

LES ÉCHANGES GAZEUX ET LA DISSOLUTION DES GAZ

- I) Physique appliquée aux échanges gazeux
- II) Rappels
- III) Les échanges gazeux

I) Physique appliquée aux échanges gazeux

a) La Loi de Dalton

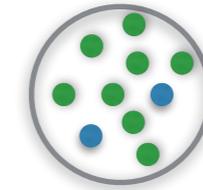
- La pression partielle exercée par un gaz est la pression de ce gaz s'il occupait seul le volume occupé par le mélange de gaz.

Pression partielle du gaz = pression totale du mélange x % du gaz

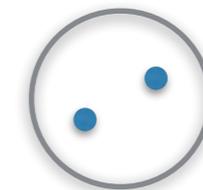
$$P_P = P_t \times \% \text{gaz}$$

Exemple de l'air

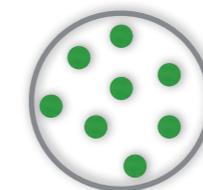
Composition (approximative):



O_2 21% $P_{PO_2} = 1 \times 0,21 = 0,21$ bar



N_2 79% $P_{PN_2} = 1 \times 0,79 = 0,79$ bar



Exemple:



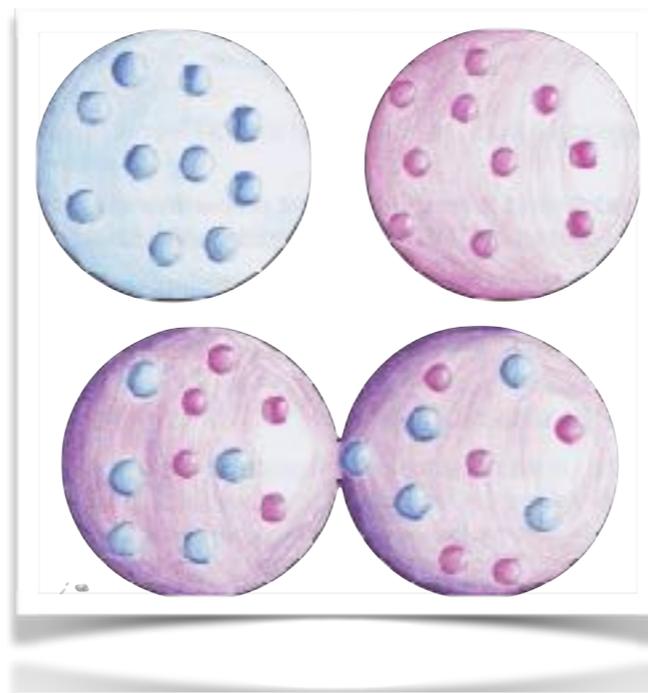
Lors d'une plongée à l'air, quelle est la pression partielle d'oxygène à 50m ?

$$P_{pO_2} = 6 \times 0,21 = 1,26 \text{ bars}$$

- La pression totale exercée par un mélange de gaz est égale à la somme des pressions partielles des gaz qui composent le mélange.

Dans le cas de l'air: $0,21+0,79= 1$ bar

- Lorsque deux récipients communiquent, les deux gaz se mélangent de façon identique dans les deux compartiments



b) La Loi de Henry

- La quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression exercée par ce gaz au contact de l'interface air / liquide, à température constante et à saturation.
- Il existe deux sortes de pression suivant que le gaz est dissous ou libre:
 - Tension p : pression qu'un gaz exerce à l'état dissous
 - Pression P : pression qu'un gaz exerce à l'état libre

Facteurs de solubilité:

La solubilité d'un gaz dépend:

- de la pression partielle
- de la nature du liquide (l'azote a une solubilité 5 fois plus importante dans l'huile ou la graisse que dans l'eau)
- de la température (plus elle est basse plus la solubilité est grande)

La rapidité du phénomène dépend:

- de la surface de contact (plus elle est grande plus la diffusion est importante)
- du temps (lorsqu'il augmente, la dissolution est plus importante)

- Un état dynamique est créé lorsqu'il existe une différence de pression entre le gaz libre et le gaz dissous. La différence de pression induit un **gradient de diffusion** de la pression la plus haute vers la pression la plus basse.

Etats de saturation:

Il en existe 3:

- **Saturation.**

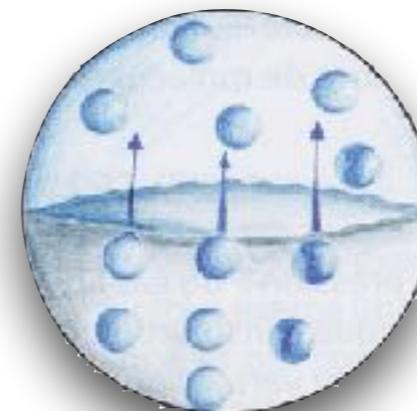
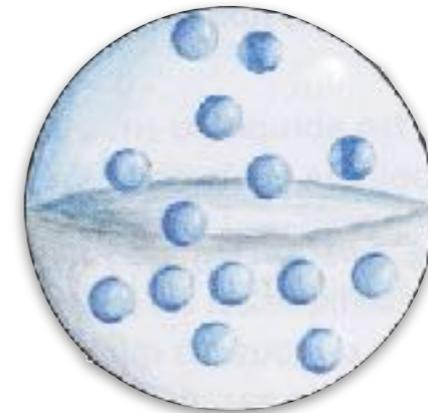
$P = p$ avec un gradient de diffusion = 0

- **Sous saturation.**

$P > p$

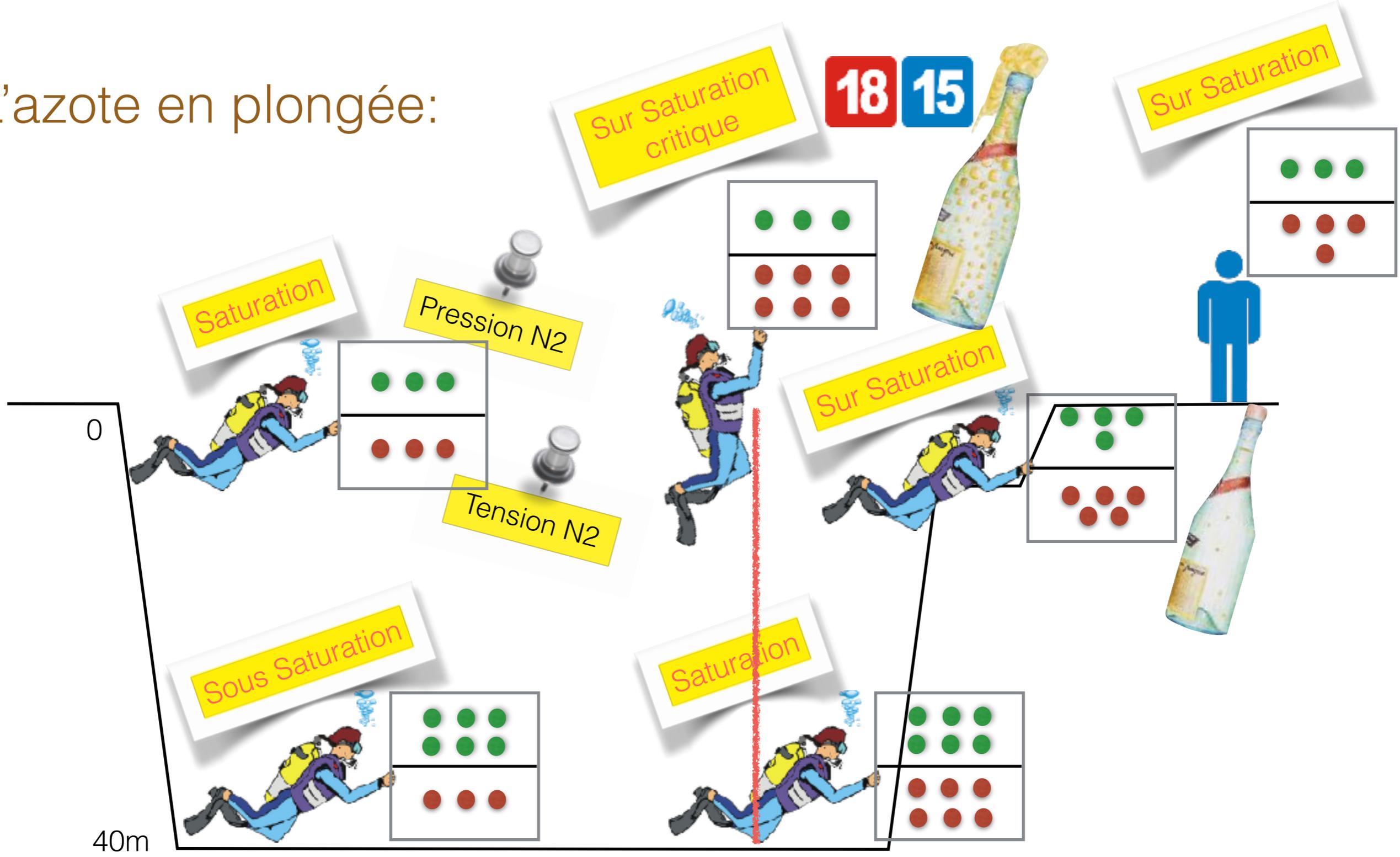
- **Sursaturation.**

$P < p$



L'azote en plongée:

18 15



II) Rappels

- **Composition de l'air:**

Oxygène	(O ₂)	20,95%
Azote	(N ₂)	78,08%
Gaz carbonique	(CO ₂)	0,033%
Argon	(Ar)	0,93%

Gaz rares (Néon, Hélium,
Krypton, Hydrogène, Xénon,
Radon, Oxyde de carbone)
0,0033%

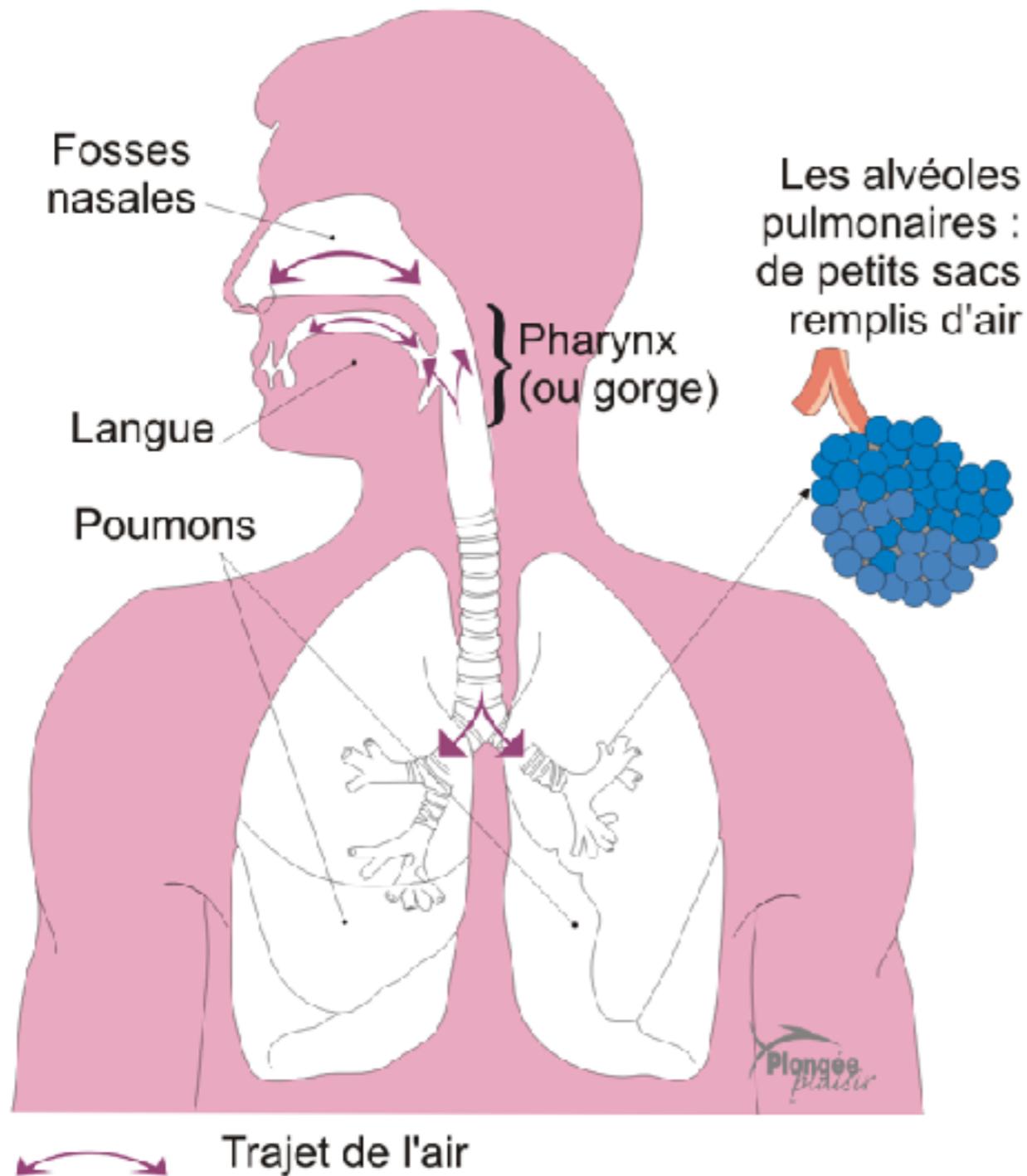
- **La ventilation**

Elle permet les mouvements d'entrée de l'air « frais » et la sortie de l'air « vicié ».

- **La respiration**

se caractérise par

- Les échanges gazeux au niveau du poumon entre l'air et le sang (*hématose*).
- Les échanges gazeux au niveau des tissus.

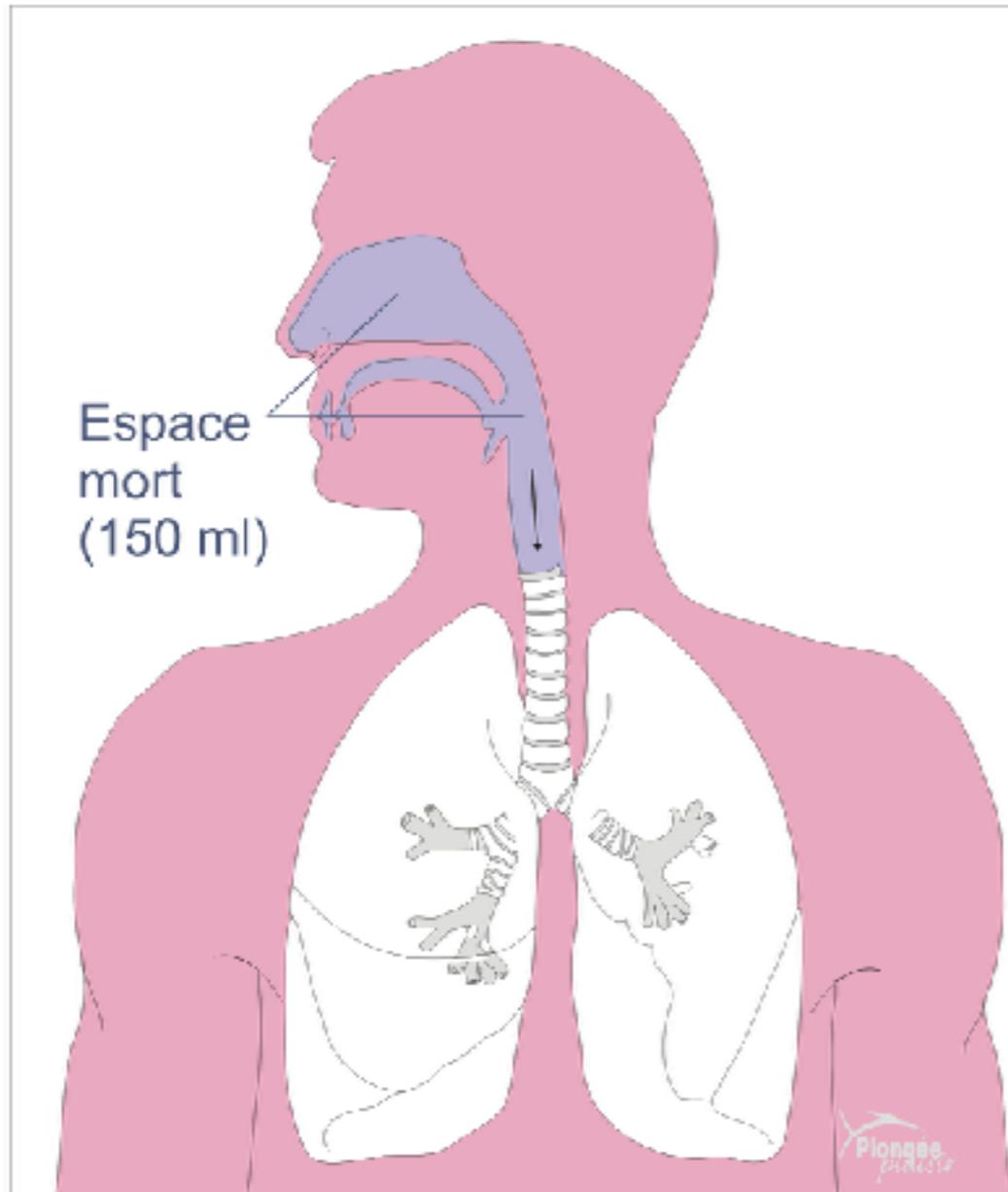


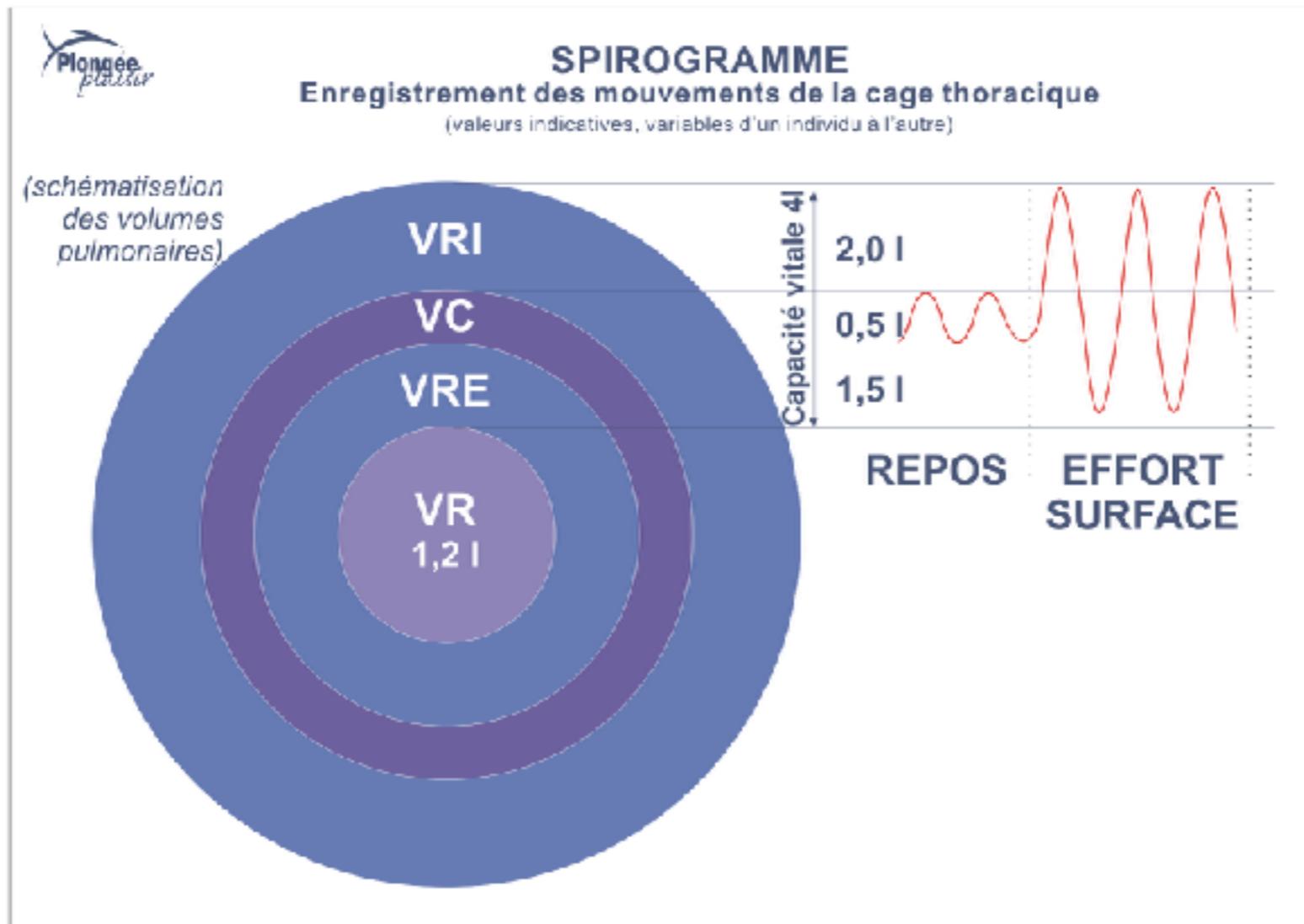
Trajet de l'air:

- Cavité buccale
- Pharynx
- Larynx
- Trachée artère
- Bronches souches
- Bronches
- Bronchioles
- Canaux alvéolaires
- Alvéoles

Espace mort anatomique:

Il représente le volume d'air qui ne participe pas aux échanges gazeux car situé en dehors des alvéoles. Il représente environ 150 ml chez l'adulte. Ce sont ces 150 ml qui arrivent d'abord aux alvéoles avant d'être complétés par de l'air frais.





• Les différents volumes pulmonaires:

- VRI volume de réserve inspiratoire (2L)
- VC volume courant (0,5L)
- VRE volume de réserve expiratoire (1,5L)
- VR volume résiduel (1,2L)

Composition de l'air alvéolaire:

La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est de **760 mmHg**.

Lorsque l'air pénètre dans les voies respiratoires, il s'y ajoute de la vapeur d'eau (l'air est humidifié par les voies respiratoires). La pression partielle de la vapeur d'eau (P_{H_2O}) est de 47 mmHg.

La pression exercée par l'oxygène, le gaz carbonique et l'azote n'est plus que de $760-47=$ **713 mmHg**.

Les pressions partielles des différents gaz de l'air inspiré (au niveau de la trachée) sont diminuées par rapport à celles dans l'air atmosphérique.

	Pp Air inspiré	Pp Air trachée
O₂	160 mmHg	713x0,21= 150 mmHg
CO₂	0,25 mmHg	713x0,00033= 0,21 mmHg
N₂	600 mmHg	713x0,79= 563 mmHg

L'oxygène est consommé par l'organisme et son renouvellement est ralenti par l'espace mort et la capacité résiduelle (VRE+VR). Ceci explique sa diminution de pression partielle au niveau de l'alvéole.

Le gaz carbonique est rejeté dans l'alvéole. Sa pression partielle est donc augmentée par rapport à celle de l'air inspiré.

L'azote n'est pas métabolisé par l'organisme. Sa pression partielle reste inchangée

	Pp Air inspiré	Pp Air trachée	Pp Air alvéolaire
O ₂	160 mmHg	713x0,21= 150 mmHg	100 mmHg
CO ₂	0,25 mmHg	713x0,00033= 0,21 mmHg	40 mmHg
N ₂	600 mmHg	713x0,79= 563 mmHg	563 mmHg

Remarque concernant les modèles de décompression

Haldane:

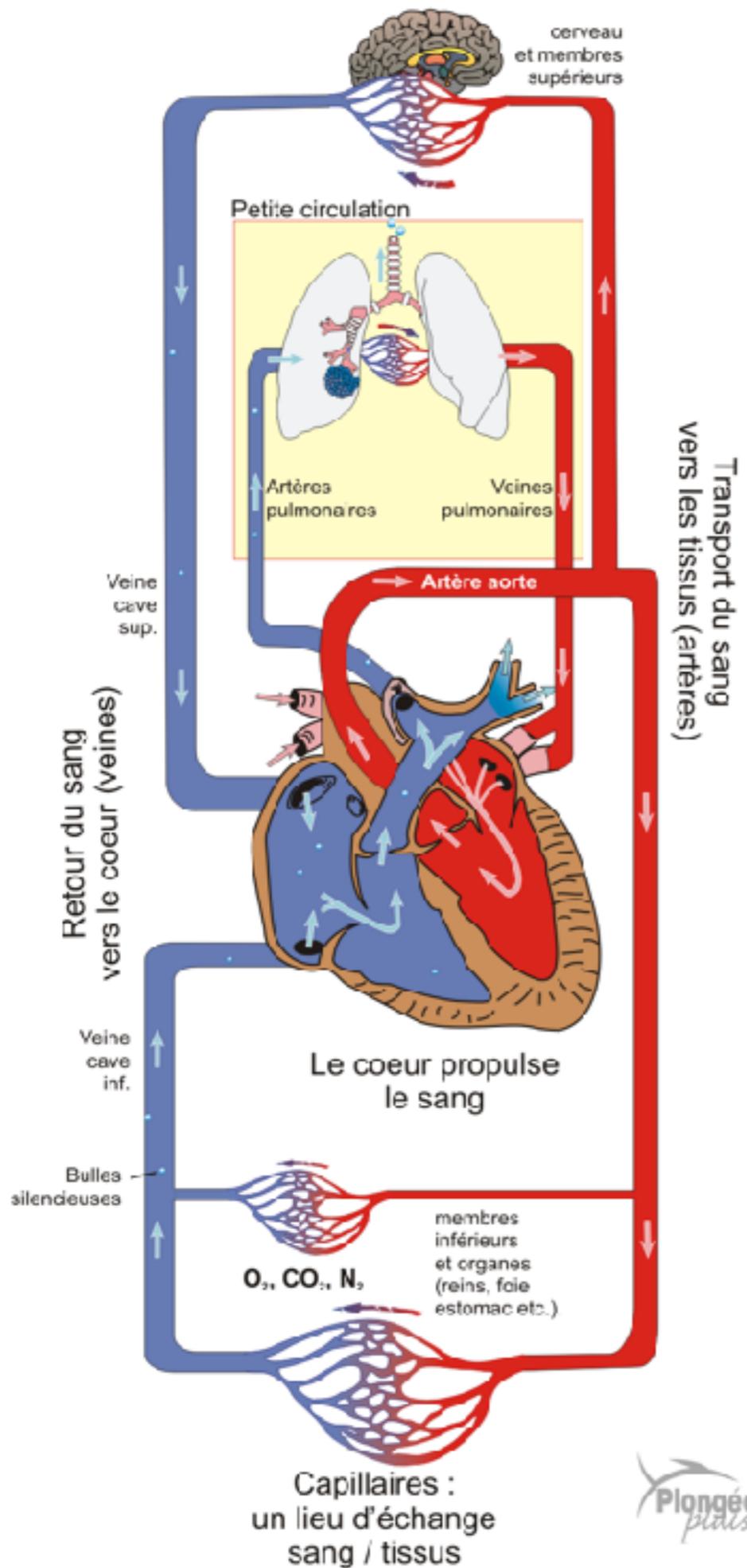
Il tient compte des pressions partielles des gaz inspirés et non des gaz alvéolaires

Cela va dans le sens de la sécurité puisque la pression partielle d'azote est surestimée.

Bulhmann:

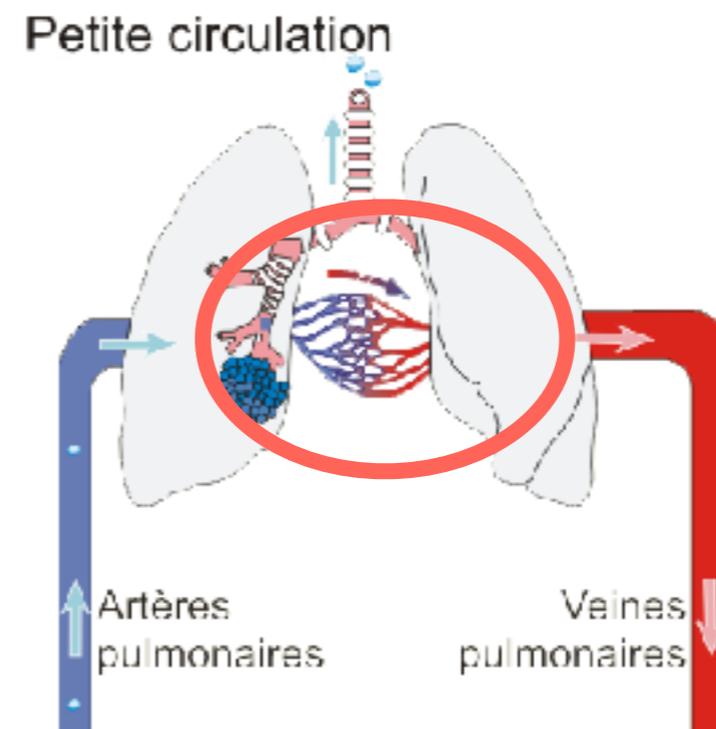
Il tient compte des gaz alvéolaires.

III) Les échanges gazeux



Etape alvéolaire des échanges gazeux

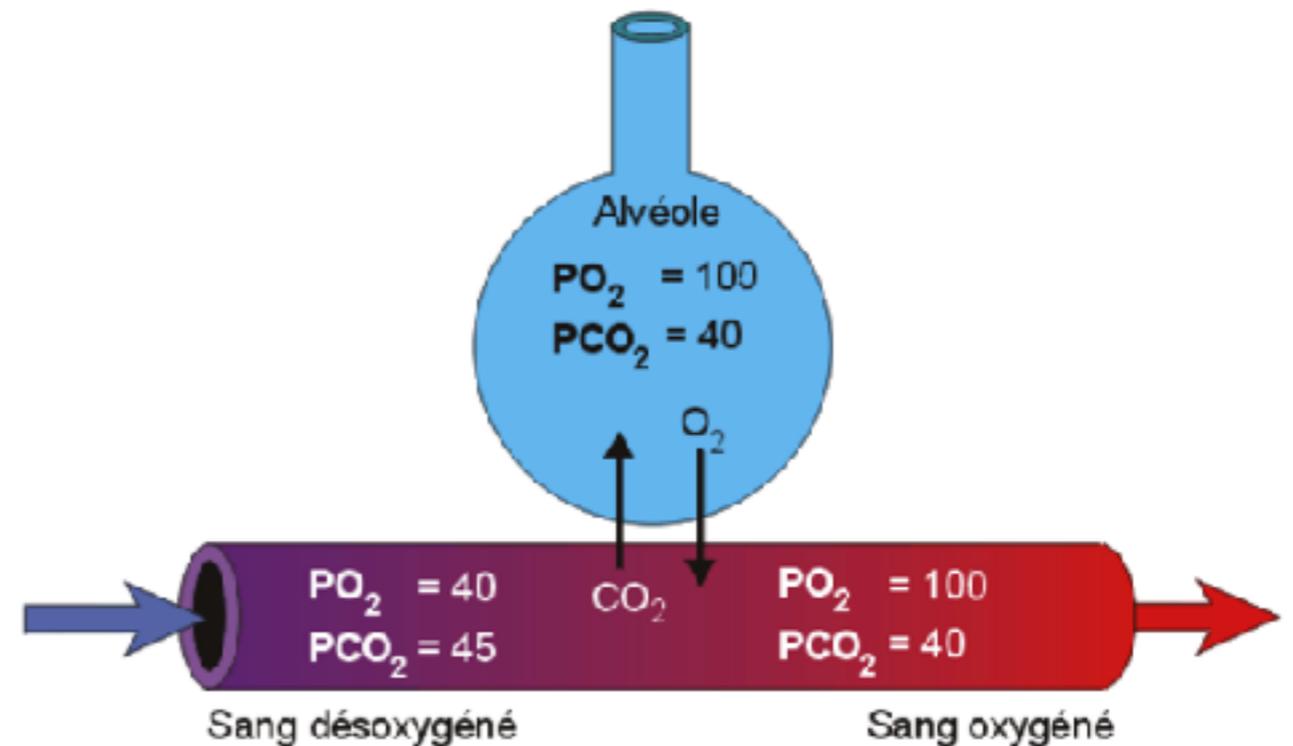
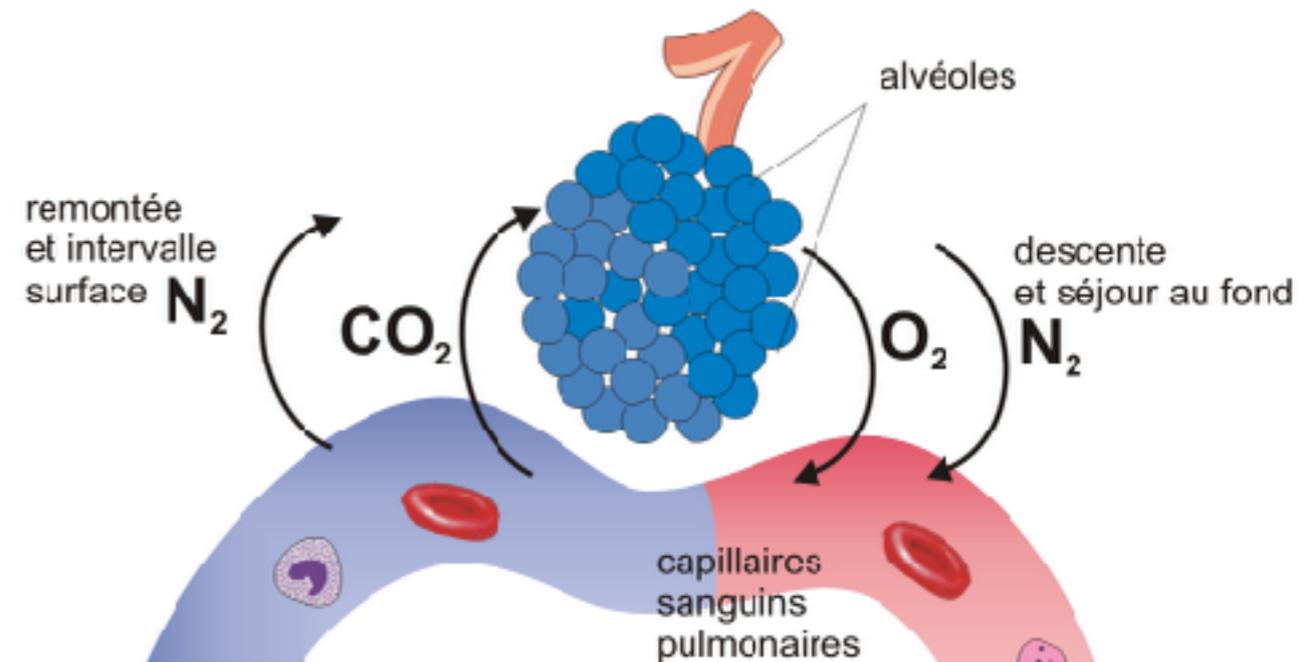
Les échanges gazeux alvéolaires se produisent entre les alvéoles et les capillaires pulmonaires



L'étape alvéolaire:

Dans l'alvéole, l'échange des gaz se fait par diffusion. Le facteur déterminant pour ces échanges est le gradient entre la pression partielle du gaz libre alvéolaire et la tension du gaz sanguin dissous.

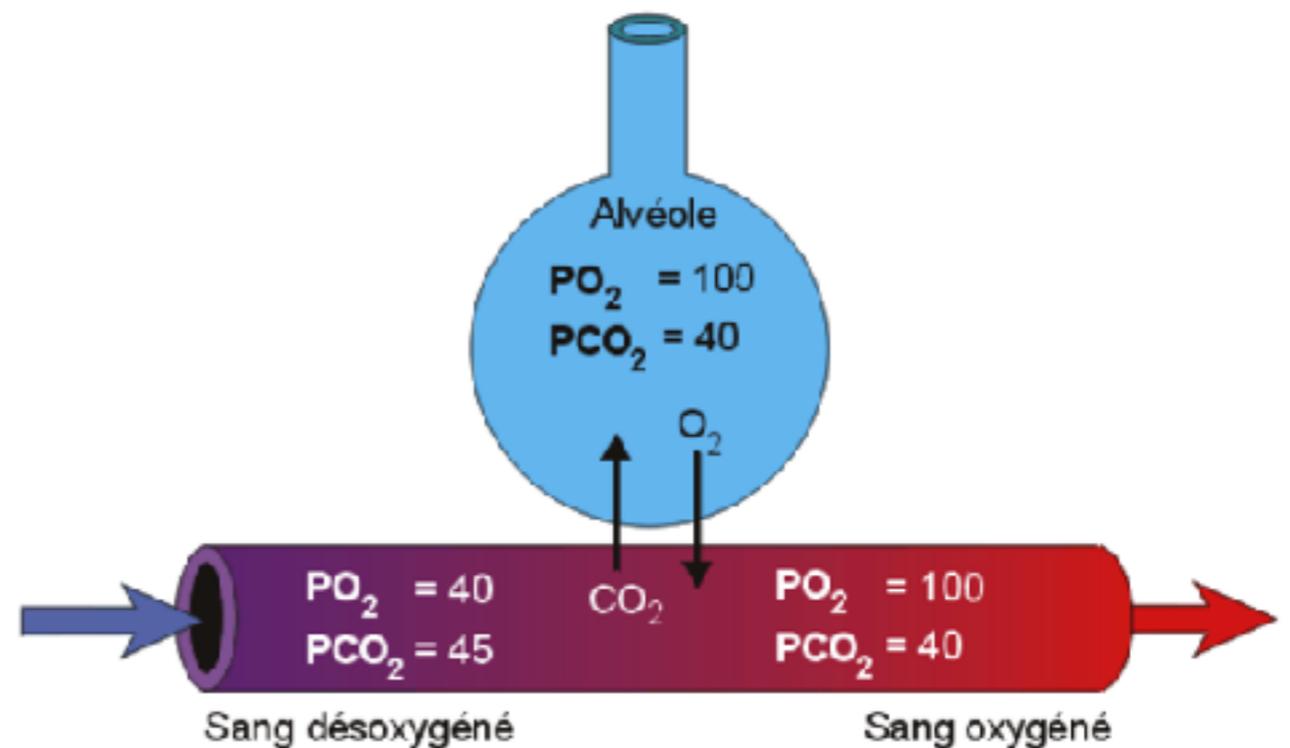
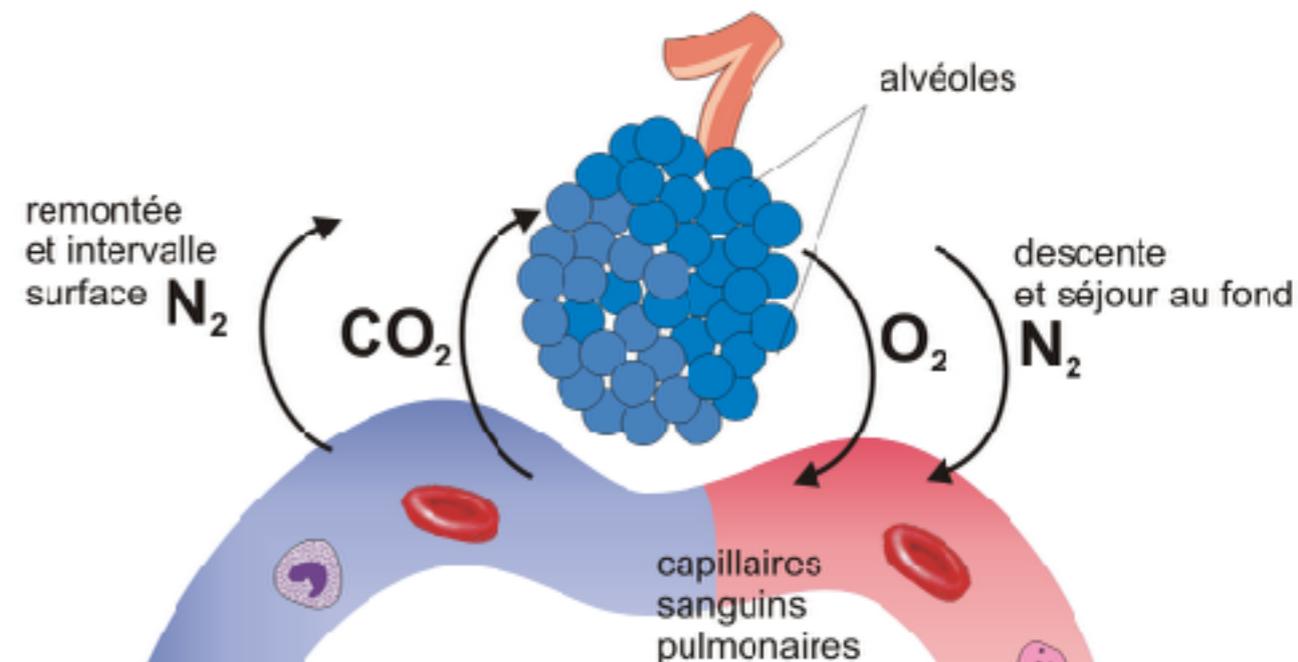
Dalton et Henry



Dalton et Henry

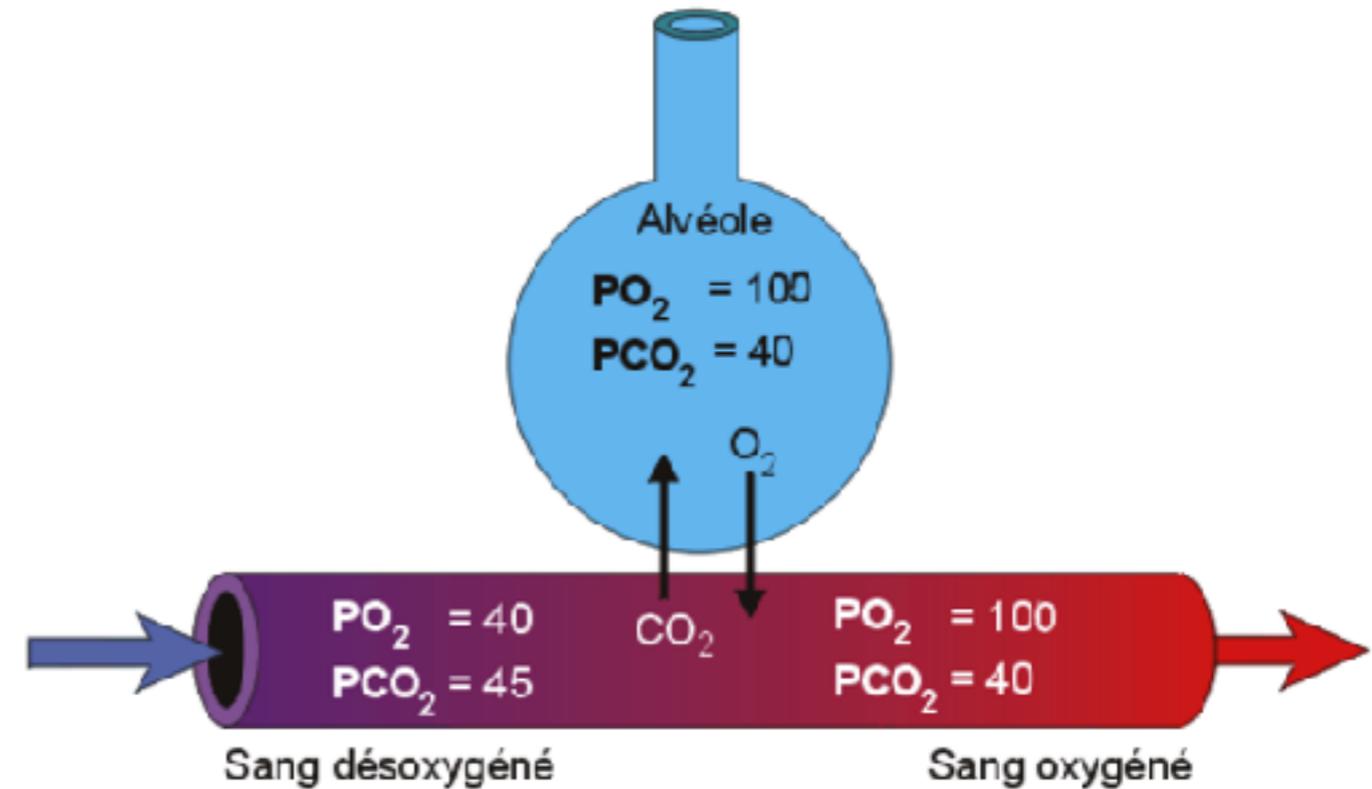
Ce gradient provoque la diffusion des molécules de la haute vers la basse pression.

Seules les molécules dissoutes participent à la pression partielle du gaz dans le sang.



p_{O_2} du sang:

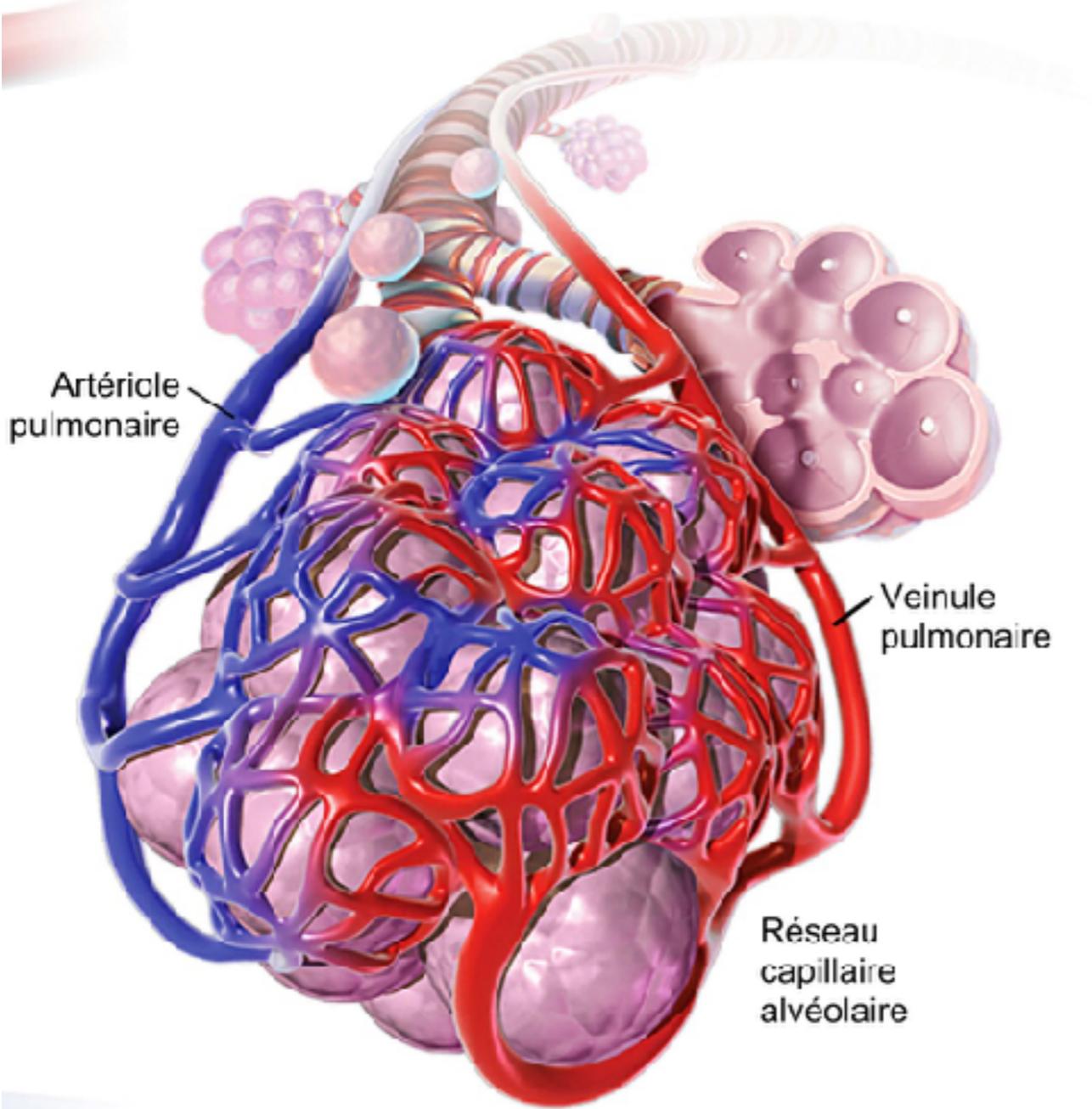
Dans le système alvéole capillaire, dès que le gradient de diffusion est instauré entre l'alvéole et le capillaire (100-40 mmHg), l'oxygène se dissout dans le sang, mais il est immédiatement capté par l'hémoglobine. Le gradient reste donc de 100-40 tant que l'hémoglobine n'est pas saturée complètement. La PO_2 du sang ne s'élève pas, elle est stabilisée à 40.



Lorsque l'hémoglobine est saturée à 100%, l'oxygène commence à se dissoudre et la PO_2 augmente jusque 100 mmHg.

En plongée (augmentation de la P_{O_2}), lorsque l'hémoglobine est saturée en O_2 , tout l'oxygène supplémentaire est transporté sous forme dissoute.

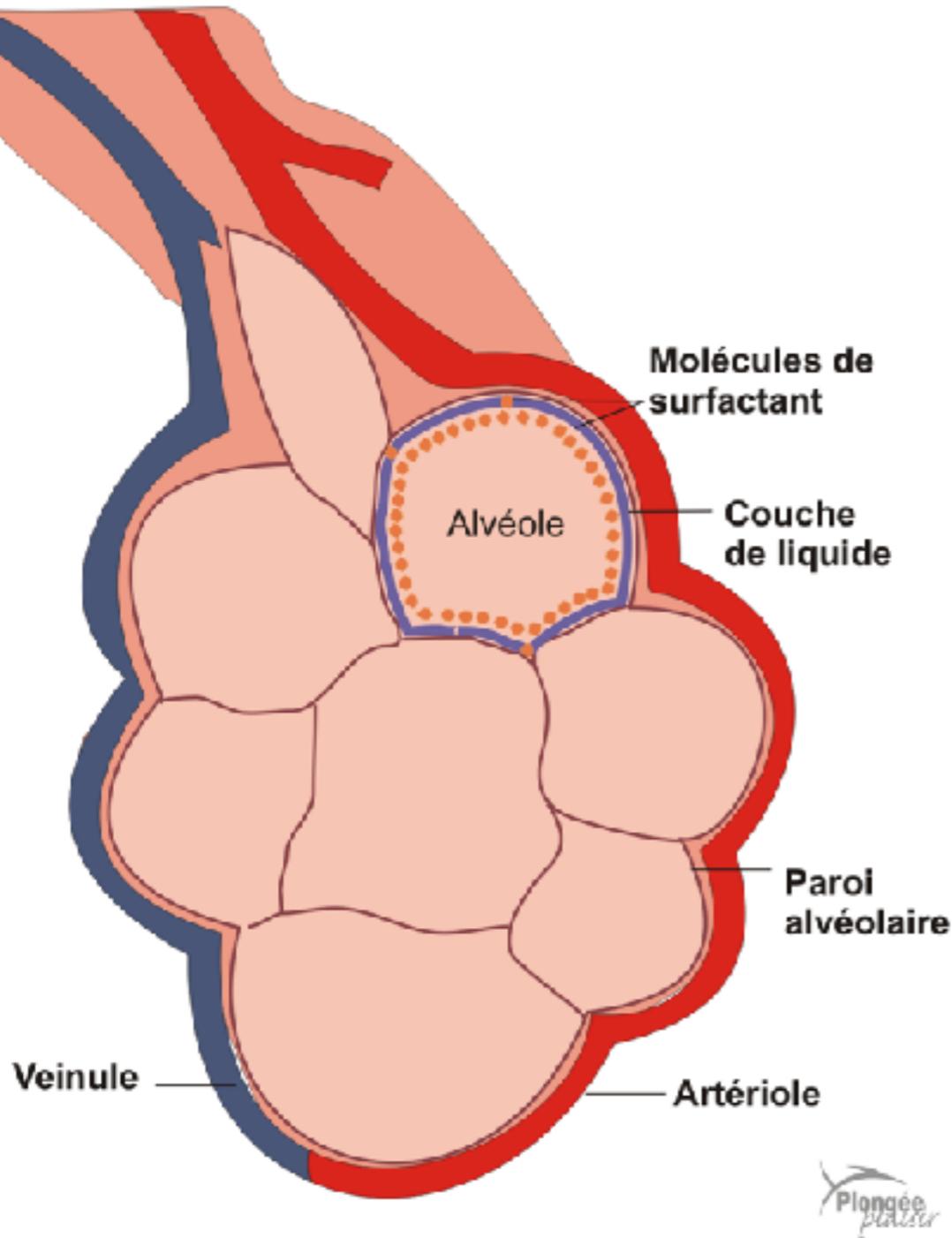
L'alvéole est la plaque tournante des échanges gazeux



Le temps de contact entre le sang et les gaz alvéolaires est si long (0,75s), et la diffusion de l'oxygène et du gaz carbonique si rapide, que l'état de saturation est atteint très vite (0,3s valeurs au repos).

Les échanges alvéolaires sont complexes. Pour parvenir au sang, les molécules doivent traverser:

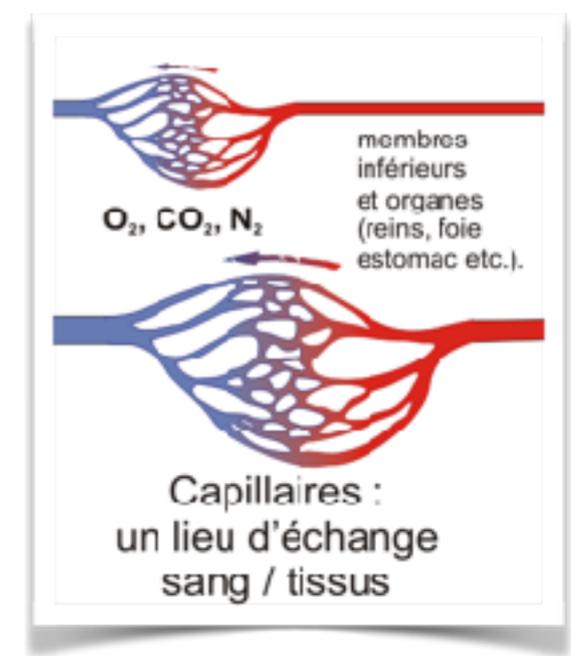
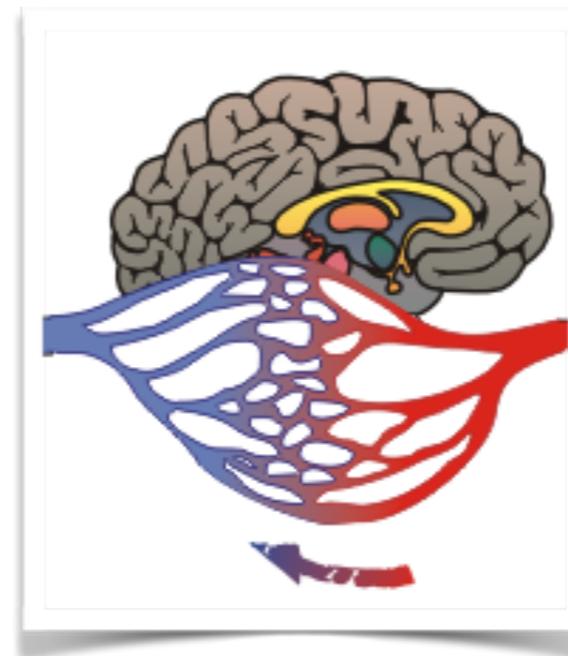
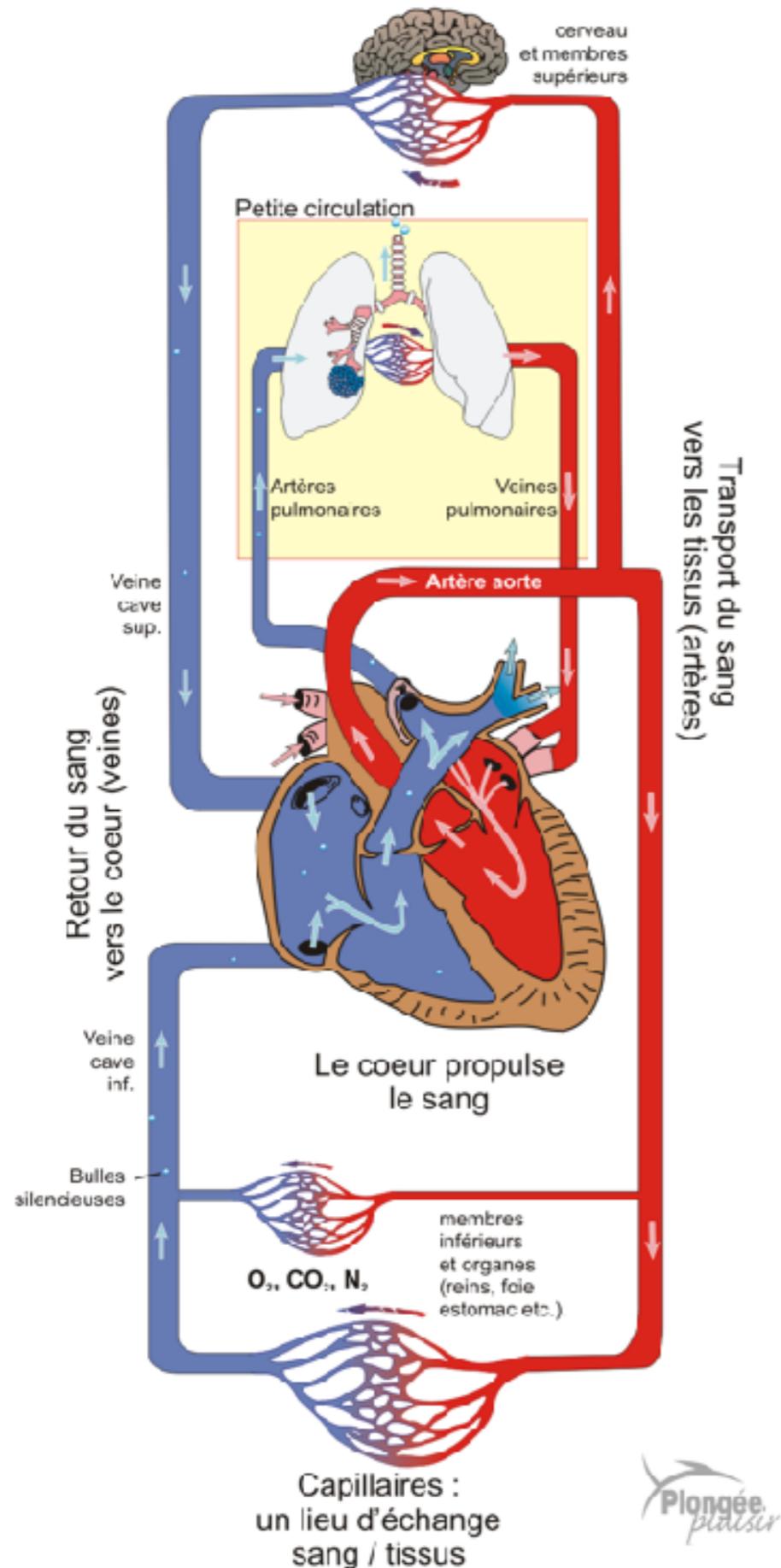
- l'alvéole (liquide, surfactant et paroi alvéolaire)
- le liquide interstitiel
- la membrane et la cellule de la paroi du capillaire



Certaines pathologies peuvent augmenter l'épaisseur de la paroi ou la quantité de liquide interstitiel et donc gêner la diffusion.

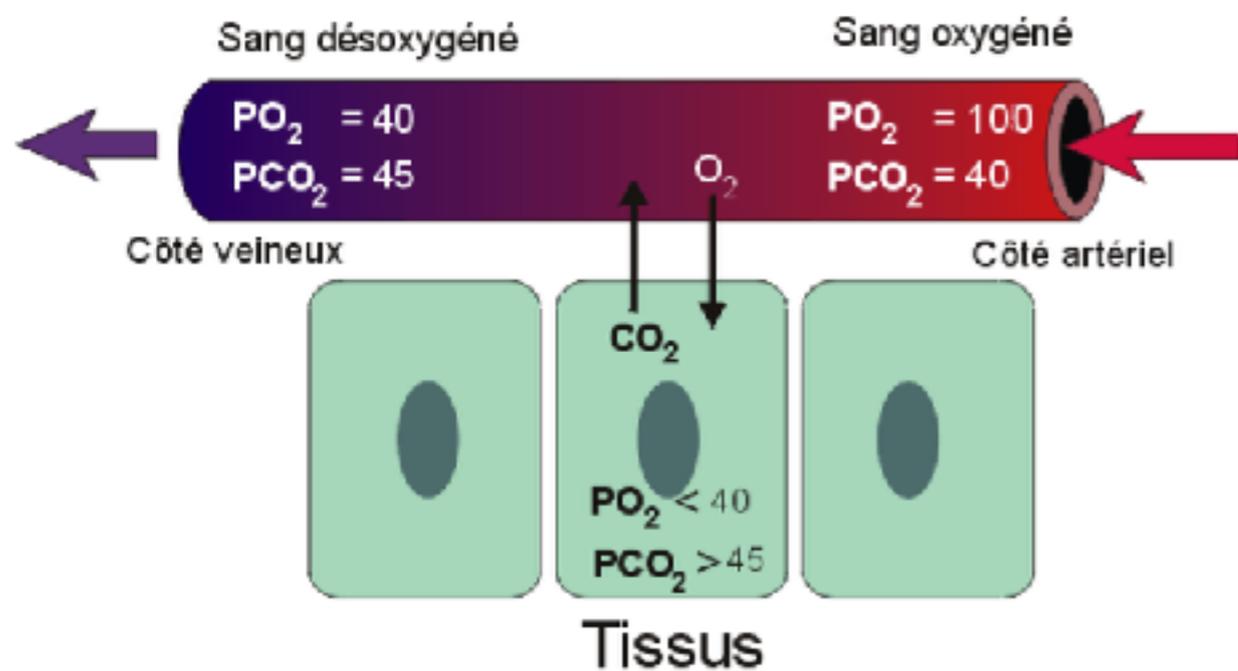
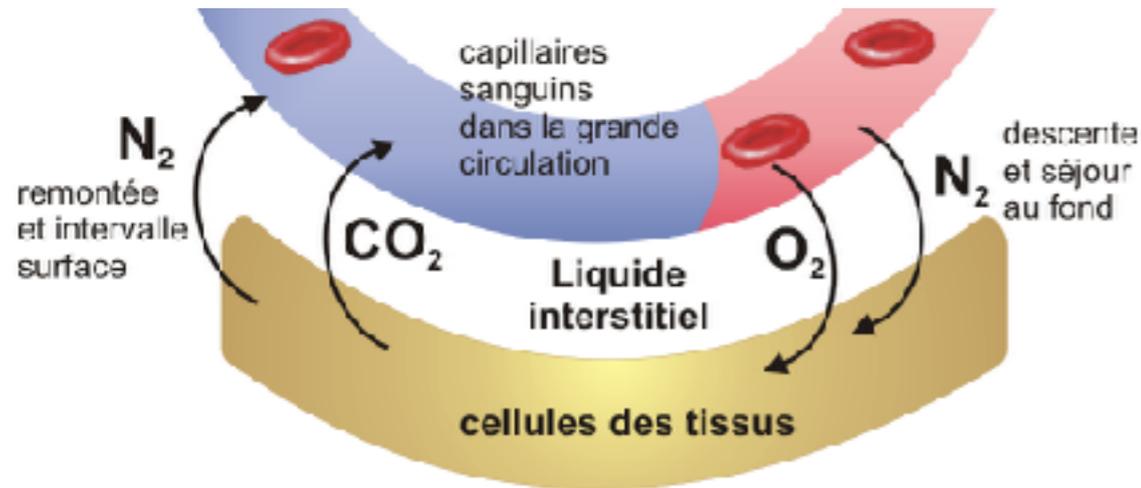
Etape cellulaire des échanges gazeux

Les échanges gazeux cellulaires se produisent entre les capillaires et les cellules des tissus.

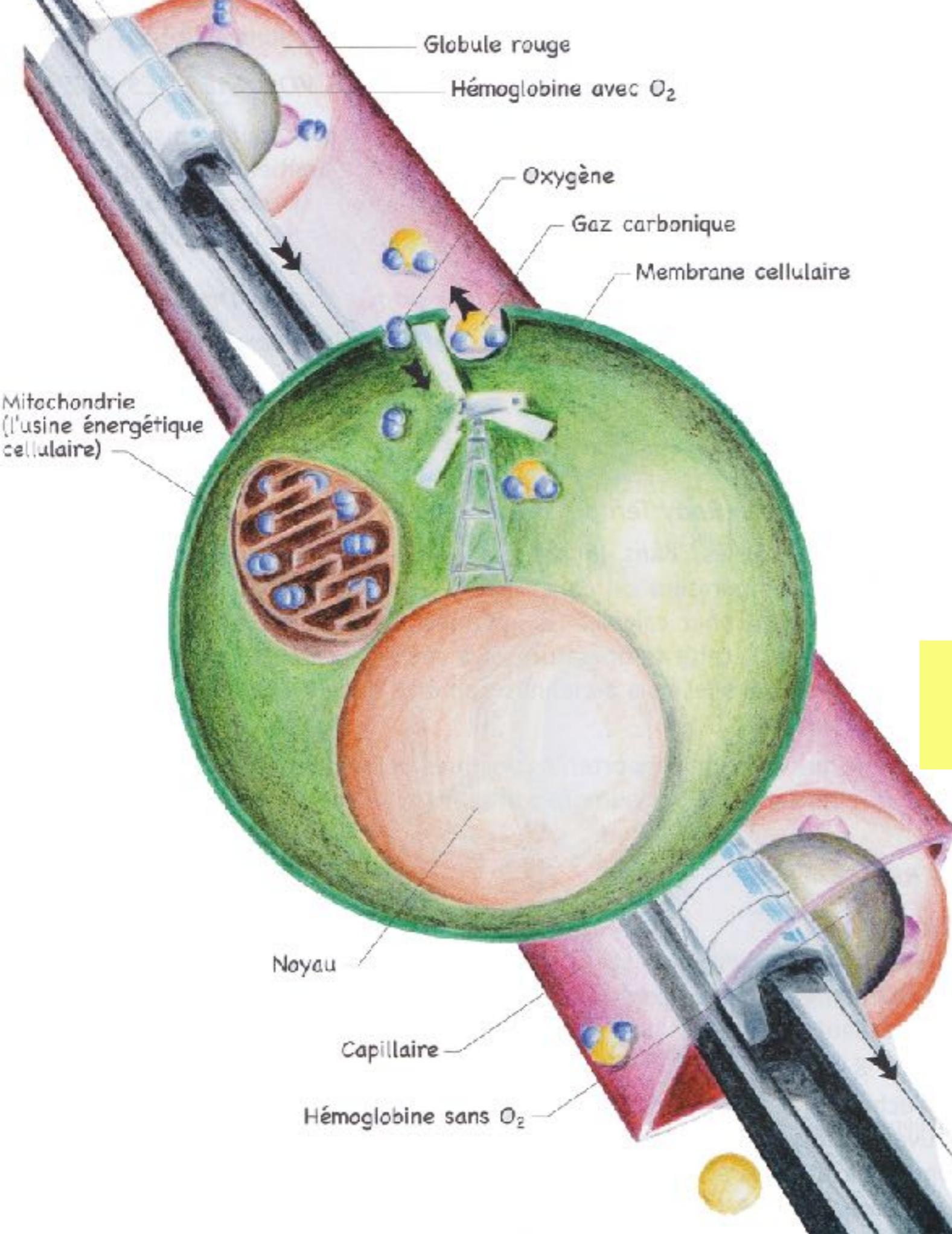


L'étape tissulaire:

Dalton et Henry



Au niveau des tissus, l'échange des gaz se fait encore par diffusion. Cette fois, c'est le gradient entre la tension du gaz dissous dans le sang et la tension du gaz dissous dans les cellules qui provoque les échanges. La diffusion des molécules se fait encore de la haute pression vers la basse pression.



Pourquoi la cellule consomme de l'O₂ et rejette du CO₂:

Entrée dans la cellule de Glucose + O₂



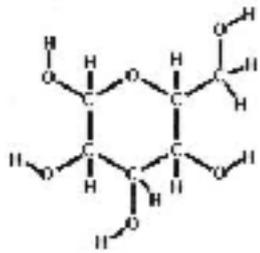
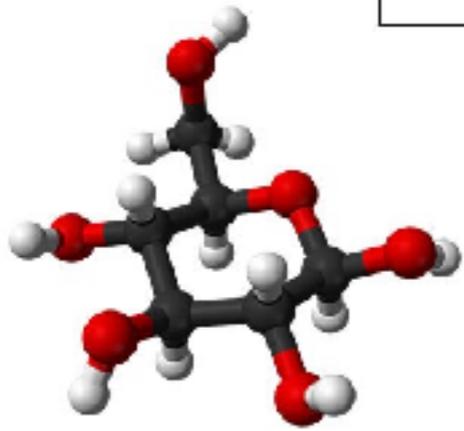
Production par la cellule de CO₂ + H₂O + ATP (dégradée en ADP pour énergie)



Rejet CO₂ et H₂O dans le sang

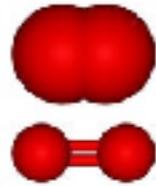
(Le glucose peut être remplacé par des protéines ou des lipides)

Equation bilan de la respiration cellulaire

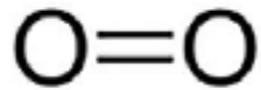


Glucose

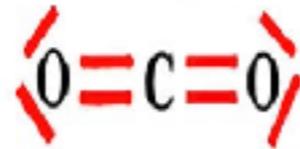
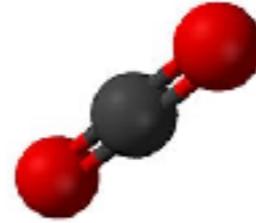
+



+



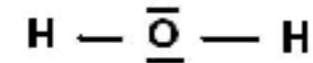
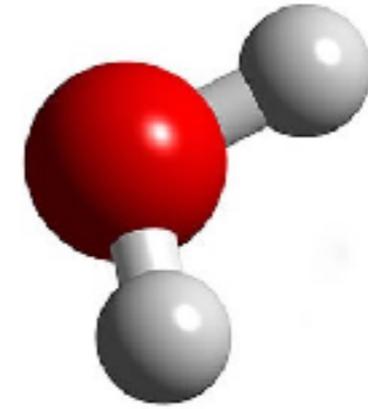
Dioxygène



Dioxyde de carbone

+

+



Eau

+



+ NRJ

Energie

40% Energie
60% Chaleur

Transport des gaz dans le sang

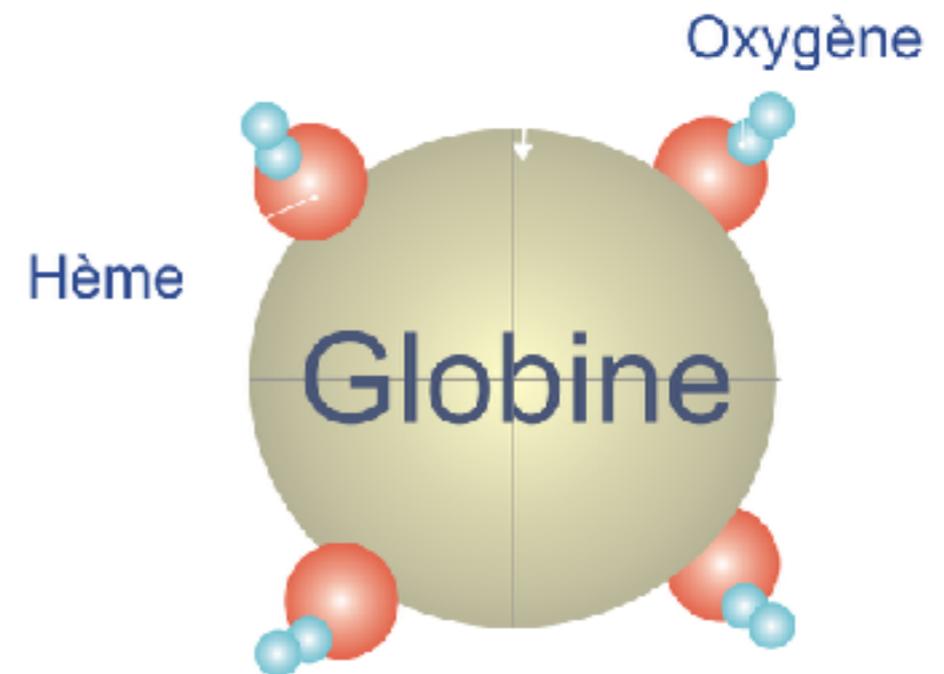
Oxygène

En surface

- 98% sous forme combinée à l'hémoglobine
- 2% sous forme dissoute dans le plasma

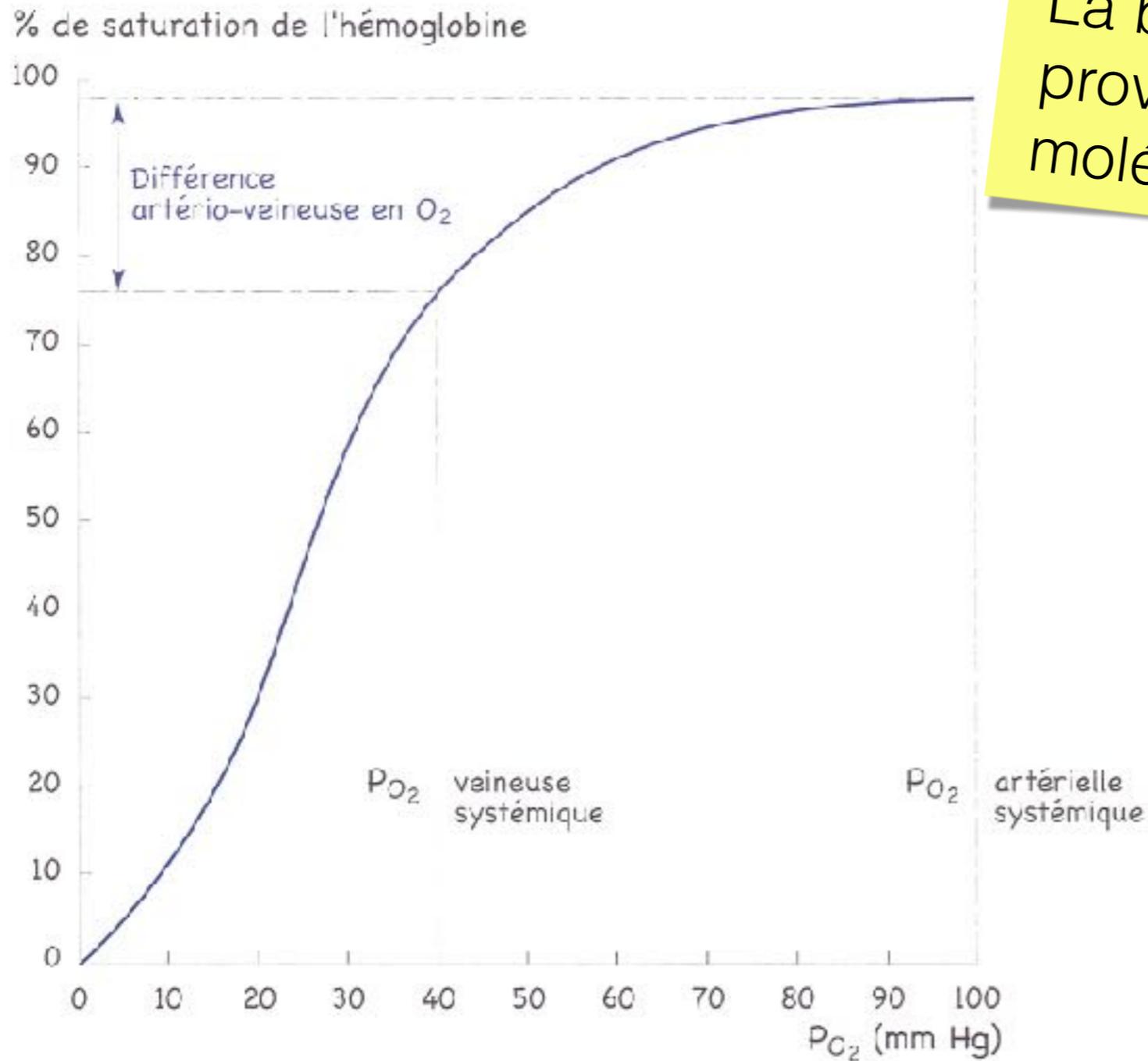
Molécule d'hémoglobine

Chaque globule rouge contient 280 millions de molécules d'hémoglobine.



Une molécule d'hémoglobine : 4 hèmes (fer) fixent l'oxygène.

- Lorsque l'hémoglobine est combinée à l'O₂, on parle d'oxyhémoglobine.
- Lorsqu'elle ne l'est pas, on parle de désoxyhémoglobine.
- Seule la forme dissoute participe aux échanges avec les cellules.
Tout au long de la circulation sanguine l'O₂ combiné est libéré dans le plasma en fonction des besoins.



La baisse de la pression d' O_2 provoque la dissociation des molécules d' O_2 de l'hémoglobine

Lorsque P_{O_2} baisse en dessous de 40 mm/Hg, l'hémoglobine aura tendance à perdre beaucoup d' O_2 , et de façon très rapide.

Saturation de l'hémoglobine en O₂ et exercice musculaire:

Lorsque l'hémoglobine est proche des tissus, surtout à l'exercice musculaire, les conditions ambiantes sont très favorables à la libération d'O₂ vers les tissus.

Ceci provient du fait que le métabolisme cellulaire (augmenté à l'exercice) produit des déchets.

Ces déchets sont le CO₂ et les ions H⁺ (qui provoquent une augmentation de l'acidité du sang).

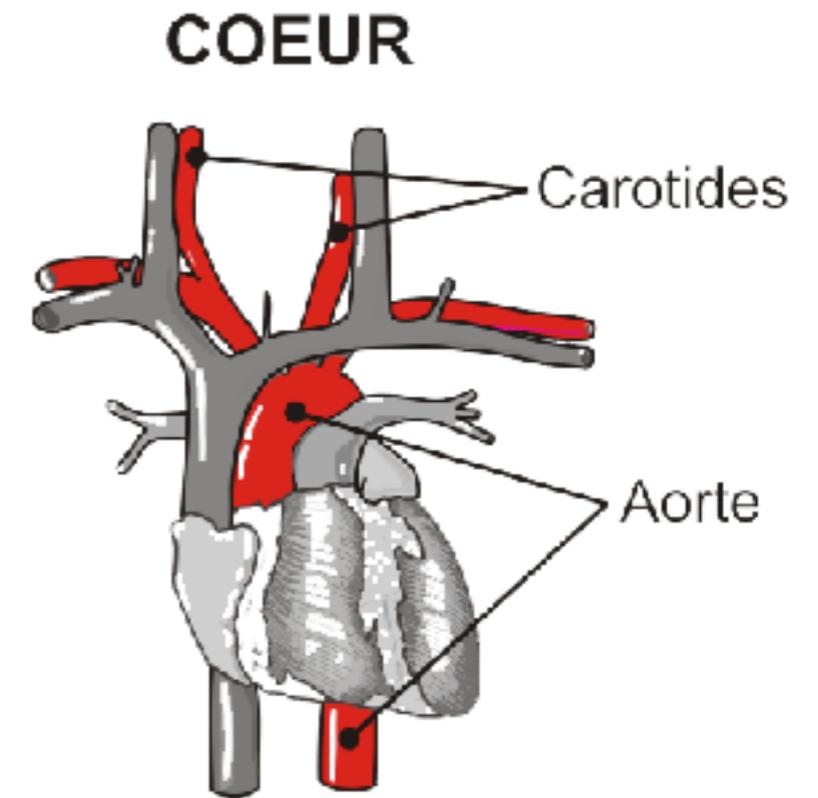
L'effet du métabolisme tissulaire est de produire de la chaleur, par exemple dans un muscle en exercice.

Tous ces phénomènes ont pour conséquence de dissocier encore plus vite l'O₂ de l'hémoglobine et de fournir encore plus d'O₂ aux tissus qui en sont avides. Plus l'activité d'un tissu augmente, plus il produit d'effets qui augmenteront la libération d'O₂ par l'hémoglobine.



La tension d'O₂ dans le sang est connue à tous moments du centre bulbaire respiratoire grâce à des chémorécepteurs périphériques (carotides et aorte).

Ces centres peuvent ainsi moduler la ventilation en fonction des besoins.



Localisation des chémorécepteurs périphériques.

L'azote (N₂)

C'est un gaz inerte.

Il est transporté à 100% sous forme dissoute.

Cas particulier du Monoxyde de carbone (CO)

Inodore et incolore. C'est un sous produit de la combustion des matériaux contenant du carbone. Il se combine à l'hémoglobine sur les mêmes sites que l'oxygène ce qui entraîne l'hypoxie.

Son affinité pour l'hémoglobine est 250 fois supérieure à celle de l'oxygène.

D'autre part la fixation de CO sur l'hémoglobine est durable (100 jours).

La présence de 0,1% de CO réduit de moitié la capacité de transport de l'oxygène par le sang.

Traitement hyperbare nécessaire.



Attention lors des opérations de gonflage.

(Chez les gros fumeurs la capacité de transport de l'O₂ est ainsi réduite de 10%.)

Signes cliniques:

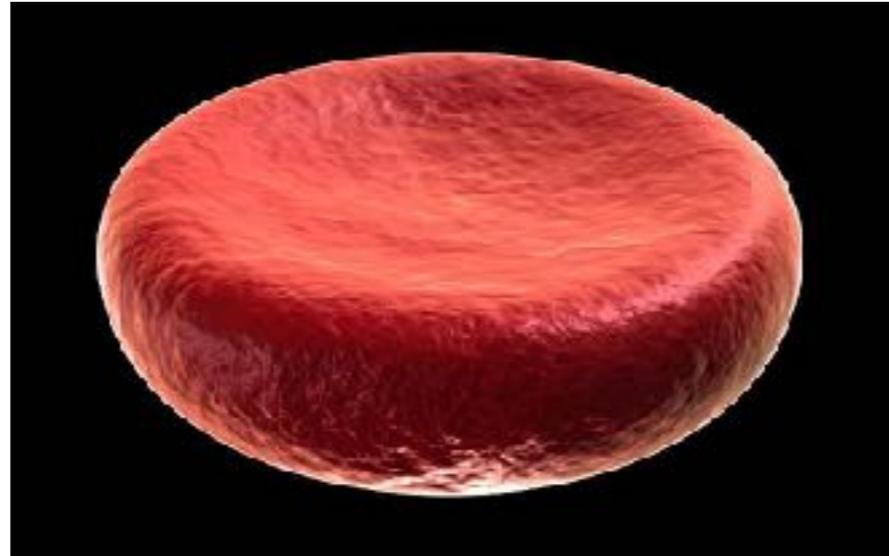
- Céphalées, vomissements
- Agitation, tremblements, troubles du tonus musculaire
- Troubles de la régulation thermique
- Perte de connaissance, coma

Contexte: plusieurs personnes atteintes sur un même bateau



Gaz carbonique (CO₂)

- 10% sous forme dissoute.
- 30% fixé par l'hémoglobine (sur un autre site que celui de l'O₂).
- 60% sous forme de bicarbonates.



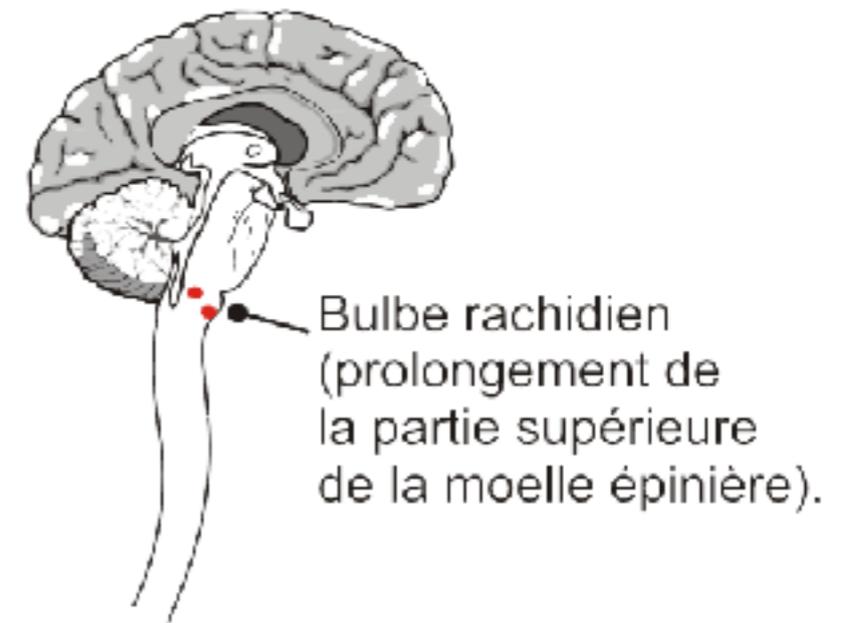
La transformation du CO_2 en bicarbonates est faite par l'hémoglobine dans le globule rouge suivant la formule:



Une fois cette transformation effectuée le bicarbonate et les ions H^+ diffusent vers le plasma.

Lorsque le CO_2 dissous augmente, la production d'ions H^+ augmente aussi. Le centre bulbaire respiratoire est informé en permanence de la concentration en ions H^+ (acidité sanguine) par des chémorécepteurs centraux situés dans le bulbe rachidien. Le rythme respiratoire est accéléré (Le CO_2 est exclusivement éliminé par la ventilation alvéolaire..

TRONC CEREBRAL



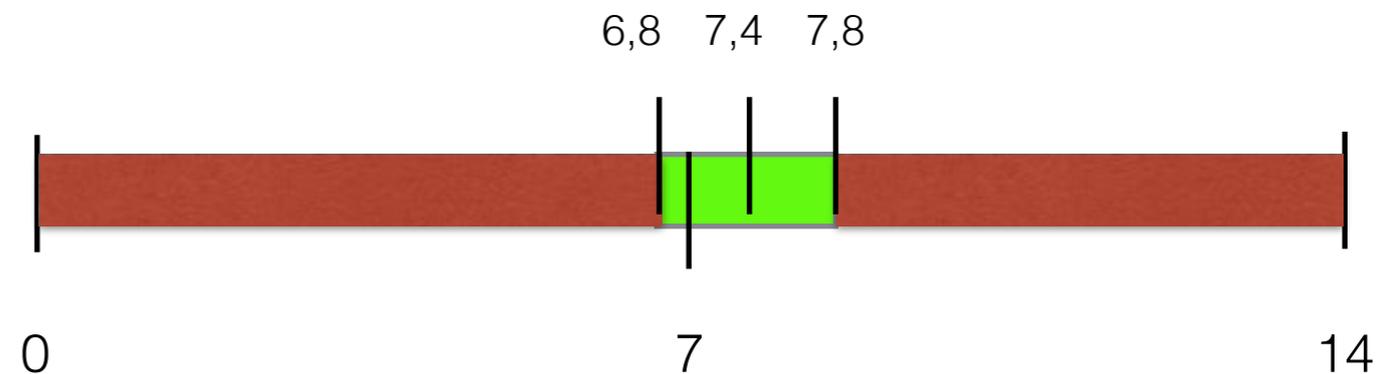
Centres inspiratoire et expiratoire. Localisation des chémorécepteurs centraux.

- La variation du nombre d'ions H^+ va faire varier le pH du sang
- Le pH (potentiel hydrogène) mesure l'activité des ions hydrogène en solution.
 - Une solution de pH 7 est dite neutre
 - Une solution de pH < 7 est dite acide (plus son pH s'éloigne de 7 (diminue) et plus elle est acide)
 - Une solution de pH > 7 est dite basique (plus son pH s'éloigne de 7 (augmente) et plus elle est basique)

pH intracellulaire	7
pH veineux	7,35
pH artériel	7,4
pH interstitiel	7,35

C'est le pH artériel qui est régulé

Limites compatibles avec
la vie:
6,8 à 7,8



Il existe trois niveaux de maintien du pH sanguin permettant de répondre plus ou moins rapidement à une brusque variation du pH:

- Les systèmes tampons (permanents, présents partout, instantanés mais limités)

Dans le sang il existe principalement deux systèmes tampon

- Dans le plasma, le tampon bicarbonate
- Dans les globules rouges, le tampon hémoglobine

- Le système respiratoire (rapide)
Les poumons interviennent en second lieu après la régulation par les systèmes tampons, en éliminant plus ou moins de CO_2 de façon à ce que la pCO_2 reste constante.
Cette régulation est mise en jeu rapidement quand la régulation par les systèmes tampons est insuffisante.
Le centre respiratoire ajuste de façon réflexe la ventilation pulmonaire et donc l'élimination de CO_2 aux variations de pH sanguin.

- Le système rénal (plus lent)
Les tampons chimiques se lient temporairement aux acides ou aux bases en excès, mais ne peuvent les éliminer de l'organisme. Seuls les reins peuvent éliminer les acides autres que le CO_2 .

La pression partielle de CO₂ est indépendante de la profondeur.

Habituellement la quantité de CO₂ dans les alvéoles est maintenue constante par le jeu de la ventilation.

	Air expiré
O ₂	0,16
CO ₂	0,04
N ₂	0,73
Vapeur d'eau	0,06

en surface (1 bar)

	Air inspiré
O ₂	0,21
CO ₂	traces
N ₂	0,79
Vapeur d'eau	variable

en surface (1 bar)

	Sang "bleu"	Air alvéolaire	Sang "rouge"
O ₂	0,05	0,13	0,13
CO ₂	0,06	0,05	0,05
N ₂	0,75	0,75	0,75
Vapeur d'eau		0,06	

en surface (1 bar)

Le CO₂ est produit par l'organisme



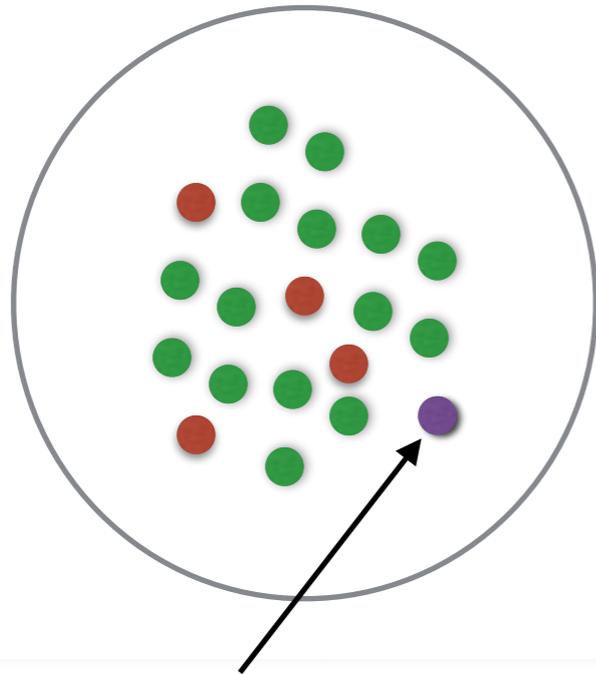
A 40 m (5 bars)

	Air inspiré	Sang "bleu"	Sang "rouge"	Air alvéolaire	Air expiré
O ₂	1,05				
CO ₂	traces	0,06	0,05	0,05	0,04
N ₂	3,95				

Oxygène et azote proviennent de l'air de la bouteille. Leur pression partielle augmente avec la profondeur.

Le CO₂, étant produit par l'organisme, sa pression partielle est indépendante de la profondeur (à effort comparable)

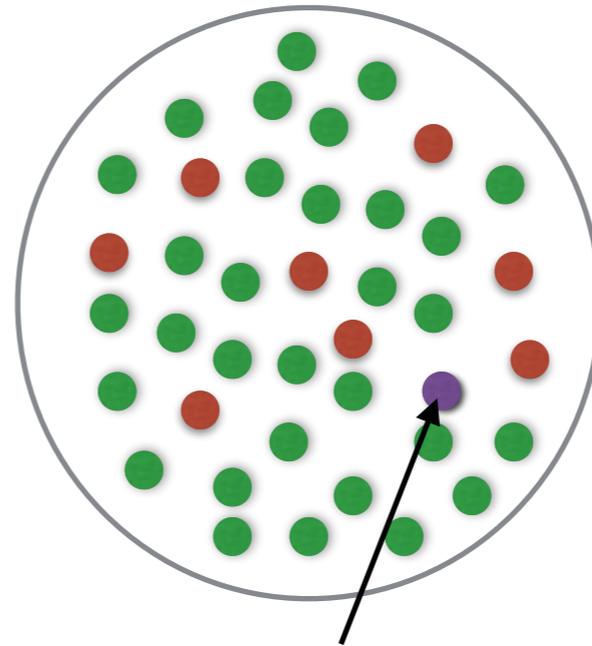
Une alvéole en surface. Pabs = 1 bar



Cette molécule de CO₂ représente 1/20 des molécules soit 5%

$$P_{pCO_2} = 1 \times 0,05 = 0,05$$

Une alvéole à 10 m. Pabs = 2 bars



Cette molécule de CO₂ représente 1/40 des molécules soit 2,5%

$$P_{pCO_2} = 2 \times 0,025 = 0,05$$

La production endogène de CO₂ n'augmente pas avec la profondeur.

La P_{pCO_2} reste constante quelle que soit la profondeur.

A effort équivalent.

Dans le cas contraire, il serait impossible de plonger

Merci de votre attention

