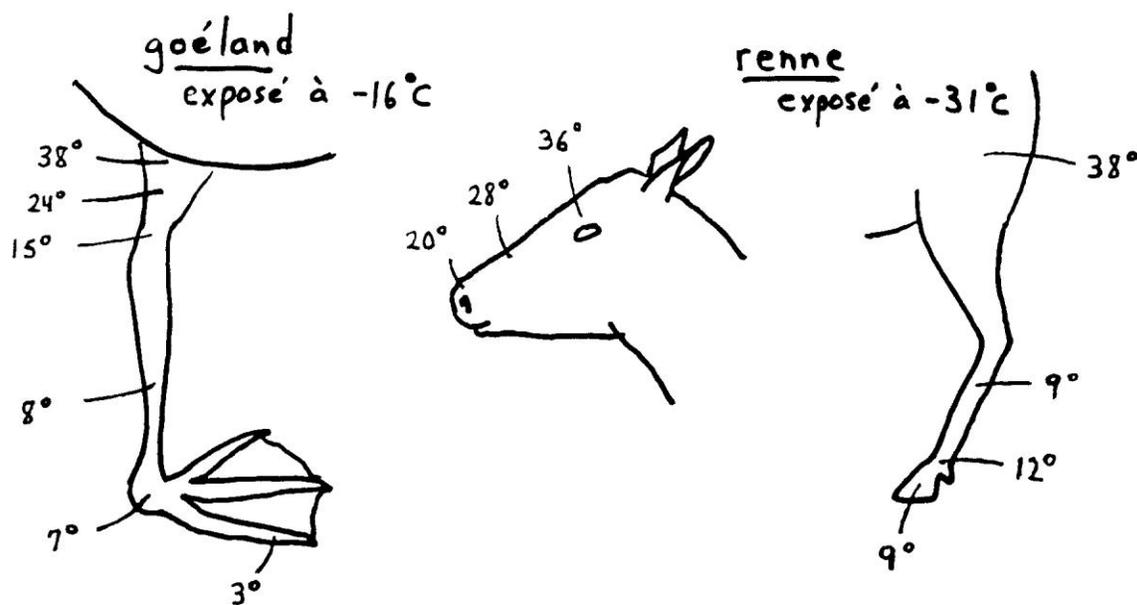
Le regroupement:

Si un animal colle son corps contre celui d'un autre, il diminue la surface de son corps exposé à l'air froid. Le regroupement (s'empiler les uns contre les autres) est donc une bonne façon de diminuer les pertes de chaleur. Le regroupement en milieu froid est couramment pratiqué par les souris, les chauves-souris, et les manchots.

Contrôle de la différence de température (T_1 et T_2):

Certains animaux exposés au froid laissent la température de leur corps descendre. Cela leur permet d'économiser l'énergie car ils n'ont plus besoin de produire autant de chaleur. C'est le cas des hibernants, dont nous reparlerons un peu plus loin.

D'autres animaux laissent la température d'une partie de leur corps descendre; il s'agit habituellement des extrémités (bout des membres, des oreilles, du nez) lesquelles ne peuvent pas facilement être maintenues à une température élevée parce qu'elles ont un rapport surface/volume élevé (à cause de leur forme) et perdent donc beaucoup de chaleur.



D'autres animaux exposés à des températures ambiantes supérieures à la température de leur corps laissent monter leur température corporelle. C'est le cas du chameau:

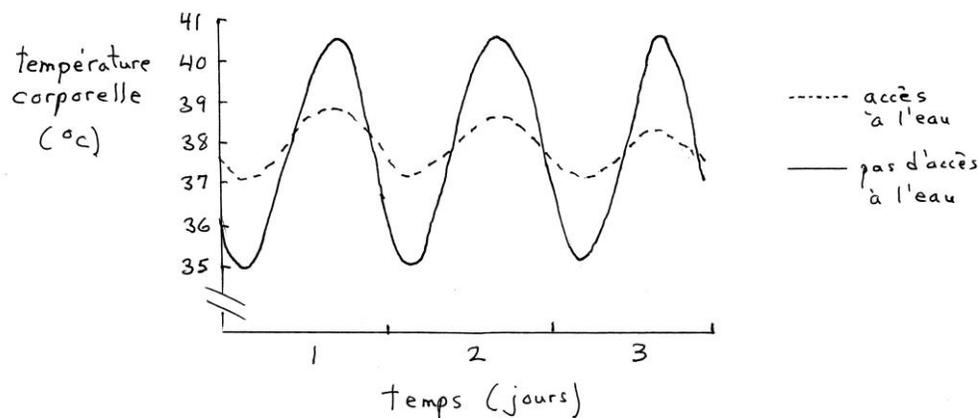


Figure 6.1 : Température rectale d'un chameau lors de températures ambiantes maximales de 42°C (jour) et minimales de 15°C (nuit).

Contrôle de la distance L entre l'environnement et les organes abdominaux producteurs de chaleur:

Par vasodilatation périphérique (augmentation de diamètre des vaisseaux sanguins de la peau), la chaleur du corps peut être amenée en surface pour y être dissipée (ceci équivaut à diminuer L).

Par vasoconstriction périphérique (diminution de diamètre de ces mêmes vaisseaux de la peau), le sang et la chaleur du corps qu'il contient sont maintenus loin de la surface (on augmente L), ce qui diminue la perte de chaleur.

Q Pourquoi les morses qui sortent de l'eau froide apparaissent-ils plus pâles qu'après avoir passé beaucoup de temps à l'air libre?

Q Pourquoi est-ce qu'on a souvent le visage tout rouge après un gros exercice physique?

La convection:

La convection est un type particulier de conduction. Deux molécules sont en contact, mais une de ces molécules appartient à un fluide en mouvement et se fait donc renouveler constamment. La conséquence est que le transfert de chaleur peut se faire beaucoup plus rapidement, et ce d'autant plus que le renouvellement (la vitesse du fluide) est grand. En plus de cet effet de la vitesse du fluide, les mêmes principes qui s'appliquent à la conduction (contrôle de k, A, T, L) s'appliquent aussi à la convection.

En nature la convection est très importante parce que la grande majorité des animaux vivent dans des fluides (soit dans l'air, soit dans l'eau).

Indice de refroidissement éolien:

À cause de $T_2 - T_1$, on perd de la chaleur plus vite dans de l'air plus froid. Mais il peut y avoir un facteur additionnel : la vitesse de l'air. Même si l'air n'est pas trop froid, mais que cet air est en mouvement, on peut perdre de la chaleur au même taux que dans de l'air plus froid sans mouvement. Prenez un énoncé météo du genre : « Aujourd'hui il va faire -8 °C, mais avec le facteur de refroidissement éolien ça va être -15 °C ». Traduction : il va faire - 8 °C (c'est cela que va montrer votre thermomètre), mais à cause du vent (et donc de la convection), vous allez perdre votre chaleur au même taux que s'il faisait -15 °C sans vent.

La radiation:

Tout objet émet et reçoit de la chaleur sous forme de radiation. La quantité de chaleur émise par un objet est proportionnelle à sa température. Si, en général, les objets qui nous entourent sont plus froids que nous, alors on reçoit moins de chaleur qu'on en émet (donc, on perd de la chaleur en tout et partout). Si les objets auxquels on est exposé sont plus chauds que nous, alors on reçoit plus de chaleur qu'on en émet, donc au total on gagne de la chaleur par radiation.

L'objet le plus chaud auquel on puisse s'exposer est le soleil. On gagne beaucoup de chaleur par radiation quand on s'expose au soleil (on le sent très bien quand on passe de l'ombre au soleil).

Par contre, l'objet le plus froid auquel on puisse s'exposer est le ciel ouvert (espace sidéral). On perd toujours plus de chaleur par radiation sous un ciel ouvert que sous un ciel ennuagé.

Faites face à un feu de camp. Vous allez avoir chaud au visage, mais froid au dos. Votre visage gagne de la chaleur émise par le feu par radiation, et votre dos perd de la chaleur par radiation au ciel ouvert.

L'avantage d'une tente de camping n'est pas seulement de nous protéger de la pluie ou du vent. C'est aussi de nous protéger de l'exposition au ciel ouvert.

Q Quels sont les avantages pour un oiseau de passer la nuit en hiver dans un conifère?

En automne il y a souvent du frimas (« gelée blanche ») sur les voitures le matin après une nuit à ciel ouvert, même si la température de l'air était quand même un peu au-dessus de 0 °C. Le métal de la voiture a perdu beaucoup de chaleur au ciel ouvert pendant la nuit, et cela a fait baisser sa température un peu en-dessous de la température de l'air, qui était déjà proche de 0 °C. La température du métal a en fait baissé en dessous de 0 °C, et la vapeur d'eau de l'air qui est venu en contact avec le métal a gelé, formant le frimas.

Q Vous prenez la température interne d'un lézard (un animal à bas métabolisme) et vous vous rendez compte que le corps du lézard est plus chaud que l'air. Comment cela est-il possible?

Couleurs foncées versus pâles :

Les objets de couleur foncée ont tendance à absorber les radiations de la lumière et à les transformer en chaleur interne. De tels objets foncés se réchauffent vite au soleil.

Les objets de couleur pâle ont tendance à absorber les radiations et à les ré-émettre tout de suite plutôt que de les transformer en chaleur interne. Ils se réchauffent moins vite.

- Q Pouvez-vous expliquer pourquoi il est plus confortable en été de porter des T-shirts blancs plutôt que des T-shirts noirs?
- Q Pouvez-vous expliquer pourquoi un diamant mandarin (« *zebra finch* ») expérimentalement peint en noir consomme moins d'oxygène par heure, au froid mais au soleil, qu'un diamant mandarin peint avec une peinture transparente?
- Q Faites une prédiction sur la couleur des populations de couleuvres en fonction de leur latitude.
- Q Pouvez-vous expliquer pourquoi, chez le boa arboricole de Madagascar, la femelle devient plus foncée quand elle est enceinte (l'espèce est ovovivipare)?
- Q Pouvez-vous expliquer pourquoi beaucoup d'animaux de l'Arctique sont blancs? (Aha! Tout n'est pas fonction de la thermorégulation!)
- Q Pouvez-vous expliquer pourquoi les grille-pains (« *toasters* ») sont faits en aluminium (réfléchissant)?

L'évaporation:

Le passage de l'état liquide à l'état gazeux est un événement qui, dans le cas de l'eau, absorbe beaucoup de chaleur. Un moyen de perdre de la chaleur est donc de la transférer à de l'eau lorsque celle-ci s'évapore. C'est la raison pour laquelle plusieurs mammifères³ transpirent quand ils ont chaud, ou que plusieurs oiseaux perdent de l'eau à travers leur peau mince. L'évaporation de la sueur ou de l'eau à la surface de leur peau leur fait perdre de la chaleur.

A noter que l'eau transpirée doit s'évaporer pour absorber de la chaleur. Donc:

Q Est-ce que transpirer contribue à dissiper la chaleur du corps quand l'environnement a un degré d'humidité de 100% (exemple : dans un sauna)? Ou un degré d'humidité élevé (exemple : la prévision météo annonce un « humidex » élevé)?

Q Une goutte de sueur qui vous tombe du front par terre a-t-elle contribué à vous refroidir?

L'eau qui s'évapore ne doit pas forcément provenir de la transpiration. N'importe quelle provenance peut faire l'affaire, tant et aussi longtemps que l'eau est en contact avec la peau et qu'elle s'évapore éventuellement. D'où les comportements suivants:

Les urubus (« vautours » américains) et les cigognes qui ont chaud défèquent sur leurs pattes! La pâte semi-solide de leurs excréments contient un peu d'eau, et leurs pattes sont dénudées de plumes, donc l'évaporation de la partie liquide des excréments refroidit les pattes et, de là, le sang qui y circule.

Les kangourous qui ont chaud lichen l'intérieur de leur avant-bras, lequel est dénudé de poils et richement vascularisé. La salive peut ensuite s'évaporer.

Les éléphants qui ont chaud s'aspergent d'eau avec leur trompe. Cette eau peut les refroidir par conduction/convection, mais aussi potentiellement par évaporation.

³ Il y a des glandes sudoripares sur tout le corps des humains, chevaux, chameaux, et ours. Il y en a seulement près des lèvres et de l'extrémité des pattes chez les vaches, moutons, chats et chiens. D'autres mammifères, comme les cochons et les éléphants, ne transpirent pas du tout et ont recours à d'autres mécanismes pour se refroidir.

Les mouvements de l'air augmentent l'évaporation de l'eau en minimisant la formation d'une couche d'air saturé en humidité en contact avec l'eau. D'où les comportements suivants:

On met notre linge à sécher sur la corde quand il vente fort. Le vent part avec la vapeur d'eau qui vient de se former par évaporation autour du vêtement et garantit que c'est toujours de l'air relativement sec qui est en contact avec le vêtement, et donc l'évaporation (séchage) continue à bien se faire.

On porte des vêtements plus lâches en été. Cela permet une circulation d'air sous nos vêtements, circulation qui enlève l'air humide en contact avec notre peau et le remplace par de l'air plus sec, permettant à la sueur de mieux s'évaporer.

Plusieurs mammifères (ex. : chiens, vaches) halètent (respirent vite, « *panting* » en anglais) quand ils ont chaud. Ils n'ont pas de glandes sudoripares sur leur corps car leur fourrure empêcherait l'air sec de venir en contact avec la peau. Mais les voies respiratoires (bouche, gorge, trachée) sont recouvertes d'eau, laquelle s'évapore en partie dans l'air sec inspiré (soufflez sur votre main : vous allez sentir l'humidité de l'air que vous expirez, même si l'air que vous avez inspiré était sec). Respirer plus vite fait circuler plus d'air dans les voies respiratoires, permettant plus d'évaporation à la surface des voies respiratoires, et l'air expiré humide « part avec » cette chaleur.

Les oiseaux qui ont chaud halètent eux-aussi, et en plus ils ouvrent leur bec et font vibrer le plancher de leur gorge. Cette vibration de la gorge (« *gular flutter* », en anglais) est parfois visible au niveau du cou de l'oiseau. Ce mouvement fait circuler plus d'air dans la gorge et augmente l'évaporation à ce niveau. C'est le même principe que le halètement, sauf que le mouvement d'air est restreint à la gorge et ne se rend pas jusqu'aux poumons.

Les corneilles sont des oiseaux noirs (revoir « radiation ») et relativement gros (revoir « rapport surface/volume »). Elles courent donc plus de risques de surchauffe. L'été, quand elles marchent sur le gazon au soleil, elles ont presque toujours le bec ouvert. Maintenant vous savez pourquoi!

Intéressant : La transpiration est le principal moyen physiologique pour l'humain de se refroidir. Nous possédons environ 2.4 millions de glandes sudoripares dans notre peau. Cela inclut la paume de nos mains et la surface interne de nos doigts, où la sueur (= l'eau, et sa capacité de facilement établir des liens hydrogènes avec d'autres substances) a aussi un rôle de colle légère pour aider à mieux tenir les objets. Un mince film de sueur est transféré de nos doigts aux objets qu'on touche (on produit toujours un peu de sueur, même si on n'a pas particulièrement chaud), et puisque les glandes sudoripares de nos doigts sont seulement situées sur les crêtes de nos empreintes digitales, le film de sueur transféré aux objets reproduit la forme de nos empreintes digitales, au plus grand malheur des criminels.

Questions à réflexion :

- Q** 1) Il est important de garder les bébés bien enveloppés dans des vêtements, beaucoup plus qu'une personne adulte. Pourquoi?
- Q** 2) Par une chaude journée d'été ensoleillé, un merle se promène sur le gazon près du centre d'accueil du Parc national que vous visitez. Ses deux ailes ne sont pas en position normale; elles traînent presque par terre. Un touriste fait remarquer que les gens du parc devraient essayer de prendre soin de cet oiseau aux ailes brisées. Que répondez-vous?
- Q** 3) Au cours d'une promenade hivernale avec un groupe de naturalistes, un des membres du groupe remarque la présence de plusieurs excréments d'oiseaux sur les branches de certains conifères. Pouvez-vous expliquer la présence de ces excréments? Pourquoi dans des conifères?
- Q** 4) Vous apercevez un goéland qui dort sur une patte seulement (l'autre est rétractée près du corps) et avec le bec sous les plumes de l'épaule. Pouvez-vous expliquer cette posture de sommeil plutôt bizarre?
- Q** 5) Lors de leur migration, les oies volent à très haute altitude. Pouvez-vous deviner le lien qui existe entre les besoins thermorégulateurs de ces gros oiseaux en plein exercice et leur altitude de vol?

- Q** 6) Une vague de chaleur traverse l'Afrique. Un éléphant, dont la température corporelle est présentement à 38°C , se trouve dans un milieu où la température ambiante est à 44°C (je dis bien, 44°C). Il a donc très chaud et veut perdre de la chaleur. Dans ces conditions, a-t-il avantage à battre ses grandes oreilles d'avant en arrière? Pourquoi (ou pourquoi pas)?
- Q** 7) Les souris nouvelles-nées (souriceaux) pèsent moins de 3-4 g. D'après vous, sont-elles endothermes ou ectothermes? Quelle est leur principale source de chaleur?
- Q** 8) Sachant qu'un campagnol (un petit rongeur) présente une surface corporelle de 53.5 cm^2 en position de sommeil, que son enveloppe corporelle (graisse, peau, fourrure) possède une épaisseur de 0.5 cm et un facteur de conductivité thermique (k) de $0.004\text{ J / s / cm / }^{\circ}\text{C}$, et que sa température corporelle est de 37.5°C , calculez son taux de perte de chaleur par conduction lorsqu'il dort à -20°C .

Sachant que $1\text{ J/s} = 1\text{ W}$, l'énergie perdue par le campagnol, si elle était transformée en électricité, pourrait-elle illuminer une ampoule de 15 W ?

Qu'arrive-t-il au taux de perte de chaleur si 2 campagnols, en se regroupant ensemble, diminuent la surface exposée à l'environnement par un facteur $1/3$ pour chaque campagnol (en d'autres mots, pour chaque campagnol, la surface exposée est 66% de ce qu'elle était auparavant)?

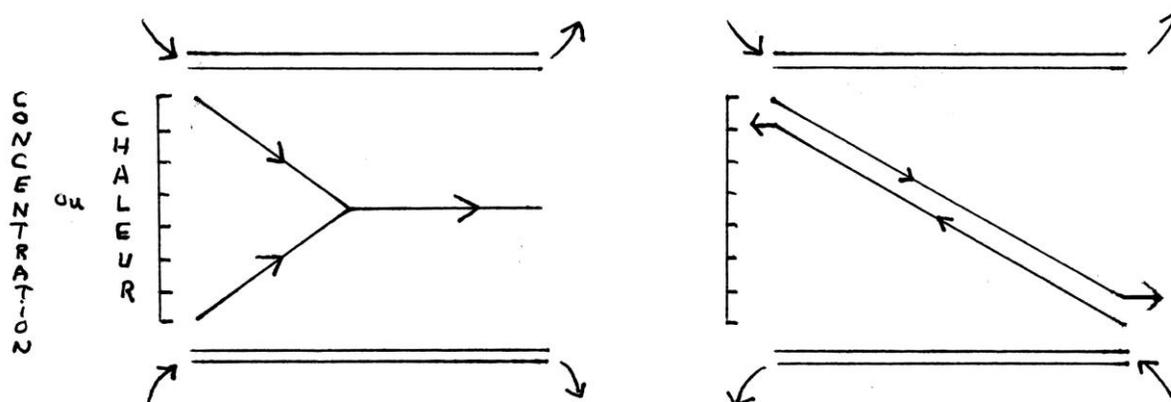
- Q** 9) Votre garagiste vous dit qu'il y a suffisamment d'antigel dans votre radiateur d'automobile pour endurer une température de -20°C , mais pas plus froid. Pour cette nuit, la météo annonce une température de -15°C , mais avec des vents causant un facteur de refroidissement de -30°C . En supposant qu'on peut se fier à la météo (!!), avez-vous besoin de rajouter de l'antigel dans votre radiateur?

- Q** 10) Les caméléons (des reptiles, donc ectothermes) peuvent relativement facilement changer de couleur. Certains caméléons ont tendance à être foncés à un certain moment de la journée, et plus pâles à d'autres moments. À quel moment sont-ils plus foncés, et pourquoi?
- Q** 11) Lesquelles des conditions suivantes résultent en une assez grosse perte de chaleur corporelle?
- a) un rapport surface / volume faible
 - b) un ciel nuageux plutôt qu'ouvert
 - c) saturation de l'air environnant en humidité
 - d) ouverture de l'anastomose (court-circuit) artério-veineuse sous l'hypoderme
 - e) une forte convection
 - f) une fréquence respiratoire accélérée
 - g) un organe superficiel plutôt que profond
 - h) une pilo-érection
- Q** 12) Avez-vous déjà vu des mammifères du désert (ex. : chameaux) noirs? Pourquoi pas?
- Q** 13) Les chameaux des déserts chauds et ensoleillés ont une fourrure plutôt longue sur le dos, mais plutôt courte sur le ventre. Expliquez cela.

Chapitre 7

Thermorégulation: Systèmes d'échange à contre-courant

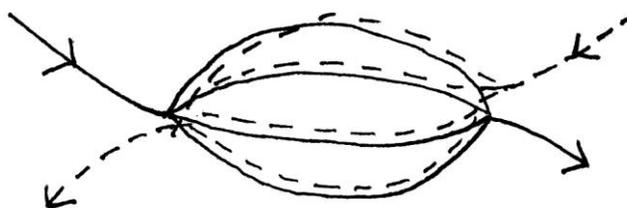
Principe de l'échange à contre-courant:



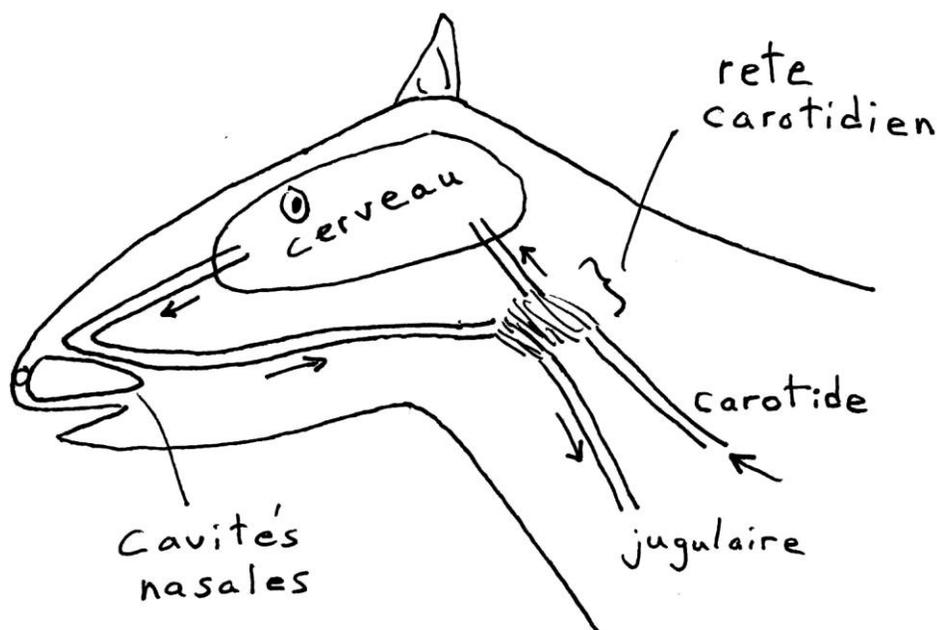
Si deux circuits sont près l'un de l'autre, ils peuvent s'échanger de la chaleur. Le circuit chaud donne une partie de sa chaleur au circuit froid. Si les deux circuits circulent dans la même direction, la quantité échangée ne peut pas être plus que la moitié (dessin de gauche). Mais s'ils circulent en sens opposé, = à contre-courant (dessin de droite), ils peuvent s'échanger bien plus que la moitié de la chaleur, plus que 90% en fait si les circuits sont longs et présentent une grande surface de contact l'un à l'autre.

Le « rete mirabile »:

Le « rete mirabile » (latin pour « réseau admirable »; « rete » se prononce « rêté ») est une structure où des vaisseaux sanguins qui transportent le sang dans des directions opposées se rapprochent les uns des autres et se divisent en de nombreux vaisseaux plus petits (afin de maximiser les surfaces d'échange et de là l'échange à contre-courant) avant de finalement se regrouper un peu plus loin. Cette structure peut servir d'échangeur de chaleur à contre-courant.



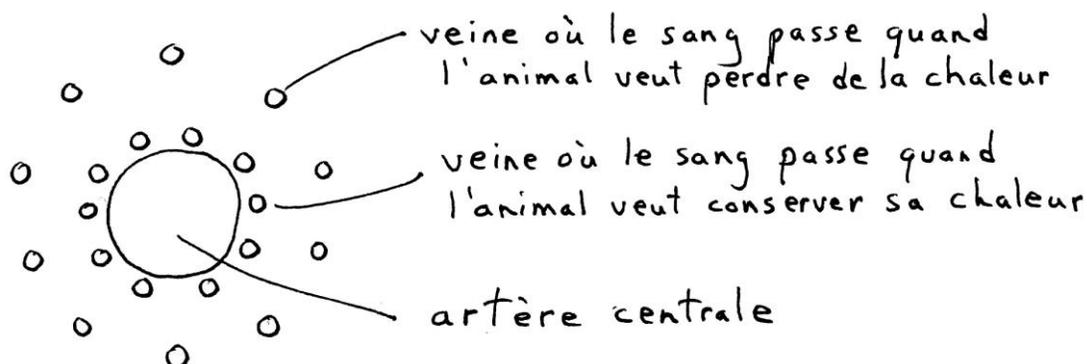
Le rete carotidien de plusieurs mammifères coureurs (gazelles, moutons, chèvres, chiens, chats):



Un rete mirabile situé à la base du cerveau, appelé rete carotidien, sert d'échangeur de chaleur. Le sang qui va vers le cerveau en provenance du cœur (par les artères appelées carotides) est très chaud car l'animal est en train de courir et ses muscles génèrent beaucoup de chaleur. Le cerveau est très sensible aux écarts de température et il fonctionne moins bien lorsque le sang qu'il reçoit est plus chaud que d'habitude.

Le rete carotidien sert à refroidir le sang trop chaud apporté au cerveau en le mettant à proximité, et à contre-courant, du sang veineux froid qui revient du cerveau en passant par les parois des deux cavités nasales (une gauche, une droite). En passant près des cavités nasales le sang s'est refroidi dû à la grande évaporation de l'eau à la surface des cavités (l'évaporation est plus grande que d'habitude parce que l'animal devient essoufflé à force de courir; la plus grande circulation d'air dans le nez y fait évaporer plus d'eau). Donc, le rete carotidien empêche le cerveau de surchauffer pendant l'exercice physique.

Le rete à la base des pattes d'oiseaux et de mammifères, à la base de la queue d'un castor, et à la base des nageoires de dauphins, de certaines tortues marines, et de manchots:



L'extrémité des pattes ou des nageoires présente un grand rapport surface / volume et constitue donc un endroit où il se perd beaucoup de chaleur. Si l'animal veut perdre de la chaleur, il a avantage à ce que le sang chaud du corps se rende jusqu'aux extrémités, où la chaleur sera perdue. Mais si l'animal veut conserver sa chaleur, il aurait avantage à ce que le sang qui entre dans ses pattes ou ses nageoires donne sa chaleur au sang veineux qui revient des extrémités pour que la chaleur puisse retourner dans le corps plutôt que d'aller se perdre aux extrémités.

Le sang entre dans les pattes/nageoires par une artère centrale. Le sang revient dans le corps par des veines qui peuvent être soit en contact étroit avec l'artère, soit loin de l'artère. Quand le sang veineux passe près de l'artère, il y a possibilité d'échange à contre-courant entre le sang artériel et le sang veineux (l'artère et les veines forment un rete mirabile). Quand le sang veineux passe loin de l'artère, il n'y a pas de possibilité d'échange. L'animal peut contrôler (inconsciemment) si le sang revient dans les veines près de l'artère ou loin de l'artère.⁴

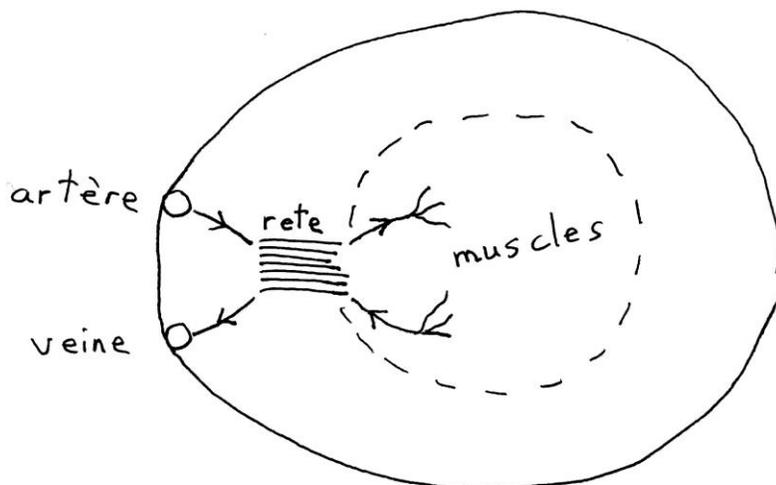
Si l'animal veut conserver sa chaleur, il fait passer le sang veineux près de l'artère. Cela forme un système d'échange à contre-courant, et le sang artériel donne sa chaleur au sang veineux. La chaleur revient dans le corps avec le sang veineux plutôt que d'aller se perdre aux extrémités.

Si l'animal veut perdre de la chaleur, il veut que le sang chaud se rende jusqu'aux extrémités pour que la chaleur puisse y être perdue. Donc il ne veut pas que le sang artériel donne sa chaleur au sang veineux. Pour ce faire, il fait passer le sang veineux loin de l'artère; il court-circuite le rete mirabile.

⁴ Le mécanisme qui contrôle dans quelles veines le sang passe est en fait une vasodilatation de l'artère. Quand le sang doit passer dans les veines lointaines, l'artère se dilate (augmente de diamètre), ce qui écrase les veines voisines, ce qui ne laisse que les veines lointaines pour laisser passer le sang.

Le rete des thons :

Coupe transversale du corps



Les thons nagent presque 24 heures sur 24. Leurs muscles de la nage, constamment en action, génèrent beaucoup de chaleur. Cette chaleur est bonne pour les muscles eux-mêmes, lesquels se contractent mieux à des températures chaudes. Malheureusement, les artères qui amènent le sang aux muscles passent près de la surface du corps du poisson, près de l'eau froide de la mer, et donc le sang qu'elles amènent aux muscles est froid. De plus, le sang veineux qui quitte les muscles part avec de la chaleur que le muscle « aimerait » bien garder.

La solution est un rete mirabile entre le sang artériel et le sang veineux des muscles. À la sortie des muscles, le sang veineux chaud donne sa chaleur au sang artériel froid qui vient dans l'autre sens. La chaleur est ainsi retournée aux muscles.

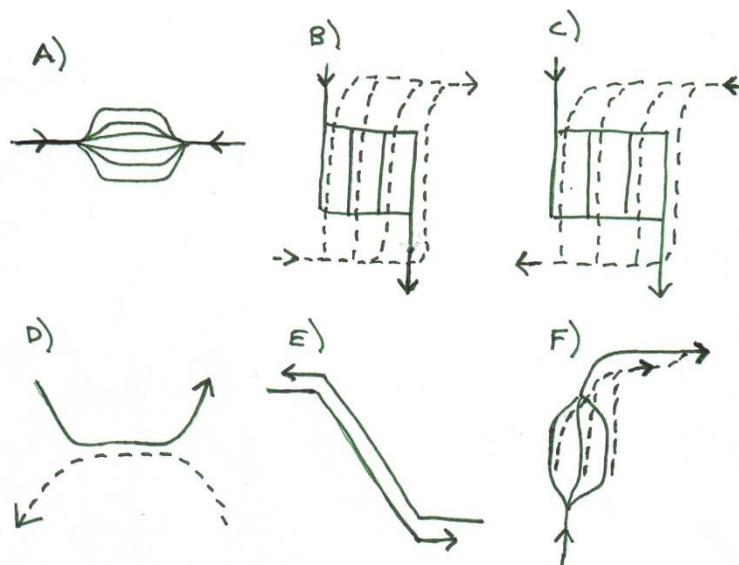
Les échangeurs de chaleur industriels:

Les échangeurs de chaleur industriels sont faits de feuilles creuses et minces qui sont empilées les unes par-dessus les autres. L'air ou l'eau circule dans un sens dans une feuille, dans le sens contraire dans la feuille suivante, et ainsi de suite pour toutes les feuilles. La forme de feuille permet une grande surface d'échange de chaleur et les circulations alternées permettent un échange bien complet à contre-courant.

Pensez-y la prochaine fois que vous regarderez un radiateur d'automobile, ou l'échangeur d'air d'une maison.

Questions à réflexion :

- Q** 1) Un rete mirabile permet aux thons de concentrer la chaleur à l'intérieur de leurs muscles. Pouvez-vous penser à un désavantage possible (non-relaté à la thermorégulation) de ce système? (Pensez aux autres fonctions du sang.)
- Q** 2) Le rete mirabile des thons est à la sortie des muscles natatoires qui génèrent la chaleur. Si au lieu de mettre un rete mirabile à la sortie d'organes producteurs de chaleur, on mettait plutôt un rete à l'entrée des organes qui perdent la chaleur (un peu comme le font les tortues marines et les dauphins) pour aider à garder tout le corps chaud, où le mettrait-on? Pensez à quel organe d'un poisson vient en contact le plus intime avec l'eau. Allez ensuite dans Google et faites « poisson-lune » et « Wegner ».
- Q** 3) Lequel des six schémas suivants représentent le mieux un rete mirabile, et pourquoi?



Chapitre 8

Thermorégulation: ectothermie

Les ectothermes (et plusieurs endothermes aussi) ont souvent recours à des stratégies comportementales pour réguler la température de leur corps. Par exemple, ils peuvent s'exposer au soleil, se mettre à l'ombre, ou plonger dans l'eau dépendamment de leur besoin de gagner ou de perdre de la chaleur. Ils peuvent se déplacer vers des endroits plus chauds ou plus froids, allant jusqu'à migrer sur de longues distances.

Choix comportemental d'une température idéale chez un reptile en laboratoire:



Lorsque placé dans un gradient de température, le reptile se tient à l'endroit qui correspond à sa température préférée. Si on change le gradient, le reptile change de place pour demeurer à sa température préférée. À noter qu'il est possible pour un ectotherme d'avoir trop chaud.

La température préférée peut changer selon certains états physiologiques. Un serpent ou un crocodile qui vient de manger une proie préfère des températures plus chaudes que d'habitude, car les activités de digestion se font mieux à des températures plus chaudes.⁵ Les alligators et iguanes malades préfèrent aussi des températures plus chaudes, un cas de fièvre comportementale (revoir page 9). Les femelles de serpents ovovivipares qui portent des jeunes en elles préfèrent aussi de plus hautes températures que d'habitude; elles sont des « incubateurs mobiles » et le développement des jeunes en elles se fait plus rapidement à des températures plus élevées.

En général, la température préférée d'un reptile est relativement chaude. Suivant le Q_{10} , les réactions biochimiques se font plus vite à des températures plus élevées, et donc l'animal peut être plus actif (courir plus vite pour échapper à un prédateur, par exemple) à des températures plus élevées. (Mais cela exige aussi qu'il consomme plus de nourriture.)

⁵ Les serpents consomment souvent de très grosses proies par rapport à leur propre corps. Un danger de la digestion trop lente est que la proie commence à pourrir dans le système digestif du serpent avant que la digestion ne soit achevée!

Bains de soleil (= héliothermie; « hélio » = soleil):

Pour un ectotherme, s'exposer au soleil est une façon importante de faire monter la température du corps. Certains lézards et serpents peuvent survivre à des latitudes ou altitudes relativement élevées (donc relativement froides) tant et aussi longtemps qu'il s'y trouve des endroits souvent ensoleillés.

L'exposition au soleil dépend des besoins. Chez les criquets qui vivent dans le désert : au début de la journée, quand le corps est froid suivant la nuit et que l'insecte veut se réchauffer le plus rapidement possible, il se met en plein soleil et expose ses flancs au soleil, pour maximiser sa surface d'absorption des radiations. Mais à mesure que la journée avance et que la température commence à devenir trop chaude, l'insecte commence par se tourner face au soleil pour minimiser la surface d'absorption, puis il finit par se mettre à l'ombre pour éviter complètement le soleil.

Les serpents au soleil ont tendance à dérouler leur corps quand ils veulent se réchauffer, mais à enrouler leur corps sur lui-même quand ils commencent à avoir trop chaud. Ainsi, ils maximisent ou minimisent l'exposition au soleil dépendamment de leurs besoins de se réchauffer ou non.

Certains lézards (« *earless lizards* », genres *Cophosaurus* et *Holbrookia*) ont un sinus sanguin (une cavité où le sang circule) sous la peau sur le dessus de leur crâne. Le matin ils se tiennent à la sortie de leur terrier, avec seulement la tête qui sort. On pense que le sinus, étant exposé au soleil sur le dessus de la tête, permet au sang – et donc éventuellement au corps tout entier – de se réchauffer tout en permettant au lézard de rester dans la sécurité relative de son entrée de terrier.

Par télémétrie, on peut localiser des serpents vivant dans les forêts, et mesurer le pourcentage de temps qu'ils passent dans des endroits ombragés versus ensoleillés. Une étude canadienne a démontré que les couleuvres passent plus de temps dans les endroits ensoleillés après avoir capturé une proie, présumément pour faciliter leur digestion avec une température plus élevée.

Thermogénèse par frissonnement :

Quand un muscle se contracte, seulement 30% environ de l'énergie qu'il utilise sert directement à la contraction. Le 70% restant est « perdu » sous forme de chaleur. « Perdu » veut dire que le système n'est pas très efficace pour la contraction, mais cette chaleur n'est pas perdue par le corps; en fait elle contribue à réchauffer le corps, et donc elle n'est pas perdue en termes de thermorégulation. L'activité musculaire permet donc de réchauffer le corps. Il peut s'agir des mouvements normaux de l'animal, et/ou du frisson.

Le frisson est la contraction plus ou moins simultanée de muscles antagonistes (= des muscles responsables de mouvements opposés, comme ouvrir la mâchoire et fermer la mâchoire) dans le seul but de générer de la chaleur. Il n'y a pas de mouvement utile (le tremblement qui en résulte ne représente pas un mouvement utile) mais la chaleur générée aide à réchauffer le corps.

Le frisson est pratiqué aussi bien par les endothermes (par exemple : nous les humains; les oiseaux pendant la nuit en hiver) que par les ectothermes.

Muscles du vol dans le thorax de certains insectes arctiques :

Comment un insecte (un bourdon, par exemple) parvient-il à voler quand l'air est froid? La réponse est qu'il commence à contracter simultanément les muscles du thorax responsables d'élever l'aile et ceux qui baissent l'aile. L'aile ne bouge pas, mais la première contraction génère un peu de chaleur, qui aide une deuxième contraction plus forte, ce qui génère un peu plus de chaleur, ce qui permet une troisième contraction encore plus forte, et ainsi de suite (un rare exemple de rétroaction positive) jusqu'à ce que le thorax soit assez chaud pour que les muscles puissent (sans contraction simultanée cette fois-ci) entamer le vol.

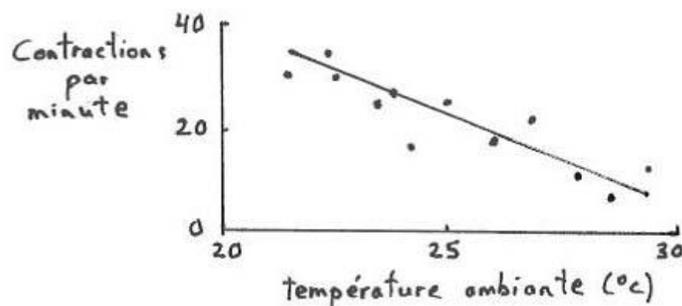
La présence de longs poils sur le thorax de ces insectes aide à y conserver la chaleur. L'abdomen, lui, est moins bien isolé, et si l'insecte devient trop chaud (après un vol prolongé, par exemple) il envoie plus d'hémolymphe (le « sang » des insectes) du thorax à l'abdomen pour y perdre de la chaleur.

Thermogénèse des essaims d'abeilles :

En hiver, les abeilles s'amassent en groupe et elles génèrent de la chaleur par activité musculaire, ce qui les empêche de geler. La forme plutôt sphérique du groupe (petit rapport surface/volume) aide à y conserver la chaleur. L'énergie pour cette activité musculaire continue vient du miel que les abeilles ont entreposé et qu'elles consomment. Les abeilles sont toujours en mouvement, de telle sorte que ce ne sont pas toujours les mêmes individus qui sont dans la périphérie du groupe exposée à l'air froid.

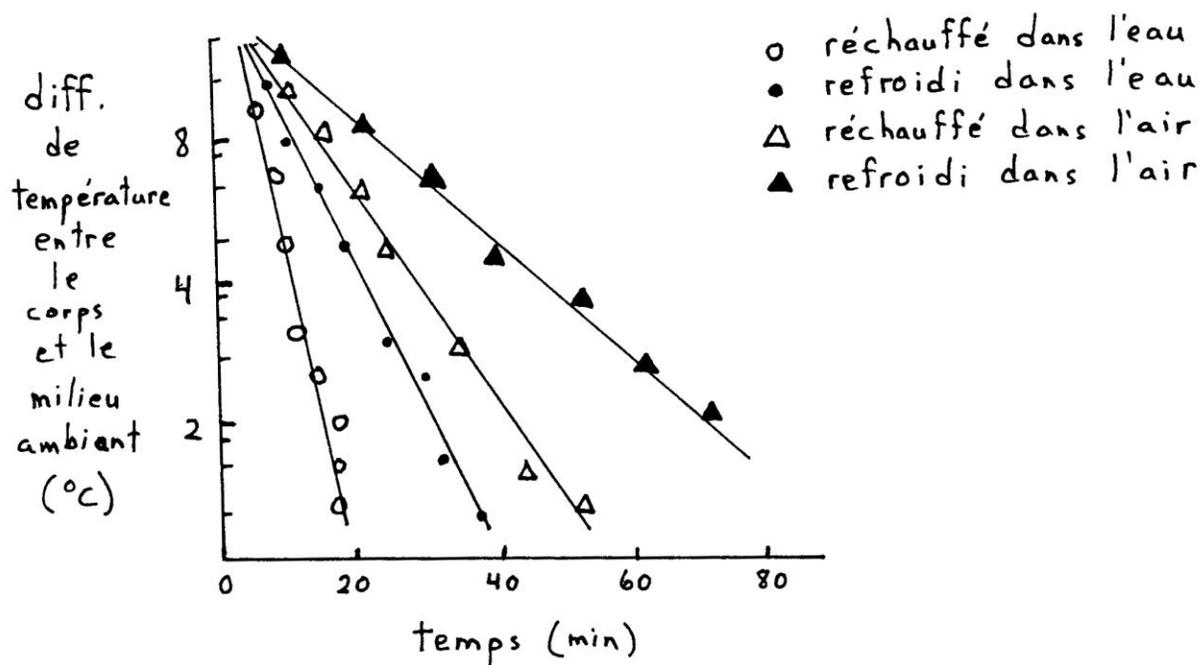
Thermogénèse des pythons incubateurs :

Chez deux espèces de python, la femelle, après avoir pondu ses œufs, enroule son corps autour de la couvée et garde les œufs au chaud en générant de la chaleur par contraction musculaire. Cela permet un développement plus rapide des embryons. La fréquence des contractions est ajustée en fonction des besoins, de telle sorte que plus de chaleur est générée quand l'environnement est plus froid. Cette activité musculaire est coûteuse : la femelle perd jusqu'à la moitié de son poids corporel pendant la période d'incubation (le poids perdu est sous forme de graisses que la femelle avait entreposées dans son corps au préalable, et qu'elle brise pour obtenir l'énergie nécessaire au travail musculaire).



Vasodilatation et vasoconstriction périphérique :

Tout comme les endothermes, un ectotherme peut aussi avoir recours à la vasodilatation (augmentation de diamètre) ou la vasoconstriction (diminution de diamètre) des vaisseaux sanguins périphériques (qui viennent près de la surface du corps, donc essentiellement la peau) pour accélérer ou ralentir son réchauffement ou refroidissement. Considérez le graphique suivant, provenant d'une étude sur un iguane marin qui préfère des températures chaudes, et qu'on place dans un milieu (eau ou air) plus chaud (préférée) ou plus froid (non-préférée) que lui:



On voit bien que la température du corps s'équilibre plus vite avec la température ambiante quand l'animal est dans l'eau plutôt que dans l'air (comparez les symboles ouverts avec leurs équivalents pleins). Ce n'est pas surprenant : vous savez déjà que l'eau est un meilleur conducteur de chaleur (« k » plus élevé) que l'air.

Mais c'est plus surprenant de voir que le transfert de chaleur entre corps et environnement est plus rapide quand l'animal se réchauffe que quand il se refroidit. Basé seulement sur des notions de conduction, il n'y a pas de raison de penser que le transfert de chaleur se ferait plus rapidement dans un sens que dans l'autre. La différence vient du fait que l'animal peut contrôler la quantité de sang qui vient proche du milieu externe. L'animal préfère la chaleur, donc quand il est placé dans de l'eau ou de l'air chaud, il est intéressé à prendre la chaleur de l'environnement le plus vite possible, et il augmente la quantité de sang qui vient en contact avec l'environnement (donc, vasodilatation périphérique; plus de sang circulant dans la peau). Dans l'eau ou l'air froid, c'est le contraire : l'animal veut perdre sa chaleur le moins vite possible, donc il diminue la quantité de sang qui vient en contact avec cet environnement froid (= vasoconstriction périphérique).

Questions à réflexion :

- Q 1) Les thons ont une activité constante de leurs muscles natatoires, ils ont un rete mirabile à la sortie des muscles natatoires, et ils ont un gros corps pour un poisson (donc, petit rapport surface/volume). On peut dire la même chose des tortues marines (sauf que, comme on l'a déjà vu, leur rete mirabile est à la base des nageoires plutôt qu'à la sortie des muscles natatoires). Pourrait-on les qualifier d'endothermes?
- Q 2) Les papillons de nuit ont habituellement un thorax plus poilu que les papillons « ordinaires » (diurnes). Pourquoi?
- Q 3) *Hypogastrura nivicola* est une petite espèce de collembole (« *springtail* ») souvent active sur la neige au printemps. (Autrefois considérés comme des insectes, les collemboles appartiennent maintenant à leur propre classe : Hexapoda.) Leur corps contient un antigel (une protéine riche en glycine) qui les empêche de geler, mais cela n'explique pas comment de tels animaux ectothermes peuvent être si actifs dans le froid. Pouvez-vous suggérer une explication possible?
- Q 4) Votre oncle, maintenant à la retraite, vient de commencer à garder des abeilles et à recueillir le miel qu'elles produisent (un 'hobby' comme un autre). En septembre, il a enlevé tout le miel qui était contenu dans ses ruches et il s'est réjoui de la grande quantité qu'il a ainsi obtenue. Expliquez-lui pourquoi ce qu'il a fait va le rendre malheureux dans le futur. Profitez-en pour lui enseigner quelques notions de physiologie animale, justifiant ainsi votre belle formation universitaire.
- Q 5) À 23 °C, un bourdon vole normalement et longtemps. Tu serres une ligature autour de son pédoncule, empêchant toute communication entre son thorax et son abdomen : le bourdon n'arrive plus à voler très longtemps. Tu prends ce même bourdon ligaturé et maintenant tu lui rases les poils du thorax : il recommence à voler normalement et longtemps. Expliquez tous ces résultats.

- Q** 6) C'est le matin d'une belle journée ensoleillée aux Iles Galapagos. Des iguanes marins sont présents sur de grandes roches. Ces iguanes, comme un certain nombre d'autres reptiles, peuvent changer de couleur pour devenir plus pâles ou plus foncés. Décrivez toutes les façons possibles pour ces iguanes de se réchauffer.
- Q** 7) À la fin de la journée ensoleillée, les iguanes marins des Iles Galapagos s'empilent les uns sur les autres et passent la nuit comme ça. Pourquoi? Indice : ces iguanes mangent des algues, et les algues sont difficiles à digérer.
- Q** 8) Dans un gradient de températures au laboratoire, vous mesurez la température préférée d'un serpent et d'un lézard de même poids et vous observez que cette température préférée est la même (31 °C, disons). En nature, ces deux espèces vivent dans un environnement semi-désertique. Sur le terrain, vous observez qu'en plein milieu des journées d'été le lézard est actif mais le serpent n'est pas actif et se tient à l'ombre, caché en dessous des roches (il a plus tendance à être actif au crépuscule, pas en plein milieu de la journée). Expliquez cette différence, en insistant sur la différence corporelle entre lézards et serpents (il y a deux considérations possibles).
- Q** 9) Les serpents diurnes doivent se réchauffer le matin avant de pouvoir devenir actifs le jour. Pourquoi n'y a-t-il pas de gros serpents aux latitudes tempérées? (Les plus gros serpents, comme les boas, anacondas, et pythons, vivent tous à des latitudes tropicales.)
- Q** 10) Au zoo, un crocodile au soleil en été se tient immobile avec la gueule ouverte. Est-ce qu'il garde sa gueule ouverte pour faire peur aux visiteurs?
- Q** 11) Lors de journées chaudes, les abeilles butineuses qui ont fini de ramasser du nectar et qui s'apprêtent à retourner à la ruche, régurgitent une partie du nectar qu'elles ont entreposé dans leur jabot et se le répandent sur le corps. De retour à la ruche, les ouvrières lchent le corps de ces butineuses. Expliquez tout cela.

Chapitre 9

Thermorégulation: Torpeur et hibernation

Maintenir une haute température corporelle lorsqu'il fait froid demande beaucoup d'énergie. Afin d'économiser l'énergie, certains endothermes ont adopté une stratégie particulière: ils laissent la température de leur corps descendre en équilibre avec celle du milieu (jusqu'à un certain point minimum). En fait, jusqu'à ce point minimum, ces animaux sont comme des ectothermes. À mesure que la température ambiante descend, leur température corporelle suit, leur métabolisme diminue, et leurs rythmes cardiaque et respiratoire diminuent. On parle alors d'un état de torpeur ou d'hibernation.

Le terme « hibernation » réfère habituellement à une longue période saisonnière (l'hiver), tandis que le terme « torpeur » réfère à une période plus courte, comme une nuit ou une durée de quelques jours seulement; une autre distinction est que la température corporelle baisse moins dans les cas de torpeur que dans les cas d'hibernation.

La baisse de la température corporelle entraîne un problème majeur: les systèmes nerveux et musculaire ne fonctionnent plus parfaitement et l'animal perd sa coordination. Il devient léthargique. Cela veut dire qu'il est vulnérable aux prédateurs. Il doit donc se trouver un bon abri. Une autre conséquence est qu'il ne peut plus se nourrir; il doit donc au préalable accumuler une réserve de graisse qui lui servira de source d'énergie pendant sa léthargie.

La graisse des hibernants est particulière: elle contient beaucoup de mitochondries et elle a des propriétés biochimiques qui résultent en une grande production de chaleur lorsqu'elle se fait briser. Cette graisse particulière (dite « brune » à cause de la grande densité de mitochondries) peut donc servir non seulement de source d'énergie mais aussi, si besoin est, de source de chaleur. (La graisse « ordinaire » est plutôt blanchâtre ou jaunâtre et elle a relativement peu de vaisseaux sanguins comparativement à la graisse brune.)

- Q** Vous vous apprêtez à sortir de votre appartement pour quelques jours pour aller visiter votre famille à Noël. C'est dommage d'avoir à payer pour le chauffage pendant cette période où vous ne serez même pas présent. Que pouvez-vous faire et quelle est l'analogie avec la torpeur?

La torpeur des colibris

Les colibris sont les plus petits oiseaux du monde. Ils ont donc un rapport surface/volume très élevé. Il est donc difficile pour eux de maintenir une haute température corporelle lorsqu'il fait froid la nuit (ils perdent beaucoup de chaleur par rapport à leur capacité de production). S'ils ont beaucoup de réserves de graisse (ils ont eu accès à beaucoup de nourriture), ils parviennent à le faire. Mais sinon, ils entrent dans un état de torpeur. Cet état est temporaire (il ne dure que la nuit) et il a des limites: si la température ambiante baisse sous 12-18 °C, l'oiseau commence à briser ses graisses à un rythme accéléré afin de maintenir sa température corporelle au moins à 12-18°C. (A noter cependant que ces graisses ne sont pas brunes; il semble que seuls les mammifères hibernants possèdent des graisses brunes en grande quantité.)

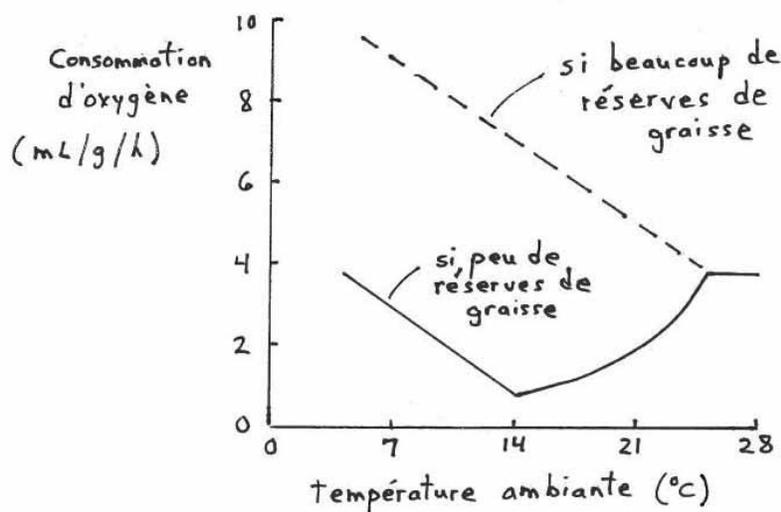


Figure 9.1 : Taux métabolique d'un colibri à différentes températures ambiantes.

Certains oiseaux (ex. : mésanges, engoulevents, martinets, colious) font la même chose quand la nourriture se fait rare et la température ambiante est froide.

Certaines petites souris marsupiales (« *dunnart* » en anglais) et rats marsupiaux (« *mulgara* » en anglais) font la même chose quand la nourriture est rare ou de moins bonne qualité.

La torpeur/hibernation des ours

L'ours est un gros animal qui peut accumuler beaucoup de graisse avant l'hiver. Ces réserves ne sont pas suffisantes pour lui permettre de maintenir sa température à 37 °C, mais elles sont quand même suffisantes pour que l'ours n'ait pas besoin d'abaisser de beaucoup sa température corporelle. Il entre donc dans un état de torpeur, mais cette torpeur n'est pas très profonde et, bien qu'un peu lent, l'ours en « hibernation » demeure capable de réponses assez bien coordonnées. En fait, la femelle donne naissance à ses jeunes en hiver pendant « l'hibernation ».

Les « vrais » hibernants: marmottes, spermophiles, certaines chauves-souris, certains marsupiaux

Les vrais hibernants peuvent accumuler suffisamment de réserves pour passer l'hiver, mais seulement si leur température corporelle s'abaisse de beaucoup. Ils laissent donc la température de leur corps baisser jusqu'à 5 °C environ (peut-être même 0 °C chez le spermophile de l'Arctique et chez certaines chauve-souris). Sous ces températures-seuils, le métabolisme s'active pour maintenir la température corporelle à ce niveau minimum (à noter que la présence d'une température-seuil indique que l'animal est encore capable de thermoréguler; la différence est que le point de référence est maintenant plus bas – un cas de rhéostase).

Ces animaux sont dans un état de léthargie avancée. Le rythme cardiaque et respiratoire est très bas. Cependant, l'activité métabolique, bien que basse, est encore présente, ce qui veut dire que les déchets métaboliques s'accumulent. L'animal doit donc uriner à intervalles de quelques semaines. Pour ce faire, il se réchauffe et « revient à la normale » de temps à autre. Le réchauffement, très rapide, provient du catabolisme des graisses brunes et du frisson par les muscles.

Notons que l'accumulation de graisses et l'hibernation sont des activités programmées à l'intérieur de l'animal. Si on place une marmotte dans un laboratoire où les conditions de température et de photopériode sont toujours les mêmes, l'animal va spontanément commencer à s'engraisser lorsque l'automne arrive (à l'extérieur) et ensuite laisser tomber sa température corporelle au niveau de la température de la pièce. Puis, aux alentours du printemps, il recommence à thermoréguler à 38 °C. Ce cycle d'engraissement et d'entrée/sortie en hibernation est dit « circannuel » (parce qu'il exprime une périodicité d'à peu près -circa- 1 an) et il peut continuer à s'exprimer de façon spontanée pendant plusieurs années.

À noter que même si on associe généralement le mot « hibernation » aux endothermes (et surtout aux mammifères), on peut aussi parler d'un genre d'hibernation dans le cas de plusieurs ectothermes. La plupart des insectes passent l'hiver dans un état de développement arrêté (habituellement au stade d'oeufs ou de pupes, mais parfois aussi comme larves ou comme adultes). On appelle cet état « diapause », mais c'est en fait similaire à l'hibernation: le taux métabolique est très bas, plus bas qu'on ne pourrait le prédire basé sur le Q_{10} normal de 2.

De même, plusieurs espèces de tortues, lézards, serpents, et alligators accumulent des graisses à l'automne et se cherchent un abri pour y passer l'hiver. Elles recherchent activement un endroit froid (mais quand même > 0 °C) pour que leur métabolisme ne soit pas trop élevé (donc, économie de réserves de graisse). Cette stratégie comportementale ressemble à l'hibernation.

Petits mammifères non-hibernants: campagnols, musaraignes, écureuils, mouffettes, rats-laveurs.

Ces animaux n'ont pas réussi à évoluer la capacité d'hiberner (et de toute façon les plus petits d'entre eux ont un volume corporel trop faible pour accumuler suffisamment de graisses pour passer tout l'hiver même s'ils hibernaient). Ils accumulent des graisses quand même, mais ils accumulent aussi des réserves de nourriture dans des nids bien isolés ou dans des terriers. Ils font de la torpeur (légère baisse de température corporelle) mais pas de l'hibernation. Ils sortent régulièrement de leur torpeur pour se nourrir à partir de leurs réserves de nourriture, ou pour chercher activement de la nouvelle nourriture (plantes ou invertébrés en diapause) sous la neige.

Questions à réflexion :

- Q** 1) Un de vos amis vous apprend qu'il vient de découvrir une caverne dans laquelle se trouve un ours en hibernation. Il vous invite à venir avec lui pour aller observer cet ours. « On pourrait même le toucher, étant donné qu'il est en hibernation », vous dit-il. Que devriez-vous lui répondre?
- Q** 2) Ce même ami a découvert une autre caverne, une où des chauves-souris hibernent. Il y fait plutôt froid (environ 6 °C) et il veut rendre service aux chauves-souris : il installe des chauffettes connectées à des batteries et élève ainsi la température de la caverne à 14 °C en permanence. Rend-il vraiment service aux chauves-souris? (Indice : relisez le dernier paragraphe de la page précédente.)
- Q** 3) Les espèces de mammifères qui font de l'hibernation peuvent servir d'exemple de rhéostase pour deux paramètres (deux points de référence qui changent). Quels sont ces deux paramètres? Illustrez les changements au cours de l'année sur un graphique.
- Q** 4) Les mulots, les lièvres, et les ours passent l'hiver au Canada. De ces trois espèces, seuls les lièvres changent de couleur de pelage : ils deviennent blancs à l'automne et redeviennent bruns au printemps. Comment expliquer cette différence entre les lièvres et les mulots/ours?
- Q** 5) Qui est le professeur de l'Université de Moncton dont les travaux de recherche portent, en partie du moins, sur l'hibernation?

Chapitre 10

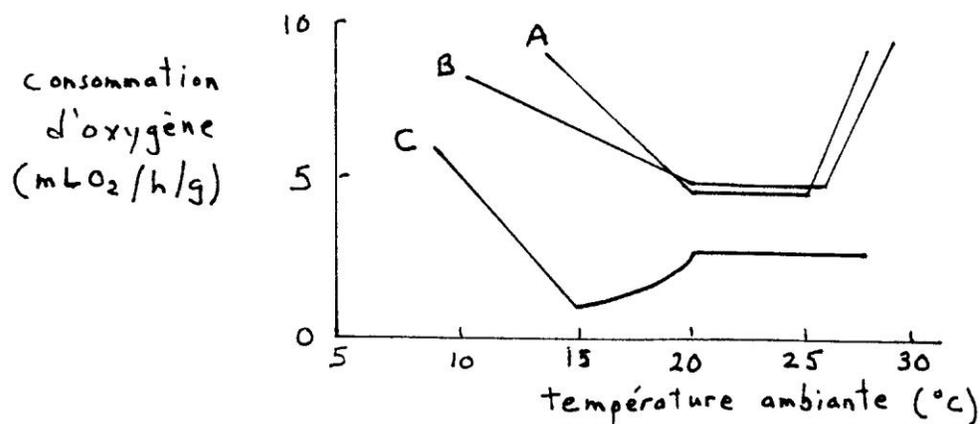
Examen 1 – exemples de questions des années passées

1) Dans certains cirques, on voit parfois des ours qui ont appris à se déplacer en bicyclette, bien que d'autres ne réussissent jamais à apprendre. Dans chacun des quatre cas ci-dessous, l'ours fait trois tours de piste. Mettez ces quatre cas en ordre croissant de consommation d'énergie par gramme de poids corporel (les classements ex aequo – égalité – sont permis). Justifiez brièvement votre réponse.

- Un ours de 80 kg à bicyclette
- Un ours de 80 kg qui court à 10 km/h
- Un ours de 80 kg qui court à 18 km/h
- Un ours de 100 kg qui court à 10 km/h

2) A l'aide de la figure suivante, répondez aux questions:

- a) Quelle est la zone thermoneutrale de l'animal A?
- b) Lequel animal, de A ou B, a la fourrure la plus épaisse?
- c) A une température ambiante de 18 °C, dans quel état particulier l'animal C se trouve-t-il?
- d) A une température ambiante de 10 °C, quelle est la température corporelle de l'animal C?



3) Vous mesurez la consommation d'oxygène d'un reptile à différentes températures ambiantes allant de 5 °C à 30 °C. Dessinez le graphique des résultats que vous devriez obtenir. N'oubliez pas de nommer les axes et de donner le nom des unités (mais pas nécessaire de donner les valeurs précises de ces unités).

- 4) En termes d'énergie consommée par km parcouru par g de poids corporel, vaut-il mieux pour un animal:
- a) être gros, être petit, ou cela n'a pas d'importance?
 - b) courir vite, courir lentement, ou cela n'a pas d'importance?
 - c) être adapté à la nage, ou au vol, ou cela n'a pas d'importance?

5) Complétez les phrases suivantes avec "supérieur(e)", "inférieur(e)" ou "similaire".

- a) Un chat (poids = 2.7 kg) a un taux métabolique spécifique _____ à celui d'un rat (poids = 112 g).
- b) Sa consommation d'oxygène (en mL d'O₂ par heure) est _____ à celle d'un rat.
- c) La superficie de la section transversale de ses os est proportionnellement _____ à celle des os d'un rat.
- d) Le rapport surface/volume de son corps est _____ à celui d'un rat.
- e) Son coût de locomotion à l'horizontale (en mL d'O₂ par kg de poids corporel par km parcouru) est _____ à celui d'un rat.

6) Vrai ou Faux? (et si faux, dites pourquoi)

- a) Une des différences entre rhéostase et homéostasie est que la rétroaction négative n'est pas impliquée dans les cas de rhéostase.
- b) En termes de kilojoules par unité de poids, le sucre contient plus d'énergie que les graisses ou les protéines.
- c) Le quotient respiratoire est calculé en divisant la quantité de CO₂ formé par la quantité d'O₂ utilisé chez un animal lors du métabolisme aérobie.
- d) Une baleine de 10 tonnes a des os qui, proportionnellement au poids de l'animal, sont de la même grosseur que ceux d'un dauphin de 120 kg.
- e) Les gros endothermes sont plus résistants au froid que les endothermes de petite taille à cause de leur rapport surface/volume plus bas.
- f) Un lézard qui s'expose au soleil gagne de la chaleur par conduction.
- g) Transpirer dans un sauna ne nous aide pas à se refroidir parce que l'évaporation de la sueur ne peut pas se faire dans une atmosphère saturée en humidité.
- h) Les principaux produits du métabolisme aérobie sont l'acide lactique (dans le cas des animaux), l'éthanol et le CO₂ (dans le cas des plantes et des unicellulaires), et bien sûr l'ATP.
- i) La fièvre, en autant qu'elle ne soit pas excessive, est bénéfique parce que la reproduction des agents pathogènes se fait mieux à des températures plus élevées que la normale.
- j) Une souris a un taux métabolique spécifique plus élevé qu'un éléphant.

7) Décrivez deux façons dont un animal ectotherme peut éviter complètement la formation de cristaux de glace dans son corps même si la température de son corps est inférieure à 0°C. Comment chacune de ces façons empêche-t-elle la formation de cristaux de glace?

8) On vous apprend que chez une certaine espèce de mammifère, le taux de transpiration possède un Q_{10} de 3, en autant que les mesures soient prises entre 20 et 40 °C. Le taux maximum est de 180 g de sueur par mètre carré par heure. Dessinez un graphique, aussi complet que possible, illustrant cette relation.

9) Vous êtes un naturaliste dans un parc national. Lors d'une visite printanière avec un groupe de touristes, vous remarquez la présence d'insectes actifs à la surface de la neige. On vous demande comment des animaux à sang froid comme ces insectes parviennent à être actifs sous de telles températures. Que répondez-vous? Utilisez une explication qu'un non-biologiste comprendrait.

10) Quelles sont les 4 variables qui peuvent influencer le taux de transfert de chaleur par conduction (et je parle de conduction pure ici, pas de convection, donc la vitesse du fluide dans lequel l'animal se trouve ne peut pas compter comme réponse). Pour chaque variable, donnez 1 exemple appliqué aux animaux.

11) Dessinez une coupe transversale de la base d'une jambe d'oiseau, dans le but de montrer l'arrangement particulier des vaisseaux sanguins, arrangement qui a un rôle thermorégulateur. Nommez bien les vaisseaux sanguins, et expliquez comment ce système fonctionne et quel est son rôle thermorégulateur.

12) Pourquoi les oiseaux qui ont froid s'ébouriffent-ils les plumes? Utilisez une explication claire et complète, comme si vous vous adressiez à quelqu'un qui n'a jamais pris le cours de physiologie animale comparée.

13) Vous observez un poisson dans un aquarium où l'eau est à 15°C; vous mesurez qu'il ouvre et ferme ses opercules à un rythme de 20 battements par minute. Par la suite, vous transférez ce poisson dans un autre aquarium où l'eau est à 25°C; après 60 minutes, vous observez 30 battements par minute au niveau des opercules, mais 3 jours plus tard cette fréquence est revenue à 20 battements par minute.

a) Excluant le stress sous lequel le poisson pourrait s'être retrouvé, donnez une raison possible pour expliquer le rythme supérieur observé 60 minutes après le transfert. Montrez bien comment cette raison fait le lien entre le facteur "fréquence des battements des opercules" d'une part et le facteur "température de l'eau" d'autre part.

b) Quel est le Q_{10} de la fréquence de battements des opercules lorsqu'on le base sur une mesure prise 60 minutes après un transfert de température, et lorsqu'on le base sur une mesure prise 72 h après un transfert. Montrez votre calcul dans les deux cas.

c) Quel nom donne-t-on au phénomène par lequel la fréquence de battements est revenue à la normale au bout de 72 h, même si au début elle avait augmenté?

14) Un poisson de 250 g et long de 8 cm est placé dans un tube propre dans lequel entre et sort 7500 mL d'eau par heure. La concentration de l'oxygène dans l'eau qui entre est de 16 mL d'O₂ par litre d'eau, et dans l'eau qui sort elle est de 12 mL d'O₂ par litre d'eau. Quel est le taux métabolique spécifique du poisson? Montrez vos calculs.

15) Faites un graphique, selon les règles de l'art, qui montre l'évolution du taux métabolique d'un animal ectotherme en fonction de la température ambiante entre 5 et 45 °C, sachant que l'animal consomme 20 mL d'oxygène par heure à 25 °C, et que le Q_{10} pour le taux métabolique de cette espèce est normalement de 2. Prenez pour acquis que l'animal n'a pas la chance de faire de la thermorégulation comportementale ni de thermogénèse par frissonnement. Mettez des chiffres sur vos axes qui me permettront de vérifier que votre graphique illustre bel et bien un Q_{10} de 2 à partir des données fournies ici.

16) Un poisson de 40 cm de long a besoin de 12 g de nourriture par jour pour survivre. De combien de nourriture aura besoin un poisson de même forme et de même physiologie s'il est 20 cm de long? Montrez vos calculs.

17) Complétez les phrases suivantes par un ou quelques mots.

On parle de techniques de ____ (a) ____ quand on utilise un émetteur implanté dans le corps et un récepteur radio pour mesurer la température corporelle à distance. Le renard de l'Arctique a un museau court et de petites oreilles, tandis que le fennec (renard du désert) a un museau long et de grandes oreilles, et ceci est un exemple pour la loi d'/de ____ (b) ____ . Une réaction catabolique en est une où une substance se fait ____ (c) ____ . Par ____ (d) ____ périphérique, un lézard peut se refroidir plus lentement lorsqu'il est placé dans un environnement plutôt froid. On appelle « organismes ____ (e) ____ » les animaux qui n'ont pas besoin d'oxygène pour remplir leurs besoins métaboliques et qui peuvent aussi survivre en présence d'oxygène. Quand on fait de la physiologie comparée, on compare des ____ (f) ____ entre eux/elles. Si l'eau est encore liquide à une température inférieure à 0 °C, on dira qu'elle est dans un état de ____ (g) ____ . Un/une ____ (h) ____ est un appareil qui sert à mesurer la quantité de chaleur dégagée par un animal. On transfère un poisson de son aquarium habituel à un autre où l'eau est 7 °C plus froide; aussitôt, le poisson devient beaucoup moins actif, mais quelques jours plus tard le poisson est revenu à son taux d'activité normal; on dira alors que le poisson s'est ____ (i) ____ à l'eau froide. Par définition, un animal ____ (j) ____ est un animal dont la température corporelle est variable. Si la durée d'exposition lors du test est plus longue que d'habitude, alors la T_{L50} inférieure mesurée lors du test sera (plus basse que, égale à, plus élevée que) ____ (k) ____ d'habitude. Les hibernants ont un type de graisse particulière, très riche en ____ (l) ____ , qu'on appelle graisse ____ (m) ____ . La capacité de support d'un os dépend de la surface de ____ (n) ____ . On appelle ____ (o) ____ le maintien d'une variable autour d'un point de référence qui fluctue ou qui change de façon temporaire, en dépit des variations qui surviennent à l'extérieur du corps. La technique de ____ (p) ____ fait appel à des ____ (q) ____ radioactifs pour estimer le taux métabolique d'un animal en liberté en nature. Le taux métabolique de base d'une vache est (inférieur, égal, supérieur?) ____ (r) ____ à celui d'un chat. La forme convexe (vers le haut) des ailes d'oiseaux fait glisser l'air plus rapidement le long de la surface supérieure de l'aile, ce qui ____ (s) ____ la pression de l'air à cet endroit. Le/la/l' ____ (t) ____ est une structure anatomique au niveau du système circulatoire qui représente un exemple de système d'échange à contre-courant. En Amérique du Nord, les populations de couleuvre présentent des corps plus foncés à mesure qu'on va plus au nord; c'est probablement une adaptation pour contrôler les échanges de chaleur par (quel processus physique?) ____ (u) ____ . Dans l'équation $Q = k A ((T_2 - T_1) / L)$, le symbole "k" représente ____ (v) ____ . Sur un graphique qui montre la zone de thermoneutralité d'un animal, le titre complet de l'axe des X sera: ____ (w) ____ . La consommation d'énergie par kilomètre parcouru chez un kangourou qui saute est (inférieure, égale, supérieure) ____ (x) ____ à celle d'un coureur humain de même poids. Chez les animaux, un des produits habituellement indésirables du métabolisme anaérobie est le/la/l' ____ (y) ____ . Les pythons femelles enroulées autour de leurs oeufs perdent jusqu'à la moitié de leur poids corporel pendant la période d'incubation parce qu'elles dépensent beaucoup d'énergie à (faire quoi?) ____ (z) ____ . La technique de l'eau doublement marquée fait appel à des ____ (aa) ____ radioactifs d'hydrogène et d'/de ____ (bb) ____ afin de calculer en fin du compte la quantité de (quelle substance?) ____ (cc) ____ **produite** par le corps par unité de temps, et de là le taux métabolique. Une moule ferme sa coquille et ne peut plus faire passer d'eau dans ses branchies et donc elle ne peut plus respirer; c'est grâce à son ____ (dd) ____ qu'elle réussira à survivre quand même.

On peut mesurer l'énergie contenue dans la nourriture d'un animal grâce à un appareil appelé ____ (ee) _____. Si vous mesurez la fréquence de battements cardiaques de plusieurs oiseaux et que vous illustrez vos résultats en fonction du poids corporel sur un graphique ____ (ff)_____, vous allez obtenir une droite et cette droite aura une pente de (quelle valeur, en chiffres?) ____ (gg)_____. Une des unités de mesure pour l'énergie est le/la/l' ____ (hh)_____. La raison pour laquelle un poisson de 5 kg consomme moins d'oxygène par kilomètre parcouru qu'un mammifère de 5 kg est que le poisson ____ (ii)_____.

- 18) Pourquoi les lézards malades passent-ils plus de temps que d'habitude, le jour, dans les parties de leur habitat où le couvert forestier est plus clairsemé, moins dense?
- 19) Pourquoi les corneilles ont-elles le bec ouvert lorsqu'elles marchent sur le gazon en plein soleil l'été?
- 20) Pourquoi est-ce que les abeilles en hiver forment des essaims en forme de boule?
- 21) Pour un projet de fin de semaine, je vous dis simplement: « Entrez dans mon laboratoire de physiologie et mesurez le quotient respiratoire d'un hamster ». Qu'allez-vous faire? (Quelles installations et appareillage allez-vous utiliser? Qu'allez-vous noter? Quels calculs allez-vous faire?)
- 22) Pourquoi est-ce qu'on a la chair de poule quand il fait froid? Expliquez bien complètement.
- 23) Faites un graphique, selon les règles de l'art, qui montre les variations de température corporelle d'un mammifère hibernant en fonction du temps en mois pour toute l'année au Canada. Utilisez une ligne continue. Pensez bien à tout ce qui arrive pendant l'hibernation. N'oubliez pas de mettre des chiffres sur l'axe des y.
- 24) Un animal consomme 5 ml d'O₂ par minute et on me dit qu'il a un quotient respiratoire de 0.8. Quel paramètre devrais-je mesurer pour m'assurer que son quotient respiratoire est effectivement 0.8, et quelle valeur prendrait ce paramètre si effectivement le quotient respiratoire est 0.8?
- 25) Un poisson de 50 g est placé dans un tube propre dans lequel entre et sort 5500 mL d'eau par heure. La concentration de l'oxygène dans l'eau qui entre est de 15 mL d'O₂ par litre d'eau, et dans l'eau qui sort elle est de 13 mL d'O₂ par litre d'eau. Quel est le taux métabolique spécifique du poisson?
- 26) Répondez aux questions suivantes par une ou deux phrase(s) :
- Vous publiez un article sur une étude où vous avez déterminé les T_{L50} d'une espèce de grenouille. La section Matériel et Méthodes de votre article devrait inclure la mention de deux paramètres. Quels sont ces deux paramètres et dans quelle direction chacun d'entre eux peut-il influencer la T_{L50}?
 - Dans le rete carotidien d'une gazelle qui court, le sang artériel donne une bonne partie de sa chaleur au sang veineux (de la jugulaire) froid. Pourquoi le sang veineux est-il particulièrement froid?
 - Vous placez un serpent dans un gradient de température. Après quelques jours vous lui donnez un gros repas. Qu'est-ce que le serpent va faire de particulier après son repas, et pourquoi?
 - Pourquoi les femelles de pythons qui s'enroulent autour de leurs oeufs perdent-elles près de la moitié de leur poids corporel pendant la période qui se termine avec l'éclosion des œufs?

27) Les grenouilles qui tolèrent le gel entreposent beaucoup de glucose dans leurs cellules avant de geler. Élaborez trois raisons pour expliquer ce fait (par "élaborez", je veux dire: ne donnez pas seulement donner la raison en 4-5 mots; donnez aussi 3-4 phrases qui expliquent, pour chaque raison, le rôle du glucose et la raison pour laquelle ce rôle est nécessaire).

28) Faites le dessin d'un rete mirabile, et dites à quoi sert un rete mirabile en utilisant un exemple.

29) Les cétacés (baleines, dauphins) ont des nageoires. Ils ont aussi une épaisse couche de graisse sous-cutanée. Parfois ils veulent perdre de la chaleur (par exemple, après une nage très vigoureuse pendant laquelle les muscles ont généré beaucoup de chaleur), et parfois ils veulent conserver leur chaleur (par exemple, lorsqu'ils sont inactifs).

- a) Quel est l'arrangement des vaisseaux sanguins au niveau de la couche de graisse sous-cutanée qui leur permet parfois de perdre de la chaleur, parfois de la conserver? Indiquez comment le sang circule dans chaque cas. Votre réponse comprendra probablement du texte et un dessin.
- b) Quel est l'arrangement des vaisseaux sanguins au niveau de leurs nageoires qui leur permet parfois de perdre de la chaleur, parfois de la conserver? Indiquez comment le sang circule dans chaque cas. Votre réponse comprendra probablement du texte et un dessin.

30) Une des colonnes de ce tableau, ensemble avec la colonne "température ambiante (°C)" permet de trouver TL_{50} pour l'espèce qui a fourni les données de cette colonne. Quelle est la colonne (A, B, C ou D?), quel titre prendrait cette colonne, et donnez TL_{50} en chiffres.

31) Une autre des colonnes de ce tableau, ensemble avec la colonne "température ambiante (°C)" permet de trouver la zone de thermoneutralité pour l'espèce qui a fourni les données de cette colonne. Quelle est la colonne (A, B, C ou D?), quel titre prendrait cette colonne, et donnez la zone de thermoneutralité en chiffres.

32) Une autre de ces colonnes (ou peut-être la même qu'une des deux précédentes) semble montrer un paramètre qui change selon un certain Q_{10} . Quelle est cette colonne (A, B, C ou D?), et quelle est la valeur du Q_{10} ?

Température ambiante (°C)	A	B	C	D
-12	0	3.65	10	120
-9	20	4.31	10	110
-6	40	5.09	10	100
-3	60	6.01	10	90
0	80	7.10	10	80
3	100	8.39	10	70
6	100	9.91	50	60
9	100	11.71	50	50
12	100	13.83	50	50
15	100	16.34	50	50
18	100	19.30	50	50
21	100	22.80	50	50
24	100	26.93	50	50
27	100	31.81	50	50
30	75	37.58	50	50
33	50	44.39	20	60
36	25	52.44	20	80
39	0	61.95	20	120
42	0	73.18	20	140
45	0	86.44	20	170

33) Que veulent dire les mots ou expressions suivantes:

- a) T_{L50} : (définition, et donnez aussi les deux paramètres expérimentaux qu'il faut spécifier quand on donne des valeurs de T_{L50})
- b) Zone de thermoneutralité: (votre définition devrait aussi spécifier à quel genre d'animaux ce terme s'applique)
- c) Taux métabolique de base: (définissez à la fois "taux métabolique" et "de base")
- d) Rhéostase: (n'utilisez pas le mot « homéostasie » dans votre définition; dites plutôt ce qu'est l'homéostasie, et de là, ce qu'est la rhéostasie)

34) Expliquez deux raisons pour lesquelles un grand maigre comme le prof a plus de chance d'avoir froid qu'un individu de même poids qui ressemble plutôt à un p'tit gros.

35) Une petite tortue et une grosse tortue font la navette entre un endroit ensoleillé et un endroit à l'ombre. Quand elles passent au soleil, la température corporelle de la petite tortue s'élève plus rapidement que celle de la grosse tortue. Quand elles passent à l'ombre, la température corporelle de la petite tortue s'abaisse plus rapidement que celle de la grosse tortue. Comment expliquer cette différence entre petite et grosse tortues?

36) Votre petit frère est en première année de spécialisation biologie. Pour vous impressionner, il vous énonce les faits suivants. Impressionnez-le encore plus en lui expliquant l'erreur qui est contenu dans chacun de ses énoncés (expliquez-lui bien). (4 énoncés = 4 explications différentes)

- a) La tortue peinte a une zone de thermoneutralité qui s'étend que de 15°C à 25°C, ce qui veut dire qu'elle n'a pas besoin de dépenser d'énergie pour la thermorégulation entre ces deux températures.
- b) Il est important pour une souris de s'engraisser avant l'automne parce que les graisses contiennent beaucoup d'énergie et la souris doit accumuler suffisamment de réserves énergétiques pour lui permettre de survivre lors de son hibernation.
- c) La fièvre est une manifestation de maladie et il faut la combattre par tous les moyens possibles.
- d) Quand on transfère un poisson de son aquarium habituel à un autre où l'eau est plus froide, le poisson devient beaucoup moins actif, mais quelques jours plus tard le poisson revient à son taux d'activité normal, ce qui indique que le poisson s'est habitué à l'eau froide.

37) Voici un respiromètre qui sert à mesurer la consommation d'oxygène par des insectes. Il s'agit d'une grosse éprouvette fermée par un bouchon. Le bouchon est transpercé par un tube millimétré, et ce tube est lui-même bouché par une goutte d'huile. L'insecte repose sur un grillage à l'intérieur de l'éprouvette, et en-dessous du grillage il y a une substance poudreuse. La personne vous explique qu'à mesure que l'insecte respire, le volume d'air à l'intérieur de l'éprouvette diminue, et donc la goutte d'huile dans le tube millimétré descend, et connaissant l'échelle sur le tube millimétré on peut donc quantifier la diminution du volume d'air. À quoi sert la substance poudreuse dans le fond de l'éprouvette, et pourquoi cette fonction est-elle essentielle?

38) Imaginez un animal qui mesure 20 cm de long; pèse 750 g; inspire normalement 2 L d'air par minute; produit 10 g d'excréments par jour; consomme normalement 160 mL d'O₂ par minute; produit normalement 180 mL de CO₂ par minute; consomme 320 L d'O₂ par gramme de poids corporel et par kilomètre parcouru quand il court à l'horizontale à 10 km/h; et maintient sa température corporelle stable aux alentours de 38 °C. Utilisez les données dont vous avez besoin pour répondre à chacune des questions suivantes, tout en montrant votre calcul ou en détaillant bien votre raisonnement.

- a) Quel est le quotient respiratoire de cet animal?
- b) Quel est le taux métabolique spécifique de l'animal?
- c) Quel serait la consommation d'O₂ par gramme de poids corporel et par kilomètre parcouru si cet animal court maintenant à 20 km/h?
- d) Quel serait le taux métabolique d'un animal de même forme mais qui pèserait 2,5 kg?
- e) Combien pèserait un animal de même forme mais qui mesurerait 30 cm de long?

39) Je vous dis « j'ai vu un lézard faire de la fièvre comportementale ». Expliquez-moi ce qu'est la fièvre et la raison pour laquelle cette réponse physiologique a évolué, et expliquez-moi ce qu'est une fièvre « comportementale » et chez quel grand type d'espèces on peut l'observer.

40) Faites un graphique, selon les règles de l'art, qui illustre le concept de « zone de thermoneutralité ». À côté de votre graphique, rajoutez une phrase qui dit quel(les) est(sont) la(les) valeur(s) de la zone de thermoneutralité selon votre graphique.

41) Quelles sont les différences entre une bombe calorimétrique et un calorimètre, dans la façon dont ils sont faits et dans la façon dont on s'en sert?

- 42) À 5 °C, un lézard consomme 12.0 mL d'oxygène par minute et produit 9.6 mL de CO₂ par minute.
 À 7 °C, il consomme 14.6 mL d'oxygène par minute et produit 11.7 mL de CO₂ par minute.
 À 10 °C, il consomme 19.7 mL d'oxygène par minute et produit 15.75 mL de CO₂ par minute.
 À 15 °C, il consomme 32.4 mL d'oxygène par minute et produit 25.9 mL de CO₂ par minute.
 À 18 °C, il consomme 43.6 mL d'oxygène par minute et produit 34.9 mL de CO₂ par minute.

Utilisez ces données, en tout ou en partie, pour calculer (a) le quotient respiratoire, et (b) le Q₁₀ du taux métabolique. Dans chaque cas, montrez votre calcul ou expliquez votre raisonnement.

43) Un poisson de 30 cm de long a besoin de 12 g de nourriture par jour pour survivre. De combien de nourriture aura besoin un poisson de même forme et de même physiologie s'il est 10 cm de long? Montrez votre calcul.

44) Le renard de l'Arctique a un museau court et de petites oreilles, tandis que le fennec (renard du désert) a un museau long et de grandes oreilles. Ceci est un exemple pour quelle « loi », et avec quel raisonnement anatomique et physiologique peut-on expliquer que cette loi existe.

Voici quelques exemples de questions et réponses pour vous indiquer le niveau de précision que je recherche dans certaines questions à développement, en particulier celles où je demande d'expliquer clairement les choses:

Quelles sont les deux principales caractéristiques d'un corps pouvant influencer son rapport surface/volume? Décrivez dans quel sens les variations au niveau de chacune de ces caractéristiques influencent le rapport surface/volume; dites aussi comment ces variations, pour chacune des deux caractéristiques, peuvent favoriser la maintenance d'un corps chaud, et pourquoi.

Premièrement, la forme du corps: plus le corps est sphérique, plus son rapport surface/volume est faible, ce qui aide à préserver la chaleur car la capacité de perte de chaleur (un procédé de surface) est minimisée par rapport à la capacité de production (un procédé de volume). La situation serait inversée pour un corps de forme aplatie ou allongée.

Deuxièmement, la grosseur du corps: plus l'animal est gros (pesant), plus son rapport surface/volume est faible, ce qui aide à préserver la chaleur (même argument qu'avant).

D'après vous, chez l'être humain, le frisson est-il un moyen plus efficace, aussi efficace, ou moins efficace que la chair de poule pour se garder chaud quand il fait froid? Pourquoi? Profitez-en pour bien expliquer ce qu'est le frisson et la chair de poule et comment ces deux stratégies aident à se garder chaud.

Le frisson est plus efficace. Le frisson consiste en la contraction \pm simultanée de muscles antagonistes, et près de 70% de l'énergie consommée par ces muscles est convertie en chaleur, ce qui contribue bien à réchauffer le corps. La chair de poule, quant à elle, est un vestige évolutif qui reflète l'action de petits muscles pilo-érecteurs cherchant à redresser nos poils. Cela était utile pour nos ancêtres évolutifs poilus car la couche d'air isolante emprisonnée par leurs poils était alors épaissie, ce qui diminuait les pertes par conduction, mais comme nos poils sont maintenant très courts et fins, ils ne peuvent plus emprisonner de couche d'air autour de notre corps et donc il ne sert à rien de redresser les poils quand on a froid.

Pourquoi n'existe-t-il aucune souris qui hiberne? Décrivez en quoi consiste l'hibernation, pourquoi les animaux en font, qu'est-ce que ça implique pour l'animal, et comment cela fait en sorte qu'une souris ne peut pas le faire.

L'hibernation est retrouvée chez les homéothermes et consiste à baisser le point de référence de la température corporelle, en d'autres mots: du thermostat. Maintenir une température plus basse demande moins d'énergie, donc une économie. Par contre, la température est souvent baissée à un tel point que l'animal perd sa coordination et devient léthargique. Donc il ne peut plus manger et doit entreposer dans son corps des réserves d'énergie au préalable pour passer l'hiver, ce qui est fait sous forme de graisses. Or, une souris est tellement petite, ce qui veut dire que son rapport surface/volume est tellement grand, que sa capacité d'entreposage (volume) est trop faible par rapport à sa capacité de perte de chaleur (surface). Elle ne peut pas entreposer suffisamment de réserves pour survivre lors de la léthargie. Donc l'hibernation n'est pas une stratégie possible pour les souris.

Un insecte veut élever la température de son corps au-dessus de celle de l'air ambiant. Est-ce possible? Si oui, décrivez le plus grand nombre possible de façons dont il pourrait le faire. Utilisez des beaux termes scientifiques dans vos descriptions.

Oui, un insecte peut réchauffer son corps au-dessus de l'air ambiant en exposant la plus grande superficie corporelle possible au soleil (gain par radiation) ou en générant de la chaleur interne par frissonnement (contraction simultanée de muscles antagonistes, surtout ceux du vol, et les réactions biochimiques impliquées dans la contraction musculaire dégagent de la chaleur; en fait 70% de l'énergie consommée par un muscle est transformée en chaleur).

Au milieu d'une chaude journée d'été, votre mère observe le chien familial et vous demande: « Pourquoi est-ce qu'un chien qui a chaud respire si vite? Et pourquoi est-ce qu'un être humain n'en fait pas autant? » Que lui répondez-vous?

Un chien qui a chaud respire plus vite car les mouvements accrus de l'air (convection) dans son système respiratoire lui permettent d'évaporer une plus grande quantité de l'eau qui recouvre l'intérieur de ses conduits respiratoires (bronches, trachée, gorge, bouche, nez), et l'évaporation de cette eau lui permet de perdre de la chaleur car les molécules d'eau absorbent beaucoup de chaleur quand elles passent à l'état gazeux. Nous, les êtres humains, avons aussi recours à l'évaporation de l'eau pour nous refroidir, mais nous utilisons l'eau de la sueur qui est répandue à la surface du corps (donc nous n'avons pas besoin de respirer vite). Un chien ne peut pas bien utiliser la sueur parce que sa fourrure isolante emprisonne une couche d'air qui se sature rapidement en humidité, ce qui diminue grandement le potentiel d'évaporation à la surface de la peau. Donc il doit haleter, même si cela produit un peu de chaleur par contraction des muscles respiratoires. Sa méthode de refroidissement n'est pas tout à fait aussi bonne que la nôtre, mais il n'a pas le choix.

En fouillant dans l'entrepôt de l'institut scientifique où vous travaillez comme physiologiste animal, vous trouvez un instrument étiqueté bombe calorimétrique. Décrivez une expérience portant sur le taux métabolique animal que vous pourriez faire en utilisant cet instrument. Profitez-en pour m'expliquer aussi comment cet instrument fonctionne.

La bombe calorimétrique est un instrument qui permet de mesurer le contenu énergétique d'un échantillon. Il s'agit d'une enceinte métallique entourée d'une mince couche d'eau dont la température est mesurée avec un thermomètre. L'échantillon à mesurer est placé dans l'enceinte et est complètement incinéré. Plus son contenu énergétique est grand, plus il y aura de chaleur dégagée lors de l'incinération, et plus la température de la couche d'eau va augmenter. Avec une calibration appropriée, on peut déduire quel est le contenu énergétique de l'échantillon à partir de la hausse de température dans la couche d'eau.

Une expérience rendue possible par cet appareil est la détermination du taux métabolique d'un animal. Il s'agit de déterminer le contenu énergétique de la nourriture normalement consommée par un animal en, disons, 2 jours, et de déterminer aussi le contenu énergétique de l'urine et des fèces produites par l'animal pendant 2 jours. La différence entre les deux représente la consommation d'énergie par l'animal en deux jours, et donc son taux métabolique.

Chapitre 11

Respiration: principes de base

Diffusion:

Lorsque deux milieux sont séparés par une membrane perméable aux gaz et que ces deux milieux ont des concentrations (pressions) de gaz différentes, les gaz ont tendance à diffuser du milieu plus concentré au milieu moins concentré. Le taux de diffusion (L/h ou mg/h ou mole/h) d'un gaz au travers d'une membrane qui sépare deux milieux se calcule par l'équation suivante:

$$\text{Taux de diffusion} = D A \left(\frac{a_1 - a_2}{x} \right)$$

- D = coefficient de perméabilité de la membrane au gaz considéré
- A = aire de la surface d'échange entre les deux milieux
- a_1, a_2 = concentration (pression) du gaz dans chacun des deux milieux
- x = distance séparant les milieux (= l'épaisseur de la membrane)

Afin de maximiser le taux de diffusion, les surfaces des organes respiratoires ont tendance à être grandes (A augmente), minces (x diminue), et humides (D de membranes humides est élevé).

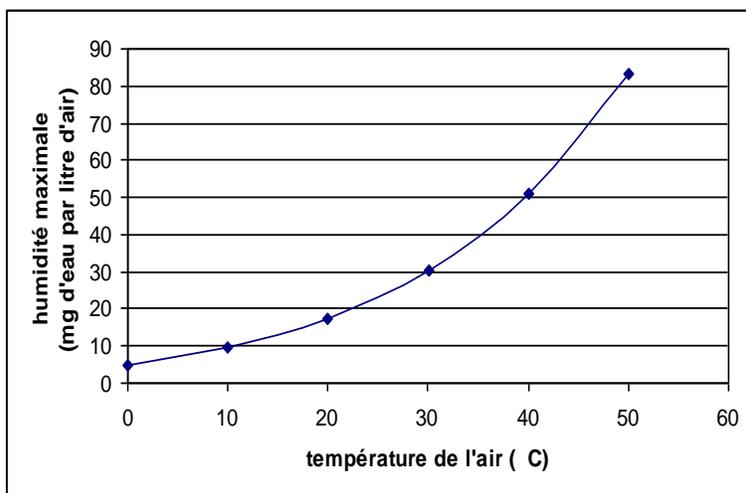
Composition de l'air (sec) dans un milieu « normal »:

	% (volume/volume)
oxygène (O ₂)	20.95 (donc, juste 1/5 de l'air nous intéresse)
dioxyde de carbone (CO ₂)	0.04 (faible, mais effet de serre quand même)
azote (N ₂)	78.08 (ce gaz est inutilisable par le corps)
argon (un gaz inerte)	0.93 (ce gaz est inutilisable par le corps)

La pression partielle exercée par un gaz (P_{gaz}) est directement proportionnelle à la fraction que ce gaz occupe dans le mélange de gaz (Loi de Dalton). Si la pression de l'air (un mélange de gaz) est 760 mm Hg, alors $P_{\text{O}_2} = 0.2095 \times 760 \text{ mm Hg} = 159.22 \text{ mm Hg}$.

Vapeur d'eau:

En plus des gaz déjà mentionnés, l'air peut contenir de la vapeur d'eau. La quantité de vapeur d'eau dépend de la température de l'air: plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur. Ainsi, à 0 °C, l'air saturé en humidité ne contient que 4.8 mg d'eau par litre d'air, tandis qu'à 37 °C il contient 43.9 mg d'eau par litre d'air. A noter que l'on parle ici d'air saturé en humidité. On peut avoir un air chaud qui est quand même très sec s'il n'y a pas de source d'eau nulle part.



Haleine et brume:

Quand il fait froid, notre haleine « fait de la brume ». C'est parce que l'air qu'on expire a pris la chaleur de notre corps et l'humidité de nos voies respiratoires (il y a évaporation de l'eau à la surface de nos voies respiratoires). L'air qu'on expire est donc à 38 °C et saturé en humidité. Cela représente beaucoup de vapeur d'eau (voir graphique ci-haut). Aussitôt que l'air expiré sort de notre bouche, il se refroidit dans l'environnement externe et sa capacité de contenir de la vapeur d'eau diminue. La vapeur d'eau maintenant excédentaire à cette nouvelle capacité ne peut que revenir à l'état liquide, se condenser en minuscules gouttelettes. Si la température externe est très froide, la capacité de l'air expiré de contenir la vapeur d'eau va baisser de beaucoup, une grande quantité de vapeur d'eau va se condenser, et les gouttelettes seront suffisamment nombreuses pour diffuser la lumière (mais encore assez petites pour flotter dans l'air), apparaissant ainsi sous forme de brume.

Q

Dans le premier film « *Jurassic Park* », un vélocirapteur (un dinosaure, donc un reptile) s'apprête à entrer dans la cuisine pour y attaquer les deux enfants qui s'y cachent. Il commence par regarder par la fenêtre de la porte, et expire violemment. De la buée se forme alors sur la fenêtre. Quelle est l'hypothèse « *nerd* » sur la physiologie des dinosaures que les réalisateurs du film ont admirablement intégrée dans cette scène?

Assèchement de l'air dans les maisons l'hiver:

L'hiver, on se met du baume sur les lèvres pour empêcher leur dessèchement. (Les lèvres ne contiennent pas de glandes sébacées, ces glandes qui produisent le sébum, une huile répandue sur notre corps pour aider à prévenir le dessèchement de la peau.) Pourquoi l'hiver mais pas l'été? C'est parce que l'hiver, on fait entrer de l'air froid dans la maison (ouverture des portes, fenêtres qui fuient). Cet air ne contient pas beaucoup d'humidité (il ne peut pas, étant froid). Mais une fois rendu dans la maison il se réchauffe; sa capacité de contenir de l'humidité augmente alors de beaucoup. L'évaporation se fait facilement dans cet air chaud mais sec, d'où la déshydratation de nos lèvres (gorge et nez aussi).

Transpiration dans les déserts:

Dans les déserts, l'air est très chaud mais très sec. Il contient peu de vapeur d'eau mais il a une grande capacité d'en prendre. Donc, quand on se promène dans un désert, on transpire et notre sueur s'évapore instantanément. La sueur n'a pas la chance de s'accumuler sur la peau, et donc on a l'impression de ne pas transpirer! Mais on transpire bel et bien, tel que révélé par notre grande soif quand on revient de notre randonnée.

Altitude:

La pression de l'air diminue en altitude. Plus précisément, elle diminue de moitié pour chaque élévation d'environ 6,000 m.⁶ La pression des gaz qui composent l'air diminue de manière similaire. Cependant, la composition de l'air (la nature des gaz et leur proportion relative) ne change pas avec l'altitude.

Q À 12,000 m d'altitude, quelle est la P_{O_2} , sachant qu'au niveau de la mer la pression normale de l'air est 760 mm Hg (= 1 atm, = 101.325 kPa)?

Q Au sommet du mont Everest, quel est le gaz le plus abondant dans l'air?

⁶ $P = (P_o \times 2.71823)^{-0.284h / (8.31432(T + 273.15))}$, où P = pression de l'air, P_o = pression de l'air au niveau de la mer, h = altitude (en mètres), et T = température (en degrés Celsius).

Solubilité des gaz dans l'eau:

Pour une même surface de contact entre gaz et eau, la quantité de gaz qui peut être dissous dans l'eau dépend de :

- 1) la nature du gaz
- 2) la pression du gaz en contact avec l'eau
- 3) la température de l'eau
- 4) le contenu en sels de l'eau

La nature du gaz: Par exemple, le CO_2 est 30 fois plus soluble que l'oxygène, tandis que l'azote est 2 fois moins soluble que l'oxygène.

C'est du CO_2 qui est dissous dans les boissons gazeuses (c'est facile à faire).

La pression du gaz: Plus la pression partielle du gaz est élevée, plus le gaz est dissous.

Lors de la manufacture des boissons gazeuses, le CO_2 est dissous dans l'eau sous forte pression. Cette forte pression demeure présente dans la bouteille/canette, donc beaucoup de CO_2 est dissous. Quand on ouvre la bouteille, le gaz sous pression s'échappe (le pssshhht qu'on entend vient du CO_2 qui sort violemment de la bouteille) et se fait remplacer par l'air ordinaire qui contient peu de CO_2 . La P_{CO_2} diminue donc de beaucoup, donc la capacité de l'eau à contenir le CO_2 dissous diminue, et donc la grande quantité de CO_2 qui y était déjà dissous n'a pas d'autre choix que de repasser en forme gazeuse, formant de petites bulles qui viennent chatouiller notre palais quand on boit.

Les physiologistes qui veulent faire des expériences avec de l'eau désoxygénée enlèvent l'oxygène dissous en insufflant de l'azote gazeux (un gaz physiologiquement inerte) dans l'eau. Dans l'air ordinaire en contact avec la surface de l'eau dans l'aquarium, l'azote occupe environ 80% du volume et l'oxygène 20%. Mais maintenant il y a aussi des bulles d'azote pur en contact avec l'eau. Donc, au total, l'azote représente maintenant bien plus que 80% des gaz en contact avec l'eau. La P_{N_2} devient énormément plus grande que la P_{O_2} , et donc l'azote remplace l'oxygène dans l'eau.

La température de l'eau:

Plus l'eau est chaude, moins elle peut contenir de gaz dissous.

En passant de 0 °C à 40 °C, la solubilité de l'O₂ diminue de moitié.

Quand on fait bouillir de l'eau dans une casserole, de petites bulles se forment sur les parois de la casserole avant même que l'eau commence à bouillir. Ces petites bulles sont de l'O₂ et N₂ dissous qui passent en forme gazeuse à mesure que la température de l'eau augmente, c'est-à-dire à mesure que sa capacité de garder les gaz dissous qu'elle contenait diminue.

Le contenu en sels de l'eau:

La présence de solutés déjà dissous dans l'eau réduit la solubilité des gaz.

L'eau de mer, salée, contient 20% moins d'oxygène que l'eau douce.

Questions à réflexion:

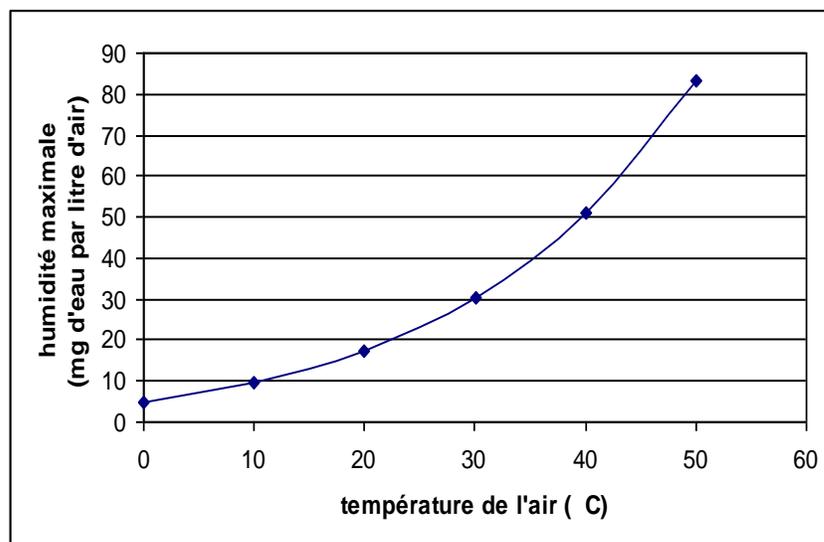
- Q** 1) Vous prenez un verre d'eau douce et vous le laissez sur le comptoir pendant quelques heures pour que l'eau s'équilibre avec l'atmosphère. Est-ce qu'il y aura plus de CO₂ gazeux dissous dans l'eau que d'O₂? (Cette question n'est pas aussi simple qu'il semble.)
- Q** 2) Dans l'eau de mer, l'oxygène gazeux a un coefficient de solubilité (une tendance à se dissoudre dans l'eau, tout autre chose étant égale) qui est deux fois plus grand que celui de l'azote gazeux. Si je prends un verre d'eau de mer et que je le laisse sur le comptoir pendant plusieurs heures pour qu'il s'équilibre avec l'air, y aura-t-il plus d'oxygène ou plus d'azote dissous dans l'eau du verre? Justifiez votre réponse.
- Q** 3) Donnez deux raisons (pour une de ces raisons, vous devrez vous rappeler d'un chapitre précédent) pour lesquelles un poisson respire plus vite (ouvre ses opercules à une plus haute fréquence) quand on le déplace dans une eau plus chaude.

Q 4) Le graphique ci-dessous représente le taux de saturation en humidité de l'air. Dans laquelle des trois situations suivantes (A, B, ou C) un mammifère, ventilant toujours ses poumons au même taux (donc, pas de changement de fréquence pour des raisons thermorégulatrices), perdrait-il le plus d'eau à cause de sa respiration au bilan final? Expliquez votre réponse.

A : air ambiant à 0 °C et 100 % d'humidité

B : air ambiant à 20 °C et 75 % d'humidité

C : air ambiant à 40 °C et 50 % d'humidité



Q 5) L'être humain ventile ses poumons au taux de 6 L d'air par minute. Combien d'eau est-ce qu'on perd par jour, à cause de notre respiration, dans de l'air à 20 °C et 50% d'humidité?

Q 6) Pour chaque paire de situations suivantes, dites quel type d'eau possède probablement le plus d'oxygène dissous, et dites pourquoi il en est ainsi en faisant référence aux facteurs qui influencent la solubilité des gaz dans l'eau.

- | | | |
|--|--------|---|
| a) l'eau d'un lac à 5000 m d'altitude | versus | l'eau d'un lac à 2000 m d'altitude. |
| b) l'eau de la plage Parlée à Shédiac* | versus | l'eau de la rivière Shédiac |
| c) l'eau du robinet que vous buvez | versus | l'eau du robinet avec laquelle vous vous lavez. |

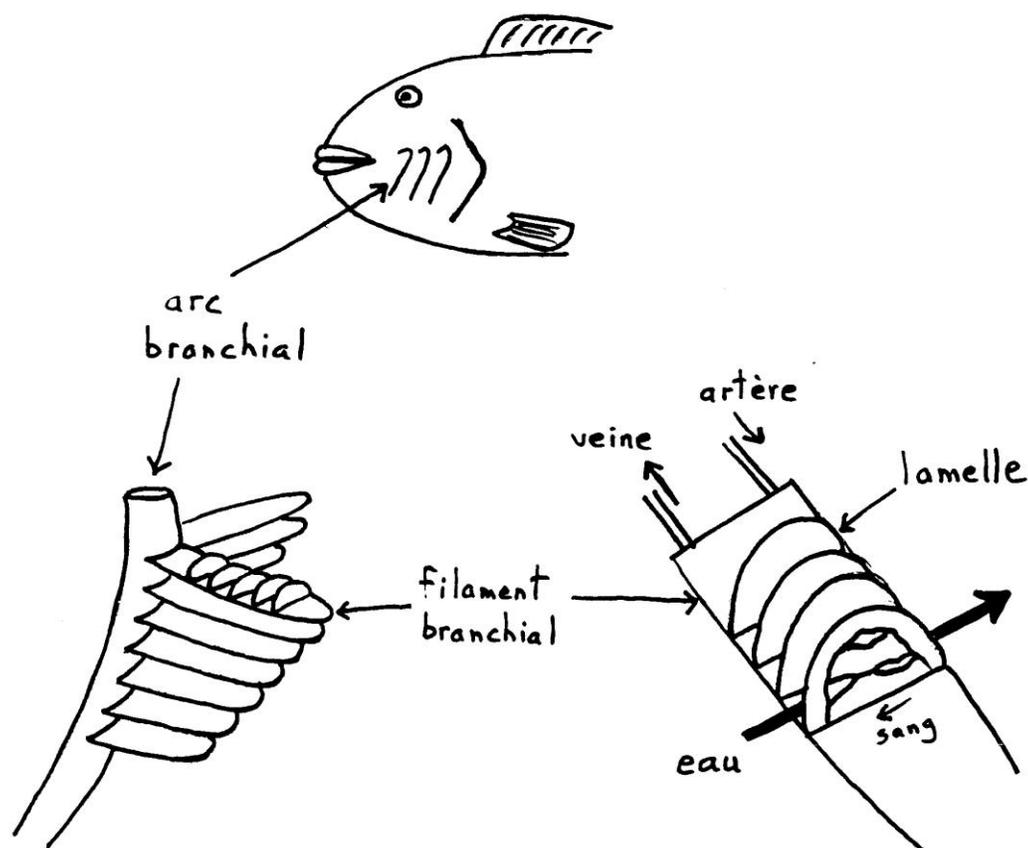
* si vous ne savez pas où se trouve la plage Parlée de Shédiac (ce qui serait surprenant, mais on ne sait jamais), je peux vous dire qu'elle se trouve sur la côte est du Nouveau-Brunswick. La rivière Shédiac, quant à elle, se trouve assez près de la plage Parlée.

Chapitre 12

Respiration: le milieu aquatique

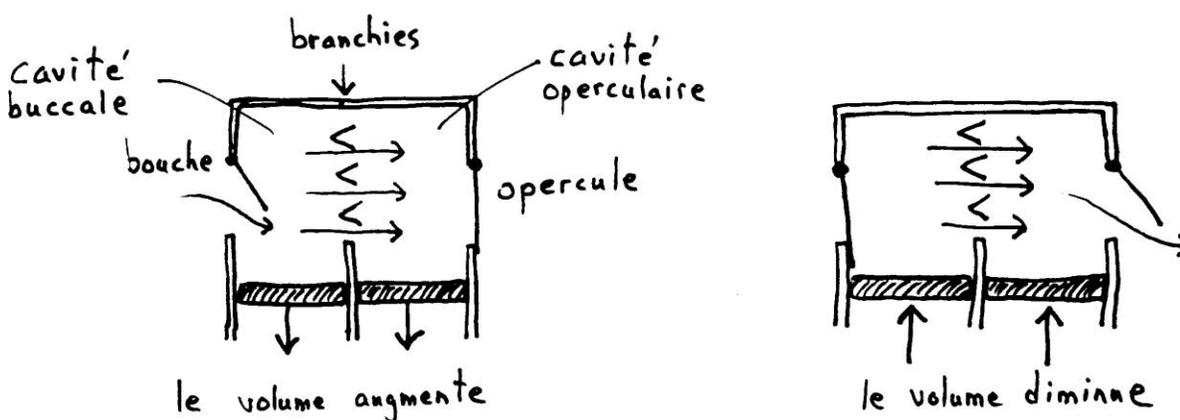
Il nous faut sympathiser avec les organismes aquatiques car, en comparaison avec l'air, l'eau ne représente pas un milieu facile pour la respiration. A volume égal, l'eau à 15 °C contient 28 fois moins d'oxygène que l'air à 15 °C, et l'eau est 1,000 fois plus pesante et 100 fois plus visqueuse que l'air (et donc plus difficile à déplacer dans les organes respiratoires).

L'organe respiratoire des organismes aquatiques est la branchie (celle-ci peut aussi servir d'organe de filtration pour la prise de nourriture, et d'organe d'échange osmorégulateur). Typiquement, les branchies présentent une structure lamellée (pour augmenter la surface d'échange) et une cuticule mince (pour faciliter la diffusion des gaz). Le sang y circule pour y recevoir l'oxygène de l'eau et y décharger le CO₂. Le patron de circulation entre sang et eau est à contre-courant pour maximiser les échanges gazeux (des scientifiques ont pris des échantillons d'eau à l'entrée et à la sortie des branchies, ont mesuré la teneur en oxygène, et ont ainsi déterminé un taux d'extraction de l'oxygène par les branchies de l'ordre de 80% - à comparer à seulement 25% pour la respiration aérienne des mammifères).



Les branchies sont ventilées (ventilation = apport d'eau ou d'air aux organes respiratoires) de façon que l'eau circule tout autour des branchies afin d'assurer un apport d'oxygène constant. Certains organismes exposent leurs branchies externes au courant d'eau naturel de l'environnement (ex.: vers marins), d'autres ont des cils à la surface des branchies qui font bouger l'eau (mollusques), d'autres se déplacent dans l'eau avec les branchies exposées (certains thons et certains requins qui nagent avec la bouche ouverte = « *ram ventilation* »), d'autres, comme les poissons téléostéens, pompent l'eau de façon active.

Le système des poissons téléostéens:



Le volume des cavités buccale et operculaire augmente quand des muscles abaissent leur plancher, et diminue quand des muscles rehaussent le plancher. Le cycle respiratoire alterne entre les deux phases illustrées ci-haut (examinez l'ouverture de la bouche et des opercules d'un poisson, la prochaine fois que vous en aurez la chance). Remarquez comment, à chaque phase du cycle, il y a toujours de l'eau qui passe au travers des branchies. Et remarquez comment ce passage est toujours dans la même direction. La circulation d'eau dans les branchies est continue et unidirectionnelle, ce qui permet l'établissement du système à contre-courant entre le sang et l'eau (revoir l'illustration de la page précédente). L'excellente extraction d'oxygène par ce système d'échange à contre-courant, en continue, réussit à compenser les désavantages respiratoires de l'eau énoncés à la page précédente.

Questions à réflexion:

- Q 1) Il est logique de penser qu'une espèce de poisson particulièrement active présenterait des branchies mieux adaptées que celles d'une espèce sédentaire. Quelles seraient les caractéristiques des branchies d'une telle espèce? Comment pourriez-vous utiliser l'approche comparative pour démontrer vos idées?

- Q** 2) Puisque l'air contient plus d'oxygène et est plus facile à déplacer que l'eau, comment se fait-il qu'un poisson exposé à l'air meurt d'asphyxie? (Indice : les lamelles de branchies sont très minces Imaginez-les dans l'eau, puis dans l'air.)
- Q** 3) Les poissons exposés soudainement à un milieu hypoxique (hypoxique = à faible teneur d'oxygène; anoxique = absence complète d'oxygène) ont tendance à rester tout près de la surface. Pourquoi? Et pourquoi ne le font-ils pas en temps normal? (Indice : d'où vient l'oxygène dissous dans l'eau?)
- Q** 4) La formation d'une couche de glace sur les lacs en hiver présente un danger pour la survie des poissons. Lequel? (« *Winterkill* » = mortalité massive des poissons d'un lac pendant l'hiver.)

Chapitre 13

Respiration: le milieu terrestre

Une grande variété d'organes peuvent servir à la respiration chez les animaux terrestres:

Poumons:	mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens, certains poissons.
Branchies rigides:	certaines crustacés, certains poissons, araignées.
Peau:	amphibiens, anguille, ver de terre, invertébrés aquatiques.
Cavité buccale:	amphibiens, certains poissons.
Trachées:	insectes.

Il suffit que ces organes soient bien vascularisés (bon apport sanguin, car c'est le sang qui prendra l'oxygène de l'air et l'amènera au reste du corps), qu'ils puissent demeurer humides, et qu'ils viennent en contact renouvelé avec l'air.

Les insectes:

Les insectes sont particuliers: ils ne font pas appel à un liquide (à leur « sang », appelé hémolymphe) pour transporter les gaz sous forme dissoute entre le milieu extérieur et les cellules du corps. Ils utilisent plutôt un système de tubes et de tubules (appelés trachées et trachéoles) qui amènent les gaz directement de l'extérieur jusqu'à proximité des cellules, et vice-versa. Ces trachées s'ouvrent sur le milieu extérieur au niveau de portes appelées stigmates. L'insecte peut ouvrir et fermer ses stigmates pour ainsi contrôler la quantité de gaz échangés (et pour contrôler la perte de vapeur d'eau). La circulation des gaz dans le système de trachées est assurée par simple diffusion, par des mouvements ou déformations rythmiques du corps, et par l'ouverture et la fermeture synchronisées de certains stigmates par rapport à d'autres. Ce type de circulation ne peut pas assurer un bon déplacement d'air sur de grandes distances, et donc il n'est efficace que pour des organismes de petite taille (une des raisons pour lesquelles les gros insectes sont inexistants).

Q On a trouvé des fossiles de libellules géantes (30 cm de long) datant du Carbonifère; pourquoi ou comment réussissaient-elles à respirer avec des trachées malgré leur très grande taille? (Indice : trouvez le niveau d'oxygène dans l'air du Carbonifère.)

Les trachéoles se terminent en cul-de-sac tout près des cellules du corps. Leur paroi est très mince pour faciliter les échanges gazeux avec le liquide corporel (hémolymphe) autour des cellules.

Même les insectes aquatiques utilisent un système de trachées. Ils amènent avec eux une ou plusieurs bulles d'air emprisonnées sous leurs ailes, pattes, ou certains poils modifiés. Seuls les stigmates qui sont en contact avec ces bulles d'air s'ouvrent; les autres demeurent fermés. Chez certaines larves d'insectes aquatiques, les stigmates sont remplacés par des branchies externes.

Crustacés (isopodes et crabes terrestres):

Les crustacés terrestres possèdent des branchies qui sont suffisamment rigides pour permettre la respiration aérienne. Ces branchies sont dans des « cavités branchiales » à la base des pattes.

Araignées:

Certaines araignées ont des trachées et trachéoles, mais habituellement pas assez longues et pas en assez grand nombre pour être efficaces toutes seules. La plupart des araignées utilisent plutôt des branchies rigides formant un « poumon lamellaire » qui ressemble à un livre avec ses pages (d'où le mot anglais « *book lung* »).

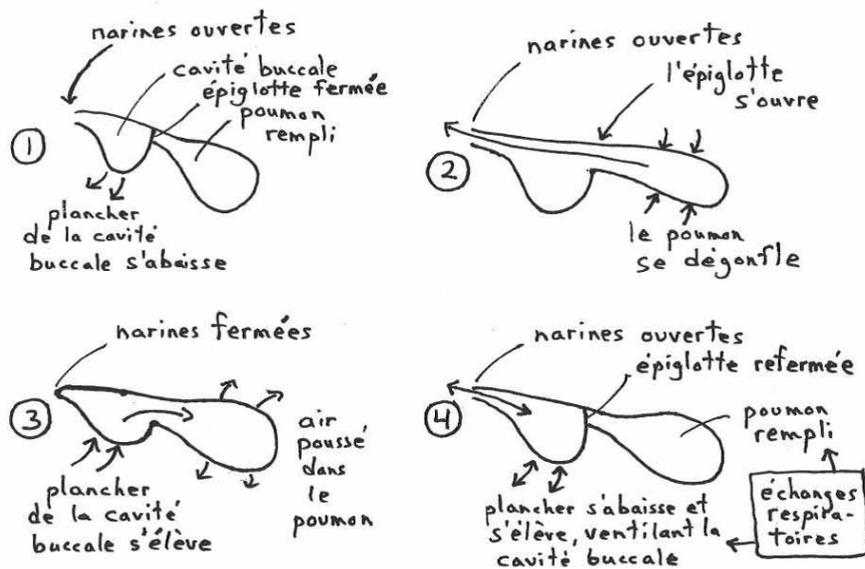
Poissons:

Certains poissons sont capables de respirer dans l'air (quelques-uns sont même obligés de respirer de l'air – ils se noient dans l'eau s'ils n'ont pas accès à l'air!). Chez ces poissons, les échanges gazeux se font à travers la peau (exemple: l'anguille), la muqueuse de la bouche, des branchies rigides, l'estomac (exemple: le *Plecostomus* des aquariums tropicaux), l'intestin (l'air entre par la bouche ou par l'anus, et ressort par l'anus), la vessie natatoire (exemple: le poisson-castor), ou un genre de « poumon » (un compartiment) connecté à l'oesophage (exemple: les dipneutes).

Amphibiens:

Les amphibiens respirent à travers la peau, la muqueuse de la bouche, et par leurs poumons. La peau est richement vascularisée (= contient beaucoup de vaisseaux sanguins) comme il convient à un organe respiratoire. Il y a même certains salamandres (famille pléthodontidae) et une ou deux espèces de cécilies et de grenouilles qui ne respirent qu'à travers la peau (ils n'ont pas de poumons).

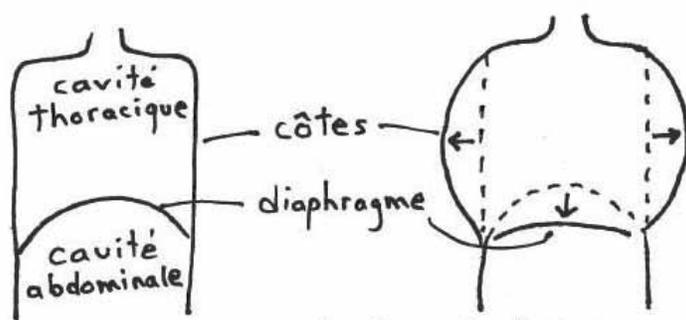
Les amphibiens n'ont ni diaphragme et ni côtes; leurs poumons se font remplir par pression positive (l'air se fait pousser dans les poumons) à partir de la cavité buccale. Voici les étapes du cycle respiratoire :



Reptiles, oiseaux et mammifères:

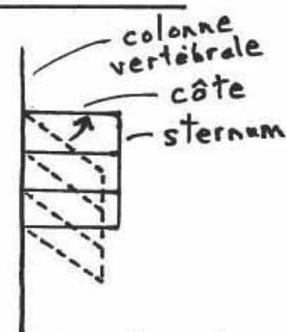
Les reptiles, oiseaux, et mammifères ne respirent qu'à l'aide de poumons. Ceux-ci sont remplis par pression négative: au cours de l'inspiration, des muscles élargissent le volume de la cavité thoracique et, de là, le volume des poumons (la paroi des poumons est collée à la paroi de la cage thoracique), ce qui y aspire de l'air. Ces muscles sont attachés aux côtes (« muscles intercostaux externes ») et, dans le cas des mammifères, composent aussi le diaphragme (la paroi musculaire qui sépare la cavité thoracique de la cavité abdominale). L'expiration est causée par l'élasticité naturelle des poumons qui tendent à revenir à leur volume original (comme une « ballonne » qui se dégonfle toute seule). Le volume total d'air inspiré (ou expiré) à chaque cycle est appelé « volume tidal » ou « volume courant ».

Tronc de l'humain, vu de face



En se contractant, le diaphragme devient plus linéaire et descend

Cage Thoracique vue de côté



les muscles intercostaux externes basculent les côtes vers le haut

Les muscles inspiratoires ne sont pas très forts (ils n'ont pas besoin de l'être, l'air étant très fluide). Pour illustrer cette faiblesse, sachez que ces muscles seraient incapables d'élargir la cage thoracique dans l'eau à des profondeurs de 1 m ou plus. Déjà à 1 m de profondeur, la pression hydrostatique de l'eau (le « poids » de l'eau) sur la cage thoracique empêche son expansion et donc empêche l'inspiration.

Si vous vous demandez comment les plongeurs sous-marins en SCUBA réussissent à inspirer sous l'eau, sachez que leur bonbonne contient de l'air sous pression. Une pièce d'équipement appelé le régulateur détecte la pression hydrostatique de l'eau à la profondeur où se trouve le plongeur et laisse entrer de l'air dans les poumons à cette même pression. La pression de l'air dans les poumons est donc équivalente à la pression de l'eau en dehors de la cage thoracique, ce qui permet à la cage thoracique de facilement prendre de l'expansion sous l'action des muscles inspiratoires.

Les tortues n'ont pas de diaphragme ni de muscles intercostaux. La présence d'une carapace (dorsale) et d'un plastron (ventral) rigides empêche le mouvement des côtes. Ce sont les muscles de la ceinture scapulaire (base des pattes antérieures) qui sont responsables du changement de volume aussi bien lors de l'inspiration que de l'expiration. Regardez attentivement une tortue : on peut voir la base de ses pattes antérieures sortir et entrer légèrement dans la carapace à chaque cycle respiratoire.

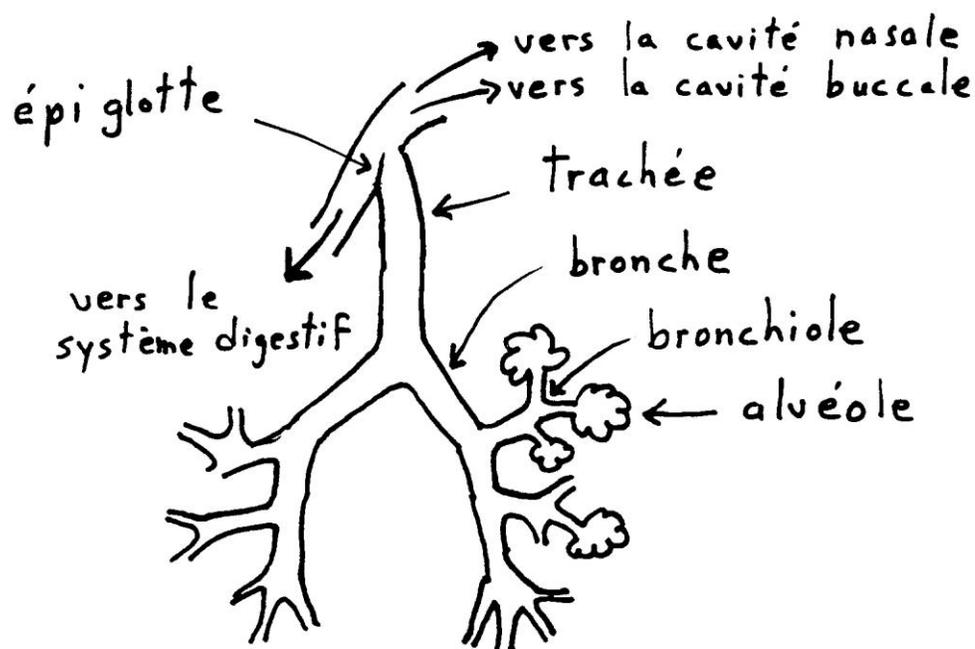
- Q** Une tortue qui fait face à un danger rentre complètement ses pattes et sa tête dans la carapace. C'est tellement serré qu'il n'y a plus de liberté pour faire légèrement entrer et sortir les pattes. Elle ne peut plus respirer! Comment réussit-elle à survivre?

Certaines tortues aquatiques respirent dans l'air mais peuvent aussi respirer dans l'eau (de retour à la notion de respiration en milieu aquatique). Leurs organes respiratoires dans l'eau sont la gorge et ... le cloaque! Elles font entrer et sortir de l'eau dans leur gorge, où se trouvent des structures filamenteuses, richement vascularisées, qui augmentent la surface de contact avec l'eau. Et elles font entrer et sortir de l'eau dans leur cloaque, dont la paroi est richement vascularisée. Cette dernière tactique est employée par nos tortues peintes canadiennes qui passent l'hiver immobiles au fond des lacs et des étangs; respirer par le cloaque suffit à remplir les petits besoins de leur faible métabolisme dans l'eau très froide.

Questions à réflexion :

- Q** 1) Je vous mets au défi de plonger dans le fond de la piscine au CEPS et de respirer par un long tuyau qui unit votre bouche à la surface. Devriez-vous accepter mon défi?
- Q** 2) Les Diplodocus étaient de très gros dinosaures avec un très long cou (les premiers qu'on voit dans le film « *Jurassic Park* »). Des gens ont fait l'hypothèse qu'ils vivaient dans l'eau, laquelle aidait à supporter leur grand poids, et que leur long cou leur permettait de respirer à la surface tout en gardant le reste de leur corps submergé. Quelle objection pourriez-vous apporter à cette hypothèse?

Les poumons sont connectés au monde extérieur par un passage qui s'ouvre dans la cavité nasale, et qui est aussi connecté à la cavité buccale. L'air contenu dans ce passage ne contribue pas aux échanges respiratoires (sa paroi est trop épaisse) et est appelé « espace mort ». Chez les mammifères, l'espace mort est composé des cavités nasales, la gorge, la trachée, les bronches, et les bronchioles.

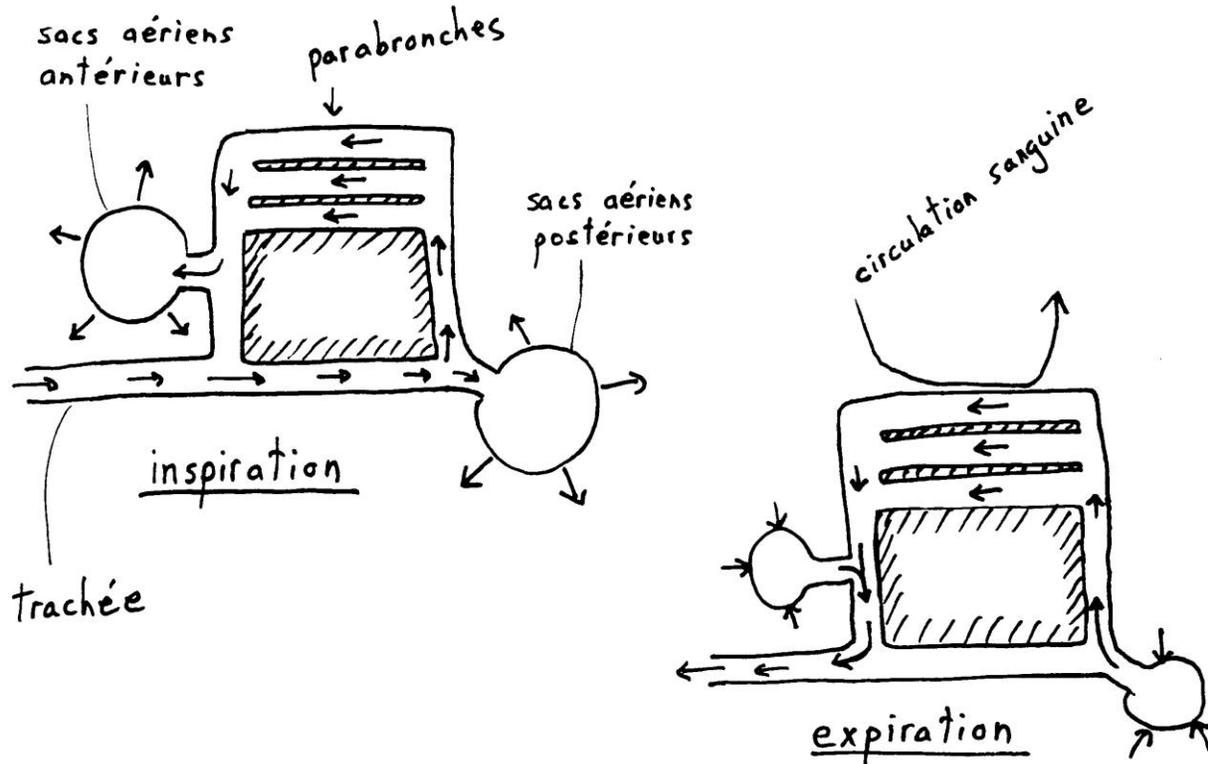


La paroi des poumons est pleine de replis pour maximiser l'aire de la surface d'échange. Chez les mammifères, ces replis prennent la forme de petites « grappes de raisin », chaque raisin étant appelé une « alvéole ». (Il y a 300 millions d'alvéoles chez l'humain.) Chez les oiseaux, les échanges respiratoires se font plutôt au niveau de petits tubes ouverts appelés « parabronches ».

Q Sachant que l'espace mort chez l'être humain moyen représente 150 mL, est-ce que ça revient au même de prendre plusieurs petites respirations (disons, 40 respirations par minute, chacune avec un volume tidal de 150 mL par respiration, pour une ventilation totale de 6000 mL par minute) que de prendre moins de respirations, mais chacune étant plus grande (disons, 12 respirations par minute, chacune avec un volume tidal de 500 mL par respiration, pour une ventilation totale de 6000 mL par minute encore une fois)?

Q Me croyez-vous si je vous dis que le volume courant (= volume tidal) exhibé par une girafe est plus grand que pour d'autres mammifères de poids comparable? Pourquoi en est-il ainsi? Qu'arriverait-il à la PO_2 et la PCO_2 pulmonaires sinon?

Les poumons des oiseaux (et peut-être même des dinosaures aussi, on n'est pas certain):



Cette illustration des deux phases respiratoires de la respiration chez les oiseaux est simplifiée. Il y a en fait 400-1800 parabronches, 4-5 sacs aériens antérieurs, et 4-5 sacs aériens postérieurs. Remarquez la circulation continue et unidirectionnelle de l'air dans les parabronches. Comme dans le cas des branchies de poissons, cela permet l'établissement d'un système d'échange à contre-courant, cette fois-ci entre l'air et le sang, pour une excellente extraction de l'oxygène de l'air par le sang, meilleure que chez les autres tétrapodes. Cela est consistant avec les grands besoins énergétiques des oiseaux pour le vol, et leur haut métabolisme (haute température corporelle de 40-41 °C, plus haute que pour les mammifères). Cela explique aussi pourquoi un oiseau prend habituellement moins de respirations par minute qu'un mammifère de même poids.

L'ajustement de la fréquence respiratoire:

Lorsque la demande en oxygène augmente (par exemple, lors de l'exercice) ou lorsque l'oxygène se fait rare (comme en altitude, ou dans l'eau hypoxique), la fréquence respiratoire augmente. Chez les organismes aquatiques, des détecteurs réagissent au manque d'oxygène dans l'eau. Chez les organismes terrestres, c'est à la fois l'accumulation de CO_2 et la baisse d' O_2 dans le sang qui sont détectées. Les détecteurs sont des amas de cellules spéciales appelées chimiorécepteurs.

Vocalisations :

La circulation d'air dans la trachée des vertébrés terrestres permet l'évolution de structures pouvant générer des sons.

Ces structures sont des membranes qui peuvent vibrer à différentes fréquences lors du passage de l'air, dépendamment si les membranes sont étirées ou non, produisant des sons aigus (membrane étirée, fréquence de vibration élevée) ou graves (membrane relâchée, fréquence de vibration basse).

Ces membranes sont appelées cordes vocales et sont situés dans le larynx (extrémité supérieure ou antérieure de la trachée) des mammifères et des grenouilles, ou dans le syrinx (extrémité inférieure ou postérieure de la trachée, là où elle se divise en deux bronches) des oiseaux. (La plupart des reptiles, et les amphibiens autres que les grenouilles, n'ont pas de cordes vocales.)

La trachée est entourée par des anneaux de cartilage qui lui donnent de la solidité, assurant ainsi qu'elle reste ouverte. Chez l'humain, l'anneau qui entoure le larynx est plus développé, en particulier chez l'homme. Il forme, sur la partie antérieure du cou, la bosse qu'on appelle la pomme d'Adam.

Q

Essayez de parler sans utiliser vos cordes vocales; oui, vous pouvez le faire! (Pensez-y.)
Mettez la main sur votre gorge : sentez-vous une différence quand vous utilisez vos cordes vocales en parlant et quand vous ne les utilisez pas?

Les sons produits par les cordes vocales peuvent être amplifiés par un phénomène de résonance (rebondissement et addition des vagues de pression de l'air) au niveau de la gorge et des cavités nasales. La qualité de notre voix change beaucoup quand on se pince le nez, ce qui illustre la contribution de nos deux cavités nasales (gauche et droite) comme caisses de résonance. Notre voix change aussi quand on a le rhume parce que la forme de nos cavités nasales change à cause de l'accumulation de mucus dans ces cavités, et dans les sinus qui y sont attachés (les sinus paranasaux sont des cavités dans les os du crâne, en communication avec les cavités nasales).

Les cordes vocales des mammifères peuvent être volontairement resserrées les unes contre les autres pour boucher la trachée. Quand on tousse, on commence par boucher notre trachée en resserrant nos cordes vocales, puis on abaisse nos côtes à l'aide de muscles intercostaux internes (qui font le mouvement contraire des externes, ceux responsables de l'inspiration), ce qui met l'air de nos poumons sous pression, puis on ouvre soudainement nos cordes vocales, et l'air sous pression sort rapidement par notre trachée, délogeant les substances (nourriture, poussières, eau, mucus accumulé, etc.) qui irritaient ou bloquaient partiellement notre trachée ou notre gorge.

Le ronflement (des humains ou des vieux chiens) n'est pas causé par une vibration des cordes vocales, mais plutôt par une vibration du palais mou, une structure musculaire au fond de la bouche qui sert à fermer la connexion entre la gorge et les cavités nasales quand on avale, pour ne pas que la nourriture entre dans les cavités nasales. Cette vibration survient quand le passage de l'air se fait mal dans la gorge ou dans le nez. Parmi les facteurs qui ont tendance à faire affaiblir la gorge et ainsi obstruer le passage de l'air, il y a : perte du tonus musculaire lors du sommeil, accumulation de graisse, mâchoire ouverte, et perte de rigidité des parois avec l'âge. L'humain a plus tendance à ronfler parce que les parois de sa gorge sont déjà molles, une adaptation au langage.

Questions à réflexion :

- Q** 1) Le lac Titicaca est situé dans les Andes et il est un des lacs les plus hauts (en altitude) au monde. Dans l'eau de ce lac, on retrouve une espèce de grenouille qui ne se trouve nulle part ailleurs. Cette espèce est particulière. Sa peau est pleine de replis (c'est comme si cette peau appartenait à un animal deux fois plus gros que la grenouille). En termes de physiologie environnementale, pouvez-vous émettre une hypothèse raisonnable qui expliquerait cette adaptation? Faites bien le lien complet, étape par étape, entre le milieu montagnard, d'une part, et les tissus de la grenouille, d'autre part.
- Q** 2) Pouvez-vous expliquer pourquoi la très grande majorité des amphibiens se retrouvent toujours dans des milieux humides?
- Q** 3) On maintient une grenouille sous l'eau pendant 8 heures et on ne parvient quand même pas à la noyer. Après l'avoir sortie de l'eau, on retrouve peu d'acide lactique dans ses tissus. Comment expliquer ces résultats?
- Q** 4) Regardez l'illustration à la page 99. L'épiglotte est un genre de porte de cartilage à l'entrée de la trachée. À quoi sert-elle, d'après vous? Regardez ensuite l'illustration à la page 96 : quel rôle additionnel l'épiglotte joue-t-elle chez les grenouilles?

- Q** 5) Je vous remets au défi de plonger dans le fond de la piscine au CEPS et de respirer par un long tuyau qui unit votre bouche à la surface. À la surface le tuyau est connecté à une réserve d'air sous pression, la même pression exercée par l'eau à la profondeur où vous êtes. Mon défi inclut que vous êtes obligé d'inspirer et d'expirer par le tuyau. Vous ne devriez pas accepter mon nouveau défi. Pourquoi?
- Q** 6) Un documentaire à la télévision montre un gros plan d'une grenouille immobile sur une roche. La seule partie du corps qui bouge est sa gorge, qui gonfle et dégonfle un peu de façon rythmée. Expliquez ce mouvement.
- Q** 7) Les muscles d'un insecte en plein vol ont forcément besoin de plus d'oxygène étant donné qu'ils travaillent plus fort. Et effectivement ils reçoivent plus d'oxygène; comment?
- Q** 8) Les anguilles peuvent sortir d'une rivière et, se déplaçant sur terre, aller rejoindre une autre rivière quelques kilomètres plus loin. Elles ont tendance à faire ces déplacements la nuit. Il y a une raison écologique (elles sont moins visibles aux yeux des prédateurs terrestres la nuit) et aussi une raison physiologique pour se déplacer la nuit. Quelle est cette dernière?

- Q** 9) Pourquoi est-ce que notre ventre ressort vers l'extérieur quand on inspire?
- Q** 10) Les boas constricteurs s'entourent autour du corps de leurs proies et les asphyxient. Les muscles du corps du boa ne sont pas assez gros pour serrer la victime fortement, mais ils sont très bons pour « barrer » (pour ne pas relaxer une fois contractés). Si un boa ne peut pas serrer sa victime fortement, comment peuvent-ils asphyxier leurs proies?
- Q** 11) Il y a beaucoup plus d'espèces de poissons qui pratiquent la respiration aérienne dans les régions tropicales que dans les régions tempérées. Pourquoi?
- Q** 12) Les cygnes ont une très longue trachée. Cela a un impact sur leur voix, mais aussi sur l'efficacité de leur système respiratoire. Quels sont ces impacts?

Chapitre 14

Respiration: transport des gaz dans le sang

Le sang est fait d'eau contenant des substances dissoutes (cette partie liquide s'appelle le plasma) et dans laquelle flottent des cellules spécialisées (globules rouges, globules blancs, plaquettes). Chez les vertébrés, ces cellules sont synthétisées dans la moëlle osseuse rouge et dans la rate.

Le sang sert à transporter beaucoup de choses dans le corps (nutriments, déchets métaboliques, facteurs de coagulation, hormones, chaleur). Les gaz respiratoires (O_2 et CO_2) sont aussi transportés par le sang entre les organes respiratoires et les cellules du corps. Considérons tout d'abord l'oxygène.

Pigments respiratoires:

La quantité d'oxygène qu'on peut dissoudre dans le plasma sanguin n'est pas très grande (du moins, pas quand on considère les grands besoins de l'organisme). Afin de pouvoir transporter plus d'oxygène, le sang contient donc des molécules spéciales qui se combinent avec l'oxygène. Ces molécules sont des protéines associées à un métal (habituellement le fer ou le cuivre). Ces métaux donnent une couleur à la molécule et donc on appelle ces transporteurs d'oxygène des « pigments ».

Exceptions intéressantes: les animaux sans pigments respiratoires.

La plupart des insectes: Comme on l'a déjà vu, les insectes amènent l'air sous forme gazeuse directement à proximité des cellules par leurs trachées et trachéoles, plutôt que de passer par un intermédiaire liquide comme le sang. Je dis seulement « la plupart » parce qu'il y a des larves de moucheron (chironomidés) qui vivent dans le fond des lacs où il y a peu d'oxygène et qui ont un pigment respiratoire (l'hémoglobine) dans leur hémolymphe. Ça leur donne une couleur rouge, d'où leur nom anglais « *blood worms* ».

Poisson antarctique: Les poissons de la famille des Chaenichthyidae (« *icefish* ») vivent dans les eaux froides de l'Antarctique. Leur sang n'a pas de pigment respiratoire. Mais leur sang est froid et donc la solubilité de l'oxygène y est meilleure, et leur faible métabolisme à ces froides températures fait en sorte que leurs besoins en oxygène sont moindres. De plus, leur peau est sans écaille et bien vascularisée, donc la peau contribue aux échanges respiratoires.

Parmi les pigments respiratoires du règne animal, on compte :

- l'hémocyanine (bleue) des chitons, gastropodes, céphalopodes, et araignées;
- l'hémérythrine (rose) de certains invertébrés marins;
- la chlorochruorine (verte) de certains polychètes (vers marins);
- l'hémoglobine (rouge) qu'on retrouve dans la plupart des animaux.

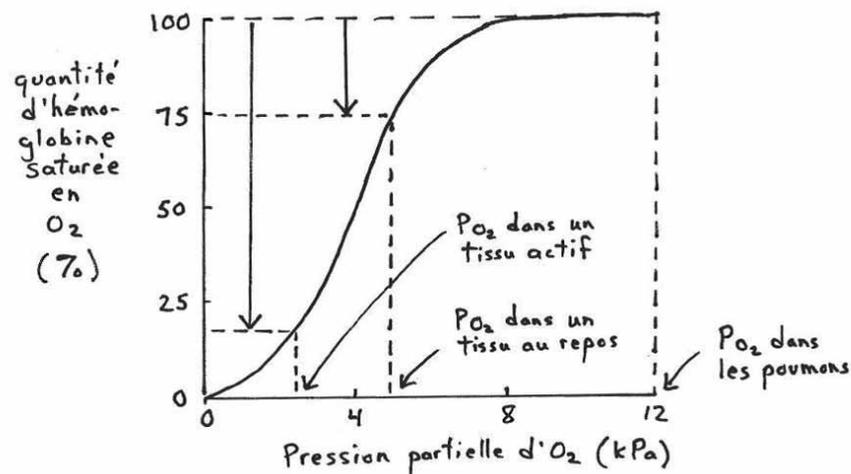
L'hémoglobine est faite de 4 sous-unités contenant chacune un ion fer (qui lie l'oxygène) et une chaîne peptidique. Elle est rouge vive lorsque liée à l'oxygène, et rouge foncée lorsque non-liée à l'oxygène.

Chez les vertébrés, l'hémoglobine est contenue dans des cellules spécialisées flottant dans le sang. Il s'agit des globules rouges. Ces globules contiennent des substances (phosphates, ions divers) qui facilitent l'interaction entre l'hémoglobine et l'oxygène. De plus, le sang qui contient des globules rouges est moins visqueux, et donc plus facile à déplacer, que si l'hémoglobine était simplement en solution libre dans le plasma. (Mais le sang avec globules rouges est quand même plus visqueux que s'il n'y avait ni globule rouge ni hémoglobine libre. Et plus il y a de globules rouges, plus le sang est visqueux et difficile à déplacer, ce qui rend la vie dure au cœur.)

Les 4 sous-unités qui forment l'hémoglobine sont parfois retrouvées de façon individuelle dans les cellules musculaires. On parle alors de myoglobine. La myoglobine sert à emmagasiner l'oxygène dans les muscles (utile lors de l'exercice, quand la demande en O_2 est accrue). Les sous-unités individuelles peuvent aussi se retrouver dans les neurones, où elles jouent le même rôle, mais où elles prennent alors le nom de neuroglobine plutôt que myoglobine. (C'est un bon temps pour vous dire que hém = sang, myo = muscle, et neuro = nerveux.)

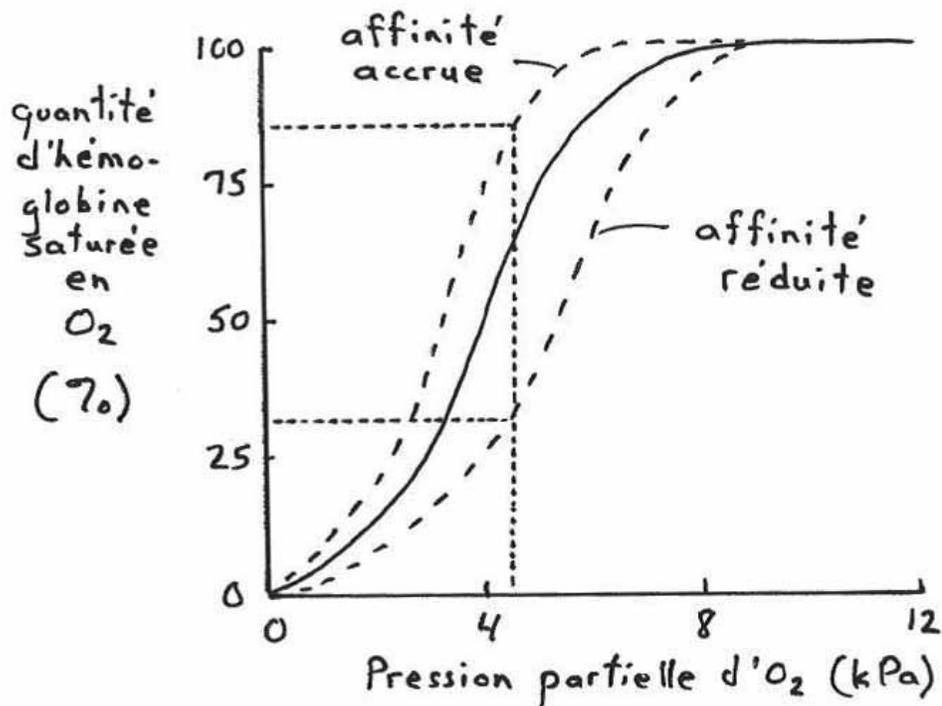
La courbe de dissociation oxygène-hémoglobine:

L'hémoglobine a tendance à se lier à l'oxygène lorsque l'oxygène est abondant, et à libérer l'oxygène dans les milieux où O_2 est plus rare. Donc, l'hémoglobine se lie à l'oxygène dans les capillaires des poumons, et libère l'oxygène dans les capillaires des tissus corporels.



Remarquez comment le sang qui sortira des poumons sera saturé en oxygène. Cependant ce sang, une fois rendu dans les tissus au repos du corps, sera dans un milieu où seulement 75% de l'hémoglobine pourra demeurer lié à l'oxygène. L'autre 25% devra relâcher son oxygène. Dans un tissu qui travaille fort, où la quantité d'oxygène présente est encore plus faible (parce qu'elle se fait très consommer par les mitochondries de ce tissu en plein travail), c'est encore une plus grande portion de l'hémoglobine qui devra y relâcher son oxygène.

L'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène peut varier en fonction de différents facteurs. Un facteur qui réduit l'affinité de l'hémoglobine pour O_2 déplace la courbe de dissociation vers la droite. Il y a encore presque 100% de l'hémoglobine qui se lie à l' O_2 dans les poumons, mais c'est une plus grande partie de cette hémoglobine qui relâche son O_2 au niveau des tissus. Une affinité réduite est avantageuse pour les animaux dont les tissus ont un grand besoin en oxygène parce que l'hémoglobine donne son oxygène aux tissus plus facilement.



Les facteurs corrélés avec l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène sont:

La température: \uparrow température \downarrow affinité (courbe déplacée vers la droite) $\uparrow O_2$ libéré

C'est bien adapté : les tissus qui ont besoin de plus d' O_2 sont ceux qui travaillent fort, et ce gros travail justement produit de la chaleur. Cette chaleur contribuera à faire libérer plus d' O_2 dans ces tissus qui travaillent fort.

Intéressant : les animaux de l'Arctique ne montrent pas cet effet de la température. Si l'effet était présent, il n'y aurait que très peu d' O_2 libéré au niveau de leurs tissus périphériques froids.

Le pH (effet Bohr et effet Root): ↓ pH (↑ CO₂) ↓ affinité ↑ O₂ libéré (Effet Bohr)

Les tissus qui travaillent fort libèrent beaucoup de CO₂. Ce CO₂ réagit avec l'eau pour former H₂CO₃, un acide qui diminue le pH. En libérant plus d'O₂ dans les tissus acides, l'hémoglobine donne plus d'O₂ justement aux tissus qui travaillent fort et qui en ont particulièrement besoin.

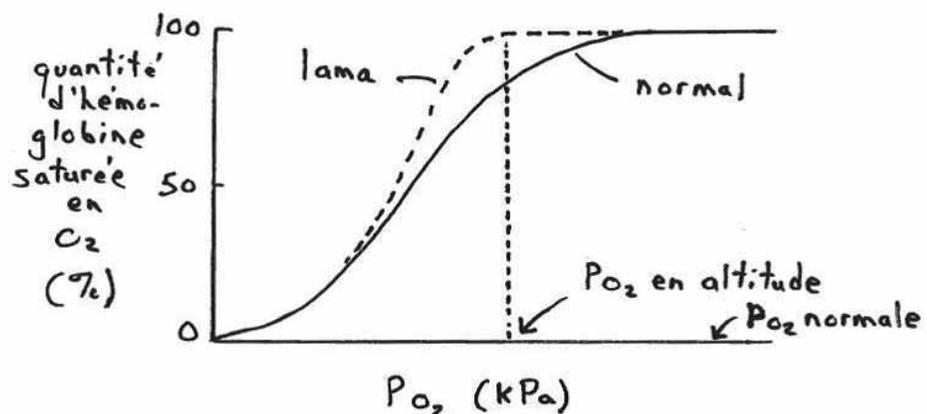
Chez certains poissons, l'affinité est tellement réduite par un bas pH qu'il devient impossible d'avoir 100% de saturation, même à des P_{O₂} très élevées. C'est l'Effet Root. Sans rentrer dans les détails, on pense qu'il s'agit d'une adaptation pour mieux remplir la vessie natatoire.

La grosseur corporelle: ↓ gros ↓ affinité ↑ O₂ libéré

Les petits animaux ont un taux métabolique spécifique plus élevé, donc chaque gramme de leur corps a besoin de plus d'oxygène, donc c'est avantageux que leur hémoglobine libère l'oxygène plus facilement.

Le fait de vivre en altitude ou à d'autres endroits pauvres en O₂: ↑ affinité

Aux plus faibles valeurs de P_{O₂} de l'air que l'on retrouve en montagne, l'hémoglobine « ordinaire » ne parvient pas à se saturer dans les poumons, mais celle des lamas ou des vautours de Rüpell, par exemple, le peut. Le sang du lama peut donc prendre plus d'oxygène dans les poumons. C'est génétique, une adaptation au niveau de toute l'espèce. (Ce n'est pas une acclimatation.)



Chez les mammifères, le fait d'être un fœtus:

L'hémoglobine fœtale a une plus grande affinité pour l'O₂ que l'hémoglobine de la mère, ce qui fait que le sang (hémoglobine) de la mère peut passer son oxygène au sang (hémoglobine) du fœtus au niveau du placenta.

Le transport du CO₂:

Contrairement à l'oxygène, le CO₂ n'est pas vraiment transporté par un pigment. Il est vrai qu'une certaine partie (20-30%) se lie à l'hémoglobine (mais pas à la même place que l'O₂). Le reste est tout simplement dissous. Par contre, une fois dissous, il réagit avec l'eau:



C'est donc surtout sous forme d'ion bicarbonate que le CO₂ est transporté dans le sang. Cette réaction prend place un peu dans le plasma sanguin, mais encore bien plus dans les globules rouges car il s'y trouve une enzyme, l'anhydrase carbonique, qui catalyse la réaction.

Notez qu'il s'agit d'un équilibre chimique. Donc, au niveau des tissus où le CO₂ est produit et est donc relativement abondant, la réaction procède vers la droite et il y a formation de H⁺ et d'ions bicarbonate. Au niveau des poumons, où le CO₂ sanguin est relativement rare car il diffuse dans l'air des poumons, la réaction procède dans le sens inverse et l'ion bicarbonate est reconverti en CO₂, lequel continue à diffuser dans l'air des poumons et est expiré.

La réaction ci-haut produit des ions H⁺, et donc elle peut affecter le pH du sang, et de là le pH du corps. S'il y a production d'un excès de CO₂ sans augmentation suffisante de la fréquence respiratoire pour s'en débarrasser, alors on a production d'un excès de H⁺, ce qui abaisse trop le pH. On parle alors d'acidose respiratoire. C'est néfaste car les enzymes du corps sont souvent dénaturées par la trop grande acidité.

Si on a une hyperventilation des poumons sans exercice, alors il en résultera moins de CO₂ que d'habitude dans le sang (plus de CO₂ que d'habitude diffuse dans l'air des poumons), la quantité de H⁺ diminuera trop, le pH s'élèvera trop, et on aura une alcalose respiratoire. C'est tout aussi néfaste pour les enzymes que l'acidose.

Q

Les gens qui ont des crises d'anxiété respirent vite et risquent souvent de s'évanouir. Pourquoi leur conseille-t-on de d'expirer et inspirer dans un sac pendant quelques instants?

Les enzymes et les réactions biochimiques qu'elles catalysent sont très affectées par le pH. Il est donc important de maintenir le pH du corps aussi constant que possible, de contrer l'excès ou le manque de CO_2 . Plusieurs protéines dans le plasma sanguin, dans le liquide interstitiel, et dans les cellules elles-mêmes peuvent servir de substances tampons et absorber les ions H^+ excédentaires (ou libérer des ions H^+ manquants).

S'il n'y a pas assez de protéines dans une cellule pour agir comme tampon, alors des pompes ioniques vont faire entrer ou sortir l'ion bicarbonate afin de changer la quantité de H^+ dans la cellule.

Q Une cellule qui doit élever son pH doit-elle importer ou exporter des ions HCO_3^- ?

Questions à réflexion:

Q 1) Pourquoi les insectes qui s'écrasent sur le pare-brise de votre auto ne laissent-ils pas de grandes marques de sang rouge? S'il y en a un qui laisse une marque de sang rouge, que pouvez-vous deviner sur son écologie?

Q 2) Vous établissez la courbe de dissociation O_2 -hémoglobine de deux espèces de poissons, une très active, l'autre plutôt sédentaire. Que pourriez-vous prédire quant à la position relative des deux courbes?

Q 3) Vrai ou faux?

- a) Le plasma sanguin est rouge.
- b) L'hémocyanine est probablement une substance bleue (cyan) retrouvée dans le sang (hém).
- c) Les « *blood worms* » rouges ne sont pas des insectes parce que les insectes n'ont pas besoin de pigments respiratoires étant donné qu'ils ont des trachées et des trachéoles, et en plus le mot « *worm* » veut dire « ver ».

Q 4) La myoglobine des muscles entrepose l'oxygène, mais cet oxygène lui a été apporté dans un premier temps par l'hémoglobine du sang. Dessinez les courbes de dissociation de l'oxygène pour la myoglobine et pour l'hémoglobine sur un même graphique.

Q 5) Sur un même graphique, dessinez les courbes de dissociation de l'oxygène pour l'hémoglobine d'un chameau, puis d'un lama capturé en montagne, et ensuite d'un lama né dans un zoo au niveau de la mer.

Q 6) De mémoire, nommez trois facteurs qui déplacent la courbe de dissociation de l'oxygène vers la gauche.

- Q** 7) Avez-vous un seul gène pour votre hémoglobine?
- Q** 8) Répondez sous forme de questions comme à « *Jeopardy* » :
- a) C'est l'atome qui donne au sang sa couleur rouge.
 - b) C'est un entrepôt d'oxygène dans les cellules nerveuses.
 - c) C'est l'enzyme qui catalyse la réaction entre le CO₂ et l'eau.
 - d) C'est le paramètre important dans l'Effet Bohr.
 - e) C'est la couleur du sang des araignées.
 - f) C'est l'endroit du corps où l'hémoglobine est synthétisée.
 - g) C'est l'endroit où on retrouve des poissons sans hémoglobine.
 - h) C'est le nom donné à une molécule colorée.
 - i) C'est le nom technique donné à la fraction liquide du sang.
- Q** 9) Les rats-taupes (« *naked mole rats* ») sont des mammifères bizarres qui vivent en colonies dans des terriers en Afrique de l'Est. Ils vivent en permanence dans ces terriers (ils se nourrissent de racines) et les terriers ne sont pas très bien ventilés, de telle sorte que l'air y est relativement pauvre en oxygène et riche en CO₂ (à cause de la respiration continue des rats-taupes). Devinez quelles sont les adaptations des rats-taupes à ces conditions environnementales, en termes de :
- a) Leur courbe de dissociation oxygène-hémoglobine;
 - b) Le pH auquel leurs enzymes fonctionnent le mieux;
 - c) Leur taux métabolique.
- Q** 10) L'anémie est causée par un manque de fer. Pourquoi est-ce que les animaux (ou personnes) anémiques se sentent faibles, sans énergie?
- Q** 11) Le dopage sanguin traditionnel consiste à prélever de soi-même du sang, isoler les globules rouges, les conserver vivants au frigo, attendre que la moëlle osseuse rouge remplace ces globules rouges, puis se réinjecter les globules rouges juste avant une compétition pour augmenter artificiellement le nombre de transporteurs d'oxygène et ainsi amener plus d'oxygène aux muscles. C'est illégal, et en plus c'est dangereux pour la santé. Pourquoi est-ce dangereux pour la santé?

Chapitre 15

Circulation: principes de base

Pression:

La pression est une force exercée par un fluide (air, eau, sang, etc.) sur une surface, comme les parois du contenant ou du vaisseau dans lequel le fluide se trouve.

Les pressions sont souvent exprimées en kPa (kilopascals), ou en mm Hg (millimètres de mercure).

Dans un système circulatoire, une pression se crée lorsque :

- a) le volume même du fluide pousse sur les parois (ex. : 3 L d'air dans une balloune exerce une plus grande force sur les parois de la balloune que 1 L d'air, ce qui se remarque par le plus grand étirement de la paroi de la balloune de 3 L); plus le volume du fluide est grand, plus la pression exercée par le fluide est grande;
- b) quelque chose pousse sur le fluide lui-même (ex. : action du cœur; le cœur pousse sur le sang, ce qui fait que le sang pousse sur les parois des vaisseaux sanguins); plus la force exercée sur le fluide est grande, plus la pression est grande;
- c) quelque chose nuit à l'écoulement du fluide (si le fluide dans un vaisseau ne peut pas facilement s'écouler vers l'avant, il cherchera plutôt à sortir vers les côtés, exerçant ainsi une force sur les parois); plus la résistance à l'écoulement est grande, plus la pression devient grande.

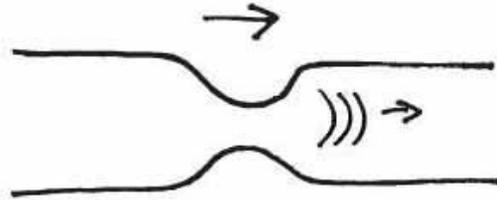
Un fluide tend à circuler à partir d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. Plus la différence de pression est grande, plus la vitesse d'écoulement entre les deux zones est grande.

Pompes:

Une pompe est un mécanisme qui crée une zone de haute pression ou de basse pression en un endroit bien défini, ce qui entraîne un écoulement entre cet endroit et les endroits qui sont en communication avec lui.

Chez les animaux, les pompes du système circulatoire créent des zones de haute pression (par contraste avec la pompe respiratoire des mammifères/oiseaux, qui crée une zone de basse pression – l'air est aspiré dans les poumons, mais le sang est poussé dans les vaisseaux sanguins).

Pompe péristaltique: Une vague de contraction, sans cesse renouvelée, se déplace le long d'un tube. Une zone de haute pression est créée devant la vague, ce qui pousse le liquide du tube dans la même direction que la vague.



Ce type de pompe est fréquent dans les tuyaux des systèmes digestif, urinaire, et reproducteur de tous les animaux.

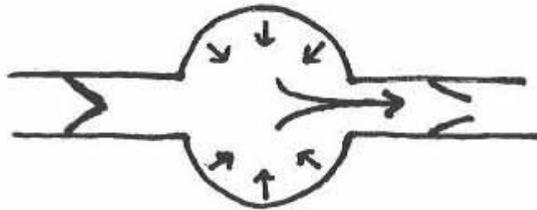
Dans le système circulatoire, les pompes péristaltiques sont le propre des invertébrés.

Avantage : Force plutôt constante.

Désavantage : Force plutôt basse (circulation lente).

Des pompes péristaltiques artificielles sont parfois utilisées par les physiologistes. Les pompes sont connectées en permanence à des animaux pour leur injecter constamment, ou à des temps pré-programmés, des doses faibles de médicaments, drogues, substances biologiquement actives, etc.

Pompe à compartiment: Un compartiment se contracte, ce qui pousse sur le fluide. On appelle un tel compartiment un cœur. Les cœurs sont habituellement associés à des valves pour garantir la circulation dans un seul sens.



Ce type de pompe se retrouve dans le système circulatoire des vertébrés.

Avantage : Force élevée (circulation rapide).

Désavantage : Force instable, monte (lors de la contraction) et descend (lors de la relaxation).

La résistance à l'écoulement dans un tube:

Les endroits de haute et basse pression sont souvent en communication par l'intermédiaire de tubes (vaisseaux sanguins). La résistance à l'écoulement est une mesure de la difficulté qu'aura un liquide à circuler dans un tube. Cette résistance à l'écoulement est définie par:

$$\text{Résistance} = \frac{8 \, l \, n}{\pi R^4}$$

où : l = longueur du tube

n = viscosité du fluide

R = rayon du tube

Donc, plus un tube est long et étroit, moins un fluide a tendance à y circuler. Un organisme peut difficilement contrôler la longueur de ses vaisseaux sanguins, mais il peut facilement en contrôler le diamètre. La vasoconstriction et la vasodilatation sont donc des moyens de redistribuer le sang dans le corps en changeant la résistance à l'écoulement à certains endroits par rapport à d'autres (et ce d'autant plus facilement que la résistance est affectée par le rayon à l'exposant 4, un gros chiffre).

La résistance à l'écoulement a une grosse influence sur la pression. Si la résistance à l'écoulement vers l'avant est grande (peut-être parce que le chemin qui reste à parcourir est long, ou étroit), le fluide aura plus tendance à vouloir s'échapper vers les côtés du vaisseau, et donc il exercera une pression plus grande.

Débit:

Le débit est la quantité d'un fluide qui passe en un point donné par unité de temps. Exprimé, par exemple, en mL / min.

Relation importante :

$$\text{Pression} = \text{débit} \times \text{résistance} \times \text{constante}$$

$$1 = 1 \times 1$$

$$1 = 0.5 \times 2$$

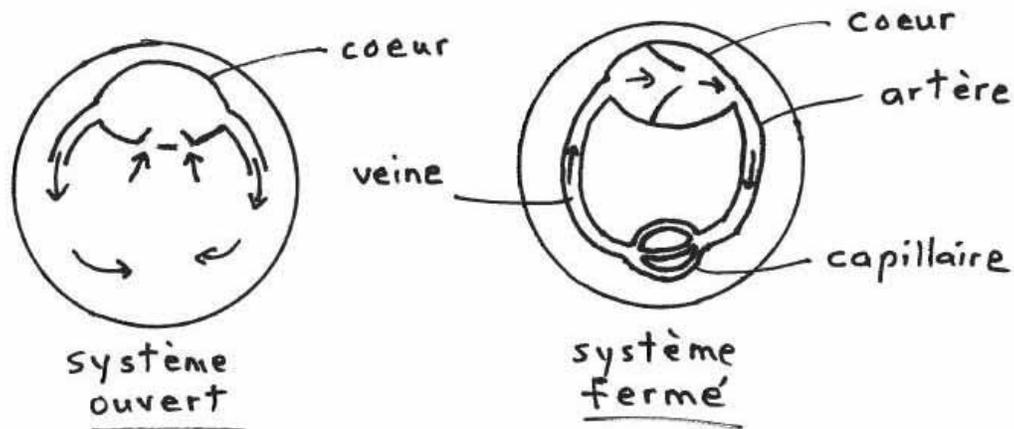
$$2 = 4 \times 0.5$$

Q

La pression mesurée dans un vaisseau devient soudainement 3 fois plus grande qu'avant, alors que le débit diminue de moitié; qu'est-il donc arrivé à la résistance à l'écoulement?

Chapitre 16

Circulation: Anatomie et fonctions des circuits



Les systèmes ouverts se retrouvent chez les insectes, araignées, crustacés, mollusques (sauf les pieuvres et les calmars) et vers de terre.

Les systèmes fermés se retrouvent chez les céphalopodes (pieuvres et calmars) et les vertébrés.

- Q** Examinez le tableau suivant et déduisez-en les principales différences fonctionnelles qui existent entre système fermé et système ouvert:

Tableau 1: Paramètres circulatoires chez un homard (système ouvert) et un poisson (système fermé) pesant tous deux 500 g.

	homard	poisson
Volume sanguin (mL)	85	15
Débit cardiaque (mL / min)	40	12
Temps de recyclage complet (s)	128	75
Pression artérielle (mm Hg)	11	37
Travail cardiaque (J/100 mL de sang déplacé)	0.146	0.50
Oxygène extrait (mL O ₂ / 100 mL sang)	0.5	5

Pour déterminer le volume sanguin d'un animal:

On injecte dans la circulation de l'animal un colorant, de concentration connue, qui se lie aux grosses protéines plasmatiques qu'on retrouve seulement dans le sang. On attend quelques minutes et on prend un échantillon de sang. On mesure la nouvelle concentration du colorant (qui sera forcément plus basse puisque le colorant s'est dilué dans toute la circulation sanguine). Comme dans toute situation de dilution, on applique la bonne vieille formule...

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

...pour trouver le nouveau volume, c'est-à-dire le volume sanguin.

Si l'animal est un vertébré, il faut se rendre compte que ce procédé ne nous donne que le volume plasmatique (le volume de la partie liquide du sang, là où se trouvent les protéines qui se lient au colorant). Or, le sang des vertébrés contient aussi beaucoup de globules rouges (il y a aussi des globules blancs et des plaquettes, mais le volume total de ces cellules dans le sang est négligeable). Donc, pour obtenir le volume sanguin incluant les globules rouges, il faut appliquer un facteur de correction qui tient compte de l'hématocrite (hématocrite = le pourcentage du volume sanguin occupé par les globules rouges – si 45% du volume d'un échantillon de sang est occupé par des globules rouges, alors l'hématocrite est 45). La formule est :

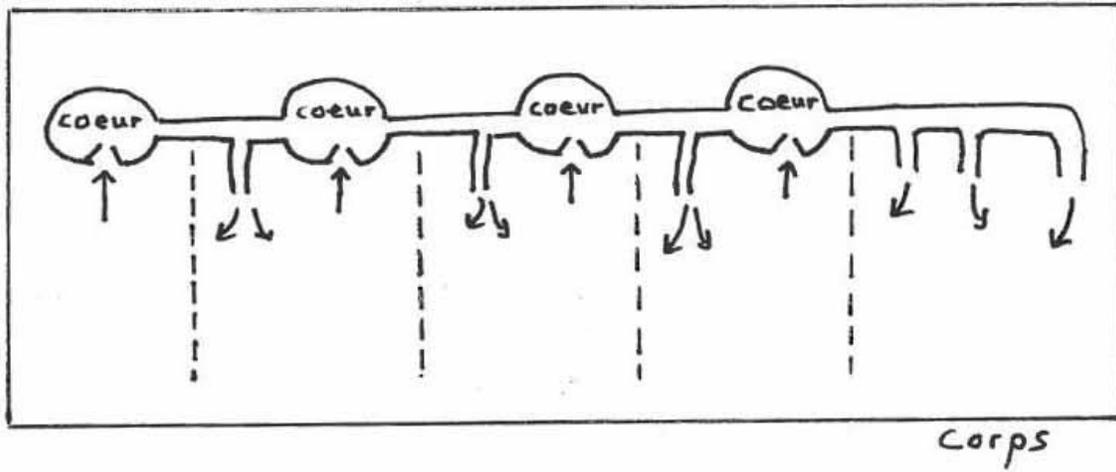
$$\text{Volume sanguin total} = \text{volume plasmatique} \times \frac{100}{100 - \text{hématocrite}}$$

- Q** Vous injectez dans une veine d'un mammifère 2 mL d'une solution 100 M d'un colorant qui se lie spécifiquement aux grosses protéines du sang. Vous attendez une trentaine de minutes et vous prenez un échantillon de 5 mL de sang. Vous analysez cet échantillon et vous mesurez que sur les 5 mL de sang, il y en a 2.3 mL qui sont en fait occupés par des globules rouges. Vous isolez le 2.7 mL de liquide restant et vous y mesurez une concentration de colorant de 0.002 M.
- Quel est le volume plasmatique total de l'animal?
 - Quel est le volume sanguin total de l'animal?

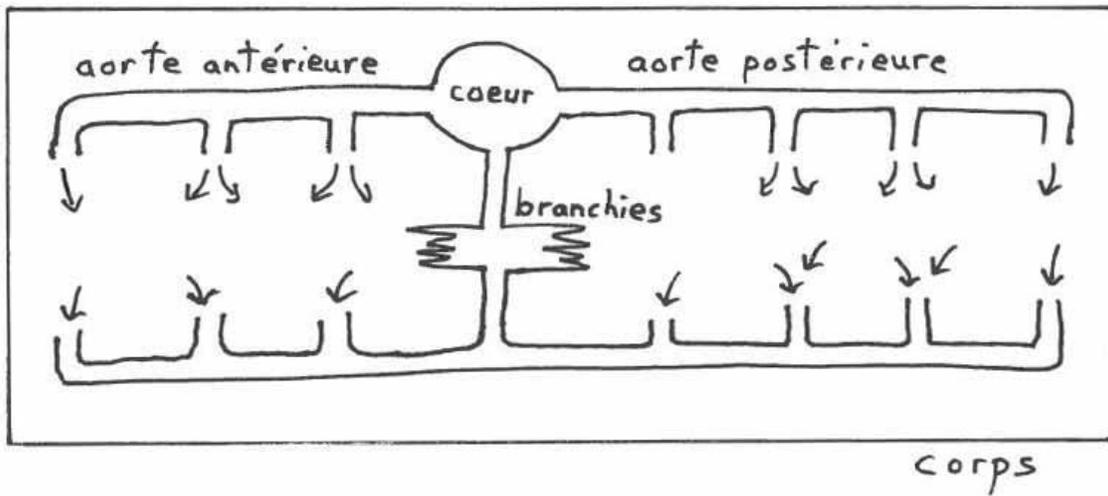
Pour mesurer le débit cardiaque ou la pression artérielle:

Une technique importante en physiologie circulatoire est la canulation, c'est-à-dire l'insertion d'une canule dans un vaisseau sanguin. Une canule (= cathéter) peut justement être définie comme un petit tuyau qu'on insère dans un vaisseau sanguin (ou autre tube du corps) et qui ressort à l'extérieur du corps. Si on canule la principale artère qui sort du cœur, on peut mesurer le débit cardiaque en mesurant le volume de sang qui sort de la canule par unité de temps (pendant les premières secondes). Si on connecte cette même canule à un manomètre, on peut mesurer la pression artérielle.

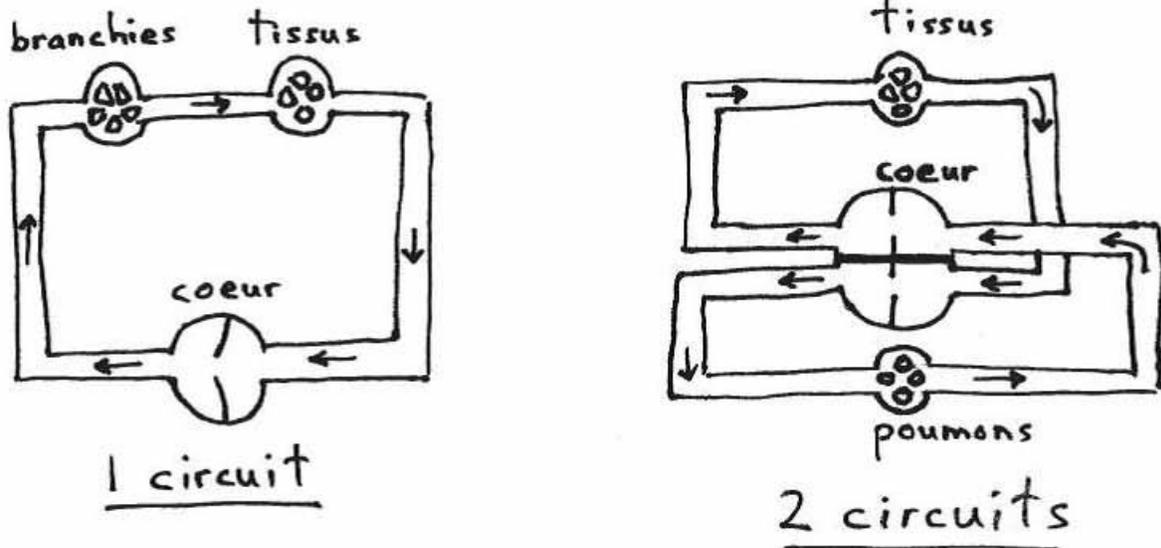
Le système circulatoire d'un insecte:



Le système circulatoire d'un homard:



Deux types de systèmes fermés: à 1 circuit et à 2 circuits:



Avantages du système à 2 circuits:

Dans un système à deux circuits, le circuit pulmonaire (celui connecté aux poumons) peut être court, étant séparé du circuit systémique (celui connecté aux autres organes et tissus du corps). Les poumons sont souvent à proximité du cœur, ce qui permet au circuit pulmonaire d'être court.

Étant relativement court, le circuit pulmonaire...

... offre moins de résistance à l'écoulement,

ce qui résulte en une pression sanguine moins grande dans ce circuit,

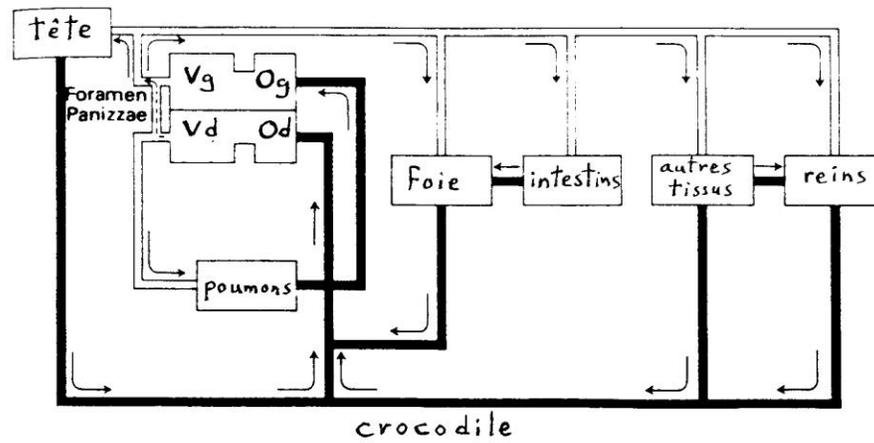
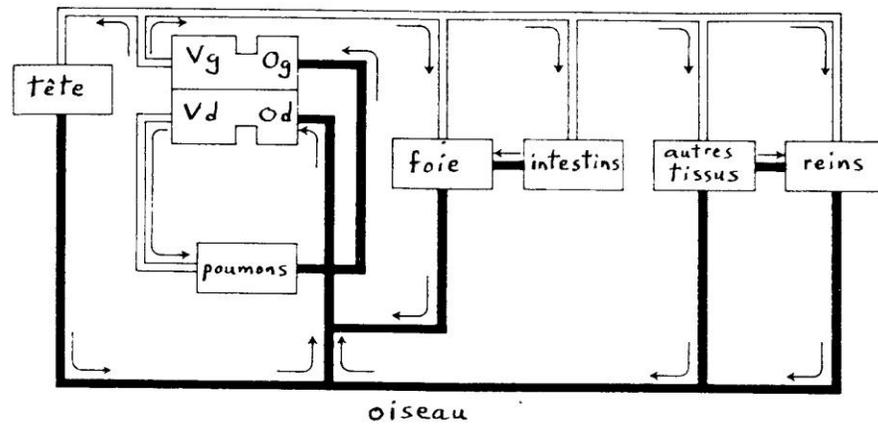
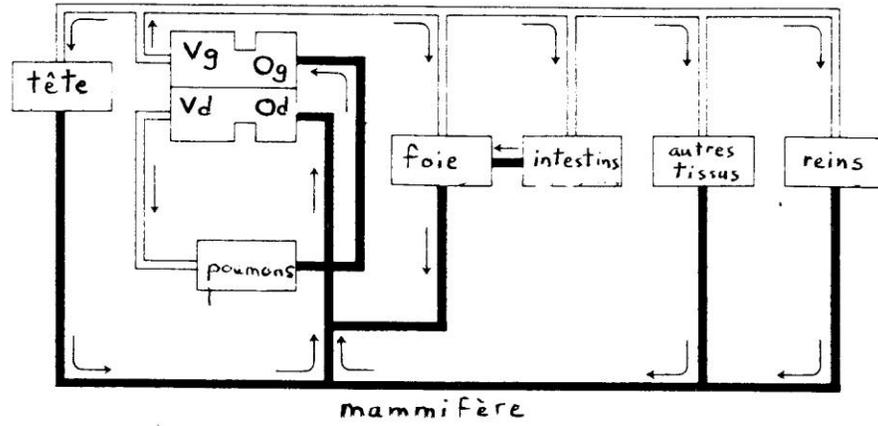
ce qui fait que le plasma sanguin a moins tendance à sortir des capillaires pulmonaires,

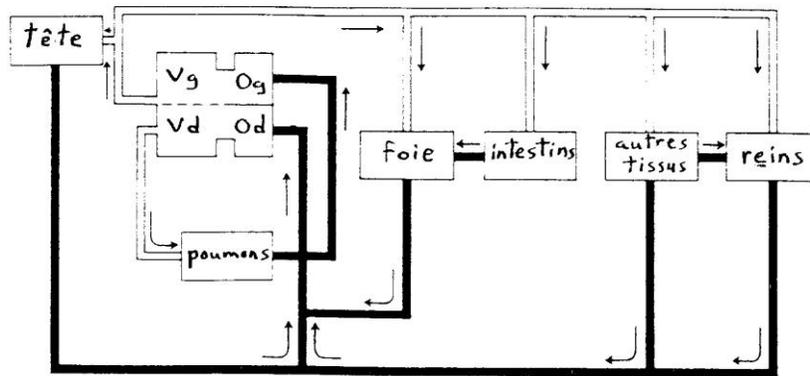
ce qui diminue le risque de noyer le poumon (= œdème pulmonaire – un oedème est une accumulation anormale de liquide à quelque part dans le corps).

Le système à 1 circuit est typique des poissons. Dans un système à 1 circuit, la pression est plutôt forte au niveau des branchies (le chemin qui reste à parcourir après les branchies est plutôt long, donc la résistance à l'écoulement est forte), mais il n'y a pas de risque de noyer les branchies, puisque les branchies sont déjà faites pour être dans l'eau!

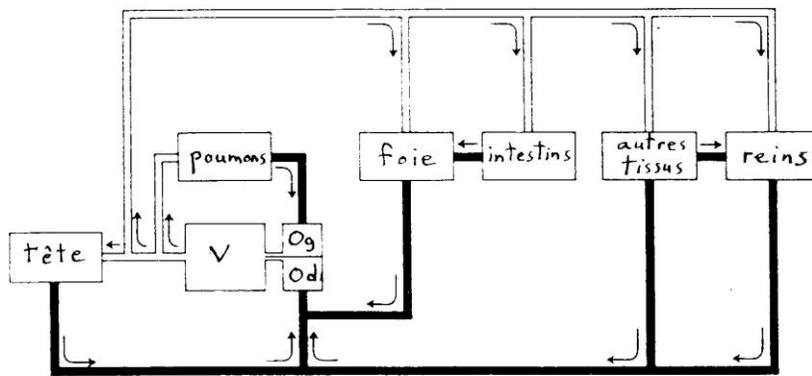
Anatomie des systèmes circulatoires des vertébrés:

O = oreillette
 V = ventricule
 g = gauche
 d = droit

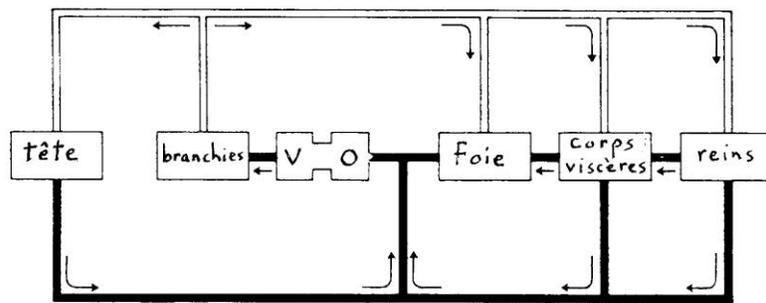




reptile non-crocodilien



amphibien urodèle



poisson

Aorte : La première artère du circuit systémique; elle sort du ventricule gauche du cœur.

Carotides : Artères qui amènent le sang au cerveau.

Jugulaires : Veines qui ramènent le sang du cerveau.

Veines caves : Les dernières veines du circuit systémique; il y a une veine cave supérieure qui ramène au cœur le sang des parties supérieures (humain) ou antérieures (animaux) du corps, et une veine cave inférieure qui ramène le sang des parties inférieures ou postérieures du corps. Elles se déversent toutes les deux dans l'oreillette droite du cœur.

Tronc pulmonaire : La première artère du circuit pulmonaire; elle sort du ventricule droit du cœur; elle se divise rapidement en une artère pulmonaire gauche qui alimente le poumon gauche, et une artère pulmonaire droite qui alimente le poumon droit.

Veines pulmonaires : Il y a une veine pulmonaire gauche qui ramène au cœur le sang du poumon gauche, et une veine pulmonaire droite qui ramène le sang du poumon droit. Elles se déversent toutes les deux dans l'oreillette gauche du cœur.

Foramen de Panizzae : Chez les reptiles crocodiliens, il y a une connexion, un court-circuit entre le début du circuit systémique et le début du circuit pulmonaire (voir diagramme sur la 2^e page précédente – page 120). Ce court-circuit s'appelle le foramen de Panizzae (foramen est un terme anatomique souvent utilisé pour désigner une ouverture). Le court-circuit est fait d'une telle façon que le sang ne peut pas passer du circuit systémique au circuit pulmonaire, mais il peut passer du circuit pulmonaire au circuit systémique. Quand le crocodile est en plongée (ce qu'il peut faire pendant plusieurs minutes), l'oxygène contenu dans ses poumons s'épuise rapidement, et il devient alors inutile d'envoyer du sang aux poumons. Le sang destiné aux poumons passe alors par le foramen de Panizzae pour rejoindre la circulation systémique plutôt que d'aller aux poumons.

Les systèmes portes :

Un système porte est un circuit sanguin où le sang passe au travers de deux lits de capillaires successifs, séparés par un vaisseau appelée une veine porte, avant de retourner au cœur. Les systèmes portes sont exceptionnels car normalement le sang en provenance du cœur passe par un seul lit de capillaire dans un organe avant de retourner au cœur.

Regardez à nouveau le système circulatoire d'un mammifère. Il y a un système porte, appelé « système porte hépatique », qui implique les intestins et le foie (« hépatique » est un adjectif qui désigne le foie). Le sang en provenance du cœur passe dans un premier lit de capillaires au niveau des intestins, où il prend les nutriments fraîchement absorbés par la paroi intestinale. Puis le sang passe dans une veine porte (la « veine porte hépatique ») qui l'amène au foie, où le sang passe à nouveau dans un lit de capillaires pour faire des échanges avec les cellules du foie, avant de finalement retourner au cœur. L'avantage de ce système est que si des toxines sont absorbées par les intestins, ces toxines ne sont pas distribuées directement au reste du corps. Les cellules du foie ont la chance de détoxifier ces poisons avant qu'ils ne soient acheminés au cœur et de là au reste du corps. (Détoxifier des substances est un des grands rôles du foie.)

Les grandes catégories de vaisseaux sanguins:

Artères et artérioles:

- Vaisseaux sanguins qui amènent le sang du cœur aux organes et tissus.
- Parois élastiques (= s'étirent mais ont tendance à revenir à leur grandeur d'origine) qui absorbent les hausses de pression quand le cœur se contracte (elles se gonflent), et relâchent cette pression quand le cœur se décontracte (elles reviennent à leur diamètre normal).

Le pouls est toujours pris à partir d'une artère. Ça consiste à détecter les gonflements et dégonflements d'une artère, chacun correspondant à un battement du cœur.

- Elles ont un diamètre relativement large et offrent donc peu de résistance à l'écoulement.
- La vasoconstriction et vasodilatation se font surtout au niveau des artérioles. Il y a des « muscles lisses » dans la paroi, responsables de ces actions.
- Paroi imperméable : il n'y a aucun échange entre sang artériel et tissus du corps.

Capillaires:

- Vaisseaux sanguins minuscules où se font les échanges entre le sang et les tissus.
- Très nombreux et pratiquement partout dans le corps.

Une cellule n'est jamais séparée d'un capillaire par plus de 4 autres cellules.

- Paroi faite d'une seule couche de cellules endothéliales avec pores (trous de beigne dans la cellule) et jonctions lâches (fentes ouvertes entre les cellules) pour laisser sortir le liquide (plasma sanguin) ou le laisser entrer.
- Les pores et jonctions lâches sont trop petites pour laisser sortir les globules rouges et certaines des grosses protéines du sang (appelées protéines plasmatiques; elles servent de substances tampons dans le sang).

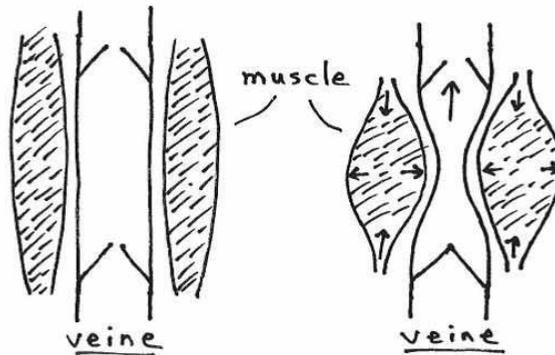
Veinules et veines:

- Vaisseaux qui ramènent le sang des organes et tissus jusqu'au cœur.
- Diamètre large, parois très extensibles (= s'étirent facilement et n'ont pas une très grosse tendance à revenir à leur grosseur d'origine).

Les veines sont plus gonflées qu'elles ont besoin de l'être. Une partie du sang qu'elles contiennent peut être vue comme une réserve de sang.

Les prises de sang sont toujours faites à partir d'une veine. Il vaut mieux puiser le sang dans la réserve, plutôt que « voler » le sang artériel destiné à un organe. De plus les veines sont souvent près de la surface, donc plus faciles à trouver. Et finalement, quand on les bloque en faisant pression en aval, elles gonflent facilement (paroi extensible), ce qui rend plus facile l'insertion d'une aiguille.

- La présence de valves et l'action des muscles squelettiques autour des veines favorisent le retour du sang vers le coeur (une nécessité pour les veines qui remontent vers le haut, comme celles des jambes). Quand les muscles squelettiques autour d'une veine se contractent (lors des mouvements de la jambe, par exemple), ils augmentent forcément leur diamètre, ce qui fait pression sur les veines et chasse leur sang vers le haut (car des valves présentes dans les veines ne permettent que le passage vers le coeur).

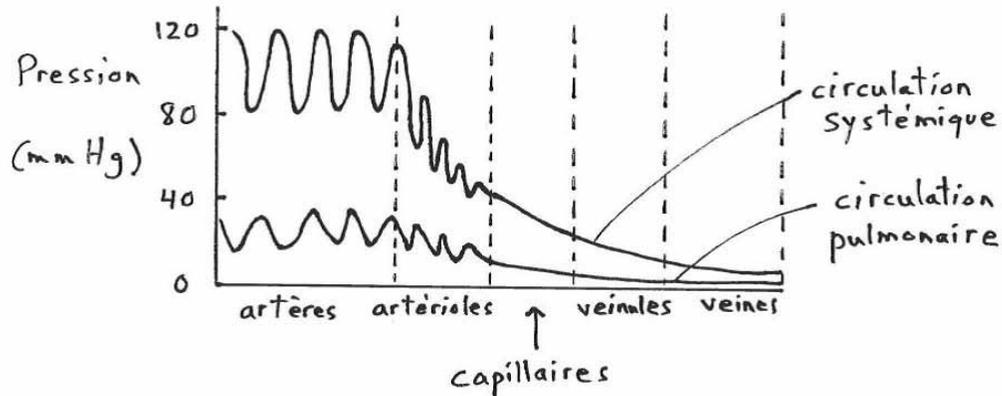


Q Le prof est très grand. Pouvez-vous expliquer pourquoi il a souvent tendance à se branler les jambes?

Q Pourquoi est-ce que certains soldats au terrain de parade, debout longtemps pendant que les chars d'assaut défilent, s'évanouissent parfois?

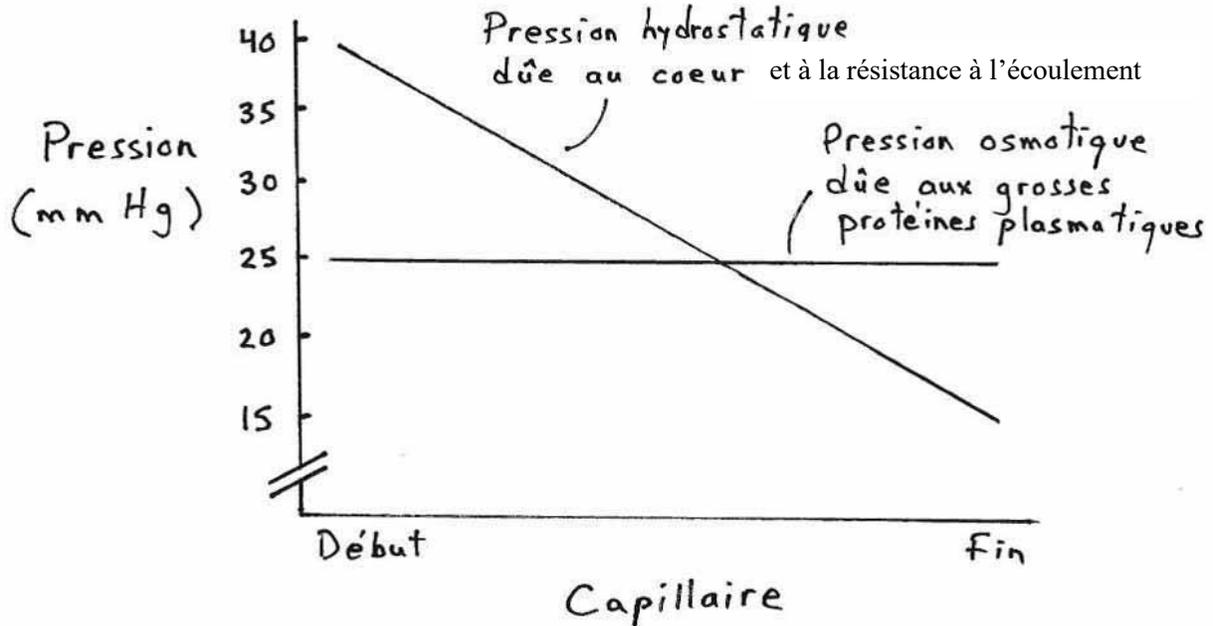
Q Pourquoi est-ce que vos chevilles deviennent enflées (ou que vos souliers commencent à donner l'impression d'être trop étroits) quand vous êtes assis longtemps, comme lors d'un long vol d'avion par exemple?

Différence de pression sanguine entre artères, capillaires, et veines:



- Q** Pourquoi (en termes de cause et d'avantage) la pression dans la circulation pulmonaire est-elle plus basse que dans la circulation systémique?
- Q** Comment expliquer (en termes de cause) que la pression soit plus élevée dans les artères que dans les veines?
- Q** La pression artérielle normale chez l'humain est 120 sur 80. Voyez-vous d'où viennent ces chiffres?
- Q** Presque tous les vaisseaux sanguins près de la surface du corps (comme ceux sur le dessus de votre main) sont des veines. Les artères sont presque toujours profondes; il y en a très peu près de la surface du corps (tel qu'illustré par le fait qu'il y a peu d'endroits où on peut prendre notre pouls manuellement). Pourquoi les artères sont-elles habituellement en position profonde? (Indice : pensez à ce qui arriverait lors d'une blessure....)

Échanges transcapillaires (entrée et sortie de liquide au niveau des capillaires):



La pression hydrostatique due au cœur et à la résistance est en fait la pression sanguine, la même que celle sur le graphique de la page précédente. Elle tend à faire sortir le liquide du capillaire. Elle est plus élevée au début du capillaire car la résistance à l'écoulement y est plus grande (le chemin qui reste à parcourir inclut tout le capillaire étroit qui présente un gros obstacle à l'écoulement.) À mesure que le capillaire se fait « clairer », la résistance à l'écoulement diminue et donc la pression aussi.

La pression osmotique est due aux grosses protéines du sang (= protéines plasmatiques, qui, rappelons-le, servent de substances tampons dans le sang) qui sont trop grosses pour sortir des capillaires et qui rendent donc forcément l'intérieur du capillaire plus concentré (= plus grande osmolarité). Cette pression fait entrer du liquide dans le capillaire. Elle demeure stable tout au long du capillaire car les grosses protéines plasmatiques restent présentes tout au long du capillaire.

Au début du capillaire, il y a plus de liquide qui sort par pression hydrostatique qu'il y en a qui rentre par pression osmotique. Donc, au début du capillaire, le liquide tend à sortir, au final.

À la fin du capillaire, la pression osmotique est plus grande que la pression hydrostatique, donc au final il y a plus de liquide qui rentre qu'il y en a qui sort à cet endroit.

Quand on prend tout le capillaire au total, du début à la fin, on peut voir que le triangle formé par les deux lignes au début du capillaire est un peu plus gros que le triangle à la fin du capillaire, ce qui veut dire qu'au total il y a un certain excès de liquide qui sort du capillaire. Cet excès est repris et retourné au système sanguin par le système lymphatique (prochaine page).

Système lymphatique:

Le système lymphatique sert à prendre l'excès de plasma sanguin qui sort des capillaires et à le retourner à la circulation sanguine. De petits vaisseaux lymphatiques en cul de sac se trouvent près des cellules. Le « cul de sac » contient des valves qui permettent au liquide interstitiel d'entrer dans le vaisseau, mais pas d'en sortir. Le liquide est acheminé vers des vaisseaux lymphatiques de plus en plus gros, jusqu'à en arriver à une connexion avec de grosses veines sanguines dans la cavité thoracique, près du cœur. Tout comme dans les veines, il y a des valves dans les vaisseaux lymphatiques pour favoriser le retour vers le thorax. Si, pour une raison quelconque, les vaisseaux lymphatiques d'une région se bouchent, il en résulte un enfllement dû au mauvais drainage de liquide interstitiel (cet enfllement est appelé un « lymphoedème »).

Le liquide du sang (sans les cellules qui y flottent) s'appelle plasma. Aussitôt qu'il sort d'un capillaire et qu'il se retrouve entre des cellules, il change de nom et devient le liquide interstitiel. Et aussitôt que ce dernier entre dans un vaisseau lymphatique, il change de nom et devient la lymphe.

La rate:

La rate est un organe connecté au système lymphatique, et aussi au système sanguin. Elle relâche dans le sang des globules rouges et des globules blancs. Elle se trouve dans la cavité abdominale (sous l'estomac chez les mammifères).

La rate est un organe non-vital. La moëlle osseuse rouge (contenue dans des espaces à l'intérieur des os) produit beaucoup plus de globules rouges et blancs que la rate. Par contre, chez certaines espèces plongeuses, la rate joue un rôle important d'entreposage de globules rouges (à revoir plus tard). La rate peut aussi jouer un rôle de destruction et de recyclage des vieux globules rouges (on la surnomme parfois « le cimetière des globules rouges »).

Questions à réflexion:

- Q** 1) Les ampoules sont un exemple d'œdème cutané. (Répétons : oedème = accumulation anormale de liquide à un endroit quelconque du corps.) Les ampoules sont un amas de liquide transparent sous l'épiderme causé par une friction entre la peau et un objet (un manche de pelle par exemple). Expliquez comment une ampoule se forme (indices: friction entraîne le bris de cellules qui relâchent des solutés; échanges trans-capillaires dans la peau; pression osmotique).
- Q** 2) Associez le terme de gauche avec un de ceux de droite.
- | | |
|------------------------|--|
| a) Rate | 1) Les cellules sanguines y flottent |
| b) Foramen de Panizzae | 2) Vasoconstriction |
| c) Carotide | 3) Amène le sang au cerveau |
| d) Plasma | 4) Présente une grande résistance à l'écoulement |
| e) Veine cave | 5) Détruit les vieux globules rouges |
| f) Capillaire | 6) Court-circuit crocodilien |
| g) Artériole | 7) Connection à l'oreillette droite |
- Q** 3) Pourquoi la lymphe n'est-elle pas rouge comme le sang?

- Q** 4) Qu'est-ce qui arriverait au niveau des échanges transcapillaires si un manque de protéines dans le régime alimentaire forçait le corps à détruire ses protéines plasmatiques afin d'en retirer les acides aminés dont il a besoin pour former d'autres protéines plus essentielles (cela arrive souvent chez les personnes qui souffrent de famine)?
- Q** 5) Un vétérinaire qui veut faire une prise de sang sur une vache malade (pour faire des tests sanguins dans le but de déterminer quelle est la maladie) commence par faire pression avec sa main sur une partie du cou de la vache, attend quelques secondes et puis insère l'aiguille d'une seringue dans le cou. Expliquez cette façon de procéder.
- Q** 6) Chez les vieux chiens (et les humains), les artères deviennent souvent moins élastiques avec l'âge (elles augmentent moins facilement de diamètre) et leurs parois internes deviennent souvent recouvertes de plaques de cholestérol. Pouvez-vous expliquer pourquoi les vieux chiens (et les personnes âgées) souffrent souvent d'hypertension (haute pression) artérielle? Et quel est le danger de cette situation?

- Q** 7) Penchez-vous et laissez pendre votre bras vers le bas pendant une minute. Regardez le dos de votre main : vous y voyez de gros vaisseaux sanguins gonflés. Quelles sont les deux choses qui vous permettent de dire que ces vaisseaux sont précisément des veines (pas des artères)?
- Q** 8) Dites si le sang qui circule dans les endroits suivants est plutôt oxygéné ou plutôt désoxygéné :
- | | | |
|---------------------|----------------------|---------------|
| a) carotide | b) oreillette gauche | c) aorte |
| d) tronc pulmonaire | e) ventricule droit | f) artérioles |
- Q** 9) Si vous regardez un vidéo montrant la circulation de sang dans un capillaire, vous voyez les globules rouges avancer rapidement pour une partie du temps, puis ils avancent lentement, puis rapidement encore, puis lentement encore, et ainsi de suite. Expliquez pourquoi ils avancent rapidement la moitié du temps, et lentement (mais ils avancent quand même) l'autre moitié du temps.
- Q** 10) Quand on va donner du sang à la Croix Rouge, comment se fait-il que ça prend toujours beaucoup de temps avant que le sac se remplisse de notre sang?

- Q** 11) La vasoconstriction survient lorsque les muscles lisses de la paroi des artérioles se contractent. Comment se fait la vasodilatation? Indice : la situation normale de base (pas de vasoconstriction et pas de vasodilatation) ne correspond pas à un relâchement complet des muscles lisses dans la paroi des artérioles.
- Q** 12) L'éléphantiasis est une maladie où la jambe de la personne affectée devient enflée et grosse comme une patte d'éléphant (regardez des images sur l'internet). Une forme tropicale de la maladie est causée par des vers parasites⁷ qui s'installent à quelque part et bloquent quelque chose. Devinez ce qui se passe.
- Q** 13) Quand on a le rhume, il y a vasodilatation des vaisseaux sanguins qui alimentent la muqueuse nasale pour y amener plus d'anticorps et de globules blancs pour combattre le virus. Ce plus grand apport sanguin entraîne, comme conséquence secondaire, la production d'une plus grande quantité de mucus, ce qui nous bouche le nez. Devinez quelle est l'action des décongestionnants, et expliquez pourquoi on déconseille aux gens qui font de la haute pression artérielle de prendre des décongestionnants.
- Q** 14) Un requin arrache la queue d'un phoque et la mange. Le phoque meurt. Mais la queue n'est pas un organe vital, alors comment se fait-il que le phoque est mort?

⁷ Transmis à l'humain par des moustiques. Les moustiques, vecteurs d'une grande diversité de pathogènes mortels comme ceux qui causent la malaria, la fièvre jaune, et autres, sont les animaux les plus grands tueurs de l'humanité.

Q 15) Un globule rouge se trouve dans la veine cave supérieure. Mettez en ordre chronologique les structures dans lesquelles ou à côté desquelles il passera avant de revenir à nouveau dans la veine cave supérieure.

- A = Jugulaire
- B = Aorte
- C = Carotide
- D = Oreillette gauche
- E = Ventricule droit
- F = Tronc pulmonaire

Q 16) Retournez voir les diagrammes de l'anatomie des systèmes circulatoires des vertébrés aux pages 120-121, et trouvez un exemple de système porte autre que le système porte hépatique.

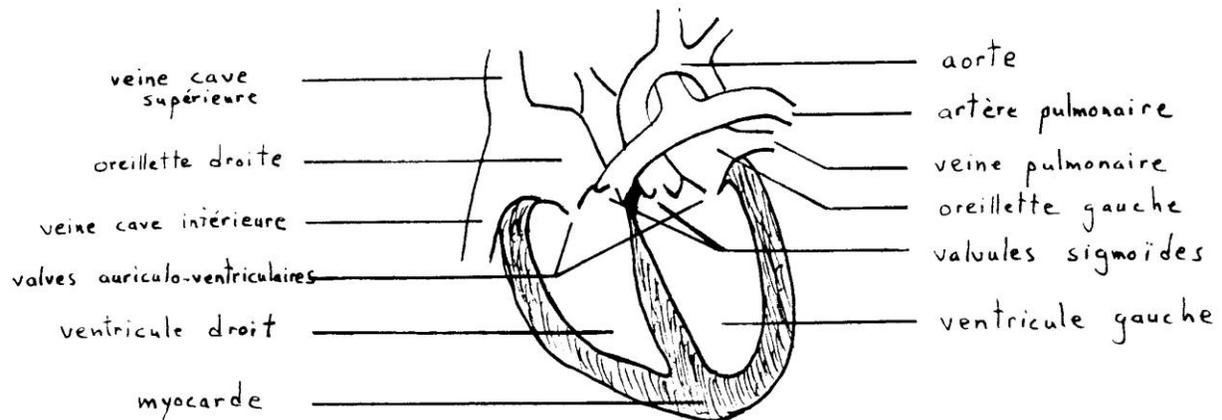
Q 17) Vrai ou faux?

- a) Plus l'hématocrite est élevé, plus le cœur a besoin de travailler fort.
- b) S'il faut amener plus de sang à un organe, les veines vont faire de la vasodilatation.
- c) Les invertébrés ont un système circulatoire ouvert.
- d) Quand une artère se fait couper, le sang sort violemment par courts jets répétés.
- e) Pour une même quantité de sang total, le volume plasmatique est positivement corrélé avec l'hématocrite.
- f) Dans les cas de leucémie (cancer du sang), l'origine du problème n'est pas dans le sang mais plutôt dans les os.
- g) La pression sanguine aortique est plus grande que la pression sanguine carotidienne.
- h) Les protéines plasmatiques contribuent assez directement à l'homéostasie.
- i) Les pompes péristaltiques construites par l'humain et utilisées en laboratoire dans des expériences de physiologie sont souvent connectées à des canules.
- j) Dans les premiers temps d'une hémorragie, le volume veineux diminue mais pas le volume artériel.

Chapitre 17

Circulation: physiologie cardiaque

Anatomie du cœur de mammifères et d'oiseaux :



Le cœur est une pompe à compartiment. Il est fait d'un muscle, le myocarde (muscle cardiaque; « myo » = muscle, « cardé » = coeur), qui constitue la paroi du cœur et est responsable de la contraction des compartiments (oreillettes et ventricules), et cette contraction pousse le sang. Le myocarde a besoin de nutriments et d'oxygène, comme tous les muscles, et chez les mammifères, oiseaux et crocodiles cet apport est assuré par la « circulation coronarienne » (une sous-division de la circulation systémique): 1-3 artères sortent de l'aorte, entrent dans le myocarde et se divisent en artérioles, puis en capillaires (qui nourrissent les cellules du myocarde), pour se réunir en veinules et en veines et en une seule veine qui se déverse dans l'oreillette droite. Chez les poissons, amphibiens et reptiles non-crocodiliens le myocarde est spongieux et prend ses nutriments et son O₂ directement à partir du sang des oreillettes et des ventricules.

Chez l'humain, 1/20 du sang de la circulation systémique passe par la circulation coronarienne pour alimenter le myocarde, même si le cœur ne représente que 1/200 du poids corporel total. Ça illustre bien l'importance du myocarde et du gros travail qu'il accomplit, sans arrêt.

Les crises cardiaques sont un blocage partiel ou total de la circulation coronarienne (par des caillots en circulation, par exemple), ce qui prive une section plus ou moins grande du myocarde de ses nutriments et oxygène. Dépendamment de l'étendue de cette section, le cœur peut battre moins bien ou tout simplement arrêter de battre.

Q Le ventricule droit pousse le sang dans le circuit pulmonaire. Le ventricule gauche pousse le sang dans le circuit systémique. Pouvez-vous expliquer pourquoi la paroi du ventricule gauche est habituellement plus épaisse que la paroi du ventricule droit?

Cycle de contraction du cœur:

- 1) Dans un premier temps, les deux oreillettes se contractent. Le sang contenu dans les oreillettes passe dans les ventricules correspondants par les valves auriculo-ventriculaires.
- 2) Ensuite, les oreillettes se relaxent et les ventricules se contractent. Aussitôt que les ventricules commencent à se contracter, le sang des ventricules pousse sur les valves auriculo-ventriculaires, qui ressemblent à des battants de porte, et les ferment violemment (le premier « boum » du « boum-boum » cardiaque), empêchant le sang de retourner dans les oreillettes. La communication avec les oreillettes étant maintenant coupée, le sang ne peut qu'aller dans l'aorte en passant par la valve sigmoïde aortique (dans le cas du ventricule gauche) ou dans le tronc pulmonaire en passant par la valve sigmoïde pulmonaire (ventricule droit).
- 3) Les ventricules se relaxent. Aussitôt qu'ils se relaxent, le sang de l'aorte et du tronc pulmonaire tend à refluer vers les ventricules. Le sang qui commence à refluer pousse sur les valves sigmoïdes et les ferme violemment (le deuxième « boum » du « boum-boum » cardiaque), empêchant le sang de retourner dans les ventricules. Puisque la pression dans les ventricules qui se relaxent est maintenant basse, les valves auriculo-ventriculaires s'ouvrent et le sang commence à entrer passivement dans les ventricules à partir des oreillettes. Éventuellement, il entrera plus fortement quand les oreillettes se contracteront, ce qui nous ramène au point # 1.

Un peu de nomenclature:

Systole = phase de contraction du cœur.

Diastole = phase de relaxation du cœur.

Auriculaire = relatif aux oreillettes.

Ventriculaire = relatif aux ventricules.

Volume systolique = volume de sang éjecté par le cœur lors de sa phase de contraction.

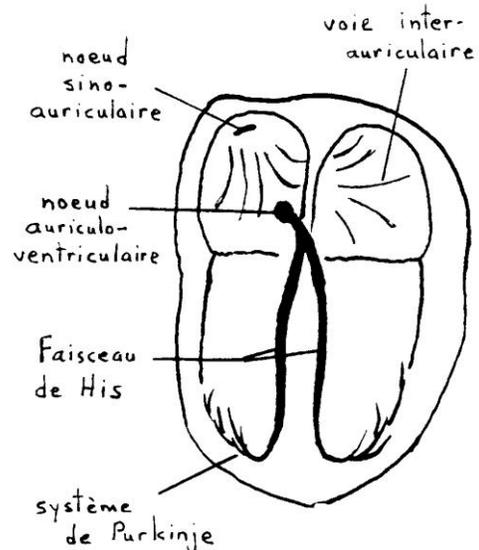
Volume ventriculaire télédiastolique = volume du ventricule à la fin (télé) de la diastole, donc à la fin de sa phase de relaxation, ce qui s'adonne à être le même temps que le début de sa systole (phase de contraction).

Pression systolique = pression artérielle mesurée à la fin de la phase de contraction du cœur.

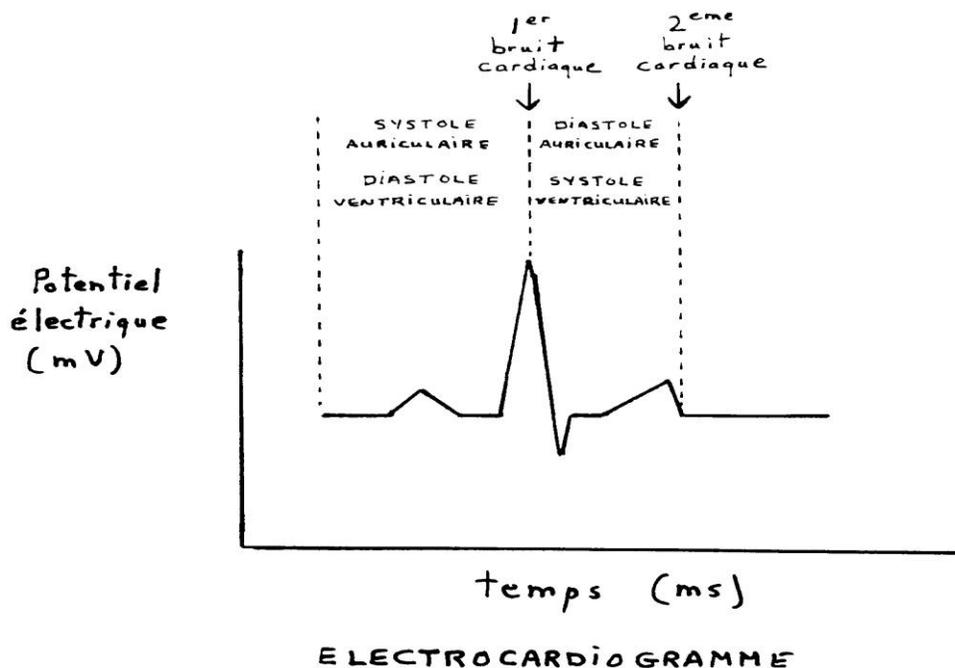
Pression diastolique = pression artérielle mesurée à la fin de la phase de relaxation du cœur.

Excitation cardiaque:

Ce n'est pas le cerveau qui « dit » au cœur de battre. Les cellules musculaires cardiaques ont la propriété de déclencher spontanément leurs propres signaux « électriques » (potentiels d'action). Elles le font de manière rythmique et synchronisée grâce à la présence d'un système conducteur, un « *pacemaker* » situé dans le « noeud sino-auriculaire » (= noeud sinusal) de l'oreillette droite. La vague « électrique » débute dans le noeud sino-auriculaire, se propage dans toutes les oreillettes par l'intermédiaire de la voie inter-auriculaire (ce qui cause la contraction des oreillettes), active ensuite le noeud auriculo-ventriculaire (où se passe un léger délai), de là se propage le long de la branche droite et de la branche gauche du faisceau de His, et s'étend ensuite à tous les ventricules via le système de Purkinje (ce qui cause la contraction des ventricules).

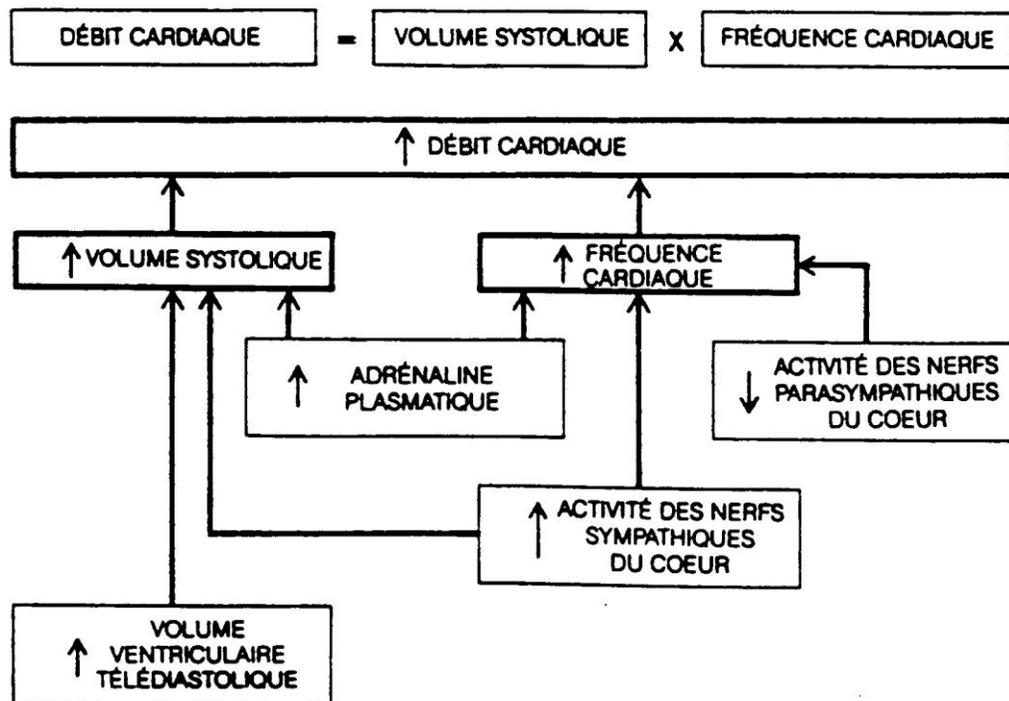


Ces signaux électriques s'échappent du cœur en partie et peuvent se propager jusqu'à la surface de la poitrine, où ils peuvent être détectés. Cela donne lieu aux électrocardiogrammes (ECG, ou *EKG* en anglais), une représentation de l'activité électrique du cœur, telle que détectée à la surface de la poitrine, en fonction du temps. La forme de l'électrocardiogramme peut renseigner la vétérinaire (ou le cardiologue) sur la nature de certains problèmes cardiaques.



Régulation de la fréquence et du débit cardiaque:

Le cœur peut générer ses propres potentiels d'action, mais la fréquence de battements peut quand même se faire influencer à partir du cerveau. Le système nerveux autonome (qui comprend des nerfs sympathiques libérateurs de noradrénaline, et parasympathiques libérateurs d'acétylcholine) et certaines hormones (surtout l'adrénaline, qui peut aussi être libérée par les glandes surrénales) peuvent accélérer (= tachycardie) ou ralentir (= bradycardie) la fréquence cardiaque. L'adrénaline et la noradrénaline augmentent la fréquence, l'acétylcholine la diminue. Si la fréquence augmente, il va sans dire que le débit (la quantité totale de sang pompée par minute) augmente aussi.

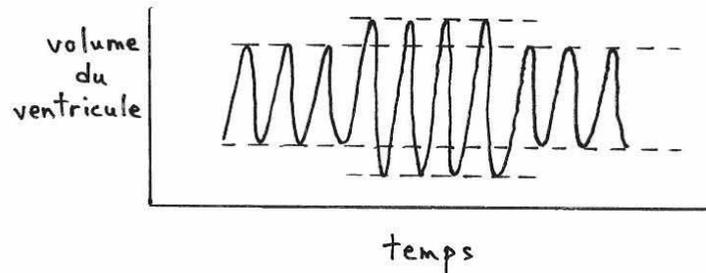


« Adrénaline plasmatique » veut dire l'adrénaline libérée par les glandes surrénales et apportée au nœud sinusal par le sang qui circule dans la circulation coronarienne (« plasmatique » fait référence au plasma sanguin, la partie liquide du sang). Pensez à votre cœur qui bat vite quand vous entendez un gros bruit soudain. Votre cerveau perçoit le bruit fort, envoie un signal nerveux aux glandes surrénales, lesquelles relâchent immédiatement de l'adrénaline dans le sang, lequel arrive au nœud sinusal par la circulation coronarienne et le stimule à faire battre le cœur plus vite, vous préparant à l'action pour faire face au danger soudain. La même chose arrive chez un animal qui fait face à un prédateur ou un compétiteur sur le point de l'attaquer.

Chez certains animaux qui préfèrent se cacher et échapper à l'attention d'un prédateur qui vient d'apparaître, la réaction à un prédateur est inverse : ce sont les nerfs parasympathiques en provenance du cerveau qui entrent en action pour ralentir le cœur et calmer l'animal, l'aidant à demeurer immobile. (Ceci a été démontré sur le terrain par télémétrie – des émetteurs radio peuvent envoyer des signaux différents en fonction de la fréquence cardiaque.)

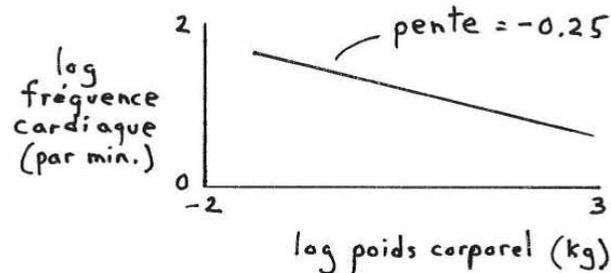
Sur le schéma de la page précédente, la relation entre le volume systolique et le volume ventriculaire télédiastolique (à la fin de la diastole, = au début de la systole) s'appelle la loi de Starling.

La loi de Starling dit que plus un ventricule est rempli (gonflé) au moment où il commence à se contracter, plus il va réussir à se vider complètement. (Plus le myocarde est étiré au début de sa contraction, plus il se contracte complètement). On pourrait représenter ceci de la façon suivante :



Ceci est avantageux. Lors d'un exercice physique, la contraction fréquente des muscles squelettiques favorise le retour du sang veineux vers le cœur (revoir la section sur les veines), ce qui remplit plus le cœur, ce qui stimule le cœur à se vider plus à chaque contraction, ce qui est bon puisque le corps est en forte action et a besoin d'un meilleur apport en sang (qui apporte le glucose et l'oxygène).

Relation entre la fréquence cardiaque et la grosseur corporelle des différentes espèces animales:



La fréquence normale de battements cardiaques varie en fonction du poids corporel à un exposant égal à -0.25 (le même que pour le taux métabolique spécifique).

Le cœur d'une baleine bat 15-16 fois par minute. Comparez cela avec le cœur d'une musaraigne ou d'une petite chauve-souris qui bat 600 fois par minute, au repos (lors d'une forte activité, ça peut monter à 1300 battements par minute, pouvez-vous croire?!)

Chez les mammifères, la durée de vie est proportionnelle au poids corporel à l'exposant 0.25. Chez les mammifères, la fréquence cardiaque est proportionnelle au poids corporel à la -0.25 . Ça veut dire que le nombre total de battements dans la vie est proportionnel au poids à la 0. Donc, les mammifères tendent à vivre le même nombre de battements cardiaques au total!

(Environ 800 millions; mais encore plus – 3 milliards – chez l'humain qui atteint 80 ans, une durée de vie anormalement longue à cause des progrès technologiques.)

Questions à réflexion:

- Q** 1) Dans les films d'horreur (voire même dans les films d'Indiana Jones, comme *Indiana Jones and the Temple of Doom!*), on voit de sinistres personnages qui extirpent le cœur de la poitrine de leurs victimes encore vivantes, et qui, avec un rire dément, tiennent dans leur main ensanglantée ce cœur qui bat encore. En théorie, est-il possible d'avoir un cœur qui bat encore en-dehors du corps? En pratique?
- Q** 2) Comme on l'a vu, chez certains animaux le cœur bat beaucoup moins vite lorsqu'ils sont mis en présence d'un prédateur. Pouvez-vous expliquer pourquoi certaines personnes s'évanouissent lorsqu'elles ont peur ou quand elles apprennent une nouvelle « choc »?
- Q** 3) Devinez quel est l'exposant qui relie la fréquence respiratoire (oui, je dis bien respiratoire, même si ce chapitre porte sur le cœur) avec le poids corporel.

- Q** 4) Pour un certain animal, le volume sanguin total est 210 ml, le volume systolique est de 0.5 ml, la pression artérielle est 10 mm Hg, le débit cardiaque est 40 ml/min, l'oxygène extrait est 0.5 ml par 100 ml de sang, et le temps de recyclage complet est 6.5 min. Utilisez ces données ou une partie de ces données pour calculer la fréquence de battements cardiaques.
- Q** 5) Des quatre valves qu'on retrouve dans le cœur, laquelle est soumise à la plus forte pression lorsqu'elle se ferme?
- Q** 6) Les gens qui mangent beaucoup de gras sont plus à risque d'avoir des crises cardiaques. On pense que l'abondance de lipides dans la nourriture entraîne la formation d'une plus grande quantité que normale de cholestérol dans le corps. Cela entraîne le dépôt de plaques de cholestérol à l'intérieur des vaisseaux sanguins. Parfois, des morceaux de ces plaques se détachent et commencent à voyager dans le sang. Complétez cette série d'événements pour en arriver à une crise cardiaque.
- Q** 7) La pression artérielle normale chez l'humain est « 120 sur 80 ». S'agit-il de la pression « systolique sur diastolique », ou « diastolique sur systolique »?

- Q** 8) Décrivez une expérience où vous utiliseriez la télémétrie pour supporter l'idée que les oiseaux qui volent en V sauvent de l'énergie par rapport à ceux qui volent seuls (ou par rapport à l'individu qui est à la pointe du V).
- Q** 9) Une molécule de CO₂ vient tout juste d'être produite dans une cellule de mammifère. Décrivez le chemin qu'elle suivra jusqu'à temps qu'elle sorte du corps. Nommez toutes les structures et liquides qu'elle traversera, tous les organes ou parties d'organe qu'elle rencontrera, toutes les substances avec lesquelles elle interagira. Ceci est une belle question de révision sur l'anatomie des systèmes circulatoire et respiratoire.
- Q** 10) Laquelle des choses suivantes se déroule entre les deux « boum » du « boum-boum » cardiaque?
- a) La systole ventriculaire
 - b) La systole auriculaire
 - c) La fréquence cardiaque
 - d) La dépolarisation du nœud sino-auriculaire
 - e) La pression diastolique
- Q** 11) Les espèces de mammifères suivantes ont un cœur particulièrement gros (poids du cœur en % du poids corporel total) : belette, musaraigne, chauve-souris, cheval. Devinez pourquoi pour chaque espèce. Et chez les oiseaux, les cœurs ont tendance à être plus gros que chez les mammifères de poids semblables, et plus gros chez les espèces migratrices, les espèces qui vivent en montagne, et les espèces qui vivent près des pôles. Ici aussi devinez pourquoi.

Chapitre 18

Circulation: effets de la gravité

La gravité a deux effets principaux sur la distribution et la circulation du sang:

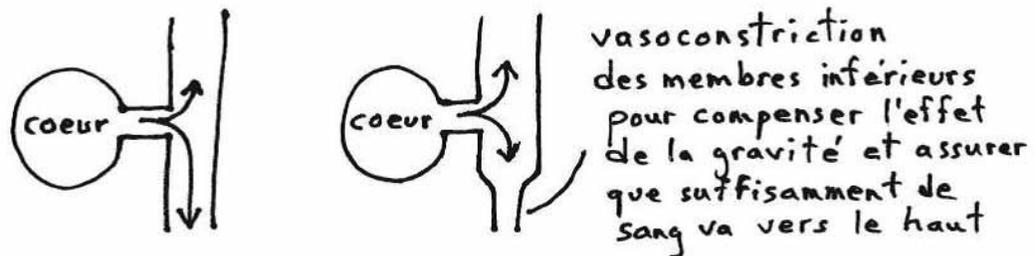
- 1) Puisque les veines sont extensibles, **le sang a tendance à tranquillement s'accumuler dans les veines des membres inférieurs** (ou de toute autre partie du corps qui occupe une position plus basse que les autres). Cela peut créer un manque de sang suffisant pour le cerveau.

On conseille souvent de ne pas essayer des souliers en fin de journée, parce que nos pieds sont souvent enflés en fin de journée, après avoir été longtemps à la verticale.

Nos pieds et chevilles ont aussi tendance à enfler lors de longs vols d'avion. On a déjà vu que l'action des muscles squelettiques quand on bouge aide le sang veineux à retourner au cœur. Assis longtemps en avion, les muscles de nos jambes ne se contractent pas souvent, et le sang a alors tendance à s'accumuler tranquillement dans les veines les plus inférieures, c'est-à-dire dans les pieds et chevilles.

Les solutions principales apportées à ce problème sont :

- a) la présence d'une peau serrée autour des pattes, limitant leur gonflement;
- b) le contrôle du débit sanguin par vasoconstriction et vasodilatation sélective de certains vaisseaux par rapport à d'autres. Les vaisseaux inférieurs sont constamment en vasoconstriction légère, tandis que les vaisseaux supérieurs sont constamment en vasodilatation légère, pour compenser la tendance du sang à aller vers le bas à cause de la gravité.



- 2) Chez les animaux où la tête est au-dessus du cœur, et le cœur au-dessus des membres, il est **difficile de faire remonter le sang des membres jusqu'au cœur, et du cœur jusqu'à la tête.**

Les solutions apportées à ce problème sont :

- a) un cœur assez fort pour pousser le sang contre la gravité vers les organes supérieurs (ce qui malheureusement entraîne une pression artérielle élevée);
- b) l'action des muscles squelettiques des pattes pour aider le sang à remonter vers le cœur (revoir section sur les veines aux pages 123-124).

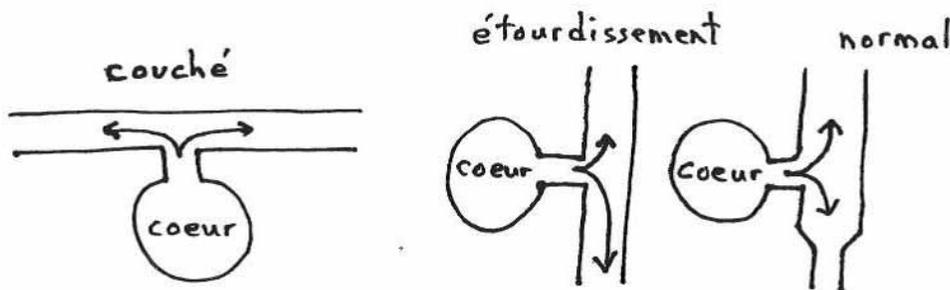
Examinons le cas de la girafe (on pourrait aussi considérer n'importe quel autre animal à long cou, comme le chameau ou certains dinosaures). La tête d'une girafe en position normale est à 2-3 m au-dessus du coeur. Le poids (gravité) de la colonne de sang dans le long cou crée une grande résistance à l'écoulement vers le haut, ce qui entraîne une pression énorme à la base du cou (la plus élevée de tout le règne animal : au moins 280/180 mm Hg). Pour combattre cette résistance, le coeur est de la grosseur d'un ballon de soccer! De plus, les artérioles qui mènent aux autres parties du corps plus basses sont contractées afin d'empêcher le sang de s'y rendre en trop grande quantité au détriment du cerveau (la diminution du diamètre des artérioles contractées cause une augmentation de la résistance en direction des pattes).

Lorsque la girafe abaisse sa tête, pour boire par exemple, la vasoconstriction au niveau des parties inférieures du corps cesse, car maintenant le sang a autant tendance à aller dans la tête que dans les pattes.

Chez la girafe comme chez les autres animaux, les ajustements de vasoconstriction sont gérés par des détecteurs de pression sanguine (= barorécepteurs) dans les artères menant à la tête (c'est en fait l'étirement des parois des artères, quand la pression est forte, qui est détecté). Si la pression dans ces artères baisse, c'est habituellement signe que pas assez de sang va à la tête parce que trop de sang va vers le bas, et les détecteurs envoient des messages au cerveau qui enclenche alors la vasoconstriction au niveau des membres inférieurs pour compenser. Si la pression devient trop élevée, quand l'animal baisse sa tête par exemple et que maintenant trop de sang va vers le cerveau, les détecteurs envoient des messages différents au cerveau qui arrête alors la vasoconstriction des membres inférieurs pour équilibrer l'apport de sang aux membres inférieurs et à la tête.

Hypotension orthostatique :

On se sent souvent étourdi quand on se lève trop rapidement. Quand on est couché à l'horizontale, le sang a autant tendance à aller vers notre tête que vers nos jambes, et il n'y a pas de vasoconstriction compensatoire nulle part. Quand on se lève, la gravité s'exerce et moins de sang va au cerveau en haut. Les barorécepteurs détectent la baisse de pression dans les artères allant vers le haut et envoient alors des messages au cerveau pour que celui-ci commence la vasoconstriction compensatoire au niveau des membres inférieurs. Cette réponse peut prendre quelques secondes, surtout si on se lève rapidement. Pendant ces quelques secondes, moins de sang va au cerveau, moins d'oxygène arrive aux neurones, lesquels fonctionnent alors moins bien et cela se traduit par de l'étourdissement. En fait, si notre volume sanguin était déjà bas (par exemple, suite à la déshydratation qui suit une grande transpiration), la quantité de sang arrivant au cerveau pendant ces quelques secondes peut être tellement faible qu'on peut tout simplement s'évanouir.



Une étude comparative: serpents arboréaux, terrestres, et aquatiques (Scientific American, déc. 1988)

Les serpents arboréaux sont souvent en position verticale. Les effets de la gravité sur leur circulation sanguine sont donc très prononcés.

Les serpents terrestres sont surtout en position horizontale, mais parfois leur corps est incliné dépendamment du terrain. La gravité a donc des effets plus ou moins prononcés.

Les serpents aquatiques vivent dans un milieu où la pression hydrostatique contrebalance les effets de la gravité. Chez un serpent en position verticale dans une colonne d'eau, la gravité a tendance à faire gonfler les parties inférieures par accumulation de sang, mais les parties inférieures sont aussi soumises à une plus grande pression hydrostatique externe (plus on est profond dans l'eau, plus l'eau pèse), ce qui compense exactement. La gravité n'a donc pas d'effet chez les serpents aquatiques.

La physiologie circulatoire de ces serpents reflète-t-elle les différents degrés auxquels la gravité les affecte?

Pression artérielle:

On devrait s'attendre à ce que les pressions artérielles soient plus élevées (le cœur est plus fort) chez les serpents arboréaux (rappelez-vous de la girafe) que chez les terrestres, et encore plus que chez les aquatiques.

La pression est mesurée en insérant une canule dans l'aorte dorsale et en connectant cette canule à un manomètre.

Les résultats sont consistants avec nos attentes : les serpents arboréaux ont des pressions artérielles de 50-90 mm Hg, les terrestres tournent autour de 50 mm Hg, et les aquatiques ont des pressions de 15-40 mm Hg.

Contrôle de la pression artérielle lors d'inclinaison:

Les serpents arboréaux devraient avoir la meilleure capacité de garder l'apport sanguin stable au cerveau lors d'inclinaisons du corps.

Le serpent est placé dans un tube qu'on peut pivoter de l'horizontale à la verticale. Une canule dans une artère près du cerveau permet de mesurer les changements de pression quand on fait passer le serpent d'une position horizontale à verticale, avec la tête vers le haut. Si l'apport sanguin au cerveau ne change pas, le volume sanguin dans ces artères ne devrait pas changer, et donc la pression à cet endroit ne devrait pas changer non plus.

Aussi bien chez les serpents arboréaux que terrestres, la pression artérielle près du cerveau reste constante lors des pivotements. Mais chez les serpents aquatiques, la pression baisse beaucoup (l'apport sanguin baisse beaucoup) lorsque la tête est pivotée vers le haut; n'étant pas exposé normalement aux effets de la gravité, les serpents aquatiques n'ont pas évolué l'adaptation de faire de la vasoconstriction compensatoire dans différentes parties de leur corps pour compenser les effets de la gravité : trop de sang va vers le bas, et pas assez vers le cerveau en haut.

Capacité de vasoconstriction au niveau de la queue: La capacité de faire de la vasoconstriction compensatoire devrait être meilleure chez les serpents arboréaux que chez les aquatiques.

Le serpent est placé dans un tube qu'on peut pivoter. Au bout du tube, sa queue dépasse et est contenue dans un compartiment rigide dans lequel on peut mesurer la pression de l'air. L'idée est que si le serpent ne peut pas bien faire la vasoconstriction quand on pivote sa tête vers le haut (queue vers le bas), alors le sang va s'accumuler dans sa queue, laquelle va gonfler, ce qui augmentera la pression de l'air dans le compartiment.

Tel qu'attendu, le volume de la queue des serpents arboréaux augmente très peu lorsque la tête pivote vers le haut, mais celui des serpents aquatiques augmente de façon significative.

Position du coeur:

Le cœur des serpents arboréaux est plus près de la tête que chez les serpents terrestres, lequel est plus près de la tête que chez les serpents aquatiques. La distance entre la tête et le cœur, exprimé en % de la longueur totale du corps, est : arboréaux 15%, terrestres 25%, aquatiques 50%.

On peut interpréter ces différences comme une adaptation de la part des espèces soumises aux effets de la gravité pour assurer un bon apport sanguin au cerveau même quand le cerveau est au-dessus du cœur. Il est plus facile de maintenir un bon apport sanguin au cerveau si le cœur est plus près du cerveau.

Position du poumon:

Le poumon des serpents arboréaux est court et limité au centre du corps. Le poumon des serpents terrestres est plus étendu le long du corps, et celui des serpents aquatiques est le plus étendu de tous le long du corps.

On peut interpréter ces différences comme une adaptation de la part des espèces soumises aux effets de la gravité pour éviter d'avoir un poumon près des extrémités du corps. Quand la gravité exerce ses effets, c'est aux extrémités du corps que le sang a tendance à s'accumuler (que ce soit l'une ou l'autre des extrémités, dépendamment si la tête est vers le haut ou vers le bas). L'accumulation de sang augmente la pression sanguine, le sang a plus tendance à sortir des capillaires, et au niveau des poumons cela pourrait faire entrer du liquide dans le poumon et le noyer.

Comportement ondulatoire:

Quand un serpent arboréal grimpe le long d'un tronc, il lui arrive souvent d'arrêter et de commencer à onduler son corps. Il n'avance pas, mais on voit des vagues de contractions musculaires se déplacer le long de son corps. On pense que ce comportement, observé seulement chez les serpents arboréaux, est une adaptation pour aider le retour du sang veineux contre la gravité (rappelez-vous du rôle des muscles squelettiques dans ce domaine). La prochaine fois que vous verrez le prof se branler les jambes, imaginez-le comme un serpent en train d'onduler!

Chapitre 19

Circulation et respiration: adaptations à la plongée

Plusieurs animaux pratiquent la respiration aérienne mais doivent de temps à autre plonger sous l'eau pour des périodes de temps plus ou moins prolongées (ex.: baleines, phoques, castors, loutres, rats musqués, manchots, canards, plongeurs/huarts, tortues marines, serpents marins).

Lorsque ces animaux se submergent, des récepteurs sensoriels localisés près des narines détectent la présence de l'eau et relaient un message au cerveau, lequel arrête automatiquement la respiration. On parle alors d'apnée (apnée = arrêt momentané de la respiration).

L'apport d'oxygène de l'extérieur est donc inexistant pendant la plongée. Face au manque d'oxygène, deux grandes adaptations existent:

- L'animal plongeur a une grande capacité d'emmagasiner de l'oxygène dans ses poumons ou dans ses tissus avant de plonger.
- L'animal plongeur, lors de la plongée, redistribue le flux sanguin (l'apport d'oxygène) et privilégie les organes essentiels (cerveau, coeur, yeux, placenta dans le cas d'une femelle enceinte) au détriment d'autres organes (digestifs, musculaires), lesquels doivent maintenant avoir recours au métabolisme anaérobie.

Emmagasiner l'oxygène:

La figure suivante montre la quantité d'oxygène emmagasiné avant la plongée chez une espèce non-plongeuse (l'humain), une espèce plongeuse à faible profondeur (une otarie), et deux espèces plongeuses à grande profondeur (deux espèces de phoques).

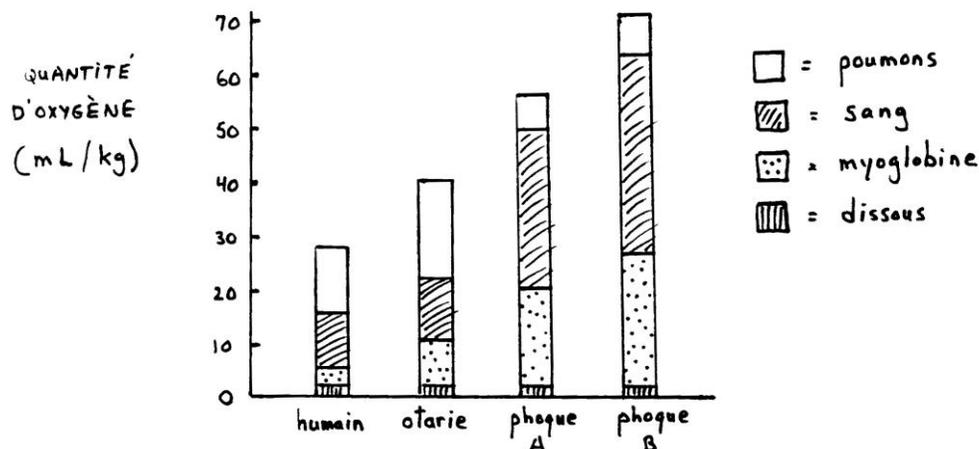


Figure 19.1 : Quantité d'oxygène présente dans divers tissus de diverses espèces en plongée.

Notons les points suivants par rapport à la figure 19.1:

- 1) La quantité d'oxygène dissous dans les liquides corporels (autre que le sang) est faible et ne varie pas d'une espèce à l'autre.
- 2) Les espèces plongeuses ont beaucoup plus de myoglobine dans leurs muscles que les espèces non-plongeuses. Elles peuvent donc y entreposer plus d'oxygène. Tout comme l'hémoglobine, dont elle est d'ailleurs la constituante de base (rappelez-vous que l'hémoglobine est faite de quatre molécules de myoglobine attachées ensemble), la myoglobine peut fixer l'oxygène lorsque l'oxygène est abondant, et relâcher l'oxygène lorsque l'oxygène est rare.
- 3) Les espèces plongeuses ont un volume sanguin proportionnellement plus important, et leur sang contient plus d'hémoglobine (plus de globules rouges). Elles peuvent donc y entreposer plus d'oxygène. De plus, pendant la plongée, la rate peut relâcher des globules rouges supplémentaires qui contiennent de l'hémoglobine déjà liée à de l'oxygène. Après la plongée, la rate reprend ces globules rouges pour éviter que le sang demeure visqueux trop longtemps.
- 4) Les espèces qui plongent à faible profondeur remplissent leurs poumons d'air avant de plonger afin d'amener une réserve d'oxygène avec elles. Cependant, les espèces qui plongent à grande profondeur vident leurs poumons (expirent) avant de plonger. Elles font ceci pour éviter le mal des caissons.

Le mal des caissons est la formation de bulles d'azote dans le sang et dans les autres liquides corporels suite à une plongée profonde suivie par une remontée rapide. Les bulles d'azote peuvent bloquer des capillaires, ou faire pression sur les neurones du cerveau, ou forcer des déformations au niveau des articulations (ce dernier symptôme est à l'origine du mot anglais pour la maladie : « *the bends* »). Ces manifestations, si elles sont prononcées, peuvent mener à la mort.

Plus on plonge profond, plus l'eau exerce une pression sur la cage thoracique et sur les poumons. Si les poumons contiennent beaucoup d'air, cet air devient sous forte pression, et cette forte pression va occasionner une plus grande dissolution de l'oxygène de l'air dans le sang –une bonne chose– et aussi de l'azote –pas trop grave pour l'instant⁸. Si l'animal remonte vite à la surface, la pression diminue vite, la solubilité diminue vite, et l'azote dissous dans le sang ne peut plus rester dissous : il passe alors en forme gazeuse et forme de petites bulles qui causent le mal des caissons. Les espèces plongeuses à grande profondeur vident leurs poumons avant la plongée pour ne pas qu'il y ait beaucoup d'azote qui puisse se dissoudre dans leur sang lors de la plongée.

Les plongeurs humains en SCUBA sont obligés de respirer de l'air sous pression lors de leur plongée. Ils sont donc obligés de remonter lentement vers la surface (faire des « paliers de décompression »), pour donner le temps à l'azote dissous de revenir sous forme gazeuse au niveau des poumons, d'où il pourra être expiré, plutôt que devenir gazeux tout d'un coup et former des bulles dans le sang.

⁸ L'azote est un gaz physiologiquement inerte en temps normal. Cependant, à de très fortes concentrations, comme par exemple lors d'une plongée très profonde, il peut interagir avec le système nerveux et causer des hallucinations, ce que les plongeurs appellent « l'ivresse des profondeurs ». Les comportements incohérents peuvent être très dangereux à ces profondeurs.

Redistribution du flux sanguin lors de la plongée:

Afin d'économiser l'oxygène, l'organisme en plongée prive d'oxygène certains organes non-essentiels en coupant leur apport sanguin. Cela se fait par vasoconstriction des artères et artérioles concernées. Seuls le cerveau, le coeur, les yeux, et le placenta dans le cas de femelles enceintes demeurent bien irrigués.

Puisque la circulation sanguine est grandement réduite, le coeur n'a plus besoin de travailler autant. Par conséquent, la fréquence cardiaque diminue considérablement aussitôt que l'animal plonge. On parle alors de bradycardie. (Le contraire, c'est-à-dire une augmentation de la fréquence cardiaque, s'appelle la tachycardie.) La bradycardie est une réaction universelle à l'asphyxie chez les vertébrés, mais elle est plus prononcée chez les organismes plongeurs.

Chez les mammifères, la bradycardie est causée par la stimulation des mêmes récepteurs qui ont causé l'apnée, à savoir les détecteurs d'eau près des narines. La bradycardie et la vasoconstriction sont ensuite amplifiées par l'action de chémorécepteurs artériels qui détectent la baisse en O₂ et la hausse en CO₂ dans le sang (mais seulement lorsque l'animal est déjà en condition d'apnée; si l'animal respire et la baisse en O₂ est causée par quelque chose d'autre que la plongée – altitude ou exercice par exemple – alors la réponse est inversée: la fréquence cardiaque augmente et il y a vasodilatation!). Chez les oiseaux, les récepteurs responsables de l'apnée ne sont pas impliqués; seuls les récepteurs artériels le sont.

En l'absence d'un apport d'oxygène, les organes moins importants se doivent d'avoir recours au métabolisme anaérobie. On se rappellera qu'un des produits du métabolisme anaérobie est l'acide lactique, dont l'accumulation dans les tissus entraîne une fâcheuse baisse de pH. À la suite d'une longue plongée, un organisme ne peut pas replonger tout de suite car il doit d'abord éliminer de son système l'acide lactique qu'il a accumulé. De retour en condition aérobie en surface, l'acide lactique est oxydé par l'oxygène (surtout dans le foie) et ainsi converti en pyruvate ou en glycogène, lesquels peuvent alors entrer dans le métabolisme aérobie.

Différence de résultats obtenus en laboratoire et sur le terrain:

Les études physiologiques sont habituellement faites en laboratoire. Si la technologie le permet, il est utile d'essayer de confirmer les résultats de laboratoire avec des études sur le terrain. Parfois, on a des surprises intéressantes. Comme par exemple :

Pour étudier la bradycardie en laboratoire, on immobilise un canard plongeur sur une planche, on lui connecte des électrodes sur la poitrine pour mesurer sa fréquence cardiaque, et on lui plonge le bec dans l'eau. Résultat : la bradycardie s'enclenche aussitôt que le bec est dans l'eau. Conclusion : la bradycardie est une réponse automatique à la plongée.

Dans des conditions plus « naturelles », on entraîne des canards à aller chercher de la nourriture dans l'eau d'une piscine. Le chemin que le canard doit parcourir sous l'eau pour obtenir la nourriture peut être court ou long. On a implanté dans le corps du canard un émetteur radio qui envoie différents signaux dépendamment de la fréquence cardiaque, donc par télémétrie on peut savoir quelle est sa fréquence cardiaque pendant la plongée. Lorsqu'on signale au canard qu'il doit aller chercher de la nourriture par le chemin long, il plonge et sa fréquence cardiaque baisse (bradycardie), tel que prévu.

Mais si on lui signale d'aller chercher de la nourriture par le chemin court, il plonge et il n'y a PAS de bradycardie. Conclusion : peut-être que la bradycardie n'est PAS une réaction automatique lors de la plongée; peut-être que lorsque le cerveau « sait » que la plongée ne durera pas longtemps, il ne déclenche pas la bradycardie. Au laboratoire, le pauvre canard ne savait jamais à l'avance pendant combien de temps on lui laisserait les narines sous l'eau, et donc il ne prenait pas de chance et enclenchait la bradycardie tout de suite.

Questions à réflexion:

- Q** 1) Chez les oiseaux, des récepteurs nasaux stimulés par l'eau causent l'apnée, mais pas la bradycardie ni la vasoconstriction. Ce sont des récepteurs artériels stimulés par la baisse en O₂, la hausse en CO₂ et l'absence de mouvements respiratoires qui causent la bradycardie et la vasoconstriction. Décrivez, aussi complètement que possible, une série d'expériences qui vous permettraient de vérifier ces affirmations (indices: il est possible de ventiler artificiellement les poumons d'un canard par l'intermédiaire d'une canule insérée dans la trachée de l'animal; il est aussi possible de stimuler électriquement les récepteurs artériels).
- Q** 2) Les espèces plongeuses à grande profondeur vident leurs poumons avant la plongée pour éviter le mal des caissons. Il y a un autre avantage, non relié à la physiologie, à plonger profondément sans avoir les poumons pleins d'air. Pouvez-vous deviner lequel? Indice : Voyez les poumons comme des sacs pleins d'air.

- Q** 3) Imaginez la technologie qui nous permettrait de mesurer le changement dans la concentration d'oxygène du sang chez un phoque en plongée dans son milieu naturel. Mot-indice : « *backpack* ».
- Q** 4) Sur les navires de recherche en biologie marine, il y a souvent une « chambre de décompression ». On y assoit les plongeurs qui, pour une raison ou une autre, ont été obligés de remonter rapidement à la surface. Que fait une chambre de décompression, d'après vous, et pourquoi?
- Q** 5) Faites une analogie entre une cannette de boisson gazeuse (ou une bouteille de champagne, si vous êtes plus riche) qu'on ouvre et un plongeur qui remonte rapidement à la surface.
- Q** 6) On a déjà observé la bradycardie chez les poissons volants. À quel moment les poissons volants font-ils de la bradycardie, et pourquoi?

- Q** 7) La myoglobine sert de réserve d'oxygène dans les muscles. Sur un même graphique bien fait, dessinez la courbe de dissociation de l'oxygène pour l'hémoglobine, et aussi celle pour la myoglobine. (De bons souvenirs de la page 111.)
- Q** 8) Parlant de courbes de dissociation oxygène-hémoglobine, dessinez une courbe normale, puis dessinez la courbe pour une espèce animale (un serpent marin, disons) qui serait adaptée à la plongée à faible profondeur et dont le principal réservoir d'oxygène est l'air qu'elle amène avec elle dans ses poumons bien remplis. Indice : pensez à ce qui arrive à la concentration d'oxygène dans les poumons à mesure que cette réserve se fait « utiliser » (diffuse dans le sang) au cours de la plongée.
- Q** 9) Tout de suite après une longue plongée, un phoque se couche sur la banquise. Il est très essoufflé. Pourquoi est-il essoufflé alors que ses muscles ne sont même pas en train de travailler fort? (La même situation s'applique à une personne qui est essoufflée après une intense activité physique.)

Q 10) Vous prenez un phoque et vous l'entraînez comme un chien de Pavlov : vous lui faites entendre le son d'une cloche, et puis après vous plongez sa cage dans l'eau d'une piscine. Vous faites cela plusieurs fois. Après un bout de temps, il apprend que le son de la cloche annonce une plongée imminente. Devinez ce qui se passe dans son corps immédiatement après qu'il entend la cloche. Et à quelle partie du chapitre cela vous fait-il penser?

Q 11) Révision sur tout le système circulatoire. Vrai ou Faux? Le volume ...

- a) ... télédiastolique est plus élevé que le volume télésystolique.
- b) ... de l'aorte augmente lors de la systole ventriculaire.
- c) ... des veines augmentent lors de l'exercice.
- d) ... du liquide interstitiel augmente quand le système lymphatique est obstrué.
- e) ... des veines des pieds augmente plus communément que celui des veines du cerveau.
- f) ... qui passe à un endroit par unité de temps est plus bas quand le débit est bas.
- g) ... sanguin d'un crabe est moins que celui d'un lézard de même poids.
- h) ... systolique augmente avec la production d'adrénaline.
- i) ... plasmatique est plus près du volume sanguin total quand l'hématocrite est plus bas.

Q 12) Laquelle ou lesquelles des situations suivantes est (sont) associée(s) à la tachycardie?

- a) Grande activité des nerfs parasympathiques.
- b) Grande quantité d'adrénaline plasmatique.
- c) Animal en plongée.
- d) Animal faisant face à un prédateur.

Chapitre 20

Examen 2 – Exemples de questions des années passées

1) Imaginez deux espèces de poissons qui ont le même poids corporel mais qui vivent dans deux milieux différents: une vit dans des lacs où l'eau est toujours bien oxygénée, l'autre vit dans des étangs où l'eau contient habituellement peu d'oxygène dissous. Sur un même graphique, dessinez les courbes de dissociation oxygène-hémoglobine de chacune de ces deux espèces. Assurez-vous que votre graphique est complet et bien fait. Rajoutez une courte explication pour justifier la position des deux courbes l'une par rapport à l'autre.

2) Le coin du vocabulaire. Complétez les phrases suivantes par un ou quelques mots:

On donne le nom de ___(a)___ à l'abaissement de la fréquence cardiaque qui survient chez un animal en plongée. ___(b)___ est le terme technique que l'on donne à une situation où le pH est abaissé suite à l'excès de CO₂ sanguin causé par une ventilation des poumons insuffisante. Le/la/l' ___(c)___ est une substance libérée par les nerfs ___(d)___ au niveau du coeur pour accélérer la fréquence de battements cardiaques. Chaque « raisin » d'une « grappe de raisin » dans un poumon s'appelle ___(e)_____. La substance qui donne au sang sa couleur rouge est la/le/l' ___(f)_____. Le gaz le plus abondant dans l'atmosphère est la/le/l' ___(g)___ suivi par la/le/l' ___(h)_____. Le/la/l' ___(i)___ correspond à la phase de contraction du coeur. Les ___(j)___ sont les principales artères menant le sang du coeur au cerveau. On appelle "pompes ___(k)___" les pompes où le mouvement du fluide est causé par une vague de contraction se déplaçant le long d'un tube. On donne le nom de ___(l)___ à la partie liquide du sang. On appelle ___(m)___ toute accumulation anormale de liquide à l'intérieur du corps. ___(n)___ est le terme technique que l'on donne à une situation où le pH est élevé suite au manque de CO₂ sanguin causé par une hyperventilation des poumons. Le nom de l'enzyme qui accélère la réaction entre le CO₂ et l'eau pour donner des ions H⁺ et HCO₃⁻ (ou vice-versa) est ___(o)_____. Le système respiratoire des insectes comprend un ensemble de ___(p)___ et de ___(q)___ qui débouchent sur l'extérieur du corps au niveau d'ouvertures appelées ___(r)_____. Les ___(s)___ sont les principales veines ramenant le sang du cerveau jusqu'au coeur. Les mammifères ont des alvéoles, mais les oiseaux, eux, ont des ___(t)_____. Le terme technique qui désigne un arrêt momentané de la respiration est ___(u)_____. On utilise l'adjectif ___(v)___ pour désigner un milieu qui contient moins d'oxygène que normal. Dans des comparaisons interspécifiques chez les mammifères, la fréquence de battements cardiaques varie en fonction du poids corporel à l'exposant ___(w)_____, le même exposant qui relie le poids corporel à/au ___(x)_____. Les muscles inspiratoires chez les mammifères sont les muscles intercostaux et le/la/l' ___(y)_____. Les membranes des organes respiratoires ont tendance à être grandes, minces et ___(z)_____. Chez les oiseaux plongeurs, les réponses qui surviennent au niveau du système circulatoire lors de la plongée sont déclenchées après que le cerveau ait reçu un message de détecteurs situés (où?) ___(aa)___ et qui ont détecté (quoi?) ___(bb)_____. Si les mammifères avaient un système circulatoire fermé à un circuit plutôt qu'à deux circuits, ils auraient des problèmes surtout au niveau de (quel organe?) ___(cc)_____. Le deuxième boum du "boum-boum" cardiaque est causé par la fermeture des ___(dd)_____. La circulation ___(ee)___ alimente le myocarde en sang. Le/la/les ___(ff)___ est/sont un exemple d'un animal qui n'a pas de pigment respiratoire. En mots complets, PN₂ veut dire ___(gg)_____. Le volume d'air inspiré ou expiré à chaque cycle respiratoire par un poumon s'appelle "volume ___(hh)___". La résistance à l'écoulement d'un fluide est plus grande dans un tube qui monte vers le haut, dans un tube qui est plus ___(ii)_____, et aussi dans un tube qui est plus ___(jj)_____. Le fait que la quantité de CO₂ puisse influencer le pH du corps est dû à la réaction chimique suivante : ___(kk)_____. L'oxygène se dissout mieux

dans une eau qui est plus froide et aussi dans une eau qui ____ (ll) ____ . On donne le nom de ____ (mm) ____ à l'abaissement de la fréquence cardiaque qui survient chez un animal en plongée. Le beau terme technique " ____ (nn) ____ " désigne la phase de contraction des oreillettes du coeur. La sorte de vaisseau sanguin où s'effectuent principalement la vasoconstriction et la vasodilatation sanguine est ____ (oo) ____ . La boue au fond des lacs ne contient pas d'oxygène; on dira donc que cette boue est un milieu (quel adjectif?) ____ (pp) ____ . Les 4 sous-unités qui forment l'hémoglobine sont parfois retrouvées individuellement dans les cellules des muscles; elles portent alors le nom de ____ (qq) ____ et elle peuvent servir à entreposer une réserve de/d' ____ (rr) ____ . On utilise le terme ____ (ss) ____ pour désigner le phénomène dans lequel l'affinité de l'hémoglobine des poissons pour l'oxygène ne peut pas atteindre 100 % dans des conditions d'acidose. Pour un même volume de sang pompé, la quantité d'énergie consommée par le coeur d'un crabe est (inférieur, similaire, supérieur?) ____ (tt) ____ à celle d'un coeur de poisson de poids similaire. On appelle ____ (uu) ____ le volume total des organes respiratoires qui ne sont pas impliqués dans les échanges gazeux (exemple : gorge, trachée, etc.). Chez les espèces plongeuses, l'organe qui peut relâcher des globules rouges dans la circulation sanguine est le/la/l' ____ (vv) ____ . Une des unités de mesure possibles pour la pression d'un gaz est ____ (ww) ____ . On appelle ____ (xx) ____ un petit tube dont une extrémité est insérée dans un tuyau quelconque du corps (un vaisseau sanguin, par exemple) et dont l'autre extrémité ressort à l'extérieur du corps. Le/la/l' ____ (yy) ____ est un court-circuit entre la circulation pulmonaire et la circulation ____ (zz) ____ chez les crocodiles. La porte qui sépare la trachée de la gorge s'appelle ____ (aaa) ____ . C'est le système ____ (bbb) ____ qui draine l'excès de liquide qui sort des capillaires. La partie du coeur où la paroi est la plus épaisse est le/la/l' ____ (ccc) ____ . Le premier "boum" du "boum-boum" cardiaque correspond à la fermeture des ____ (ddd) ____ qui se trouvent (où précisément dans le coeur?) ____ (eee) ____ . Le gaz qui est impliqué dans le mal des caissons est le/la/l' ____ (fff) ____ . Le terme technique par lequel on désigne le pourcentage de volume sanguin occupé par les globules rouges est ____ (ggg) ____ . Si le sang passe à travers deux réseaux de capillaires, au lieu d'un seul, avant de revenir au coeur, on a affaire à un système ____ (hhh) ____ . Les cellules sanguines sont surtout produites dans (soyez précis) ____ (iii) ____ . La partie du coeur qui reçoit le sang de la circulation pulmonaire est le/la/l' ____ (jjj) ____ . Les branchies peuvent extraire une grande quantité d'oxygène de l'eau parce que le patron de circulation de l'eau en dehors des lamelles et du sang dans les lamelles forment ensemble un système ____ (kkk) ____ . Si on se sent étourdi quand on se lève trop vite, c'est parce que le/la/l' ____ (lll) ____ des vaisseaux sanguins inférieurs ne s'est pas fait assez rapidement. Le mal des caissons est dû à la formation de ____ (mmm) ____ dans nos liquides corporels suite à une remontée en surface (décompression) trop rapide. Les salamandres qui n'ont pas de poumon utilisent (quel autre organe?) ____ (nnn) ____ pour respirer. Pour qu'une pression soit exercée sur les parois d'un tuyau par un liquide qui s'y trouve, il faut deux choses en plus du volume du liquide lui-même : (1) quelque chose qui exerce une force sur le liquide (exemple, un coeur), et (2) ____ (ooo) ____ . On appelle ____ (ppp) ____ le tracé, en fonction du temps, des changements de potentiels électriques mesurés à la surface de la poitrine lors des battements cardiaques.

3) Pour quelle(s) raison(s) mécanique(s) la pression artérielle mesurée dans le circuit pulmonaire d'un vertébré supérieur est-elle inférieure à la pression artérielle mesurée dans son circuit systémique, et quel est l'avantage qu'il en soit ainsi?

4) Il existe des invertébrés relativement gros (les pieuvres, les homards, par exemple), mais on ne retrouve pas d'insectes aussi gros. Pourquoi les insectes géants n'existent-ils pas?

5) Pourquoi se sent-on étourdi quand on se lève trop rapidement?

6) Définissez les termes suivants:

- a) Tachycardie
- b) Myoglobine (sa nature et son rôle)
- c) Espace mort
- d) Diastole auriculaire
- e) Système porte
- f) Loi de Starling
- g) Apnée
- h) Foramen de Panizzae (ce qu'il est et sa raison d'être)

7) Pour un certain animal, le volume sanguin total est 210 ml, le volume systolique est de 0.5 ml, la pression artérielle est 10 mm Hg, le débit cardiaque est 40 ml/min, l'oxygène extrait est 0.5 ml par 100 ml de sang, et le temps de recyclage complet est 6.5 min. Utilisez ces données ou une partie de ces données pour calculer la fréquence de battements cardiaques. Montrez votre calcul.

8) Vous injectez dans le système circulatoire d'un mammifère 75 ml d'une solution 25 M de colorant. Vous attendez une trentaine de minutes et vous prenez un échantillon de 2 ml de sang. Vous centrifugez cet échantillon et vous mesurez que sur les 2 ml de sang, il y en a 0.6 ml qui sont en fait occupés par des globules rouges. Le 1.4 ml qui reste présente une concentration de colorant de 0.85 M.

- a) Quel est le volume sanguin total de l'animal? Montrez votre calcul.
- b) Le colorant injecté doit avoir la particularité de se lier à quelque chose. Quoi? Et à quoi servent ces choses normalement?

9) Dans l'eau de mer, l'oxygène gazeux a un coefficient de solubilité (une tendance à se dissoudre dans l'eau, tout autre chose étant égale) qui est deux fois plus grand que celui de l'azote gazeux. Si je prends un verre d'eau de mer et que je le laisse sur le comptoir pendant plusieurs heures pour qu'il s'équilibre avec l'air, y aura-t-il plus d'oxygène ou plus d'azote dissous dans l'eau du verre? Justifiez votre réponse.

10) Faites un graphique des différentes pressions qu'on peut mesurer tout le long d'un capillaire. Identifier bien les différents types de pressions, ce qui les cause, et indiquez leurs effets sur le mouvement de liquide au travers de la paroi du capillaire. Profitez-en pour expliquer, idéalement à l'aide du graphique, la nécessité d'avoir un système lymphatique.

11) Faites un graphique selon les règles de l'art de la courbe de dissociation hémoglobine-oxygène. À l'aide du graphique mais aussi avec des mots, montrez comment l'effet Bohr mène à une plus grande livraison d'oxygène aux tissus par rapport à la situation sans effet Bohr.

12) Le prof mesure 6'9". Quand il est assis, il fait souvent branler ses jambes. Quel est l'avantage possible pour quelqu'un de très grand de se faire branler les jambes? Expliquez bien la situation.

13) Certaines espèces d'oiseaux peuvent voler à 6000 m d'altitude, mais aucune espèce de chauve-souris ne peut le faire (du moins, pas de façon soutenue). Comment peut-on expliquer cette différence entre oiseau et mammifère?

14) L'hyperventilation des poumons, si elle est prolongée sans que le corps soit particulièrement actif, peut mener à une élévation du pH sanguin. Pourquoi?

15) Nommez et décrivez brièvement trois adaptations aux effets de la gravité que l'on retrouve chez les serpents arboréaux. Je recherche ici des adaptations physiologiques ou anatomiques, pas comportementales.

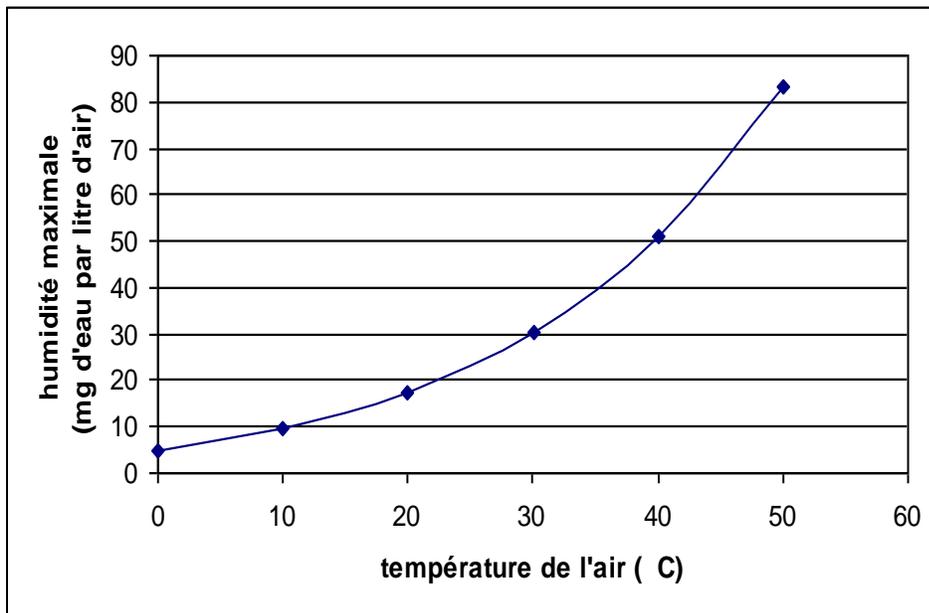
16) En un certain endroit de la circulation sanguine d'un animal, vous mesurez un certain débit, une certaine pression, et une certaine résistance à l'écoulement. Quelques instants plus tard, vous mesurez à nouveau et vous observez que la résistance à l'écoulement est maintenant trois fois plus petite qu'avant et que la pression est deux fois plus grande. Comment le nouveau débit se compare-t-il à l'ancien? Montrez votre calcul.

17) Le graphique ci-dessous représente le taux de saturation en humidité de l'air. Dans laquelle des trois situations suivantes (A, B, ou C) un mammifère, ventilant toujours ses poumons au même taux (donc, pas de changement de fréquence pour des raisons thermorégulatoires), perdrait-il le plus d'eau à cause de sa respiration? Expliquez votre réponse.

A : air ambiant à 0 °C et 100 % d'humidité

B : air ambiant à 20 °C et 75 % d'humidité

C : air ambiant à 40 °C et 50 % d'humidité



18) Une molécule de CO₂ vient d'être produite à l'intérieur d'une cellule du corps. Cette molécule est destinée à être expulsée du corps. Décrivez le chemin que la molécule suivra. Assurez-vous de bien nommer tous les liquides dans lesquels la molécule se retrouvera, tous les vaisseaux sanguins et organes et parties d'organe dans lesquels elle voyagera, toutes les membranes qu'elle traversera, et toutes les substances avec lesquelles elle va interagir. En étant bien précis, vous pourriez trouver au moins 25 items.

19) Si on pense à la façon dont les animaux ventilent (remplissent d'air) leurs poumons, quelles sont les différences entre une grenouille, une tortue, et un chat. Assurez-vous de bien nommer, de la façon la plus précise que vous devriez le pouvoir, les organes impliqués.

20) Nommez 4 facteurs qui influencent la solubilité des gaz dans l'eau. Mentionnez aussi dans quel sens ces facteurs influencent la solubilité du gaz. A noter que ces facteurs peuvent être reliés soit aux gaz dissous, soit à l'eau dans laquelle ils sont dissous.

21) Répondez aux questions suivantes avec une ou deux phrases:

- a) Nommez trois caractéristiques des branchies qui aident les poissons à extraire l'oxygène de l'eau.
- b) Qu'est-ce qu'une crise cardiaque et qu'est-ce qui la cause?
- c) Nommez deux adaptations des espèces plongeuses à grande profondeur qui leur permettent d'emmagasiner de l'oxygène avant de plonger.
- d) Au niveau de la circulation, à quoi sert le système lymphatique?
- e) Que veut dire « systole auriculaire »?
- f) Que veut dire « bradycardie »?

22) Quels changements surviennent dans le système circulatoire d'une girafe lorsque celle-ci abaisse sa tête pour boire? Commencez par décrire la situation avant qu'elle abaisse sa tête, et la raison pour laquelle cette situation existe; décrivez ensuite le ou les changements et la raison pour laquelle il/ils prennent place.

23) Vous devez opérer un gros poisson. Il est sur une table d'opération, dans un linge mouillé pour ne pas qu'il s'assèche. Il est anesthésié et donc il est incapable de faire bouger les muscles responsables de faire circuler l'eau dans ses branchies. Donc vous voulez faire circuler l'eau pour lui à l'aide de tuyaux insérés dans sa cavité buccale ou dans sa cavité operculaire. Un vétérinaire vous dit qu'habituellement l'eau entre par la bouche et sort par les opercules, mais que de façon surprenante on peut ici faire entrer l'eau par les opercules et la laisser sortir par la bouche, et que cela apportera tout autant d'oxygène au poisson. Devriez-vous croire ce vétérinaire? Pourquoi ou pourquoi pas?

24) Quel est le pigment respiratoire des vertébrés? Et pourquoi parle-t-on de « pigment » et de « respiratoire » ?

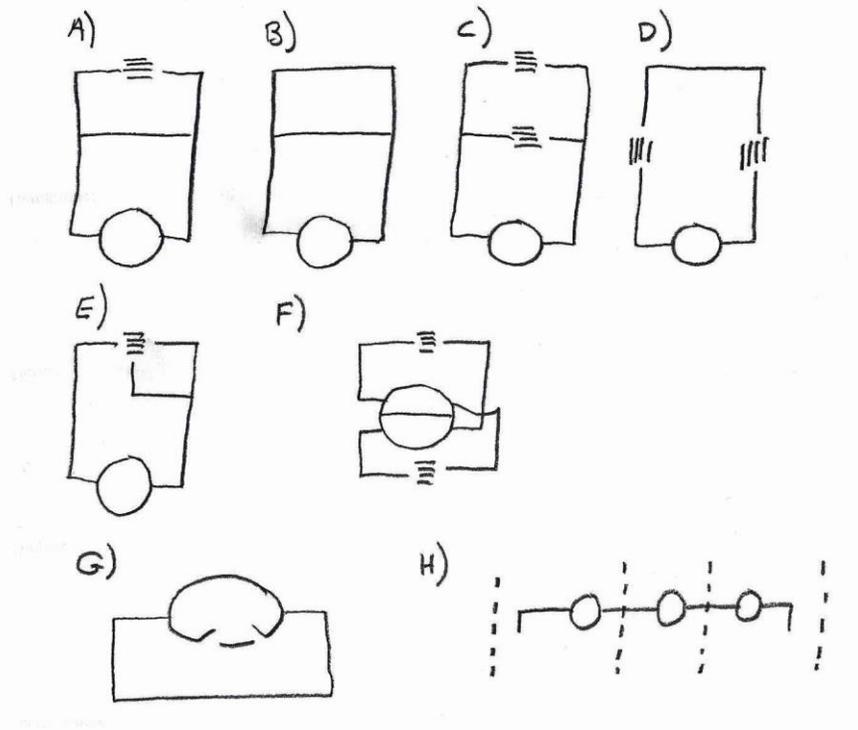
25) Décrivez précisément (à quelqu'un qui n'a jamais pris le cours de physiologie animale comparée) ce qu'est l'effet Bohr, et la raison pour laquelle il est avantageux que l'effet Bohr prenne place à certains moments dans certains tissus.

26) Le plus clairement et complètement possible, expliquez pourquoi un système circulatoire à deux circuits (systémique et pulmonaire, comme chez les mammifères) est considéré plus efficace qu'un système à un seul circuit (comme celui des poissons).

27) La lymphe des mammifères n'est pas rouge, contrairement au sang. Pourquoi, et quelle est la caractéristique des capillaires qui explique ce fait?

28) Il est difficile pour le sang veineux de remonter le long des membres d'un mammifère jusqu'au cœur. Nommez deux adaptations qui aident le sang à remonter les veines.

29) Lequel des huit dessins ci-dessous (identifiés par une lettre) est le meilleur pour représenter un système porte? Pour justifier votre réponse, définissez ce qu'est un système porte.



30) Votre ami vous met au défi de plonger dans le fond de la piscine au CEPS (5 m de profondeur) et d'y passer 5 minutes en respirant par un tuyau connecté à la surface. Pourquoi devriez-vous dire non et mieux choisir vos amis?

31) Le lac Titicaca est situé dans les Andes et il est un des lacs les plus hauts (en altitude) au monde. Dans l'eau de ce lac, on retrouve une espèce de grenouille qui ne se trouve nulle part ailleurs. Cette espèce est particulière. Sa peau est pleine de replis (c'est comme si cette peau appartenait à un animal deux fois plus gros que la grenouille). En termes de physiologie environnementale, pouvez-vous émettre une hypothèse raisonnable qui expliquerait cette adaptation? Faites bien le lien complet, étape par étape, entre le milieu montagnard, d'une part, et les tissus de la grenouille, d'autre part.

32) Un insecte s'écrase sur le pare-brise de votre automobile et laisse une grande marque de sang rouge. Que pouvez-vous dire sur l'écologie de cet insecte, et quel est le fait physiologique qui vous permet de faire cet énoncé écologique?

33) Le système respiratoire des mammifères a un impact sur la quantité d'eau qu'il y a dans leur corps. Quel est cet impact? (Décrivez la situation de base à l'intérieur du système respiratoire, dites pourquoi il en est ainsi, dites ensuite ce qui se passe quand l'animal respire, et la conséquence pour la quantité d'eau dans le corps)

34) Une ampoule est un amas de liquide transparent sous l'épiderme causé par une friction entre la peau et un objet (un manche de pelle par exemple). Expliquez comment une ampoule se forme.

35) Les espèces plongeuses ont une rate particulièrement bien développée. Pourquoi? (Dites à quoi sert la rate et comment ce rôle est relié à la physiologie d'une espèce à respiration aérienne lors de la plongée.)

36) Un vétérinaire qui veut faire une prise de sang sur une vache malade (pour faire des tests sanguins dans le but de déterminer quelle est la maladie) commence par faire pression avec sa main sur une partie du cou de la vache, attend quelques secondes et puis insère l'aiguille d'une seringue dans le cou. Expliquez cette façon de procéder.

37) Nommez trois adaptations aux effets de la gravité que l'on retrouve dans le système circulatoire des serpents arboréaux.

38) Répondez à chacune des questions suivantes par une seule phrase complète.

- a) Lorsqu'un animal terrestre plonge sous l'eau, qu'arrive-t-il à la fréquence de battements cardiaques?
- b) Quel nom donne-t-on à ce phénomène?
- c) Pourquoi ce phénomène se produit-il (quel est l'avantage)?
- d) Qu'est-ce qui permet à tous les tissus du corps de bien survivre malgré ce phénomène?

39) Sur un même graphique, dessinez deux courbes de dissociation oxygène-hémoglobine, l'une correspondant à une situation où la température est basse, l'autre correspondant à une situation où la température est plus élevée. Assurez-vous que votre graphique est complet et bien fait.

40) Imaginez que le texte suivant vient d'apparaître dans un magazine de vulgarisation scientifique. Une bonne physiologiste y détecterait un certain nombre d'erreurs et d'inexactitudes. Identifiez-les.

« Lors d'une expérience sur la fonction des alvéoles dans le poumon d'un goéland, des scientifiques ont récemment découvert que, lorsque le pH sanguin dans les capillaires est bas, l'oxygène a de la difficulté à traverser la paroi des alvéoles, ce qui cause une saturation incomplète de l'hémoglobine. Il s'agit là d'un bel exemple d'effet Root, lequel a déjà été démontré chez plusieurs autres oiseaux et mammifères. La saturation incomplète de l'hémoglobine finit par entraîner une baisse de la concentration d'oxygène dans le sang, laquelle est détectée par des récepteurs artériels qui envoient un message au cerveau de l'oiseau, stimulant ainsi l'oiseau à augmenter sa fréquence respiratoire. »

41) Puisque l'air contient plus d'oxygène et est plus facile à déplacer que l'eau, comment se fait-il qu'un poisson exposé à l'air meurt d'asphyxie? Utilisez un raisonnement aussi complet que possible.

42) Vous êtes un employé au zoo de Moncton et une partie de votre travail consiste à expliquer au public la biologie des animaux du zoo. Vous êtes en face de l'enclos de la girafe et quelqu'un (un barbu à lunettes qui mesure 6'9", alors c'est peut-être votre ancien prof de physio animale qui veut vous tester) vous demande si la hauteur exceptionnelle de cet animal a des conséquences sur sa physiologie circulatoire. Pouvez-vous nommer deux adaptations particulières du système circulatoire de la girafe et expliquer pourquoi ces adaptations sont utiles?

43) Quelle est la principale différence entre l'hémoglobine d'une vache et celle d'un chat, et comment expliquer cette différence?

44) Vrai ou Faux? Attention: si vous dites "faux", vous devez aussi me dire quelle partie de la phrase est fautive, et comment cette partie devrait être ré-écrite pour rendre la phrase vraie.

- a) Chez un homard de 500 g, le volume sanguin, le débit cardiaque, et la pression artérielle sont plus élevés que chez un poisson de 500 g.
- b) L'avantage d'un système sanguin à deux circuits est de pouvoir maintenir une haute pression dans le circuit systémique (pour bien amener le sang partout) et une basse pression dans le circuit pulmonaire (pour éviter la perte excessive de lymphe au niveau des poumons).
- c) Chez les amphibiens, le coeur comprend une oreillette droite et une oreillette gauche, et un ventricule non-divisé.
- d) Les prises de sang se font à partir des veines car la pression sanguine élevée qu'on y retrouve favorise le remplissage rapide du sac dans lequel le sang du donneur est récupéré.
- e) A l'entrée d'un capillaire, la pression hydrostatique du sang est moins élevée que la pression osmotique due aux colloïdes du plasma sanguin, et donc le plasma a tendance à sortir du capillaire.
- f) Les serpents arboréaux ont une meilleure capacité de vasodilatation au niveau de la queue que les serpents aquatiques.
- g) Par vasoconstriction au niveau des veines de ses jambes, la girafe combat les effets de la gravité et aide le sang à monter au cerveau.
- h) Dans les capillaires, du plasma sort parce que la pression hydrostatique est plus élevée que la pression osmotique, et tout ce plasma se fait reprendre par le système lymphatique.
- i) L'adrénaline libérée par les nerfs sympathiques qui sont connectés au coeur, ou libérée par les glandes surrénales, accélère la fréquence cardiaque.
- j) Les espèces adaptées à la plongée peuvent accumuler beaucoup d'oxygène dans l'hémoglobine de leurs muscles.

45) Au sommet du mont Everest, quel est le gaz le plus abondant dans l'air?

46) Quelle est la particularité du système respiratoire des insectes quand on le compare à d'autres invertébrés ou à même à des vertébrés? Dans votre réponse, nommez les principaux organes anatomiques impliqués.

47) On maintient une grenouille sous l'eau pendant 8 heures et on ne parvient quand même pas à la noyer. Après l'avoir sortie de l'eau, on retrouve peu d'acide lactique dans ses tissus. Comment expliquer ces résultats?

48) Donnez un exemple de l'utilité d'un système à contre-courant dans le domaine des échanges respiratoires.

- 49) Dans un contexte physiologique, qu'est-ce que le diaphragme et à quoi sert-il?
- 50) Dans des conditions normales, comment se fait-il que l'hémoglobine se lie à l'oxygène dans les capillaires des poumons, mais relâche l'oxygène dans les capillaires des tissus?
- 51) Nommez trois caractéristiques des organes respiratoires des animaux terrestres qui augmentent le taux de diffusion des gaz à travers leur paroi.
- 52) Dites ce qu'est une canule, et nommez une variable physiologique que l'on peut mesurer en utilisant une canule.
- 53) Chez un mammifère, comment nomme-t-on:
- a) le vaisseau sanguin qui sort du ventricule droit?
 - b) le vaisseau sanguin qui amène le sang au cerveau?
 - c) le vaisseau sanguin qui ramène le sang du cerveau?
- 54) Normalement, je prends 12 respirations par minute, avec un volume tidal de 500 ml, pour une ventilation totale de 6000 ml / min. Est-ce qu'il y aurait des conséquences particulières si, pendant les minutes qui s'en viennent, je prenais 40 respirations par minute avec un volume tidal de 150 ml? Si oui, quelle conséquence et pourquoi? Si non, pourquoi pas?
- 55) Faites un graphique, bien complet, bien soigné, qui illustre les pressions exercées sur le sang à différents endroits le long d'un capillaire, pressions qui expliquent le passage du plasma à travers la paroi des capillaires. Étiquetez bien chacune des courbes ou droites en disant quel type de pression est représentée et quelle en est la cause. Servez-vous aussi de ce graphique pour expliquer la nécessité pour l'organisme d'avoir un système lymphatique (vous devrez donc donner la fonction du système lymphatique).
- 56) Quels sont les trois facteurs qui déterminent la difficulté qu'aura un liquide à circuler dans un tube (par exemple, la difficulté qu'aura du sang à circuler dans un vaisseau sanguin)? En plus de nommer chacun de ces facteurs, dites quel niveau du facteur correspond à une plus grande difficulté de circulation.
- 57) Vasoconstriction: Lequel, entre un serpent arboréal et un serpent aquatique, a le plus de chance d'être capable d'en faire, dans quel type de vaisseau sanguin, à quel niveau du corps, et dans quel but ultime?
- 58) Deux milieux A et B sont séparés par une paroi X. Deux milieux M et N sont séparés par une paroi Z. La différence de pression partielle de l'oxygène entre A et B est trois fois plus grande que celle entre M et N. X est deux fois plus épaisse que Z. Le coefficient de perméabilité de X à l'oxygène est deux fois plus petit que celui de Z. La superficie de X est quatre fois plus grande que celle de Z. Va-t-il y avoir plus d'oxygène qui va diffuser à travers de X qu'à travers de Z par unité de temps, et si oui, combien de fois plus (ou si non, combien de fois moins)? Montrez votre calcul ou expliquez votre raisonnement.
- 59) Pourquoi y a-t-il très peu d'endroits sur le corps où on peut prendre le pouls? Expliquez le plus complètement possible.

60) Expliquez à vos parents pourquoi il y a peu d'endroits dans le corps où ils peuvent prendre leur pouls.

61) Dans le premier film « *Jurassic Park* », un vélocirapteur (un dinosaure, donc un reptile) s'apprête à entrer dans la cuisine pour y attaquer les deux enfants qui s'y cachent. Il commence par regarder par la fenêtre de la porte, et expire violemment. De la buée se forme alors sur la fenêtre. Expliquez à vos amis quelle est l'hypothèse « *nerd* » sur la physiologie des dinosaures que les réalisateurs du film ont admirablement intégrée dans cette scène.

62) Expliquez à la classe de plongée sous-marine dont vous êtes prof ce qui se passe dans le cas du mal des caissons.

63) En une phrase (mais quand même une phrase bien complète, qui peut donc être relativement longue), dites pourquoi :

- a) Il y a beaucoup plus d'espèces de poissons qui pratiquent la respiration aérienne dans les régions tropicales que dans les régions tempérées.
- b) La très grande majorité des amphibiens se retrouvent toujours dans des milieux humides.
- c) Les girafes exhibent un plus grand volume tidal que d'autres mammifères de même poids.
- d) La pression sanguine est plus élevée dans les artères que dans les veines.

64) Une girafe lève son cou, le faisant passer d'une position horizontale à une position verticale (avec la tête élevée). Qu'est-ce qui arrive ailleurs dans son corps (ailleurs que dans le cou ou la tête) et pourquoi?

65) Les anguilles sont des poissons qui peuvent sortir de l'eau et ramper sur terre sur des distances de plusieurs centaines de mètres, pour passer d'une rivière à une autre par exemple. Pour quelle raison physiologique (pas écologique) est-ce que les anguilles ont plus tendance à faire cela la nuit plutôt que le jour?

66) Parmi les choses suivantes, laquelle ou lesquelles (il peut y en avoir plus qu'une) est/sont une adaptation typique d'un animal adapté à la plongée en grande profondeur?

- a) Grande quantité de myoglobine
- b) Grand volume tidal
- c) Grande quantité d'anhydrase carbonique
- d) Bonne capacité de tachycardie
- e) Grande capacité de métabolisme aérobie dans les organes non-essentiels
- f) Vasoconstriction sélective lors de la plongée

67) Parmi les choses suivantes, laquelle ou lesquelles (il peut y en avoir plus qu'une) peu(ven)t expliquer la présence d'une pression sanguine élevée?

- a) Vasodilatation importante
- b) Circuit sanguin long
- c) Hématocrite élevée
- d) Effet Bohr prononcé
- e) Volume sanguin plus élevé
- f) Diastole ventriculaire plus longue

68) Parmi les choses suivantes, laquelle ou lesquelles (il peut y en avoir plus qu'une) diminue(nt) l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène?

- a) Une température plus élevée
- b) Un pH plus élevé
- c) Une bonne adaptation à l'altitude
- d) Le fait d'être un fœtus
- e) Le fait d'être une espèce possédant un plus gros corps
- f) La présence d'un Effet Root.

69) Parmi les choses suivantes, laquelle ou lesquelles (il peut y en avoir plus qu'une) est/sont associée(s) à la trachée des vertébrés?

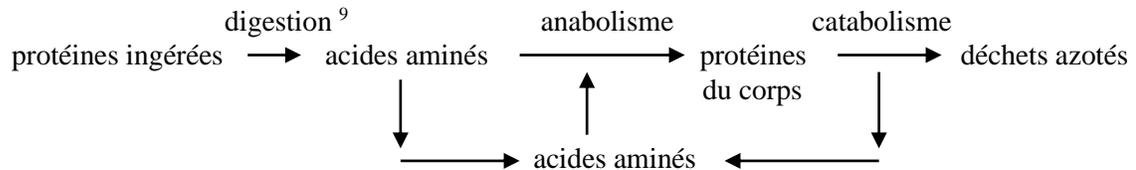
- a) Opercules
- b) Larynx
- c) Épiglote
- d) Espace mort
- e) Acidose respiratoire
- f) Ronflement (des humains ou des vieux chiens)

70) Artère-artériole-capillaire-veine-capillaire-veinule-veine. Comment appelle-t-on un tel arrangement?

Chapitre 21

Digestion: nutriments

Protéines:



Les produits du catabolisme (dégradation) des vieilles protéines du corps sont appelés « déchets azotés » parce qu'ils contiennent de l'azote, constituante typique des protéines. Ces déchets azotés sont habituellement excrétés dans l'urine de l'animal. Les différents déchets azotés sont :

Urée	chez	mammifères, amphibiens adultes, requins.
Acide urique	chez	reptiles, oiseaux, insectes.
Ammoniaque	chez	poissons, larves d'amphibiens.
Guanine	chez	araignées.

Lors de la digestion, les protéines sont brisées par des endopeptidases, c'est-à-dire des enzymes qui attaquent les chaînes peptidiques (les chaînes d'acides aminés que sont les protéines) à partir de l'intérieur (endo = intérieur); elles brisent le lien entre deux acides aminés à l'intérieur de la chaîne. Les deux principales endopeptidases du système digestif sont :

Pepsine:	- fonctionne mieux à un pH de 2 (acide); - sécrétée dans l'estomac avec HCl (qui justement rend le milieu acide, et qui dénature les protéines).
Trypsine:	- fonctionne mieux à un pH > 7 (alcalin); - sécrétée par le pancréas et déversée dans l'intestin.

La digestion des protéines peut aussi se faire par des exopeptidases, des enzymes qui attaquent les chaînes peptidiques par les bouts; elles décrochent le dernier acide aminé d'une chaîne.

⁹ La très grande majorité des protéines ingérées sont brisées (digérées) dans le tube digestif pour libérer leurs acides aminés constitutants, lesquels sont absorbés, mais il y a quelques exemples de petites chaînes peptidiques absorbées tel quel, sans digestion préalable. C'est le cas notamment des anticorps présents dans le lait maternel.

Les protéines sont nécessaires, surtout pour les animaux en croissance (les protéines sont les matériaux de base dans la construction du corps), mais aussi pour les animaux adultes car il y a régénération continue des structures du corps (peau, cheveux, muscles, etc.) et des substances protéiniques importantes (ex. : enzymes, anticorps, hémoglobine, hormones, récepteurs et transporteurs membranaires).

Q Prenez une mouche femelle qui est en train de synthétiser ses oeufs et donnez-lui un choix de nourriture entre une solution de protéines et une solution de sucre. Laquelle va-t-elle choisir, et pourquoi?

Q Vous apprenez que les moustiques qui vous piquent sont seulement des femelles. Les mâles, eux, se nourrissent de sève de plante. Pouvez-vous expliquer ce fait?

Q Vous apprenez que presque toutes les espèces d'oiseaux nourrissent leurs jeunes avec des insectes ou autres arthropodes, ou avec de la viande, mais pas avec des graines ou des fruits, même les espèces qui sont granivores ou frugivores à l'âge adulte. Pouvez-vous expliquer ce fait?

Les animaux peuvent synthétiser certains acides aminés, dits « non-essentiels », à partir d'autres acides aminés. Les acides aminés dits essentiels ne peuvent pas être synthétisés par le corps et doivent donc être obtenus tel quel dans la nourriture. (Attention, « non-essentiel » ne veut pas dire non-nécessaire. Les acides aminés « non-essentiels » sont quand même nécessaires; c'est juste qu'il est non-essentiel de les obtenir tel quel dans la nourriture puisque le corps peut les former par lui-même à partir des autres acides aminés obtenus dans la nourriture.)

La viande contient tous les acides aminés essentiels et non-essentiels; les carnivores n'ont donc pas à s'en soucier.

Mais certaines plantes ne contiennent pas tous les acides aminés essentiels. Chez l'humain, les végétariens doivent balancer leur régime alimentaire avec plusieurs plantes. Par exemple, les fèves manquent de méthionine, le blé manque de lysine, le blé d'inde (maïs) manque de tryptophane, tous des acides aminés essentiels. Un régime végétarien basé seulement sur le maïs, par exemple, entraînerait des maladies car le corps deviendrait déficient dans les protéines qui exigent le tryptophane dans leur synthèse (le tryptophane étant presque absent du maïs qui sert de seule nourriture, et le corps ne pouvant pas synthétiser son propre tryptophane). Les animaux herbivores doivent aussi varier leurs sources de nourriture.

Glucides: Saccharides simples (monosaccharides, oses simples) ou double (disaccharides) ou en longue chaîne (polysaccharides). Lors de la digestion, les disaccharides et polysaccharides sont brisés en monosaccharides qui sont absorbés tel quel.

Les glucides servent surtout de source d'énergie: ils sont presque tous convertis dans le corps en glucose (un monosaccharide), lequel est utilisé pour obtenir de l'ATP par glycolyse anaérobie dans le cytoplasme des cellules et/ou par oxydation aérobie dans les mitochondries.

Le glucose peut aussi être converti en glycogène pour entreposage à court terme (le glycogène consiste en plusieurs molécules de glucose attachées les unes à la suite des autres dans une longue chaîne avec embranchements). La conversion en glycogène se fait à l'intérieur des cellules du foie et des muscles. La reconversion en glucose se fait elle aussi dans ces cellules.

L'insuline est l'hormone qui permet aux cellules musculaires de laisser entrer le glucose. Les diabétiques, qui manquent d'insuline (diabète de type I), ou chez qui les récepteurs cellulaires de l'insuline devient moins efficace (diabète de type II), ont beaucoup de glucose dans leur sang parce que leurs cellules musculaires ne peuvent pas absorber le glucose. (Mais les neurones peuvent encore absorber le glucose car ils n'ont pas besoin de l'insuline pour cette tâche – heureusement, car les neurones ont absolument besoin de glucose comme source d'énergie.) Le glucose en excès dans le sang est éliminé par les reins et se retrouve dans l'urine (c'est là le meilleur signe du diabète, car l'urine normalement ne contient pas de glucose). Les cellules musculaires des diabétiques ne peuvent utiliser que les lipides comme source d'énergie. Les produits de réaction du métabolisme des lipides dans les muscles –les cétones– se retrouvent aussi dans l'urine et lui donnent une odeur fruitée (un autre signe de diabète).

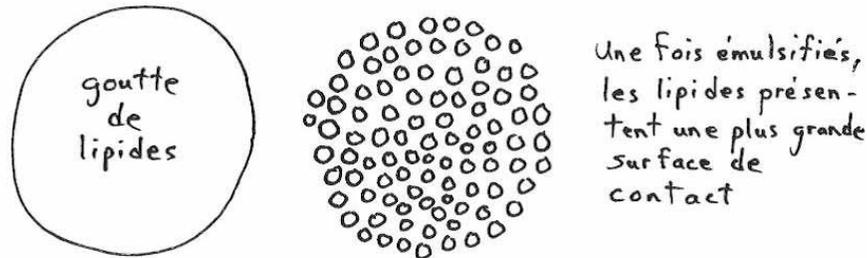
Amidon: L'équivalent végétal du glycogène (la seule différence est que les embranchements de la chaîne sont un peu différents), il est brisé par l'amylase, enzyme sécrétée dans la salive et par le pancréas. L'action de l'amylase est bien meilleure si l'amidon a été chauffé au préalable (donc, maintenant vous savez pourquoi on fait bouillir ou frire nos patates plutôt que de les manger crues, et pourquoi on fait du pain ou des biscuits ou des gâteaux au four plutôt que de manger la farine crue – et vous devinez aussi quel est le principal nutriment retrouvé dans les patates et la farine, et dans tous les grains).

Cellulose: Le principal polysaccharide contenu dans les fibres végétales. La cellulose forme la paroi cellulaire des cellules végétales, paroi que le système digestif doit briser s'il veut avoir accès aux nutriments renfermés dans la cellule. La cellulose est brisée par la cellulase, une enzyme qui n'est produite que par certaines bactéries, protozoaires, champignons, les poissons d'argent, et quelques coléoptères. Tous les herbivores doivent abriter, dans leur système digestif, des micro-organismes porteurs de cellulase. Sinon, ils ne pourraient pas avoir accès aux nutriments contenus dans les cellules végétales.

Les termites sont un exemple. Leur système digestif contient des protozoaires producteurs de cellulase. Ces protozoaires sont des anaérobies obligatoires. Si on expose les termites à des pressions d'O₂ trois fois plus élevées que la normale, les termites survivent, mais pas leurs protozoaires internes. Ces termites ne peuvent plus digérer le bois et finissent elles-aussi par mourir, mais de faim.

Lipides: Graisses animales, huiles végétales, glycérides, stérols.

- Rôles:
 - source d'énergie (sauf dans le cerveau, lequel n'accepte que le glucose);
 - entrepôt d'énergie à long terme (graisse entreposée à différents endroits du corps);
 - isolant thermique (couche de graisse sous-cutanée);
 - structure (membrane cellulaire, certaines hormones, etc.).
- Lors de la digestion, les lipides sont brisés par des enzymes appelées lipases. Il en résulte des acides gras, du glycérol, ou divers stérols, qui sont absorbés.
- Problème: Les lipases ont besoin d'eau pour fonctionner. Or, les lipides sont hydrophobes et insolubles dans l'eau: ils tendent à s'agglutiner en gouttes qui excluent l'eau. Les lipides ont donc besoin d'être émulsifiés (= brisées en petites gouttelettes) avant d'être attaquées par les lipases. Au total les petites gouttelettes présentent une plus grande surface de contact avec l'eau et avec les lipases que l'unique grosse goutte d'origine. L'émulsification se fait par les sels biliaires produits par le foie, intégrés à la bile qui est entreposée dans la vésicule biliaire, et puis déversée dans l'intestin lors d'un repas.



Vitamines:

Composés organiques autres que les protéines, les glucides ou les lipides, et qui sont nécessaires pour le bon fonctionnement du corps (elles agissent souvent comme co-enzymes).

ex.: vitamine C = acide ascorbique. Chez l'humain (seulement), son manque entraîne le scorbut, c'est-à-dire la formation insuffisante de collagène (la protéine la plus abondante du corps; elle sert de « colle » pour tenir le corps ensemble).

ex.: vitamine A = carotène. Son manque entraîne un problème de vision la nuit.

Attention: un excès des vitamines liposolubles (A, D, E, K) peut être toxique.

ex.: les vitamines liposolubles sont emmagasinées dans le foie de certains animaux (surtout des carnivores); les premiers explorateurs polaires qui manquaient de nourriture et qui mangeaient alors le foie de leurs chiens de traîneau mourraient d'empoisonnement par « hypervitaminose A » (= excès de vitamine A).

À noter que les vitamines ne sont pas digérées (brisées dans le tube digestif) car elles sont suffisamment petites pour être directement absorbées tel quel.

Les besoins en vitamines de certains animaux sont peu connus car ces animaux refusent souvent de se nourrir à partir de produits synthétiques. Pour connaître les effets des nutriments ou de leur manque sur la santé d'un animal, il faut pouvoir manipuler précisément la composition de la nourriture dans des expériences, et cela revient à dire qu'il faut manufacturer les aliments et les donner aux animaux sous forme de moulée. Or, ce ne sont pas tous les animaux qui acceptent de manger de la moulée. En général les mammifères et les oiseaux acceptent, mais les reptiles, amphibiens, poissons, et invertébrés sont beaucoup plus réticents. Par exemple, les grenouilles ne mangent que des proies qu'elles ont vu bouger et qu'elles ont attrapées elles-mêmes.

Minéraux: Éléments ingérés sous forme d'ions et absorbés tel quel.

Na (sodium): L'ion Na^+ est essentiel pour la conduction nerveuse, le transport à travers les membranes cellulaires, et plusieurs autres processus physiologiques.

Les carnivores ont accès à beaucoup de sodium dans la viande, mais les herbivores ont plus de problèmes, surtout les mammifères qui passent l'hiver ici. De là les comportements suivants:

- Porc-épics qui grugent les pagaies de canot, les poignées de pelles, ou autres choses qui ont entré en contact avec la sueur humaine, laquelle contient un peu de Na^+ .
- Mouflons et chevreuils qui voyagent de longues distances pour licher le sel de certaines roches ("*salt licks*"), ou boire l'eau de certaines sources, toutes riches en sodium.
- Orignal qui se nourrit de plantes submergées (ils vont jusqu'à plonger pour les obtenir) car les plantes aquatiques ont des concentrations en sodium 10-400 fois plus élevées que les brindilles d'arbustes.
- Gorilles qui mangent du bois en décomposition; ce bois contient du sodium.
- Être humain qui inonde sa nourriture sous le sel (NaCl). Nous avons évolué à partir de singes frugivores, et nous avons hérité leur goût très fort pour le sel. Dans un environnement où le sel est rare, comme celui de nos ancêtres évolutifs, cet amour du sel était avantageux; mais dans notre environnement moderne où nous pouvons facilement extraire le sel des roches ou de l'eau de mer, l'amour du sel nous pousse à en consommer trop, ce qui nous fait faire de l'hypertension artérielle, avec risques accrus de crises cardiaques, d'accidents vasculaires cérébraux, ou de problèmes rénaux.

Ca (calcium): L'ion Ca^{++} est essentiel pour la conduction nerveuse et la contraction musculaire.

Le calcium est aussi utilisé dans la formation des os, des écailles d'oeufs, des coquilles de mollusques, et du lait. L'appétit pour le calcium augmente donc pendant certaines périodes où le besoin est plus grand, comme par exemple :

- Femelles d'oiseaux avant de pondre.
- Femelles de mammifères en lactation.
- Cervidés mâles en train de faire pousser leurs bois, qui sont faits de tissu osseux.

Tous ces animaux, si on leur offre une solution concentrée en calcium, vont en boire plus à ces périodes de l'année. Si la quantité de calcium disponible dans la nourriture ou dans l'eau n'est pas suffisante, ils vont alors extraire du calcium de leur propres os (faits en grande partie d'hydroxyapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) avec danger croissant de fracture.

Les vétérinaires doivent souvent traiter la « fièvre du lait » chez les vaches laitières qui viennent de donner naissance à un veau. Dans les quelques jours après avoir donné naissance, la vache produit beaucoup de lait, et le lait contient beaucoup de Ca^{++} . La production de lait est tellement grande que les glandes mammaires finissent par extraire trop de Ca^{++} du sang, et il ne reste plus assez de Ca^{++} dans le sang pour les autres fonctions physiologiques de la vache (on parlera alors d'hypocalcémie; hypo = inférieur, calc = calcium, émie = dans le sang). La vache devient faible (par exemple, elle ne peut plus se lever debout – la contraction musculaire se fait mal). Le traitement est l'injection de calcium additionnel dans la circulation sanguine.

Les ions du chlore, magnésium, phosphate, soufre, et potassium sont aussi importants.

D'autres minéraux, appelés « oligoéléments » sont essentiels mais en petites quantités seulement; en grandes quantités, ils peuvent être toxiques.
(« oligo » veut dire « rare »)

- fer (qui fait partie de la molécule d'hémoglobine)
- cuivre
- iode (qui fait partie de la structure des hormones thyroïdiennes; les manufacturiers l'ajoute au sel de table pour éviter le manque d'hormones thyroïdiennes chez l'humain)
- cobalt
- zinc (qui fait partie de la structure de plusieurs enzymes)
- manganèse
- vanadium
- etc.

Les compagnies qui confectionnent les aliments pour animaux domestiques ou pour étudier la nutrition chez les animaux doivent tenir compte de la teneur en minéraux, incluant les oligoéléments, et aussi en nutriments essentiels (c'est facile d'oublier).

Questions à réflexion :

- Q** 1) Notre système digestif contient-il des « vitaminases »?
- Q** 2) Les légumes contiennent beaucoup de vitamines. En ce qui concerne les vitamines hydrosolubles (B et C), pourquoi est-il désavantageux, en termes de nutrition, de faire bouillir les légumes avant de les manger?
- Q** 3) La « fièvre du lait » des vaches est une maladie mal nommée. Pourquoi, pensez-vous?
- Q** 4) Une étude au Québec a observé, tout au long de l'année, les orignaux qui visitaient une source d'eau minérale dans une forêt. Au printemps c'était surtout des femelles qui visitaient la source pour s'en abreuver, mais en été et en automne c'était surtout des mâles. Comment expliquer ces résultats?

Q 5) Votre oncle est un maniaque des oiseaux. Il sort dans la nature les fins de semaine pour observer les oiseaux sauvages, il installe des mangeoires dans sa cour arrière, il installe des nichoirs aussi. Au printemps, il a l'habitude de broyer des coquilles d'œufs (qui viennent des œufs qu'il mange à son déjeuner) et à épandre ces petits morceaux de coquilles dans sa cour. Pourquoi fait-il cela?

Q 6) Dans les champs des fermes laitières, on voit parfois des blocs carrés que les vaches semblent aimer lécher. À quoi servent ces blocs?



Q 7) Considérez les œufs de poule que vous mangez le matin. Le blanc d'œuf est riche en protéines, le jaune d'œuf est riche en lipides. Pourquoi est-ce qu'un œuf contient beaucoup de protéines et de lipides?

Q 8) Dans le schéma qui débute la section « Protéines » de ce chapitre, on voit « Acides aminés » dans la plus basse ligne. Quel est l'adjectif particulier qu'on peut donner à ces acides aminés?

- Q** 9) Une expérience a comparé le poids du fémur (le grand os de la cuisse) chez un groupe de rates (rats femelles) qui venaient tout juste de sortir de leur période de lactation (leurs petits venaient tout juste d'être sevrés), versus un groupe de rates qui n'avaient pas été en période de lactation. Ils ont trouvé une différence entre les deux groupes. Devinez quelle était cette différence et expliquez-la.
- Q** 10) Vous lisez dans un livre de nutrition animale que la vitamine C est un nutriment non-essentiel pour les vaches. Laquelle des interprétations suivantes serait la meilleure?
- a) La vitamine C ne sert à rien dans le corps des vaches.
 - b) Les végétaux que les vaches mangent contiennent toujours de la vitamine C.
 - c) La vache, contrairement à l'être humain, peut facilement synthétiser sa propre vitamine C à partir d'autres substances, et les notes de cours du prof sont mal faites parce qu'il a parlé de l'adjectif « non-essentiel » seulement dans le cadre des acides aminés et il aurait dû mentionner que ça s'applique aussi parfois à d'autres types de nutriments.
- Q** 11) Les quelques communautés Inuits qui vivent encore de façon traditionnelle savent, par transmission orale de génération en génération, qu'il ne faut pas manger le foie d'un ours polaire. Superstition ou bonne leçon de nutrition? Et pourquoi alors pouvez-vous manger du foie de vache ou de porc?
- Q** 12) Au laboratoire, vous avez une solution d'une sorte de protéines que vous voulez décomposer en acides aminés pour évaluer la composition de la protéine. Dans ce but vous ajoutez des gouttes de pepsine à la solution, sachant que la pepsine est une peptidase. Mais les protéines restent essentiellement intactes! Pourquoi est-ce que ça n'a pas marché?

- Q** 13) Les pâtes alimentaires sont faites à partir de semoule de blé, donc de grains de blé. Pourquoi les coureurs et coureuses de marathon mangent-ils de grosses assiettes de spaghetti la veille de leur compétition? (Indice : en anglais, on appelle cette stratégie « *carbo-loading* ».)
- Q** 14) Les muscles des coureurs de marathon travaillent sans arrêt pendant longtemps, mais avec un bon apport en oxygène (l'effort est long mais pas trop intense, et les systèmes respiratoire et circulatoire réussissent à fournir la quantité d'oxygène nécessaire pour que le métabolisme aérobie suffise aux besoins). Quand un muscle se contracte, ses sources d'énergie sont : ATP déjà présent pour les premières 4-6 secondes, puis créatine phosphate (une sorte d'entrepôt d'ATP) pendant les quelques 15 secondes qui suivent, puis le glucose qui vient de la dégradation de « A » pendant 1-2 h, puis « B » à la place du glucose pour le reste du temps. Qu'est-ce que A et qu'est-ce que B? (Soit dit en passant, le passage de A à B comme source d'énergie occasionne une plus grande sensation de fatigue, ce qu'on appelle « frapper le mur ».)
- Q** 15) Un bocal contient une mouche. Deux pipettes, une contenant une solution de protéines et une contenant une solution de sucre, sont insérées dans le bocal, et la mouche peut boire/manger à partir de n'importe laquelle des deux. En mesurant la baisse du niveau de solution dans chaque pipette, on peut savoir combien de protéines et de sucre la mouche consomme à chaque jour. Si on fait cela avec des mâles et des femelles pour les premières trois semaines de leur vie adulte, on s'aperçoit que les mâles consomment presque seulement du sucre; les femelles, elles, consomment surtout des protéines pendant la première semaine, et surtout du sucre par la suite. Expliquez ces résultats.
- Q** 16) Par sélection artificielle, il est possible de développer des races d'animaux (ex. : bœufs) très musclés (et par entraînement physique on peut développer des humains très musclés). Mais ça c'est artificiel. Comment se fait-il que les espèces très musclées sont essentiellement inexistantes en nature?

- Q 17) Vous vivez à la campagne. Votre voisin est un éleveur de poulets et il est le propriétaire d'un grand poulailler commercial. Il vous apprend que la moulée qu'il donne à manger à ses poulets contient des coquilles moulues d'huître et autres bivalves (une façon de recycler les déchets des usines de transformation des produits de la mer). Son poulailler contient-il des poulets à griller (« *broilers* », que vous mangerez bientôt à la rôtisserie) ou plutôt des poules pondeuses (« *layers* », dont vous achèterez bientôt les œufs au supermarché)?
- Q 18) Comment se fait-il qu'une poule puisse continuer à pondre des œufs, pendant un certain temps, même quand son régime alimentaire devient totalement déficient en calcium?
- Q 19) Les systèmes de filtration des aquariums contiennent habituellement un substrat qui sert de milieu de croissance pour des bactéries du genre *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*. À quoi servent ces bactéries? Indice : regardez bien leur nom.
- Q 20) Votre amie fait l'hypothèse que le nombre de jeunes qu'une espèce d'oiseaux peut produire à chaque année est limité par la quantité de nourriture que les oiseaux peuvent trouver dans leur territoire. Pour tester cette hypothèse, elle veut placer de la moulée pour poulets dans les territoires de plusieurs couples reproducteurs, et comparer leur nombre d'œufs pondus, et leur nombre de jeunes sevrés, avec des couples pour lesquels elle n'ajoutera rien à leur territoire. Que lui conseillez-vous de vérifier pour que son expérience soit bien faite?
- Q 21) Quand il y a beaucoup de nourriture dans l'habitat d'un lézard ou d'un crocodile, la grosseur de sa queue augmente. Pourquoi?

Chapitre 22

Digestion: anatomie fonctionnelle du système digestif

Bouche (cavité buccale) :

La bouche est souvent munie de structures qui aident à l'obtention de nourriture :

Beaucoup d'invertébrés aquatiques et de poissons obtiennent le phytoplancton ou le zooplancton dont ils se nourrissent par filtration. Ils font circuler de l'eau sur une surface recouverte de mucus (cette surface peut appartenir aux branchies dans certains cas). Les particules alimentaires sont piégées par le mucus, et l'animal mange ce mucus. Les fanons de certaines baleines et la frange du bec des flamants roses représentent un autre type de prise de nourriture par filtration.

Certains animaux sont spécialisés pour se nourrir de liquides. Beaucoup d'invertébrés ont des structures buccales pour percer la cuticule des plantes pour se nourrir de leur sève, ou percer la peau d'animaux pour se nourrir de leur sang ou de leurs liquides corporels. Certains d'entre eux, comme les araignées, après avoir percé le corps de leurs proies, commencent par leur injecter des enzymes digestives; elles boivent ensuite la soupe qui en résulte.

Autres exemples de nutrition liquide : Les mouches ont un « labium » qui absorbe les liquides un peu comme une éponge (elles n'hésitent pas à éponger des excréments, une des raisons pour laquelle on n'aime pas voir des mouches rôder autour de notre nourriture). Les papillons ont un proboscis pour aspirer le nectar des fleurs (la longueur de proboscis peut être adaptée à la longueur de leur fleur préférée). Les chauve-souris vampires mordent les pattes d'un oiseau ou d'un mammifère qui dort et se nourrissent du sang qui coule (leur salive contient un anti-coagulant qui aide le sang à couler).

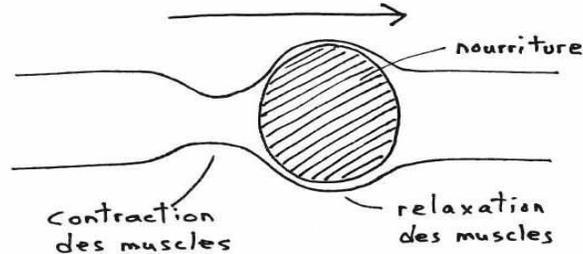
La bouche peut être munie de structures dures qui aident à capturer les proies et à les briser, comme par exemple les chélicères des araignées, les mandibules d'insectes carnivores, le bec des oiseaux et des tortues et des monotrèmes (des mâchoires osseuses recouvertes de kératine dure), ou les mâchoires recouvertes de dents de la plupart des autres vertébrés.

Les mammifères (sauf les monotrèmes) ont des dents dont la forme peut varier selon leur fonction. Les incisives, en avant, mordent et arrachent une bouchée. Ensuite on a les canines, acérées, qui déchirent. Les prémolaires, ensuite, déchirent et broient. Les molaires, finalement, avec une surface plus plate, broient. Le nombre de chaque type de dents varie d'une espèce à l'autre, ce qui aide à identifier l'espèce des squelettes trouvés en nature. Certains de ces types de dents peuvent être absents (par exemple, les vaches n'ont pas d'incisives supérieures –elles utilisent leur langue pour arracher l'herbe– tandis que les chevaux, eux, en ont; un cheval peut vous mordre mais pas une vache).

La bouche des vertébrés terrestres produit habituellement de la salive, un mucus assez liquide qui limite un peu la croissance bactérienne dans la bouche, qui lubrifie la nourriture pour son prochain voyage dans le tube digestif, et qui peut contenir une enzyme, l'amylase, qui commence à briser (digérer) l'amidon de la nourriture. Chez certains animaux la salive peut aussi servir de colle.

Oesophage:

L'oesophage est un tube qui apporte la nourriture de la bouche à l'estomac. Le tube comprend un espace intérieur (la lumière du tube), puis une couche de muscles circulaires, puis une couche de muscles longitudinaux. La nourriture est transportée par péristaltisme, une vague de contraction par les muscles circulaires (rappelez-vous des pompes péristaltiques vues dans un chapitre précédent).



La vague péristaltique peut voyager dans l'autre sens (de l'estomac vers la bouche; = péristaltisme inversé). Par exemple :

- Vomissement (pour expulser de l'estomac une substance toxique; ou, pour certains oiseaux, décourager les prédateurs sur le point d'attaquer).
- Régurgitation (ex. : oiseaux piscivores qui nourrissent leurs jeunes en leur régurgitant les poissons semi-digérés de leur estomac).
- Ruminants (une bouchée d'herbe remonte dans leur bouche pour se faire mieux mâcher; à revoir dans deux pages).

Jabot: Chez plusieurs oiseaux et insectes, le jabot est un élargissement (oiseau) ou un embranchement (insecte) de l'oesophage pour entreposer la nourriture, et parfois l'humecter aussi.

Ex : Les pigeons ont un très gros jabot. Quand il trouve des graines, le pigeon les ingère très rapidement avant que des compétiteurs apparaissent sur la scène. Les graines sont entreposées et humectées dans son jabot.

Ex : Chez le moustique, le jabot est un embranchement de l'oesophage qui s'étend jusque dans l'abdomen. Il permet d'entreposer rapidement le sang, de telle sorte que le moustique passe le moins de temps possible à être vulnérable sur sa victime. L'abdomen tout rouge d'un moustique « rempli » est en fait le sang de la victime entreposé dans le jabot qui s'étend dans l'abdomen.

Estomac:

L'estomac est l'organe où débute la digestion (le bris des grosses molécules en plus petites molécules, assez petites pour être absorbées plus loin). La digestion peut être mécanique (bris de la nourriture par des structures, comme une paroi dure) ou elle peut être chimique (bris de la nourriture par des enzymes). Un peu d'absorption de certains nutriments peut aussi se faire dans l'estomac. L'estomac peut aussi être vu comme un site d'entreposage de la nourriture, permettant d'espacer les repas.

Bris mécanique:

L'estomac des oiseaux est souvent divisé en deux : une partie est chimique (voir ci-dessous) et l'autre, appelé « gésier », est pour la digestion mécanique. Un gésier est un estomac dont les parois sont dures. Les oiseaux (en particulier les granivores) avalent souvent, consciemment, de petites roches qui s'installent dans leur gésier. Le mouvement des parois dures du gésier, allié à la présence des petites roches, permet de déchirer et moudre la nourriture.

Comme les oiseaux, les crocodiles ont un estomac divisé en deux et eux aussi avalent des roches. Les petites roches trouvées dans les gésiers d'animaux comme les oiseaux et les crocodiles portent le nom de gastrolithes (gastr = estomac, lithe = roche).

Bris chimique:

Chez la plupart des vertébrés, la paroi de l'estomac est glandulaire. Les glandes sécrètent le pepsinogène qui, en milieu acide dans l'estomac, se transforme automatiquement en pepsine, une enzyme qui commence à briser les protéines de la nourriture.

Les glandes sécrètent aussi de l'acide chlorhydrique (HCl). Cet acide permet de dénaturer les protéines, et il active la pepsinogène en pepsine. La pepsine fonctionne mieux à un pH acide.

L'estomac est en fait très acide (pH = 2 chez les mammifères; le record appartient probablement aux crocodiles, qui ont un pH = 1 dans leur estomac, leur permettant de digérer même des os entiers). Pour un vertébré, c'est normal d'avoir un estomac acide.

La paroi de l'estomac est recouverte d'une épaisse couche de mucus, lequel protège la paroi contre l'acide et contre la pepsine.

S'il se fait un affaiblissement dans la couche de mucus protectrice, l'acide et la pepsine attaquent la paroi de l'estomac et peuvent la perforer. On parle alors d'un ulcère gastrique (ulcère = perforation, gastr- = estomac).

L'estomac possède des sphincters (sphincter = un anneau musculaire pouvant refermer un tube lorsqu'il se contracte). Le sphincter oesophagien inférieur est à l'entrée de l'estomac et s'ouvre seulement pour laisser entrer la nourriture lorsque l'animal avale. Le sphincter pylorique est à la sortie et s'ouvre seulement lorsque la nourriture semi-digérée, maintenant appelée « chyme », doit passer à la prochaine étape du tube digestif, l'intestin.

Si le sphincter oesophagien inférieur se ferme mal, le contenu acide de l'estomac peut refluer dans l'œsophage, et l'acide peut alors attaquer la paroi de l'œsophage car la couche de mucus de ce dernier n'est pas aussi épaisse que dans l'estomac. On parle alors de « brûlements d'estomac » (un nom un peu bizarre puisque ce n'est pas de l'estomac, mais plutôt de l'œsophage, que vient la douleur; pour se consoler, on peut se dire que le nom anglais « *heartburn* » n'est pas mieux).

Des muscles circulaires et longitudinaux sont présents dans la paroi de l'estomac. Il peut même y avoir une troisième couche, appelée « couche oblique ». Les contractions de ces muscles font du bris mécanique, mélangent nourriture et pepsine, et éventuellement elles vident l'estomac par péristaltisme vers l'intestin.

Anaérobiose veut dire que les micro-organismes font du métabolisme anaérobie. Cela libère du méthane (CH₄) et du CO₂ qui sont éliminés par éructation (= action de « rotter »). Il y a aussi production d'acides gras (acétique, butyrique, et propionique) qui sont absorbés directement par la panse.

Une fois que l'enveloppe de cellulose des cellules végétales est brisée, le contenu de ces cellules est libéré et passe à la caillette où il est digéré par les enzymes de l'animal.

A noter que les bactéries et protozoaires croissent et se reproduisent, mais ils passent à la caillette où ils sont eux aussi digérés (1-1.5 kg de micro-organismes sont ainsi digérés à chaque jour). Certains survivent et sont évacués avec les excréments; ils peuvent alors recoloniser le système digestif des nouveau-nés (dont le système digestif est « propre », sans micro-organismes) quand la gueule des nouveau-nés touche à un tas d'excréments (ex. : une bouse de vache) pendant qu'ils explorent leur environnement, ou même lors de leur naissance.

Le médium dans lequel les micro-organismes vivent dans la panse est en fait la salive de l'animal (les vaches produisent 100-200 litres de salive par jour; c'est pourquoi les vaches sont souvent baveuses). L'eau de la salive est réabsorbée quotidiennement au niveau du feuillet (c'est le rôle principal du feuillet (= omasum), d'ailleurs) et de l'intestin.

Les micro-organismes peuvent synthétiser des protéines à partir de composés simples comme l'urée (les animaux eux-mêmes ne le peuvent pas). Vous vous rappellerez que l'urée est normalement la forme sous laquelle les déchets azotés (produits par le catabolisme des protéines) sont excrétés dans l'urine chez les mammifères. Certains ruminants, au lieu d'excréter l'urée, la recyclent en partie dans leur salive pour que les micro-organismes puissent la transformer en protéines. Cela arrive surtout lorsque le régime alimentaire comporte peu de protéines. On peut donc nourrir une vache avec de l'urée plutôt qu'avec des aliments à haute teneur en protéines, lesquels sont beaucoup plus chers (mais aussi, il faut bien le dire, plus nutritifs).

A noter que les micro-organismes des ruminants peuvent synthétiser tous les acides aminés essentiels. Les ruminants n'ont donc pas besoin de se soucier de balancer leur régime alimentaire.

Et le bonnet (= réticulum), lui, à quoi il sert? C'est un lieu de séparation, de triage, des particules d'herbe. Les grosses particules sont renvoyées au rumen pour être mieux brisées, les petites sont acheminées au feuillet pour éventuellement arriver à la caillette.

Le cas des herbivores non-ruminants:

Leur estomac est plus ou moins compartimenté, et il contient des micro-organismes. Cependant, ils ne peuvent pas ruminer. Ils ont quand même tendance à mâcher vite (ils ont peur des prédateurs) et donc les micro-organismes de leur système digestif n'ont pas un bon accès aux fibres végétales, et la digestion n'est pas aussi bonne qu'elle pourrait l'être.

Cela est évident quand on compare une bouse de vache (un ruminant) avec des crottes de cheval (un non-ruminant). Les excréments de vache ressemblent à une purée; les brins d'herbe ont été bien détruits, bien digérés. Les crottes de cheval, elles, contiennent encore des morceaux d'herbe visibles à l'oeil nu. Les brins d'herbe, mal mâchés, étaient relativement gros, présentaient donc un rapport surface/volume moins grand, et donc les micro-organismes n'avaient pas autant de surface d'attaque pour les digérer.

Avantages de la rumination par rapport aux non-ruminants:

- L'extraction des nutriments est plus complète.
- Le besoin total de manger est moindre.
- Il y a moins de risque de prédation (meilleure vigilance).
- Les ruminants peuvent subsister avec moins, en autant que la nourriture soit de bonne qualité.

Désavantage de la rumination par rapport aux non-ruminants:

La rumination est un processus qui prend plus de temps, et une fois que la panse est pleine, il faut attendre que ce temps s'écoule. Si la nourriture est de mauvaise qualité, tout ce temps ne donnera pas beaucoup de nutriments (parce que même si l'extraction est bonne, il n'y a pas beaucoup de nutriments dans la nourriture en partant). Les non-ruminants survivent mieux avec une nourriture de mauvaise qualité parce qu'ils peuvent compenser cette mauvaise qualité en faisant passer plus de nourriture dans leur système par unité de temps.

Q L'île de Sable est une île sablonneuse dans l'Océan Atlantique, à 300 km de la Nouvelle-Écosse. Il s'y trouve une population de chevaux sauvages, possiblement les descendants de chevaux domestiques qui avaient été confisqués des Acadiens lors de la Déportation en 1755 et entreposés sur l'île. Ce sont les seuls gros mammifères terrestres de l'île. Le long de la Côte Est des États-Unis, il y a un certain nombre d'îles côtières qui elles aussi abritent des populations de chevaux sauvages et rien d'autre. Pourquoi toutes ces îles sablonneuses côtières abritent-elles des chevaux sauvages et pas des vaches sauvages?

Q Les chevreuils sont des ruminants. Pourquoi est-il important pour eux de s'engraisser à l'automne, avant notre hiver canadien?

Estomac des insectes:

L'estomac des insectes prend souvent la forme de tubes qui se terminent en cul de sac. On appelle ces tubes des « caeca gastriques ». Il s'y fait à la fois digestion et absorption des nutriments.

Intestin:

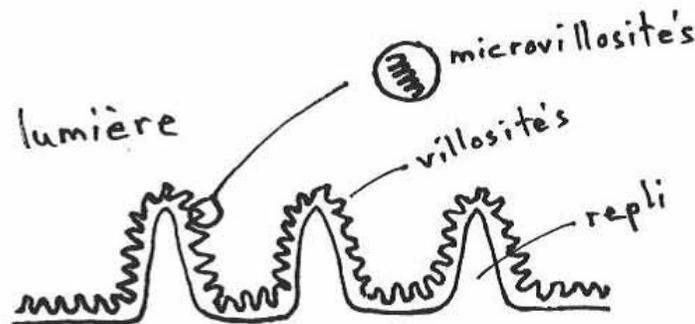
Dans l'intestin, la digestion se poursuit (surtout dans la partie proximale = antérieure) et l'absorption des nutriments se fait (surtout dans la partie distale = postérieure).

À l'entrée de l'intestin, il y a sécrétion (par le pancréas, voir plus loin) d'un mucus alcalin pour remonter le pH très acide de la nourriture semi-digérée (chyme) qui sort de l'estomac.

Sans cette neutralisation, l'acide attaquerait la paroi de l'intestin et pourrait causer un « ulcère duodénal » (« duodénum » est le nom donné au premier tiers de l'intestin, le 2^e tiers étant le jéjunum, et le 3^e tiers l'iléum ou iléon).

La neutralisation permet aussi aux enzymes digestives sécrétées par l'intestin et par le pancréas de bien travailler, car ces enzymes sont plus efficaces à un pH alcalin.

La paroi de l'intestin est pleine de replis pour augmenter la surface en vue d'une absorption maximale. (Chez l'humain, la surface totale de l'intestin est 200-300 m², l'équivalent d'un plein terrain de tennis.) Il y a trois couches de replis : les microscopiques microvillosités, qui sont sur les villosités, qui elles-mêmes sont sur les replis circulaires.



L'absorption se fait de façon passive, par transport actif ou par endocytose. Beaucoup de liquide (le suc intestinal) est sécrété par l'intestin dans sa lumière pour véhiculer les enzymes digestives, pour aider à dissoudre les nutriments, et pour amener ces nutriments en contact avec la paroi pour s'y faire absorber. Ce liquide est normalement réabsorbé par la paroi, surtout au niveau plus distal de l'intestin, mais si quelque chose nuit à cette réabsorption du suc intestinal le résultat est la diarrhée (qui peut mener à une déshydratation mortelle).

Tout comme pour l'œsophage et l'estomac, il y a des muscles circulaires et longitudinaux dans la paroi de l'intestin, et la nourriture voyage le long de l'intestin par péristaltisme.

Les fibres végétales prennent plus de temps à être digérées que les cellules musculaires de la viande (la viande, c'est du muscle). En conséquence, les herbivores ont des intestins plus longs que les carnivores. La longueur de l'intestin peut varier non seulement d'une espèce à l'autre, mais aussi à l'intérieur d'un même individu si son régime alimentaire change.

Les têtards sont surtout herbivores (algue, phytoplancton), mais après leur métamorphose ils deviennent des grenouilles carnivores (insectes). L'intestin des têtards est trois fois plus long que celui des grenouilles, même en termes absolus.

Les merles d'Amérique se nourrissent de vers de terre en été, mais plutôt de petits fruits en hiver. À l'automne, leur intestin s'allonge, et il se raccourcit au printemps.

Chez certains serpents qui mangent de grosses proies à intervalles de plusieurs mois, l'intestin rétrécit entre les repas. Pendant ce temps entre les repas, le serpent, dont les besoins énergétiques ne sont pas si grands en partant (c'est un ectotherme), subsiste à partir des graisses accumulées suite au repas précédent.

Même l'estomac peut subir des transformations. Les oiseaux du genre *Paradoxornis* (« *parrotbills* ») sont granivores en hiver et insectivores en été. En hiver, leur estomac est gros et possède des parois dures, et l'oiseau mange de petites roches, pour bien moudre les graines. En été, l'estomac devient petit, ses parois sont molles, et l'oiseau ne mange plus de petites roches (digérer un insecte est plus facile que digérer une graine).

Les feuilles d'arbre ont beaucoup de fibres, peu de nutriments, et souvent des substances toxiques. Les espèces de mammifères folivores ont des intestins très longs et sont souvent peu actives (ex. : paresseux, koalas). Les espèces d'oiseaux purement folivores sont rares, car le très long intestin que cela exige alourdit l'oiseau, ce qui n'est pas idéal pour le vol.

Dans l'intestin vivent énormément de bactéries (des souches d'*Escherichia coli*, par exemple) et des protozoaires qui aident à digérer les substances. Cette action entraîne la production de toutes sortes de substances intéressantes, rejetées par les bactéries comme produits d'excrétion.

Les bactéries produisent des vitamines, B et K en particulier.

Les bactéries peuvent produire des gaz, lesquels causent les flatuosités (« pets »). (Il faut bien dire que les flatuosités peuvent aussi être causées par de l'air avalé avec la nourriture.)

Certaines bactéries intestinales produisent des catégories de substances appelées indoles et scatoles. Ce sont ces substances (les scatoles en particulier) qui donnent aux excréments leur odeur particulière, souvent perçue comme étant mauvaise.

Les mauvaises odeurs corporelles sont presque toujours causées par des produits d'excrétion de bactéries. La mauvaise haleine vient de substances volatiles relâchées par les bactéries qui vivent dans notre bouche. Les mauvaises odeurs corporelles viennent de substances relâchées par des bactéries qui vivent sur notre peau (par exemple, nos aisselles sont un lieu où les bactéries prolifèrent, car les aisselles produisent une sueur plus visqueuse dont les bactéries aiment se nourrir).

Caeca pyloriques des poissons téléostéens:

Chez les poissons, l'absorption se fait surtout dans des tubes en cul de sac appelés caeca pyloriques. (Attention : chez les insectes, les caeca gastriques remplissent surtout le rôle de l'estomac, alors que chez les poissons, les caeca pyloriques remplissent plutôt le rôle de l'intestin.)

L'absence d'un long intestin replié chez les poissons rend leur système digestif assez linéaire. Cela permet aux biologistes d'effectuer un type particulier de pompage stomacal pour déterminer le contenu de l'estomac et le régime alimentaire du poisson sans tuer l'animal. Un tube est inséré dans l'anus et de l'eau y est pompé; l'eau remonte le tube digestif, prend avec elle le contenu de l'estomac, et sort par la bouche où elle est recueillie. S'il y avait un long intestin replié, l'eau aurait trop de difficulté à circuler et elle occasionnerait plutôt une rupture de l'intestin.

Caecum: (à ne pas confondre avec les caeca gastriques des insectes ou les caeca pyloriques des poissons)

Chez certaines espèces herbivores (mammifères et oiseaux), il y a souvent un ou deux caeca très développés. Le caecum est un embranchement de l'intestin qui se termine en cul de sac. Il s'y trouve des bactéries qui digèrent la cellulose et autres fibres végétales.

Fonctionnellement, le caecum est comme un estomac de ruminant (une chambre de fermentation des fibres végétales par des micro-organismes), sauf qu'il vient vers la fin de l'intestin ou au milieu de celui-ci. (En anglais on dit que ces animaux sont des « *hindgut fermenters* » plutôt que des « *foregut fermenters* » comme les ruminants.) L'absorption des nutriments relâchés par l'action bactérienne est donc limitée au caecum lui-même et au peu d'intestin qui le suit, ce qui ne représente pas une aussi grande surface d'absorption que possible, et cela bien entendu n'est pas idéal.

Les rongeurs (rats, souris) et les lagomorphes (lièvres, lapins, pikas) ont apporté à ce problème une solution intéressante: la coprophagie (copro = crottes, phagie = manger). Les crottes, qui contiennent encore beaucoup de nutriments non-absorbés, sont ré-ingérées, entreposées dans une partie de l'estomac pour une fermentation supplémentaire de 1-2 h, et puis passées dans l'intestin pour que l'absorption des nutriments se fasse bien le long de tout l'intestin.

De jeunes rats expérimentalement privés de coprophagie ont des taux de croissance 25% moins élevés que les témoins. La coprophagie est empêchée en faisant vivre l'animal sur un grillage (les crottes tombent sous le grillage) et en plaçant un cône autour du cou de l'animal (comme ceux que les vétérinaires mettent sur les chiens pour ne pas que ces derniers lèchent leurs plaies) pour ne pas qu'il puisse prendre les crottes dans sa gueule directement quand elles sortent de l'anus.

Chez l'humain, l'appendice est un caecum vestigial. Nos ancêtres évolutifs, plus herbivores et frugivores, avaient un caecum bien développé. Mais au cours de l'évolution nous sommes devenus plus omnivores, et notre caecum a plutôt perdu son utilité, et il s'est beaucoup rétréci. Il persiste encore mais sous forme très réduite et sans fonction utile (au contraire, il est parfois le foyer d'infections bactériennes, résultant en une inflammation –appendicite– qui peut rompre sa paroi, avec des conséquences parfois mortelles).

Le foie et la vésicule biliaire:

Le foie est un organe important servant à la synthèse, l'entreposage, et la dégradation de diverses protéines, lipides, glucides, et autres. C'est le plus gros organe interne du corps. (Le plus gros organe du corps est la peau, qui n'est pas un organe interne.)

Le foie a aussi un rôle dans la digestion des graisses: il produit la bile, laquelle est entreposée dans la vésicule biliaire et relâchée au niveau du début de l'intestin lors d'un repas. La bile est un produit aqueux qui contient des sels biliaires dérivés du cholestérol. Ces sels biliaires émulsifient les lipides (les brisent en petites gouttelettes), ce qui, comme on l'a déjà vu, rend ces lipides plus accessibles aux lipases (lesquelles ont besoin d'un contact avec l'eau et avec les lipides en même temps pour fonctionner). Les sels biliaires sont ensuite réabsorbés par l'intestin postérieur (distal).

La bile contient aussi des « pigments biliaires », en particulier la bilirubine, une substance jaunâtre qui provient de la dégradation de la vieille hémoglobine du sang. C'est intéressant, il y a un lien entre la couleur rouge du sang et la couleur brunâtre des excréments :

1. La vieille hémoglobine (rouge) du sang est brisée en bilirubine (jaune) par des enzymes dans le sang, la rate ou le foie.
2. La bilirubine est retirée du sang par le foie, qui la met dans la bile.
3. La bile est déversée dans l'intestin.
4. Dans l'intestin, des bactéries se nourrissent de la bilirubine, et la transforment en urobilinogène et puis en stercobiline, cette dernière étant une substance brunâtre qui se retrouve dans les fèces et leur donne une couleur brune.

Le pancréas:

Le pancréas a un rôle digestif prépondérant. Il libère au début de l'intestin, via le conduit pancréatique, un grand nombre d'enzymes digestives, dont la trypsine, une peptidase importante qu'on a déjà vu. Ces enzymes sont dans un liquide, appelé suc pancréatique, qui a aussi comme effet de neutraliser l'acidité des aliments semi-digérés qui sortent de l'estomac.

Le pancréas a aussi un rôle hormonal. Il produit de l'insuline, dont on a déjà parlé. À cause du diabète, ce rôle du pancréas est assez bien connu du public. Mais bien peu de gens réalisent que les cellules productrices d'insuline ne représentent que 1% du pancréas. 99% du pancréas sert plutôt à produire des enzymes digestives.

L'hépatopancréas (des invertébrés):

Nom peu approprié (il ne s'agit ni d'un foie – « hépato » – ni d'un pancréas) donné aux caeca gastriques (revoir la page 180 au sujet des insectes) lorsque ceux-ci sont très gros.

Questions à réflexion :

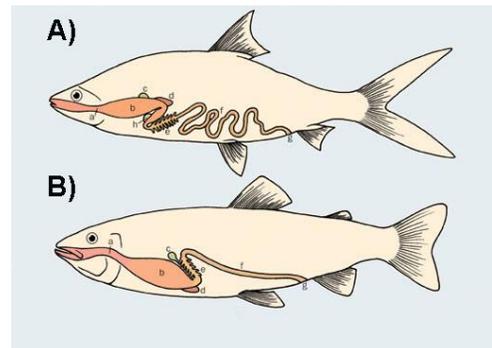
- Q 1) Les fourmis pot-de-miel (*honeypot ants*) ont des ouvrières dont le seul rôle est de servir d'entrepôt vivant pour un liquide sucré riche en glucides (d'où le mot « miel ») qu'elles peuvent régurgiter aux autres ouvrières ordinaires qui en font la demande. Nommez et décrivez la partie du système digestif dans laquelle le « miel » est entreposé dans ces ouvrières spéciales?



- Q 2) Au premier cours du semestre, je vous ai peut-être montré la photo d'une fistule sur le flanc d'une vache, vous expliquant que les chercheurs s'en servaient pour obtenir des échantillons de micro-organismes du système digestif. À quelle partie précisément du tube digestif la fistule d'une vache est-elle connectée, pensez-vous? Nommez cette partie et dites à quoi elle sert.



- Q 3) Que pouvez-vous dire sur les régimes alimentaires de ces deux espèces de poissons, et pourquoi?



- Q 4) Vous vous promenez en hiver le long d'une route de gravelle en campagne. Sur la route vous voyez des oiseaux qui semblent picorer dans la gravelle. Y a-t-il des proies particulières disponibles en hiver dans la gravelle?

- Q** 5) Sur les rayons d'une animalerie (*pet shop*), vous voyez une boîte qui dit « Grès pour oiseaux » (*Grit for birds*). Est-ce un bon cadeau de Noël à acheter à votre ami, qui est le propriétaire d'un canari? Pourquoi ou pourquoi pas?
- Q** 6) Si pour une raison quelconque la bile n'est pas produite ou pas déversée dans l'intestin, les excréments de l'animal sont gras et blanchâtres. Expliquez cet aspect et cette couleur particulière des excréments.
- Q** 7) Au printemps le courlis de Sibérie (un oiseau limicole) migre d'un seul coup de l'Australie jusqu'en Sibérie. Avant la migration, son régime alimentaire change, passant de crabes abondants mais plutôt durs à digérer (leur carapace est dure) à des crevettes moins abondantes mais plus faciles à digérer (leur carapace est molle). Le contenu énergétique de ces proies est le même. Pourquoi un oiseau qui va bientôt migrer sur une très longue distance devrait-il faire un tel changement de régime alimentaire, surtout que les nouvelles proies sont plus difficiles à trouver?
- Q** 8) Faites une prédiction sur ce qui arrive à l'intestin d'un spermophile pendant son hibernation.
- Q** 9) Relisez bien la section « Bris chimique » pour l'estomac, et devinez pourquoi les glandes productrices d'enzymes digestives ne se font pas elles-mêmes détruire par les enzymes qu'elles produisent.

- Q** 10) Un des produits de la dégradation de l'hémoglobine est la bilirubine, un pigment jaunâtre. Devinez pourquoi les grands alcooliques ont souvent la peau un peu jaunâtre.
- Q** 11) Un autre produit de la dégradation de l'hémoglobine est la biliverdine, un autre pigment de couleur différente, que le foie intercepte normalement pour le mettre dans la bile. Expliquer pourquoi, quand on vomie souvent et longtemps, on finit parfois par vomir une substance un peu verdâtre.
- Q** 12) Associez l'organe de gauche avec la bonne notion de droite :
- | | |
|---------------------|---|
| a) jabot | 1) absorption des nutriments |
| b) panse | 2) réabsorption de l'eau chez les ruminants |
| c) bonnet | 3) genre d'intestins en cul de sac chez les poissons |
| d) caillette | 4) entreposage |
| e) feuillet | 5) plus gros compartiment de l'estomac des ruminants |
| f) estomac | 6) la digestion mécanique ou chimique commence ici |
| g) intestin | 7) production de HCl chez les ruminants |
| h) caecum | 8) sert surtout à produire des enzymes digestives |
| i) pancréas | 9) indirectement impliqué dans la digestion des lipides |
| j) foie | 10) triage de particules chez les ruminants |
| k) caeca pyloriques | 11) embranchement de l'intestin plein de bactéries |
- Q** 13) Les sangsues se gorgent de sang quand elles en ont la chance, mais ce sang n'est pas digéré tout de suite. Plutôt, au cours des jours qui suivent, le sang est digéré par petites quantités dans des « repas » espacés. Où le sang est-il conservé en attendant d'être digéré et absorbé?
- Q** 14) L'exosquelette des insectes est fait de chitine. Aucun vertébré ne peut digérer la chitine. Comprenez-vous pourquoi la paroi des gésiers de la plupart des oiseaux insectivores est bien musclée?

- Q** 15) Les diabétiques de type I manquent d'insuline et doivent s'en injecter dans le sang. Pourquoi ne prennent-ils pas plutôt une pilule d'insuline? (Indice : l'insuline est une protéine.)
- Q** 16) Certains organes digestifs peuvent aussi servir d'organes respiratoires (certains poissons-chats avalent de l'air et les bulles d'air voyagent tout le long du tube digestif, et au niveau de l'intestin elles donnent leur oxygène au sang) et certaines parties du système respiratoire peuvent servir à l'absorption (les vaporisateurs nasaux démontrent que la muqueuse nasale peut absorber certaines substances). Quelles sont les qualités en commun d'un bon organe respiratoire et d'un bon organe digestif?
- Q** 17) Avoir un jabot pour l'entreposage est utile pour un oiseau dont les sources de nourriture sont grosses, espacées, et susceptibles de se faire voler (quand on trouve une telle source de nourriture si rare, il vaut mieux se bourrer la face avant que les compétiteurs arrivent). Basé sur ce que vous connaissez de leur nourriture habituelle, devinez laquelle des espèces de chacune des paires suivantes possède un jabot alors que l'autre espèce de la paire n'en possède pas.
- a) Vautours versus hiboux.
 - b) Poulets versus oies.
- Q** 18) La production de salive est souvent stimulée par la présence d'objets dans la bouche (ces objets sont habituellement la nourriture). Expliquez pourquoi on dit souvent que mâcher de la gomme aide à empêcher la mauvaise haleine.
- Q** 19) Vous mangez un steak avec des patates. Décrivez tous les organes et parties d'organe que ce steak et ces patates rencontreront lors de leur voyage le long de votre tube digestif. Dites aussi quelles enzymes attaqueront quelles molécules de quel aliment (steak ou patates), et à quel endroit.
- Q** 20) En Amérique du Sud, certains perroquets (aras) mangent régulièrement de la terre argileuse. Quelles expériences ou observations feriez-vous pour tester les hypothèses suivantes sur les raisons adaptatives d'un tel comportement?
- a) Ils font cela pour obtenir du grès qui contribue à la digestion mécanique de leur gésier.
 - b) Ils font cela pour obtenir des ions de sodium ou de calcium.
 - c) Ils font cela pour obtenir des substances qui neutralisent des toxines légères contenues dans leurs autres aliments habituels.

Chapitre 23

Digestion: appétit et choix de la nourriture

L'hypothalamus joue un rôle important dans la prise de nourriture et le contrôle du poids corporel.

Chez les mammifères, une lésion expérimentale du noyau ventro-médian de l'hypothalamus entraîne l'obésité car les animaux n'arrêtent plus de manger (hyperphagie). Stimuler le noyau par de petits chocs électriques fait arrêter la prise de nourriture. Ce noyau joue donc un rôle important dans la satiété (la sensation de ne plus avoir faim).

Toujours chez les mammifères, une lésion des aires hypothalamiques latérales entraîne l'anorexie. Stimuler ces aires par petits chocs électriques entraîne l'appétit. Ce noyau joue un rôle important pour donner la sensation d'appétit.

L'équilibre entre ces deux centres contrôle l'apport de nourriture, et de là le poids corporel (rappelez-vous que cet équilibre peut changer – rhéostase – comme chez les hibernants qui s'engraissent).

Ces centres semblent utiliser deux paramètres pour « décider » s'il faut que l'animal se nourrisse ou arrête de se nourrir : la quantité de glucose sanguin (la glycémie) et la quantité de lipides sanguins (la lipémie).

Contrôle glucostatique:

Des détecteurs sont sensibles à la concentration de glucose dans le sang. Une concentration faible (= hypoglycémie) stimule l'appétit et inhibe la satiété. Un niveau élevé (= hyperglycémie) fait le contraire. Ces détecteurs sont situés dans le cerveau et dans le foie, mais ce sont surtout ceux du foie qui sont importants. (Des micro-injections de glucose près des centres du cerveau ont seulement un peu d'effet sur l'appétit de l'animal, mais des micro-injections de glucose près des centres du foie arrêtent facilement la prise de nourriture.)

Il nous arrive souvent de ne pas avoir faim immédiatement après une longue activité physique, comme une séance de sport. Pendant l'activité, le foie brise son glycogène et met en circulation dans le sang le glucose qui en résulte pour que les muscles puissent le prendre et s'en servir comme source d'énergie. Le foie continue de faire cela quelques minutes après l'arrêt de l'exercice : cela fait monter les niveaux de glucose sanguin car maintenant les muscles ne travaillent plus et ne consomment plus beaucoup de glucose. Cette hyperglycémie inhibe l'appétit et stimule la satiété. Il faut attendre que le métabolisme normal passe au travers de cet abondant glucose sanguin avant que l'appétit revienne.

Contrôle lipostatique :

La situation est la même que dans le cas du contrôle glucostatique, sauf que ce sont des détecteurs de lipides sanguins qui sont impliqués.

Autres facteurs faisant arrêter la prise de nourriture :

L'estomac qui est plein de nourriture peut aussi envoyer des messages nerveux au cerveau pour stimuler la satiété. Ce mécanisme est commun chez les invertébrés. L'estomac plein est distendu et des récepteurs d'étirement dans les parois signalent au cerveau qu'il est temps d'arrêter de manger. L'inverse se produit quand l'estomac est vide. Chez certains invertébrés, ce sont d'autres parties du système digestif (comme l'oesophage) qui contiennent les détecteurs d'étirement.

On veut savoir comment une mouche sait qu'il est temps d'arrêter de manger. On commence par tester l'idée du contrôle glucostatique. On injecte du glucose dans la mouche, faisant la prédiction que cela coupera son appétit. Mais ce n'est pas le cas : la mouche continue de bien manger. Conclusion : pas de contrôle glucostatique chez la mouche.

On se demande alors si le contrôle de l'appétit se fait par un signal hormonal, peut-être envoyé par l'estomac plein. On crée des jumeaux parabiotiques (parabiotiques = partageant artificiellement la même circulation sanguine) en faisant une ouverture dans l'exosquelette dorsal de deux mouches et en les collant dos à dos; elles partagent maintenant leur hémolymphe. On nourrit l'une et on fait jeûner l'autre, puis on teste les deux pour leur appétit. Seule la mouche non-nourrie a faim. Conclusion : pas de signal hormonal. (S'il y avait un signal hormonal produit par la mouche bien nourrie qui cause sa satiété, la deuxième mouche elle-aussi n'aurait pas faim car elle aussi aurait l'hormone de la première mouche dans son hémolymphe partagée.)

On se demande alors si ce sont des signaux nerveux en provenance des parois étirées de l'estomac qui font arrêter de manger. On injecte de la nourriture dans l'estomac de la mouche (par son anus), mais cela n'a pas d'effet : la mouche a encore faim. Conclusion : pas de signaux nerveux en provenance de l'estomac rempli.

Là on commence un peu à se décourager devant tous ces résultats négatifs. Mais il nous reste une possibilité : des signaux nerveux en provenance de l'œsophage rempli (rempli parce que le contenu du jabot rempli – les mouches ont un jabot – commence à déborder dans le reste de l'oesophage). Mais injecter de la nourriture dans l'œsophage est trop difficile à faire. Ça continue d'être décourageant! Heureusement nous avons des talents en chirurgie et on est capable de couper les nerfs qui relient l'œsophage au cerveau. Après avoir fait cela, la mouche n'arrête jamais de manger, elle devient toute ronde (ses pattes ne touchent même plus au sol) et peut même exploser! Conclusion : c'est un signal nerveux en provenance de l'œsophage, probablement quand il est rempli, qui dit à la mouche d'arrêter de manger.

Autres facteurs activant le système digestif :

Le fait de voir ou de sentir de la nourriture, ou même de l'imaginer, peut mener à une activation de certaines parties du système digestif. À la simple vue de nourriture appétissante, on (ou l'animal) commence à saliver, l'estomac commence déjà à sécréter ses enzymes, et le péristaltisme commence (ce qui peut déplacer des bulles d'air présentes dans le tube digestif et ainsi causer des « bruits d'estomac », qui bien plus souvent sont en fait des bruits d'intestin car c'est là que se trouvent surtout les bulles d'air).

Choix de la nourriture:

En nature tout comme en laboratoire, les animaux démontrent une habileté remarquable à choisir un régime alimentaire équilibré. Si vous prenez un jeune rat, veau, ou poulet, et vous lui offrez un choix de 5 moulées qui ont la même texture, qui ont des goûts différents mais également agréables, et chaque moulée étant une substance purifiée (protéine, glucide, lipide, minéraux, vitamines), l'animal va manger chaque moulée en quantité différente mais idéale pour un taux de croissance maximal. On ne connaît pas le mécanisme impliqué.

La même chose se produit si on nourrit un rat avec une nourriture manquante en vitamine B par exemple, et après on lui donne un choix entre deux moulées, une avec et l'autre sans vitamine B. Le rat ne mangera que la moulée avec vitamine B (un phénomène appelé « appétit spécifique ») mais attention: seulement si les deux moulées ont un goût différent. Le rat doit être capable d'associer un goût particulier avec les effets physiologiques bénéfiques de la vitamine. Un fait intéressant: si maintenant on met la vitamine B dans l'autre moulée plutôt que dans la première, le rat continue de manger la moulée originale, même si celle-ci n'a plus la vitamine (un phénomène appelé « persistance de l'appétit spécifique »).

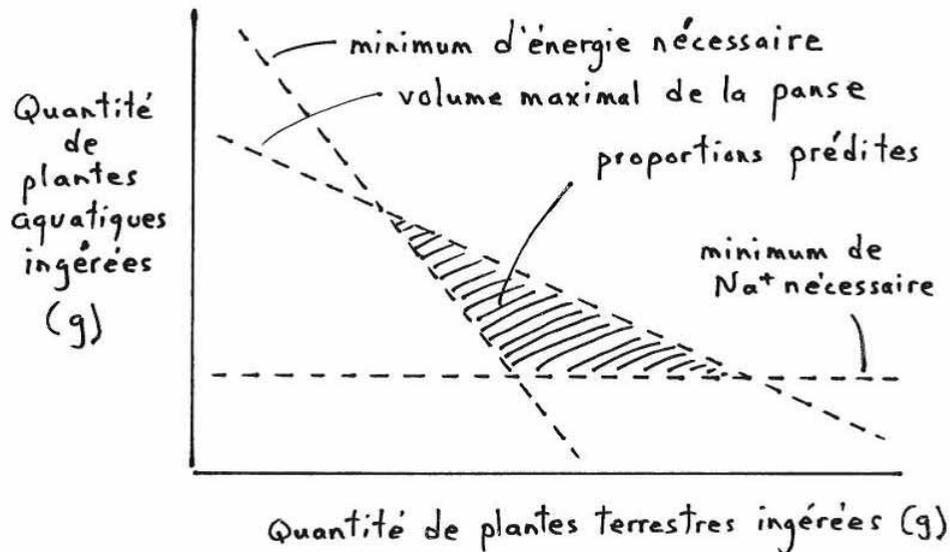
Les animaux ont aussi la capacité d'apprendre à éviter les aliments toxiques. Ils apprennent à associer la nausée causée par la toxine avec l'aliment ingéré auparavant, ou avec son odeur, ou avec son goût. Par exemple, un rat qui consomme une moulée parfumée avec du cacao et additionnée de lithium (qui cause la nausée) refusera toujours de manger du cacao dans le futur.

L'intensité avec laquelle l'animal refusera la nourriture qui l'a rendu malade varie en fonction de :

- L'intensité du malaise qui s'en suit : Plus intensément l'animal est malade, plus facilement il apprend à éviter la nourriture. À noter que le malaise doit être sous forme de nausée. Un rat n'apprend pas à éviter une nourriture si on lui donne un choc électrique quelques heures après le repas.
- L'intensité du goût de la nourriture empoisonnée : Plus le goût de la nourriture est distinguable, plus l'animal apprend facilement.
- La nouveauté de cette nourriture : Plus la nourriture est nouvelle (pas souvent consommée dans le passé), plus l'animal apprend facilement.
- L'intervalle de temps entre consommation et malaise : Plus tôt la nausée apparaît après le repas, plus facilement l'animal apprend. L'intervalle maximum pour un rat est 7 h.

Modélisation du régime alimentaire idéal:

Expérience intéressante avec les orignaux : Le régime alimentaire des orignaux est un mélange de plantes aquatiques et terrestres. Grâce à des mesures par bombe calorimétrique, on connaît le contenu énergétique moyen de ces plantes, et on sait combien d'énergie au minimum l'animal a besoin pour survivre. On connaît le volume occupé par ces plantes une fois avalées et on connaît le volume maximal de la panse de l'animal. On connaît aussi les besoins minimaux en sodium de l'animal, besoins que seules les plantes aquatiques peuvent combler. On peut donc modéliser quelles sont les proportions relatives de plantes aquatiques et terrestres que l'orignal devrait consommer pour satisfaire à tous ses besoins (ci-dessous). Dans une « cafétéria » (une pièce avec un grand choix de nourriture), on laisse l'orignal se nourrir comme il veut de plantes aquatiques et terrestres. Résultat : l'orignal choisit un mélange de plantes aquatiques et terrestres qui correspond aux quantités que le modèle a prédit.



Question à réflexion :

- Q 1) Cette question ne fait pas directement référence à une partie du présent chapitre, puisqu'elle parle de détection de nourriture plutôt que de choix de nourriture. Elle est intéressante quand même : Imaginez une expérience qui vous permettrait de prouver que les mouches détectent la présence de nourriture avec leurs pattes (en d'autres mots, leurs détecteurs sensoriels de nourriture seraient situés sur leurs pattes; elles « goûteraient » avec leurs pattes). Vous savez déjà que les mouches déroulent automatiquement leur proboscis (= labium) quand elles détectent de la nourriture (comme du sucre, par exemple), et vous pouvez coller le dos d'une mouche (préalablement anesthésiée en l'ayant mis au congélateur pour quelques minutes) au bout d'un petit bâton de bois. Imaginez aussi d'autres questions auxquelles vous pourriez répondre avec cet arrangement.

Chapitre 24

Osmorégulation: principes de base

Nomenclature:

Osmorégulation: Contrôle de la quantité d'eau et de la quantité de sels dissous (solutés) dans le corps.

Eau salée (eau de mer): L'eau de mer a une concentration typique de 35 g de sels (les ions sodium et chlore surtout, mais aussi quelques ions sulfate, magnésium, calcium, potassium, et bicarbonate) par litre d'eau (= 3.5% = 35 parties par millier).

Eau saumâtre: Eau dont la salinité varie entre 0.05% et 3.0%.

Eau douce: Eau dont la salinité est inférieure à 0.05%.

Dureté de l'eau: L'eau douce a peu de sels, et la quantité de peu de sels qu'elle contient peut varier. La variation provient surtout des ions Ca^{++} et Mg^{++} . La dureté de l'eau est une mesure de la quantité de peu d'ions contenus dans l'eau douce, en mol/L ou en mg/L. Plus il y a d'ions, plus l'eau est dure.

Euryhalin: Se dit d'un animal aquatique qui peut tolérer une grande variation dans la salinité de l'eau dans laquelle il vit.

Sténohalin: Se dit d'un animal aquatique qui ne peut pas tolérer une grande variation dans la salinité de l'eau dans laquelle il vit.

Hyperosmotique: Se dit d'une solution ou d'un corps qui, par rapport à une autre solution ou un autre milieu, a tendance à recevoir de l'eau par osmose. Elle exhibe normalement une plus grande concentration de sels dissous. Plus ou moins synonyme avec hypertonique.

Hypo-osmotique: Se dit d'une solution ou d'un corps qui, par rapport à une autre solution ou un autre milieu, a tendance à perdre de l'eau par osmose. Elle exhibe normalement une plus faible concentration de sels dissous. Plus ou moins synonyme avec hypotonique.

Isosmotique: Se dit de deux solutions ou deux milieux qui n'ont pas tendance à s'échanger de l'eau par osmose. Elles exhibent normalement des concentrations similaires en sels dissous (iso = égal). Plus ou moins synonyme avec isotonique.

Osmoconforme: Se dit d'un animal dont le corps demeure isosmotique avec le milieu, même si la salinité du milieu change. À mesure que la salinité du milieu change, celle du corps change de manière similaire.

Osmorégulateur: Se dit d'un animal dont le corps maintient une quantité plus ou moins constante d'eau et de sels malgré des changements de salinité dans le milieu. Cet animal pratique l'osmorégulation et, en termes de salinité, l'homéostasie.

Facteurs importants dans l'osmorégulation:

1) La nature du milieu extérieur

Les solutés ont tendance à diffuser vers les milieux où leurs concentrations respectives sont plus faibles.

L'eau, elle, a tendance à diffuser par osmose vers les milieux où les concentrations en solutés sont plus élevées.

Chez la plupart des osmorégulateurs, la teneur en solutés du corps est plus grande que celle de l'eau douce, mais plus faible que celle de l'eau de mer (eau douce : < 10 mOsm; corps de la plupart des vertébrés : 250-350 mOsm; eau de mer : 1200 mOsm). Donc les poissons d'eau douce ont tendance à perdre leurs solutés et à gagner de l'eau, tandis que les poissons marins ont tendance à gagner des solutés et à perdre leur eau.

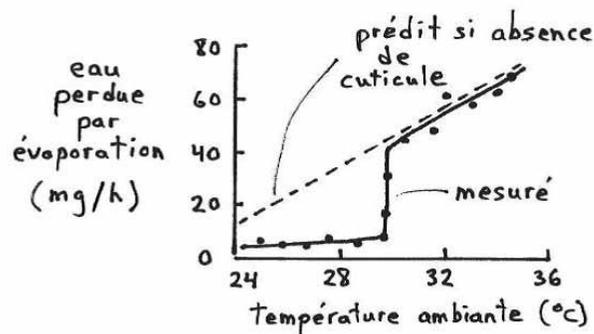
Les animaux terrestres, eux, ont tout simplement tendance à perdre leur eau. Ils essaient de contrer cette tendance à l'aide d'une peau relativement imperméable.

2) La perméabilité des téguments

La peau des insectes, reptiles, oiseaux et mammifères est peu perméable à l'eau et aux solutés (peu perméable, mais quand même pas complètement imperméable). En général, celle des poissons, à l'exception des branchies, est aussi peu perméable. Celle des amphibiens, par contre, est normalement perméable. Celle des invertébrés marins osmoconformes est aussi perméable.

Q Pourquoi la peau des amphibiens est-elle perméable?

L'imperméabilité de la cuticule des insectes est habituellement due à une couche de cire qui recouvre la cuticule. Chez certains insectes, comme les coquerelles, cette couche peut fondre à une température aussi basse que 30°C . Au-dessus de cette température, la couche de cire fond et l'insecte se déshydrate presque au même taux que s'il n'avait pas de cuticule.



3) La surface d'échange des organes perméables

Bien entendu, la tendance à perdre ou à gagner de l'eau ou des solutés dépend de la grandeur de la surface d'échange. La perte ou le gain se fait à travers la surface du corps, et donc plus la surface est grande, plus la perte ou le gain est grand. Les organes perméables qui sont en contact avec le milieu extérieur et qui présentent de grandes surfaces d'échange (comme les branchies des poissons) sont des endroits importants d'échange de solutés et d'eau.

Le rapport surface/volume est un autre facteur important à considérer, surtout dans les cas des pertes d'eau. Un plus grand rapport surface/volume du corps veut dire qu'une plus grande proportion du volume d'eau contenue dans le corps peut se perdre à travers la surface du corps.

Q Pourquoi est-ce que les moustiques (qui sont très petits et très effilés) sont surtout actifs la nuit ou au crépuscule plutôt qu'en plein milieu du jour?

4) Le boire et le manger

Une façon d'acquérir de l'eau est bien entendu de boire (et dans le cas des animaux marins, cela va aussi faire entrer des sels). Manger permet aussi d'acquérir l'eau et les sels contenus dans la nourriture.

Certaines espèces de pigeons frugivores n'ont pas besoin de boire. Les fruits juteux qu'ils mangent contiennent toute l'eau dont ces oiseaux ont besoin.

En nature, les autruches ne boivent habituellement pas. Les plantes qu'elles mangent contiennent suffisamment d'eau pour subvenir à tous leurs besoins en eau.

5) L'évaporation

Chez les animaux terrestres, l'évaporation est un moyen de thermorégulation (transpiration, halètement) et une conséquence de la respiration normale (évaporation de l'eau qui recouvre les voies respiratoires dans l'air sec inspiré). Cette eau qui s'évapore sert à quelque chose d'utile, mais n'oublions pas que, du point de vue de l'osmorégulation, elle sort du corps et est donc perdue.

L'humain perd environ 300-400 ml d'eau par jour à cause de sa respiration.

6) Le métabolisme

Un des produits de plusieurs réactions biochimiques dans le corps est l'eau. Cette eau, appelée « eau métabolique », peut aider à maintenir l'équilibre osmotique. Chez l'humain, l'eau métabolique produite à chaque jour satisfait environ 10% de nos besoins journaliers en eau.

Par contre, le métabolisme produit aussi des déchets qui doivent être éliminés. L'eau est souvent nécessaire pour véhiculer ces déchets (formation d'urine). En ce sens, le métabolisme engendre une perte d'eau. Cependant, l'animal peut jusqu'à un certain point contrôler la quantité d'eau qu'il perd ainsi en contrôlant la concentration de l'urine qu'il produit. La capacité de produire une urine très concentrée minimise la perte d'eau.

Le métabolisme des protéines produit des déchets azotés. Chez les reptiles, les oiseaux et les insectes, ces déchets prennent la forme d'acide urique, une forme énergétiquement coûteuse à produire, mais qui est insoluble et qui donc ne requiert pas d'eau pour son élimination. L'excrétion d'acide urique est donc une forme d'économie d'eau.

Excréter de l'acide urique permet de minimiser les pertes d'eau par le corps, mais ce n'est probablement pas l'avantage premier de cette forme de déchets métaboliques. Insectes, reptiles et oiseaux partagent tous la caractéristique de pondre des œufs en milieu terrestre. La cuticule ou coquille de ces œufs ne permet pas le passage de déchets métaboliques. L'embryon qui se développe doit donc vivre avec ses déchets azotés. Si ces déchets prenaient une forme soluble, ils empoisonneraient l'embryon. En étant sous une forme insoluble comme l'acide urique, ils peuvent être entreposés dans un recoin de l'œuf et ne pas interférer avec le développement normal de l'embryon.

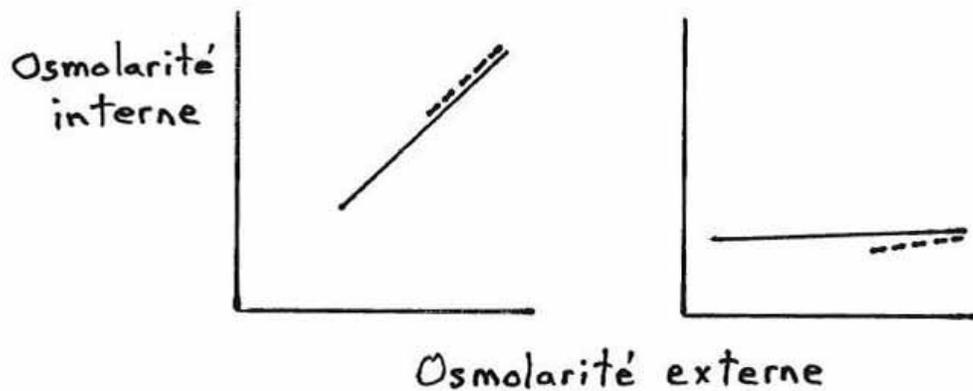
Chez les mammifères, les déchets azotés (l'urée) sont solubles mais passent de l'embryon au sang de la mère, qui les élimine dans son urine. Chez les organismes qui pondent des œufs dans un milieu aquatique, les déchets azotés sont sous forme d'ammoniaque, qui est très toxique mais aussi très soluble et qui diffuse au travers de la cuticule mince de l'œuf pour se perdre dans l'eau environnante.

Questions à réflexion :

- Q** 1) J'ai installé une mangeoire à colibri sur la fenêtre de ma cuisine. Il s'agit bien sûr d'un réservoir d'eau sucrée qui imite le nectar dont se nourrissent habituellement les colibris. Les colibris qui se perchent à ma mangeoire expulsent souvent des gouttes de liquide par leur cloaque. Je n'ai jamais vu des oiseaux autres que des colibris faire cela. Pourquoi cette différence?

Q 2) Vous remarquez qu'il y a beaucoup de dépôts calcaires (poudre blanche) qui se forment sur la sortie de vos robinets. Vivez-vous dans une région où l'eau est plutôt dure, ou pas tellement dure?

Q 3) Regardez les deux graphiques ci-dessous. Au bout de chaque ligne, l'animal ne survit pas. Lequel des graphiques (gauche ou droite) montre des mesures prises sur des animaux osmoconformes, et lequel sur des animaux osmorégulateurs? Sur chaque graphique, quelle ligne (pleine ou pointillée) dénote un animal plutôt sténohalin, et quelle ligne dénote un animal plutôt euryhalin?



Q 4) On verra les stratégies osmorégulatrices des animaux terrestres dans un prochain chapitre, mais vous pouvez déjà donner des éléments de réponse à la question suivante. Certains animaux du désert n'ont pas besoin de boire; pourquoi pas (deux raisons possibles)?

Q 5) Comme on l'a vu, les insectes ont une couche de cire sur leur cuticule pour aider à imperméabiliser leur exosquelette. Les mammifères ont quelque chose d'un peu équivalent : la peau contient des glandes sébacées (associées à la racine des poils) qui produisent un mélange de glycolipides, le sébum. Le sébum se répand à la surface de la peau et aide à imperméabiliser la peau (eau et lipides se mélangent mal, donc ce n'est pas surprenant de voir que des lipides entrent dans la confection de sébum imperméabilisant). Chez l'humain, les lèvres et la paume des mains se déshydratent facilement. Devinez ce que ces parties de notre corps n'ont pas..... Et devinez de quoi est fait la lotion pour les mains ou le baume pour les lèvres.....

Q 6) Toute autre chose étant égale (même poids, même habitat, même type de nourriture), un animal à sang chaud a tendance à perdre plus d'eau qu'un animal à sang froid. Pourquoi?

Q 7) Vrai ou faux?

- a) Les poissons anadromes (trouvez ailleurs la définition si vous ne la connaissez pas déjà) sont euryhalins.
- b) Le corps des poissons d'eau douce est hyperosmotique par rapport à leur milieu ambiant.
- c) Le corps des organismes osmoconformes est hypo-osmotique par rapport à leur milieu ambiant.
- d) Une cellule hypo-osmotique a tendance à perdre de l'eau par osmose.

- Q** 8) Les phasmes (*stick insects*) sont des insectes dont la forme du corps, très longue et mince, imite celle de brindilles ou de tiges d'herbe pour bien les camoufler. Sont-ils diurnes ou nocturnes?
- Q** 9) Vous avez appris les termes « osmoconforme » et « osmorégulateur ». Devinez ce que veulent dire « ionoconforme » et « ionorégulateur ». Devinez ce que veut dire « thermoconforme ».
- Q** 10) Dans un désert, qu'est-ce qui va se déshydrater le plus vite : un lézard de 70 g ou un lézard de même forme mais de 300 g?
- Q** 11) La peau des amphibiens est très perméable. Qu'est-ce que cela veut dire pour une espèce qui passe beaucoup de temps dans l'eau (une grenouille, par exemple), et pour une espèce qui passe beaucoup de temps dans l'air (un crapaud, par exemple)?

Chapitre 25

Osmorégulation: le milieu aquatique

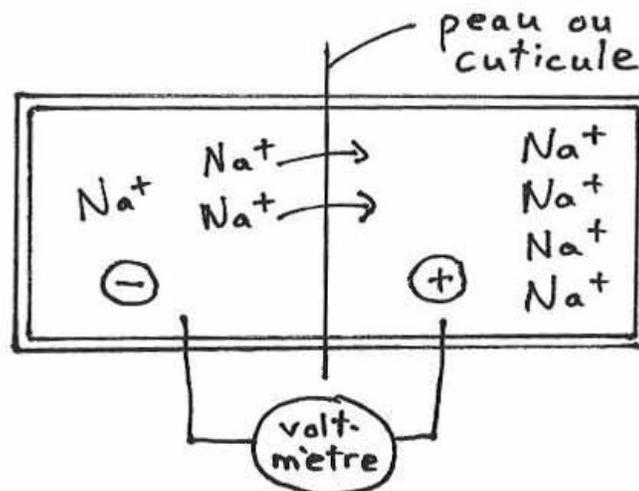
Le milieu d'eau douce:

Tous les organismes d'eau douce (invertébrés, poissons, amphibiens) font face au même problème: ils ont tendance à absorber trop d'eau et à perdre leurs sels.

Leur solution pour l'eau: ils ne boivent pas (il y a déjà suffisamment d'eau qui entre dans leur corps par les branchies (poissons) ou à travers leur peau mince (amphibiens, invertébrés)), et ils produisent une urine très abondante et diluée (pour se débarrasser de l'excédent d'eau).

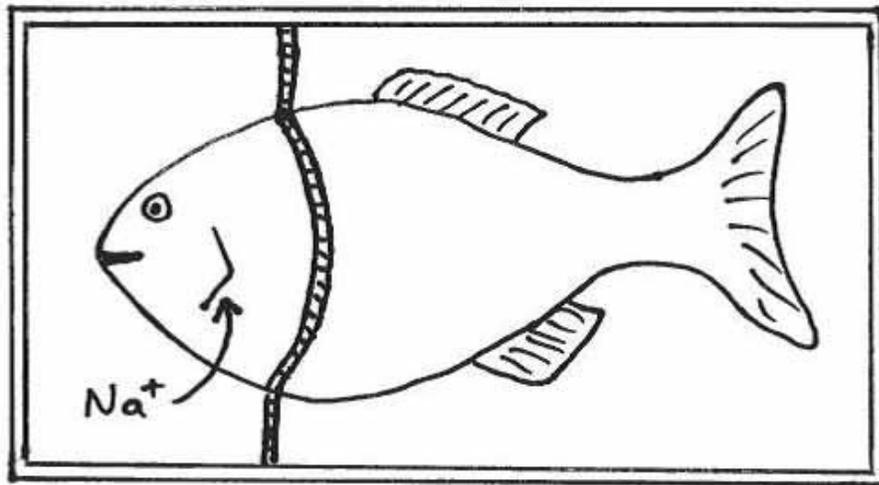
Leur solution pour les sels : ils absorbent des sels grâce à des cellules particulières. Ces cellules particulières se retrouvent dans les branchies des poissons et des invertébrés, et dans la peau des amphibiens. La cuticule renferme des « pompes ioniques », un complexe de molécules qui transportent les sels de l'extérieur vers l'intérieur du corps, même si ce transport se fait contre le gradient de concentration. Ce transport quasi constant représente un grand besoin énergétique.

Le transport ionique que font ces cuticules ou membranes s'étudie avec un appareil de Ussing (= chambre de Ussing). Il s'agit d'une enceinte close qu'on peut séparer en deux sections avec un morceau de peau ou de cuticule de branchies. On peut placer la peau ou la cuticule dans le sens qu'on veut pour que le transport d'ions se fasse dans un sens ou dans l'autre. On peut jouer avec les concentrations de départ des ions dans chacune des deux sections. Un voltmètre mesure la différence de potentiel entre les deux sections. Le potentiel est influencé par la quantité d'ions de chaque côté de la membrane. Donc, en mesurant comment le potentiel change, on mesure la direction et l'intensité du transport ionique à travers la membrane.



Un autre dispositif de mesure est la chambre aquatique à partition. Il s'agit d'une enceinte séparée en deux sections par une membrane de caoutchouc. La membrane est trouée et on peut y coincer le corps d'un poisson de telle sorte que sa tête et ses branchies sont d'un côté de la membrane et le reste de son corps sont de l'autre côté. On peut prendre des échantillons de l'eau de chaque côté de la membrane à intervalles de temps et mesurer comment la concentration de différents ions change. Ce genre de dispositif nous permet de vérifier que ce sont surtout les branchies qui jouent un rôle dans les échanges osmorégulateurs et non pas la peau du reste du corps. On peut aussi mesurer la capacité d'absorption des branchies vis-à-vis de différents types d'ions.

La chambre à partition peut aussi être utilisée pour distinguer les contributions relatives des branchies et de la peau à la respiration, en mesurant comment la concentration d' O_2 change de chaque côté de la membrane. (Normalement la peau ne contribue pas à la respiration, mais il y a des exceptions : amphibiens, *icefish*.)



Le milieu marin:

Plusieurs stratégies osmorégulatrices existent en milieu marin:

- 1) On peut avoir un milieu interne similaire au milieu externe. C'est le cas de la plupart des invertébrés marins et des chordés anciens (tuniciers, lancelets). La concentration totale en sels (l'osmolarité) de même que la composition ionique du milieu interne sont les mêmes que le milieu externe. Ces animaux sont osmoconformes et ionoconformes.

- 2) On peut avoir un milieu interne qui a la même concentration totale en sels que le milieu externe, mais la nature de ces sels n'est pas la même dans le milieu interne que dans le milieu externe. Ces animaux sont osmoconformes mais pas ionoconformes.

Par exemple, dans le cas de la myxine (*hagfish*): la concentration totale en sels (l'osmolarité) est la même à l'intérieur du corps que dans l'eau de mer à l'extérieur du corps. L'eau n'a donc pas tendance à bouger par osmose. Cependant, le corps de la myxine contient moins de Mg^{++} et plus de Na^+ que l'eau de mer (ces concentrations favorisent la bonne action des enzymes de la myxine). Cela veut dire que par diffusion le Mg^{++} a tendance à entrer dans le corps et le Na^+ a tendance à sortir du corps. Il faut donc qu'il y ait des pompes ioniques dans les cuticules de la myxine qui font ressortir le Mg^{++} à l'encontre du gradient de concentration du magnésium, et d'autres qui font revenir le Na^+ dans le corps à l'encontre du gradient de concentration du sodium.

Autre exemple particulier : les requins et les raies. L'osmolarité du corps de ces poissons est la même que celle de l'eau de mer. Pourtant, presque tous les ions sont moins abondants dans leur corps que dans l'eau de mer. C'est donc dire qu'il doit y avoir un autre soluté dans le corps qui permet de rehausser son osmolarité au même niveau que l'eau de mer. Cet autre soluté est l'urée. C'est bizarre, normalement l'urée est un déchet azoté qu'on ne retrouve pas chez les poissons et qui peut être toxique en grande quantité chez eux, mais les requins et les raies ont évolué la capacité de le produire et d'avoir une physiologie qui fonctionne bien en sa présence (même plus : leur physiologie ne fonctionne bien qu'en présence d'urée). Le rôle de l'urée chez ces poissons semble être de rendre le corps iso-osmotique avec l'eau de mer et éviter ainsi les problèmes de sortie massive d'eau par osmose.

Le requin bouledogue (*bull shark*) a la capacité de remonter les estuaires de grands fleuves. Il passe ainsi de l'eau de mer à l'eau saumâtre, parfois même à l'eau douce. Il a la capacité de régler la quantité d'urée de son corps, pouvant s'en débarrasser à mesure qu'il passe dans de l'eau moins salée. Cependant, il ne peut pas le faire suffisamment pour demeurer vraiment isosmotique avec l'eau moins salée; ayant encore de l'urée, il devient hyperosmotique par rapport à l'eau saumâtre. Beaucoup d'eau finit par entrer dans son corps par osmose et on observe alors chez lui une plus grande production d'urine pour se débarrasser de cet excès d'eau (comme le font d'ailleurs les poissons d'eau douce, vous vous souvenez?).

- 3) On peut osmoréguler et maintenir une concentration en sels dans le corps inférieure à celle du milieu (le milieu intérieur est donc hypo-osmotique). C'est le cas des poissons téléostéens (= poissons osseux). Puisque leur milieu interne est hypo-osmotique par rapport à l'eau de mer, l'eau a tendance à sortir du corps et les sels ont tendance à rentrer. Pour contrer la perte d'eau, ces poissons boivent de l'eau de mer. Par contre, cela introduit aussi des sels, lesquels viennent s'ajouter aux autres sels qui déjà avaient tendance à rentrer. Pour compenser cette entrée massive de sels, ces poissons rejettent des ions divalents dans leur urine, et rejettent des ions monovalents à l'aide de pompes ioniques spéciales contenues dans la membrane de « cellules à chlore ». Ces cellules sont localisées dans les branchies des poissons.

Il est intéressant de remarquer que d'autres animaux marins, autres que les poissons, n'ont pas accès à l'eau douce et se doivent de boire l'eau de mer (ex. : iguanes de mer, tortues de mer, serpents de mer, crocodiles de mer, oiseaux marins). Ils font donc face, eux aussi, à un problème d'excès de sels. Ils n'ont pas de cellules à chlore, et leurs reins ne peuvent pas produire une urine plus concentrée que l'eau de mer. Leur solution: des glandes à sels.

Les glandes à sel sont situées dans la région de la tête. Elles prennent le Na^+ et le Cl^- qui sont dans le sang et les sécrètent dans une solution concentrée qui est rejetée dans la bouche (serpents et crocodiles de mer) ou dans les cavités nasales (iguanes et oiseaux de mer), d'où elle peut ensuite être expulsée du corps.

Il est bien connu que les naufragés humains en mer ne doivent pas boire l'eau de mer qui les entoure. C'est frustrant de voir tant d'eau et ne pas devoir en boire. C'est encore plus frustrant de voir un oiseau marin en train de le faire (mais la présence d'un oiseau marin peut indiquer la proximité d'une île, source d'espoir). L'oiseau marin peut boire l'eau de mer parce que sa glande à sel peut enlever l'excédent de sel qui se trouve dans son sang après avoir bu l'eau de mer. Mais l'humain n'a pas de glande à sel; ce sont ses reins qui sont programmés pour enlever l'excédent de sels dans le sang. Or, les reins humains sont incapables de synthétiser une urine plus concentrée que l'eau de mer. Pour se débarrasser de l'excédent de sels qui est entré dans le corps après avoir bu 1 litre d'eau de mer, les reins produisent 1.4 litre d'urine (en comparaison, la glande à sel d'un oiseau marin a besoin de produire seulement 0.35 litre de sécrétion pour enlever tout le sel consommé avec 1 litre d'eau de mer). En fin de compte, pour l'humain, il y a plus d'eau qui sort du corps qu'il en entre, et « ironiquement » le naufragé meurt quand même par déshydratation après avoir bu l'eau de mer.

Alors, comment est-ce que les mammifères marins (phoques, baleines, etc.) réussissent à survivre en milieu marin? Une partie de la réponse est que leurs reins, eux, sont capables de synthétiser une urine plus concentrée que l'eau de mer. Une autre partie de la réponse est qu'ils n'ont pas besoin de boire beaucoup d'eau de mer parce que leurs besoins en eau sont presque entièrement comblés par l'eau contenue dans leurs proies (habituellement, des poissons). En un sens, ils profitent des efforts osmorégulateurs déjà faits par leurs proies.

Applications pratiques:

Les laboratoires de physiologie utilisent souvent la solution de Ringer. Il s'agit d'une solution synthétique dont la composition ionique ressemble raisonnablement bien à celle des liquides corporels des animaux. La ressemblance est aussi bien au niveau de la quantité de solutés que de leur nature. On peut s'en servir pour maintenir vivants des tissus ou des organes *in vitro* sans les exposer à un choc ionique ou osmotique.

Les poissons tropicaux qu'on garde dans des aquariums d'eau douce sont parfois la proie d'infection par des parasites externes. Pour combattre ceux-ci, il convient d'ajouter un peu de sel à l'eau de l'aquarium. Le principe physiologique impliqué est que les capacités osmorégulatrices des poissons leur permettent de survivre au choc osmotique causé par l'arrivée d'un peu plus de solutés dans l'eau environnante, mais les parasites, eux, sont très sténohalins (vous vous rappelez de ce mot technique?) et ne peuvent pas survivre au changement de salinité, même si ce changement est relativement petit.

Un excès de sel ou de sucre aide à conserver les aliments. Par exemple, il est rare que la confiture (un aliment très sucré) pourrisse; les viandes très salées ne pourrissent pas non plus. Il faut réaliser que la pourriture est le résultat de l'action de bactéries ou de champignons microscopiques qui se nourrissent de l'aliment. L'abondance de sucre ou de sel dans un aliment crée un milieu très hyperosmotique : l'eau a donc beaucoup tendance à sortir par osmose des cellules bactériennes ou fongiques. Les bactéries ou champignons microscopiques meurent par déshydratation et l'aliment ne pourrit pas.

Questions à réflexion :

- Q 1) En voyage aux Iles Galapagos, vous êtes assis sur le bord de la mer à contempler la beauté de la nature et le comportement des iguanes marins qui vous entourent. Vous remarquez que quelques minutes après qu'un iguane sorte de la mer (après une nage de plusieurs dizaines de minutes) et qu'il s'installe sur terre, il semble « éternuer » et par cette action il éjecte des gouttes de liquide de sa cavité nasale. Faites un commentaire intelligent et érudit à vos compagnons de voyage.



- Q 2) En voyage à l'île de Shédiac, vous êtes assis sur le bord de la mer à contempler la beauté de la nature et les bateaux qui passent. Pas loin de vous, un goéland est immobile sur la plage. Des gouttes coulent le long de son bec et tombent par terre au bout du bec. Est-il en train de pleurer, triste de vous voir?

- Q** 3) Vous faites des études en laboratoire sur l'activité d'un organe de requin *in vitro*. Pour garder l'organe bien en vie, vous ne devriez pas utiliser une solution de Ringer classique. Plutôt, vous devriez baigner l'organe dans une solution différente. Que contiendra la solution, et pourquoi?
- Q** 4) Vous étudiez l'anatomie interne d'une glande à sel. Faites une prédiction sur ce que vous allez découvrir, sachant que les glandes à sel ont une excellente capacité d'extraire le sel du sang (Indice : dans quel contexte a-t-on déjà parlé d'une excellente « capacité d'extraction » plus tôt dans le cours?).
- Q** 5) Complétez avec le mot « hyperosmotique » ou « hypo-osmotique » ou « isosmotique ».
- a) Les poissons d'eau douce sont _____ par rapport à leur milieu ambiant.
 - b) Les requins sont _____ par rapport à leur milieu ambiant.
 - c) Les bactéries sont _____ dans la confiture.
 - d) Les vers marins sont _____ par rapport à leur milieu ambiant.
 - e) Un phoque est _____ dans l'eau de mer.
 - f) Notre sang est _____ par rapport à l'eau douce et _____ par rapport à l'eau de mer.
 - g) Notre urine est _____ par rapport à l'eau de mer.
 - h) La solution de Ringer est _____ par rapport aux tissus corporels.
 - i) La solution produite par les glandes à sel est _____ par rapport à l'eau de mer.
- Q** 6) Les requins ont une glande spéciale appelée glande rectale, impliquée dans l'osmorégulation. Devinez ce qu'elle produit, et où?

- Q** 7) Le choquemort (*mummichog*) est une espèce de poisson qui vit dans l'eau des zones côtières. Il est abondant le long des côtes du Nouveau-Brunswick. Il est probablement le plus euryhalin de tous les poissons. On peut prendre un choquemort acclimaté à l'eau douce et le mettre directement dans de l'eau de mer (un choc ionique et osmotique qui tuerait pratiquement n'importe quelle autre espèce de poissons) et il va survivre sans problème¹⁰. Dans les 24 h qui suivent son passage en eau de mer, les membranes de ses branchies subissent de grands changements. Quels sont ces changements, d'après vous?
- Q** 8) Les branchies des poissons sont des organes qui consomment beaucoup d'énergie. Pourquoi?
- Q** 9) Le wallaby de l'Ile d'Eugène (une sorte de kangourou) peut boire de l'eau de mer pour survivre sur son île semi-désertique. Faites une prédiction sur les reins de cette espèce.
- Q** 10) Quelle adaptation du crocodile de mer lui a permis de coloniser des îles isolées de l'ouest du Pacifique?
- Q** 11) Voici les étendues de salinité (en g de sels par litre) tolérées par différentes espèces de poissons (tiré du livre *Amazing Numbers in Biology*). Devinez des choses sur l'habitat usuel de ces espèces. Et posez une question au sujet du mot « tolérées ».
- | | |
|----------------------|------|
| Poisson rouge : | 0-15 |
| Truite arc-en-ciel : | 0-35 |
| Épinoches : | 0-55 |
| Plie : | 7-75 |

¹⁰ Le choquemort est aussi très résistant au manque d'oxygène et à la présence de polluants. Il est vraiment robuste. C'est probablement pourquoi il a été choisi par la NASA pour être le premier poisson dans l'espace: à bord de Skylab 3 en 1973. Il a été un peu désorienté par l'absence de gravité au début, mais il a très bien survécu.

Chapitre 26

Osmorégulation: le milieu terrestre

Chez les organismes terrestres, le principal enjeu osmorégulateur est d'avoir un corps suffisamment bien hydraté (ça peut être difficile, étant donné que l'eau est parfois rare dans certains environnements, et que l'eau a tendance à sortir du corps ou à s'évaporer dans l'air environnant). Les adaptations dans ce domaine peuvent être divisées en trois catégories : celles pour obtenir l'eau, celles pour entreposer l'eau, et celles pour économiser (minimiser les pertes) d'eau.

Obtention d'eau :

1) Boire ou manger :

Comme on l'a déjà vu, l'eau peut être bue telle quelle, ou obtenue dans la nourriture.

2) Production d'eau métabolique :

Comme aussi vu déjà, l'eau peut être produite par des réactions chimiques dans le corps. Les animaux du désert sont particulièrement bien adaptés à ce niveau : ils ont beaucoup de sentiers métaboliques qui mènent à la production d'eau. En fait, beaucoup d'espèces du désert peuvent survivre sans boire, tant et aussi longtemps qu'elles ont accès à de la nourriture. Les nutriments entreront dans les nombreux sentiers métaboliques producteurs d'eau, et cela suffira aux besoins en eau de l'animal.

3) Absorption cutanée (= par la peau) :

La peau des amphibiens est perméable et laisse facilement entrer l'eau. Aucun amphibien ne boit de l'eau. Ils obtiennent l'eau à travers leur peau ou dans leur nourriture.

De plus, certaines grenouilles et crapauds, qui vivent dans des régions semi-arides sans eau libre, ont des régions cutanées sur le ventre et sous les cuisses percées d'une multitude de petits canaux qui, lorsqu'ouverts par l'action de l'hormone AVT, absorbent l'eau par capillarité, un peu comme une éponge. L'animal peut s'asseoir sur de la terre humide et tranquillement absorber l'eau à travers sa peau.

Parfois les herpétologistes veulent faire des études sur les mouvements des grenouilles ou des crapauds. Cela peut être fait par télémétrie : un émetteur radio fixé à l'animal peut envoyer un signal, et on peut ainsi savoir où l'animal se trouve. Dans le cas d'une petite grenouille, l'émetteur est trop gros pour être inséré dans le corps, et la peau de la grenouille est trop humide pour y coller l'émetteur. La solution est de placer l'émetteur dans un sac à dos miniature qu'on met sur le corps de l'animal. Mais si la grenouille en est une qui a des régions cutanées absorbant l'eau, il faut faire attention que les sangles du sac à dos ne recouvrent pas ces régions, sinon on empêchera la grenouille d'obtenir assez d'eau pour survivre.

Entreposage d'eau :

1) Vessies surdimensionnées :

Beaucoup de grenouilles et de salamandres ont une grosse vessie qui peut servir de réservoir d'eau. Normalement l'eau de l'urine, une fois rendue dans la vessie d'un animal, ne peut pas être réabsorbée, mais ces amphibiens sont capables de le faire. Quand la réabsorption peut se faire, il devient possible d'utiliser la vessie comme réservoir d'eau. L'animal absorbe beaucoup d'eau au travers de sa peau quand il a la chance de le faire; l'eau est entreposée dans la vessie, et cette eau peut être réabsorbée dans le sang dans les journées sèches qui suivent.

On prive d'eau un groupe de grenouilles dont la vessie est pleine, et un autre groupe dont la vessie est vide. À intervalles, on prend des échantillons de sang pour mesurer la concentration en solutés (l'osmolarité) du plasma sanguin (ceci est un indice de déshydratation : un animal déshydraté a moins d'eau dans son sang, ce qui augmente la concentration du plasma). Pour les grenouilles à vessie vide, la concentration (l'osmolarité) du plasma sanguin augmente rapidement; tandis que pour les grenouilles à vessie pleine, elle augmente plutôt lentement.

Économie d'eau (minimiser les pertes): (une spécialité des espèces du désert)

1) Téguments (= enveloppe corporelle, = peau) relativement imperméables :

Comme on l'a vu dans un chapitre précédent, la plupart des vertébrés terrestres ont une peau relativement imperméable, habituellement grâce à des lipides présents dans ou sur la couche superficielle de la peau (l'épiderme). Exception majeure : les amphibiens, dont la peau est habituellement mince (vous vous rappelez que c'est pour des raisons respiratoires), ce qui laisse sortir l'eau plus facilement. Pour éviter la déshydratation, la plupart des amphibiens terrestres sont limités aux micro-habitats humides. (Je dis seulement « la plupart » parce qu'un petit nombre de grenouilles et de crapauds vivent en milieu sec et peuvent étaler sur leur peau des lipides produits à partir d'une glande spéciale, pour imperméabiliser leur peau).

2) Thermorégulation comportementale, ou tolérance, plutôt que le recours à l'évaporation :

Les espèces du désert sont dans un environnement chaud et sec. La chaleur fait en sorte que la transpiration serait utile, mais la transpiration requiert de l'eau, et l'eau n'est pas très disponible. Les espèces désertiques ont donc recours à des stratégies de thermorégulation comportementales qui ne font pas appel à l'eau, comme des habitudes de vie nocturne (il fait moins chaud la nuit) ou la vie souterraine (il fait moins chaud dans les terriers). Elles peuvent aussi faire preuve de tolérance physiologique aux hautes températures corporelles (rappelez-vous du chameau, vu à la page 52).

3) Production d'une urine très concentrée et de fèces très sèches :

Comme on le verra au chapitre suivant, les vertébrés du désert ont des reins qui peuvent produire une urine très concentrée, c'est-à-dire utiliser moins d'eau pour véhiculer une même quantité de déchets métaboliques à éliminer.

Les espèces du désert produisent aussi des fèces très sèches. L'intestin de tous les vertébrés est bon pour absorber l'eau de la nourriture, et réabsorber l'eau du suc intestinal, mais l'intestin des espèces désertiques est vraiment très bon. Dans la partie postérieure de l'intestin, il y a un grand nombre de pompes ioniques qui absorbent pratiquement tous les ions Na^+ et Cl^- de la nourriture, et l'eau a tendance à suivre par osmose et donc à être absorbée elle aussi.

4) Diminution de la quantité d'eau perdue dans les voies respiratoires grâce à un système d'échange à contre-courant temporel :

Les cavités nasales des espèces du désert présentent beaucoup de replis, ce qui augmente leur surface. Une des choses qui se font à la surface des cavités nasales est l'évaporation de l'eau dans l'air sec qui est inspiré, et cela nous met sur la voie d'une explication :

L'évaporation de l'eau qui recouvre les parois des cavités nasales refroidit ces dernières lors de l'inspiration. Lors de l'expiration, l'air saturé en humidité qui sort des poumons repasse par-dessus ces parois froides, et qu'est-ce qui se passe quand de l'air humide vient en contact avec une surface froide? De la condensation! Une bonne partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air expiré est redonnée aux cavités nasales sous forme de condensation plutôt que d'être perdue avec l'air expiré qui sort du corps. Plus les parois présentent une grande surface (replis), plus il y a d'eau reprise par condensation.

L'être humain est le seul primate avec un nez externe. Notre espèce a évolué dans des environnements chauds et secs en Afrique, et peut-être que notre nez externe contribue à augmenter la surface de nos cavités nasales pour nous permettre de minimiser les pertes d'eau dues à la respiration.

Ce système reprend de l'eau, et, si vous y pensez bien, reprend de la chaleur aussi (la condensation redonne la chaleur prise lors de l'évaporation). Ce n'est donc pas surprenant d'apprendre que les mammifères du Grand Nord ont eux aussi des cavités nasales avec beaucoup de replis.

Alors, si ce mouvement en direction opposé de l'air inspiré et de l'air expiré dans les cavités nasales conserve la chaleur, comment se fait-il que beaucoup de mammifères respirent vite quand ils ont chaud, comme on l'a déjà vu?

Réponse : ils inspirent par le nez mais expirent par la bouche. De cette façon, l'air chaud expiré se condense moins parce que l'air sec a passé par le nez plutôt que par la bouche, donc c'est le nez qui s'est refroidi par évaporation plutôt que la bouche, donc moins de condensation peut se faire dans la bouche (Touchez au nez de votre chien qui halète : il est froid. Touchez à sa langue, s'il vous laisse faire sans danger : elle est chaude).

Questions à réflexion :

- Q** 1) Si un hamster doré manque d'eau mais qu'il y a encore de la nourriture dans sa cage, il peut survivre pendant plusieurs semaines. Faites une prédiction sur le milieu naturel dans lequel les hamsters dorés vivent et ont évolué (j'ai ajouté « et ont évolué » parce que je suis d'accord pour dire que le milieu naturel des hamsters dorés, de nos jours, est le *pet shop* – il y a énormément plus de hamsters dorés en captivité que dans la nature – ils sont en fait en danger de disparition dans la nature).
- Q** 2) À la page précédente (point # 4), pourquoi est-ce que je parle d'un « système d'échange à contre-courant temporel » ? Quelle est la différence avec un système d'échange à contre-courant standard?
- Q** 3) Les bosses de chameau contiennent des graisses. C'est une réserve d'énergie pour survivre quand il manque de nourriture. Pendant longtemps on a pensé que c'était aussi, indirectement, une réserve d'eau, parce que l'oxydation des graisses, en plus de mener à la formation d'ATP, mène aussi à la formation d'eau métabolique. Mais de nos jours on rejette cette idée de réserve indirecte d'eau. Sachant qu'oxyder des graisses exigent de respirer plus (revoir le tableau 1 à la page 18), expliquez pourquoi il n'y a pas vraiment gain d'eau lors de l'oxydation des graisses.
- Q** 4) Retournez voir les exercices # 4 et # 5 à la page 91. Quelle serait la perte d'eau par jour, due à la respiration, chez un mammifère dont le volume tidal est 750 mL, qui prend 10 respirations par minute, qui est dans de l'air ambiant à 30 °C et 0% d'humidité (pour les fins du présent problème, prenez pour acquis que cela ne change pas au cours de la journée de 24h), et dont les parois de cavité nasale permettent de reprendre 25% de l'humidité contenue dans l'air expiré?

Chapitre 27

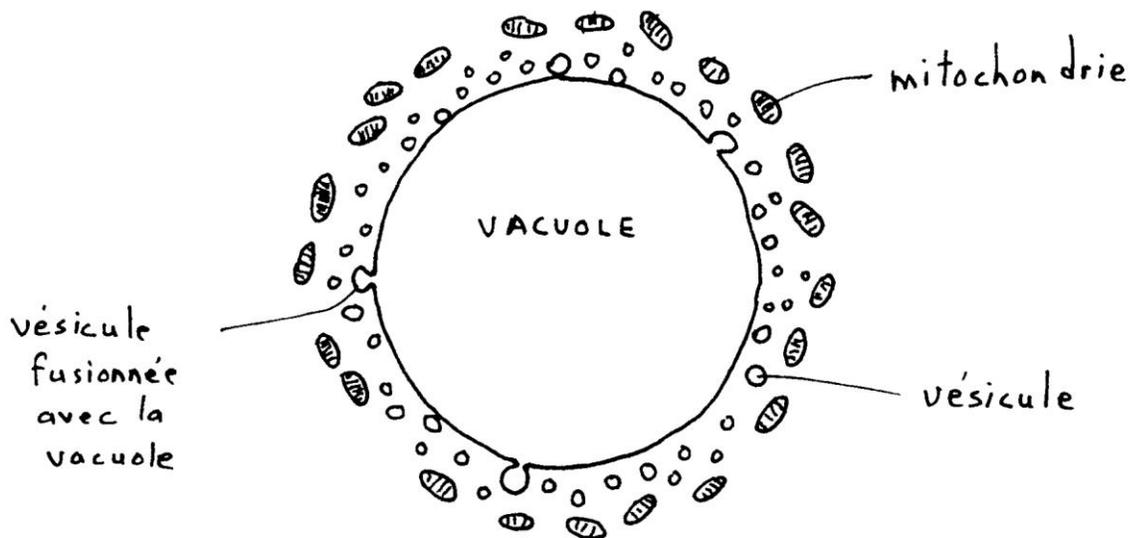
Osmorégulation: organes et systèmes excréteurs

Le rôle des organes et des systèmes excréteurs est principalement de se débarrasser des déchets métaboliques que le corps contient (ils peuvent aussi se débarrasser des excédents de solutés). Voici une liste d'organes excréteurs:

- les vacuoles contractiles des protozoaires et des éponges;
- les néphridies de la plupart des invertébrés ;
- les « reins » des mollusques et la glande verte des crustacés;
- les tubes de Malpighi des insectes;
- le rein des vertébrés.

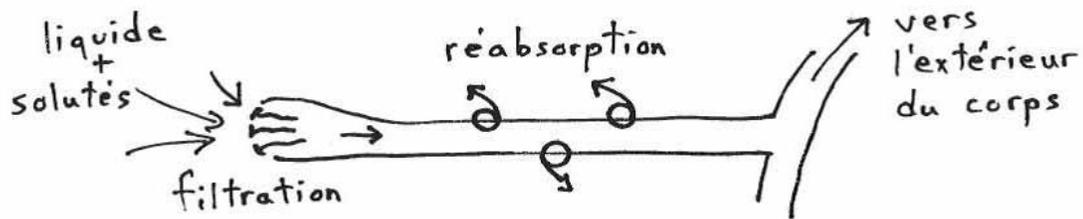
Vacuoles contractiles des protozoaires et des éponges:

Les vacuoles contractiles sont des organites de cellule, connectées à l'extérieur de la cellule. Par microscopie, on peut voir qu'elles sont entourées de petites vésicules et de mitochondries. Le fluide du cytoplasme entre dans les vésicules (c'est-à-dire qu'il est filtré à travers de minuscules ouvertures dans la membrane des vésicules), les « bons » solutés sont alors retournés au cytoplasme par des pompes (lesquelles puisent leur énergie à partir de l'ATP fourni par les mitochondries), les vésicules se fusionnent ensuite avec la vacuole pour y déverser le fluide qu'elles contiennent, et la vacuole finalement se contracte pour expulser ce fluide à l'extérieur de l'organisme.



Néphridies des invertébrés:

Les néphridies sont des tubes qui sont connectés à un canal excréteur à un bout, et qui contiennent des cils et des petits trous à l'autre bout. L'action des cils aspire le cytoplasme dans le tube au travers des petits trous (filtration), le long duquel les « bons » solutés sont réabsorbés par transport actif (par des pompes). Le fluide restant, contenant encore les « mauvais solutés » (déchets métaboliques), se déverse dans le canal excréteur et est rejeté à l'extérieur.

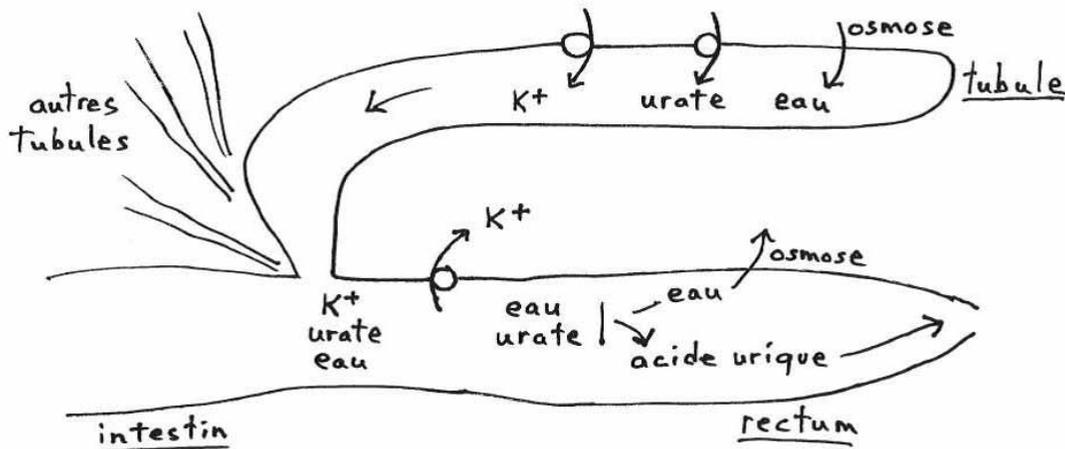


Les « reins » des mollusques et crustacés:

Ces « reins » sont en fait des sacs qui s'ouvrent à l'extérieur du corps par l'intermédiaire d'un long tube. Le liquide interstitiel entre à l'intérieur du sac par filtration, et les solutés sont réabsorbés dans le tube. Le mécanisme est donc très similaire à celui des néphridies.

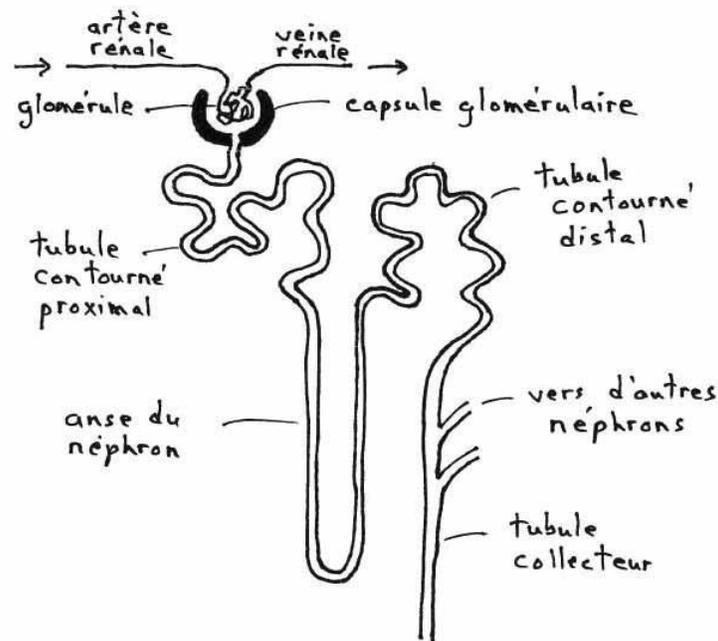
Les tubules de Malpighi des insectes:

Dans les tubules de Malpighi des insectes, il n'y a pas de filtration, il y a plutôt sécrétion de l'ion K^+ (potassium) et de l'ion urate (le principal déchet métabolique) dans les tubules. L'eau suit par osmose. Cette urine est acheminée dans le rectum, où l'ion potassium est réabsorbé activement; l'ion urate, ne pouvant plus s'associer avec K^+ , réagit avec l'eau et forme de l'acide urique. Celle-ci est peu soluble et précipite. En l'absence de solutés, l'eau qui reste quitte le rectum en diffusant à travers sa paroi par osmose. De cette façon, les déchets métaboliques sont éliminés sous forme concentrée sans gaspillage d'eau.



Le rein des vertébrés

Le rein des vertébrés est fait de plusieurs milliers de « néphrons ». Chaque néphron commence par une boule de capillaires (appelée « glomérule ») entourée par une capsule (appelée « capsule glomérulaire »), suivi d'un « tubule contourné proximal », une « anse du néphron » (un tubule en forme de U, aussi appelé anciennement « anse de Henle »), et un « tubule contourné distal ». Les tubules contournés distaux de plusieurs néphrons s'ouvrent dans un tube collecteur qui est parallèle à l'anse et qui se déverse dans une grande cavité appelé bassin rénal, connecté à un tuyau (l'uretère) qui, par péristaltisme, amène l'urine à la vessie pour entreposage. La vessie se déverse à l'extérieur de corps par un autre tuyau appelé « urètre ».



Le plasma sanguin sort des capillaires, à l'exception des cellules sanguines et des grosses protéines plasmatiques qui sont trop grosses pour passer au travers des pores des capillaires. Ce filtrat est recueilli dans la capsule glomérulaire et passe dans le tubule contourné proximal où les bons solutés sont réabsorbés par des pompes et où beaucoup d'eau est aussi réabsorbée (par osmose, elle suit les solutés réabsorbés). Cette réabsorption de solutés et d'eau se fait aussi dans le tubule contourné distal.

Entre les deux tubules contournés se trouve l'anse du néphron, un tube en forme de U qui représente un système d'échange à contre-courant entre l'urine qui descend l'anse et l'urine qui remonte l'anse. Cet arrangement, associé à des pompes dans la paroi du tube ascendant, permet de concentrer très fortement des solutés (NaCl surtout) dans le fond de l'anse (le bout du U) et dans ses tissus avoisinants. Cela crée un fort gradient de concentration qui, par osmose, fait beaucoup sortir l'eau des tubes collecteurs qui passent à proximité.

- Q** Plus l'anse est longue, plus la concentration des solutés est forte à son extrémité. Devinez ce qui caractérise l'anse des néphrons des espèces du désert, et pourquoi.

Deux choses peuvent influencer la quantité d'eau réabsorbée par les néphrons :

- a) La quantité de solutés réabsorbés.

Plus il y a de solutés réabsorbés par la paroi des néphrons, plus l'eau a tendance à suivre par osmose, donc plus il y a d'eau réabsorbée. L'inverse est aussi vrai : moins il y a de solutés réabsorbés, moins il y a d'eau réabsorbée (par osmose).

Vous rappelez-vous de la grande production d'urine par quelqu'un qui a bu de l'eau de mer? L'eau de mer fait entrer beaucoup de sel (NaCl) dans le corps. Pour se débarrasser de cet excédent de sel, les néphrons réabsorbent moins le Na^+ et le Cl^- , ce qui fait qu'il y a aussi moins d'eau qui est réabsorbée par osmose, ce qui fait que beaucoup d'eau reste dans le néphron et donc dans l'urine, ce qui donne une urine abondante.

- b) La quantité d'ADH (= vasopressine) produite par l'hypothalamus.

L'ADH (« *anti-diuretic hormone* », aussi appelée « vasopressine ») est une hormone produite par l'hypothalamus et relâchée dans la circulation sanguine au niveau de la neurohypophyse. Un de ses rôles est d'augmenter la perméabilité de la paroi des tubes collecteurs et des tubules contournés distaux à l'eau. Plus il y a d'ADH, plus l'eau peut être réabsorbée par la paroi, moins il en reste dans l'urine, ce qui donne une urine moins abondante et plus concentrée. L'inverse est aussi vrai.

Q L'alcool inhibe la production d'ADH. Si vous buvez 1 L de jus de pomme et votre ami boit 1 L de bière, qui d'entre vous sera le premier à avoir envie d'aller uriner?

Q Les maux de tête sont causés par une vasodilatation des vaisseaux sanguins du cerveau, ce qui fait pression sur les méninges qui entourent le cerveau (le cerveau ne contient pas de récepteurs sensoriels de la douleur, mais les méninges, elles, en ont). Cette vasodilatation est en réponse à une déshydratation : la déshydratation entraîne une baisse de volume sanguin, et pour assurer un bon apport sanguin au cerveau malgré le manque relatif de sang il y a vasodilatation pour compenser. Pourquoi a-t-on mal à la tête le lendemain d'une soirée où on a trop bu? Pourquoi conseille-t-on de boire un verre d'eau pour chaque verre de boisson lors d'un party?

Le processus de filtration-réabsorption:

Lorsque l'excrétion se fait sous forme liquide (urine), le processus de formation de cette urine est la filtration-réabsorption.

L'urine est d'abord formée par filtration : un liquide corporel passe au travers de trous (comme par exemple, les pores de capillaires). Le « filtrat » (ce qui a réussi à passer au travers du filtre) est l'urine. Mais la filtration est assez grossière : seules les très grosses molécules restent à l'intérieur du corps; la plupart des solutés, incluant de « bonnes » substances, réussissent à passer au travers du filtre avec l'eau.

Donc, au début, l'urine contient beaucoup de bonnes substances que le corps aurait avantage à garder. Ces substances sont donc réabsorbées par des pompes dans la paroi de longs tubes par où l'urine doit passer. L'action de ces pompes représente une grande dépense d'énergie (par exemple, nos reins consomment 20-25 % de tout l'oxygène utilisé par notre corps, même s'ils ne représentent que 1% du poids total de notre corps). L'eau est aussi beaucoup réabsorbée : elle a tendance à suivre par osmose les solutés réabsorbés. Les substances non-réabsorbées (les déchets métaboliques) et le peu d'eau qui n'a pas été réabsorbée non plus constituent l'urine finale.

Il semblerait plus logique de seulement mettre de l'eau dans un tube et avoir des pompes qui sécrèteraient les déchets métaboliques dans cette eau pour former l'urine. Mais si un animal explore un nouvel environnement ou un nouvel aliment, il pourrait s'y trouver des substances toxiques qui représenteraient alors de « nouvelles » substances à excréter, et bien sur les pompes appropriées ne seraient pas là, n'ayant pas eu le temps d'évoluer.

L'étude des fonctions rénales:

L'avènement de micro-pipettes permettant d'aller prendre des échantillons de fluide dans n'importe quelle partie d'un organe excréteur a permis de grands progrès dans l'étude des fonctions rénales. Ces micro-pipettes nous permettent de connaître la composition et la concentration des substances retrouvées à un endroit précis de l'organe, de même que le volume de fluide circulant à cet endroit.

Questions à réflexion :

- Q 1) Le rat kangourou peut produire une urine 4 fois plus concentrée (mesurée en milli-osmoles) que celle de l'être humain. Devinez des choses sur ses reins et son écologie.

- Q 2) Pensez-vous qu'un animal du désert pourrait boire de l'eau de mer? (Que de bons souvenirs sur le wallaby de l'île d'Eugène.)

Chapitre 28

Examen 3 – exemples de questions des années passées

Vous désirez obtenir un emploi d'été comme assistante de recherche dans un laboratoire de physiologie animale. Dans le cadre de l'entrevue d'emploi, la personne en charge vous fait visiter ses installations. Puisque vous voulez l'impressionner, vous avez tendance à compléter ses explications. Elle commence par vous montrer son appareil de Ussing, vous décrivant comment il est possible d'installer une membrane ou un morceau de peau entre les deux côtés d'une enceinte. Elle pointe ensuite vers un appareil de mesure rattaché à cette enceinte. C'est ici que vous l'interrompez et que vous lui dites de quel type d'appareil de mesure il s'agit, ce que ça permet de mesurer, et l'implication de ces mesures sur les conclusions qu'on peut tirer sur les propriétés de la membrane ou du morceau de peau. (**Question 1**)

La personne passe ensuite devant un gros contenant et dit « Ça, c'est notre réserve de liquide de Ringer » et vous vous empressiez d'ajouter « Ah oui, la solution qui (est quoi?) et qui sert à (quoi?) ». (**Question 2**)

La personne vous montre ensuite un respiromètre qui sert à mesurer la consommation d'oxygène par des insectes. L'appareil est très simple. Il s'agit d'une grosse éprouvette fermée par un bouchon. Le bouchon est transpercé par un tube millimétré, et ce tube est lui-même bouché par une goutte d'huile. L'insecte repose sur un grillage à l'intérieur de l'éprouvette, et en-dessous du grillage il y a une substance poudreuse. La personne vous explique qu'à mesure que l'insecte respire, le volume d'air à l'intérieur de l'éprouvette diminue, et donc la goutte d'huile dans le tube millimétré descend, et connaissant l'échelle sur le tube millimétré on peut donc quantifier la diminution du volume d'air. Impressionnez la personne en lui disant à quoi sert la substance poudreuse dans le fond de l'éprouvette, et pourquoi cette fonction est essentielle. (**Question 3**).

Dans cette même section du laboratoire (qui, comme vous l'avez deviné, sert à des expériences portant sur le taux métabolique des animaux), vous apercevez deux appareils de forme similaire. Tous les deux semblent être des enceintes (des chambres) faites en métal, avec un thermomètre comme principal appareil de mesure rattaché. Vous vous exclamez : « Ah, je vois que vous possédez une ... pour mesurer et aussi un ... pour mesurer ... » (**Question 4**)

Dans une autre section du laboratoire, la personne s'approche de plusieurs aquariums et vous dit « C'est ici qu'on étudie la réaction des poissons à l'eau hypoxique ». Vous répondez : « Je suppose donc que cette bonbonne (et vous pointez vers une bonbonne de gaz tout près) contient (quoi?) dans le but de réduire (quoi?) en (faisant quoi, selon quel principe?) » (**Question 5**)

Et avant de quitter la section des aquariums, vous remarquez que quelques-uns des poissons semblent porter des parasites externes. Quelle substance suggérez-vous d'ajouter à l'eau (afin d'exhiber vos connaissances de l'osmorégulation, connaissances que vous dites à la personne, bien sûr)? (**Question 6**)

De retour au bureau, la personne poursuit l'entrevue en vous posant des questions simples, dans le genre : **Question 7**) Savez-vous ce que veulent dire les mots « euryhalin » et « osmoconforme »?

Question 8) Savez-vous à quoi sert votre pancréas?

Question 9) Seriez-vous d'accord avec moi pour dire que les requins étant des poissons qui vivent dans l'eau de mer (des requins, je dis bien), l'eau a tendance à entrer dans leur corps par osmose? Pourquoi ou pourquoi pas?

Question 10) Que pouvez-vous me dire sur les glandes à sels?

Question 11) Si je vous demandais, dans le cadre d'une des expériences qui se fait dans mon laboratoire de recherche, de suivre le taux de déshydratation d'une grenouille à intervalles de temps, qu'est-ce vous devriez mesurer, et comment cette mesure nous renseignerait-elle sur le taux de déshydratation?

En attendant de savoir si vous allez obtenir l'emploi dans le laboratoire de recherche, vous allez passer une autre entrevue pour un emploi d'été, cette fois-ci dans une ferme expérimentale qui se spécialise dans l'étude de la nutrition chez les vaches. Encore une fois, vous tentez d'impressionner votre employeur potentiel par votre savoir. Donc, aussitôt que vous apercevez des vaches avec des genres de fenêtres sur le côté de leur corps, vous dites : « Ah, des vaches avec des ... (a)..... probablement connectées au plus grand compartiment de l'estomac, à savoir le/la/l' (b)..... , dans le but d'aller chercher des échantillons de (c).... (et ici vous énumérez les différentes choses qu'on retrouve dans ce compartiment de l'estomac) **(Question 12)**

Les vaches, comme vous le savez, sont des ruminants. Vous passez devant une vache qui rumine et qui vient tout juste d'avaler. Vous dites : « Attention, attention, dans quelques secondes on va voir un bel exemple de (a).... tout le long de (b).... (un organe du système digestif) » et effectivement, cinq secondes plus tard on voit une bosse qui remonte le long du cou de la vache, qui recommence alors à mastiquer. En plus de ces beaux mots que vous avez exprimés, vous ajoutez : « Bien sûr, les avantages évolutifs de la rumination, qui sont (c).... (soyez assez explicites ici), ne sont pas tous importants de nos jours, dans des conditions de ferme. » **(Question 13)**

En continuant de vous promener parmi le troupeau, vous mettez le pied dans une belle bouse de vache. Vous n'êtes pas certain qu'il serait approprié de parler de merde lors d'une entrevue d'emploi, mais il y a quand même toutes sortes d'idées qui vous passent par la tête. Vous gardez ces idées pour vous-mêmes, mais votre employeur potentiel aurait probablement été impressionné. Ces idées étaient : La couleur des excréments de vache, comme dans le cas de presque tous les excréments, vient de (a)... tandis que leur odeur vient de (b).... et leur aspect se compare à celui d'une crotte de cheval de la façon suivante ... (c)... ce qui démontre bien leurs différentes façons de traiter la nourriture (vache versus cheval), c'est-à-dire : (d).... **(Question 14)**

Les vaches de la ferme expérimentale semblent avoir un comportement normal dans l'étable, mais celles qui sont dans le champ à l'extérieur respirent très vite (à une fréquence élevée). Pouvez-vous expliquer à votre employeur potentiel ce comportement des vaches à l'extérieur? **(Question 15)**

Dans le champ des vaches, vous remarquez par terre, à certains endroits, des blocs d'une substance solide, environ 20 x 20 x 30 cm. Ces blocs sont colorés de toutes sortes de couleurs et sont de toute évidence artificiels. Certains de ces blocs semblent déformés, comme si les vaches les avaient lichés. À quoi ces blocs servent-ils, pensez-vous, et pouvez-vous faire le lien avec d'autres espèces animales? **(Question 16)**

17) Vous devenez aventurier. Vous entreprenez de traverser le continent antarctique avec l'aide de chiens de traîneau. Tout se déroule bien au début mais soudainement, vous voici pris dans une tempête de vent et de neige qui vous immobilise pendant des jours et des jours. Vous finissez par manquer de nourriture et donc, à votre grand regret, vous en êtes réduits à manger vos chiens de traîneau. Très affamé, vous voulez les manger au complet, mais en fait vous devriez faire attention à quelque chose lorsque vous préparez ce repas inhabituel. De quoi s'agit-il, et pourquoi?

18) Ecoeuré à tout jamais des aventures polaires, vous décidez maintenant de traverser le désert en chameau. Mais vous voici pris dans une tempête de sable qui vous immobilise pendant des jours et des jours. Vous finissez par manquer d'eau. Vos compagnons vous disent « Perçons les bosses de nos chameaux et buvons l'eau que ces bosses contiennent ». Expliquez-leur patiemment quelle est leur erreur et, puisque vous devez passer le temps, expliquez-leur aussi pourquoi les chameaux ont des bosses.

19) Écoeuré à tout jamais des aventures désertiques, vous décidez maintenant de traverser le Pacifique en bateau à rames. Mais vous voici pris dans une tempête tropicale qui vous jette sur une île déserte et vous y immobilise pendant des jours et des jours. Vous avez soif (encore!). Vous auriez grandement avantage à essayer de ramasser l'eau de pluie plutôt que de boire l'eau de mer autour de vous. Physiologiquement, pourquoi est-il fortement déconseillé de ne pas boire d'eau de mer quand on a soif? Et pourquoi est-ce que les iguanes de mer avec qui vous partagez cette île déserte semblent-ils n'avoir aucun problème à boire de l'eau de mer, eux?

20) Ecoeuré à tout jamais des aventures marines, vous décidez de traverser la forêt boréale en canot. Mais vous voici pris dans un brouillard intense qui vous immobilise pendant des jours et des jours. Quand finalement le brouillard se lève, vous vous dirigez vers votre canot et vous vous apercevez que quelqu'un ou quelque chose a complètement grugé les manches de vos pagaies de canots, de telle sorte que vous allez être pris pour en construire d'autres à partir de grosses branches et de votre couteau suisse. Comment expliquer ce qui est arrivé à vos pagaies de canots?

21) Les moustiques sont un aspect incontournable de l'été canadien. Les gens sont toujours prêts à se plaindre des moustiques, ce qui fait que les moustiques sont souvent un sujet de conversation. Plus on en connaît sur les moustiques, plus on peut participer à de telles conversations, et si on n'a pas peur d'avoir l'air trop « *nerd* », on peut renseigner les gens sur les questions suivantes :

- a) Pourquoi est-ce que ce sont seulement les moustiques femelles qui nous piquent?
- b) Le moustique a une adaptation anatomique particulière qui minimise le temps qu'il doit passer sur notre bras à ingérer notre sang. Quelle est la structure anatomique impliquée, en quoi consiste-t-elle, et à quoi sert-elle?
- c) Pourquoi les moustiques ne sont-ils pas actifs en plein milieu des belles journées d'été ensoleillées?

22) La phrase suivante est-elle vraie, et si elle est fausse, pourquoi? Si l'arrêt de la prise de nourriture se fait par contrôle glucostatique, alors on devrait s'attendre à ce que, chez des chiens paraboliques, le fait de nourrir abondamment le premier chien n'empêcherait pas le deuxième chien d'avoir faim.

23) Pourquoi certains animaux font-ils de la coprophagie?

24) Pourquoi les animaux du désert ont-ils souvent des cavités nasales dont les parois présentent beaucoup de replis?

- 25) Quel est le rôle digestif du foie? Donnez une bonne explication complète.
- 26) Quels sont les différents problèmes osmotiques auxquels les poissons d'eau douce font face, et comment est-ce qu'ils combattent ces problèmes?
- 27) A quoi servent les caeca pyloriques d'un poisson (pour le poisson lui-même), et quel est l'avantage de leur existence pour les gens qui étudient les poissons?
- 28) Qu'est-ce qui caractérise les ruminants en termes d'anatomie, de physiologie, de comportement, et des avantages qu'ils ont par rapport aux non-ruminants? Vous n'avez pas besoin de me parler de salive, d'urée, de recolonisation des nouveau-nés, ou d'éructation.
- 29) Qu'est-ce que la cellulose (est-ce une protéine, glucide, lipide, vitamine, oligoélément?), où précisément la retrouve-t-on habituellement, et quel est le lien entre la cellulose et le système digestif de pratiquement tous les herbivores?
- 30) Nommez deux facteurs au niveau du sang et un facteur au niveau de l'estomac qui font diminuer ou arrêter la sensation de faim et la prise de nourriture. Dites bien si ces facteurs doivent être bas ou élevés pour causer la satiété et l'arrêt de la prise de nourriture.
- 31) Comment l'anse du néphron des reins des animaux qui sont adaptés à vivre dans les déserts diffère-t-elle de celle d'autres animaux non-désertiques de même taille, et pourquoi en est-il ainsi? Votre explication devrait inclure une description de ce que fait l'anse du néphron, et pourquoi elle fait cela.
- 32) Expliquez comment les pythons incubateurs parviennent à réchauffer leurs œufs.
- 33) Expliquez ce qui se passe dans les conditions suivantes en utilisant des notions de vasoconstriction ou vasodilatation, et dites bien dans quelle partie du corps la vasoconstriction ou vasodilatation se fait et pourquoi.
- On se sent étourdi quand on se lève trop rapidement.
 - Un iguane marin se retrouve soudainement dans de l'eau trop froide à son goût.
 - Un phoque bien adapté à la plongée plonge pour une longue période de temps.
 - Une grenouille ne peut pas respirer d'air parce qu'elle est sous l'eau, mais elle va survivre quand même sans accumuler d'acide lactique dans ses tissus.
 - Un serpent arboréal se retrouve soudainement avec la tête par en haut.
- 34) Inférieur, supérieur, ou similaire? Dans cette question, rappelez-vous qu'un chat est plus gros qu'un rat, et rappelez-vous qu'un chat est un carnivore alors que le rat est granivore. Le taux métabolique de base d'un chat est ___(a)___ à celui d'un rat. Le rapport surface/volume du chat est ___(b)___ à celui du rat. La dépense d'énergie par g de poids corporel et par kilomètre parcouru d'un chat qui court à 2 km/h est ___(c)___ à celle du même chat qui court à 1 km/h, et ___(d)___ à celui d'un rat qui court à 2 km/h. L'affinité de l'hémoglobine de chat pour l'oxygène est ___(e)___ à celle du rat. La fréquence de battements cardiaque du chat est ___(f)___ à celle du rat. La longueur relative du système digestif du chat est ___(g)___ à celle du rat. La masse du squelette du chat est proportionnellement ___(h)___ à celle du rat.

35) Expliquez ce que veulent dire les mots et expressions suivants:

- a) Parabiotique
- b) Osmoconforme
- c) Hépatopancréas
- d) Acide aminé essentiel
- e) Eau dure
- f) Péristaltisme
- g) Catabolisme
- h) Rete mirabile
- i) Bombe calorimétrique
- j) Euryhalin
- k) Solution de Ringer
- l) Ulcère gastrique (définissez bien les deux mots)
- m) Diastole
- n) Oligoélément
- o) Système porte
- p) Sphincter pylorique (définissez bien les deux mots)
- q) T_{L50}
- r) Poïkilotherme
- s) Contrôle glucostatique
- t) Villosités
- u) Caillette
- v) Tachycardie
- w) Quotient respiratoire
- x) Effet Root
- y) Jabot (quoi, quelle sorte d'animaux, sert à quoi?)
- z) Brûlement d'estomac
- aa) Cellule à chlore (où, quelle sorte d'animaux, sert à quoi?)
- bb) Déchet azoté (incluant deux exemples et la sorte d'animaux associée à chaque exemple)

36) Répondez aux questions suivantes par quelques phrases :

- a) Certains animaux terrestres ne boivent jamais d'eau; donnez deux raisons possibles.
- b) Pourquoi est-ce que les aliments très salés se conservent longtemps sans pourrir?
- c) Au printemps, une personne qui aime les oiseaux gardent les coquilles d'oeufs qu'elle mange, broie ces coquilles, et étend les morceaux qui en résultent dans sa cour arrière. Pourquoi?
- d) Les requins ont un moyen inusité de minimiser leurs problèmes osmotiques. Quel est-il?
- e) En termes de digestion, à quoi sert la bile? Et par quel organe est-elle produite?
- f) Qu'est-ce que le taux métabolique de base?
- g) En termes de causes, pourquoi la pression sanguine est-elle élevée dans les artères mais basse dans les veines?
- h) Donnez trois raisons pour lesquelles certaines grenouilles qui peuvent laisser geler une partie de leur corps en hiver entreposent beaucoup de glucose dans leurs tissus en automne.
- i) Qu'est-ce que la pepsine et à quoi sert-elle?
- j) Pourquoi est-ce que les vaches qui sont couchées au soleil en été respirent vite?
- k) Dites-moi quelque chose d'intéressant sur l'intestin des merles d'Amérique en automne.

37) Poissons :

- a) Que pouvez-vous me dire d'intéressant sur l'anatomie du système digestif des poissons téléostéens à comparer à celui d'un mammifère, et l'intérêt que cela présente pour les gens qui étudient l'écologie des poissons?
- b) Question présentée très tôt dans le cours, dans le syllabus lui-même en fait : comment se fait-il que les poissons meurent d'asphyxie (manque d'oxygène) dans l'air même si l'air contient plus d'oxygène que l'eau?
- c) Vous transférez un poisson dans de l'eau plus chaude. Son stress émotionnel finit par disparaître mais il ne réussit quand même pas à s'acclimater. Sa fréquence d'ouverture des opercules est plus grande (plus rapide). Donnez deux raisons possibles pour expliquer cette plus grande fréquence.

38) Oiseaux :

- a) Pourquoi est-ce qu'un oiseau marin peut survivre en buvant de l'eau de mer alors qu'un être humain ne le peut pas (expliquez la situation pour ces deux « animaux »)?
- b) La circulation d'air dans les poumons des oiseaux est unidirectionnelle. Cela permet une adaptation qu'on ne retrouve pas chez les mammifères. Laquelle, et quelle est son avantage?
- c) Pourquoi certains oiseaux mangent-ils de la gravelle?

39) Vrai ou faux? (et si c'est faux, dites pourquoi) :

- a) La technique de l'eau doublement marquée utilise des isotopes radioactifs d'oxygène et d'hydrogène et elle peut être utilisée pour mesurer le taux métabolique de base d'un animal en nature.
- b) Si on prend une grenouille qui a une vessie bien remplie, et qu'on la prive d'eau, et qu'on prend des échantillons de son hémolymphe à intervalles réguliers, la concentration du plasma va diminuer moins rapidement que dans le cas d'une grenouille dont la vessie est vide.
- c) Les facteurs suivants diminuent l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène : une espèce de plus grande grosseur corporelle, une température plus élevée, une plus grande présence de CO₂ en milieu aqueux, un pH plus faible, le fait d'être une mère plutôt qu'un fœtus.

40) Des chiffres et des calculs :

- a) L'animal A est homéotherme, est long de 0.7 m, présente une surface corporelle de 2 m², et pèse 4 kg. L'animal B est aussi homéotherme, long de 1.2 m, présente une surface corporelle de 4 m², et pèse 12 kg. En hiver, lequel de ces deux animaux risque le plus d'avoir froid, et pourquoi?
- b) Un poisson de 60 cm de long a besoin de 15 g de nourriture par jour. De combien de nourriture un poisson de même forme mais de 100 cm de long a-t-il besoin? Montrez votre calcul.
- c) Pour un certain animal, le volume sanguin total est 210 ml, la fréquence de battements cardiaque est 130 par minute, la pression artérielle est 10 mm Hg, le débit cardiaque est 40 ml/min, l'oxygène extrait est 0.5 mL par 100 ml de sang, et le temps de recyclage complet est 6.5 min. Utilisez ces données ou une partie de ces données pour calculer le volume systolique.

41) Les excréments :

- a) Si un animal produit des crottes qui sont blanchâtres et graisseuses, qu'est-ce qui fonctionne mal dans son corps, et expliquez le lien avec « blanchâtres » et avec « graisseuses »?
- b) Pourquoi certains animaux font-ils de la coprophagie?
- c) D'où vient la mauvaise odeur des excréments?

42) Si les phrases suivantes sont vraies, dites-le. Si elles sont fausses, dites quel mot (vous ne pouvez en choisir qu'un seul) devrait être remplacé, et par quel(s) autre(s) mot(s) il devrait être remplacé, pour rendre la phrase vraie.

- a) Dans les milieux hypoxiques, beaucoup d'animaux ont recours au métabolisme anaérobie afin de remplir les besoins en oxygène de leurs tissus corporels.
- b) Le gésier est un élargissement de l'œsophage qui permet d'entreposer de la nourriture et de l'humecter.
- c) Pendant la saison de ponte, il est bon de donner aux oiseaux des coquilles d'œuf brisées afin qu'ils puissent les manger et ainsi obtenir un bon apport en ions sodium pour synthétiser leurs propres coquilles d'œuf.
- d) Les ruminants produisent beaucoup de salive, libère du méthane dans l'environnement, peuvent inverser la direction du péristaltisme qui se fait dans leur intestin, ont des conditions anaérobies dans leur estomac compartimenté, et avalent la végétation immédiatement après l'avoir brouté.
- e) Les animaux du désert sont bien adaptés pour produire de l'eau métabolique, produire des fèces sèches, et produire une urine diluée.

43) Un animal à sang froid, bien adapté à vivre entre 0 et 40 °C, présente un Q_{10} de 1.4 pour la consommation d'oxygène. Il consomme normalement 5 mL d'oxygène par minute à 15 °C. Quelle sera sa consommation d'oxygène à 35 °C? Montrez votre calcul.

44) Un poisson X mesure 3 cm de long, pèse 12 g, et consomme 56 mL d'oxygène par heure à 8 °C. Un poisson Y de la même espèce et de même forme mesure 12 cm de long.

- a) Quel est le poids corporel du poisson Y? Montrez votre calcul
- b) Quel est le taux métabolique spécifique du poisson Y à 8 °C? Montrez votre calcul.

45) Vous injectez dans un vertébré 5 mL d'une substance à une concentration 18 M, substance qui a la propriété de se fixer aux grosses protéines du sang. Après quelques heures, vous prenez un échantillon de 10 mL du sang de cet animal, vous séparez la substance des grosses protéines auxquelles elle s'est fixée, et vous déterminez que sa concentration dans l'échantillon était de 0.003 M. Quel est le volume plasmatique sanguin de l'animal? Montrez votre calcul.

46) Un animal A présente un quotient respiratoire de 0.95. Un animal B consomme 4 fois moins d'oxygène et produit 3.2 fois moins de CO_2 que A. Quel est le quotient respiratoire de B? Montrez votre calcul.

47) Voici la fréquence d'ouverture, par minute, des opercules d'un poisson observée à différentes températures :

- à 5 °C, 12.0
- à 7 °C, 14.6
- à 10 °C, 19.7
- à 15 °C, 32.4
- à 18 °C, 43.6

Utilisez ces données, en tout ou en partie, pour calculer le Q_{10} de la fréquence d'ouverture des opercules. Montrez votre calcul ou votre raisonnement.

48) Qu'est-ce que la bile, quel organe la produit, et quel rôle joue-t-elle dans la digestion?

49) Dites si les paragraphes suivants contiennent une ou des erreurs. S'il y a des erreurs, dites quelle(s) est (sont) la ou les erreurs et dites ce qu'il faudrait avoir écrit pour que le paragraphe devienne vrai. Lisez attentivement. Parfois, s'il y a erreur, il ne s'agira que d'un seul mot à remplacer par un autre; parfois, il s'agira d'une erreur plus générale qui exigera une plus grande explication. Il se pourrait aussi qu'il n'y ait pas d'erreur. Trois points par paragraphe.

a) On peut conserver les aliments en y incorporant de grandes quantités de sel ou de sucre. Cela crée une forte pression osmotique qui va faire sortir l'eau des cellules des aliments, et l'absence d'eau dans les cellules d'aliments empêche les réactions biochimiques de dégradation (catabolisme) de se faire.

b) Si on expose des termites à de fortes pressions d'oxygène, elles vont éventuellement mourir parce que l'oxygène sous pression réussit à pénétrer dans leur tube digestif et les protozoaires qui y vivent sont des anaérobies obligatoires, et donc ils vont mourir, et puisque ce sont eux qui peuvent digérer la cellulase de la paroi des cellules végétales, les termites ne réussiront plus à digérer le bois et mourra de faim.

c) Il est relativement facile de faire un lavage d'estomac d'un poisson parce que leur tube digestif est relativement linéaire, dû au fait que l'absorption de la nourriture se fait dans des embranchements appelés hépatopancréas plutôt que dans un long intestin faisant partie du tube digestif.

d) La coprophagie se fait surtout chez des espèces où il se fait relativement peu d'absorption à cause du fait que le caecum est petit, et donc il est avantageux de refaire passer les crottes une deuxième fois dans le tube digestif.

e) Les mots ou phénomènes suivants sont associés aux ruminants ou à la rumination : méthane, péristaltisme inversé, bonnet, grande production de salive, mastication remise à plus tard, rumen, urée peut servir de nutriment, aucune nécessité de se soucier d'un régime alimentaire complet en acides aminés essentiels.

f) Si l'arrêt de la prise de nourriture se fait par contrôle glucostatique, alors on devrait s'attendre à ce que chez des chiens parabiotiques, le fait de nourrir abondamment le premier chien n'empêcherait pas le deuxième chien d'avoir faim.

g) Les premiers explorateurs polaires mourraient parfois d'empoisonnement après avoir mangé le foie de leurs chiens de traîneaux, ceci parce que le foie contenait une grande quantité de vitamine A, une vitamine hydrosoluble qui est toxique lorsque présente en trop grande quantité dans notre corps.

h) Ce sont seulement les moustiques femelles en période de reproduction qui piquent les animaux pour obtenir leur sang, parce que ce sont les femelles et non pas les mâles qui synthétisent des œufs et donc elles ont besoin de l'énergie fournie par le sang pour cette synthèse d'œufs.

i) Les facteurs suivants diminuent l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène : une espèce de forte grosseur corporelle (en comparaison avec une plus petite), une température plus élevée, une plus grande présence de CO_2 en milieu aqueux, un pH plus faible.

j) Si la concentration des grosses protéines sanguines diminue, le système lymphatique va avoir moins de travail à faire; par contre, si la concentration en solutés du liquide interstitiel diminue, le système lymphatique va avoir plus de travail à faire.

k) Si la durée d'exposition à la température testée augmente, ou si l'animal a été acclimaté moins bien à cette température, l'espacement entre la T_{L50} inférieure et la T_{L50} supérieure sera moins grande.

l) L'espèce A est plus grosse que l'espèce B et donc le rapport surface/volume de l'espèce A est inférieur à celui de l'espèce B, ce qui veut dire qu'elle perd moins de chaleur par rapport à sa capacité de production. Donc, si tu mets l'espèce A dans un calorimètre, tu vas mesurer une moins grande élévation dans la température de la couche d'eau qui entoure le calorimètre que si tu mets l'espèce B.

m) Les mammifères qui veulent minimiser les pertes de chaleur vont hérissier (élever) leurs poils, ou bien faire de la convection au niveau de leurs vaisseaux sanguins périphériques, ou bien éviter de s'exposer au ciel ouvert.

n) Quand on inspire, le ventre sort un peu vers l'extérieur. La raison pour cela est que les poumons se remplissent d'air, et donc ils poussent sur le diaphragme qui est situé sous eux, et le diaphragme à son tour pousse sur les organes abdominaux situés sous lui, et cela fait ressortir le ventre.

o) La pression partielle de l'oxygène dans l'air contenu par l'espace mort à la fin de l'expiration est la même que la pression partielle de l'oxygène dans l'air, à savoir environ 20 % de 101.325 KPa (au niveau de la mer).

50) Un serpent arboréal de 80 g inspire-t-il autant d'air par minute qu'un écureuil arboréal de 80 g? Justifiez bien complètement votre réponse.

51) A certaines sources naturelles d'eau, il y a des moments de l'année où on ne retrouve que des chevreuils femelles, et d'autres moments de l'année où on ne retrouve que des mâles. Pourquoi?

52) En ne tenant compte que de leur différence de grosseur, dites si c'est un lézard de 400 g ou un lézard de 70 g qui se déshydratera le plus vite dans un désert, et expliquez bien pourquoi.

53) Pourquoi les espèces d'oiseaux granivores nourrissent-elles leurs jeunes avec des insectes plutôt qu'avec des graines (si elles sont granivores, on devrait s'attendre à ce qu'elles nourrissent leurs jeunes avec des graines, non?)

54) Pourquoi certains animaux du désert peuvent-ils survivre sans eau pendant de très longues périodes de temps? Comment appelle-t-on le type d'eau impliquée et d'où vient-elle?

55) À quoi sert un gésier? Donnez aussi un exemple.

56) Complétez les phrases suivantes :

Le vrai estomac des ruminants s'appelle le/la/l' ____ (a) _____. Le/la/l' ____ (b) _____ est l'action de manger ses propres excréments. On appelle ____ (c) _____ la quantité d'énergie consommée par un animal par unité de temps et par gramme de poids corporel. Les plantes entreposent le glucose en le transformant en un polysaccharide appelé ____ (d) _____; les animaux font la même chose mais le polysaccharide impliqué est le/la/l' ____ (e) _____. Un requin est (choisissez entre hyperosmotique, isosmotique, ou hypo-osmotique) ____ (f) _____ par rapport à son milieu externe. C'est surprenant, mais il y a une enzyme que presque aucun animal herbivore peut produire directement lui-même, mais dont il a vraiment besoin; cette enzyme est le/la/l' ____ (g) _____. Les ____ (h) _____ sont les plus petits replis retrouvés à la surface interne de l'intestin, dans le but d'augmenter sa surface d'absorption. Chez les poissons, le rôle de l'intestin est rempli par les ____ (i) _____. La technique de l'eau ____ (j) _____ permet de mesurer le taux métabolique d'un animal sur le terrain. On appelle ____ (k) _____ la phase de contraction des oreillettes du coeur. Si les mammifères avaient un système circulatoire fermé à un circuit plutôt qu'à deux circuits, ils auraient des problèmes surtout au niveau de (quel organe?) ____ (l) _____. En mots complets, PN_2 veut dire ____ (m) _____. Le volume d'air inspiré ou expiré à chaque cycle respiratoire par un poumon s'appelle "volume ____ (n) ____". Le/la/l' ____ (o) _____ est la principale endopeptidase sécrétée par l'estomac. On appelle ____ (p) _____ un estomac qui a des parois dures faites pour moudre la nourriture. Si vous voulez mesurer le niveau de déshydratation d'un crapaud que vous êtes en train de priver d'eau, vous devriez mesurer (quel paramètre relativement facile à mesurer?) ____ (q) _____. Les muscles inspiratoires chez les mammifères, les oiseaux, et la plupart des reptiles sont les muscles ____ (r) _____ et le diaphragme. On appelle ____ (s) _____ le maintien d'une variable autour d'un point de référence qui fluctue ou qui change de façon temporaire, en dépit des variations qui surviennent à l'extérieur du corps. Une moule ferme sa coquille et ne peut plus faire passer d'eau dans ses branchies; c'est grâce à son ____ (t) _____ qu'elle réussira à survivre quand même. Par ____ (u) _____ périphérique, un lézard peut se refroidir plus lentement lorsqu'il est placé dans un environnement plutôt froid. On utilise l'adjectif ____ (v) _____ pour désigner un milieu qui contient moins d'oxygène que d'habitude. Les branchies peuvent extraire une grande quantité d'oxygène de l'eau parce que les patrons de circulation de l'eau en dehors des lamelles et du sang dans les lamelles forment ensemble un système ____ (w) _____. On utilise l'expression ____ (x) _____ pour désigner le phénomène dans lequel l'affinité de l'hémoglobine des poissons pour l'oxygène ne peut pas atteindre 100% dans des conditions d'acidose. Le principal déchet azoté des oiseaux et des reptiles est une substance appelée ____ (y) _____ et la principale caractéristique de cette substance, qui explique sa présence chez des espèces terrestres ovipares, est qu'elle est ____ (z) _____. Les cellules à chlore se trouvent au niveau de (quel organe?) ____ (aa) _____ et on les retrouve chez des espèces qui habitent (quel type de milieu?) ____ (bb) _____. Le fait que la présence de CO_2 puisse influencer le pH du corps est dû à la réaction chimique suivante : ____ (cc) _____. L'acide ____ (dd) _____ est un des produits du métabolisme anaérobie chez les animaux. Dans des expériences où on veut voir si une grenouille est déshydratée dépendamment de son niveau d'eau entreposée dans son/sa ____ (ee) _____, la façon la plus simple de mesurer le niveau de déshydratation est de mesurer ____ (ff) _____. Si la quantité d'ions ____ (gg) _____ n'est pas assez abondante dans la nourriture, les animaux peuvent en extraire de leurs propres os. Le/la/l' ____ (hh) _____ est un appareil avec lequel on peut mesurer le contenu énergétique d'un échantillon d'aliments. Les humains végétariens doivent varier leur régime alimentaire pour s'assurer qu'ils vont obtenir tous les ____ (ii) _____. L'adjectif qui fait référence au foie est ____ (jj) _____. Dans des comparaisons interspécifiques chez les mammifères, la fréquence de battements cardiaques varie en fonction du poids corporel à l'exposant -0.25, le même exposant qui liait ____ (kk) _____ au poids corporel. On appelle ____ (ll) _____ la quantité d'énergie consommée par unité de temps par un animal testé sous des conditions standardisées. La raison anatomique pour laquelle la pression sanguine est moins forte

dans le circuit pulmonaire que dans le circuit systémique est que le circuit pulmonaire est plus ___(mm)___ que le circuit systémique. Notre appendice est un ___(nn)___ vestigial. L'adjectif ___(oo)___ indique un animal qui aurait de la difficulté à survivre si le contenu en sels de l'eau dans laquelle il vit changeait soudainement. Chez un animal osmoconforme, l'eau a tendance à (entrer dans le corps, sortir du corps, ou ni entrer ni sortir du corps?) ___(pp)___ . À l'entrée de l'intestin des oiseaux et des mammifères, des enzymes digestives sont déversées en provenance de/du/de la ___(qq)___ . Grâce à (quel organe?) ___(rr)___ , les oiseaux marins et reptiles marins peuvent éliminer l'excédent de sels absorbés avec l'eau de mer qu'ils boivent. Les déchets azotés sont le résultat du catabolisme des ___(ss)___ . Les crises cardiaques sont causées par un blocage au niveau de la circulation (donnez l'adjectif approprié) ___(tt)___ . On appelle ___(uu)___ l'ensemble des températures ambiantes sous lesquelles un animal endotherme n'a pas besoin de dépenser de l'énergie pour la thermorégulation. On appelle ___(vv)___ une solution manufacturée pour qu'elle ait sensiblement les mêmes ions, à des concentrations similaires, que ce qu'on retrouve dans les liquides interstitiels. L'odeur particulière de l'urine des diabétiques provient de la présence, dans l'urine, de ___(ww)___ . Les petits tubes que les physiologistes insèrent parfois dans les artères ou les veines des animaux, afin d'y prendre régulièrement des échantillons de sang ou y faire régulièrement des injections, s'appellent ___(xx)___ . Les requins sont particuliers en ce sens qu'ils accumulent ___(yy)___ dans leurs tissus pour les rendre ___(zz)___ (ici vous avez le choix entre : saumâtre, hyperosmotique, hypo-osmotique, isosmotique, myxine, et perméable) avec le milieu externe dans lequel ils vivent. Si la paroi de l'intestin se fait percer par de l'acide près de la sortie de l'estomac, alors on a un (soyez précis) ___(aaa)___ . On donne le nom de ___(bbb)___ au phénomène qui fait que la courbe de dissociation oxygène-hémoglobine se déplace vers la droite quand le milieu devient plus acide. Chez les mammifères, les muscles qui servent à inspirer sont les muscles intercostaux et le/la/l' ___(ccc)___ . Les paramètres qui déterminent la quantité de chaleur qui passe d'un objet à un autre par conduction sont la grandeur de la surface de contact, la différence de température et la distance entre les deux objets, et finalement ___(ddd)___ .

57) Pourquoi

- a) ... est-ce que les abeilles forment des essaims en forme de boule en hiver?
- b) ... est-ce que le nez d'un goéland coule quand il boit de l'eau de mer, mais pas quand il boit de l'eau douce?
- c) ... est-ce que la pression sanguine est plus élevée dans une artère que dans une veine?
- d) ... est-ce que les boas incubateurs perdent du poids pendant l'incubation?
- e) ... est-ce que les couleuvres présentent des couleurs corporelles plus foncées à mesure qu'on monte à des latitudes plus élevées?
- f) ... est-ce que la confiture pourrie très difficilement?
- g) ... est-ce que les vaches laitières ont parfois de la difficulté à se lever après avoir donné naissance à leur veau?
- h) ... est-ce que les phasmes (« *stick insects* ») sont nocturnes?
- i) ... est-ce que le courlis de Sibérie, avant sa longue migration, change son régime alimentaire pour des proies plus digérables, même si elles sont plus difficiles à trouver?
- j) ... est-ce qu'un animal doit manger?
- k) ... est-ce qu'un animal doit respirer?
- l) ... est-ce que les pattes d'un éléphant sont proportionnellement plus larges que les pattes d'une vache?
- m) ... est-ce qu'un cycliste dépense beaucoup moins d'énergie par kilomètre parcouru qu'un coureur?
- n) ... est-ce qu'un mammifère s'hérisse les poils quand il a froid?
- o) ... est-ce qu'un morse qui sort de l'eau est plus pâle que d'habitude?
- p) ... est-ce les fennecs (= renards du désert) ont de grandes oreilles?

- q) ... est-ce que les kangourous se lichen les bras?
- r) ... est-ce que les corneilles qui se promènent sur le gazon en été ont le bec ouvert?
- s) ... est-ce que les oies volent à très haute altitude lors de la migration?
- t) ... est-ce que les papillons de nuit sont plus poilus que les papillons diurnes?
- u) ... est-ce qu'un poisson meurt d'asphyxie hors de l'eau, même s'il y a plus d'oxygène dans l'air que dans l'eau?
- v) ... est-ce que la majorité des amphibiens vivent dans des milieux humides?
- w) ... est-ce que notre ventre ressort vers l'extérieur quand on inspire?
- x) ... est-ce que l'humain a plus tendance à ronfler que les autres espèces animales?
- y) ... est-ce que les insectes n'ont pas de sang rouge?
- z) ... est-ce qu'un serpent arboréal ondule sur place quand il monte un arbre?
- aa) ... est-ce qu'on a parfois la tête qui tourne quand on se lève trop vite?
- bb) ... est-ce qu'un phoque est essoufflé après une plongée de longue durée?
- cc) ... est-ce que les chevreuils lichen des roches, parfois?
- dd) ... est-ce qu'une termite exposée à de fortes P_{O_2} meure au bout de quelques jours?
- ee) ... est-ce que les vaches sont baveuses?
- ff) ... est-ce que certains animaux mangent leurs crottes?
- gg) ... est-ce que les originaux sont souvent retrouvés dans des étangs?

58) Les moustiques

Les moustiques ne sont pas très actifs en plein milieu de journées ensoleillées; ils sont plutôt actifs la nuit ou au crépuscule. La principale raison est qu'étant donné que les moustiques sont ___(a)___ et ___(b)___, alors ils ont un/une ___(c)___ plus ___(d)___, et cela fait en sorte que lors d'une journée ensoleillée ils ont plus de chance de ___(e)___ . Ceci étant dit, si un moustique vous pique, ce sera certainement une femelle, car seules les femelles (font quoi?) ___(f)___ et pour cela elles ont besoin de/du/des (quel nutriment?) ___(g)___ qui se trouve(nt) en bonne quantité dans votre sang. Pour minimiser le temps passé sur votre bras, le moustique va rapidement entreposer le sang ingéré dans un organe spécial appelé ___(h)___ qu'on peut décrire comme étant un/une ___(i)___ de/du ___(j)___ .

59) Les grenouilles

Les grenouilles ne boivent pas d'eau; elles obtiennent plutôt de l'eau de la façon suivante : ___(a)___ . Certaines espèces de grenouilles peuvent aussi entreposer de l'eau dans un organe particulier, le/la/l' ___(b)___ . La particularité de l'intestin des têtards de grenouilles est qu'il est ___(c)___ . Chez les grenouilles, les muscles qui sont activés pour remplir les poumons sont les muscles ___(d)___ . Certaines grenouilles canadiennes entreposent beaucoup de glucose dans leurs cellules avant l'hiver; les trois avantages de faire cela sont ___(e)___, ___(f)___, et ___(g)___ . Les grenouilles qui vivent dans le lac Titicaca (l'un de lacs le plus haut en altitude au monde) ont une peau qui est pleine de ___(h)___ pour pouvoir être capable de ___(i)___ . Pour déterminer si la production de sons (croassements) par les grenouilles mâles en période de reproduction est énergétiquement coûteuse, tu pourrais amener des mâles au laboratoire et mesurer ___(j)___ par unité de temps lorsque le mâle émet des croassements à diverses fréquences.

60) Les lézards et les serpents

Les iguanes de mer (les seuls lézards marins qui existent) ont souvent des petits dépôts blancs sur leur tête ou à la sortie de leurs narines; il s'agit probablement de cristaux de (quel(s) élément(s)?) ____ (a) ____ suite à l'évaporation d'une solution créée par (quelle structure particulière?) ____ (b) ____ . Les iguanes qui sont malades préfèrent se placer dans des endroits où la température ambiante est plus chaude, un exemple de (deux mots) ____ (c) ____ ; par exemple, s'il fait soleil, ils vont préférer s'étaler sur des roches de couleur plus ____ (d) ____ . Un lézard présente une queue plus grosse que celle d'un autre individu de la même espèce; vous en déduisez que le premier individu est (quoi, et qu'est-ce qui vous permet de dire cela?) ____ (e) ____ . Un serpent terrestre dépense moins d'énergie à se déplacer par kilomètre parcouru qu'un organisme coureur de même poids car il n'a pas besoin de ____ (f) ____ . Une femelle python s'enroule autour de ses oeufs dans le but de les ____ (g) ____ en faisant ____ (h) ____ . Les serpents arboréaux ont une capacité de ____ (i) ____ au niveau de leur queue qui est plus grande que chez les serpents aquatiques. La courbe de dissociation oxygène-hémoglobine d'un serpent marin qui passe beaucoup de temps en plongée à faible profondeur est différente d'une courbe normale de la façon suivante : ____ (j) ____ .

61) Les poissons

Les aquariophiles (les personnes qui gardent des poissons en aquarium) savent qu'il est important que le filtreur de leur aquarium contienne des microorganismes dont le rôle est de retirer le/la/l' (nommez la substance) ____ (a) ____ de l'eau, car c'est là le principal déchet azoté des poissons. Si leurs poissons d'eau douce ont des parasites externes, les aquariophiles peuvent essayer de les tuer (les parasites, pas les poissons!) en ajoutant un peu de sel à l'eau de l'aquarium, étant donné que les parasites sont plutôt (choisissez le mot le plus approprié parmi : osmorégulateur? ionorégulateurs? néphridiens? sténohalins? euryhalins? ectothermes? endothermes?) ____ (b) ____ . Les requins sont (hyperosmotiques? iso-osmotiques? hypo-osmotiques?) ____ (c) ____ par rapport à leur milieu, et cela s'explique par la présence de (quelle substance?) ____ (d) ____ dans leur corps. Comparativement à d'autres groupes d'animaux, le tube digestif des poissons est assez court et linéaire puisque la digestion et l'absorption des nutriments se fait dans les ____ (e) ____ plutôt que dans le tube lui-même. Si tu prends un choquemort acclimaté à l'eau douce et que tu le places dans l'eau de mer, il va réussir à survivre, surtout grâce à de grands changements qui vont se faire rapidement dans les membranes de ses ____ (f) ____ ; le principal changement sera l'apparition de « cellules ____ (g) ____ » qui vont (faire quoi?) ____ (h) ____ . Un poisson ouvre et ferme ses opercules à un rythme plus élevé lorsqu'il est dans de l'eau plus chaude, et il y a deux raisons pour cela : ____ (i) ____ et ____ (j) ____ .

62) Les chevreuils

Si vous entendez parler d'une source d'eau qui est très fréquentée par les chevreuils femelles au printemps et par les mâles à l'automne, vous devinez alors que l'eau de cette source est probablement riche en ____ (a) ____ , ce qui est utile pour les femelles pour qu'elles puissent (faire quoi?) ____ (b) ____ et pour les mâles pour qu'ils puissent (faire quoi?) ____ (c) ____ . Les chevreuils sont des ruminants : dans leur panse, ils ont des micro-organismes qui digèrent le/la/l' (quelle substance?) ____ (d) ____ du matériel végétal, ce que les enzymes du chevreuil lui-même ne peuvent pas faire. La panse du chevreuil est associée à trois autres compartiments, dont les noms sont (nommez les trois) ____ (e) ____ . En tant que ruminant, le chevreuil fait du/le/la ____ (f) ____ inversé tout le long de son/sa ____ (g) ____ dans le cou pour

ramener la nourriture dans sa bouche et prendre le temps de la mâcher; une telle rumination présente quatre avantages (en voici deux : ____ (h) ____ et ____ (i) ____); il y a aussi un désavantage (qui est celui-ci, bien expliqué : ____ (j) ____) ce qui explique pourquoi les chevreuils ont beaucoup de mortalité hivernale, quand ils doivent se contenter de manger des brindilles d'arbres.

63) Les chameaux

La bosse des chameaux contient ____ (a) ____ qui leur sert de ____ (b) ____; cette substance est concentrée dans les bosses plutôt que répartie partout autour du corps car elle a de bonnes propriétés ____ (c) ____, ce qui n'est pas idéal dans des milieux chauds. Les chameaux étant adaptés à la vie dans le désert, leur urine est probablement relativement ____ (d) _____. Les cavités nasales des chameaux du désert présentent beaucoup de ____ (e) ____ afin qu'il se fasse plus de ____ (f) ____ de la vapeur d'eau de l'air expiré. Une des adaptations particulières du chameau pour minimiser les besoins de transpirer (et donc pour économiser l'eau) est de laisser son/sa (quoi faire quoi?) ____ (g) ____ pendant le jour. En tant qu'animal du désert, il est probable que les ____ (h) ____ dans les reins des chameaux soient plus ____ (i) ____ que chez un animal non-désertique de même grosseur corporelle. Les chameaux ont un cou relativement long, ce qui les oblige à avoir un volume tidal qui est (quoi, et pourquoi?) ____ (j) _____.

64) Les oiseaux

Un changement anatomique intéressant qui survient chez les merles à l'automne est que leur (quoi fait quoi?) ____ (a) ____ étant donné que leur régime alimentaire (change de quelle façon?) ____ (b) _____. La gravelle que beaucoup d'oiseaux granivores mangent finit par prendre résidence dans (quelle partie précise de leur système digestif?) ____ (c) ____ et elle sert à faire une digestion (quel adjectif?) ____ (d) ____ des graines. Les parabronches et les capillaires pulmonaires des oiseaux forment un/une ____ (e) _____.

65) Divers

Le rôle premier de l'ADH est de ____ (a) _____. Le principal déchet azoté des reptiles est le/la/l' ____ (b) _____. Ce qui définit la fièvre du lait chez les vaches laitières, c'est ____ (c) _____. L'amidon est digéré par l'enzyme appelée ____ (d) ____, laquelle fonctionne mieux si l'amidon a été ____ (e) _____. Le liquide produit en grande quantité par l'intestin des mammifères porte le nom technique de ____ (f) _____. Le sphincter pylorique se trouve (où?) ____ (g) _____. Dans les livres de physiologie animale écrits en anglais, on peut lire les expressions « *foregut fermenters* » et « *hindgut fermenters* »; le terme « *foregut fermenters* » fait référence à des mammifères qui possèdent une chambre de fermentation vers le début de leur tube digestif (il s'agit de la panse des ruminants), tandis que « *hindgut fermenters* » fait référence à des animaux qui possèdent une chambre de fermentation spéciale vers la fin de leur tube digestif, et cette chambre de fermentation est en fait (quel organe?) ____ (h) _____.