PRESSION ATMOSPHERIQUE ET PIO_2

La pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Le tableau suivant donne quelques valeurs de la pression barométrique pour quelques altitudes :

altitude	*pression barométrique (Torr)*
Arcachon (0 m)	*760*
Balaïtous (3144 m)	*506*
camp 1 du Huscarán (Pérou)	*380*
Sagarmata (Everest) (8848 m)	*247*

La pression saturante de vapeur d'eau à 37°C est de 47 Torr.

Calculez, pour ces 4 altitudes, la pression partielle de l'air inspiré et la pression partielle en oxygène de l'air inspiré.

réponse

La pression partielle de l'air sec est la pression atmosphérique moins la pression partielle en vapeur d'eau. La proportion d'oxygène dans l'air sec est de 21%.

La pression partielle de air inspiré est donc la pression atmosphérique moins 47 mm Hg, et la pression partielle en O_2 est 21% de cette pression.

Les résultats sont donc les suivants :

altitude	*P. barométrique(Torr)*	*Pair inspiré (Torr)*	*PIO_2 (Torr)*
0	760	713	150
3144	506	459	97
5500	380	333	70
8848	247	200	42

PRESSIONS PARTIELLES ALVEOLAIRES AU SOMMET DE L'EVEREST

Les pressions partielles alvéolaires en CO_2 ($PACO_2$) et en O_2 (PAO_2) peuvent être calculées à partir des formules suivantes :

$PACO_2 = (V°CO_2 / V°A)K$

$PAO_2 = PIO_2 – (PACO_2/R) + F$

$V°CO_2$: production de CO_2
$V°A$: ventilation alvéolaire
R : quotient respiratoire
F : facteur de correction ($F = 0$ lorsque $R = 1$)

La $PACO_2$ normale chez l'homme est de 40 mmHg. ans ces conditions, quelle serait la PAO_2 d'un alpiniste au sommet de l'Everest ? (on prendra $R = 1$)

réponse :
lorsque R = 1, alors $PAO_2 = PIO_2 – PACO_2$
La PIO_2 a été calculée dans l'exercice précédent : 42 mm Hg
Donc la PAO_2 serait égale à 42 – 40 = 2 mm Hg

effet de l'hyperventilation :

si la ventilation de l'alpiniste est multipliée par 4, quelles seront alors des valeurs de la PAO_2 et de la $PACO_2$ *(en admettant que la production de CO_2 demeure constante)* ?

si la ventilation est multipliée par 4, la $PACO_2$ est divisée par 4 (cf. 1re équation). Elle devient égale à 10 mm Hg, et la PO_2 est alors égale à 42-10 = 32 mm Hg.

Quel effet cela aura-t-il :

- *sur la PO_2 artérielle ?*

L'hyperventilation, en augmentant la PAO_2, va augmenter la PO_2.

- *la PCO_2 artérielle ?*

La PCO_2 artérielle est diminuée dans les mêmes proportions que la $PACO_2$.

- *sur le pH sanguin ?*

La diminution de la PCO_2 artérielle entraîne une alcalose.

(il n'est pas demandé de valeurs chiffrées)

CONCENTRATION EN OXYGENE DU SANG : EFFET DE L'ALTITUDE

Donnez la valeur de la PO_2 artérielle (PaO_2) normale chez l'homme au niveau de la mer.

- *La concentration moyenne en hémoglobine (Hb) est de 15 g/100 ml.*
- *On rappelle que la concentration en O_2 du sang (en ml/100ml) est donnée par la formule :*

$[O_2] = (1,39 \times Hb \times (\%Sat/100)) + 0,003\ PaO_2$

(%Sat étant % de saturation de l'hémoglobine)

À partir de la courbe de saturation de l'hémoglobine et de la concentration en hémoglobine du sang, calculez la concentration en oxygène du sang dans ces conditions.

réponse :

La PO_2 moyenne est de 90 à 100 mm Hg. (On prendra 100 mm Hg pour la suite des calculs) pour cette pression, le % de saturation est près de 100 % (on prendra 100% pour les calculs).

La concentration en O_2 du sang artériel est donc :

$[O_2] = (1,39 \times 15 \times 1) + (0,003 \times 100) = 20,85 + 0,3 = 21,15$ ml/100ml de sang.

À 4600 m, la PaO_2 chez l'homme est de 45 mmHg. Calculez alors la concentration en oxygène dans le sang.

réponse

Pour une telle pression, le % de saturation est de l'ordre de 75 %. La concentration en oxygène dans le sang est alors de :

$[O_2] = (1,39 \times 15 \times 0,75) + (0,003 \times 45) = 15,63 + 0,14 = 15,8$ ml/100ml de sang.

CONCENTRATION EN OXYGENE DU SANG : EFFET DE LA POLYGLOBULIE ET DES VARIATIONS DE LA COURBE DE DISSOCIATION HB-O2

La polyglobulie d'altitude amène couramment une concentration en hémoglobine de 20 g/100ml.

En tenant compte de ce qui a été calculé précédemment, calculez la concentration en O_2 lors de polyglobulie.
Comparez aux valeurs de $[O_2]$ trouvées lors de l'exercice précédent. Commentez.

réponse

$[O_2] = (1,39 \times 20 \times 0,75) + (0,003 \times 45) = 20,85 + 0,14 = 21$ ml/100ml de sang.

L'augmentation de la concentration en hémoglobine due à l'hyperglobulie ramène la valeur de la concentration en oxygène dans le sang à celle correspondant aux conditions normoxique. Il s'agit d'une réponse adaptée – même si le choix adaptatif n'est pas forcément le meilleur.

Chez le lama et la vigogne – Camélidés d'Amérique du sud vivant en altitude –, on n'observe pas de polyglobulie, et la concentration en hémoglobine est proche de celle des animaux de plaine. Par contre, l'hémoglobine de ces animaux présente une affinité plus importante pour l'oxygène que les animaux de plaine.

En prenant comme valeur de Hb 15g/100 ml et comme valeur de la PaO_2 45 mmHg, calculez la concentration sanguine en O_2, en tenant compte de la courbe de dissociation de l'oxygène. Comparez avec les valeurs précédentes. Commentez.

L'augmentation de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène fait que pour une pression de 45 mm Hg, le % de saturation est d'environ 90 %. La concentration sanguine en O_2 est alors de :

$[O_2] = (1,39 \times 15 \times 0,90) + (0,003 \times 45) = 18,77 + 0,14 = 18,9$ ml/100ml de sang.

L'augmentation de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène fait que, malgré la faible PO_2 et l'absence d'augmentation de la concentration sanguine en hémoglobine, la concentration sanguine en O_2 est à peu près identique à celle des animaux de plaine.

Au niveau de la mer, la concentration en oxygène dans le sang d'un lama sera quasiment identique à sa concentration en altitude :

$[O_2] = (1,39 \times 15 \times 1) + (0,003 \times 100) = 20,85 + 0,3 = 21,15$ ml/100ml de sang.

LA PLONGEE

Pourquoi un plongeur en profondeur ne peut pas respirer de l'air à pression atmosphérique ?

S'il respire de l'air à la pression atmosphérique, le poumon, qui est un organe creux, sera écrasé par la pression liée à la profondeur, et la respiration sera impossible.

Quelle doit être la pression du mélange gazeux inspiré par un plongeur ?

La pression du mélange gazeux respiré doit être égale à la pression de l'environnement, de manière à ce que les pressions s'équilibrent.

Pourquoi un plongeur doit-il expirer lors de la remontée ? Que risque-t-il s'il remonte sans avoir expiré ?

Lors de la remontée, la diminution de pression va entraîner une augmentation de volume des gaz, selon la loi de Boyle-Mariotte. En absence d'expiration, le volume pulmonaire va augmenter, au delà de son volume maximal normal. Pour éviter ce phénomène, le plongeur doit expirer lors de la remontée, surtout dans la zone près de la surface, où la variation de volume est la plus importante. S'il remonte sans avoir expiré, l'augmentation du volume du poumon peut provoquer des fissurations bronchiques et alvéolaires, avec pneumothorax, emphysème sous-cutané, embolie gazeuse.

Un plongeur descend à une profondeur de 70 m. Quelle est la pression partielle en O_2 et en N_2 dans l'air inspiré ?

À 70 m, la pression ambiante est égale à 8 fois la pression atmosphérique. La pression de l'air inspiré est la pression ambiante moins la pression saturante de vapeur d'eau à 37 °C. Les pressions partielles en gaz sont obtenues en pourcentage de la pression d'air inspiré (21 % d'O_2 ; 79 % de N_2) :

$PIO_2 = [(8 \times 760) - 47] \times 0{,}21 = 1267$ Torr = 1,67 atm
$PIN_2 = [(8 \times 760) - 47] \times 0{,}79 = 4766$ Torr = 6,27 atm

À quels problèmes le plongeur va-t-il être confronté ?

Les pression partielles en oxygène et en azote sont telles qu'elles atteignent des valeurs toxiques. La PIO_2 dépasse 1,6 atm, pression à partir de laquelle l'oxygène a des effets toxiques aigus convulsivants (effet Paul Bert). La PIN_2 est telle que l'azote a également des effets toxiques, sur le système nerveux central, entraînant une narcose à l'azote (ivresse des profondeurs).

Avant une plongée en apnée, certains plongeurs hyperventilent volontairement. Pourquoi ? Quelles peuvent être les conséquences néfastes d'une telle pratique ?

L'hyperventilation va entraîner d'une part une augmentation de la quantité d'oxygène dans le sang, d'autre part une hypocapnie. L'augmentation de la quantité d'oxygène dans le sang va augmenter la résistance à l'hypoxie induite par la plongée en apnée. D'autre part, l'hypocapnie et l'augmentation de pH qui en résulte vont inhiber la ventilation. Au cours de la plongée, la diminution de la pression partielle en oxygène – liée à l'hypoxie – va stimuler les centres respiratoires et provoquer un réflexe d'inspiration. En inhibant ce réflexe, le plongeur peut prolonger son temps d'apnée. Le risque est que l'anoxie cérébrale entraînée par l'hypoxie et aggravée par l'alcalose entraîne une perte de conscience avant que le réflexe d'inspiration n'oblige le plongeur à remonter reprendre sa respiration. Il y a alors risque de noyade**.**

SOLUBILITE DES GAZ DANS L'EAU

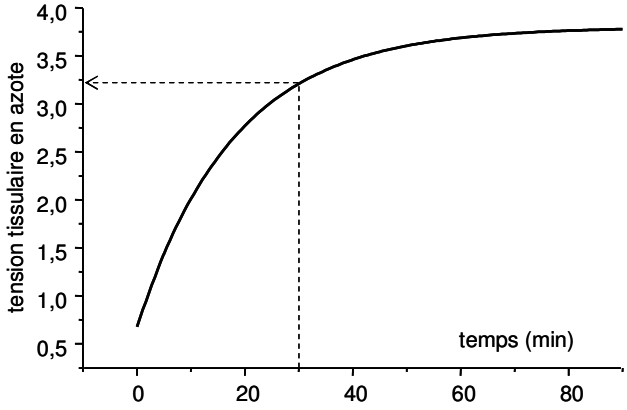
De quoi dépend la quantité de gaz dissous dans un liquide à l'équilibre ? Quelle est la loi qui permet de déterminer cette quantité ?

La quantité de gaz dissous dans un liquide dépend principalement de la solubilité du gaz dans ce liquide et de la pression partielle du gaz. La solubilité dépend de la nature du gaz, du liquide et de la température (la solubilité diminue lorsque la température augmente). La solubilité dans l'eau dépend des sels en solution – la solubilité de l'oxygène dans l'eau de mer est inférieure de 20 % à sa solubilité dans l'eau douce.
La loi qui donne la concentration de gaz dissous en fonction de la pression partielle du gaz est la loi de Henry :

$$Ca = K_H \times P_a$$

C_a = concentration en gaz dissous
P_a = pression partielle du gaz
K_H = coefficient de Henry pour le gaz en question
K_H dépend de la température. En général, il est donné pour la température standard (298,23 K)

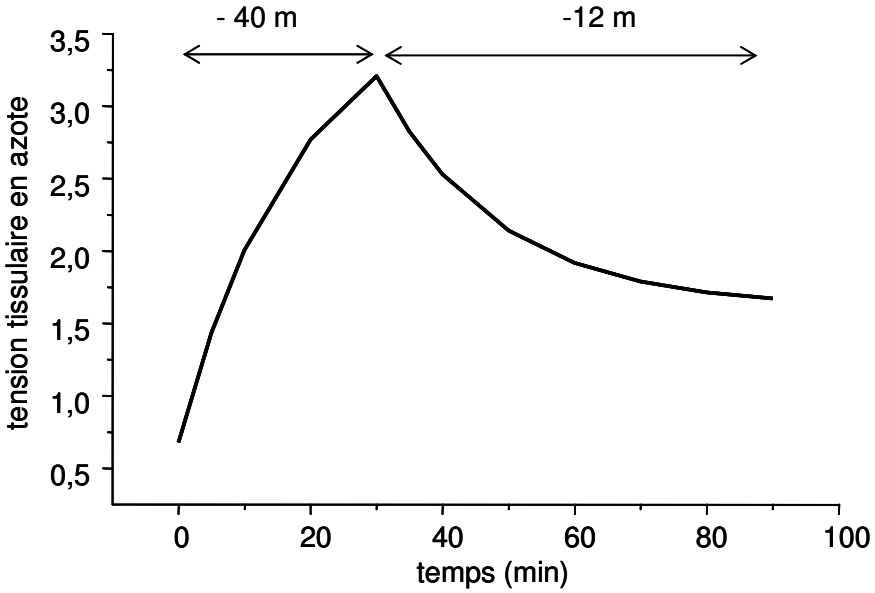
Un plongeur respirant de l'air comprimé descend à 40 m de profondeur et y reste pendant 30 min (on négligera le temps nécessaire à la descente). Duelle est la tension d'azote dissous dans la moelle épinière du plongeur ?
Que peut-il se passer si le plongeur remonte directement à la surface ?



D'après la courbe, au bout de 30 min, la tension en azote de la moelle épinière est d'environ 3,25 atm. Si, le plongeur remonte directement à la surface, la pression ambiante sera de 1 atm, et la pression partielle en azote d'environ 0,80. L'azote dans la moelle épinière se trouvera en état de sursaturation. Tissu à courte période (12,5 min), la moelle épinière a un coefficient critique de 2,5, qui sera dépassé en cas de remontée directe à la surface. Le plongeur risque un accident de décompression qui, au niveau de la moelle épinière, peut provoquer une paraplégie.

SOLUBILITE DES GAZ DANS UN LIQUIDE

Après 30 min de plongée à 40 m, le plongeur décide de remonter en effectuant un palier à 12 m. La courbe suivante montre la variation de la tension en azote dans la moelle épinière depuis le début de la plongée.



Commenter la courbe.

À 12 mètres de profondeur, la pression ambiante est légèrement supérieure à 2 atm (2,2 atm). La PIO_2 est plus faible qu'à 40 m de profondeur, mais plus élevée qu'à la surface. Il y a sursaturation, mais moins importante que si le plongeur était à la surface (la PIN_2 a 12 m est de 1,69 atm.), et le coefficient de sursaturation ne dépasse pas la valeur critique ; le plongeur peut donc remonter à la profondeur de 12 m sans accident de décompression. La tension en azote dans la moelle épinière va diminuer selon une exponentielle décroissante (suivant la loi de Haldane). Lorsque la tension aura diminué de telle sorte que la sursaturation par rapport à la pression atmosphérique soit inférieure au coefficient critique, le plongeur pourra achever sa remontée à la surface sans accident de décompression.

NB : ce calcul ne correspond pas à une situation réelle, car il n'est tenu compte que d'un seul compartiment, à période courte. Le principe est le même pour les compartiments à période longue, mais avec des cinétiques de saturation et de désaturation et des coefficient critiques différents, ce qui rend la situation réelle plus complexe (et peut nécessiter plusieurs paliers).

Pourquoi est-il inutile, voire dangereux, de prolonger le palier ?

Il est inutile de prolonger le palier au delà du temps nécessaire pour pouvoir remonter au palier suivant ou à la surface sans dépasser le coefficient de saturation critique, car on augmente le temps de plongée dans diminuer le temps de dégazage complet, qui ne s'effectuera qu'à la surface. De plus, les tissus à longue période se saturant en plusieurs heures, l'allongement du temps de plongée aux paliers – donc en profondeur – peut augmenter la saturation de ces tissus, et donc augmenter les risques d'accident de décompression – sans compter les autres risques induits par l'augmentation du temps d'immersion.

MAMMIFERES PLONGEURS

quantité de sang et pouvoir oxyphorique chez le phoque et chez l'homme :

	phoque (30 kg)	**homme (70 kg)**
sang (litre)	4,5	5
O_2 (ml/100 ml de sang	30-40	20

Calculer la quantité d'oxygène stocké dans le sang, par kg de poids corporel, chez l'homme et chez le phoque. Qu'en conclure sur les possibilités de plongée en apnée dans ces deux espèces ?

La quantité totale d'oxygène stockée dans le sang d'un phoque de 30 kg est :
30 à 40 ml x 45 = 1350 à 1800 mlO_2, soit 45 à 60 mlO_2/kg de poids corporel

Chez l'homme, cette quantité est de :
20 x 50 = 1000 mlO_2, soit environ 15 mlO_2/kg de poids corporel.

Les réserves sanguines en oxygène du phoque sont donc 3 à 4 fois plus importantes que celle de l'homme, ce qui augmente le temps de plongée en apnée.

Ces caractéristiques permettent-elles d'expliquer à elles seules les performances de plongée des Mammifères aquatiques ?

Non, car le temps de plongée en apnée d'un dépasse largement 6 fois le temps de plongée en apnée d'un homme. D'autres mécanismes permettent une plongée en apnée plus longue : stockage d'O_2 dans les muscles par la myoglobine, diminution de la consommation en oxygène, métabolisme anaérobie et réduction du métabolisme basal.

Pourquoi les Mammifères plongeurs ne souffrent-ils pas de problème de décompression ?

Le risque d'accident de décompression est lié à l'existence d'échanges gazeux dans le poumon pendant la plongée. Or, les Mammifères plongeurs plongent en expiration, sans air dans le poumon, donc sans échanges gazeux durant la plongée.

Est-il possible de respirer un liquide ? pourquoi ?

Il n'y a pas d'impossibilité théorique à la respiration pulmonaire de liquide. Les facteurs limitants sont la faible quantité d'oxygène dissous dans l'eau, les problèmes thermiques, osmotiques, et la viscosité des liquides qui entraîne un effort respiratoire important.
En augmentant la pression ambiante, on augmente la quantité d'oxygène dissous dans l'eau, et on peut arriver à des concentrations en O_2 suffisantes pour pourvoir aux besoins en oxygène (par exemple, avec une pression de 8 atm en oxygène pur). Des expériences ont été faites chez le rat et le chien montrant que, dans de telles conditions, les animaux ont survécu plusieurs heures en respirant de l'eau (plus précisément un liquide isotonique pour éviter les problèmes d'osmolarité).