

ECHANGES GAZEUX OU LE CHEMIN DE L'AIR VERS LA CELLULE

Objectif : prendre conscience de l'équilibre très subtil entre la ventilation et la vie de mes cellules, qu'il va falloir maintenir avant pendant après la plongée.

Généralités

L'air

Composition de l'air en surface inspiré.

Inspiration / expiration la notion de débit par différence de pression

Echelle de valeurs et conversion

Ventilation Pulmonaire

Les voies aériennes supérieures

Les bronches et la répartition de l'air dans les poumons

L'air alvéolaire

Composition de l'air expiré

Echange gazeux

Rappel d'anatomie et physiologie des poumons et de l'alvéole

La Membrane Alveolo Capillaire MAP

L'HEMATOSE (henry et fick)

Respiration cellulaire

La respiration cellulaire : le rôle de l'eau (H₂O)

La respiration cellulaire : aérobie et VO₂max

Le sang veineux mêlé

La régulation

Les Chémorécepteurs et la réaction du SNC aux variations du PH sanguin

Spécificité de la respiration cellulaire du cœur et des poumons

Tableau de synthèse

Le cas de l'essoufflement

Le cas de l'apnée

La noyade

Rappel

L'osmose

Généralités

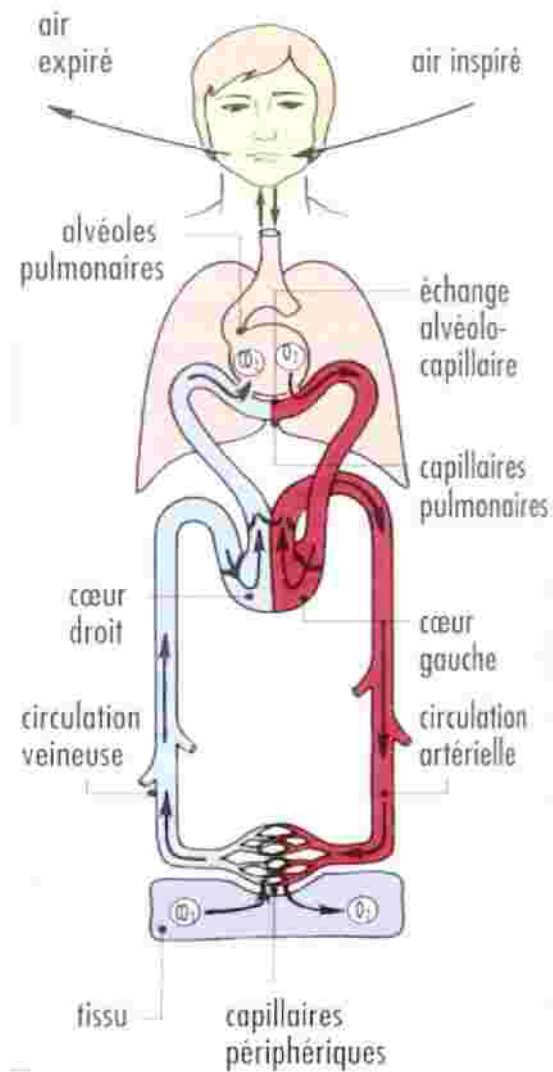
PHASE 1 : LA VENTILATION

LES POUMONS : LA ZONE D'ÉCHANGE

PHASE 2 : LE TRANSPORT DES GAZ

PHASE 3 : LA RESPIRATION CELLULAIRE

LES TISSUS : NOUVELLE ZONE D'ÉCHANGE



QUI PERMET LE RENOUVELLEMENT DE L'AIR DANS LES POUMONS

L'HEMATOSE

L'Air

Composition de l'air en surface inspiré.

L'air que nous respirons est composé de plusieurs gaz qui sont considérés à l'équilibre à une pression de une Atmosphère ou 1013 hPa à 15 °C .

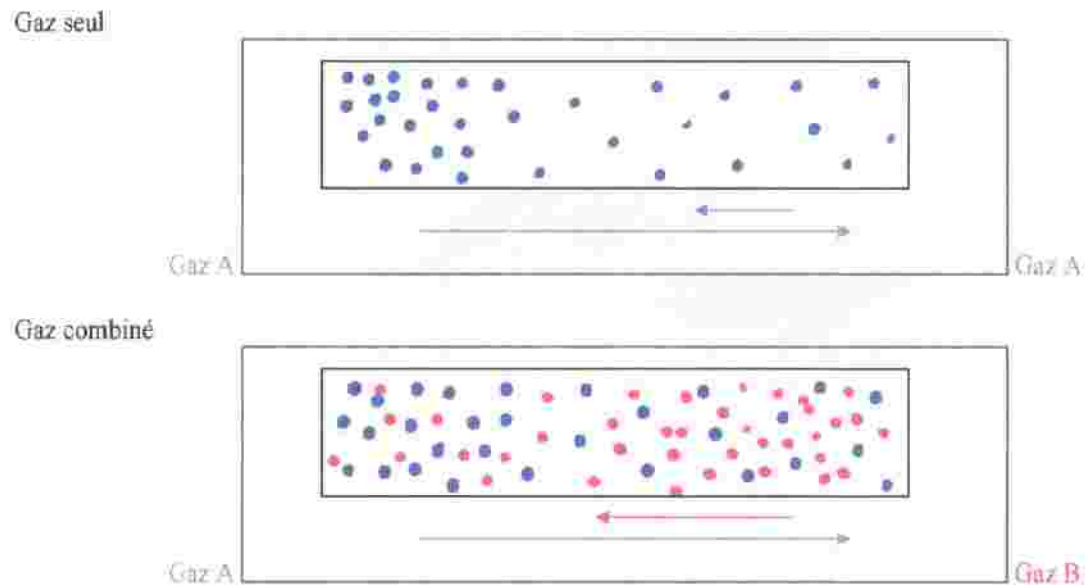
l'Azote (N ₂)	78,084 %
l'Oxygène (O ₂)	20,946 %
l'Argon	0,934 % associé à l'azote avec les autres gaz rares Néon, Krypton, Hélium, Xénon, Radon, Hydrogène.
Et des traces de CO ₂	0,037% Dioxyde de carbone

Nous considérons donc 79% de N₂ et 21% d'O₂ avec le CO₂ négligeable.

Chacun de ces gaz se comportent de façon indépendante dans l'air et s'équilibrent indépendamment dans l'espace qu'ils occupent.

C'est le principe de la « **diffusion** »

Chaque gaz diffuse d'une zone de pression partielle élevée vers une zone de pression partielle plus basse jusqu'à l'équilibre.



Inspiration / expiration la notion de débit par différence de pression

Pour créer un débit il faut nécessairement une différence de pression au travers d'une section.
Avec l'air c'est la différence de pression qui fixe la vitesse à travers les voies aériennes.

Echelle de valeurs et conversions de pression

Atmosphère	mbars	bars	mmHg	hPa	kPa
1	1013,25	1,01325	760	1013,25	101,325

Pression partielle des principaux gaz qui composent l'air inspiré au niveau de la mer.

GAZ	mbars	bars	mmHg	hPa	kPa
AIR	1013,25	1,01325	760	1013,25	101,325
O2 21%	212,73	0,21273	159,6	212,73	21,273
N2 79%	800,46	0,80046	600,4	800,46	80,046
CO2 0,037%	0,375	0,0000375	0,2812	0,375	0,0375

Ventilation Pulmonaire

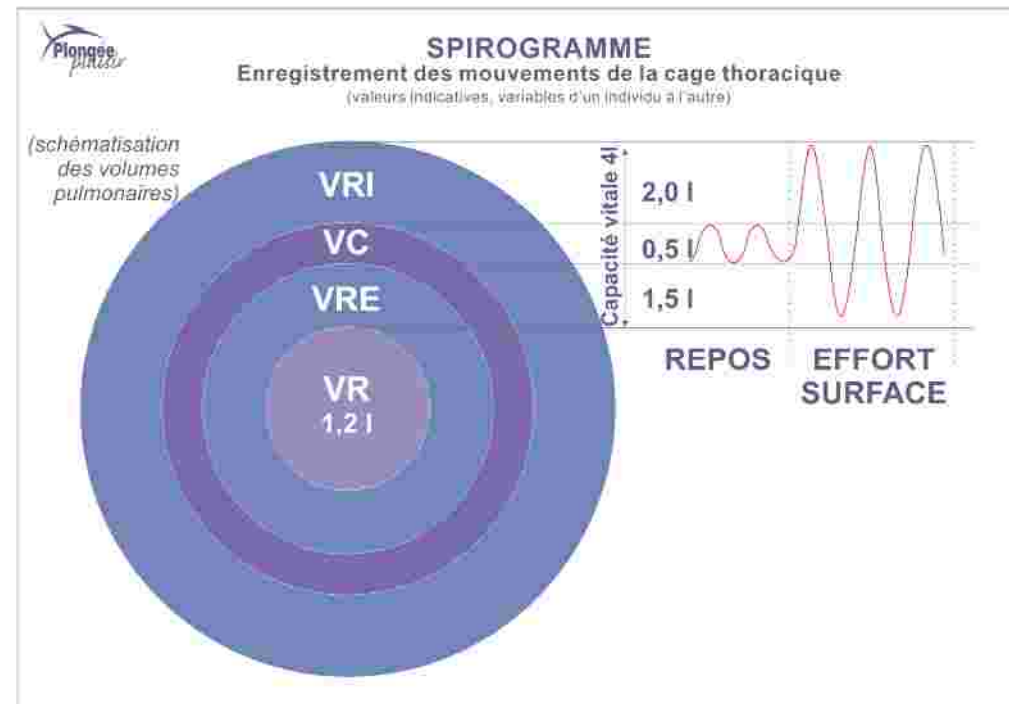
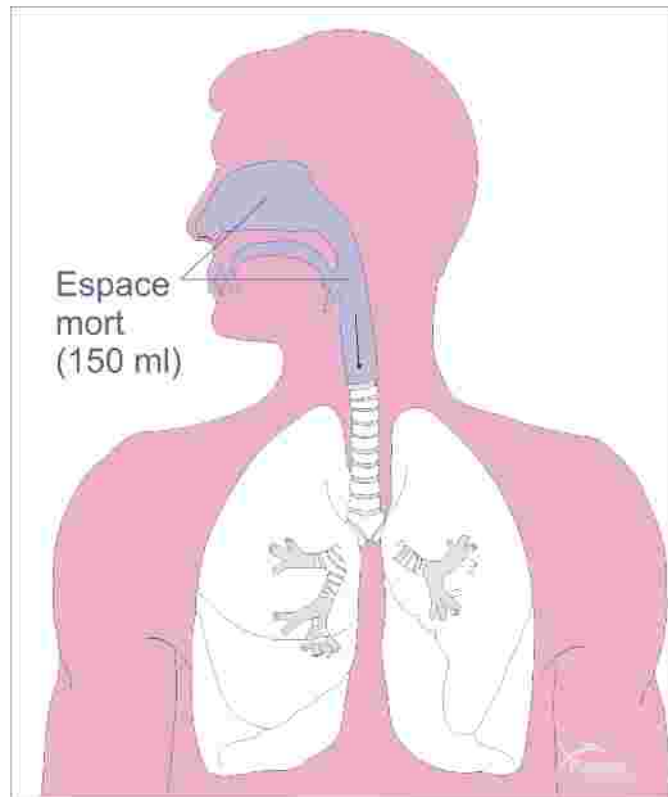
Les voies aériennes supérieures

Au repos nous renouvelons une très petite partie de l'air contenu dans les poumons.

Sur 0,5 litres d'échange 0,15 litres viennent de l'espace mort et donc seulement 0,35 litres soit 1/5^{ème} d'air frais entre dans la ventilation.

En exercice, l'amplitude augmente et nous échangeons environ 1/3 en renouvellement d'air frais.

Cette air frais va diffuser dans les poumons jusqu'à atteindre l'alvéole qui est la zone où la **PPO₂ est la plus faible** et la **PPCO₂ est la plus forte**.



Cela représente une très petite quantité de gaz 0,35 litres pèse 0,36 grammes, l'oxygène nécessaire à la vie représente donc 0,076 grammes. L'air ambiant à une PPO₂ de 160 mmHg soit 0,21 Bars et 0,3 mmHg de CO₂ donc très proche de 0 bars.

Les bronches et la répartition de l'air dans les poumons

Lors de son arrivée dans les poumons via les bronches l'air n'est plus qu'à 120 mmHg de O₂ (0,16 bar) et à 34 mmHg de CO₂ (0,05 bar) car il se mélange avec l'air non renouvelé , l'air se répartit ensuite par diffusion dans les alvéoles mais de façon inégale pour finir a 100mmHg (0,14 Bar) d'O₂ dans l'alvéole et 40 mmHg (0,053 bars) de CO₂.

Normalement l'air alvéolaire devrait être à 105 mmHg d'O₂ mais les shunts pour oxygéner le poumon lui-même et les coronaires cardiaques prélèvent une petite partie en priorité.

Le type de ventilation et la position du corps va influencer également sur les zones d'échange.

Diffusion (air)

Les alvéoles distendues dans le haut des poumons vont être moins compliantes et il y aura donc une **Ventilation moindre**

Perfusion (sang)

La pression vasculaire plus basse dans le haut des poumons va réduire le recrutement/distension

La résistance plus élevée due à la distension abouti à une **Perfusion moindre**

Diffusion (air)

Les alvéoles non distendues dans le bas des poumons vont être compliantes , se qui favorise le renouvellement

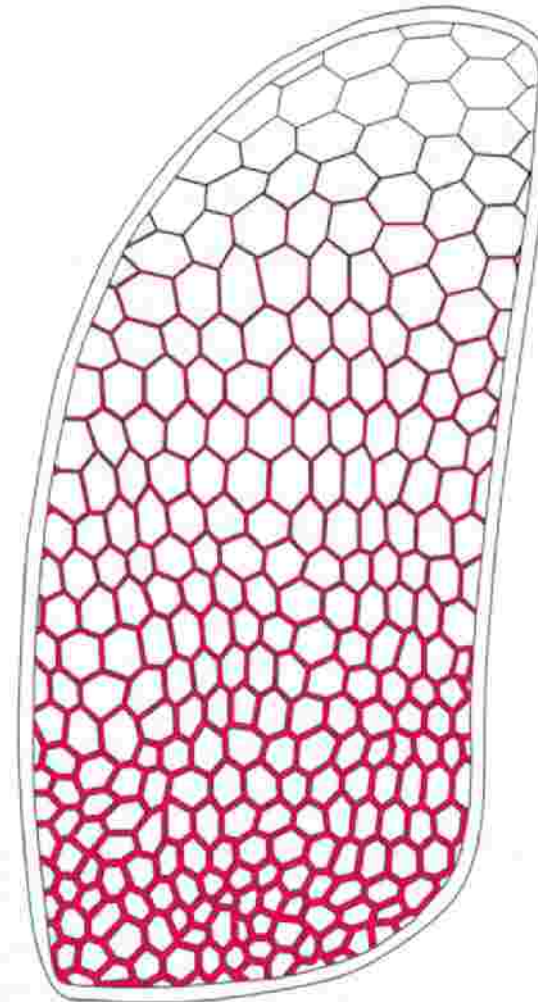
Ventilation plus élevée

Perfusion (sang)

La pression vasculaires plus hautes dans le bas des poumons va Augmenté le recrutement/distension

La résistance moins élevée due aux alvéoles non distendues

Abouti à une **Perfusion plus élevée**

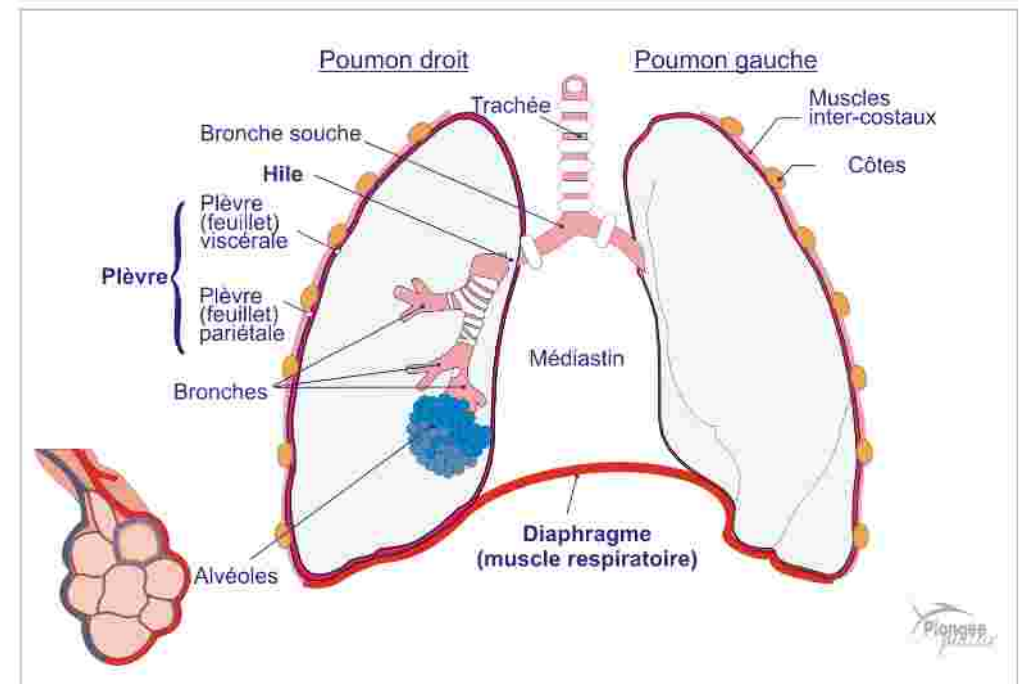


L'air alvéolaire

L'air alvéolaire est différent de l'air inspiré car seule une petite partie de l'air frais renouvelé l'a atteint (échange et diffusion) et il a également été humidifié suite à son passage dans les voies aériennes supérieures.

Au bout du chemin l'air alvéolaire se compose de :

L'O₂ est à 100 mmHg (0,14 Bars) en moyenne
Le CO₂ reste constant à 40 mmHg (0,053 bars)
Vapeur d'eau environ 45 mmHg (0,06 bars)



Composition de l'air expiré

L'air expiré est différent de l'air alvéolaire car il s'est mélangé avec l'air contenu dans les espaces morts et dans les bronches.

Le CO₂ est de l'ordre de 34 mmHg (0,045 bars) , il va être évacué .

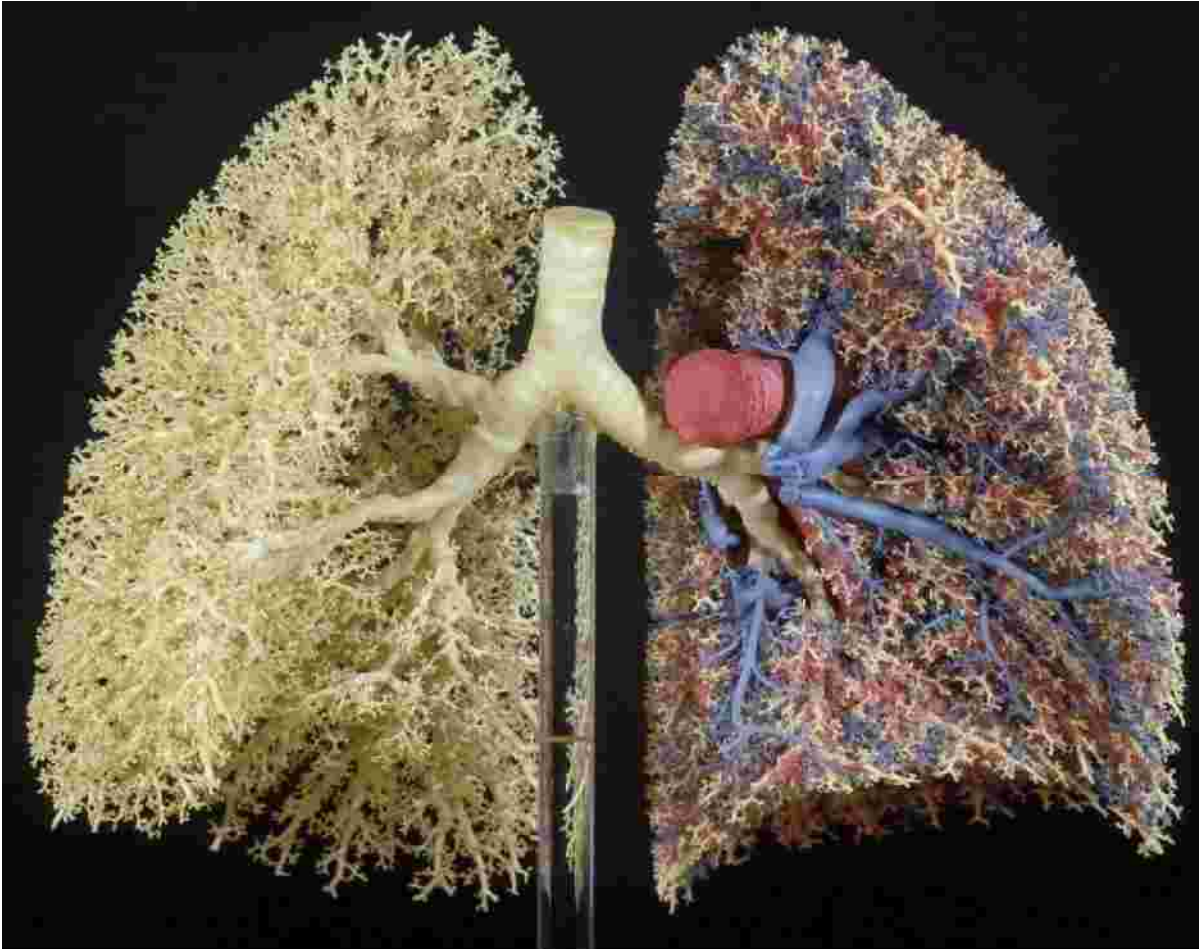
L'O₂ est à 120 mmHg (0,16 bars) , il va être renouvelé .

Vapeur d'eau environ 45 mmHg (0,06 bars) elle va être évacué également.

Echange gazeux

Rappel d'Anatomie et physiologie des poumons et de l'alvéole

Arbre bronchique (ventilation alvéolaire) et vaisseaux pulmonaires (circulation du sang)



Les poumons sont constitués de deux réseaux bien distincts :

- l'arbre bronchique le réseau d'air
- et le réseau sanguin (sang)

L'arbre bronchique a un volume variable dû aux variations de diamètre des alvéoles.

Environ 700 Millions d'alvéoles dont le diamètre varie de 0,1 à 0,5 mm entre l'expiration et l'inspiration représentant une surface d'échange d'environ 150m².

Le réseau sanguin contient environ 500 ml de sang soit 10 à 12 % du sang contenu dans le corps.

Le ventricule droit alimente le réseau en sang veineux mêlé par le biais des artères pulmonaires dans la petite circulation.

Le réseau se caractérise par un très grand débit avec une faible résistance due au nombre de capillaires.

L'Alvéole

L'alvéole est un petit sac qui se trouve en terminaison du réseau de bronches. C'est le lieu de l'échange entre l'air du système ventilatoire et le sang.

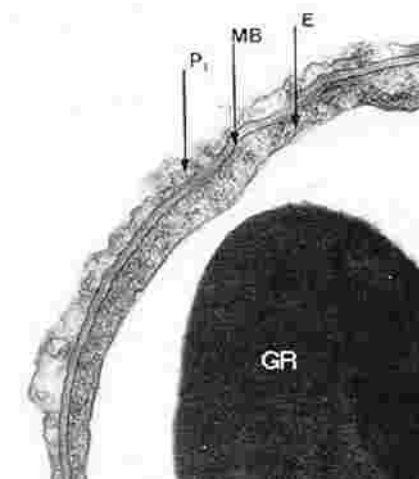
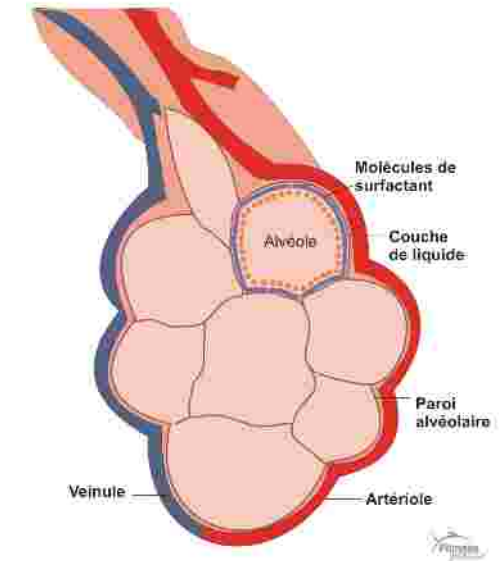
L'alvéole est élastique grâce à la présence d'un surfactant qui la maintient ouverte.

Les différents gaz contenus dans l'air alvéolaire vont échanger par diffusion au travers d'une membrane très fine appelée MAP Membrane Alveolo Capillaire vers le liquide sanguin.

Inversement les gaz contenus dans le sang vont diffuser vers l'air alvéolaire (de la plus grande Pression Partielle vers la plus basse)

La Membrane Alveolo Capillaire MAP

La MAP a une épaisseur d'environ 0,3 à 0,5 micron, elle forme une paroi entre l'air et le sang et elle est composée du surfactant et de tissu dit conjonctif.



C'est le lieu où se produit **L'HEMATOSE**

L'HEMATOSE (henry et fick)

HEMATOSE : Ensemble des échanges alvéolo-capillaires permettant l'apport d'oxygène au sang et l'élimination du gaz carbonique produit par les cellules.

Sang hématosé : **sang riche en oxygène**

LOI DE HENRY rappel

A température constante et à l'équilibre, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide
On appelle Tension, la quantité de gaz dissous dans un liquide (c'est la PP de DALTON avec les gaz mais dans un liquide)
(voir les 7 facteurs de dissolution cours précédant)

LOI DE FICK

La loi de Fick établit que le débit de transfert d'un gaz à travers une couche de tissu est proportionnel à sa surface ainsi qu'à la différence de pression partielle du gaz entre ces 2 faces. La diffusion est également inversement proportionnelle à l'épaisseur du tissu.

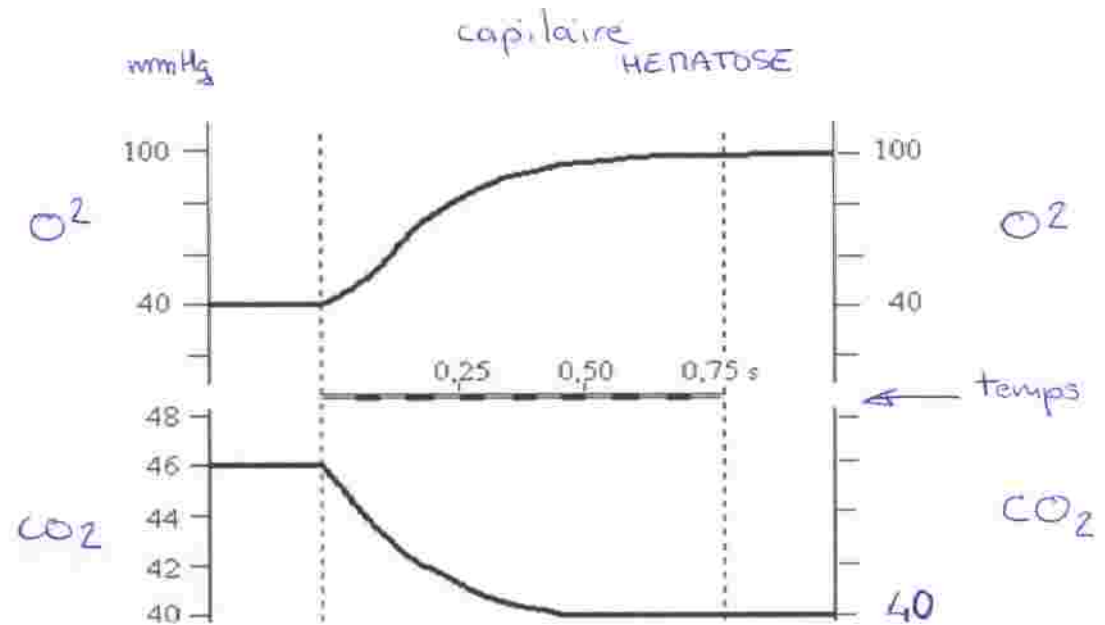
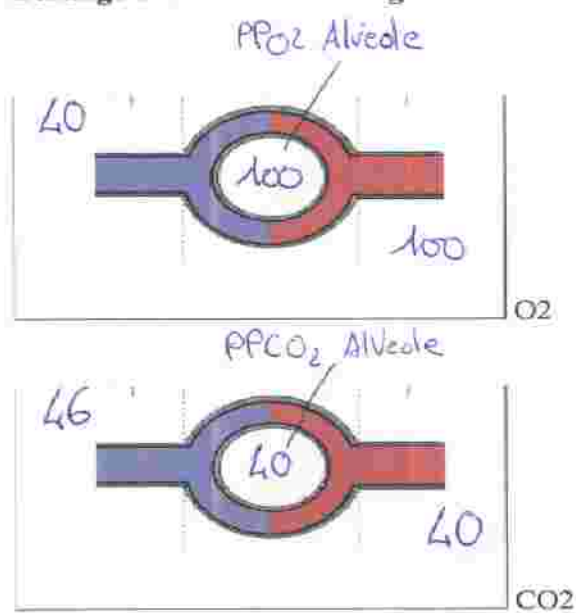
De plus, la vitesse de ce phénomène est proportionnelle à une « constante de diffusion » qui dépend des propriétés du tissu et du gaz donné.

La capacité de diffusion à travers la membrane va donc dépendre :

- des caractéristiques de la **membrane (MAP)**
- du **gradient de pression** des deux côtés de la membrane
- du **temps de contact** entre le gaz et la membrane
- de la **constante de diffusion** des gaz (des caractéristiques des gaz O₂ CO₂ N₂)
- de la **surface d'échange**

L'état de nos poumons, la nature du gaz respiré et la façon dont nous ventilons aura donc une incidence directe sur l'échange gazeux.

Echange entre alvéole et sang



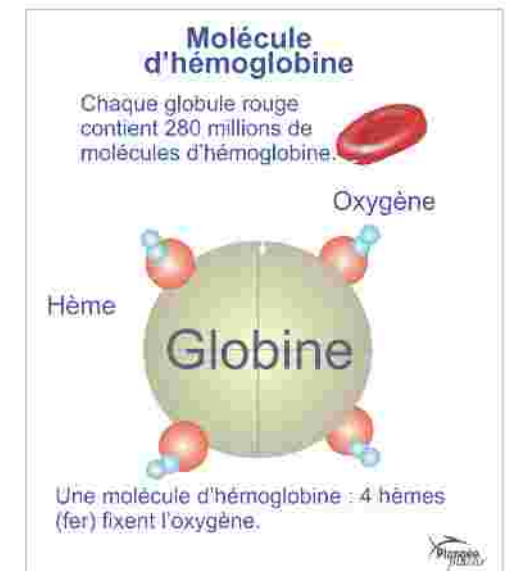
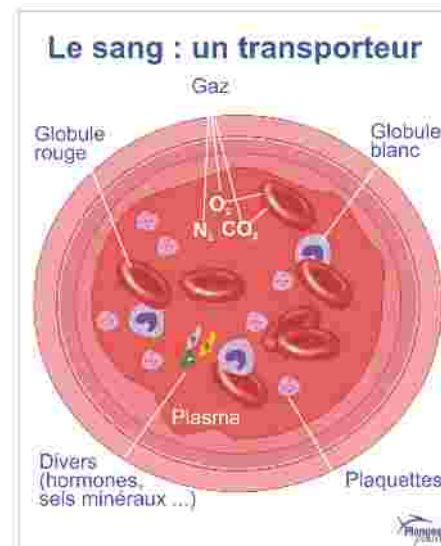
0,75 s est le temps de contact entre le sang capillaire et l'alvéole.

Le CO_2 a une constante de diffusion plus importante que l' O_2 . Il diffuse plus vite.

Mais comme il est produit en permanence par le corps, il retourne dans le sang artériel avec un P_{PCO_2} de 40 mmHg, nous avons donc évacué 6 mmHg de CO_2 sur les 46 mmHg au moment de l'échange pulmonaire.

L' O_2 va passer d'abord sous forme dissoute dans le sang puis va se fixer sur les 4 Hèmes de la globine pour former l'hémoglobine (le globule rouge) pour atteindre à l'Hématose 100 mmHg dans le sang artériel contre 40 mmHg dans le sang veineux.

Le globule rouge est transporté par le sang artériel jusqu'aux cellules. 97% de O_2 est transporté par l'hémoglobine et 3% dissous dans le plasma.



L'équilibre étant presque instantané (environ 0,5s). On parlera de **PERFUSION** de l' O_2 .

Respiration cellulaire

La respiration cellulaire le rôle de l'eau (H₂O)

Arrivé à proximité des cellules un nouvel échange se produit.

L'O₂ va passer de 100mmHg dans le capillaire à 40mmHg car l'O₂ est consommé par le corps en continu avec une PPO₂ d'environ 30 mmHg dans le tissu. Il n'est pas équilibré totalement.

Cette fois c'est l'eau contenue dans le corps qui va faciliter les échanges et la combustion.

Le déchet produit, le CO₂, retourne au sang par différence de pression partielle.

La PPCO₂ est d'environ 50mmHg dans les tissus. le sang artériel arrive avec une PPCO₂ de 40mmHg et retourne dans le sang veineux avec une PPCO₂ de 46 mmHg jusqu'au poumon. il reste donc une PPCO₂ plus importante dans les tissus que dans le sang.



Le CO₂ va revenir dans le sang veineux sous forme d'acide carbonique H₂CO₃.

60 à 70 % sous forme de bicarbonate.

20 à 30% sous forme de carhémoglobine

7 à 10% dissous

Cette configuration permet de garder une acidité relativement stable du sang (PH sanguin)

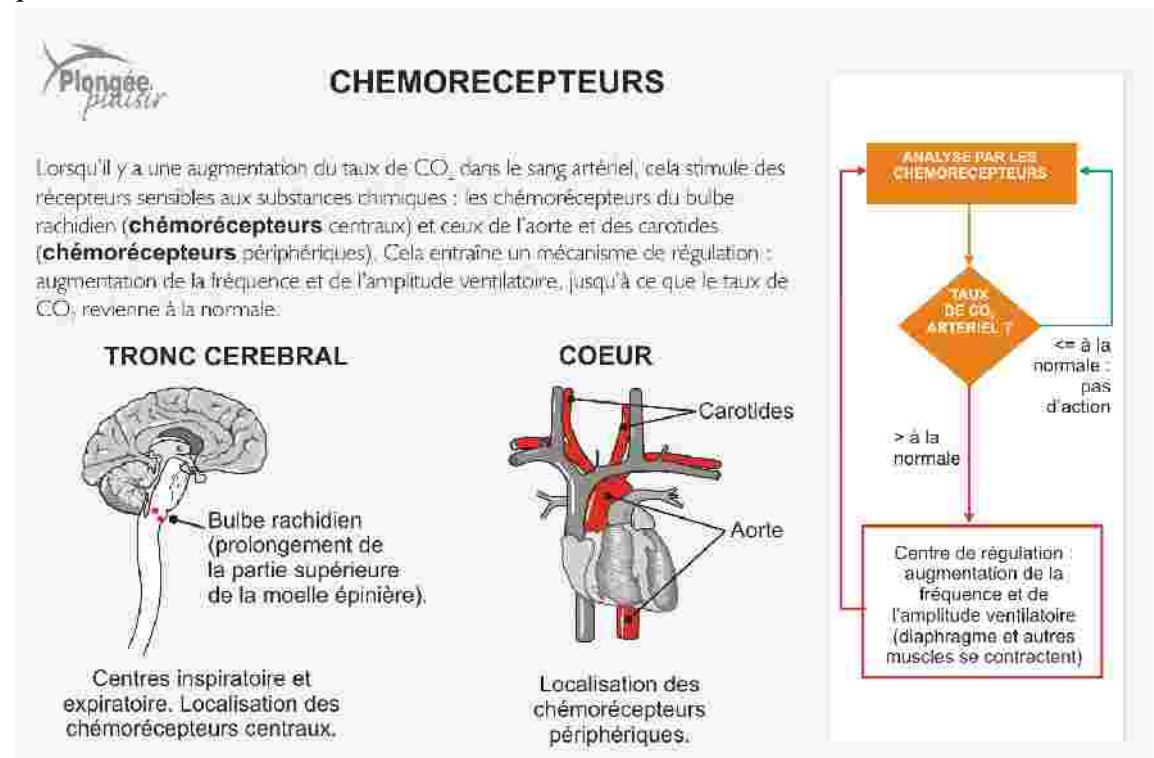
Le CO₂ se stock donc dans le corps sous forme de ballastes.

Les Chémorécepteurs analyseront cette acidité du sang et réagiront sur le rythme cardiaque et la fréquence ventilatoire pour stabiliser le taux de CO₂ du sang si l'acidité n'est pas régulée à 40 mmHg à la sortie du poumon dans les artères.

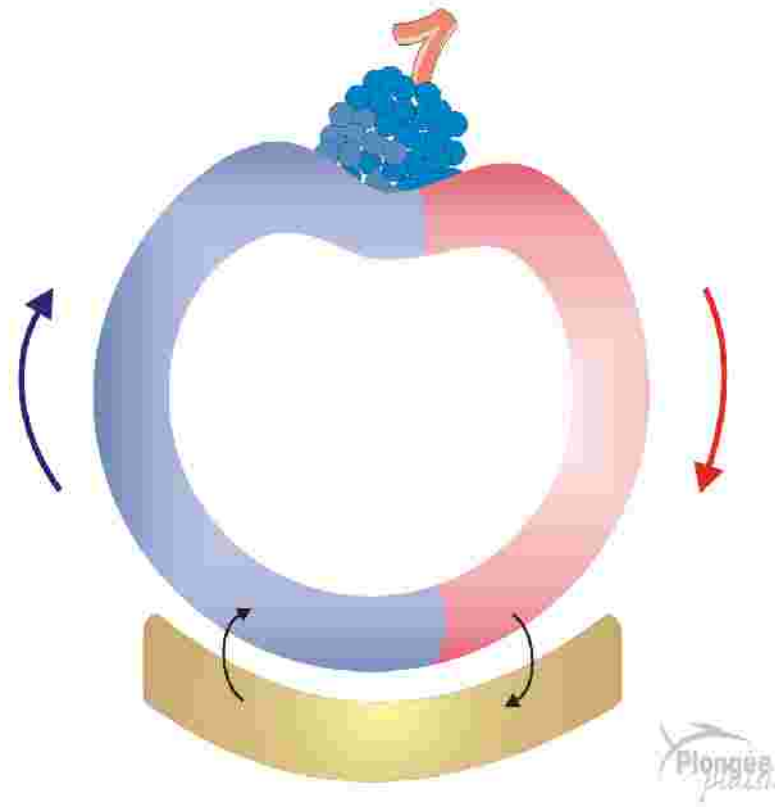
La respiration cellulaire aérobie et VO₂max

C'est suite à l'entraînement strictement en aérobie que nous favorisons la vitesse d'échange de l'oxygène dans le muscle puisque la PPO₂ est de l'ordre de 30mmHg pour 40mmHg dans le sang veineux. Augmentant ainsi la capacité aérobie dans l'effort avant d'atteindre la phase de production de lactate.

Cela procure une augmentation du stock de glycogène dans le muscle et un plus grand nombre de mitochondries.



A VOS STYLOS



SYNTHESE DES EQUILIBRES D'ECHANGES

mmHg Bar	AIR INSPIRE	AIR ALVEOLAIRE	SANG ROUGE	TISSU	SANG BLEU	AIR ALVEOLAIRE	AIR EXPIRE
O ₂	160 / 0,21	100 / 0,133	100 / 0,133	30 / 0,04	40 / 0,053	100 / 0,133	120 / 0,16
CO ₂	trace	40 / 0,053	40 / 0,053	50 / 0,066	46 / 0,061	40 / 0,053	34 / 0,045
N ₂	600 / 0,79	=	=	=	=	=	=
Vapeur d'eau	45 / 0,06	45 / 0,06				45 / 0,06	Trace voir sec

L'ESSOUFFLEMENT

L'essoufflement est un réflexe du corps qui réagit à une baisse du PH avec une acidité trop élevée du sang artériel en provoquant une hyperventilation mais dans le volume de réserve inspiratoire.

Or dans cette zone et à fréquence élevée, l'air frais supposé renouveler l'air contenu dans les poumons n'a pas le temps de l'atteindre et de diffuser pour assurer le renouvellement d'O₂ et surtout l'élimination du CO₂. **Ventilation inefficace.**

Le CO₂ contenu alors dans l'alvéole ne pouvant être évacué, la PPCO₂ va continuer à augmenter à mesure que le corps diffusera le CO₂ dans le sang veineux (déchet).

Le processus finira en détresse ventilatoire pouvant aller jusqu'à la mort.

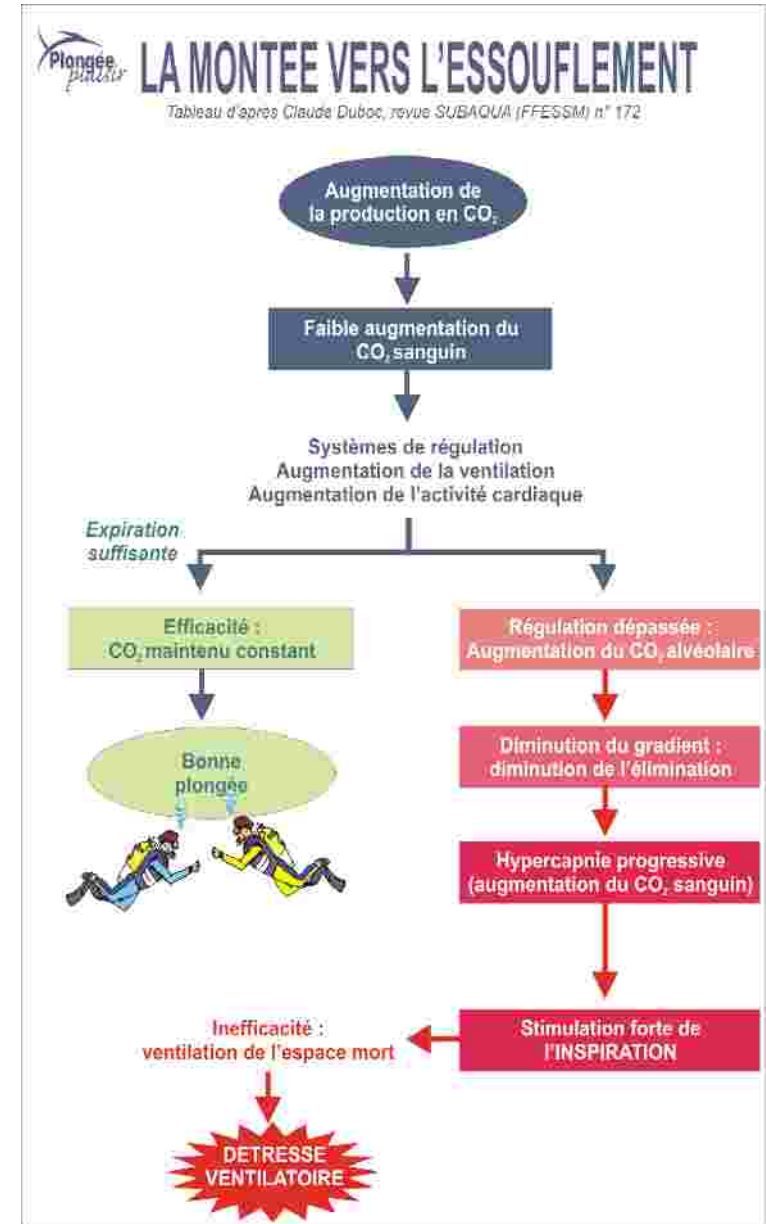
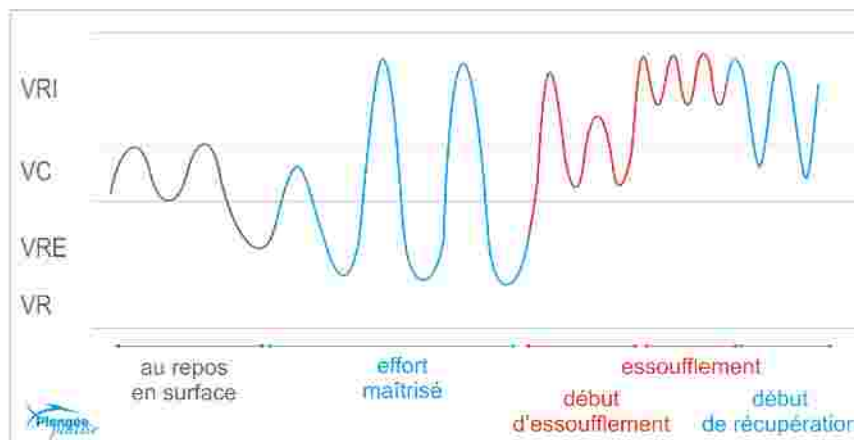
En surface, en stoppant tout effort et en s'allongeant, l'essoufflement finit par passer en général. Par contre, en immersion, la contrainte liée au matériel, à la densité de l'air et la ventilation exclusivement par la bouche, va amplifier le phénomène et le rendre très difficile à maîtriser une fois engagé.

Il y a un fort risque de panique et de noyade.

Le GP doit donc être particulièrement vigilant et éviter de trop solliciter la filière aérobie en privilégiant des efforts ponctuels et courts pour sa palanquée en cas de nécessité.

En choisissant des parcours adaptés en cas de courant, en ayant un palmage adapté aux capacités et aux niveaux de sa palanquée.

Ne jamais engager une immersion essoufflée et prévoir une ligne de vie si nécessaire.

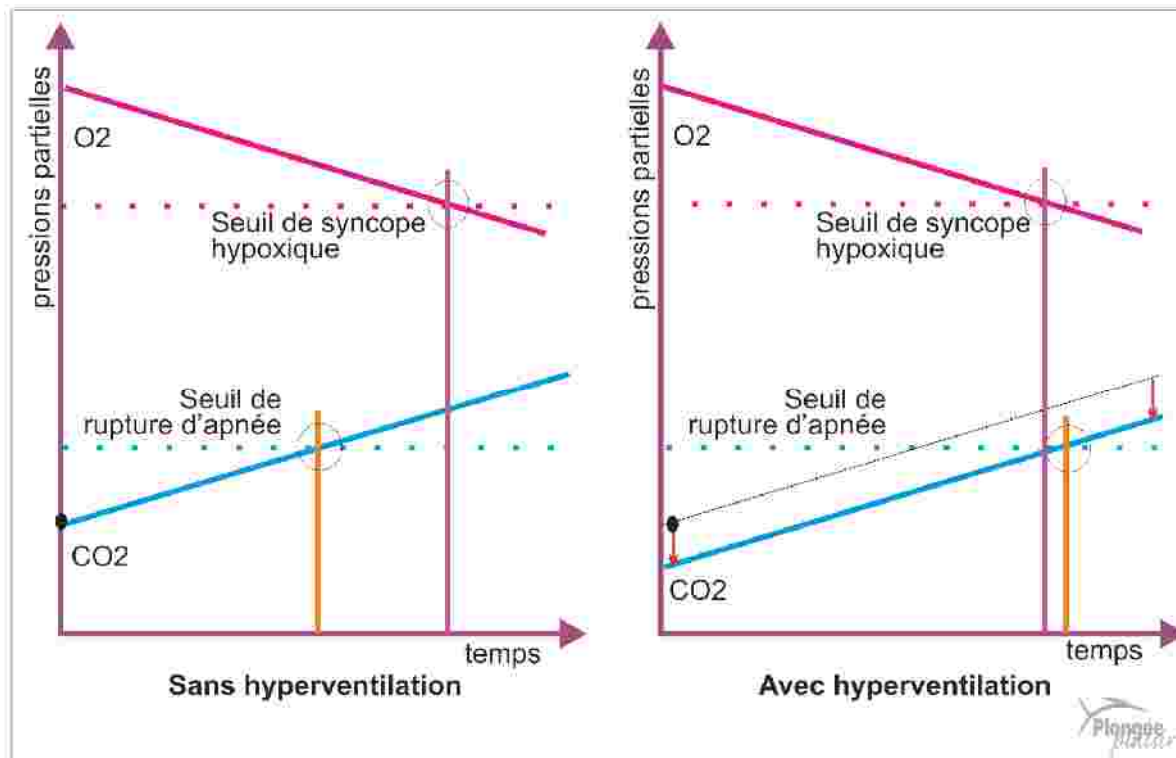


APNEE

L'apnée pour le niveau 4 est un exercice de concentration et d'aisance.

Au calme, l'hématose est plus rapide que le passage du sang au contact de l'alvéole. C'est par différence de PP_{O_2} que l' O_2 va de l'air alvéolaire vers le plasma puis le globule rouge. Or l'hyperventilation ne modifiant en rien la PP_{O_2} dans l'alvéole, elle n'a aucun effet sur l'oxygénation du sang déjà hématisé.

Par contre, la PP_{CO_2} elle, va chuter à 20 mmHg et va donc accessoirement reculer la soif d'air et mettre en danger l'apnéiste, qui perd ainsi, son seul élément d'alerte avant la syncope hypoxique. A proscrire donc pour l'apnée mais à conseiller temporairement pour lutter contre un départ d'essoufflement (élimination du CO_2).



LA NOYADE

Rappel :

La noyade se caractérise par une intrusion d'eau (mer, lac, piscine) dans les voies aériennes puis dans les poumons.

Les échanges gazeux entre l'air et le sang (l'hématose) ne pourront plus s'effectuer correctement.

L'intrusion de l'eau dans les poumons aura toujours pour conséquence une destruction plus ou moins rapide des alvéoles pulmonaires et provoquera une détresse respiratoire, un œdème pulmonaire suivi d'une mort par asphyxie.

En plongée, la désaturation de l'azote sera perturbée avec un risque d'ADD.

Il n'y a pas de petite noyade (RIFAP mise sous oxy et évacuation de la victime)

Il y a deux types de noyade caractéristique :

La **noyade asphyxique** ou noyade bleue ou primaire, qui survient suite à une panique avec quatre stades d'évolution de la noyade.

L'aquastress : La victime est consciente et affolée, l'eau n'a pas atteint les poumons mais elle a avalé beaucoup d'eau (œsophage gorgé). Etat de choc sans conséquence grave mais avec un risque d'ADD du aux apnées, aux toux et à l'agitation.

La petite hypoxie : victime consciente qui a inhalé un peu d'eau. La victime ayant donc un peu d'eau dans le fond des poumons on constatera une ventilation rapide, des signes d'essoufflements ainsi qu'une toux qui peut être accompagnée d'un rejet d'écume blanchâtre. La victime sera épuisée et on retrouvera des marques d'hypothermie, d'où l'importance de couvrir la victime. On notera aussi la présence de cyanose (coloration violacée de la peau étant due à mauvaise oxygénation du sang) au niveau des lèvres et des paupières.

La grande hypoxie : La victime consciente ou inconsciente qui a inhalé une plus grande quantité d'eau que précédemment. La victime ayant cette fois-ci plus d'eau dans les poumons on constatera une ventilation très rapide ou au contraire très lente. Les autres signes que l'on retrouvera seront : le pouls très rapide, une cyanose très marquée (symptôme qui sera d'autant plus impressionnant sur l'enfant), l'essoufflement et éventuellement la toux avec rejet de "spume".

L'anoxie : Arrêt ventilatoire ou cardio-ventilatoire dû à une présence massive d'eau dans les poumons empêchant totalement l'oxygénation du sang. On constate des marques de cyanoses très accentuées comme pour un stade 3

La **noyade syncopale** ou noyade blanche ou secondaire, qui survient au moment de la reprise ventilatoire réflexe suite à une perte de connaissance. Avant la reprise ventilatoire, il n'y a pas d'eau dans les poumons ni dans l'œsophage.

L'OSMOSE ou eau salée / eau douce

L'osmose est un principe selon lequel une solution moins concentrée en sel, séparée d'une solution plus concentrée par une membrane semi-perméable, traversera celle-ci pour diluer la solution la plus concentrée jusqu'à l'équilibre des concentrations.

Milieu	Eau douce	Sang (plasma)	Eau de mer
Concentration en sel	0 g./l	9g./l	Environ 33g./l

Comme nous pouvons l'observer sur le tableau, le sang, plus précisément le plasma* est plus concentré en sel que l'eau douce mais nettement moins que l'eau de mer. On dit alors que l'eau douce est hypotonique** et que l'eau salée est hypertonique***.

** **HYPOTONIQUE** : Se dit d'un liquide ou d'une solution dont la concentration moléculaire est plus faible que celle du milieu de référence (notamment le plasma sanguin) – définition médiadico.com

*** **HYPERTONIQUE** : Se dit d'un liquide, d'une solution ou d'un milieu organique, dont la concentration moléculaire est plus importante que celle d'un autre liquide ou d'un autre milieu en présence duquel ils se trouvent (notamment le plasma sanguin) - définition médiadico.com

L'eau douce

En conséquence, l'eau douce étant moins concentrée en sel que le sang, elle va traverser, selon le principe de l'osmose, la membrane alvéolaire pour se diluer avec le sang (plasma). Le passage de l'eau douce dans le sang veineux est appelé hémomodilution, il est caractérisé notamment par une augmentation de la masse sanguine qui peut doubler en quelques minutes. Provoquant des troubles importants pour la tension cardiaque, la ventilation et l'intrusion de microbes dans l'organisme. La noyade en piscine se rapproche de la noyade en eau douce mais l'œdème pulmonaire (OAP) est aggravé par la présence de chlore et des produits de désinfection.

L'eau de mer

L'eau de mer étant plus concentrée en sel que le sang, le phénomène opposé se produit. Toujours selon le principe de l'osmose, la partie eau du sang (plasma) traverse la paroi alvéolaire pour se mélanger à l'eau de mer présente dans les poumons. Il s'en suit une forme de noyade interne ayant pour conséquence une diminution du volume sanguin appelé hémococentration et un œdème aigu du poumon (OAP). Le sang présent dans le système veineux est plus concentré, moins fluide du fait de l'osmose et de la perte de la partie eau du sang (plasma).

En mer, la noyade provoque des symptômes proches de l'OAP ou de la Surpression Pulmonaire visible rapidement.

