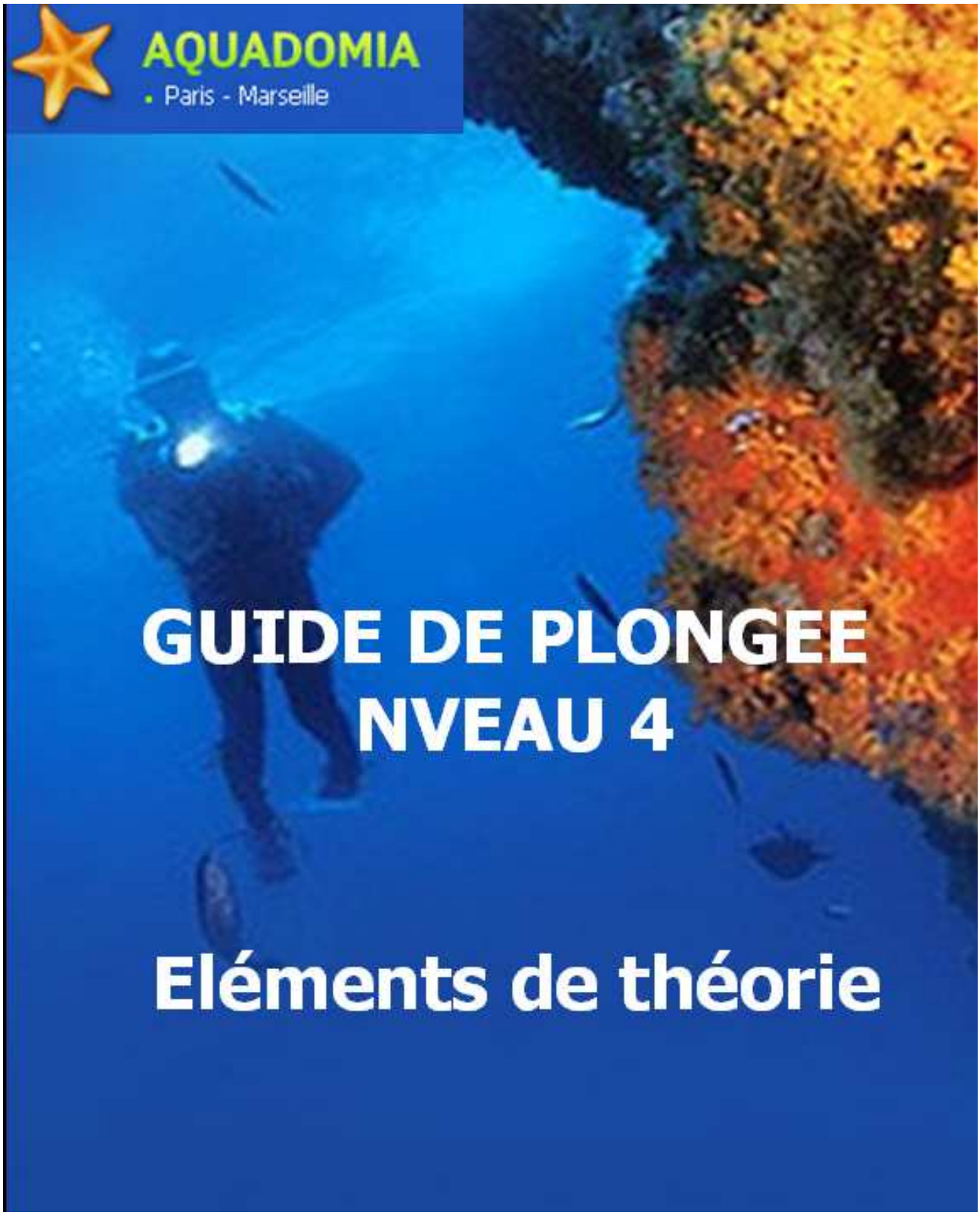

AQUADOMIA
Paris - Marseille
GUIDE DE PLONGEE
NVEAU 4
Eléments de théorie

LE ROLE DU GUIDE DE PLONGEE :

PLAISIR ET SECURITE

ELEMENTS DE PHYSIQUE DE BASE

Nous vivons dans un monde où la matière se présente sous plusieurs aspect.

- Solide
- Liquide
- Gazeux

Cette matière peut alternativement passer de l'un à l'autre de ces états en fonction, de la T° de la pression.

Dans certaines conditions ces états peuvent cohabiter (T° et pression)

1) LA MASSE d'un corps est une grandeur caractérisant une quantité de matière constituant ce corps.
Elle ne dépend ni de la T° ni la pression, ni du lieu.
L'unité est le KG correspondant à une quantité d'eau pure contenue dans 1Dm3 à 4°C

MASSE SPECIFIQUE ou **MASSE VOLUMQUE**

La notion de masse ne donne aucune idée quant au volume occupé par une matière d'une substance à l'autre, **la même masse peut occuper des volumes différents**, il faut donc définir pour chaque matière sa quantité dans un volume donné.
La masse volumique de l'eau est égale à

- 1Kg / Dm3

La masse volumique du plomb (Pb) est égale à 11,3 Kg / Dm3 :dans 1Dm3 on peut placer 11,3 Kg de Plomb

La masse volumique du mercure (Hg) est égale à 13,6 Kg / Dm3

La masse volumique de l'or est égale à 19,5 Kg/Dm3

La masse volumique de l'air est égale à 1,29g / Dm3 à 0°C et à 1 Bar

La masse spécifique fait donc intervenir le Volume mais est dépendant de la T° (les corps se dilatent à la chauffe, on le verra plus tard avec la loi de CHARLES), et de la pression (aucune matière n'est incompressible totalement)

2) LA DENSITE d'un corps est le rapport entre sa masse et celle d'un autre corps occupant le même volume.

Elle s'exprime sans unité.
Il convient de préciser la référence quand on exprime la densité.
Habituellement il est entendu que la densité des solides ou des liquides s'effectue toujours par rapport à l'eau.
Dans le cas de gaz c'est l'air (1,29 / Dm3)

3) LE POIDS est une force exercée sur un corps du haut vers le bas.
Cette force peut provoquer une chute si les appuis de ce corps sont supprimés.
Si ce corps est posé sur une table, la table exerce sur lui une force égale à son poids, cette force découle de l'attraction terrestre (pesanteur)
A l'inverse de la masse, le poids varie selon le lieu.
Il est plus grand au pôle et plus faible à l'équateur, pratiquement nul dans l'espace.
Son unité est le NEWTON, soit la force communiquée à une masse de 1Kg et une accélération de 1M / Sec / Sec
Mesure d'un poids à l'aide d'un ressort : l'allongement est proportionnel à la force de traction qu'il subit (dynamomètre)

a) Le poids volumique : est le poids d'une unité de volume d'un corps, il s'exprime en NEWTON / M3

b) relation masse/poids : dans un même lieu un bloc de 15l sera plus difficile à soulever qu'un bloc de 12l.

Le poids est donc proportionnel à la masse

A PARIS « G » mesure de pesanteur = 9,81 m / Sec –2
« G » diminue avec l'altitude

RAPPEL

Km	Hm	Dam	M	Dm	Cm	Mm
			M3	Dm3	Cm3	Mm3
			M²	Dm²	Cm²	Mm²
				l	Cl	Ml
			Tonne	Kg	Gr	Mgr

4) <u>FORCE</u> cause capable de déformer un corps ou d'en modifier l'état de repos ou de mouvement

- **<u>Statique :</u>** Déformation
- **<u>Dynamique :</u>** Modification d'un mouvement d'un corps ou création d'un mouvement

Représentation d'une force:

Elle peut être :
- Colinéaires : Dans le même sens ==➔Direction (droite, gauche)
- Résultantes : S'ajoutent ==➔Point d'application
- Nulles : S'opposent ==➔Sens, Intensité (Newton)

En plongée, la notion de force se décline :
- Flottabilité
- Pression
- Fonctionnement des détendeurs

<u>Rappel</u>

Masse = Quantité de matière d'un corps
Poids = Force qui ramène un corps vers la terre et qui varie suivant le lieu
Masse spécifique = Masse correspondant à un volume donné (Eau = 1Kg / Dm3
1Dm3 = Kg)
Densité = Masse d'un corps / Masse d'un corps de référence occupant un même volume

5) <u>LA PRESSION</u> est une combinaison de deux grandeurs : force et surface

P = F / S

La pression augmente si la force est grande et la surface est petite

Son unité est le Pascal qui est trop faible, on lui préfère le Bar.
1 Bar = 100.000 Pascal
1 Bar = 1 Kg / Cm² soit une force de 1 Kg sur 1 Cm²

En plongée, on la retrouve dans:
- Les blocs
- En immersion
- En niveau différent (altitude)

a) PRESSION ATMOSPHERIQUE, P.Atm

Pression du poids de l'air au-dessus de nous exprimée en Hecto Pascal (HP)

Au niveau de la mer la P.At = 1013 HP ou 1 Bar

On peut aussi l'exprimer en Mm de mercure (HG), qui au niveau de la mer est de :
760 Mm de HG

Donc 1 Bar = 1013 HP = 760 Mm HG

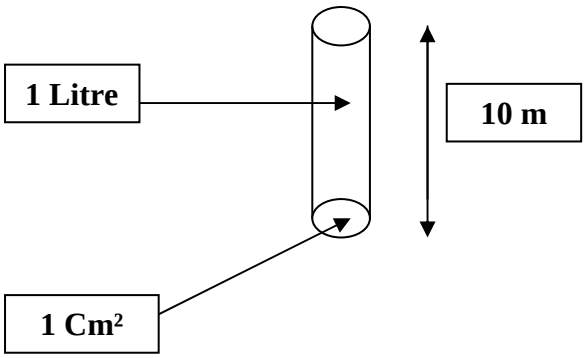
En altitude la pression diminue de par la couche d'air moins importante.
En effet, un plus grand nombre de molécules d'air se trouvent concentré près du sol, par le fait que les molécules ont une masse, elles sont donc soumises à la gravitation et sont attirées vers le centre de la terre .
On considère que l'on perd environ 0,1 Bar par 1000m

Exemple :
Si Patm = 0,86 Bar
Combien en Hg ?
760 x 0,86 = 653,60 Hg
En HP ?
1013 x 0,86 = 871,18 HP

Si Patm = 1050 HP
En Bar : 1050 / 1013 = 1,03 Bar
En HG : $\frac{1050 \times 760}{1013}$ = 786,76 HG

b) PRESSION HYDROSTATIQUE OU PRESSION RELATIVE

Dans l'eau nous subissons une pression égale au poids d'une colonne d'eau située au-dessus de nous.
Plus précisément un cylindre de 1 Cm² de section contenant 1 litre d'eau (1Kg) et mesurant 10 m



Cette colonne d'eau exercera donc à son extrémité basse une pression de 1 Bar
(P= F / S)

A 10 m de profondeur nous aurons donc une pression relative de 1 Bar (1 Kg / Cm²)
A 20 m notre colonne d'eau sera de 20 m de hauteur et contiendra 2 litres (2 Kg) d'eau
La pression relative sera donc de 2 Bars

La pression relative est également dépendante de la densité du liquide dans lequel on procède à l'immersion.

Donc dans l'eau de densité 1.
La pression relative (Prela) à 20 m est de 2 Bars x densité 1 = **2 Bars**
Dans un liquide de densité 1,03 à 20 m on aura
2 Bars x 1,03 = **2,06 Bars**

Donc on peut dire : que la pression relative varie avec la densité

On a vu qu'en altitude, la pression atmosphérique variait

On peut donc dire : que la Patm varie avec l'altitude

Nous subissons également dans l'eau, outre la pression exercée par la colonne d'eau au-dessus de nous, la pression atmosphérique exercée par l'atmosphère au-dessus de l'eau, soit au niveau de la mer et à 10 m de profondeur :
1 Bar de PRela + 1 Bar de Patm = 2 Bars qui est la **pression absolue Pabs**

Pabs = Prela + Patm

Exemple :
Patm = 646 Mm HG
Densité du liquide = 1,05
Quelle est la Pabs à 40 m ?

Patm = Patm du lieu/ Patm au niveau de la mer

Patm en Bar
646 / 760 = 0,85 Bar

Prela = (Profondeur/10) x Densité

(40 m/10) x 1,05 = **4,2 Bars**

Pabs = Prela + Patm

4,2 Bars + 0,85 Bar = **5,05 Bars**

Inversement :

Patm 646 HG
Densité 1,05
Pabs = 7,15 Bars

Quelle est la profondeur ?

Si Prela = (Prof/10) x D

Pabs = Prela + Patm

Donc 7,15 Bars – 0,85 Bar = 6,36 bars

Pabs Patm

(6,36 x 10)/1.05 = **60 m**

<u>En plongée la pression augmente à la descente et diminue à la remontée</u>

COMPRESSIBILITE DES GAZ

MARIOTTE (17ème) mais aussi le physicien Anglais BOYLE ont découvert au même moment l'influence de la pression sur les gaz

1) Applications :

- Matériel :

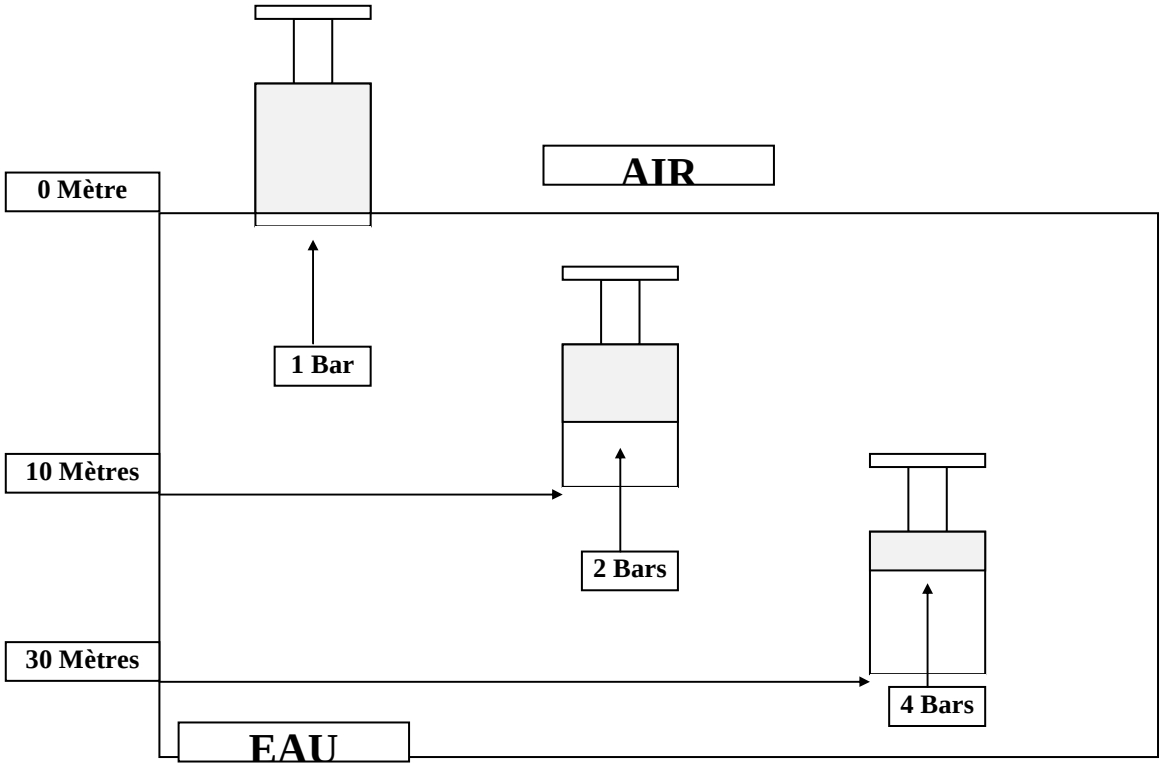
- Compresseurs
- Blocs
- Tampons
- Détendeurs
- Profondimètre capillaires
- SSG (gilet)

- Plongeurs :

- Accident de décompression
- Barotraumatismes
- Surpression pulmonaire
- Levage
- Flottabilité

2) Mise en évidence :

Les gaz sont aisément compressibles
En plongée la pression exercée par l'eau va comprimer les gaz.
Exemple :



Si l'on plonge un verre, gradué, retourné dans l'eau, l'eau va monter lentement dans le verre en comprimant l'air qui se trouve à l'intérieur
A 10m la pression est de 2 bars, l'eau occupe la moitié du volume, l'air a donc diminué de moitié
A 30m la pression est de 4 Bars, l'eau occupe les ¾ du verre, l'air a donc diminué des ¾
Si l'on remonte le verre on constate que l'air se dilate et chasse l'eau
A 10m l'air occupe à nouveau la moitié du volume et à la surface il occupe la totalité du volume du verre.

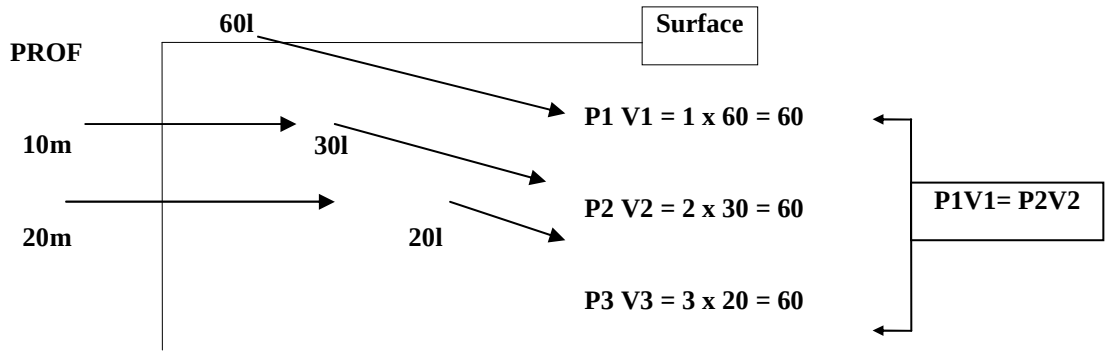
Si :

- P est la pression avant immersion
- V est le volume du gaz avant immersion
- P' la pression en immersion
- V' le volume du gaz en immersion

La loi de MARIOTTE s'exprime en conséquence par la formule:

- P x V = P' x V' = Pn x Vn

3) Vérification:



P1 x V1 = P2 x V2 = P3 x V3 = Pn Vn

P1 = pression avant immersion
V1 = volume avant immersion
P2 = pression à 10 m
V2 = volume à 10 m
P3 = pression à 20 m
V3 = volume à 20 m
Etc…

Enoncé:

A température constante le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il reçoit

Mais à T° constante, ce qui traduit qu'en modifiant la T° les données changent

Si nous tenons compte de la T°, la loi de MARIOTTE est modifiée par la loi de **CHARLES** qui précise :

« A volume constant, la pression d'un gaz est proportionnelle à sa T° absolue »

On peut également citer la loi de **GAY LUSSAC**

« A Pression constante le volume occupé par un gaz est proportionnel à sa T° absolue »

Toutefois en plongée la pression est rarement constante, on ne retiendra donc que la loi de CHARLES
Pour des raisons de calculs on transformera la T° en ° Celsius ou Centigrades en ° Kelvins et on dira donc que la T° absolue est égale à **0° C = 273° K**
T° absolue = T° en ° C + 273 = T° en ° K
Donc ramené à MARIOTTE on dira :

$$\frac{P1V1}{T1} = \frac{P2V2}{T2} \text{ car } \frac{P \times V}{T} = \text{Constante}$$

La quantité d'air disponible pour le plongeur est proportionnelle au produit de :

$$\frac{P \times V}{T}$$

4) En application :
On dispose d'un bloc de 15 l gonflé à 180 Bars à 15 °C
Sur le pont du bateau il est soumis à une T° de 55 °C
Quelle sera sa pression ?

T1 = 15°C + 273 = 288 °K T2 = 55°C + 273 = 328 °K

P1 = 180 Bars P2 = ?

$\frac{P1}{T1} = \frac{P2}{T2}$ $P2 = \frac{P1\ T2}{T1}$

$P2 = \frac{180\ b \times 328\ °K}{288\ °K}$ = **205 Bars**

La pression augmente si la T° monte, c'est donc la démonstration de la loi de CHARLES.

Inversement :
On gonfle un bloc de 15 l à 190 Bars à 40 °C
Quelle sera sa pression dans une eau à 15 °C ?

T1 = 40 °C + 273 = 313 °K
T2 = 15 °C + 273 = 288 °K

$\frac{P1}{T1} = \frac{P2}{T2} = \frac{P1 \times T2}{T1} = P2 = \frac{190\ Bars \times 288\ °K}{313\ K}$ = **174,82 Bars**

La pression diminue si la T° baisse

Si nous avions un choix à faire de deux blocs de 15 l
- Le premier gonflé à 190 Bars à 47 °C
- Le 2ème gonflé à 180 Bars à 27 °C

Le tout pour s'immerger dans une eau à 17 °C
Que choisir ?

T1 1er bloc = 47 °C + 273 = 320 °K
T1 2ème bloc = 27 °C + 273 = 300 °K
P1 1er bloc = 190 Bars
P1 2ème bloc = 180 Bars
T2 = 17 °C + 273 = 290 °K

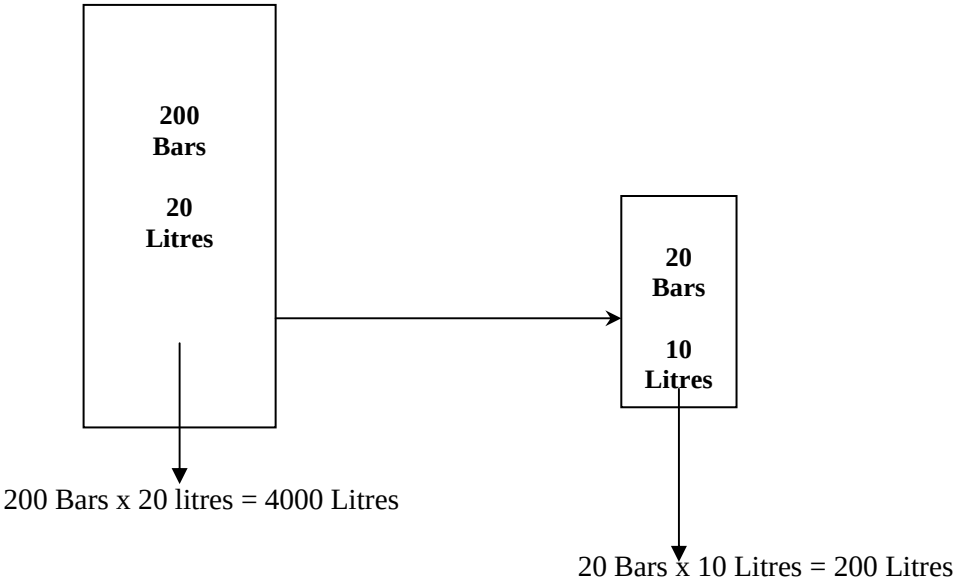
1°) $\frac{190\ b \times 290\ °K}{320\ °K}$ = **172,19 Bars**

2°) $\frac{180\ b \times 290\ °K}{300\ °K}$ = **174 Bars**

Autres applications

Les tampons dans le gonflage des bouteilles
Le principe du gonflage est d'équilibrer le bloc à remplir avec le tampon jusqu'à la pression maximale pouvant être supportée par le bloc

Exemple :
Un tampon de 200 Bars de 20 l est utilisé pour gonfler un bloc de 10 l dans lequel reste 20 Bars.



On met en remplissage le bloc avec le tampon, à l'équilibre il n'y aura plus qu'un seul bloc représentant le volume total des deux : tampons + bloc
soit 4000 l + 200 l = 4200 l

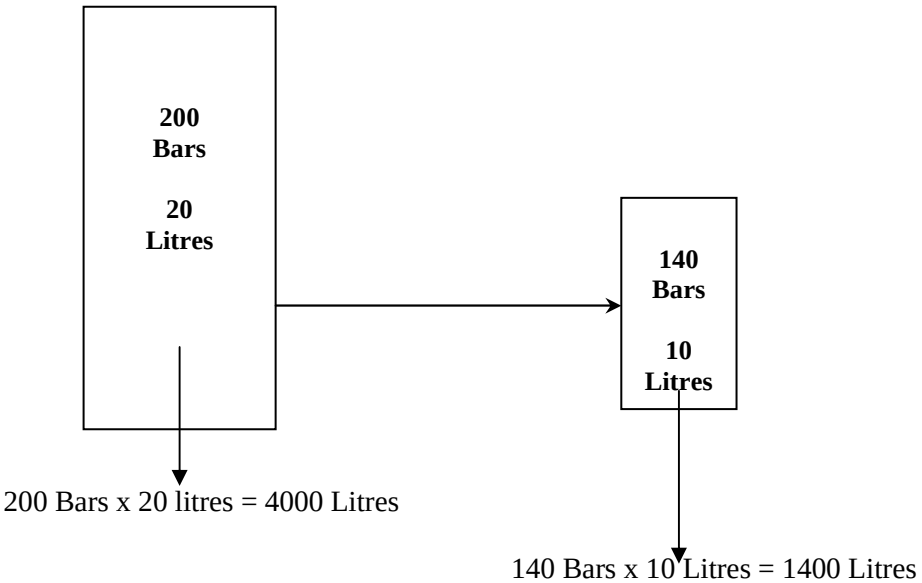
On souhaite alors connaître la pression d'équilibre de ces deux récipients :

$$\frac{4000\ l + 200\ l}{20\ l + 10\ l} = \mathbf{140\ Bars}$$

En fermant le tampon nous avons donc un bloc de 10 l gonflé à 140 Bars

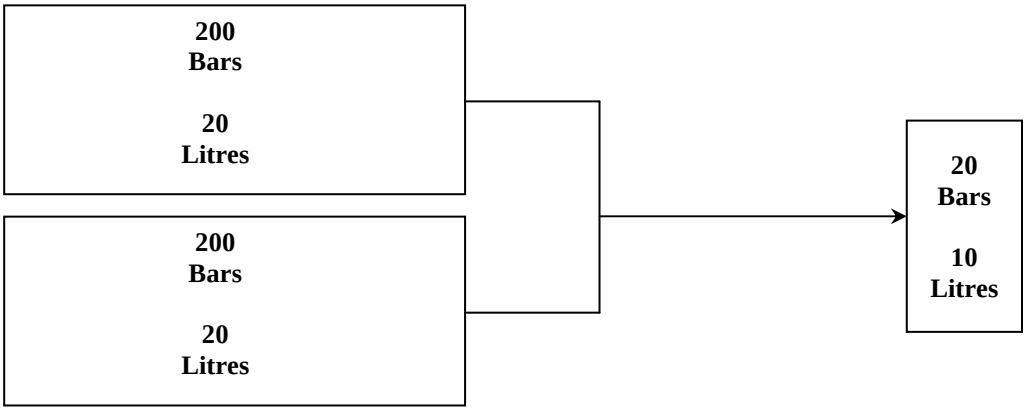
Soit $\frac{P1V1 + P2V2}{V1 + V2} = \frac{(20\ Bars \times 10\ l) + (200\ Bars \times 20\ l)}{10\ l + 20\ l} = \mathbf{140\ Bars}$

Si maintenant on décide de continuer le gonflage de ce bloc à l'aide d'un nouveau tampon de 200 Bars et de 20 l
Il s'agira d'un gonflage successif



Soit $\frac{P1V1 + P2V2}{V1 + V2} = \frac{(140\ Bars \times 10\ l) + (200\ Bars \times 20\ l)}{10\ l + 20\ l} = \mathbf{180\ Bars}$

On convient d'effectuer la même opération mais en **simultanée** en reliant les deux tampons



Soit :

$$\frac{P1V1 + P2V2}{V1 + V2} = \frac{(20 \text{ Bars} \times 10 \text{ l}) + (200 \text{ Bars} \times 20 \text{ l}) + (200 \text{ Bars} \times 20 \text{ l})}{10 \text{ l} + 20 \text{ l} + 20 \text{ l}} = \mathbf{164\ B}$$

On constate donc qu'il est préférable de gonfler successivement plutôt que simultanément

Consommation

Un plongeur dispose d'un bloc de 12 l à 175 Bars
Il plonge à 25 m et sa consommation est de 24 l / Mn

Quelle est la durée de sa plongée, s'il veut conserver 50 Bars ?

175 Bars – 50 Bars = 125 Bars
25 m = 3,5 Bars

$$\frac{125 \text{ Bars} \times 12 \text{ l}}{3{,}5 \times 24 \text{ l}} = 17{,}86 \text{ Mm}$$

PRINCIPE DE LA REGLE DE TROIS

6 = 3 x 2
3 = 6/ 2
2 = 6/ 3
d = P : V
V = P : d
P = d x V

$$\frac{N\ldots\ldots \times 7}{9 + 12} = \frac{21}{7} = N\ldots\ldots = 3$$

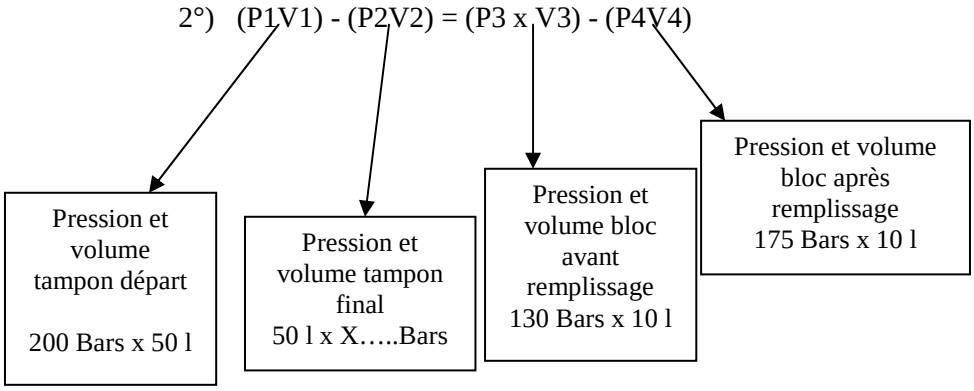
Autres exemples de problèmes de gonflage

2 tampons de 50 l
1er = 150 Bars
2ème = 200 Bars
Bloc de 10 l, reste 30 Bars
On souhaite remplir le bloc à 175 Bars en successif
Quelle sera la pression finale dans le 2ème tampon ?

Soit

$$1°)\quad \frac{P1V1 + P2V2}{V1 + V2} = \frac{(30 \text{ Bars x } 10 \text{ l}) + (150 \text{ Bars x } 50 \text{ l})}{10 \text{ l} + 50 \text{ l}} = \mathbf{130\ Bars}$$

2°) (P1V1) - (P2V2) = (P3 x V3) - (P4V4)



$$\frac{(P1V1) – [(P3V3) – (P4V4)]}{V2} = P2$$

$$\frac{10000 – (1300 – 1750)}{50} = \mathbf{191\ Bars}$$

Algébriquement :
(200 Bars x 50 l) – (50 l x X…..) = (175 Bars x 10 l) – (130 Bars x 10 l)
10000 – 50x = 1750 – 1300
50x = 450 – 10000
50x = -9550
$x = \frac{9550}{50} =$ **191 Bars**

Il est bon de noter que dans un bloc où le manomètre indique « 0 » il reste en fait 1 Bar égal à la pression Atm, la lecture sur un manomètre correspond à la pression relative.

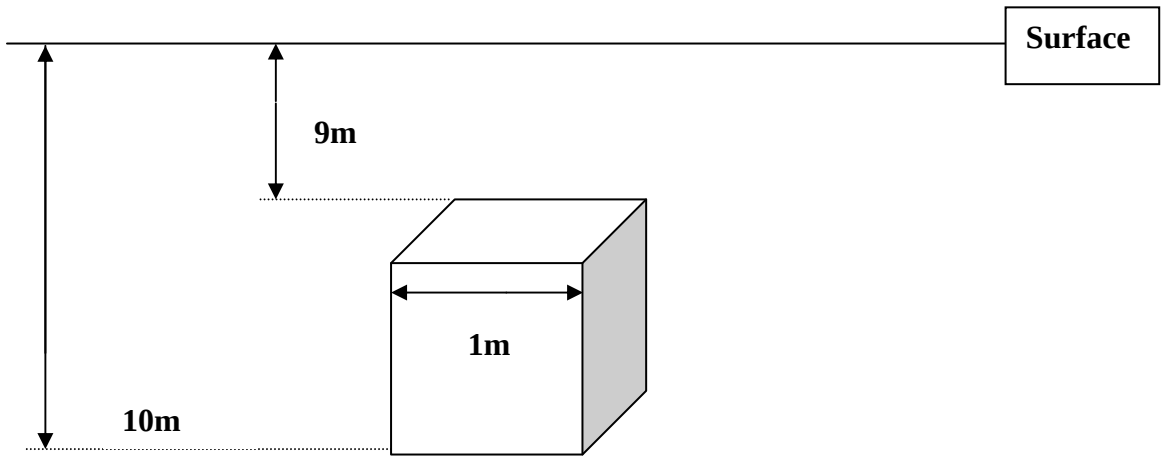
Lors des cours sur le matériel il sera abordé les profondimètres.
MARIOTTE intervient également sur les barotraumatismes qui seront expliqués ultérieurement.
En pratique et en utilisant le gilet (PA) et le poumon ballast on utilise la loi de MARIOTTE
Les levages divers touchent aussi ARCHIMEDE objet d'un autre cours

LA FLOTTABILITE

1) <u>Applications :</u>

- Le lestage
- La flottabilité
- Le poumon ballast
- Le gilet
- Le parachute
- Les techniques d'immersion
- Le levage

Soit un cube de 1m de coté, on l'immerge à 9m de profondeur



On constate qu'une force s'exerce de la surface vers le cube :

A 9m la Pabs est de 1,9 bar
Soit 1m = 100 cm x 100 cm = 10.000 cm²
Donc 10.000 cm² x 1,9 bar = 19.000 Kgf = 19 Tonnes
A 10 m la Pabs est de 2 bars
Soit 1m = 100 cm x 100 cm = 10.000 cm²
Donc 10.000 cm² x 2 bars = 20.000 Kgf = 20 Tonnes

La force sur la face inférieure est donc plus importante que celle qui s'exerce sur la surface supérieure.
Les forces latérales s'annulent

Autres exemples :

Le principe de la balance :

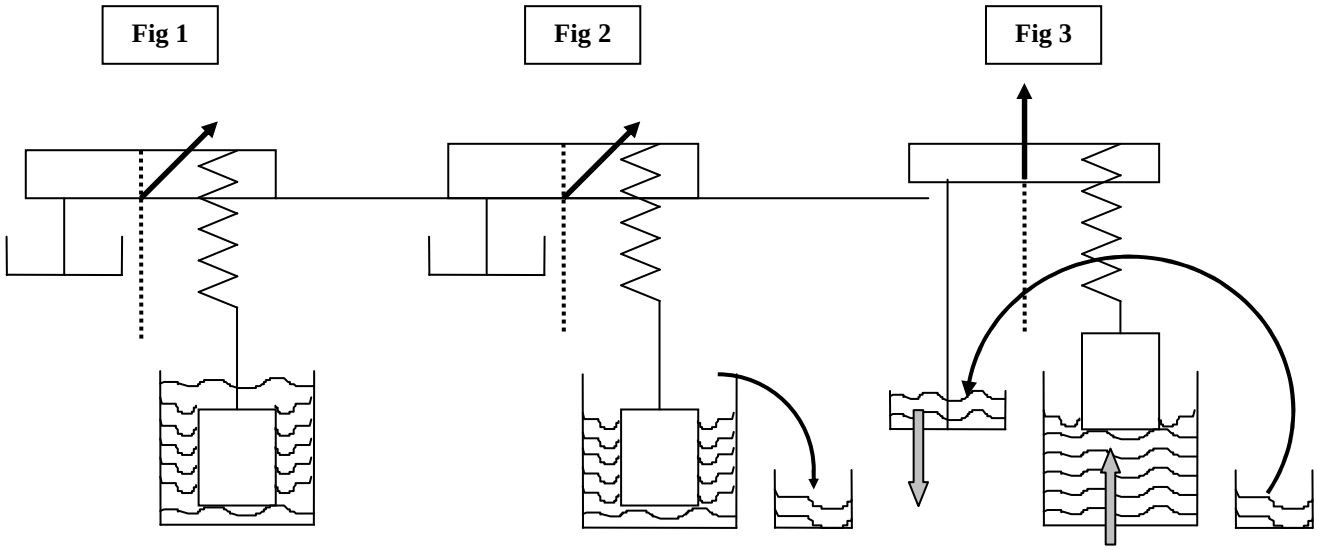


Fig 1 : **Nous immergeons un bloc de densité « 1 » dans un récipient d'eau, nous constatons qu'il coule et que l'eau sort du récipient**

Fig 2 : **Nous récupérons l'eau expulsée**

Fig 3 : **Nous rajoutons l'eau retirée dans l'autre plateau de la balance, nous constatons que les deux plateaux sont en équilibre**

Tout corps plongé dans l'eau reçoit de la part de celle-ci une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume d'eau déplacée.

Nous pouvons appeler le poids réel (Pre) le poids d'un corps dans l'air.
Le poids apparent (Papp), le poids d'un corps dans l'eau.

Le poids apparent est la différence entre le poids réel et la poussée d'ARCHIMEDE.
La poussée étant égale au volume du corps

Papp = Pre - Parchi

3 repères :

Pre < Parchi : La valeur du poids d'un corps est < à la valeur de son volume, le corps remonte **« la flottabilité est positive »**

Pre > Parchi : La valeur du poids d'un corps est > à la valeur de son volume, le corps coule **« la flottabilité est négative »**

Pre = Parchi : La valeur du poids d'un corps est = à la valeur de son volume, le corps flotte **« la flottabilité est nulle »**

Si nous considérons qu'un plongeur a un poids de 80Kg, un volume de 79l, une combinaison de 5Kg qui elle même a un volume de 10l, une ceinture de 5Kg et de volume 2l, un bloc de 15Kg avec un volume de 12l
Quel est le constat que l'on en tire?

	PLONGEUR	COMBINAISON	LEST	BLOC	TOTAL
POIDS	80Kg	5Kg	5Kg	15Kg	105Kg
VOLUME	79l	10l	2l	12l	
POUSSEE	79Kg	10Kg	2Kg	12Kg	103Kg
Papp	1Kg	-5Kg	3Kg	3Kg	2Kg
FLOTTABILITE	→				Négative

On peut donc dire que la Parchi est une force qui ne dépend que du volume de l'objet immergé et du fluide dans lequel on l'immerge.
Elle ne dépend pas du Pre de l'objet.
Dans l'eau la Parchi sera de 1 KgF par litres immergé (d de l'eau = 1)

Applications :

- **Un plongeur s'immerge en phoque, il sort les bras, il expire, il diminue son volume, il coule.**
- **Un nageur fait la planche en surface poumons pleins, il flotte, s'il expire son volume diminue, il reçoit une poussée inférieure, il coule.**
- **Le plongeur équilibré en immersion inspire, il augmente son volume, il remonte**

Il peut être associé MARIOTTE et ARCHIMEDE
Le plongeur descend, tous les gaz se compriment (estomac, intestins, alvéoles de la combinaison, etc..) le volume diminue la Parchi est moins grande.
L'importance du lestage trouve là son application, le plomb est choisi car il a une densité importante pour un petit volume (11,3), on pourrait aussi lester avec des composants plus lourds tel que : le mercure (13,6), l'or (19,3)

Si nous devons remonter un plongeur , ce n'est pas le plus lourd(Pre) qui sera le plus dur à remonter mais le plus dense (rapport poids/volume)

Le Papp d'un plongeur n'est pas constant durant sa plongée, il varie avec la profondeur
Plus de pression = moins de volume

il varie aussi avec le temps (consommation), la bouteille se vide le Papp diminue

EXEMPLES PRATIQUES :

Nous trouvons à 40 m une ancre de 30 Kg et de d 4
Nous disposons d'un parachute de 30 l, nous y mettons 15 l d'air

1°) est-ce que l'ancre remonte ?

2°) si non à quelle profondeur doit-on la remonter à la palme pour qu'elle remonte seule ?

1°) Papp = Pre – Parchi ou Vol

Volume = Masse / d
Volume de l'ancre = 30 Kg / 4 = 7,5 Kg

30 Kg – 7,5 Kg = 22,5 Kg ou 22 l, 5
Elle ne remontera pas avec 15 l d'air

2°) à 40 m la Pabs = 5 Bars
P1 V1 = P2 V2
P1 = 5 Bars V1 = 15 l P2 ? V2 = 22 l,5
$\frac{5 \times 15}{22,5}$ = 3, 33 Bars = **23, 3 m**

$$\frac{P1V1}{V2} = P2$$

****

On dispose d'un caisson d'appareil photos d'un poids de 20 Kg
et de Volume 25l
On y place un appareil photos de 10 Kg
On possède de la mousse de d = 0,2 (0,2 Kg / Dm3)
On immerge dans une eau de d = 1

Quel volume de mousse doit-on rajouter pour obtenir un Papp = 0 ?

Papp du caisson et appareil photos 20 Kg + 10 Kg = 30 Kg – 25 l = 5 Kg

La mousse est égale à 0,2 Kg / Dm3
Soit pour chaque litre de mousse rajoutée on obtient 0,2 Kg en plus
Donc 1 Kg (1l) – 0,2 Kg = 0,8 Kg de flottabilité par litre rajoutée
Papp 5 Kg/ 0,8 = 6,25 Litres de mousse

****

Une ancre de 40 Kg et de 20 l de volume se trouve dans une eau de d = 1,25
à 45 m
On dispose d'un parachute de 5 l d'air
A quelle profondeur remontera-t-elle ?

Papp 40-20 = 20 Kg
45m = 6,625 Bars ($\frac{45}{10}$ x 1,25 + 1)
$\frac{6,625 \text{ x } 5}{20 \text{ x } 1,25}$ = 1,33 bar ➔**2,64 m**
Un objet flotte à 15 m après que l'on y ait attaché un parachute de 10 l d'air à 40m et dans une eau de d = 0,8

Quel est son Papp ?

40m = 4,2 Bars

4,2 Bars x 10 l = ($\frac{\text{Pabs} - 1}{0,8}$) 10 = 15 m

Donc $\frac{15 \text{ m}}{10}$ x 0,8 + 1 = 2,2 Bars
$\frac{4,2 \text{ Bars x } 10}{2,2 \text{ Bars}}$ = **19 Kg de Papp**

****

La masse d'un boîtier de caméra est de 3 Kg, son volume de 5 Dm3
On dispose d'un lest de masse volumique 11 Kg / Dm3
Combien doit-on rajouter pour que le Papp du boîtier soit nul dans une eau de d = 1,03 ?

1°) Le lest à l'intérieur
2°) Le lest à l'extérieur

1°) papp = Pre – (Parchi x d)
3 Kg – (5 x 1,03) = **2,15 Kg**

2°) Si le lest est à l'extérieur il convient de connaître la Parchi du lest
d du lest = 11
d de l'eau = 1,03
Poids du lest = 2,15 Kg
Vol = ?
Papp du lest = 2,15 ➔ résulte de : (Vol du lest x d du lest) – d de l'eau
Soit 2,15 = (Vol lest x 11) – 1,03
Vol du lest = 2,15/(11 – 1,03) = 0,22 Dm3

$d = \frac{P}{V}$ P ?
P = d x V = 11 x 0,22 = **2,42 Kg**

LA LOI DE DALTON

I) INTRODUCTION.

Le plongeur respire de l'air comprimé qui est composé de plusieurs gaz.

Ces gaz vont subir des modifications en fonction de la profondeur atteinte et avoir des comportements différents.

O2 combiné a l'hemoglobine ou dissous dans le sang est directement utilisé par l'organisme.

CO2 s'intègre dans le système chimique. Il est surtout d'origine interne et sa production ne change pas beaucoup avec la pression.

Les gaz inertes , dissous dans le sang au niveau de l'échangeur pulmonaire se repartissent dans l'organisme selon leur solubilité dans les différents tissus. Dans la plongée amateur a l'air , le gaz inerte est l'azote.

II) DEFINITION.

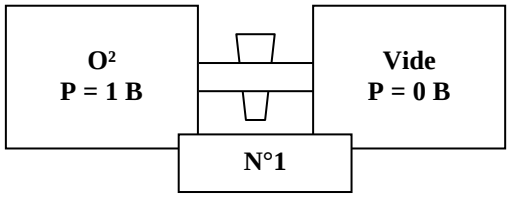
La pression partielle d'un gaz dans un mélange est égale à la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul le volume du mélange.

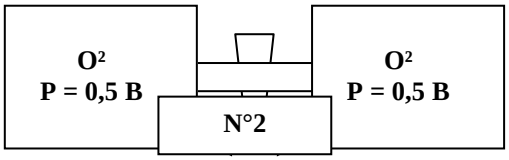
III) MISE EN EVIDENCE.

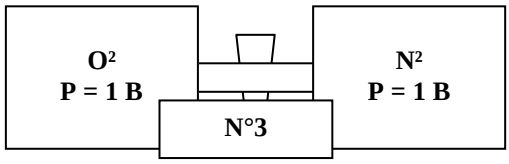
l'expérience de BERTHOLET

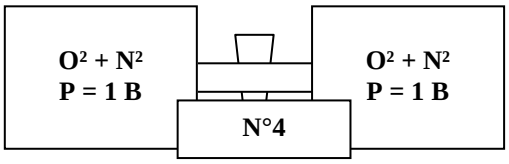
A) Prenons deux récipients d'un même volume de 1 L, muni chacun d'un manomètre et relié par un robinet

1) Robinet fermé : le 1er récipient contient de l'O2 à la P° de 1 bar. le 2eme récipient est au vide absolu.









2) On ouvre le robinet de communication entre les deux récipients. Au bout d'un certain temps à l'équilibre, on constate que chaque récipient a une P° identique de 0,5 B.

3) Robinet fermé. Le 1er récipient contient de l'O2 à une P° de 1B. le 2e récipient contient du N2 à une P° de 1B.

4) On ouvre le robinet. La T° étant maintenue constante, au bout d'un certain temps à l'équilibre on constate:

- Que la P° n'a pas changée dans chacun des récipients.

- Que chaque récipient contient la même quantité des deux gaz.

Dans un cas comme dans l'autre le gaz ou les gaz se retrouvent en quantité égal dans chacun des deux récipients. La pression est identique seul la composition de chaque récipient est modifié.

Lorsqu'il est seul, il y a une répartition égal des pressions dans chacun des récipients. Dans le premier cas 0,5b.
Lorsqu'il est avec un autre gaz (O_2/N_2) ils ont une P° totale de 1B mais avec une pression respective de 0,5 B pour chacun. On parlera alors de P° partielle d'O2 et de P° partielle de N2
On peut en déduire que :

P°abs = 1B = PPO2 = 0,5B + PPN2 = 0,5B

La P° partielle du gaz = La P° abs x % du gaz

DONC :

La P° exercée par un mélange gazeux est égale à la somme des P° partielles de chacun des gaz constituant ce mélange.
La P° partielle d'un gaz constituant d'un mélange est la P° que ce gaz exercerait s'il occupait seul le volume total du mélange.
La P° partielle d'un gaz constituant d'un mélange est égale au produit de la P° totale du mélange par la concentration (pourcentage) du gaz dans le mélange.

V) APPLICATIONS.

Composition de l'air.

O2 ⇒ 20,9 % GAZ RARES ⇒ 0,07 %
N2 ⇒ 79 %
CO2 ⇒ 0,03 %

On peut simplifier en considérant :

O2 ⇒ 20 %
N2 ⇒ 80 %

Il faut savoir que l'O2 est toxique pour l'organisme à une P° partielle de 1,6 B

Exercice :

Calculer la PPo2 et la PPn2 a 40 M
PP = Pabs x X% → Pabs a 40M → Ppo2 = 5x 20%
PPn2 = 5 x 70ù

Profondeur maxi atteinte pour une plongée a l'air.
1,6 = 5 x X% → Pabs = 8B = 70 M

Avec quel mélange obtient–on une P° partielle d'O2 maxi à 40M ?

Chaque gaz constituant l'air possède des propriétés biologiques particulières. Les effets de ses gaz sur l'organisme sont directement corrélés avec leurs P° partielles. Le calcul des P° partielles est utile pour comprendre la physiologie de la plongée a l'air et indispensable pour la plongée avec des mélanges.

LA DISSOLUTION DES GAZ

I) INTRODUCTION

Les liquides dissolvent les gaz . Leurs dissolution dans les liquides se fait suivant la loi de HENRY. Les gaz se dissolvent aussi dans les tissus. La quantité dissoute et la vitesse de dissolution sont fonctions de paramètres physiques. (T° et P°).

II) DEFINITION.

A TEMPERATURE CONSTANTE ET A SATURATION, LA QUANTITE DE GAZ DISSOUS DANS UN LIQUIDE EST PROPORTIONELLE A LA P° EXERCEE PAR CE GAZ AU CONTACT DU LIQUIDE.

III) MECANISME

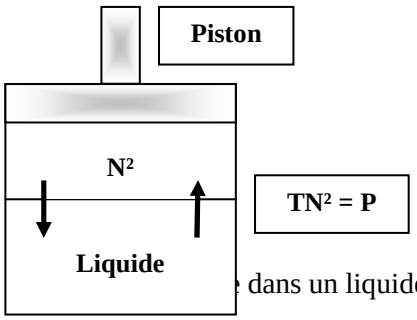
La bouteille d'eau gazeuse : si l'on ouvre la bouteille , une partie du gaz contenu dans l'eau s'échappe et passe brutalement de la forme dissoute à la forme gazeuse. (↘ de la P° par ouverture de la bouteille) ⇨ création de bulles.

Le sucre dans le café chaud se dissout. Si l'on en rajoute trop , il ne se dissout plus.(saturation).Refroidi il se cristallise.

Autre exemple: On visite une cave - dégustation de vins de 3 sous-sols, à chaque étape (1er sous-sols, 2ème sous-sol, 3ème sous-sol) on boit un verre, donc plus on descend plus l'alcool se disperse dans le sang.
On décide de remonter directement du 3ème sous-sol au rez-de-chaussée, les jambes sont lourdes et on peut aller jusqu'à tituber.
On décide d'effectuer un arrêt de quelques minutes au 2ème sous-sol, puis également au 1er sous-sol avant de rejoindre le rez-de-chaussée, on constate alors que l'effet de l'alcool s'est grandement atténué voire a disparu.
Il en va de même en plongée pour l'azote qui s'élimine par la respiration en effectuant une lente remontée et des paliers.

Prenons un récipient fermé dans lequel nous introduisons un liquide et au dessus de se liquide un gaz le tout fermé par un piston.

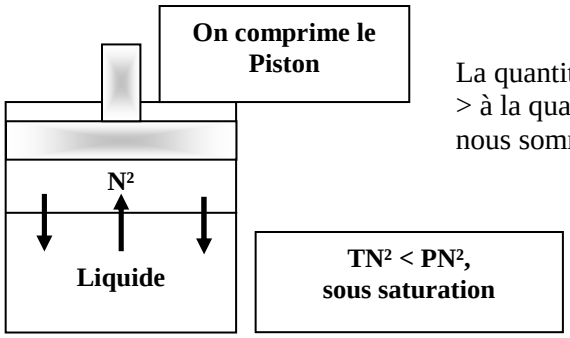
1°)



Le gaz diffuse à travers la surface libre du liquide jusqu'à ce que la quantité de N^2 en solution soit en équilibre avec la P exercée par le gaz sur la surface libre du liquide, il y a saturation.

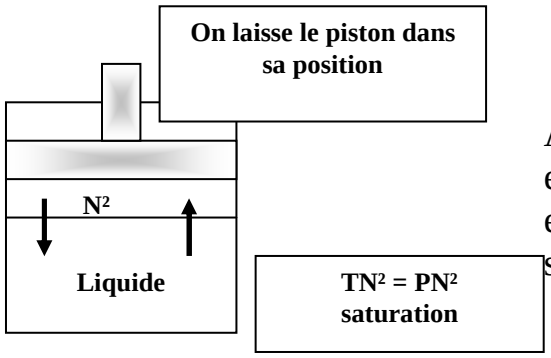
dans un liquide on parle de tension

2°)



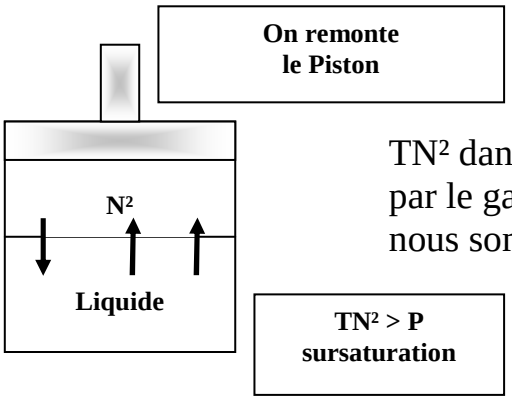
La quantité de N^2 qui pénètre dans le liquide est > à la quantité qui s'échappe, le liquide se charge en N^2 nous sommes en sous saturation.

3°)



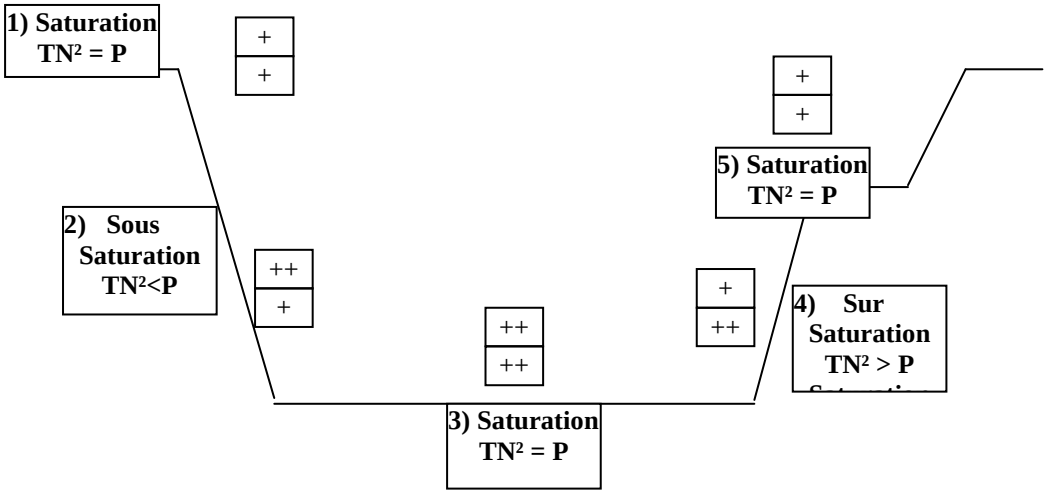
Au bout d'un certain temps il y a équilibre entre la quantité de N^2 dans le liquide et la P exercée nous sommes à nouveau en saturation.

4°)



TN^2 dans le liquide est > à la P exercée par le gaz (le gaz quitte le liquide), nous sommes en sur saturation.

Regardons ce qui se passe chez le plongeur



1) Notre plongeur est en surface il respire de l'air dont la composition est approximativement de 20% O_2 et 80% N_2, la quantité dissoute dans l'organisme est égal à la quantité proposée.
2) Lors de la descente la pression partiel de l'azote augmente donc il y a un déséquilibre entre la quantité proposée et la quantité réellement dissoute.
3) Après un passage long à la profondeur il y a à nouveau équilibre entre la quantité proposée et celle acceptée.
4) Au moment ou il décide de remontée la pression va diminuer donc on se retrouve devant un déséquilibre, l'organisme à une trop grande quantité à restituée par rapport à la pression extérieur.
5) Si au cour de la remontée il laisse le temps à l'organisme de restituée le surplus d'azote on va se retrouver à nouveau dans une phase d'équilibre.

IV) LES ETATS.

- a) SOUS SATURATION.:

Etape au cour de laquelle le liquide absorbe le gaz en le dissolvant.

- b) SATURATION**.:**

Etat d'équilibre. La tension d'azote dans le liquide est égale à la P° exercée par le gaz.

- c) SURSATURATION**.:**

Etape au cour de laquelle le liquide restitue le gaz dissous préalablement pour tendre vers une nouvelle valeur de saturation

- d) SURSATURATION CRITIQUE.

Le liquide est en état de sursaturation lorsque la tension est supérieure à la P° partielle du gaz sur le liquide . A partir d'une certaine valeur de l'écart entre Tension et P° partielle , des micro bulles prennent naissances sur des noyaux gazeux préexistant. C'est la phase de germination . Lorsque la P° absolue diminue les microbulles se dilatent en application de la loi de Mariotte .La sursaturation critique est atteinte. Il y a risque d'accident .L'état de sursaturation est défini par rapport à la P°.

IV) FACTEURS DE SOLUBILITE.

La solubilité d'un gaz dépend

a) de la nature du liquide pour le gaz considéré (caractérisé par son coefficient de solubilité = CS)

L'azote a une solubilité cinq fois plus importante dans l'huile ou la graisse que dans l'eau.

FACTEURS INFLUENTS

.

1 La nature du gaz	**azote**
2 Liquides ou tissus.	**Tissus différents.**
3 Pression.	**Profondeur**
4 Température.	**Considérée constante**
5 Durée.	**Durée de la plongée.**
6.Agitation.	**Effort important⇨ accident**
7. Surface de contact.	**Sensiblement constante**

b)De la température.

Plus elle est basse et plus grande sera la solubilité du gaz dans le liquide.

DEUX CHOSES : C'est pour cela que des bulles s'échappent dés que l'on met de l'eau à bouillir.

C'est pour cela aussi que les eaux froides sont plus poissonneuses que les eaux tempérées car la concentration d'O2 est plus élevée.

c) de la P° partielle exercée par le gaz à l'interface gaz liquide. La dissolution est proportionnelle à son augmentation.

IV) NOTION DE TENSION

.

Lorsqu'un liquide est en contact avec un gaz, il s'effectue des échanges permanents entre les deux .Systématiquement il existe une partie du gaz qui est a présent dans le liquide sous forme dissoute .Pour mesurer la quantité de gaz dissout on parle de Tension .La Tension est aussi exprimé en BAR.

L'OPTIQUE

La lumière solaire est en partie réfléchie par l'eau de même que sur une surface brillante, alors qu'une autre partie pénètre dans l'élément liquide.

Par contre en y pénétrant elle est soumise à une déviation de par la nature de ces milieux différents compte tenu de la vitesse de sa propagation c'est la réfraction

La réfraction est le phénomène par lequel une onde change de direction en passant d'un milieu à un autre.

En passant d'un milieu A à un milieu B, le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface de séparation sont dans un même plan

L'indice de réfraction du milieu B par rapport au milieu A est constant

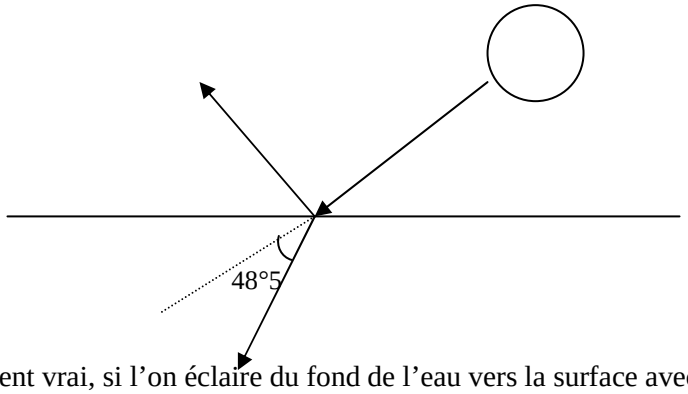
La vitesse de propagation de la lumière est :

- Dans l'air de :300.000 Km / s
- Dans l'eau de : 225.0000 Km / s

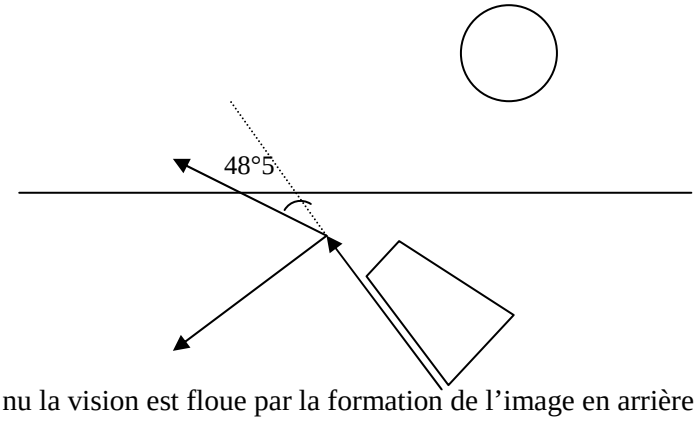
Soit environ les ¾ de sa vitesse dans l'air

Qui n'a pas un jour plongé un bâton dans l'eau est n'a pas constaté comme une cassure au niveau du changement de milieu, cassure pouvant changer suivant l'angle donné

La réfraction s'explique par un rayon lumineux qui pénètre dans l'eau avec un angle < à 48° 5 au- dessus, il est réfléchi



L'inverse est également vrai, si l'on éclaire du fond de l'eau vers la surface avec un angle > à 48° 5, le rayon est réfléchi



Dans l'eau à l'œil nu la vision est floue par la formation de l'image en arrière de la rétine.

Facteurs d'altération de l'information visuelle :

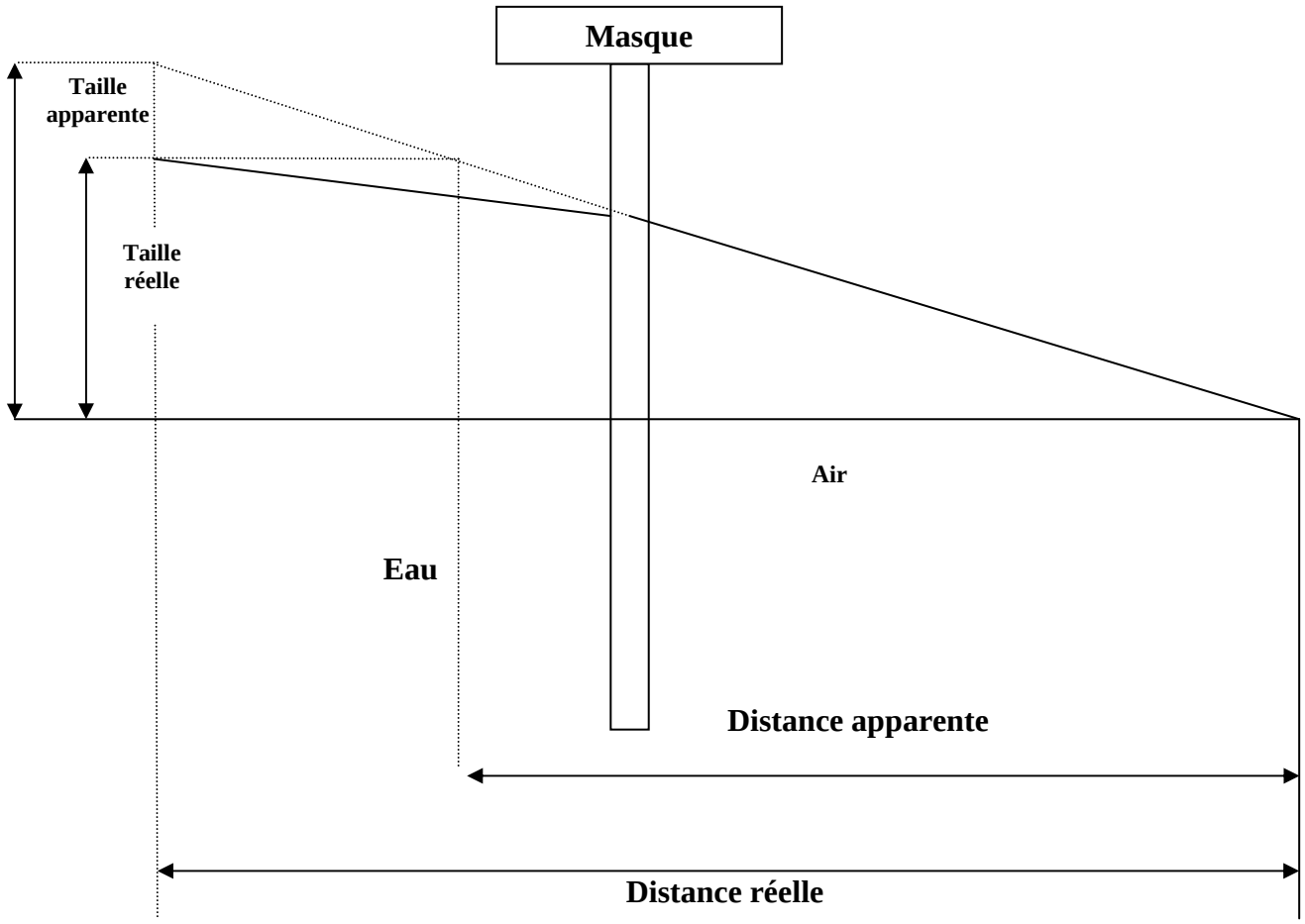
- Propriétés physiques
- Qualité de l'air
- Réduction de la vision dans l'eau

Si l'on met la tête dans l'eau sans le masque la vision est trouble, en effet :

- Il faut de l'air entre l'œil et l'eau
- Il y a une différence d'indice de réfraction entre l'eau et l'air
- Le masque est donc tout indiqué

Utilité du masque :

- Il restitue l'interface Air avec la cornée, mais
  - Le champs visuel est modifié
  - La distance est faussée
  - La vision sera nette, mais le champ de vision sera diminué alors que les objets semblent plus près ¾ et plus gros 1/3



La quantité de lumière diminue avec la profondeur.

Elle est de ¼ à 5m
1/8 à 15 m
1/30 à 40 m

La lumière est composée de 7 couleurs

- violet
- indigo
- bleu
- vert
- jaune
- orange
- rouge

Le rouge disparaît à 10 m , à 30 m ne reste que le bleu et le vert
À 40 m le rouge orangé paraît gris foncé.

L’ACOUSTIQUE

Au contraire de la lumière, le son se propage plus vite dans l’eau que dans l’air.

330 m / s dans l’air
1500 m / s dans l’eau

On entendra donc le moteur d’un bateau qui s’approche, d’assez loin ainsi que les coups frappés sur la bouteille par un plongeur ou par le directeur de plongée sur l’échelle qui rapellent les palanquées..

Un son grave sera entendu de plus loin qu’un son aigü

Par contre les paroles seront inaudibles, les cordes vocales faisant vibrer l’air qui ne peut transmettre à l’eau ses vibrations.

La direction est par ailleurs difficile à déterminer.
La perception est faite:

- Dans l’air : par les oreilles
- Dans l’eau: par les oreilles et par les vibrations de la boite crânienne

LES ELEMENTS DE CALCULS DE TABLES

Rappels :

Loi de Henry : La quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression exercée sur ce liquide.
Sous saturation : Le liquide peut encore absorber une certaine quantité de gaz.
Saturation : Etat d'équilibre où le liquide et l'environnement ambiant sont à la même pression.
Sursaturation : Le liquide évacue le gaz en excédent .
Pression : On parlera de **pression partielle** d'azote (PpN2) dans un mélange gazeux (l'air)
On parlera de **tension** d'azote dans un liquide (c'est la quantité d'azote dissous)

***Loi de Dalton* : La pression partielle d'un gaz dans un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul tout le volume du mélange.**

Pression partielle d'azote : c'est la pression d'azote respirée à la profondeur considérée. On note PpN2 = Pabs * X /100 X étant la proportion d'azote du mélange. Pour l'air X=80.

Loi de Mariotte : Le volume occupé par un gaz est inversement proportionnel à la pression.
Lorsque la pression diminue il y a « dégazage » sous forme de micro bulles diffusant dans l'environnement ambiant et évacuées sous forme gazeuse. Si la pression augmente trop rapidement, il y a dilatation des bulles, qui ne peuvent plus être évacuées naturellement.

OBJECTIF DES TABLES :

Proposer aux plongeurs un moyen de remonter à la surface au terme d'une plongée, de telle manière que la saturation de gaz dans le corps soit toujours en dessous du seuil de la capacité naturelle que nous avons à éliminer ce gaz.
Ce seuil désigne la saturation minimum nécessaire pour provoquer la dilatation suffisante des micros bulles circulant dans le corps pour ne plus pouvoir être éliminées. Au delà, il y a modification chimique ou biologique du milieu, c'est l'**accident de décompression**.

Concept de décompression :

Paul BERT est le premier à avoir rattaché la maladie de décompression à la formation de bulles. Il exprime le premier que l'accident se produit à la remontée.
Principe : Lors de la plongée, l'organisme est soumis à la pression ambiante dépendante de la profondeur. Les tissus se saturent en azote. Lors de la remontée, il y a formation de petites bulles dans les vaisseaux sanguins avec élimination par les poumons qui ont une capacité de filtration. Si la pression augmente trop vite, selon la loi de Mariotte, il y a dilatation de la bulle qui ne peut plus traverser les parois des alvéoles pulmonaires.

Il faut donc :
- une élimination progressive de l'azote de manière « naturelle »
- une condition optimale d'élimination :
  Ne pas redescendre : les bulles seraient recomprimées, et réinjectées dans l'appareil circulatoire.
  Ne pas faire la manœuvre de vasalva : ce geste a pour effet de comprimer l'air contenu dans l'appareil respiratoire, les bulles ne pouvant plus être évacuées sont réinjectées dans la grande circulation puis diffusée dans tout l'organisme.

Concept de Haldane :

En 1906 la Royale Navy britannique recourt aux services du physiologique John Haldane pour établir une ligne de conduite à observer par les plongeurs afin de remonter vers la surface. Haldane fonde son étude sur l'expérimentation. Le modèle mathématique est énoncé ensuite. Les expériences sont faites sur des chèvres qui correspondent en corpulence et en taille à un corps humain. Les animaux sont exposés à différentes pressions puis décompressés rapidement. L'observation des animaux amène Haldane à énoncer que lorsque le rapport des pressions est inférieur à 2, la décompression ne provoque pas de troubles.

Néanmoins, il met en évidence que les troubles sont différents selon la pression et la durée d'exposition . Il en déduit que le corps n'est pas homogène et ses différents constituants réagissent spécifiquement .
Haldane énonce les hypothèses suivantes :

- Il y a équilibre instantané au niveau alvéolaire .
- Il y a vascularisation parfaite des tissus et équilibre des échanges sang / tissus.
- Chaque compartiment absorbe et élimine le gaz inerte selon la même loi.

Ces hypothèses sont erronées mais sont le principe de base aux calculs mathématiques.

Il produit donc un modèle considérant le corps comme étant constitué de 5 compartiments appelés « **Tissus** ». Chaque tissu, est caractérisé par la vitesse à laquelle il se sature en gaz : c'est la « **Période** ».
Quelques définitions :

- **Tissu :** On respire de l'air à la pression ambiante, ce qui a pour effet de diffuser les gaz dans les différents composants de l'organisme (sang, muscles, os, cartilages, moelle...etc.). Ces différents éléments sont appelés « Tissus ».

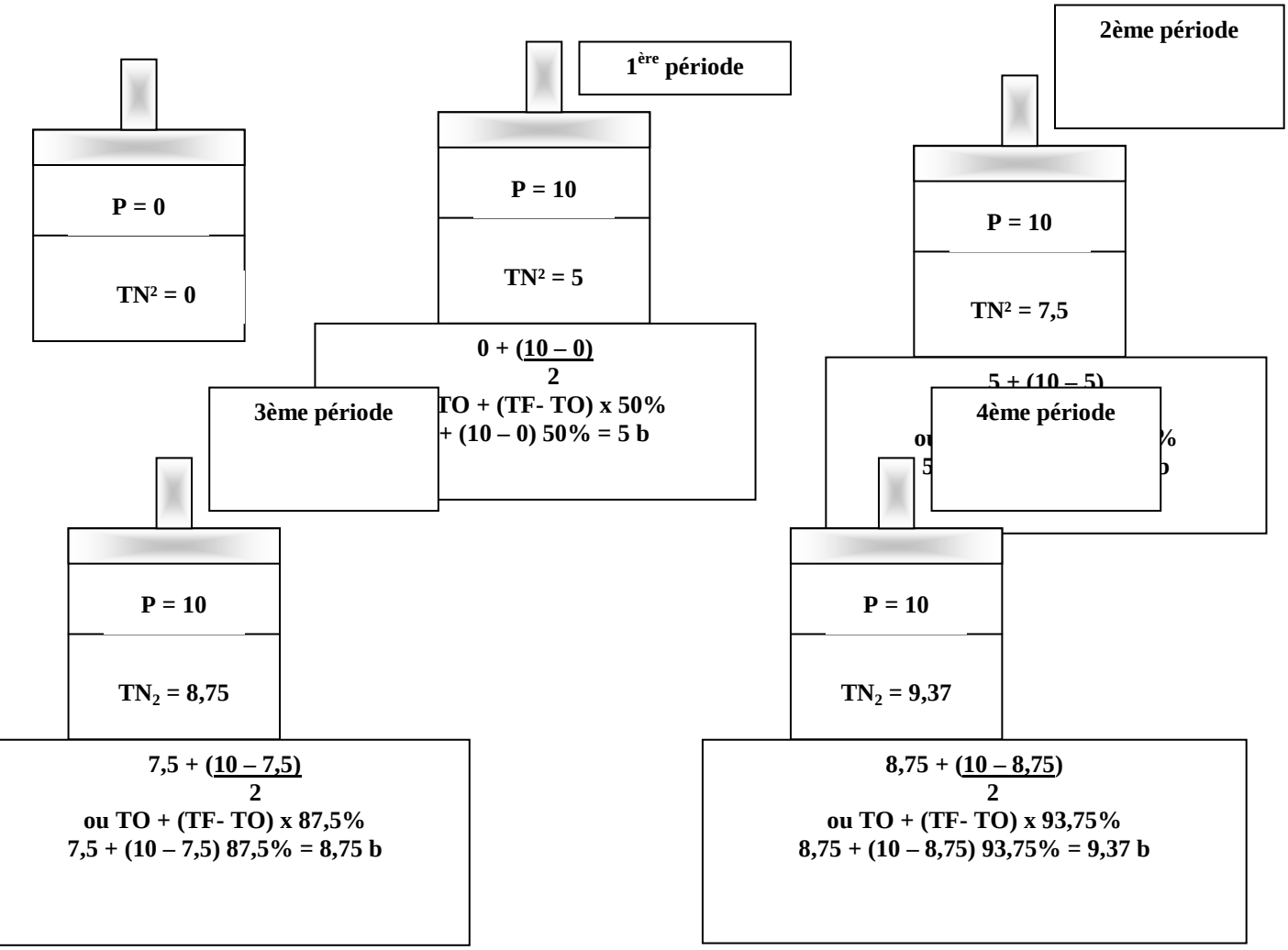
- **Gradient :** C'est l'écart qui existe entre un état initial est un état final. Par analogie c'est la distance qui existe entre MARSEILLE et LA CIOTAT (40km).
  Pour un tissu c'est la différence entre une tension de départ est une tension d'arrivée.

- **Période :** C'est le temps que nous devons mettre pour parcourir la moitié du gradient. Si nous reprenons la distance entre MARSEILLE et LA CIOTAT ce sera le temps nécessaire pour parcourir la moitié de la distance totale donc 20 km
  Par analogie aux lois chimiques, c'est la durée nécessaire à un élément pour réaliser la moitié d'un phénomène physique le caractérisant.
  La période d'un tissu est le temps nécessaire à atteindre une tension de gaz égale à la moitié du **gradient** auquel il est soumis.

Ex 1 : immersion : état initial = 0,8 bar de N2
A 40 mètres : état final = 4 bars de N2
Gradient = 4 – 0,8 = 3,6 bar
Pour un tissu de période 40mn, tension au bout d'une période = 1,8 bar

Ex 2 : plongée à 30 mètres : état initial = 3,2 bars de N2
Remontée à la surface : état final = 0,8 bar de N2
Gradient = 3,2 – 0,8 = 2,4 bar
Pour un tissu de période 60 mn, tension au bout d'une période = 1,2 bar

Démonstration



A chaque période le liquide charge la moitié du gradient, c'est à dire la moitié de la différence entre la pression du gaz et la tension atteinte à la période précédente.
On considère que l'équilibre est atteint au bout de 6 périodes.
D'où nous pouvons écrire que :

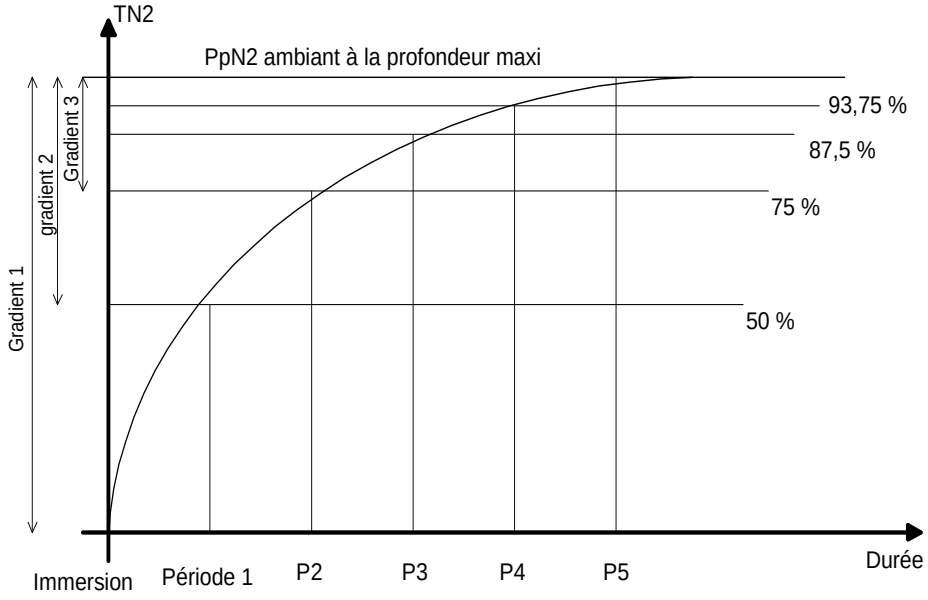
$$TN_2 = T_0 + (T_f - T_0)/2$$

ou

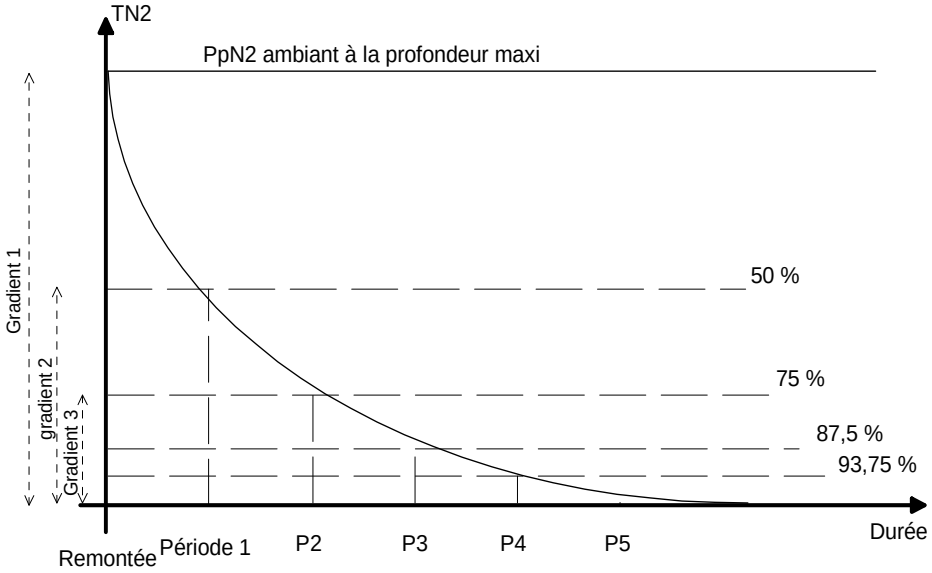
$$\boxed{TN_2 = T_0 + (T_f - T_0) \times \%}$$

Avec : TN2 : Tension finale d'azote d'un tissu à la pression ambiante pendant la durée t
T_0 : Tension d'arrivée d'un tissu à la pression ambiante
PpN2 : Pression partielle de N2 à la pression ambiante
% : Pourcentage de dissolution lié à la période du tissu.

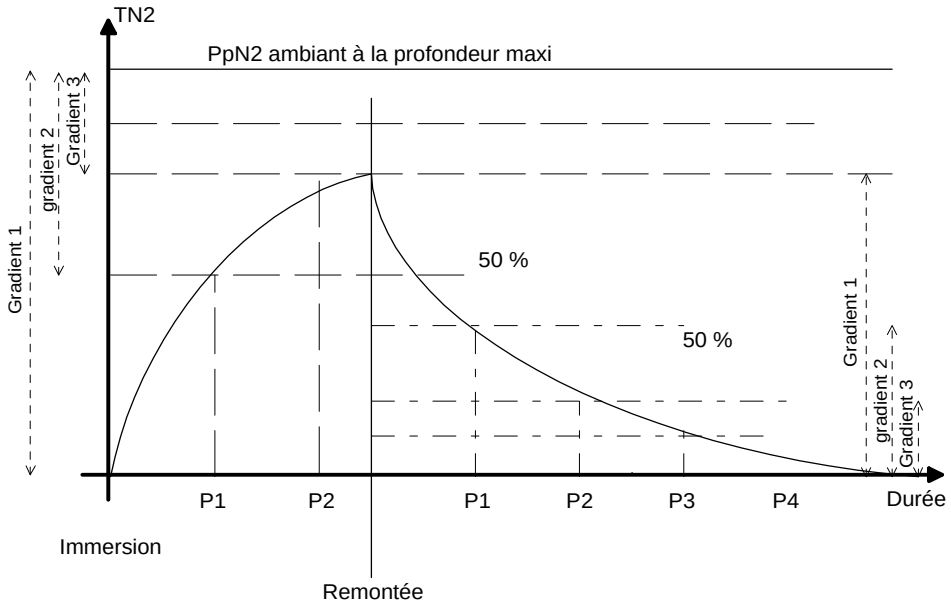
La descente : Phase de saturation



La remontée : Phase de désaturation.



La plongée : Phase de saturation puis de désaturation.



Eléments pratiques :

1 période → 50 %
2 périodes → 75 %
3 périodes → 87,5 %
4 périodes → 93,75 %
5 périodes → 96.875%
6 périodes → 100%

Exemple 1: Soit un tissu de période 40 minutes, une plongée à 20 m d'une durée de 120 minutes.

Tension initiale T0 = Pabs surface * 0,8 = 0,8 bar
Pression partielle d'azote à 40 m = PpN2 = Pabs à 20m * 0,8 = 2,4 bars
Nombre de période pour cette plongée = 120 / période = 120 / 40 = 3
Dissolution = 87,5 %

D'où : TN2 = 0,8 + (2,4 – 0,8)* 0,875 = 2,2 bars

Exemple 2 : Remontée à 10m en 20 minutes.

Tension initiale T0 = 2,2 bars
Pression partielle à 10 m = PpN2 = Pabs à 10m * 0,8 = 1,6 bars
Nombre de période pour la remontée = 20 / période = 20/40 =1/2
Dissolution = 29 %

D'où : TN2 = 2,2 + (1,6 – 2,2) * 0,29 = 2 bars

La sursaturation et son coefficient :

On a vu que les tissus saturent à une pression donnée. On définit le **coefficient de sursaturation** par le rapport :

Cs = TN2 dans un tissu / Pabs ambiante

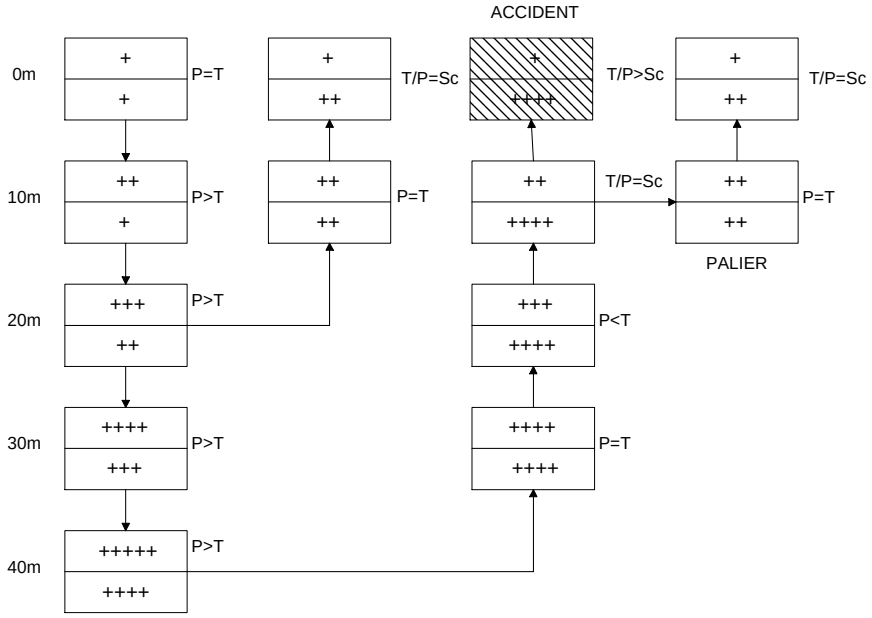
Lors de la remontée, ce coefficient augmente (Pasb diminue). Afin d'éviter la création de bulles, il convient de ne pas dépasser une valeur limite propre à chaque compartiment.

C'est le **coefficient de sursaturation critique** Csc. Il est établit de manière empirique pour chaque tissu considéré. Pour les tables MN90 il correspond à :

5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
2.72	2.54	2.38	2.2	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54

On peut modifier ces valeurs en les diminuant pour sécuriser nos plongées . C'est ce que font certains ordinateurs.

Voici ci-dessous un exemple de plongées à 20 mètres sans accident, à 40 mètres sans palier avec accident et à 40 mètres avec palier sans accident. Chaque case correspond à un compartiment, le « + » supérieur représente de pression absolue, le « + » inférieur représente la tension dans le compartiment.



Calcul de la profondeur du palier :

C'est la pression minimale que peut supporter le tissu avant dégazage incontrôlé. La valeur de cette pression détermine la profondeur du palier.

Le calcul du palier consiste donc à calculer la pression absolue à ne pas dépasser pour que, quel que soit le tissu considéré le coefficient de sursaturation **(Cs)** soit toujours inférieur au coefficient de sursaturation critique **(Csc).**
Le tissu ayant le coefficient de sursaturation le plus élevé est appelé **tissu directeur**.

Nous avons vu que Sc=TN2 / Pabs, on connaît TN2, on connaît Sc (ici c'est la limite à ne pas dépasser donc Csc), il ne reste plus qu'à évaluer Pabs.

Exemple : Profondeur 30m, Durée 60mn

Profondeur de palier pour les tissus suivants ?

Tissu 60mn ? → 1 période → TN2=0,8+(3,2-0,8)*0,5=2 bars → Pabs=2/1,58=1,26→
Profondeur du palier = 2,6 m →3m

Tissu **30**mn ?→ 2 périodes→ TN2=0,8+(3,2-0,8)*0,75=2,6 bars → Pabs=2,6/1,82= 1,42→
Profondeur du palier = **4,2** m →6m

Tissu 15mn ?→ 4 périodes→ TN2=0,8+(3,2-0,8)*0,9375=3,05 bars→ Pabs=3,05/2,2= 1,38→
Profondeur du palier = 3,8 m →6m

Le tissu directeur est le tissu qui impose le palier le plus profond. Ici c'est le tissu 30mn

Calcul de la durée du palier :

La durée du palier est le temps nécessaire au tissu directeur pour atteindre une tension de sursaturation d'azote au palier suivant strictement inférieure à son coefficient de sursaturation critique .

Le tissu directeur détermine la profondeur du premier palier. Il faut attendre la fin du « dégazage » de ce tissu pour pouvoir continuer. Cette limite est donnée par l'état du tissu 3 mètres plus haut. Si son Csc est supérieur à sa PpN2 il faut continuer le palier, sinon , on peut remonter jusqu'à ce qu'un autre tissu dicte un arrêt et ce, jusqu'à la surface.

Son calcul est compliqué : il faut calculer la tension d'azote de chaque tissu au palier suivant et vérifier que le coefficient de sursaturation critique n'est jamais dépassé.

On peut appliquer : $TN2 = T_0 + (PpN_2 - T_0) * \%$

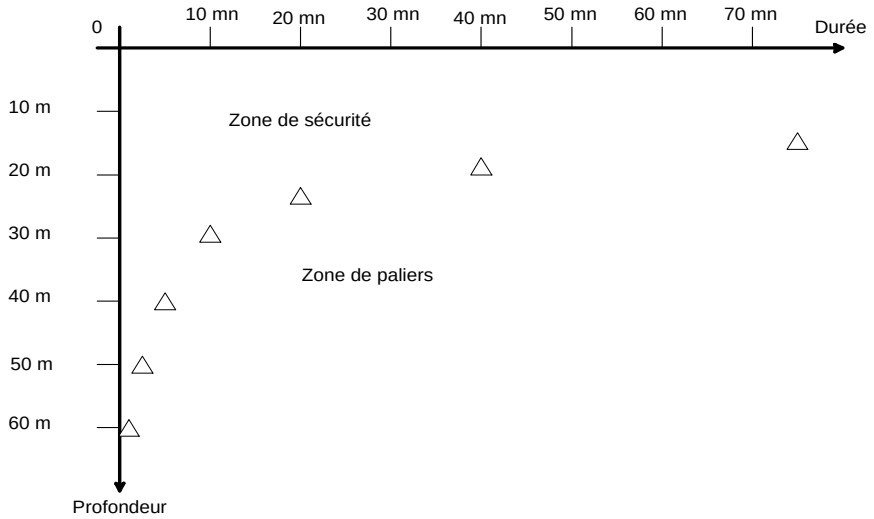
Et chercher le pourcentage limite $\% = TN2 - T_0 / Tf - T_0$ pour pouvoir remonter

TN2 est la tension du tissu à la fin du palier pour qu'il puisse être remonté au palier suivant sans dépasser Sc.
Tf est la tension finale du tissu en fin de palier
To est la tension à l'arrivée au palier.

On peut donc à l'aide du tableau ci-avant calculer le % et en déduire la durée du palier en fonction de la période.

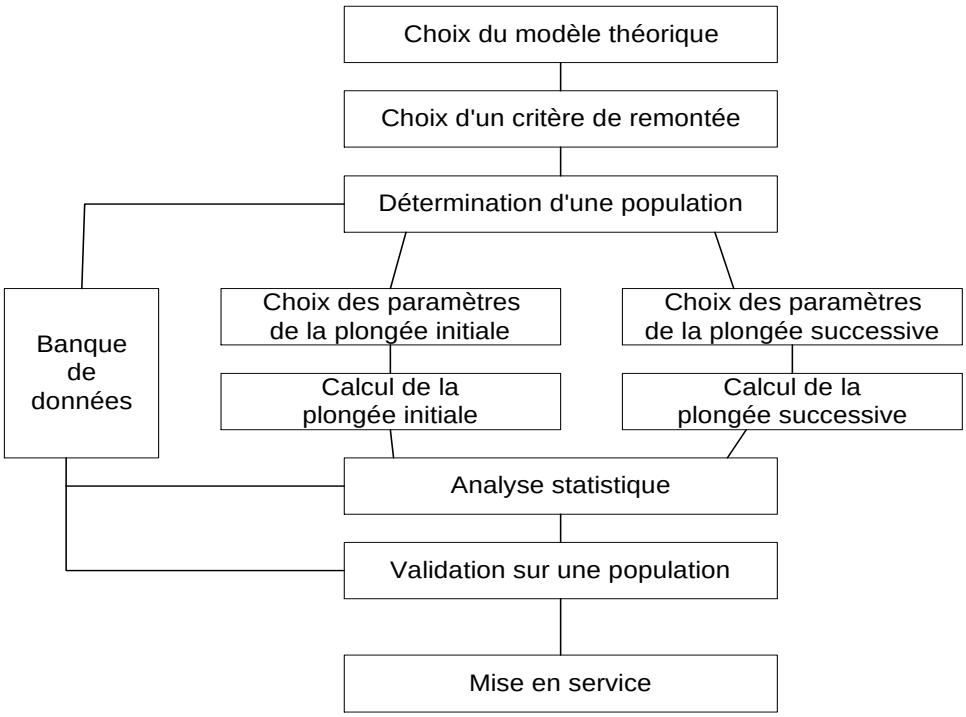
Courbe de sécurité :

C'est la courbe pour laquelle à une profondeur donnée et une durée donnée, les tissus sont toujours en dessous du coefficient de sursaturation critique, et par conséquence n'imposent jamais de palier.



Méthode d'élaboration :

Le modèle mathématique n'est pas suffisant pour obtenir une représentation fidèle d'un plongeur réel. Les tables de plongée ont été conçues puis affinées à travers des statistiques reposant sur l'expérience pratique réelle de plongées. Ainsi les coefficients de sursaturation critiques ont évolués pendant quelques décennies, et les calculs d'arrondis ont abouti aux tables actuelles.



Ordinateurs :

Les ordinateurs utilisent exactement les mêmes concepts que les tables. Néanmoins leurs capacités à calculer de manière rapide et complexe permet d'avoir une meilleure précision .

La mesure de la profondeur se fait par des capteurs, la durée est calculée à partir d'horloges à quartz, et le calcul se fait en continu.

Contrairement aux tables qui utilisent la profondeur maxi de la plongée, les ordinateurs intègrent le profil de plongée en temps réel. Par conséquent, chaque variation de profondeur au cours de la plongée est mesurée, et le calcul de la tension d'azote dans chaque tissu est fait à tous moments. Cela explique que les durées de paliers résultant des ordinateurs sont toujours inférieures à celles des tables. En effet lorsque l'on plonge à 40m pendant 5 minutes , que l'on remonte à 30 m pendant 12 minutes, que l'on redescend à 38m pendant 6 minutes et qu'enfin on remonte à la surface, les tables considèrent que la durée de la plongée est de 23 minutes à 40m , alors que l'ordinateur calculera un taux de décompression intermédiaire résultant du passage à 30m. C'est bien ! ça peut être dangereux !

Afin d'optimiser les calculs, les ordinateurs utilisent un nombre de tissus différent des tables (7, 8, 9 tissus), par conséquent les durées de paliers sont différentes de ceux des tables. Certains peuvent adapter les coefficients de sursaturation critique ce qui permet de « durcir » les plongées.

Il faut toujours garder à l'esprit que le profil de la plongée est le critère déterminant pour la décompression. Ainsi les profils dits « yoyo » sont les plus sujets à accidents. Les ordinateurs sont alors « incapables » d'intégrer de manière fiable les remontées consécutives.

Le plongeur niveau 4 est maître de ses décisions quant aux moyens de décompression qu'il utilisera, dès lors qu'il a acquis les connaissances suffisantes sur le matériel qu'il emploie.

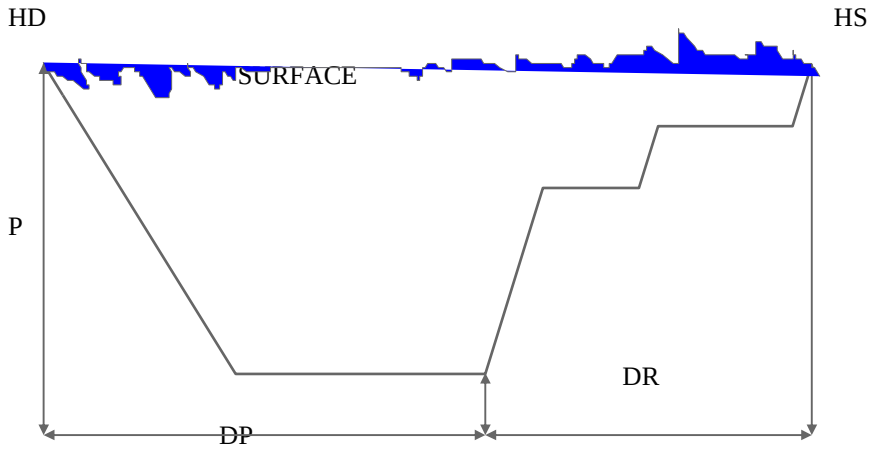
UTILISATION DES TABLES MN 90

I)- Plongée simple : C'est une plongée qui se déroule au Moins 12h après la précédente.

Quelques définitions :

- DP : durée de plongée : c'est le temps qui s'est écoulé depuis l'immersion jusqu'au moment l'on décide de remonter à vitesse préconisée par son moyen de décompression.
- P : c'est la profondeur maximale atteinte au cours de la plongée
- DR : durée de remontée c'est le temps nécessaire mis pour remontée de la profondeur à laquelle on se trouve vers le premier palier au moment où on décide de remonter, la durée des paliers sera prise en compte dans ce temps.
- HD : heure départ :l'heure à laquelle on s'immerge
- HS : heure sortie : l'heure à laquelle on s'émerge
- VR : Vitesse de remontée est 15 m/mn et de 30 secondes entre chaque palier (1 m/10s).pour l'utilisation des tables MN 90.
- GPS : groupe de plongées successives

Pour déterminer les paliers, il faut prendre la plus grande des profondeurs à laquelle nous sommes allés,
si la profondeur n'existe pas dans les tables, prendre la profondeur immédiatement supérieure.



Exercice : Faire le schéma

1)- Immersion à 9 h00. Descente à 32 mètres
Amorce de la remontée à 9 h 40
Paliers ? Heure de sortie ? X_1 ?.

2)- Immersion à 8 h 30. Descente à 43 m, amorce de la remontée à 8 h 50
Paliers ? Heure de sortie ? X_1

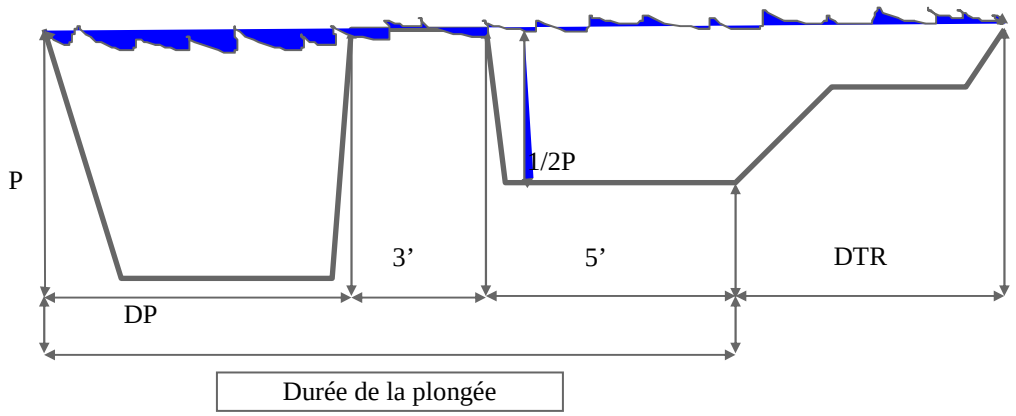
3)- Immersion à 9 h 15. Descente à 30 m.
A 9 h 25, descente à 41 m
A 9 h 30, remontée à 20 m (on remonte de 20 m pas de 40 m).
A 9 h 36, amorce de la remontée en surface
Paliers ? Heure de sortie ? X_1 ?

1) Remontée rapide?

Si l'on fait une remontée rapide ,on dispose de 3 mn pour redescendre à la mi profondeur, une fois cette mi profondeur on effectue un palier de 5 mn.

.

- Le temps nécessaire à prendre en compte pour la durée de la plongée est : le temps passé avant la remontée rapide + les trois minutes nécessaires pour se re immerger à mi profondeur + les 5 minutes passées à cette profondeur.
- La profondeur maximale atteinte

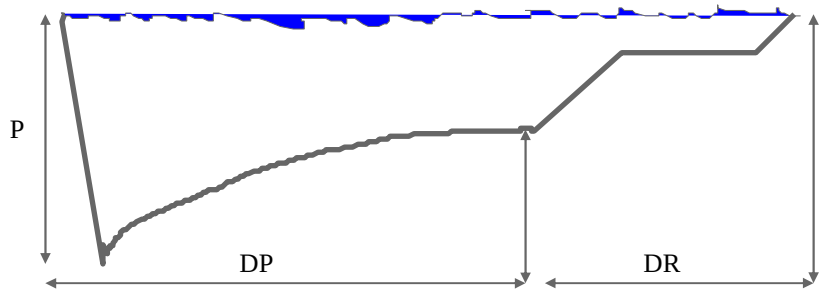


Exercice :
Immersion à10 h 00 à 40 mètres. A 10 h 17, panne d'air. Remontée et arrivée en surface à 10 h 18. Arrivée au premier palier à 10 h 21. Paliers ? Heure de sortie ? X_1 ?

2) Remontée lente?

C'est une remontée qui est inférieure à la vitesse préconisée par votre moyen de décompression soit inférieur à 15 m/mn pour les tables MN 90

Dans ce cas nous prendrons la durée totale de la plongée avant l'amorce de la remontée à vitesse préconisée.



Exercice :
Immersion à 9 h 00. Descente à 37 mètres. Amorce de la remontée le long d'un tombant.
Arrivée à 15 mètres à 9 h 26 et remontée vers la surface
Paliers ? Heure de sortie ? X_1 ?

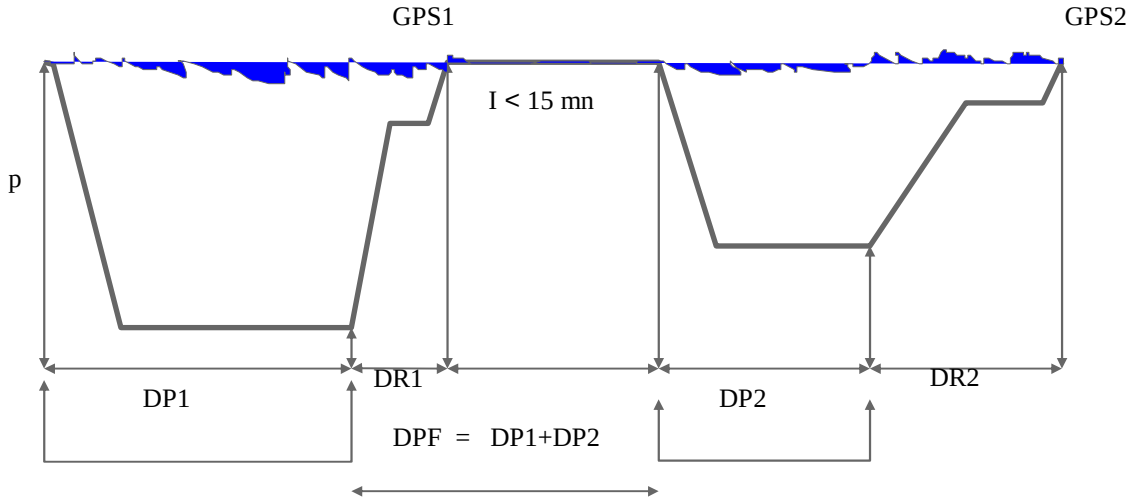
3) La panne d'air au palier :
Un plongeur effectue un palier à 6 mètres, celui-ci se terminant il monte au palier de 3 mètres pendant qu'il accède à son dernier palier il tombe en panne d'air.
Il dispose alors de 3 minutes pour récupérer un bloc en surface et se réimmerger et effectuer le palier interrompu.

II)- PLONGEES CONSECUTIVES

On parle de plongée consécutive quand l'intervalle entre la première et la deuxième plongée est inférieure à 15 minutes.
Paramètres à prendre en compte :

- **Temps :** somme : de la durée de la première plongée palier non compris et la deuxième plongée palier non compris.
- **La profondeur :** c'est la profondeur maximale atteinte au cours des deux plongées.

- Pour la durée de remontée ne pas oublier que nous remontons de la profondeur de la deuxième plongée.



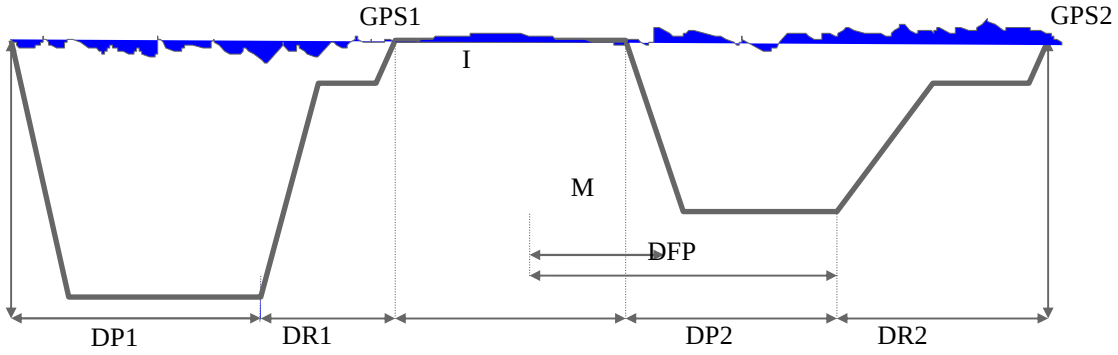
Exercice d'application :

Immersion à 9 h 00. Descente à 43 mètres. Amorce de la remontée à 9 h 14
Nouvelle immersion à 9 h 35. Descente à 15 mètres. Amorce de la remontée à 9 h 52
Paliers ? Heure de sortie ? X1?

III)- plongée successive

On parle de plongée successive quand l'intervalle entre la première et deuxième plongée est supérieur à 15 minutes mais inférieur à 12 heures.
Nous avons vu qu'après chaque plongée nous notons le GPS qui correspond au taux d'azote résiduel au moment de la sortie pour le tissu directeur.
Le tableau 1 des tables MN 90 donne le taux d'azote résiduel en fonction de l'intervalle de surface.
Si l'intervalle ne figure pas prendre l'intervalle immédiatement inférieur.
Le tableau 2 nous donne la, majoration en fonction de la profondeur de la deuxième plongée, mais aussi en fonction de l'azote résiduel.
Si le taux d'azote résiduel ne figure pas prendre le taux immédiatement supérieur.
Si la profondeur ne figure pas prendre celle immédiatement supérieure.
*** Majoration :**

Temps fictif à ajouter au temps réel de la seconde plongée pour calculer ses paliers, mais ne pas à prendre en compte lorsque l'on calcule l'heure de sortie.
C'est le temps que nous aurions du passer à la nouvelle profondeur pour atteindre le taux d'azote résiduel que nous avons au départ de la deuxième plongée



Exercice d'application :
Immersion à 9 h 00. Décente à 46 mètres.
Amorce de la remontée 0 9H 16
Nouvelle immersion à midi. Descente à 37 mètres. Amorce de la remontée à 12 h 28.
Pour chacune des plongées : Paliers ? Heure de sortie ? X_1?

LA PLONGEE EN ALTITUDE

I- Introduction:

Les plongées ne se déroulent pas toutes au niveau de la mer, mais aussi en altitude, ou la pression atmosphérique y est inférieure (cf. cours de physique).
Comme les tables de plongées MN 90 ont été élaborées pour des plongées au niveau de la mer, nous sommes contraints de calculer une profondeur équivalente pour pouvoir utiliser les tables MN 90.

II- Explications:

a)- Rappel: nous savons que

- TN_2 = Pabs..X%

- SC = TN_2/P° ATM

b)- Mise en évidence:

Prenons deux plongées se déroulant de la même manière, l'une en mer à (1bar) et l'autre en lac à (0,5 bar).
Considérons que les deux plongées se prolongent jusqu'à saturation de tous les compartiments soit $PPN_2 = TN_2$

P atm mer = 1 bar	**P atm lac =0,5 bar**
P relt = 0,8 bar	P relt = 0,8 bar
P abs = 1,8 bar	**P abs = 1,3 bar**
$PPN_2 = TN_2$ = 1,8 x 80% = 1,44 bar	$PPN_2 = TN_2$ = 1,3 x 80% = 1,04 bar

Calculons Cs. si, l'on décide de remonter directement en surface dans les deux cas:
En mer
Cs. = TN_2 / P abs = 1,44 / 1 = 1,44. Dans ce cas nous pouvons remonter sans aucun souci, car Cs est inférieur au Csc de tous les compartiments.
En lac Cs = TN_2 / P abs = 1,04 / 0,5 = 2,08. Or dans ce cas nous remarquons que 8 compartiments seraient en sur saturation critiques.

Tissu	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
Sc	2,72	2,54	2,38	2,20	2,04	1,82	1,68	1,61	1,58	1,56	1,55	1,54

c)- Conclusion:

On ne peut donc pas effectuer les mêmes plongées en mer et en lac en utilisant les tables MN 90

III- Utilisation des tables (mer) en altitude:

a)- Exemple:

En lac p° atm 0.5b plongée à 20m	En mer p° atm 1b
0.5b	1b
↓ X 5	↓
2.5b	5b soit 40m

Donc pour pouvoir utiliser la table il faut trouver une profondeur ayant le même rapport ici 40 m.

Par le calcul :
Nous savons que : SC = TN_2/P° atm et TN2 = P abs . X %

Donc pour la plongée en lac : TN_2 = 2.5 x 0.8 = 2 et SC = 2/0.5 = 4 b

Pour avoir le même rapport au niveau de la mer il faut :

$TN_{2\ du\ lac} = TN_{2\ mer}$ donc $TN_{2\ mer} = 4$
Or nous savons que: TN_2 = P° abs x % N_2
Soit 4 = P° abs x 0.8 ⇒P°abs = 4/0.8 = 5b soit 40 m en mer

Donc on peut écrire que : $(TN_2/P°\ atm)_{mer} = (TN_2/P°\ atm)_{lac}$

⇒ P abs mer . X % / Patm .mer = Pabs lac . X % / Patm lac

P abs mer/Patm mer = Pabs lac/Patm lac

⇒ *P abs mer* = P abs lac x P atm mer / P atm lac

Prof. fictive | **Prof. réel**

P° abs FICTIVE = P° REELLE LAC x P°MER / P° atm LAC

La profondeur fictive nous permet de rentrer dans la table MN 90
La profondeur des tables est toujours supérieure à la profondeur réelle.

IV)- Les profondimetres:

Nous utilisons plusieurs sortes de profondimètres et nous les classons en deux familles:

profondimètre mécaniques	**Profondimètre électronique**
Capsule	Ordinateurs
Profondimétres digitaux	
Membrane	
Tube de bourbon	
Capillaire	

a)- Profondimètres mécaniques:(capsule, membrane, tube de bourdon)
Lors de la fabrication, la pression de l'air enfermé dans le volume du profondimètre est de Patm = 1 bar, l'aiguille est alors devant le zéro de la graduation.
En altitude, Patm en surface du lac étant inférieure à 1 bar , l'aiguille a tendance à reculer par rapport au zéro de la graduation. Il faudra atteindre une certaine profondeur, dépendante de la Patm du lac , pour que la pression absolue à cette profondeur soit de 1 bar, à partir de ce moment, l'aiguille se déplacera devant la graduation.
Ce décalage s'appelle le **retard**

1)- Démonstration:

Prenons un bathymètre à membrane ou à tube de bourdon:
Il réagit à la pression absolue et indique la profondeur correspondante en mer
Quand qu'il indique 10 m, c'est qu'il reçoit une Pabs = 2 bars
S'il indique 10 m en altitude, la profondeur n'est pas 10m

2)- Exemple:

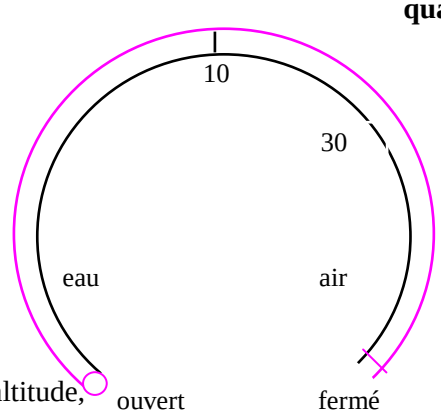
Patm = 0,8 bar
s'il indique 10 m, Pabs = 2 bars
2 = 0,8 + Prelat.
Prelat = 2 - 0,8 = 1,2 bar
Profondeur = 1,2 x 10 = 12 m
il a un **retard** de deux mètres

Retard = 10 x (1 - patm en bar) Donc la **profondeur réelle = Prof lue + retard**

RETARD = (P ATM MER - PATM LAC) X 10

b)- Bathy mètre à capillaire:

C'est une application de la loi de mariotte



quand il indique	**en mer Pabs=**
10m	**2 bars La pression a doublée**
20m	**3 bars a triplée**
30m	**4 bars a quadruplée**

En altitude, que la pression a doublé. Mais, la profondeur n'est pas 10 m.

Exemple: Avec Patm = 0,8 bar
s'il indique 10 m, c'est que
Pabs = 2 x 0,8 = 1,6 bar
Prelat = 1,6 - 0,8 = 0,8 =8 mètres

Profondeur réelle = Profondeur bathy à capilaire x Patm en bar

c)- profondimètre électronique:

La mesure s'effectue cycliquement par un capteur à semi-conducteurs et pont électronique. La mesure est directement l'expression de la hauteur de la colonne d'eau. En altitude, on pourra lire directement la **profondeur réelle.**

D)- Vitesse de remontée:

La vitesse de 15m/mn est calculée pour permettre au tissu le plus court (1,5 mn) de se déssaturer sans risque de dégazage incontrôlé. C'est en fait une succession continue de paliers. Il faut lui appliquer la même règle qu'au palier.
V reelle = V table x Patm en bar

V réelle = 15m/mn x Patm. En bar

Dans les problèmes, on prendra la durée de remontée indiquée dans la table depuis la profondeur fictive.

$$\textbf{VIT REM. LAC} = 15\text{M/MN} \times \frac{\textbf{PATM.LAC}}{\textbf{PATM.MER}}$$

E)- Variation de $_{X1}$ avec l'altitude:

Sc = TN2/Pabs et à la surface Sc = TN2/Patm
Valeur critique pour le tissu 120 mn. Sc = 1,54

Appelons : Patm1, la première pression atmosphérique
Patm2, la deuxième pression atmosphérique
X1bis la nouvelle valeur de X1

Si l'altitude ↗ Patm ↘ le rapport TN2/Patm ↗ ce rapport ↗ dans la proportion Patm1/Patm2

Si l'altitude ↘ Patm ↗ et le rapport TN2/P atm ↘ ce rapport ↘ dans le rapport Patm1/Patm2

Il faut tenir compte de la variation de ce rapport :

- de telle sorte qu'il ne dépasse jamais sa valeur critique 1,54
- pour calculer les paliers d'une plongée après changement d'altitude, en utilisant les mêmes tables conçues pour Patm = 1 bar

il faut calculer le nouveau coefficient X1bis

$$X_1^{BIS} = X_1 \times \frac{PATM1}{PATM2}$$

LA PLONGEE AUX MELANGES BINAIRES

(arrêté du 28 Août 2000)

A)- Justification :

La plongée au mélange est pratiquée par de nombreux professionnels (corailleurs, scaphandriers) et quelques sportifs (spéléo), car il intéressant de diminuer la proportion d'azote pour limiter les paliers et les effets de l'azote sur l'organisme.
Les tables ont été calculées pour des mélanges 20/80 or si nous modifions les mélanges en enrichissant en oxygène il va falloir trouver une profondeur correspondante pour utiliser les tables MN 90

B)- INTERETS

AVANTAGES	INCONVENIENTS
+ Augmenter la durée de la plongée sans paliers ou diminuer la durée de paliers pour une même durée de plongée. + Augmenter la sécurité si utilisation des tables à l'air + Diminution de la consommation d'environs 10% + Moins ou pas de majoration pour les plongées suivantes + Diminution du temps du temps post plongée si on doit prendre l'avion + Moins de fatigue post plongée	+ Organisation et planification plus lourdes + Utilisation du nitrox dans des zones de moyennes ou faibles profondeurs + Respect absolu de la profondeur maxi + Fabrication des mélanges + Utilisation de matériel spécifique

C)- Explications

pour ne pas confondre avec l'altitude on l'appellera la **profondeur équivalente**

le rapport $\mathbf{TN_2/Patm} = (\mathbf{TN_2/P°atm})_{\text{mélange}}$

$$\mathbf{TN_2 = P\ abs \times \%N_2}$$
$$\mathbf{P°\ abs_{\ mél} \times \%\ N_{2\ mél} = \mathit{P°\ abs_{\ normale}} \times \%\ N_{2\ normal}}$$
$$\mathbf{\mathit{P°\ abs_{\ normale}} = P°\ abs\ mél \times (\ \%N_{2\ mél} / \%\ N_{2normal})}$$
$$\mathbf{PAE = P°\ abs\ mél \times (\%\ N2/\ 0.80)}$$

D)- Observations

- si le taux d'azote est inférieur à 79% (c'est l'intérêt), la profondeur équivalente est toujours plus faible que la profondeur réelle.
On rentre dans la table avec la profondeur absolue équivalente mais nous remontons de la profondeur réelle.
- pas de modification de la profondeur de paliers ni de la vitesse de remontée
La remontée est programmée pour que **TN2/P Abs = ou < Sc**

E)- Inhalation d'o2

En surface : abaissement du taux d'azote résiduel et donc de la majoration.
En respirant de l'o2 pur, la désaturation est plus rapide qu'en respirant de l'air puisque la tension finale de l'azote est de 0 bar.

Aux paliers :
tf = 0 bar donc baisse beaucoup plus rapide de la tension d'azote
les paliers de 3m et 6 m peuvent être effectués en inhalant de L'O_2 pur
la durée de chacun des paliers à l'oxygène pur est égal aux deux tiers de la durée du palier à l'air arrondie à la minute supérieure et est au minimum de 5 minutes.
Cependant la durée de chacun des paliers à l'o2 pur est égale à la durée du palier à l'air lorsque celui-ci est compris entre 1 et 5 minutes.

PASSAGE DE L'AIR DANS L'ORGANISME

1) PENETRATION DE L'AIR DANS L'ORGANISME

a) Composition de l'air :

l'air que nous respirons est composé en majorité à : 79,03% d'azote, 20,93% d'oxygène, 0.03% gaz carbonique.
L'azote pénètre dans l'organisme mais n'est pas utilisé par lui. La quantité d'azote rentrée doit ressortir.
L'oxygène pénètre dans l'organisme il est utilisé par lui pour fonctionner.
Le gaz carbonique pénètre en faible quantité dans l'organisme. Il n'est pas utilisé par lui pour fonctionner.

b) Comment l'air pénètre dans l'organisme ? L'inspiration

C'est un phénomène actif qui peut être soit normal soit forcée. Il permet de déterminer plusieurs volumes inspiratoires :

- le volume courant : 0.5 l à chaque fois que nous inspirons de façon naturelle
- le volume de réserve inspiratoire : 2.5 l quand nous faisons intervenir notre volonté pour augmenter notre volume inspiratoire

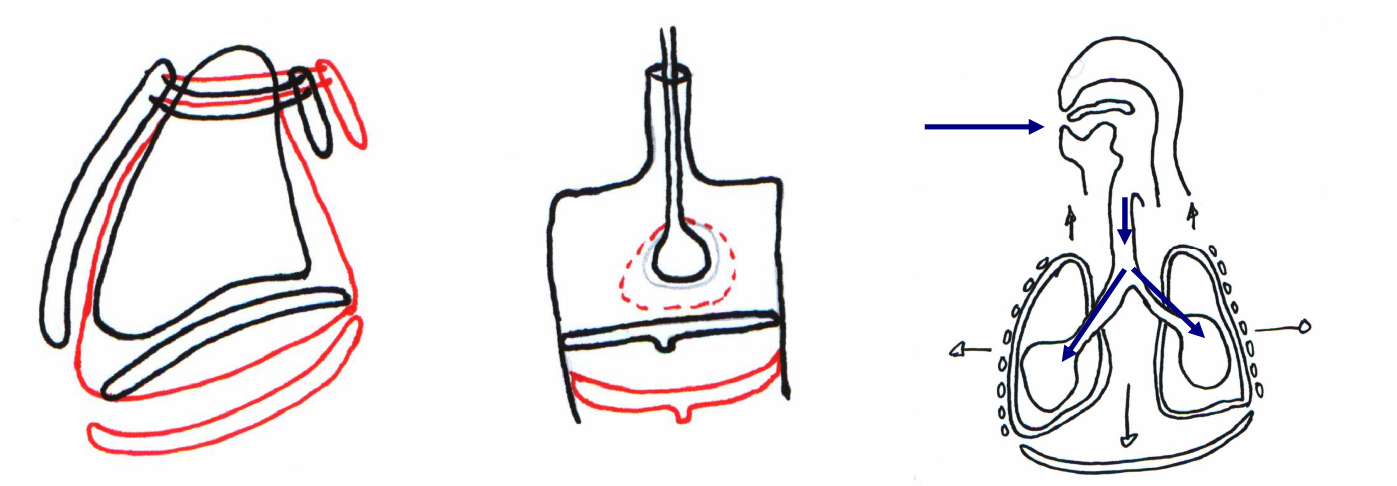
c) Pourquoi avons-nous une modification du volume pulmonaire ?

- **la plèvre :** elle est composée de deux feuillets, un viscéral accolé au poumon l'autre pariétal accolé à la cage thoracique. Entre les deux un espace virtuel.

Cette particularité anatomique permet au poumon de suivre les mouvements de la cage thoracique donc d'augmenter de volume en même temps que la cage thoracique.

- la cage thoracique : elle est limitée en avant par le sternum, en arrière par les vertèbres dorsales, sur les côtés par les côtes, en haut par les clavicules en bas par le diaphragme
- les muscles inspirateurs :
  + le diaphragme qui par son abaissement permet une augmentation du volume vertical (1 ;2 ;3)
  + les releveurs de côtes qui par contraction permettent une augmentation du volume horizontal et antéro-postérieur (3)

schéma :



1) abaissement du diaphragme, élévation du sternum ,mobilisation des côtes provoquant une augmentation du volume pulmonaire	Ballon de baudruche fixé à un tube relié à l'extérieur, le tout dans un bocal fermé par un membrane eu caoutchouc, dés que le l'on tire la membrane vers le bas cela provoque une augmentation du volume du ballon de baudruche	La modification du volume de la cage thoracique, permet la pénétration de l'air dans les voies aériennes

2) SUIVONT LE TRAJET DE L'AIR DE L'EXTERIEUR VERS LES ALVEOLES

a) <u>les voies aériennes supérieures:</u>

i. **les fosses nasales :** filtrage, réchauffage et humidificateur de l'air
ii. **le pharynx :** c'est le carrefour aérodigestif, c'est à son niveau que s'effectue le tri entre l'air et le bol alimentaire.
iii. **L'épiglotte :** ferme le passage des voies aériennes au bol alimentaire
iv. **Le larynx :** structure supportant les cordes vocales

b) <u>les voies aériennes inférieures :</u>

i. **la trachée :** maintenue ouverte par des arceaux cartilagineux. Elle est tapissée de cils qui réagissent à toute irritation par le réflexe de toux.
ii. **les bronches :** la trachée se divise en deux bronches souches qui pénètre dans les poumons.
iii. **Les bronchioles :** ces bronches qui pénètrent dans les poumons se divisent pour donner des ramifications de plus en plus étroite : les bronchioles

La totalité de l'air qui pénètre dans les voies aériennes n'arrive pas à l'unité fonctionnelle des poumons (espace mort anatomique)

iv. **Les alvéoles :** phase terminale des voies aériennes inférieures. Elles représentent environs une superficie de 70m^2. La paroi des alvéoles est très fine, elle est tapissée à l'intérieur d'un produit : le surfactant dont la particularité est de facilité le passage des gaz, et d'empêcher l'alvéole de se collaber. C'est l'unité fonctionnelle des poumons. Les alvéoles sont très richement vascularisées.

La totalité de l'air arrivant dans les alvéoles ne va pas participer aux échanges (espace mort physiologique) car toutes les alvéoles ne sont pas perfusées en même temps.

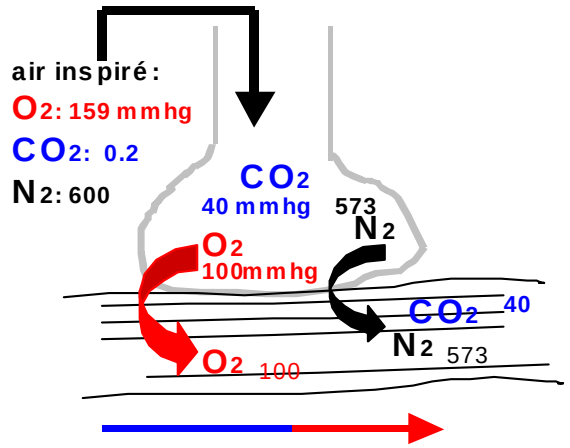
3) PASSAGE DE L'AIR INSPIRE D'UN MILIEU AERIEN DANS MILIEU LIQUIDIEN

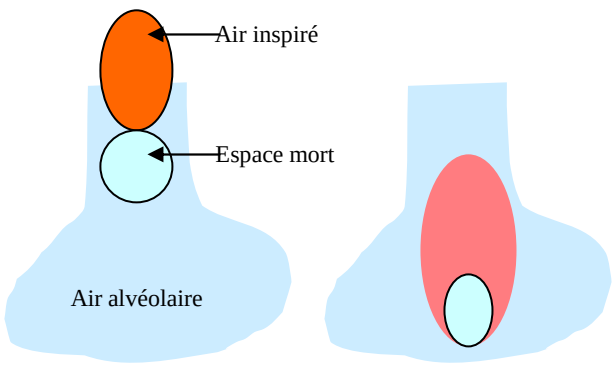
a) <u>Hématose :</u>

le passage se fait du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré.
La P_P^{O2} alvéolaire est de 100mmhg. La P_P^{CO2} alvéolaire est de 40mmhg ce chiffre doit être maintenu constant par l'organisme.
La P_P^{O2} sanguin est de 40mmhg,. La P_P^{CO2} sanguin est de 47mmhg.
La différence de gradient entre le milieu sanguin et le milieu alvéolaire permet le passage des gaz du milieu le concentré vers le milieu le moins concentré.
Ce passage est du en partie aux propriétés anatomique et physiologique de l'alvéole.
Les lois qui régissent cette diffusion sont :

1. loi de HENRY
2. loi de DALTON

schéma :



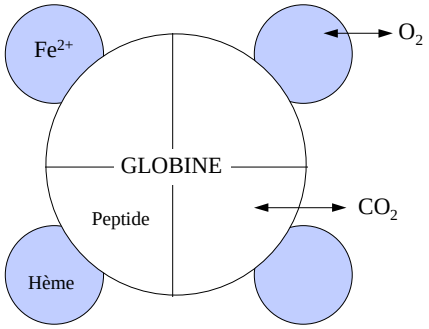


sens de circulation du sang Début d'inspiration inspiration

b) <u>La composition du sang :</u>

NOMS	CARACTERISTIQUES	ROLES
GLOBULES ROUGES (HEMATIES)	Transport O2, donne la couleur au sang, Vient de la moelle osseuse, 5 millions/mm^3, Durée de vie 120j, On trouve dans ces hématies de l'hémoglobine qui permet le transport de gaz.	TRANSPORT
GLOBULES BLANCS (LEUCOCYTES)	On peut les trouver hors du sang, dans tous les liquides de l'organisme. 6 à 8000/mm3 de sang, ils détruisent les bactéries, corps étrangers, cellules mortes, les microbes, etc.…	DEFENSE DE L'ORGANISME
PLAQUETTES (THROMBOCYTES)	De 150 à 400000 par mm^3	COAGULATION
PLASMA	Composé d'eau, sels minéraux, transporte les éléments nutritifs provenant de la digestion (protéines, lipides, glucides, vitamines….), Gaz dissous, déchets dus au travail.	TRANSPORT DEFENSE COAGULATION.

Son rôle : il transporte les nutriments, les hormones, les déchets de l'organisme.
Schéma d'une molécule hémoglobine :



Comment sont transporté les gaz dans le sang :

L'oxygène :

- sous forme combinée à l'hémoglobine (98%) oxyhémoglobine
  ($Hb + O_2 = HbO_2$)
- sous forme dissoute dans le plasma (2%) 0.3ml/100ml de plasma.

Le gaz carbonique :

- sous forme combinée à l'hémoglobine (30%) carbaminohémoglobine
  ($Hb + CO_2 = HbCO_2$)
- sous forme dissoute dans le plasma (70%) dont la répartition plus précise est :
  a. 60% transformé en acide carbonique (H_2CO_3) qui intervient sur l'acidité du sang.
  b. 10% dissous dans le plasma.

L'azote : sous forme dissoute dans le plasma.

c) <u>Un système de canalisation :</u> LES VEINES

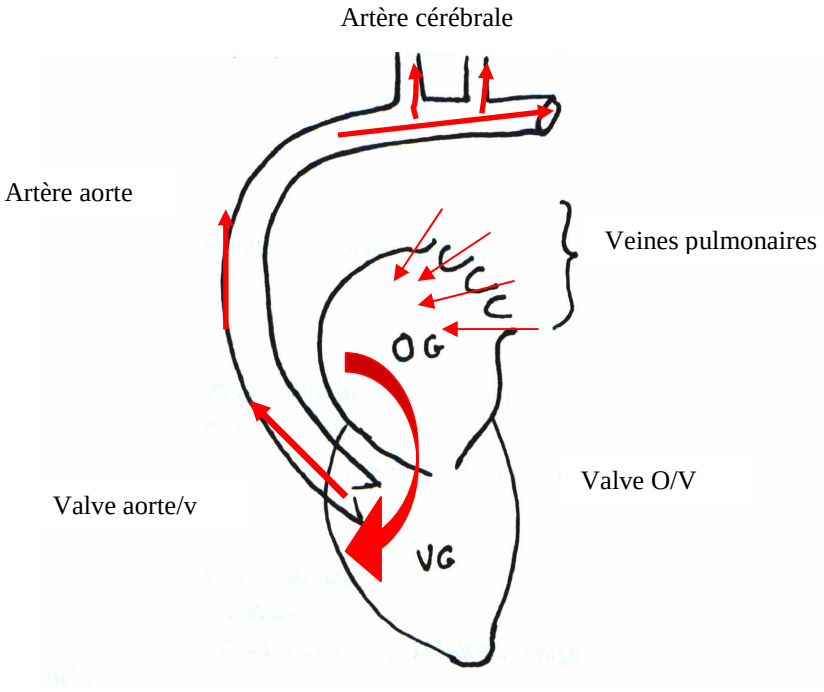
Véhiculer et contenir le sang : les vaisseaux qui sont en contact avec les alvéoles s'appellent :

i. les capillaires : particularité : petit diamètre et fine épaisseur. Présent en grand nombre autour des alvéoles.
ii. Les veinules : font suite aux capillaires d'épaisseur et de diamètre supérieur
iii. Les veines : font suite aux veinules d'épaisseur et de diamètre supérieur.

Elles arrivent toujours au cœur, elles se collabent lorsque l'on les sectionne. A l'intérieur on trouve des valves anti-reflux qui empêche le sang de redescendre.

4) ARRIVE DU SANG DANS UNE POMPE ASPIRANTE ET REFOULANTE : PARTIE GAUCHE DU CŒUR

schéma de la partie gauche du cœur :



a) <u>pénétration du sang dans les différentes cavités composant le cœur gauche:</u>

le sang pénètre dans un premier temps dans l'oreillette gauche avant de pénétrer dans le ventricule droit. Ce remplissage des cavités cardiaque s'effectue pour ce qui est de l'oreillette pendant la phase de repos du cœur (diastole), le remplissage du ventricule s'effectue pendant cette phase de diastole, le remplissage complet du ventricule fait.suite à la phase de systole auriculaire qui expulse le sang restant dans l'oreillette vers le ventricule Une augmentation de pression dans le ventricule ferme la communication auriculo-ventriculaire

b) <u>expulsion du sang dans la canalisation :</u>

Une contraction ventriculaire fait suite à la phase de repos ce qui a pour conséquence d'ouvrir la valve de communication de l'aorte, (valve sigmoïde aortique) donc de permettre l'expulsion du sang en dehors de la cavité ventriculaire dans l'artère aorte. (valves auriculo-ventriculaire : Mitrale)

5) ARRIVE DU SANG RICHE EN OXYGENE AU NIVEAU DES DIFFERENTS ORGANES DE L'ORGANISME

a) <u>Comment est véhiculer le sang à sa sortie du cœur :</u>

le sang arrivant au niveau des différents tissus de l'organisme est véhiculé dans une canalisation artérielle. Les vaisseaux qui partent du cœur s'appellent des artères elles prennent un nom différent en fonction de leur diamètre et de leur épaisseur.

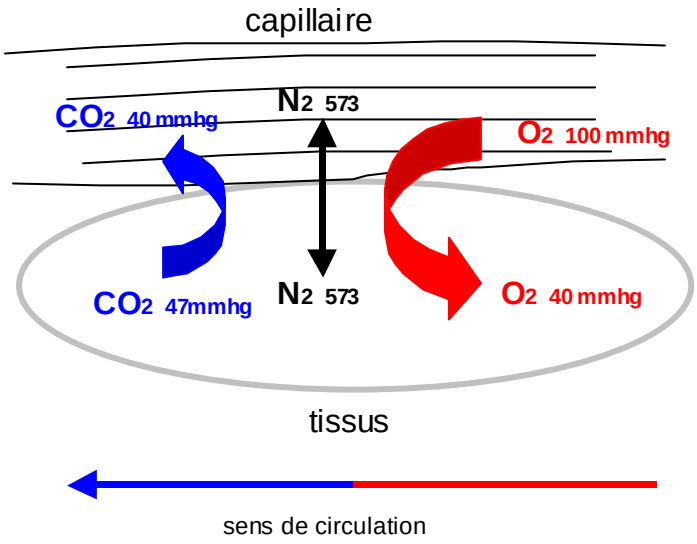
Les artères : font suite à la sortie du cœur elles ont un gros diamètre et sont épaisses.

Les artérioles : font suite aux artères de diamètre et d'épaisseur inférieurs.

Les capillaires : de diamètre et d'épaisseur très fins c'est à leur niveau que s'effectueront les échanges entre le sang et les tissus de l'organisme.

b) <u>Chargement des tissus en oxygène, en azote et déchargement en gaz carbonique :</u>

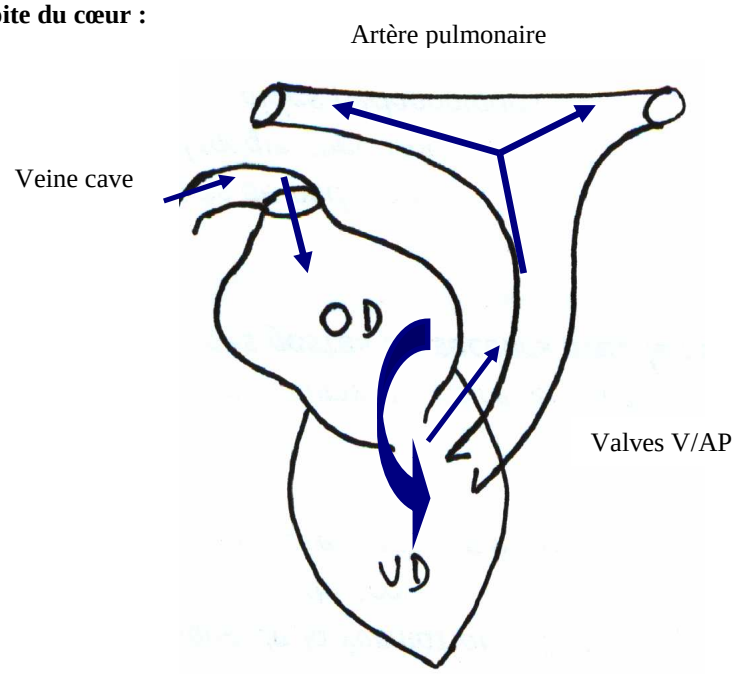
Schéma des échanges tissulaire :



l'azote pénètre et sort de l'organisme en quantité égal.
Les capillaires qui ressortent des tissus ont une forte quantité de gaz carbonique est une faible quantité d'oxygène.
Le sang passe des capillaires au veinules, puis dans les veines avant de se jeter dans la partie droite du cœur.

6) ARRIVE DU SANG RICHE EN GAZ CARBONIQUE DANS UNE POMPE ASPIRANTE ET REFOULANTE

Schéma de la partie droite du cœur :



a) <u>pénétration du sang dans les différentes cavités qui composent la partie droite du cœur :</u>

Le sang arrive par les veines cave supérieur et inférieur qui ont récupéré le sang provenant des différents tissus de l'organisme.
Sa pénétration dans l'oreillette droite s'effectue pendant la phase de repos du cœur (diastole), remplissage de la cavité de l'oreillette puis ouverture sous le poids du sang des valves tricuspide (communication auriculo-ventriculaire).
Une contraction des oreillette permet le remplissage complet du ventricule. Le ventricule droit une fois remplie la valve de communication auriculo-ventriculaire se ferme.

b) <u>Expulsion du sang dans le système artèrielle : artère pulmonaire :</u>

Augmentation de la pression ventriculaire associée à une contraction ventriculaire (systole), permet l'ouverture de la communication entre le ventricule et l'artère pulmonaire (valve sigmoïde pulmonaire).

Cette ouverture permet l’expulsion du sang du ventricule dans l’artère pulmonaire.

7) PASSAGE DES GAZ DU SANG D'UN MILIEU LIQUIDIEN DANS UN MILIEU AERIEN

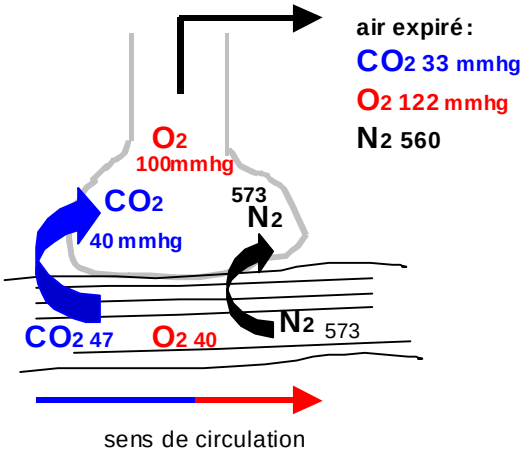
a) <u>Composition du sang provenant des tissus :</u>

Le gaz carbonique : 47mmhg
L'oxygène : 40mmhg
L'azote : 570mmhg

b) <u>Hématose :</u> le sang contenu dans le système artérielle arrive au niveau des alvéoles par les capillaires dont nous avons dit qu'ils avaient un diamètre et une épaisseur très fin.

Cette diminution de diamètre permet de ralentir le débit sanguin au niveau alvéolaire de plus la fine épaisseur des parois permet le passage des gaz du milieu liquidien dans le milieu aérien.

Schéma :



8) SUIVONS LE TRAJET DE L'AIR DES ALVEOLES VERS L'EXTERIEUR

<u>a) Passage des voies aériennes inférieur vers les voies aériennes supérieures :</u>

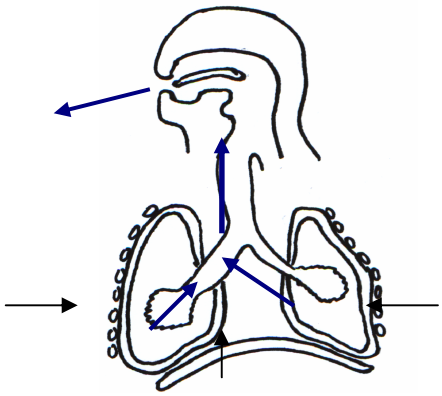
alvéole, bronchioles, bronches, trachée, larynx, pharynx, fosses nasale

<u>b) Comment l'air peut passer des voies aériennes inférieures au voies aériennes supérieures :</u>

+ **Le relâchement musculaire :**
Les poumons reprennent leur volume initial, due à l'action combinée du relâchement musculaire du diaphragme et des muscles intercostaux, mais aussi à la propriété des poumons de vouloir retrouver leur volume. L'expulsion de l'air hors de l'organisme est une phase passive, c'est **l'expiration**
+ **L'expiration :**

- phénomène passif
- phénomène actif : la phase active est sous le contrôle de la volonté, elle nous permet d'augmenter notre volume d'expiration. Pour cela elle fait intervenir des muscles expirateurs (abdominaux). En diminuant le diamètre de la cage thoracique, on diminue le volume des poumons donc on expire une plus grande quantité d'air. Volume de réserve expiratoire 1.5 l

schéma :



c) Composition de l'air rejeté par l'organisme après utilisation :

L'air que nous rejetons se compose : d'oxygène : 16%, d'azote : 79%, de gaz carbonique : 5%, de vapeur d'eau

d) le soufflet pulmonaire :

<table>
<tr><td>Volume de réserve inspiratoire</td><td>2.5l</td><td rowspan="3">Capacité vitale 4.5l</td><td rowspan="4">Capacité totale 61</td><td></td></tr>
<tr><td>Volume courant</td><td>0.5l</td><td></td></tr>
<tr><td>Volume de réserve expiratoire</td><td>1.5l</td><td rowspan="2">Capacité résiduelle fonctionnelle 3l</td></tr>
<tr><td>Volume résiduel</td><td>1.5l</td><td></td></tr>
</table>

(Le nombre de cycle respiratoire au repos : 12à 15 cycles/minute)

9) COMMENT L'ENSEMBLE EST-IL REGULE ?

a) La régulation pulmonaire :

Elle est située pour la partie centrale au niveau du **bulbe rachidien**, il existe une zone déterminant l'inspiration et une zone déterminant l'expiration.

Une zone situé à la périphérie au niveau **des sinus carotidien** est sensible à la composition du taux de CO_2 et O_2 mais aussi à l'acidité du sang.

La respiration est un phénomène automatique qui peut être contrôlé par la volonté.

Le rythme et l'amplitude des mouvements respiratoires sont réglés par la variation des paramètres sanguins :

Diminution de l'O2 ou augmentation du CO2 entraîne une accélération.

b) La régulation cardiaque :

Le cœur possède sont propre rythme qui lui est donné par **tissu nodal**. La contraction du cœur débute au niveau des oreillettes pour et se prolonger au niveau des ventricules.

Le fonctionnement cardiaque est intégré au besoin de l'organisme. Cette intégration met en jeu des récepteurs chimique et de pression qui informe le centre bulbaire sur les besoins de l'organisme en apport sanguin.

L'innervation du cœur est double :

- un système accélérateur (parasympathique)
- un système modérateur (sympathique)

10) QUELS SONT LES REPERCUTIONS DU MILIEU HYPERBARE SUR L'ORGANISME

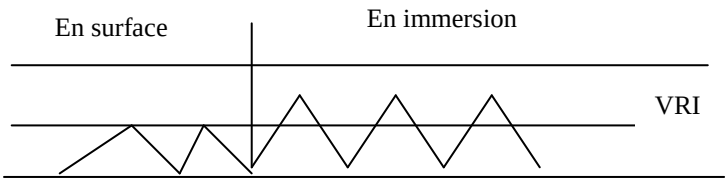
a) au niveau de l'appareil respiratoire :

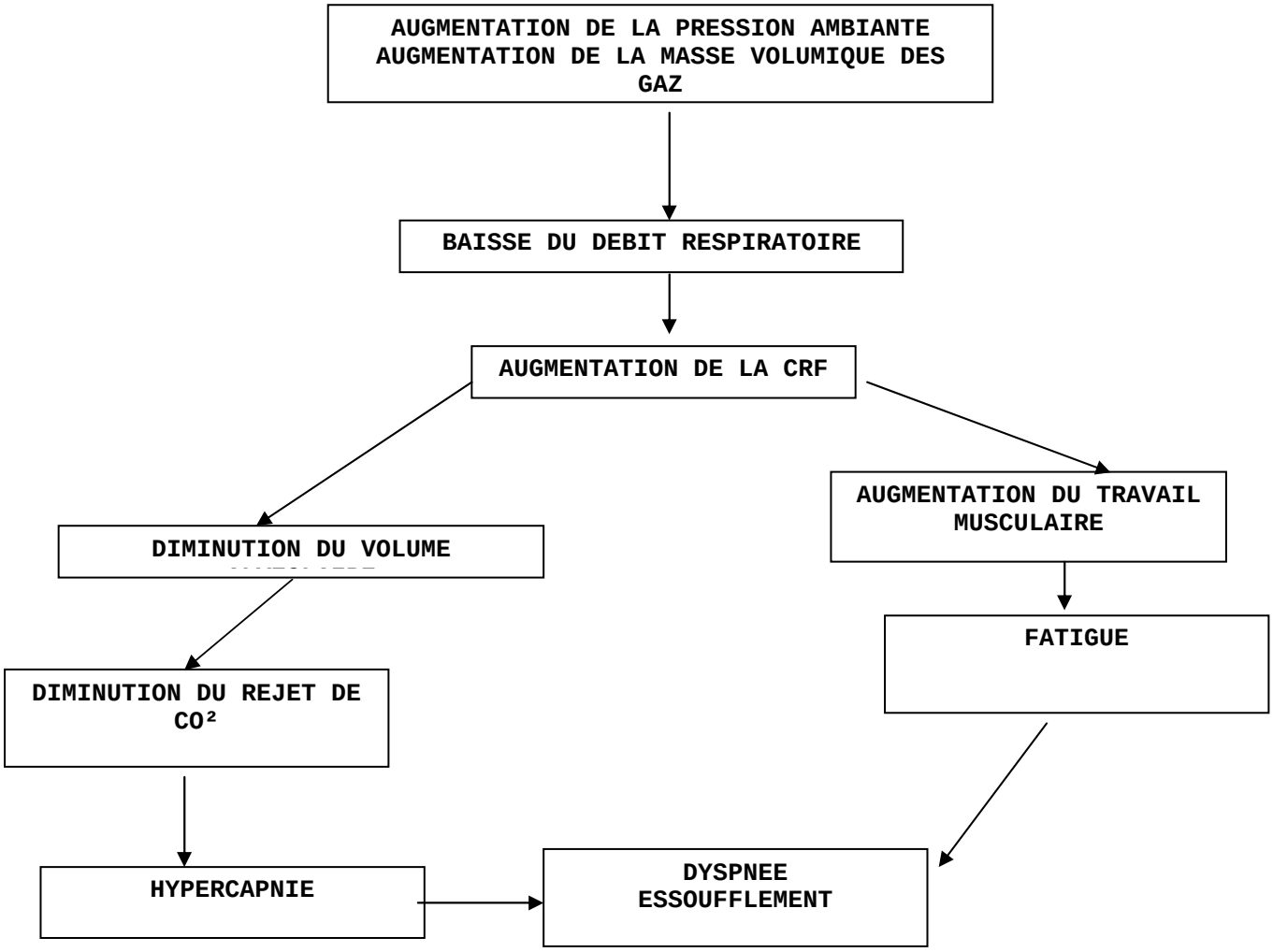
+ Augmentation de la masse volumique des gaz (loi de Mariotte) : l'augmentation de la pression ambiante occasionne une augmentation de la masse volumique des gaz, qui conduit à une diminution de l'écoulement des gaz dans les voies aériennes. Cette diminution induit une diminution de l'approvisionnement et de l'élimination des gaz au sein des alvéoles.

+ Diminution des débits alvéolaire : Cette diminution des débits oblige l'organisme à fournir des efforts musculaire supplémentaire pour maintenir les débits constant.

La diminution des débits expiratoire à pour conséquence une augmentation de CRF ce qui oblige l'organisme à augmenter son apport en travaillant sur le volume de réserve inspiratoire.

Schéma :

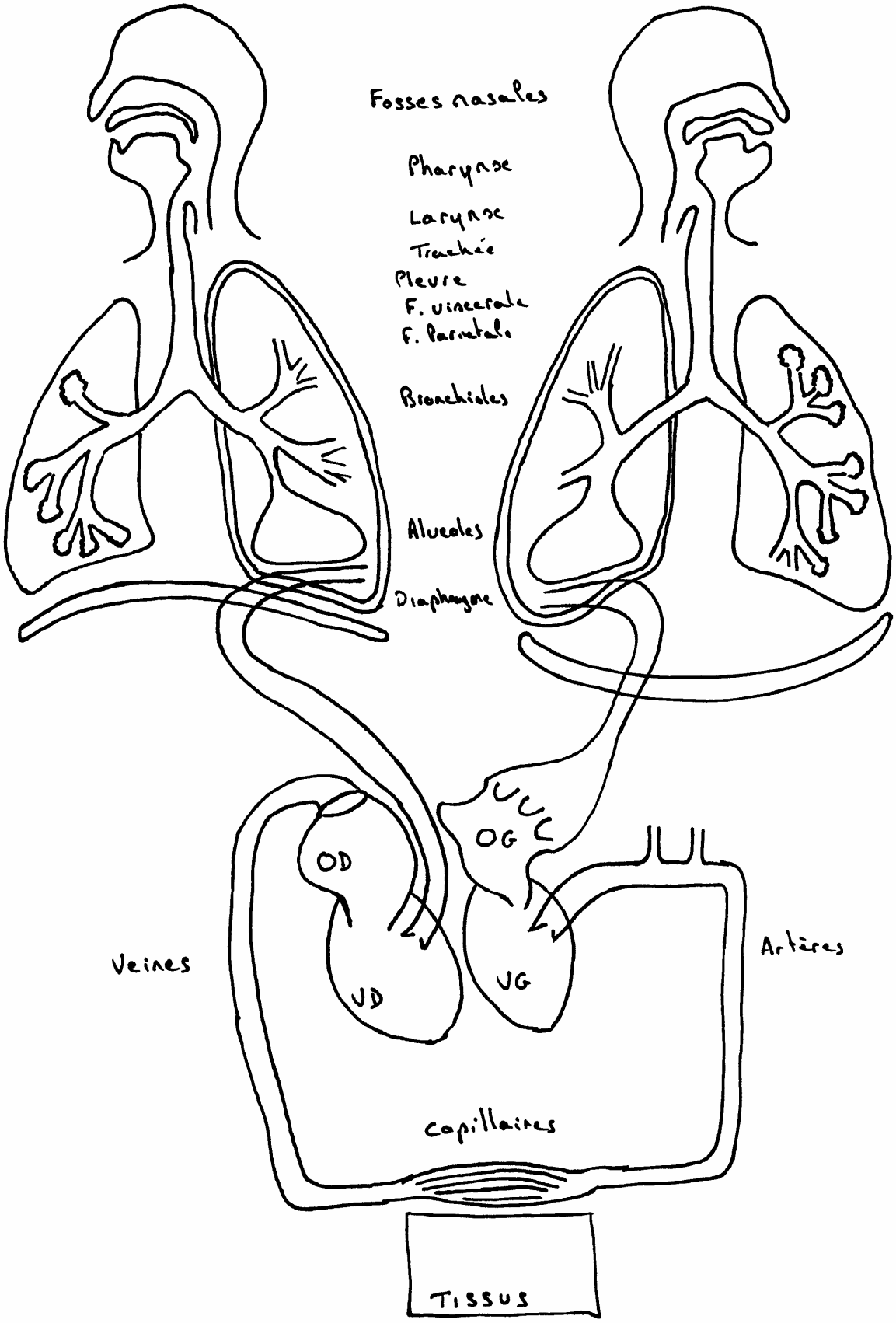




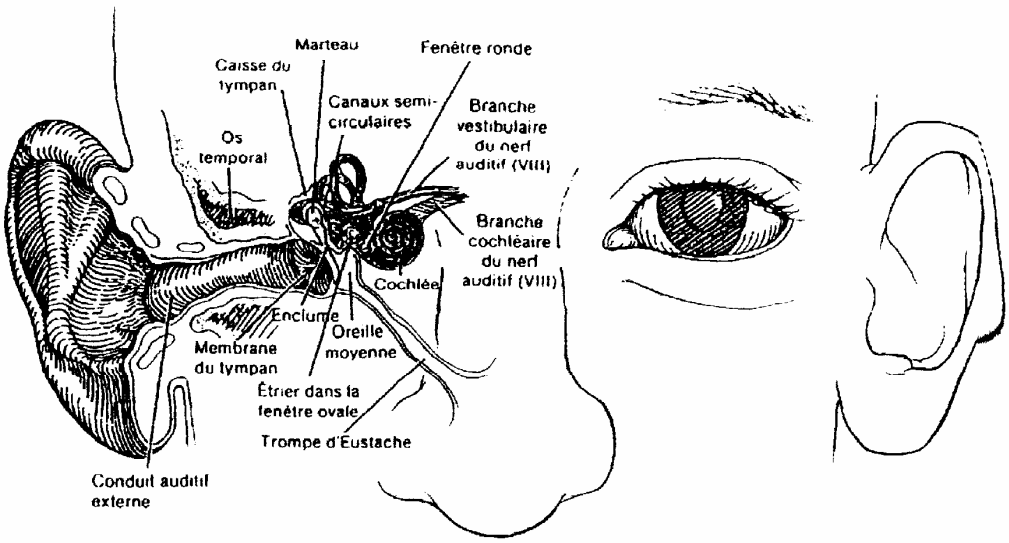
b) au niveau de l'appareil circulatoire :
+ effet de la pression hydrostatique : le sang situé à la périphérie est déplacé la partie centrale (tissu pulmonaire) (Bloodshift) ce qui provoque une diminution de l'espace disponible pour augmenter le volume pulmonaire.
+ bradycardie : diminution du rythme cardiaque

SCHEMA D'ENSEMBLE DU TRAJET DE L'AIR

(à compléter)



L'OREILLE

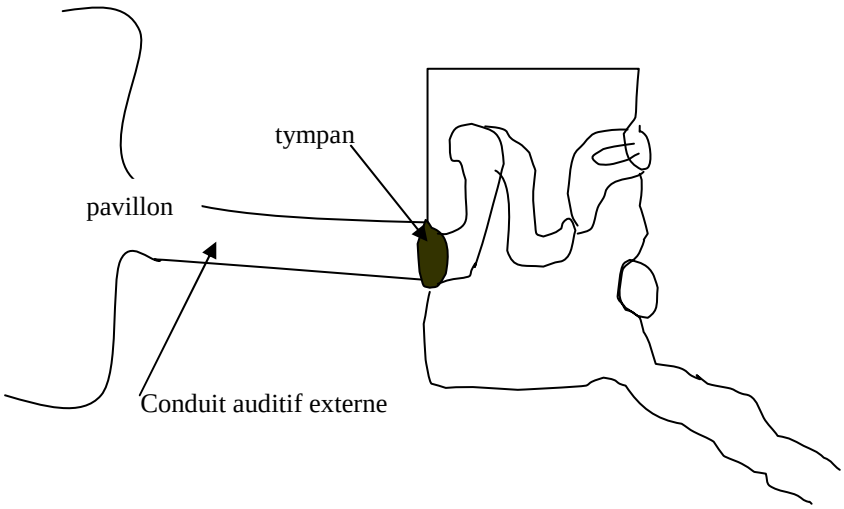


PRESENTATION :

Les 2 fonctions de l'oreille:

- audition,
- équilibration.

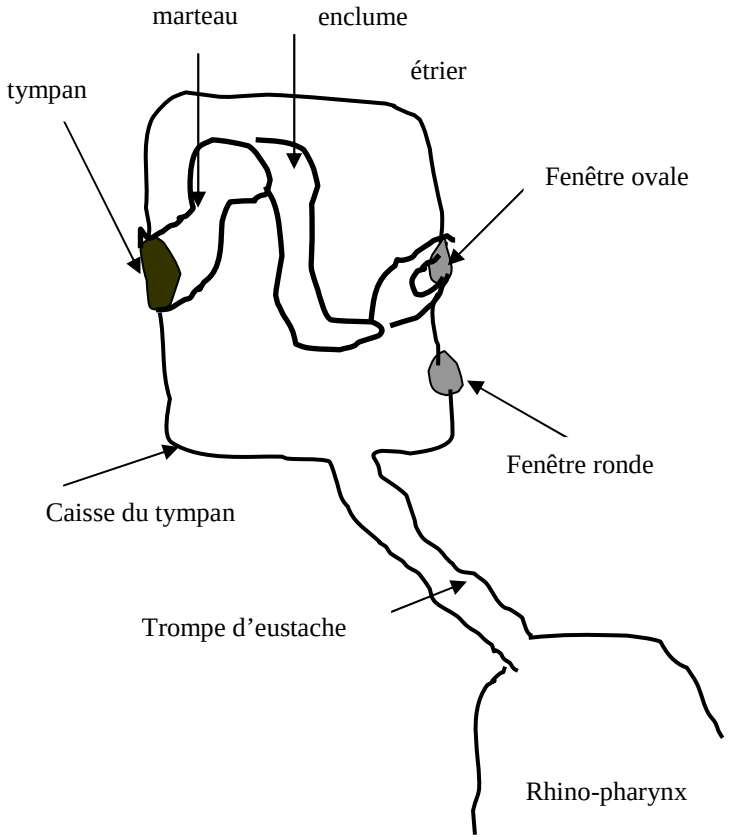
DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT



1. **<u>Oreille externe</u>**

– Pavillon,
– Conduit auditif externe tapissé de glandes sécrétant le cérumen (qui capte les poussières et absorbe les vibrations parasites),
– Tympan (membrane souple).

SON ROLE: CAPTER LES SONS, LES CANALISER VERS LE TYMPAN.



2. Oreille moyenne

Elle est composée de deux parties: caisse tympanique et chaîne des osselets.

Caisse tympanique: c'est une cavité osseuse indéformable située dans l'os temporal et présentant 4 orifices:

- sur la paroi extérieure: le tympan,
- sur la paroi intérieure: 2 cavités fermées par une membrane: fenêtre ovale et fenêtre ronde,
- sur la paroi antérieure: trompe d'Eustache faisant communiquer l'OM et le rhino-pharynx.

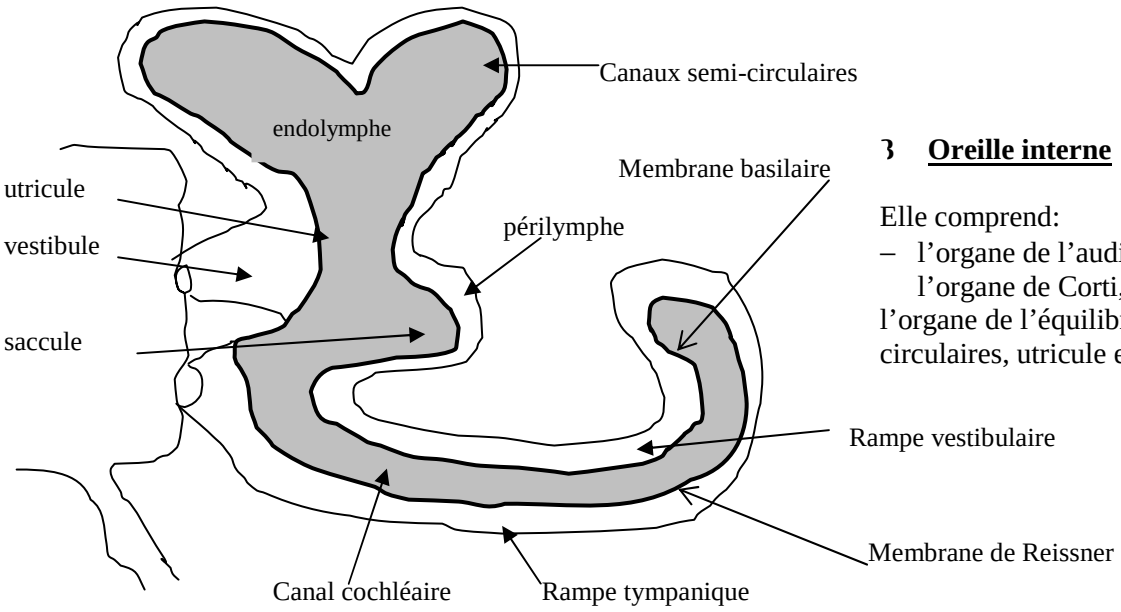
Elle abrite la chaîne des osselets.

Les osselets:
Marteau
Enclume
Etrier
Tympan ⇨Marteau ⇨Enclume ⇨Etrier ⇨Fenêtre ovale.

Son rôle: Transmission des sons (par un solide)

2 remarques importantes:

- La surface du tympan est plus importante que celle de la fenêtre ovale. Il y a donc amplification des sons. En effet, les osselets transforment des vibrations de faible intensité en vibrations moins amples, mais d'intensité augmentée.
- Ce système de transmission ne peut fonctionner que s'il y a équipression de part et d'autre du tympan. D'où la présence de la trompe d'Eustache.



3 Oreille interne

Elle comprend:

- l'organe de l'audition: cochlée et l'organe de Corti,

l'organe de l'équilibration: canaux semi-circulaires, utricule et saccule.

3. Audition

Rappel: L'étrier appuie sur la fenêtre ovale.

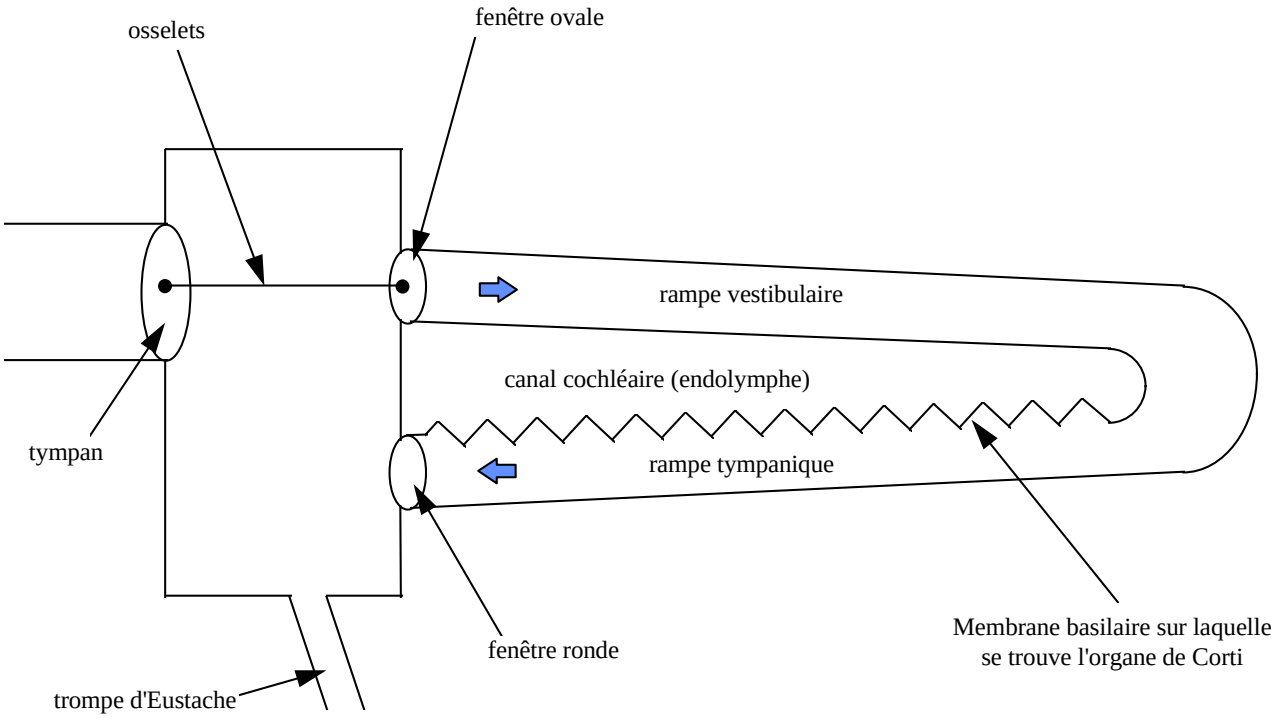
La vibration de la fenêtre ovale fait passer l'ébranlement sonore dans un milieu liquide (la périlymphe qui se trouve dans le vestibule). Le vestibule se prolonge ensuite par le limaçon, qui est divisé en deux:

- la rampe vestibulaire,
- la rampe tympanique.

Entre ces deux rampes est situé le canal cochléaire qui contient l'organe de Corti, ou organe de l'audition.

Cet organe de Corti est en connexion avec les cellules nerveuses qui transmettent l'influx nerveux au niveau cérébral par le biais du nerf auditif.

L'organe de cOrti se trouve sur la membrane basilaire. Il contient les cellules auditives réceptives (ce sont des cellules ciliées disposées en rangée double).



Anatomie schématique de l'oreille (audition), Cochlée déroulée.

Remarque: Les déformations de la fenêtre ronde permettent de compenser celles de la fenêtre ovale.

4. Equilibration

Les récepteurs de l'équilibration sont situés dans le saccule, l'utricule et les canaux semi-ciculaires.

L'utricule et le saccule ont un rôle dans la statique du corps (membranes semblables à de gros sacs). Ils sont connectés au vestibule.

Les 3 canaux semi-circulaires ont un rôle dans la dynamique: ils sont situés dans les 3 plans de l'espace. Ils permettent d'équilibrer le corps lorsqu'il est en mouvement. Le contrôle s'effectue au niveau du cervelet par l'intermédiaire du nerf vestibulaire.

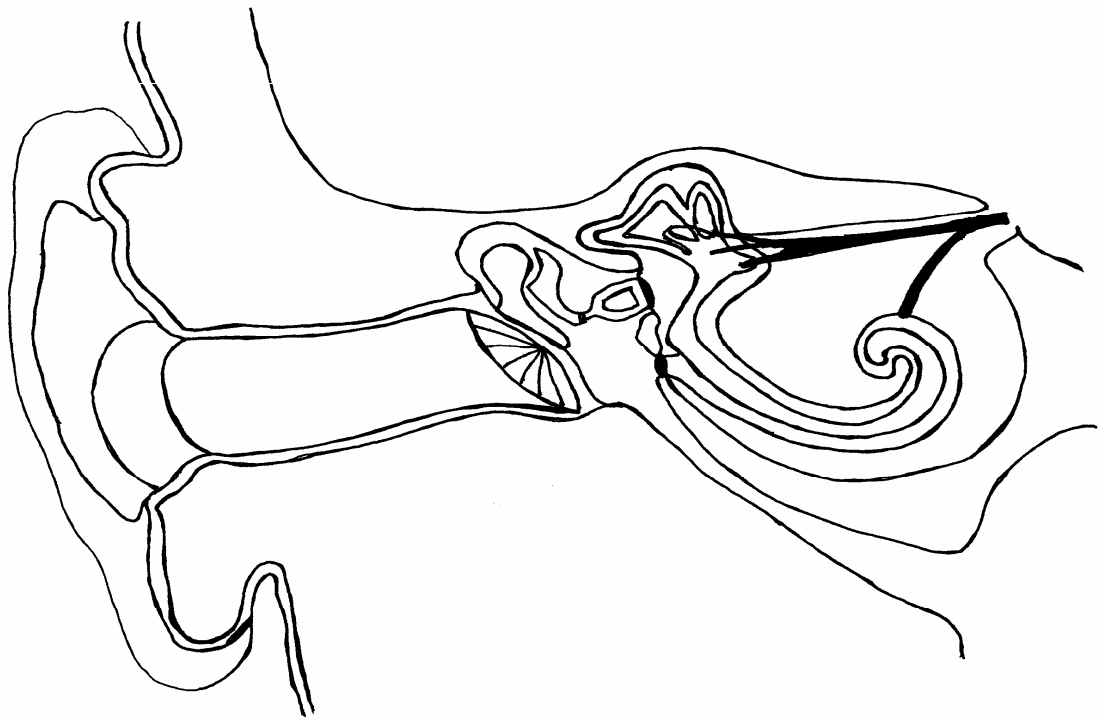
LES CONSEQUENCES EN PLONGEE

- Equilibrage de l'OE / OM
  Précision: pourquoi à la remontée les oreilles s'équilibrent toutes seules ➟ partie souple (proche du rhino-pharynx) / partie rigide (proche de la caisse tympanique) de la trompe d'Eustache.
- Positionnement dans un milieu en 3D,
  Le trépied de l'équilibre:
  - ➪ OI,
  - ➪ vision ➘ (eau trouble, luminosité,...)
  - ➪ système musculaire articulaire propioceptif ➘ (pas d'appui, combinaison qui serre,)

D'où l'importance de l'OI.

- Audition dans l'eau (son 330 $m.s^{-1}$ dans l'air / 1500 $m.s^{-1}$ dans l'eau, cf. cours sur l'acoustique),
- Accidents spécifiques de l'oreille (ADD et barotraumatismes à voir plus tard).
  Si atteinte vestibulaire ➪ récupérable,
  Si atteinte organe de Corti ➪ non récupérable (endolymphe),
  Si atteinte des canaux semi-circulaires ➪ non récupérable (cupule, masse gélatineuse) mais adaptation progressive de l'équilibre avec une seule oreille interne.

Annoter le schéma :



ACCIDENT DE DECOMPRESSION

1) QU'EST CE QU' UN ACCIDENT DE DECOMPRESSION ?
Toute altération de l'état de santé se produisant pendant ou après le retour en surface d'un plongeur. Liés à la libération de gaz sous formes de bulles dans l'organisme.

Il est caractérisé par :

- un temps de latence (qq minute à plusieurs heures)
- évolution constante des signes ver l'aggravation

il doit être distingué du barotraumatisme qui se produit :

- à la descente (oreilles, sinus, dents)
- à la remontée (surpression pulmonaire)

qui est immédiatement constitué.

2) COMMENT SE MANIFESTE L'ADD ?

a) les formes non neurologiques :

+ ***LES MANIFESTATIONS NON NEUROLOGIQUES :***

MANIFESTATIONS ARTICULAIRES : **LES BENDS**

⇨ la douleur
⇨ l'impotence fonctionnel
⇨ l'absence de déficit neurologique
⇨ non visibles

MANIFESTATIONS CUTANEES :

LES PUCES
LES MOUTONS

⇨ douloureux
⇨ précédents ou accompagnant un accident graves

MANIFESTATIONS RESPIRATOIRE : **LES CHOKES**
Correspond à l'embolisation pulmonaire des bulles, toujours suivis par d'autres manifestations.
Pouvant s'accompagner de :

⇨ douleur thoracique
⇨ hypertension artérielle

D'intensité différentes :

⇨ oppression thoracique, étouffement
⇨ difficulté à respirer

+ LES MANIFESTATIONS NEUROLOGIQUES :

LOCALISATION CERREBRALE :

- atteintes :
  - ⇨ sensorielles
    - ➢ visuelles (perte partielle ou totale de la vision)
    - ➢ auditives (surdité)
    - ➢ vestibulaire (vertiges, perte d'équilibre, nausées, vomissements)
  - ⇨ motrices
    - ➢ paralysie de type hémiplégie
    - ➢ paralysie faciale
    - ➢ aphasie (perte de la parole)
  - ⇨ sensitives
    - ➢ anesthésie, hypo ou hyperesthésie
    - ➢ toucher, piqûre, douleur, chaleur/froid
  - ⇨ signes généraux
    - ➢ fatigue intense, céphalées, angoisse, hypertension

LOCALISATION MEDULLAIRE :
leurs localisation :

- cervicale : (atteintes des membres supérieurs
- dorsale : (atteinte membres inférieur et vésicale)
- lombaire : (atteinte membres inférieurs)

signes de début :

- chokes
- douleur dorsale ou lombaire (coup de poignard, tour de reins)

4) FACTEURS FAVORISANT.

L'accident peut survenir à tout âge et chez tout type de plongeurs.

a) Mauvaise utilisation des tables:

- Vitesse de remontée non respectée
- Non respect des paliers

b) Physique.

- Un travail musculaire intense avant la plongée et/ou au fond entraînant une augmentation de la quantité de gaz dissous pendant la plongée, car la perfusion tissulaire est plus élevée.
- Un sujet gras, car l'azote se trouve en plus grande quantité dans les tissus adipeux (tissus nerveux aussi) l'azote est 5 à 6 fois plus soluble dans les graisses.
- La fatigue
- La consommation d'alcool : l'alcool est a l'origine d'une dilatation des vaisseaux périphériques, ceci augmente la susceptibilité du plongeur à l'accident de décompression. La résistance au froid est altérée par cette vasodilatation.
- Le froid qui diminue la vitesse d'élimination des gaz par vasoconstriction
- Age : sujet qui on plus de 40 ans

c) Plongée :

- profondeur
- successives
- consécutives.
- Profil inversé
- Plongée Yo-Yo

5) ORIGINE DES DIFFERENTES MANIFESTATIONS

a) ROLE DU POUMON

Le gaz inerte est évacué, par passage de la phase dissoute vers la phase gazeuse, au niveau de la frontière alvéolo-capillaire.
Les bulles circulantes, existent normalement après une plongée, leurs nombres étant proportionnel à la durée et à la profondeur. Le sang veineux chargé de ces bulles passe dans le cœur droit puis est filtré par les poumons. L'appareil pulmonaire joue alors entièrement son rôle de filtre à bulles et les éliminent.

Dans le cas de décompression anormale, les bulles circulantes deviennent excessives en quantité et en taille. Le filtre pulmonaire qui ne peut accepter qu'une certaine quantité ne peut plus jouer son rôle et n'assume plus le dégazage normal.

b) FORMATION DE LA BULLE

Au cours du séjour en pression nous absorbons de l'azote qui va se dissoudre progressivement dans les différents tissus de l'organisme : c'est la sous saturation.
Si la durée d'immersion est suffisamment longue un équilibre va intervenir : c'est la saturation

Lors de la remontée la pression du gaz alvéolaire diminue suivant la pression hydrostatique. La tension du gaz dissout dans les tissus devient donc supérieure à la pression du gaz dissout dans le sang et qui arrive des poumons. Il y alors passage du gaz des tissus vers le sang, c'est la sursaturation

Si l'on procède à une décompression trop rapide le dégazage ne peut se faire de façon progressive et les poumons sont insuffisants pour évacuer tout le gaz trop rapidement libéré. Il se produit une effervescence azotée dont les effets néfastes se manifestent.
Donc on peut dire qu'il y a apparition des bulles par différence de pression trop rapide.
Vous pourrez lire dans certaines revues que d'autres phénomènes sont évoqués tels que la cavitation, le gaz carbonique, la cinétique du sang et bien d'autre encore pour expliquer la formation de ces bulles qui nous pose problème à nous plongeur.
Il faudra attendre SPENCER dans les années 70 et son travail de recherche sur les bulles avec Doppler pour affirmer que les bulles existent dans l'organisme sans pourtant être pathogène, contrairement à ce que pensait HALDANE
En cas de passage d'une bulle dans la grande circulation, de nouveaux problèmes peuvent intervenir.

La bulle, corps étranger, dans le sang ou dans les tissus provoque une réaction de défense de l'organisme.
Après la formation de la bulle, une couche de dépôt l'entoure rapidement. Cette couche est constituée de protéines plasmatiques, d'agrégats plaquettaires, de fibrines.
Cette bulle enveloppée induit des réactions biologiques en chaîne dans l'organisme.

Cette réaction de défense de l'organisme évolue vers la maladie de décompression (M.D.D) dont l'accident de décompression est une manifestion explosive.
Comme nous l'avons vu, la bulle est recouverte d'une couche de dépôt d'une épaisseur de 4 à 10 mm.
Si la bulle vient à disparaître, cette enveloppe persiste et continue à exercer un rôle pathologique, il se produit une stimulation de la coagulation.

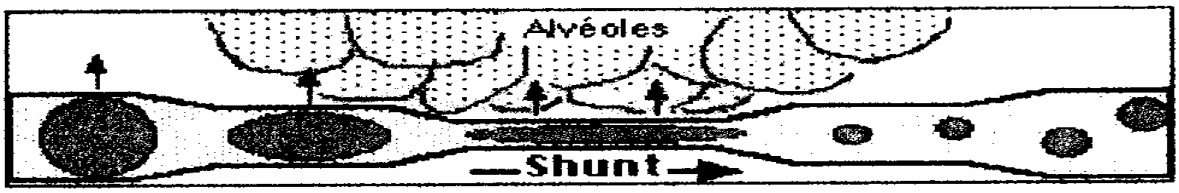
Tous ces phénomènes diminuent la fluidité du sang, ce qui ralentit le flux sanguin entraînant des troubles de perfusion et de ventilation.

Les bulles sont principalement présentent dans la circulation veineuse et dans les différents liquides qui compose notre organisme.
Or comme nous avons pu le constater dans les différentes manifestations de l'accident de décompression on s'aperçoit que des bulles sont présentent dans la circulation artérielle.

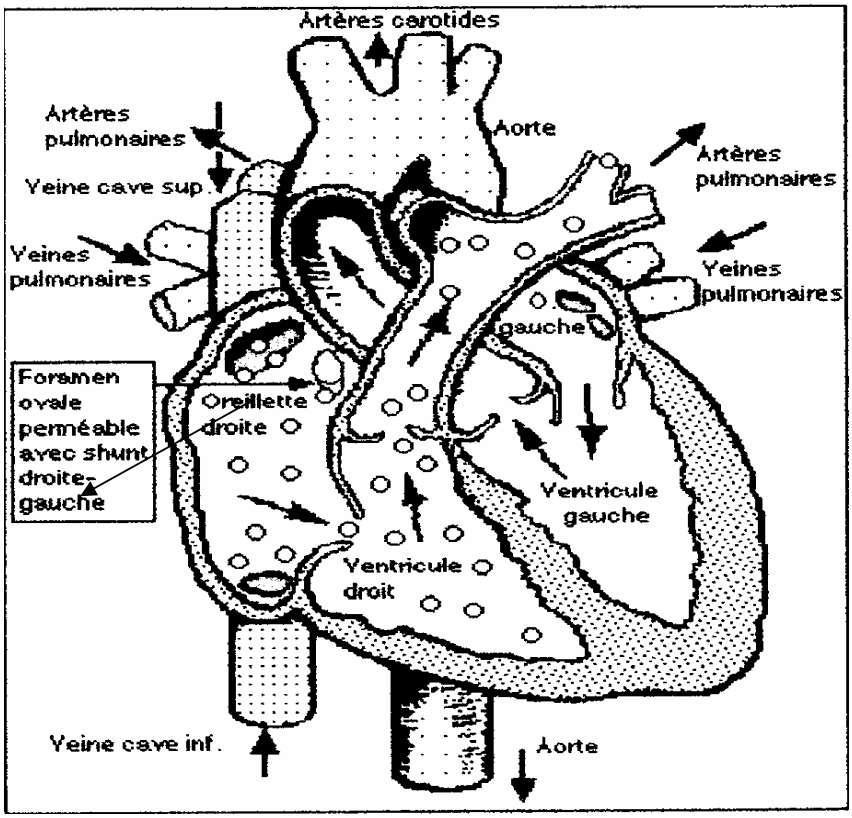
C) LE TRAJET DE LA BULLE

Comme nous l'avons vu le filtre pulmonaire doit éliminer à son rythme ces bulles gazeuses au fur et à mesure.
Cependant il arrive que des bulles se retrouvent dans la circulation artérielle.
Il existe deux types de passage :

- Le shunt pulmonaire : l'intégrité du filtre pulmonaire doit être parfait pour pouvoir piéger et éliminer les bulles en circulation après la plongée.
A la suite d'une lésion du tissu pulmonaire il peut se produire un shunt veino-artériel. L'alvéole est perfusé mais pas ventilée, d'où passage du sang veineux dans la circulation artérielle et donc de bulles qui vont augmenter de volume.



Le shunt cardiaque : il existe un risque de passage veino-artériel au niveau des oreillettes. Ce passage se situe au niveau de ce que l'on appel le Foramen Ovale.
Toute hyperpression artérielle pulmonaire favorise l'ouverture du foramen et permet le passage de bulles dans la circulation artérielle.



Les bulles de la circulation artérielles s'embolisent dans les artères lorsque le calibre de celles-ci diminuent. Le sang ne peut circuler il y a donc anoxie. Un effet direct de la bulle sur la paroi vasculaire pourrait aussi provoquer des lésions.

Une fois dans la circulation artérielle il ne reste plus à la bulle qu'à suivre le trajet des différents vaisseaux qui composent ce système de canalisation.

A la sortie de la crosse aortique la bulle peut passer dans la carotide primitive qui irrigue le cerveau d'où une atteinte de type central.(cf. cours sur la circulation)

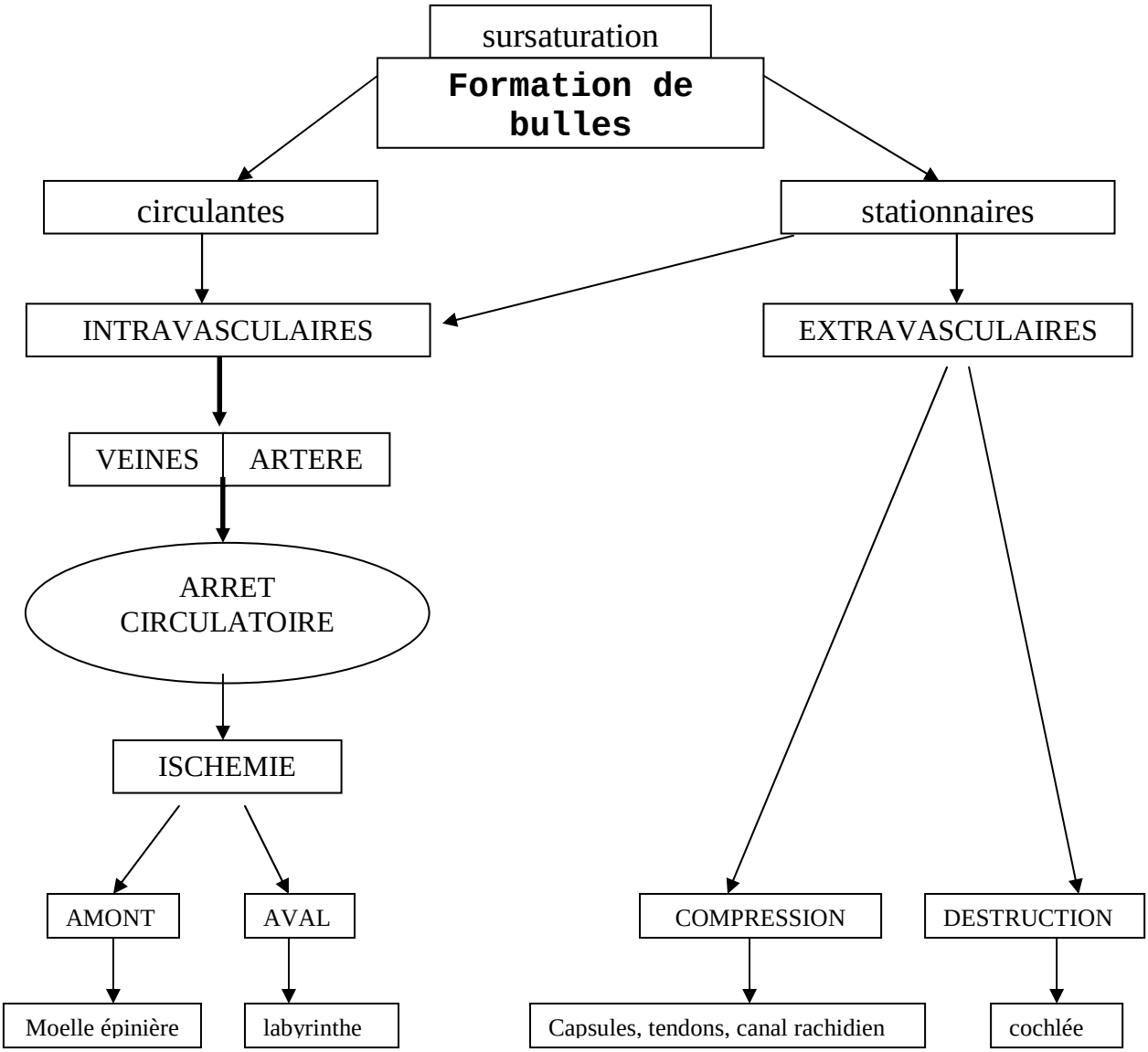
Mais cette bulle peut tout aussi bien suivre l'aorte est venir emboliser une autre zone telle que la moelle épinière est provoquer des lésions de type médullaire.

Mais les bulles ne sont pas toutes dans la circulation. Certaines peuvent être présentent au niveau de certains tissus occasionnant des lésions de type 1.
Mais aussi de type 2 si elles sont localisées au niveau des différents liquides de l'oreille interne.(cf. cours sur l'oreille)

6) QUE FAIRE

REAGIR SANS ATTENDRE : C'EST UNE **URGENCE**

❶ PREVENIR LES SECOURS (délais d'intervention)
❷ OXYGENE PUR
❸ REHYDRATATION : H_2O (NON SUCRE) ½ litre en ½ Heure
❹ ASPIRINE 250 A 500 MG (MAX)



TARAVANA : accident de décompression des apnéistes professionnel

LES EFFETS DE L'AZOTE SUR L'ORGANISME

LA NARCOSE

1) Manifestation du phénomène :

Combien de plongeurs on été confrontés à ce problème de prés ou de loin.
Il est difficile de décrire avec précision les différentes manifestions occasionnées par la respiration de l'azote.

Les manifestations observées ou décrites sont :

- **sentiment de bien être ou d'anxiété**
- **désorientation spatiale**
- **un comportement incohérent**
- **accentuation du dialogue intérieur**

ces manifestations peuvent être associées à des accidents beaucoup plus grave si on laisse s'installer cet état tel que :.

- **la surpression pulmonaire**
- **l'accident de décompression**
- **la noyade**

2)Comment ces différentes manifestations peuvent elles apparaîtrent ?

Ce type de manifestation est encore assez mal connu, en effet tous les efforts des physiologistes, se portent sur l'accident de décompression.
Ce que l'on peut dire, c'est que son origine serait une augmentation trop importante est brutale de la pression partielle d'azote mais aussi des gaz rares que nous respirons. Cette augmentation de pression partielle dans le sang entraîne des désordres sur le plan neurologique. Avec des réactions physiques et mentales caractéristiques d'un état général d'euphorie ressemblant à une intoxication éthylique.

Surviennent à des profondeurs variables selon les individus.
Possible entre 20-40m
Fréquent au-delà de 40m

3) Comment éviter ce phénomène ?

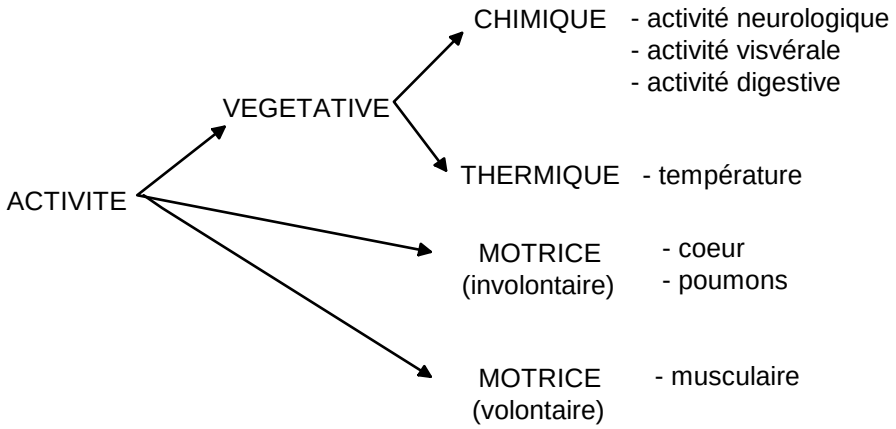
- **connaître ses limites**
- **s'habituer progressivement à de nouvelles profondeurs**
- **descendre progressivement par étapes**
- **ne pas descendre rapidement la tête en bas**
- **observer ses coéquipiers**

En cas de problème le simple fait de remonter la personne permet de faire disparaître les différentes manifestations

L'OXYGENE ET LA PLONGEE

Rôle de l'oxygène :

L'oxygène est le comburant d'un grand nombre de réactions chimiques qui se produisent dans l'organisme. Il est nécessaire en permanence pour le métabolisme de l'être humain et a pour but de produire des activités végétatives et motrices.

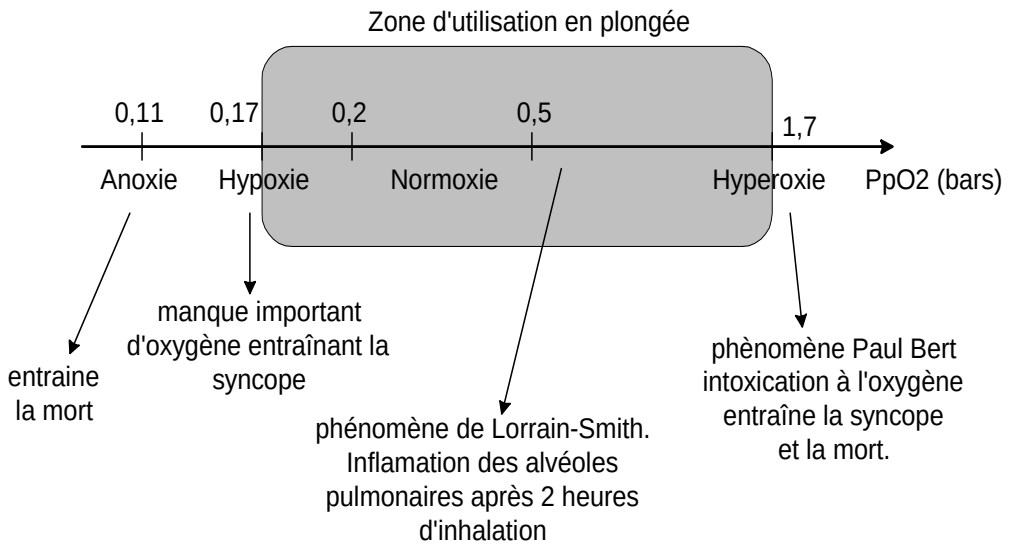


L'oxygène est utilisé par l'organisme pour produire de l'énergie qui est le résultat de l'association du **comburant** et du **combustible.** On le trouve à l'état naturel dans l'air, résultat de la photosynthèse. Sa concentration est de 20.9%. Par analogie, on peut faire une comparaison entre le métabolisme humain et un moteur de voiture.

	Moteur	Corps humain
Combustible	Essence	Glucides, Lipides (aliments)
Comburant	Oxygène	Oxygène
Résultat	Fait tourner le moteur	Vie
Déchets produits à évacuer	CO_2 , CO...	CO_2
Facteurs augmentant la consommation de O_2	Vitesse, couple...	Effort, stress, froid...

Limites de l'oxygène :

L'oxygène est indispensable à la vie et donc à notre organisme, mais il n'est pas toujours un ami. Il peut entraîner des accidents : accidents par toxicité et accidents par déficience. L'oxygène en plongée doit toujours être utilisé en dessus de la limite basse (0.17 bar) et en dessous de la limite haute (1.7 bar).



Limites hautes : Hyperoxie

L'effet Paul Bert ou neurotoxicité de l'O_2 : correspond à des crises convulsives survenant lors d'expositions à de fortes pressions partielles d'O2.(1.6b)

Cependant, même si la profondeur (la pO2) est cruciale, d'autre facteurs rentrent en ligne de compte : longue exposition, facteurs aggravants : essoufflement, fatigue, stress, froid...

Quelles conséquences pour l'organisme ?

- dysfonctionnement neurologique

Les différentes manifestations :

- Face rose
- Vision double, réduction du champ visuel
- Contraction musculaire, crampes
- Crise de type épileptique
- Perte de connaissance

Quelles réactions face à ces manifestations ?

- Baisser la PpO_2
- Traitement médical

Comment les éviter ?

- Bonne condition physique, mais dépend des individus et du contexte (fatigue, stress...)
- Aggravation avec l'absorption d'alcool, de tabac et de café.
- Ne jamais dépasser 1,6 bars de PpO_2.

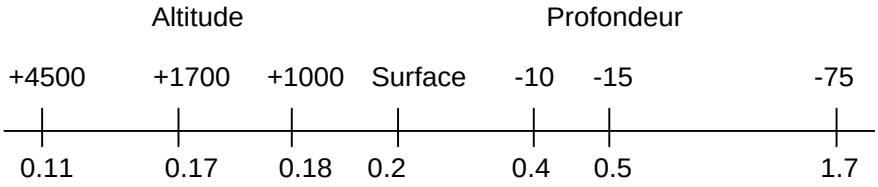
Exemples :

- plongée à l'oxygène pur → PpO_2=1.6 bar, profondeur=6m.
- plongée à l'air → PpO2 ≤ 1.6, Pabs = PpO_2 / $\%O_2$ = 1.6 / 0.2 = 8 bar soit 70 m.
- plongée aux mélanges enrichis en O_2 --> le pourcentage doit être calculé en fonction de la profondeur maximum à atteindre pour avoir toujours une PpO_2 < 1.6 bars.

On souhaite plonger à 30m. Quel mélange (O_2 + N_2) peut-on utiliser pour réduire au maximum les paliers ? PpO_2=1.6 bars, Pabs=4 bars → PpO_2/Pabs = 1.6/4 = 40 %.

Point d'entrée dans les tables ? P_{AE} = Pabs * % N_2/80, P_{AE} = 4 * 60/80 = 3Bars, soit 30 m.

On peut mettre en évidence l'importance de la pression ambiante dans le calcul de la pression partielle et tirer les raisons des limites volontaires des tables.



En première approximation la pression atmosphérique diminue de 0.1 bar tous les 1000m.
La profondeur fictive d'une plongée en lac d'altitude étant : Pf= Pr / Patm on connaît la profondeur réelle maximum à ne pas dépasser Pr= Pf * Patm = 70 * 0.9 = 63 m.
La prise en compte de ce phénomène apparaît dans les tables de plongée MN90, la profondeur maxi de plongée étant fixée à 65 mètres. En effet, les valeurs des coefficients de sursaturation critique étant établies pour des plongées en mer, on doit tenir compte de l'écart de pression atmosphérique ambiant.

L 'effet Lorrain Smith ou histotoxicité pulmonaire de l 'O2 : correspond à des phénomènes irritatifs au niveau du tissu pulmonaire lors d 'expositions de longues durées à des pO2 supérieures à 0,5 b.

Cette histotoxicité, généralement limitée en plongée sportive (diminution modérée de la capacité vitale) peut néanmoins aller jusqu 'à l 'OAP.

Quelles conséquences pour l'organisme :

- inflammation des alvéoles pulmonaires, soumis à une concentration d'oxygène supérieure à la normale (0,2 b) pendant des durées importantes.

Les différentes manifestations :

- Face rose
- Gêne respiratoire
- Toux
- Brûlures alvéolaires
- Œdème pulmonaire
- Douleur de type brûlure retrosternale

Quelles réactions face à ces manifestations ?

- Baisser la PpO2
- Traitement médical

Comment l'éviter ?

- Ne jamais respirer à une PpO2 > 0,5 bar pendant plus de 2 heures
- Concerne les plongeurs professionnels (travaux sur coques de bateaux)
- Concerne le secourisme : oxygénothérapie normobar

Limites basses : Hypoxie

On parle d'**hypoxie** lorsque la pression partielle de O_2 d'un milieu (tissu ou compartiment) est comprise entre 0.17 et 0.12 bar.

On parle d'**anoxie** lorsqu'il y a une diminution ou une suppression de l'oxygène dans les tissus, ceci entraînant une syncope brutale.

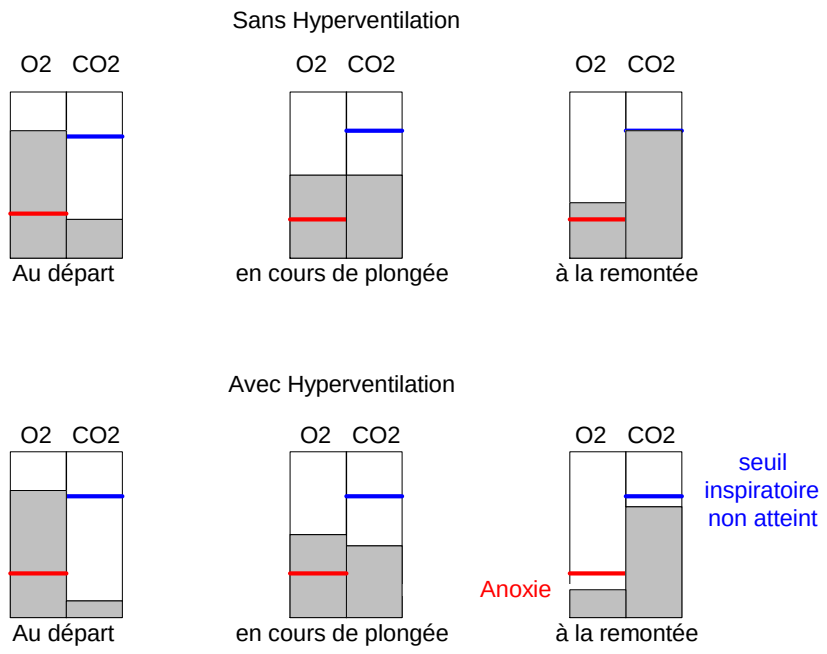
Ce ne sont pas des accidents toxiques, mais on les présente ici par commodité.

On rencontre ces phénomènes en plongée libre à la suite d'une hyperventilation prolongée : c'est le " **rendez-vous syncopal des 7 mètres** " bien connu des chasseurs.
En effet l'hyperventilation , pratiquée à tort pour accroître la durée d'apnée, abaisse la $PpCO_2$ dans les alvéoles et donc dans le sang, sans pourtant augmenter celle de O_2. La régulation de la respiration est contrôlée par les organes de coordination qui sont des centres nerveux situés au niveau du bulbe et de la protubérance, et dépend principalement de la pression partielle de CO_2 dans le sang artériel : le CO_2 agit donc directement sur les centres respiratoires, c'est lui qui donne l'envie de respirer.
Le CO_2 est produit par oxydation et donc par consommation de O_2. Le fait de baisser la pression de CO_2 au départ, retarde le moment ou le seuil déclenchant l'envie de respirer sera atteint.

Mécanisme :

- sans hyperventilation le seuil réflexe inspiratoire est atteint avant le seuil d'insuffisance en oxygène.

- avec hyperventilation, le seuil réflexe inspiratoire n'est pas atteint alors que le taux en oxygène est en dessous du seuil d'anoxie, entraînant la syncope.



Au cours de la descente on a une augmentation de la pression partielle d'oxygène (lois de DALTON), notre plongeur se sent bien.
Pendant son séjour au fond il a une sensation de bien être du à cette augmentation de la pression partielle d'oxygène.
Mais pendant son séjour au fond il consomme de l'oxygène et produit du gaz carbonique, jusqu'à atteindre le point de rupture de l'apnée. Quand il décide de remonter vers la surface la consommation d'oxygène a été très importante.

La $PPCO_2$ endogène a augmenté mais sa PPO_2 (hypoxie) elle a diminué atteignant le seuil de tolérance pour l'organisme.
Ce taux faible d'oxygène ne permet pas une bonne irrigation des cellules nerveuses, c'est la syncope par anoxie cérébrale.
En même temps le taux de CO_2 a augmenté (hypercapnie) jusqu'à atteindre le seuil de déclenchement du réflexe inspiratoire, et il inhale de l'eau au lieu de l'air, c'est la noyade

Comment éviter ce mécanisme ?

- respect de la règle du tiers temps
- préférer une respiration ample
- ne pas plonger seul

Quelles en sont ces manifestations ?

- Hallucinations
- Perte de conscience
- Arrêt respiratoire
- Arrêt cardiaque

Généralement, pas de signe avertisseur

Que faut-il faire face à une syncope ?

dans l'eau :
- sortir la personne de l'eau pour éviter la noyade

hors de l'eau :
- oxygénothérapie

Utilisation intensive de l'oxygène :

On peut définir trois cadres d'utilisation de l'oxygène pour le plongeur classique.
- au palier
- entre deux plongées
- en plongée avec mélange O_2/N_2 (32/68 ; 36/64 ; 40/60)

Au palier :

But recherché : réduire la durée des paliers. Ils sont diminués de 1/3 par rapport à la durée calculée à l'air arrondie à la minute supérieure et au minimum de 5 minutes.
La durée des paliers à l'oxygène pur est égale à la durée du palier à l'air lorsque celui-ci est inférieur à 5 minutes.
Le groupe de plongées successives reste le même.

Principe : augmenter la différence entre la tension de N2 des tissus et la PpN2 respirée afin d'éliminer l'azote plus rapidement.

Restriction : jamais avant le palier à 6m (effet Paul Bert)

Entre deux plongées :

But recherché : décroître plus rapidement le taux d'azote résiduel afin de réduire l'intervalle de temps entre deux plongées successives. Cette pratique présente l'avantage de diminuer rapidement la pression partielle

d'azote résiduelle se trouvant dans l'organisme après la première plongée, donc, de réduire ou d'éviter la majoration appliquée à la plongée successive.

Principe : augmenter la différence entre la tension de N_2 résiduelle et la PpN_2 respirée.

Le calcul de l'azote résiduel après inhalation d'O_2 pur en surface se trouve dans les tables MN90 et notée X_2.

La plongée Nitrox :

AVANTAGES	Inconvénients
• Par rapport à une plongée air diminution voire suppression des paliers • Aaugmentation de la sécurité si on utilise des tables air • Moins ou pas de majoration pour les plongées suivantes • Moins de fatigue post-plongée, meilleur confort, augmentation de la sécurité si effort obligatoires post-plongée. • Diminution du temps post plongée si l'on doit prendre l'avion • Diminution de la consommation d'environ 10% Autre utilisation : optimisation de la décompression, mais cela sort du cadre de cette formation.	• Organisation et planification plus lourdes • Limité aux profondeurs faibles ou moyennes • Respect absolu de la profondeur maxi • Fabrication des mélanges et utilisation de matériel particulier

UTILISATION THERAPEUTIQUE DE L'OXYGENE :

Une bouteille d'oxygène est obligatoire sur un bateau de plongée dans le cadre d'un club. Elle doit être réprouvée tous les 2 ans au minimum.

L'oxygène peut être :

- inhalé : le sujet respire seul dans le masque ;
- insufflé : le sujet ne ventilant pas, c'est le secouriste qui insuffle de l'oxygène dans les poumons.

Utilisation :

L'oxygène peut être utilisé en secourisme lors de certains accidents.

- Hypercapnie : c'est l'essoufflement du à une quantité de CO_2 trop importante. Dans le cas de maux de têtes au retour de plongée, l'apport d'oxygène est bénéfique.

- Noyade et surpression pulmonaire : Dans les deux cas il y a lésion des poumons, leur capacité d'échange gazeux est donc diminué. Pour subvenir aux besoins de l'organisme, il faut augmenter la concentration d'oxygène dans l'air respiré.

- Accident de décompression : En plus de l'oxygénation des tissus, l'oxygène pur respiré permet l'élimination plus aisée de l'azote car la PpN2 du gaz ingéré est nulle.

INTOXICATION PAR LE CO_2 OU HYPERCAPNIE

INTRODUCTION:

- le gaz carbonique est toxique pour l'homme.l'air n'en contient que 0.03%.
la ventilation permet de maintenir constant le taux de CO_2 dans le sang. On parle d'hypercapnie quand la pression partielle de CO_2 artérielle est supérieure à 4o mmhg.
Or nous savons que la pression partielle de CO2 au niveau des alvéoles est une constante est que celle ci est égale à 40 mmhg est quelque soit la profondeur si les conditions de ventilation sont efficaceet normale.

D'ou provient la production de CO_2?

Production endogène:

- d'origine métabolique provenant de :
  - activité musculaire excessive.(réponse au froid, à une situation stressante, à un effort, lestage inaproprié)
  - Difficulté à l'expiration: respiration superficielle

Production exogène:

- présence accidentelle d'un taux de CO_2 dépassant 1% dans les bouteilles due au compresseur et à sa prise d'air.

Quels sont les facteurs qui participent à l'équilibre du CO_2?

L'équilibre du PH sanguin: le CO_2 participe à cet équilibre.

L'élimination du CO_2: dépend du gradient entre les deux extrémités du système ventilatoire et expiratoire.

La charge en CO_2: lorsque celle ci est d'origine exogène, la réponse ventilatoire est beaucoup moins importante que lorsque elle est d'origine endogène.

Le travail ventilatoire: en hyperbarie ce travail est augmenté (cf. cours appareil respiratoire).

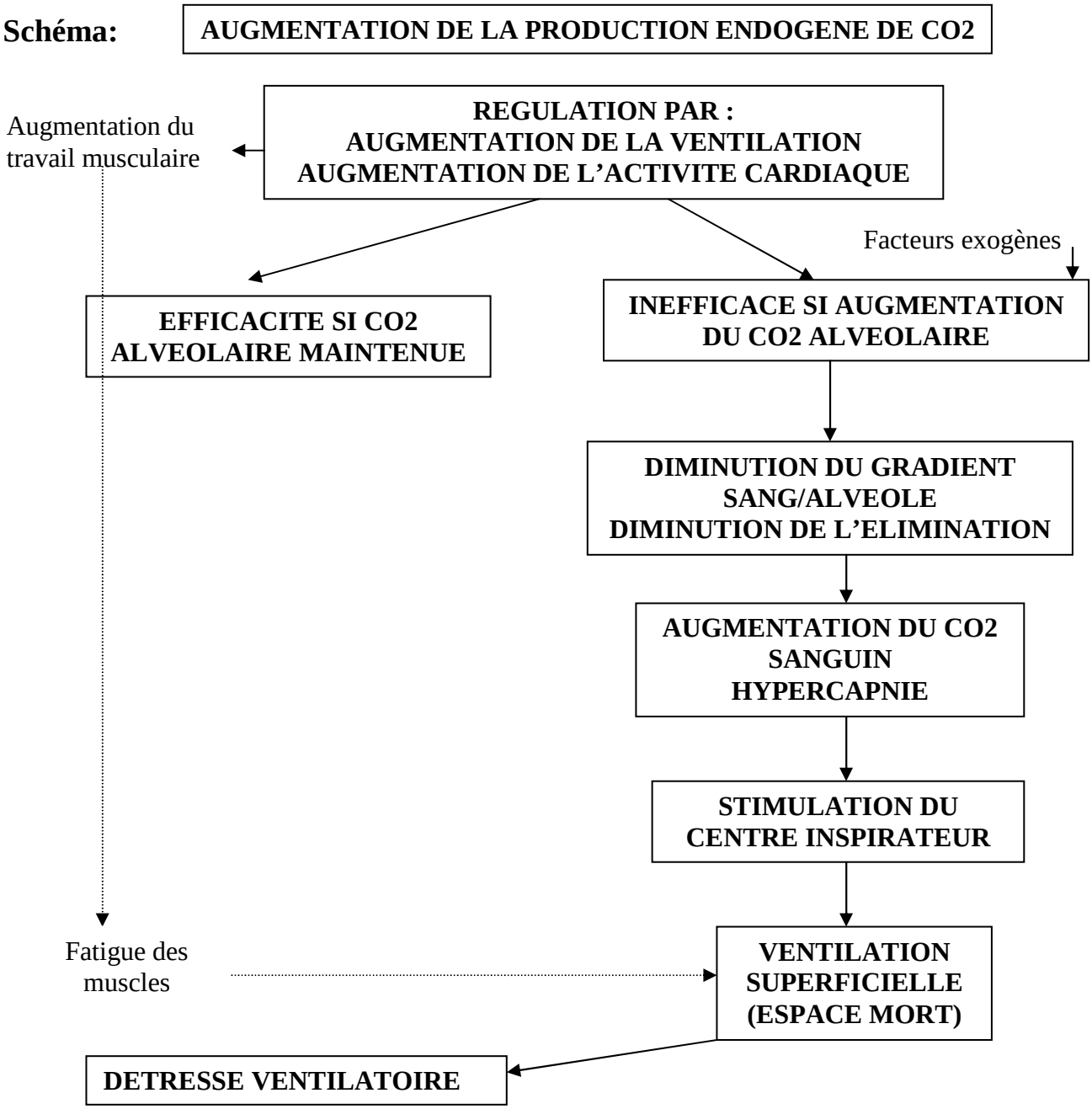
Sensibilité des centres respiratoires bulbaires aux variations du Co2 dans le sang

Comment arrive l'essoufflement:

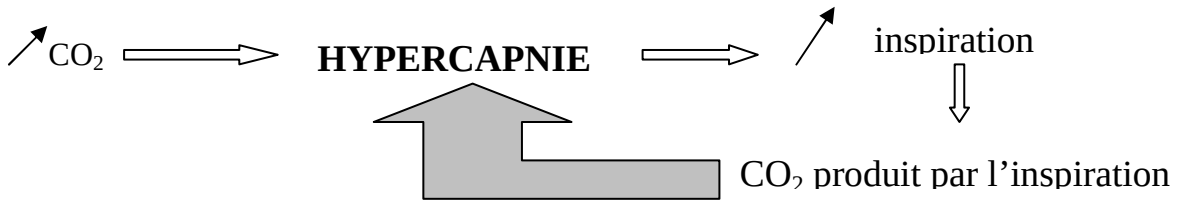
Comme nous avons pu le voir dans le cours sur la respiration il existe un état d'équilibre entre la CRF est le VC + VRI qui correspond à l'état de relaxation du système cage thoracique /poumons.
Or nous avons vu qu'au cours de la plongée, il se passait un certains nombre de modifications aboutissant à un déséquilibre entre le la CRF est le VC + VRI.
Se déséquilibre occasionne une augmentation du travail musculaire donc une augmentation de la production endogène de CO_2.
Pour combattre cette augmentation de CO2 sanguin, l'organisme met en place un système de régulation à la fois ventilatoire est cardiaque qui doit permettre de garder constant le taux de CO2 alvéolaire.

S'il parvient à garder ce taux constant, notre plongeur effectuera une bonne plongée.
Dans le cas contraire cela se terminera par une détresse ventilatoire

Schéma:



Dés qu'une augmentation de CO2 apparaît au niveau du sang des capteurs chimique informe le centre bulbaire inspirateur qui réagit par une augmentation de l'inspiration (phènomène actif qui produit du CO2, qui s'ajoute au CO2 déjà présent dans l'organisme) c'est le cercle vicieux de l'essoufflement.



Comment pouvons nous l'éviter:

- éviter le travail musculaire
- entrainement physique en endurance (résistance à la fatigue de muscles inspiratoires)
- entraînement à la plongée (habitude des muscles respiratoires à travailler dans des conditions inhabituelles)
- utiliser un matériel bien réglé

comment pouvons nous nous en apercevoir?

- production anormale de bulles
- dyspnée (difficulté à respirer)
- apnée expiratoire impossible
- problème de stabilisation (profondeur)

Quel réaction devons nous avoir?

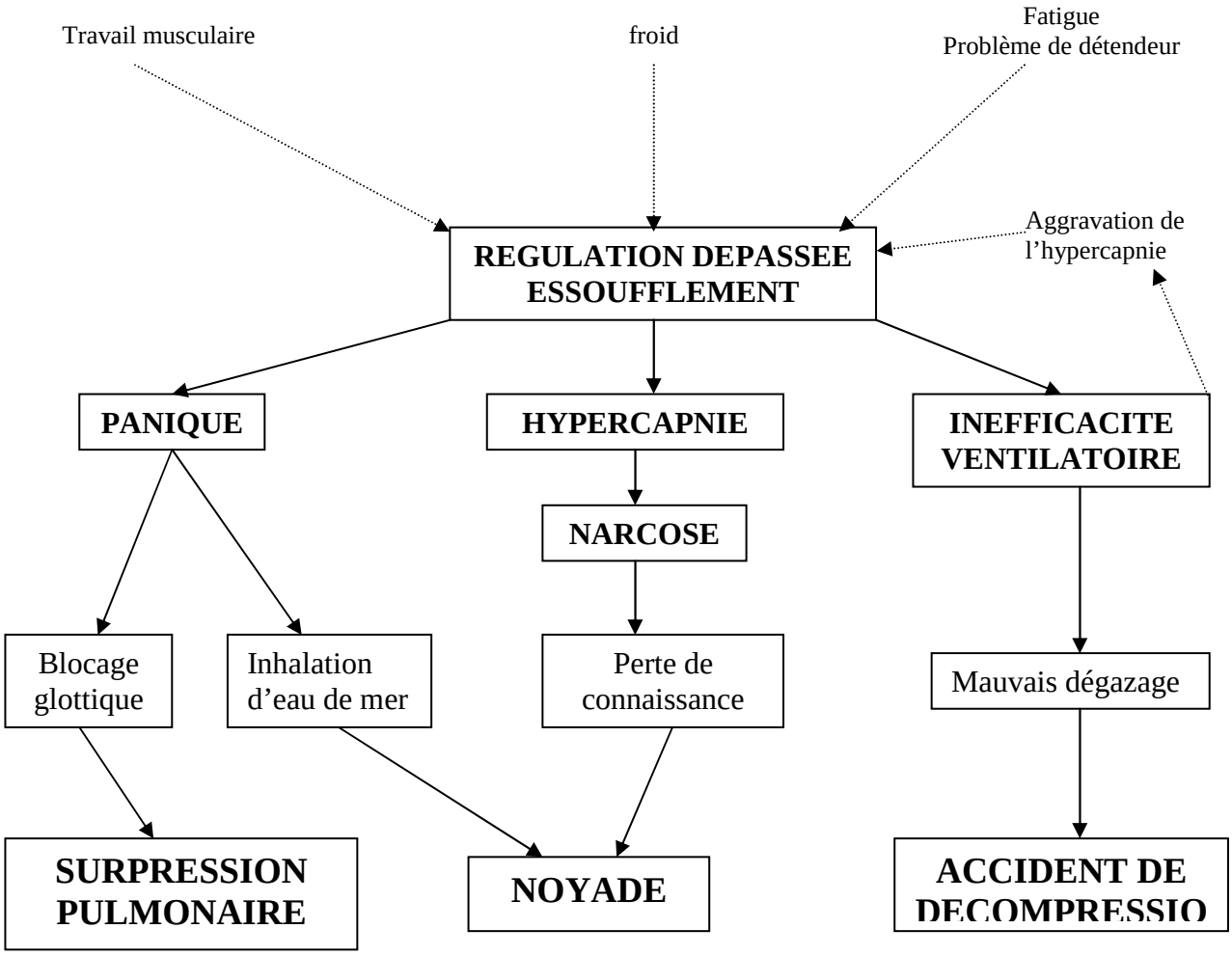
Dans l'eau:

- stopper tout effort musculaire
- remonter la personne
- la faire expirer
- maintenir le détendeur

en surface:

- oxygène
- traitement des accidents associés

Conséquences pour le plongeur:



LES ACCIDENTS BAROTRAUMATIQUES

Ces accidents dit mécaniques sont la conséquence de l'application de la loi de Mariotte

1) LE PLAQUAGE DU MASQUE

Ses origines :

Au cours de la descente, la pression ambiante augmente et l'air se trouvant dans le masque s'équilibre avec la pression extérieure. Le masque va se déformer jusqu'à sa limite d'élasticité. Puis une dépression va se créer à l'intérieur de celui-ci (l'air du masque est à une pression inférieur à la pression ambiante). Le masque va se coller sur le visage comme une ventouse.

Ses conséquences sur le plongeur :

- simple gêne (troubles de la vision)
- douleur
- éclatement des vaisseaux sanguins autour des yeux
- hématome des paupières inférieures
- saignements du nez

Comment les éviter ?

- Souffler dans le masque par le nez lors de la descente.
- Il faut faire attention avec les débutants qui n'ont pas le réflexe de souffler par le nez.
- Attention à la tension du masque qui doit être réglé avec la cagoule.

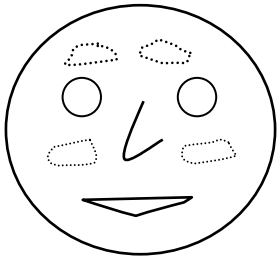
Que faire si nous ne sommes pas parvenus à les éviter ?

Les symptômes sont spectaculaires mais sont rarement graves et se résorbent rapidement. Il faut consulter un médecin ORL et ne pas plonger pendant quelques jours.

2) LES SINUS

Les sinus sont des cavités osseuses se trouvant dans la boite crânienne. Elles sont réparties symétriquement. Les principaux sont les sinus frontaux, maxillaires, ethmoidaux, et sphénoïdaux (os de la tête, base du crâne). Les sinus sont reliés par un canal étroit aux fosses nasales : l'OSTIUM

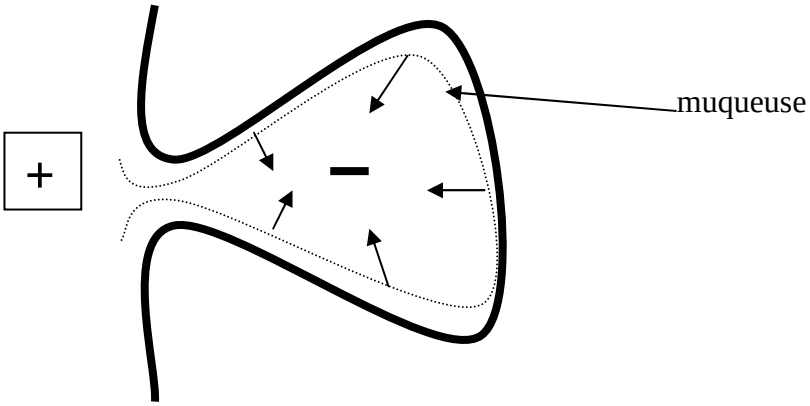
Schéma :localisation des sinus frontaux et maxillaires



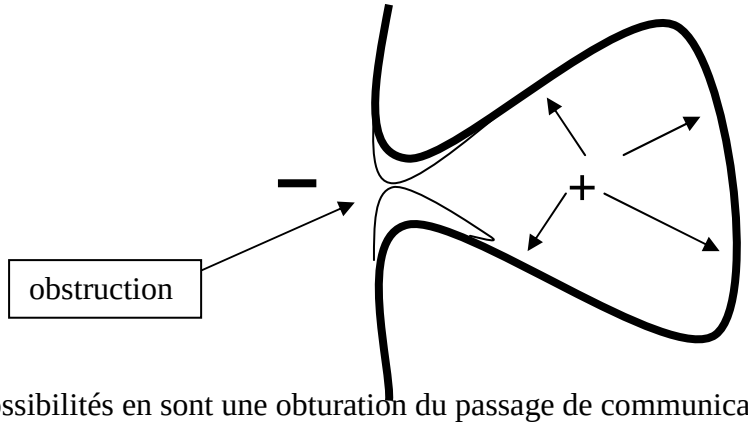
Pourquoi ça coince ?

Lors de la descente la pression augmente l'équilibrage se fait automatiquement, mais si celui-ci ne se fait pas il se crée une dépression dans la cavité concernée.

Cette dépression peut occasionner un décollement de la muqueuse qui tapisse la paroi des différents sinus.



Lors de la remontée l'air contenu dans ces cavités ne peut s'échapper entraînant une augmentation de la pression à l'intérieur de ces dernières occasionnant une gène avec douleur.



Les raisons de ces deux possibilités en sont une obturation du passage de communication avec l'oropharynx. donc l'équilibre ne peut ce faire.

Les différentes manifestations :

Lors de la descente :

- Douleur localisée au niveau du sinus concerné
- Décollement de la muqueuse.
- Inflammation
- Saignement

Lors de la remontée :

- Douleur
- atteinte de la muqueuse par compression

COMMENT EVITER SES DIFFERENTES MANIFESTATIONS ?

Eviter de plonger en cas de forte sinusite, rhume, etc.
Avant de s'immerger faire pénétrer de l'eau par le nez pour effectuer un rinçage des sinus.

Que faire si les manifestions apparaissent :

Si la douleur survient lors de la remontée, descendre puis remonter doucement afin de permettre à l'air de s'échapper. si la douleur persiste quand même et qu'elle ne passe, prévenir son camarade et forcer la remontée (attention risque de perte de connaissance si la douleur est trop violente).

Consulter un O.R.L.
Arrêt de la plongée provisoire en fonction de la gravité de l'atteinte.

……

3) LES DENTS

pourquoi ça coince ?

Une carie pas soignée ou un plombage mal positionné peuvent laisser une petite cavité. Au cours de la descente l'air pénètre dans la cavité, puis, lors de la remontée, l'air se dilate suivant la loi de MARIOTTE mais l'espace par lequel il a réussi à pénétrer est obstrué, gênant ainsi son élimination.

Manifestations :

- Violente douleur
- Expulsion du plombage
- Eclatement de la dent

Comment éviter ces manifestations ?

- visite périodique chez un dentiste (une par an)
- préciser au dentiste que vous êtes plongeur

Que faire si le problème arrive ?

- Stopper la remontée
- redescendre légèrement, remonter le plus lentement possible pour permettre au volume d'air de s'échapper de la cavité.

………………………………………………………………………………

4) LES OREILLES

L'atteinte des oreilles peut être localisée aux différentes parties de l'oreille à savoir l'oreille moyenne et/ou oreille interne.
Les barotraumatismes de l'oreille moyenne sont signalés dans à une à deux pour cent des plongées, ceux de l'oreille interne sont dix fois moins nombreux, mais beaucoup plus pénalisant par les séquelles qu'ils occasionnent

Les origines :

- accidents mécaniques en rapport avec des variations de pressions (lois de Mariotte).

Au niveau de l'oreille moyenne :

A la descente :

Déséquilibre de pression entre l'oreille externe et l'oreille moyenne dus à une obstruction de la trompe d'eustache. Cette obstruction peut être d'origine pathologique (rhume) ou anatomique (configuration de la trompe d'eustache)

au niveau de l'oreille interne :

A la descente :

- barotraumatisme mixte de l'oreille moyenne transmis à l'oreille interne.
- Barotraumatisme direct de l'oreille interne par coup de piston de l'étrier sur la fenêtre ovale ou par coup de pression sur la fenêtre ronde. Dont l'origine est une équilibration trop violente ou tardive.

A la remontée :

- vertige alternobarique qui comme sont nom l'indique est la manifestation d'une analyse par l'organisme d'une différence de pression entre l'oreille droite et l'oreille gauche occasionnant des vertiges.

Les différentes manifestations :

- Douleurs lors de la descente
- Acouphènes (bourdonnements, sifflements)
- Vertiges

- Syncope

Comment les éviter ?

- Ne pas plonger si enrhumé.
- Manœuvre d'équilibration
- Ne pas forcer pour équilibrer les oreilles.
- Ne pas obstruer le conduit auditif

Que faire si apparitions des manifestations ?

- Si vertiges lors de la remontée redescendre légèrement :
- si disparition, on peut penser à un vertige de type alternobarique.
- si non disparition, remonter lentement atteinte certaine de l'oreille interne.
- si douleurs lors de la descente sortir la personne ne pas forcer
- consulter médecin O.R.L.

••

5) LES COLIQUES DU SCAPHANDRIER

les origines :

Les gaz provenant de la fermentation des aliments ou l'air avalé en plongée se dilatent pendant la remontée.

Les manifestations :

S'ils ne peuvent s'échapper, par voie orale ou anale, les gaz provoquent :

- violentes douleurs abdominales.
- ballonnement

(Elimination possible par voies hautes par éructation, par voies basses par flatulences).

Les douleurs occasionnées peuvent entraîner une perte de connaissance avec les complications qui s'y ajoutent.

Comment éviter ces manifestations ?

- Eviter toute alimentation susceptible de favoriser une fermentation.
- Eviter les boissons gazeuses

Que faire si apparition des manifestations ?

Dans l'eau :

- Elimination par les voies naturelles

En surface :

- Médecin et évacuation vers centre hospitalier

••

6) LA SURPRESSION PULMONAIRE

L'accident est lié à la notion de pression et de volume (loi de MARIOTTE). Il arrive le plus souvent chez les débutants. Quand on souffle l'excès d'air des poumons lors de la remontée, tout se passe bien ; par contre, si on bloque la respiration à la profondeur ou l'on se trouve et que l'on remonte. L'air va se dilater et l'augmentation de volume peut entraîner des lésions graves de l'appareil ventilatoire.

Les facteurs favorisants :

- hauts :
  - blocage volontaire lors de la remontée (type R.S.E., échange d'embout, apnéiste respirant sur un détendeur)
  - vasalva à la remontée
  - spasme glottique (inhalation d'eau)
  - problème du au matériel :
    - blocage en débit continu
    - remontée P.A. non maîtrisée.
- bas :
  - bronche à clapet
  - asthme

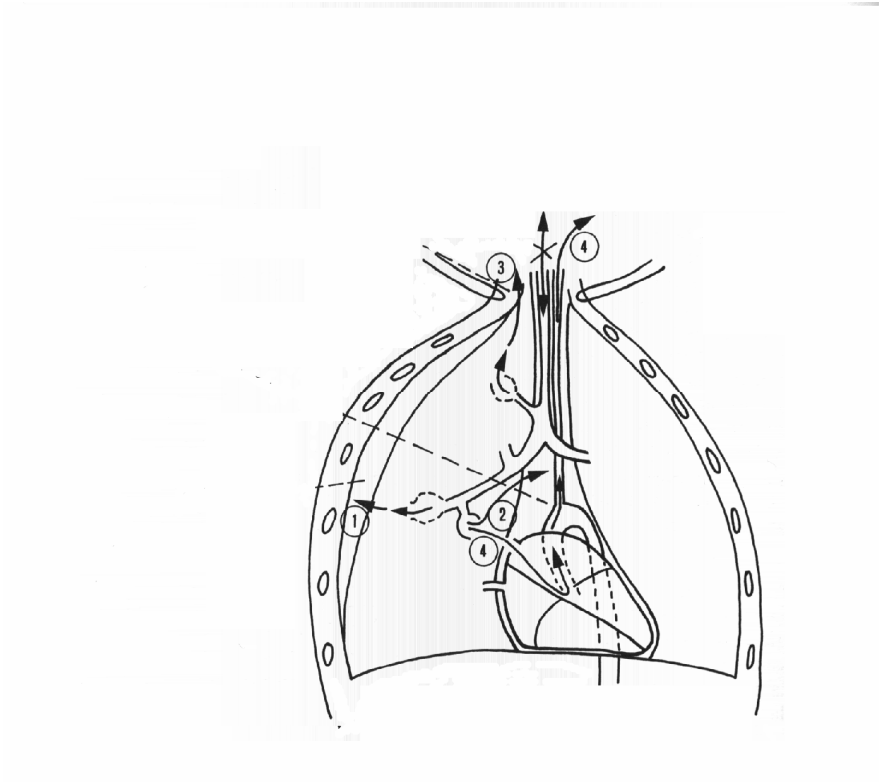
Son origine :

l'air présent dans les poumons ne peut plus s'échapper. Lors de la remontée vers la surface il se détend et dilate les poumons jusqu'à atteindre le seuil d'élasticité maximum de ces derniers.

Si nous prenons un ballon que nous gonflons jusqu'à atteindre son seuil d'élasticité celui-ci va éclater. C'est un peu le même problème que nous allons rencontrer au sein du corps humain car nous pouvons comparer les poumons à un ballon. La différence, c'est qu'il est en relation avec d'autres éléments de notre organisme.(cf. cours d'anatomie sur la respiration).
Au cours de cette dilatation, les alvéoles atteignant leur seuil d'élasticité, peuvent soit se fissurer (en périphérie), soit être comprimer contre d'autres alvéoles (à l'intérieur).

Que se passe-t-il au niveau de l'organisme ?

schéma :



<u>phase mécanique :</u> augmentation du volume de certaines alvéoles qui peut provoquer une déchirure ou fissure voire compression d'une ou plusieurs des alvéoles.
Provoquant ainsi plusieurs possibilités :

- ***compression des alvéoles voisines*** donc diminution des capacités ventilatoires.

- ***Pneumothorax :*** déchirure du feuillet viscérale de la plèvre occasionnant à ce niveau une perte de mobilité du poumon par non répercussion des mouvements de la cage accompagnée d'écoulement sanguin provenant de la plaie.

- ***Emphysème médiastinal*** : passage de l'air en dehors de l'alvéole cet air remonte le long de l'arbre bronchique pour passer au niveau du médiastin.

Donc compression du poumon éventuellement intact et compression mécanique du muscle cardiaque.

- ***Emphysème sous cutanée*** : (bouée).continuation de l'air provenant du médiastin. arrivée d'air dans la zone sous-cutanée du cou.

Phase physiologique :

***Aéro-embolisme* :** passage de l'air dans la circulation via le cœur gauche puis dans l'aorte et dans l'artère carotide provoquant des désordres d'ordres neurologiques.

Les différentes manifestations :

- **Générale :**
  - Pâleur.
  - fatigue intense.
  - froid.
  - personne cyanosé (coloration bleuâtre de la peau, due à une oxygénation insuffisante).

- **Pulmonaire :**
  - douleur thoracique rétro-sternale plus ou moins violente
  - gène respiratoire
  - toux et crachats sanglants(du sang dans les alvéoles)
  - difficultés ventilatoires

- **Neurologique :**
  - perte de sensibilités diverses(paresthésies).
  - Pertes de motricité diverses de type hémiplégique
  - troubles visuels et auditifs
  - troubles de la parole
  - convulsions

Comment éviter ces différentes manifestations ?

- expiration lors de la remontée
- pas de valsalsa lors de la remontée.
- bon fonctionnement du matériel.
- respect des contres indications médicales

Que faire en cas d'apparition d'une des manifestations ?

Même si c'est limité à une distension alvéolaire, on se trouvera en présence d'un handicap ventilatoire.

- Sur le terrain :
  - décubitus dorsal (position semi-assise)
  - oxygénothérapie (15l/mn)
  - ventilation assistée si nécessaire
  - prévenir le C.R.O.S.S.M.E.D.

- En caisson :
  - Recompression thérapeutique

LE FROID

Caractéristiques de l'homme :

L'homme est un homéotherme (les parties profondes ont une température constante). Cependant, l'enveloppe du corps (peau, tissus sous-cutanés et muscles squelettiques) a une température variable en fonction de celle du milieu ambiant.

La température du noyau central, comprenant les organes profonds (cerveau, organes du thorax et de l'abdomen) est maintenue constante grâce à l'équilibre entre les quantités de chaleur reçue et produite et la quantité de chaleur perdue. Il s'agit de la thermorégulation.

Les différents types d'échanges thermiques

Radiation: transmission par ondes électromagnétiques (rayonnement).
Ex: le soleil à la plage.

Conduction: échange entre l'organisme (la peau) et les objets en contact. Un gradient thermique est nécessaire. Ces échanges de chaleur ont lieu à travers un milieu sans mouvement de la matière qui les compose.
Ex: Poser une pierre chaude sur un plaque froide.

Convection: Echange thermique de l'organisme avec les fluides au contact (gaz ou fluides). Il est fonction de la surface de contact et de la conductivité thermique du fluide.
Ex: convecteur électrique (le fluide s'échauffe et se met en mouvement).
➪ peau et le fluide qui l'entoure (air ou eau),
➪ muqueuses des voies aériennes et gaz respirés.

Evaporation: Si la température est trop élevée, si les rayonnement, conduction et convection ne sont pas suffisants, la chaleur doit être perdue par évaporation (transpiration).

Les sources de chaleur

La thermogenèse

Au repos, elle est due :
à plus de 50% aux organes internes,
environ 20% aux muscles et à la peau,

L'activité physique permet une thermogénèse dont 90% est due aux muscles.

La chaleur reçue

Uniquement lorsque $t_{ambiante} > t_{cutanée}$

LA THERMOREGULATION

Principes

But: Maintenir la température centrale constante (valeur de consigne) malgré les variations de quantités de chaleur (reçue), produite ou perdue.

La valeur de consigne est de 37°C.

Symptômes observés lors de la baisse de la température centrale:

36°C	Frissons sporadiques continus
33°C	Hallucinations
32°C	Trouble du rythme cardiaque
30°C	Perte de connaissance
25°C	Irréversibilité

Le centre de contrôle de la thermorégulation est l'hypothalamus (glande du cerveau proche de l'hypophyse) où sont localisés des récepteurs sensibles à la température et qui enregistrent la température du noyau central. Ces récepteurs centraux sont sensibles à de très faibles variations de température.

D'autre part, il reçoit des informations complémentaires venant des récepteurs périphériques de la moelle épinière et de la peau, qui sont sensibles à des variations de température plus importantes.

La température effective du corps est comparée à la valeur de consigne.

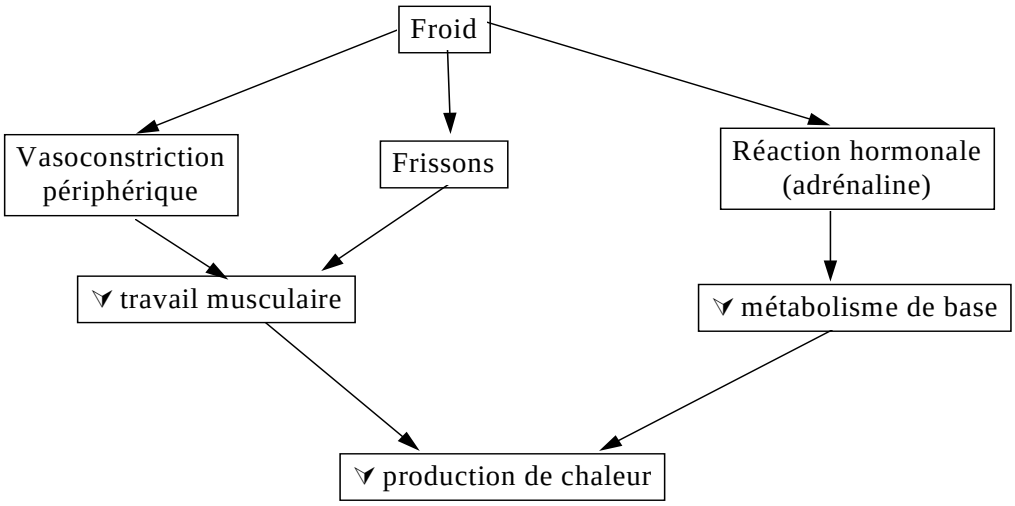
1) $T_{centrale} > T_{consigne}$ ➪ « trop chaud », pas en plongée.

2) $T_{centrale} < T_{consigne}$ ➪ l'organisme puisera dans ses réserves pour favoriser la thermogenèse :

– Vasoconstriction cutanée :diminution de la quantité de sang périphérique et diminution de la conduction.

– Déclenchement de frissons et auripilation des poils (inefficaces pour produire de la chaleur mais plutôt signal d'alerte). L'hypoxie et l'hypercapnie inhibent le frisson.

– Réaction hormonale qui accroîtra la thermogenèse en augmentant les combustions (adrénaline et noradrénaline provenant des glandes médullo-surrénales, thyroxine produite par la thyroïde). Augmentation du métabolisme de base: réaction chimique libérant de la chaleur au niveau cellulaire.



$T_{centrale}$ = 37°C
$T_{périphérique}$ = 28 et 33°C (ne peut pas descendre en dessous de 10°C).

Equilibre thermique pour un homme nu:
dans l'eau à 33°C,
dans l'air à 25°C.

<u>Conséquences de l'immersion en eau froide</u>

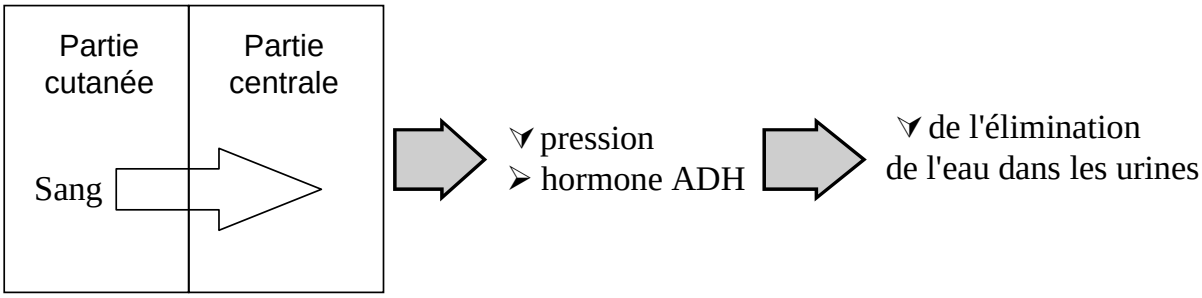
Les échanges thermiques se font principalement par:

– conduction au niveau de la peau (rôle de la combinaison),

– convection au niveau de la peau (mouvement d'eau),

– la respiration: l'air comprimé respiré est froid du fait de sa détente. Echanges par conduction et convection.

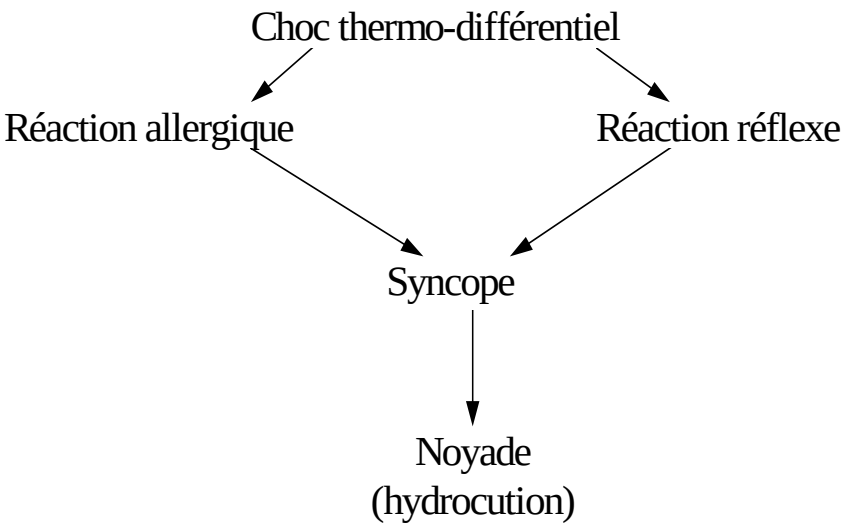
Il y a redistribution du sang entre la peau et les organes profonds: vasoconstriction périphérique (comme des robinets qui se ferment et empêchent l'irrigation des extrémités). Le sang quitte l'enveloppe pour limiter les pertes de chaleur et se concentrer vers les organes du noyau central.
Il y a vasodilatation interne qui implique une augmentation du débit cardiaque, une diurèse (augmentation du volume d'eau dans les urines) et une hémoconcentration (le sang devient plus concentré, l'eau en excès est éliminée par les reins, phénomène visant à épaissir le sang pour limiter les déperditions).
D'où l'importance de se réhydrater après la plongée (en plus, prévention des ADD).



L'hormone ADH (antidiurétique Hormone) a pour rôle de réabsorber l'eau des urines dans l'organisme.
Attention, ces phénomènes favorisent la fatigue musculaire (crampe = production d'acide lactique) et l'essoufflement.

LE CHOC THERMO-DIFFERENTIEL

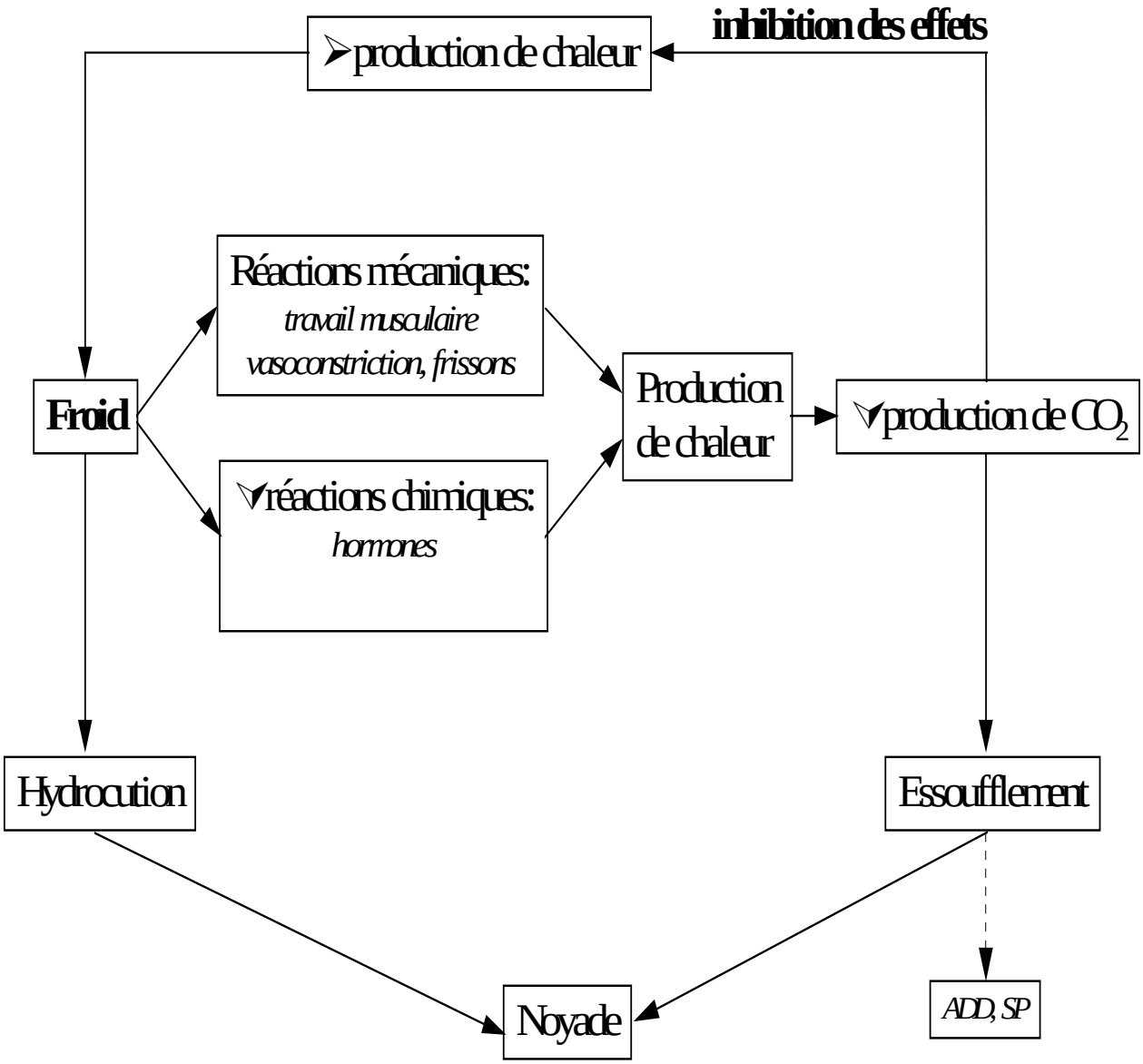
Ecart important entre la température de l'eau (20 à 23°C en été) et celle du corps (habillé avec la combinaison, et exposé en plein soleil).
Il peut être dû à une réaction allergique (au froid, à l'eau, au plancton, aux méduses,...) ou à un réflexe neuro-endocrinien vasculaire.
➪ Syncope ➪ noyade.
On parlera d'hydrocution lorsque la syncope survient dans l'eau.



LE COMPORTEMENT DE NOTRE PLONGEUR FACE AU FROID DANS L'EAU ?

- plongeur prostré, recroquevillé,
- production importante de bulles,
- désintéressement à la plongée.

Les effets dus au froid:



Comment limiter le risque ?

1°) Avant la plongée:

- Se protéger du froid pour s'équiper,
- Vêtements chauds
- Fatigue = facteur aggravant car plus sensible,
- Alimentation: apport calorique.

2°) Pendant la plongée

- Combinaison adaptée aux conditions de plongée et à la morphologie,
- Mise à l'eau progressive,
- Diminuer le temps d'exposition,
- Diminuer la profondeur,
- Eviter les longs paliers,
- Ne pas uriner dans la combinaison, (car réaction chaud / froid),
- Etre attentif à son comportement et celui des autres.

3°) Après la plongée:

- S'habiller au sec et à l'abri,
- S'hydrater,
- Vêtements chauds,
- Pas d'alcool (car si à jeun entraîne une hypoglycémie chez un sujet venant de fournir un effort musculaire dans un environnement froid (➪ chute de le température centrale)),
- Alimentation.

LA NOYADE

1-DEFINITION :

Submersion des voies aériennes supérieures, par de l'eau ou tout autre liquide, aboutissant à une asphyxie aiguë avec ou sans inondation broncho-alvéolaire.

2-LES DIFFERENTS TYPES DE NOYADE

- **Noyade primaire :** Il y a inhalation d'eau, ce qui aboutit à l'inondation des voies respiratoires.

Elle survient:

- pour des nageurs inexpérimentés ou ayant présumés de leurs forces,
- lors d'une immersion accidentelle,
- en raison d'incidents techniques (matériels défectueux, incarcération dans une épave ou un filet en plongée,...).

- **Noyade secondaire :** Elle fait suite à une syncope (perte de connaissance).

Syncope = arrêt momentané ou affaiblissement des battements du cœur.
Les causes sont :

- maladies antérieures (spasmophilie, épilepsie, diabète, infarctus,...),
- traumatisme (perforation du tympan, choc bateau),
- cause neurovégétative (choc thermo-différentiel),
- allergiques (eau froide, méduses, rascasses, ...),
- « rendez-vous syncopal des 7 mètres » (apnéistes),
- inhibition émotive (peur de l'eau).

LES MECANISMES DE LA NOYADE : L'EAU PEUT ETRE INHALEE (POUMONS) OU AVALEE (ESTOMAC).

Dans Les poumons : quelques cm^3 de liquide suffisent.

Il y a engorgement sérieux et brutal des alvéoles pulmonaires entraînant la destruction du surfactant (mince pellicule lubrifiante protéinée tapissant la membrane de l'alvéole = épithélium). Il évite que les alvéoles pulmonaires se collabent, permet l'hématose et évite les infections.
Suivent une hypoxie puis une anoxie.

Dans L'estomac : 2 à 5 litres de liquide.

Les signes sont vomissements et diarrhées.
Il ne faut pas essayer de vider la victime, qui est en général consciente, en la secouant car on risque de faire passer de l'eau de l'estomac vers les poumons. Il faut la placer dos au sol en attendant les secours.

LES 4 STADES DE LA NOYADE (CLASSIFICATION DE BORDEAUX)

Stade 1: Aquastress :

Il ne s'agit pas vraiment d'un noyé: il a avalé 1 ou plusieurs tasses.(anxiété, épuisement, froid)

Couvrir la victime avec une couverture, donner une boisson chaude (pas d'alcool), la rassurer.

Stade 2: le petit hypoxique :

Début de noyade avec inhalation liquidienne modérée (un peu d'eau).
➪ anxiété, épuisement, froid, respiration perturbée (petite toux).
Couvrir la victime avec une couverture, donner une boisson chaude (pas d'alcool), la rassurer, aller chez le médecin pour éviter toute infection.

Stade 3: le grand hypoxique :

Il s'agit d'une vraie noyade.
Il y a inhalation d'eau et plusieurs alvéoles sont détruites.
➪ La victime se débat, revit sa noyade.
La placer au sol (PLS si inconscient). La placer sous oxygène, la couvrir et appeler les secours.

Stade 4: la grand anoxique :

Il s'agit d'une noyade avec imminence d'arrêt cardiaque. Inhalation conséquente d'eau.
➪ Inconscient, arrêt ventilatoire, circulation presque nulle, état de mort apparente.

Rappel: 2 insufflations puis MCE (seul 15/2, à deux: 5/1).
Pour hisser un noyé à bord, utiliser un bout.

Alerter les secours: VHF, canal 16
Téléphone portable, composer le 112

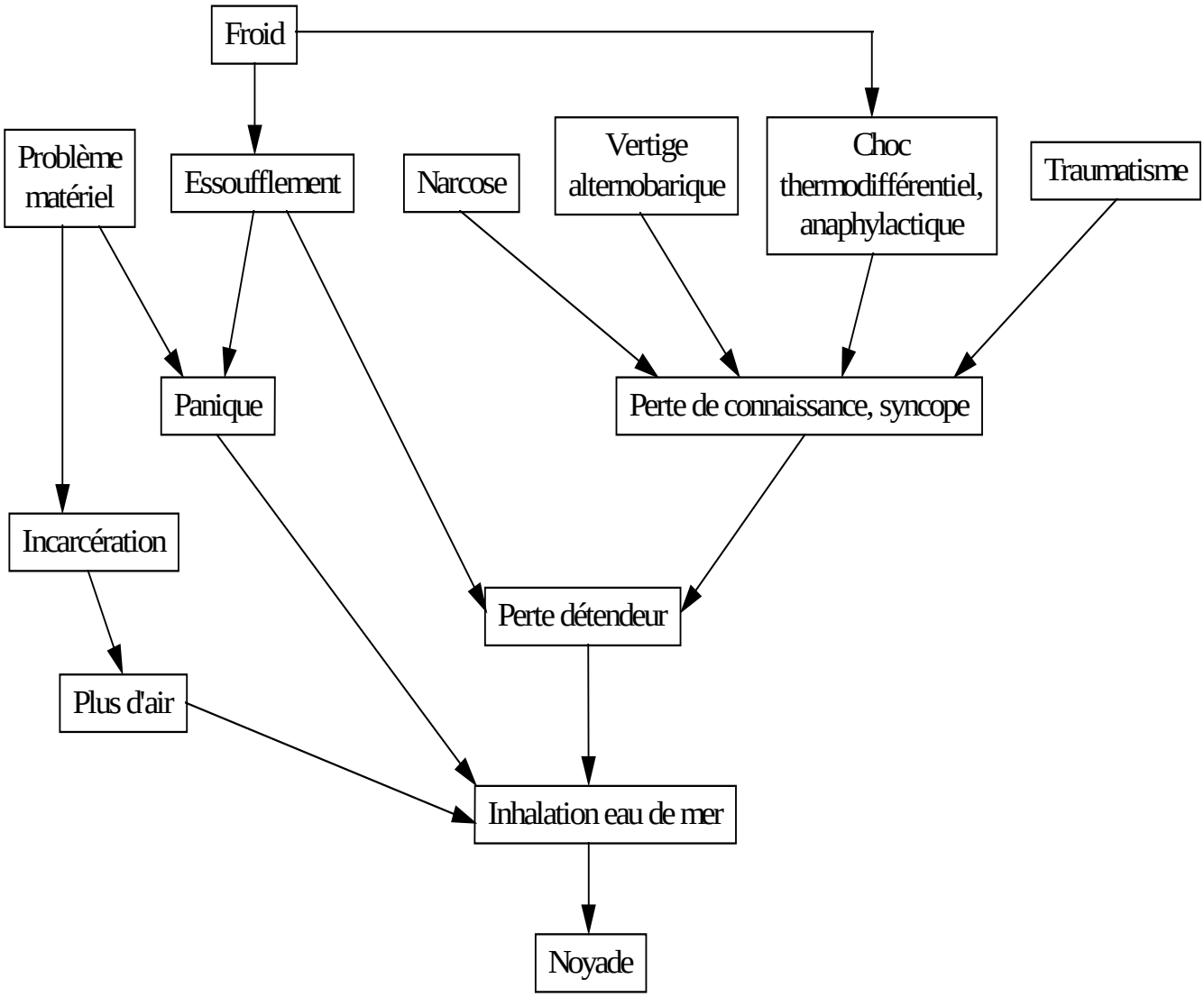
1- BILAN SUR LES 4 STADES

	Etat de conscience	**Activité ventilatoire**	**Efficacité cardio-circulatoire**
Aquastress	+	+	+
Petit hypoxique	+	+/- Encombrement trachéo-bronchique	+
Grand hypoxique	+/- Agitation	+/- Encombrement trachéo-bronchique et œdème aigu du poumon	+
Grand anoxique	- Inconscient	- Inefficace	- Pas de pouls

<u>Œdème aigu du poumon</u> :
Atteinte des alvéoles (baisse des pressions capillaires pulmonaires, épaississement de la paroi alvéolo-capillaire, altération du surfactant dû à l'inhalation d'eau). Passage de sang dans les alvéoles.
Il est responsable de perturbations :
– de la mécanique ventilatoire (augmentation de la résistance des voies aériennes),
– anomalie du flux sanguin aux abords des alvéoles (capillaires pulmonaires),
– troubles de l'hématose.
Conséquence = hypoxie (signe = sensation d'étouffement, manque d'air).

En plongée :

La noyade est la cause principale de décès en plongée. Tout incident de plongée peut être à l'origine d'une noyade :
- narcose,
- panique,
- vertige (type alternobarique),
- panne d'air (suite à une incarcération dans une épave ou un filet),
- essoufflement, ...



LE MATERIEL

Le matériel en plongée ne se limite pas uniquement à ce dont nous avons l'habitude de parler, c'est à dire aux détendeurs, ordinateurs et un peu aux stabs.

Chaque matériel nécessite une explication quant à ses possibilités d'utilisations. Par exemple, c'est en expliquant pourquoi un masque est étanche, qu'on expliquera aussi pourquoi il ne faut pas trop le serrer. De même sur une stab, la répartition des volumes va intervenir sur la stabilité en plongée. De ce fait on ne placera peut –être pas les plombs au même endroit.

Ce qu'il faut retenir la dedans, c'est qu'on choisit un matériel en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire, et comme bien choisir, c'est connaître essayons d'avancer un peu…

GENERALITES

1) NOTIONS D'ETANCHEITE ET DE FORCES

L'air comprimé ayant été stocké dans une bouteille ou bloc, plusieurs dispositifs vont intervenir en chaîne pour détendre cet air et la fournir au plongeur à sa demande.

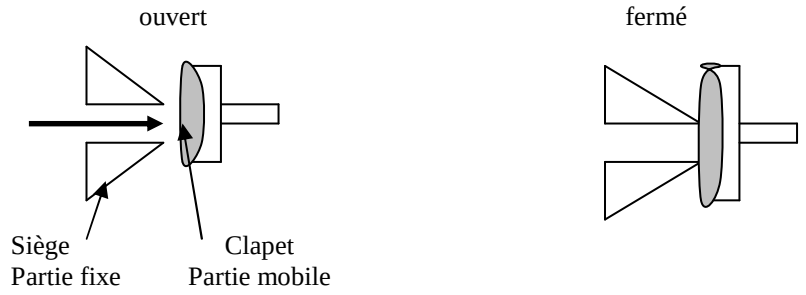
Avant de détailler les éléments de cette chaîne, il convient de rappeler certains principes généraux :

1)FORMULE DE BASE :

$$P=F/S$$

2) NOTIONS D'ETANCHEITE

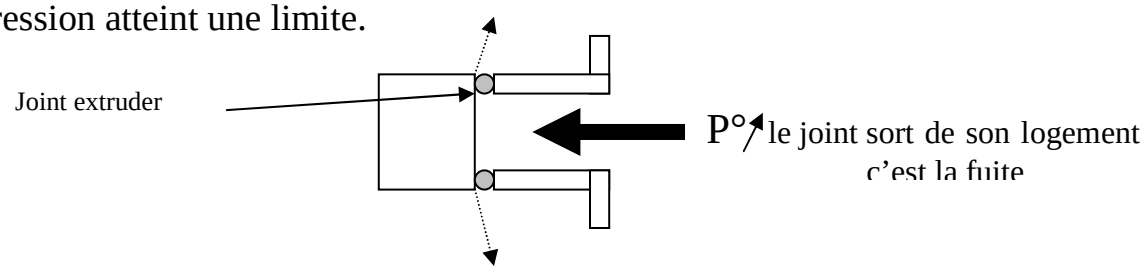
Pour ouvrir ou fermer le passage de l'air demandé au travers des orifices de la chaîne de fourniture d'air, on utilise le principe du siège clapet :



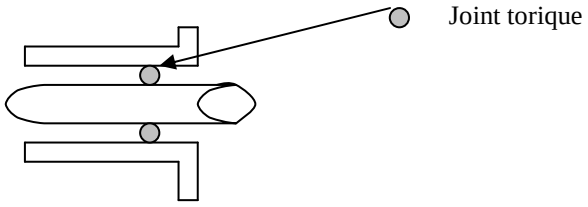
Le siège est généralement en métal (bronze nickelé ou acier inox) et le clapet en matière souple (souvent Téflon) de manière à favoriser l'obtention de l'étanchéité en position fermée **(le siège « marque », en pénétrant dans le clapet souple**) et à reporter sur une pièce unique, facile à changer et d'un coût faible, l'usure du système.
Il existe des exceptions comme un clapet métallique sur un siège métallique, notamment au niveau des réserves, et des sièges souples avec des clapets métalliques.

L'étanchéité au niveau d'un détendeur est également assurée par d'autres systèmes que sont les joins. Il en existe différentes sortes selon l'endroit ou on les place au niveau d'un détendeur. En plongée on en rencontre 3 sortes :

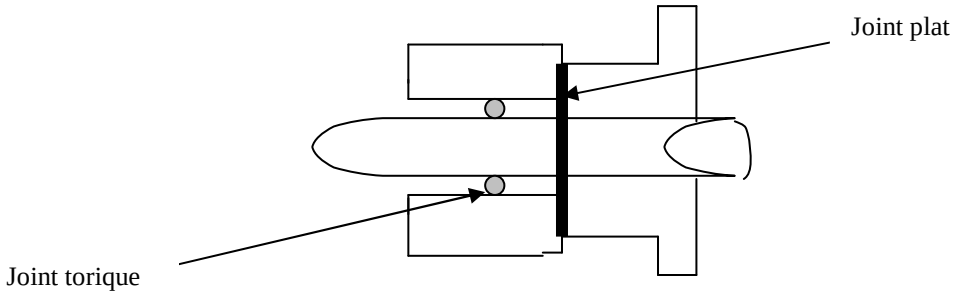
❁Le **joint extrudeur**, il saute automatiquement par mesure de sécurité lorsque la pression atteint une limite.



❁Le **joint Torique**, c'est celui que l'on rencontre au niveau de la robinetterie. On l'utilise pour toutes les parties qui tournent sur un détendeur :

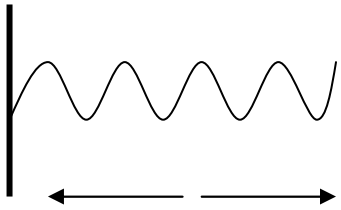


❁Le **joint plat**, qui intervient pour des serrages relativement important.
(type robinetterie)



2) Ressort

C'est le système métallique qui permet de créer une force en exerçant une certaine pression sur une surface.
La force d'un ressort est déterminée à partir de trois variables :



Caractéristiques du métal
Le nombres de spires
Le diamètre des spires

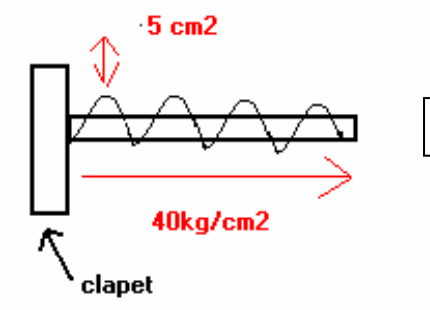
On dit que le ressort est **taré à une certaine force.**

On peut utiliser un ressort de deux manières, soit en l'étirant soit en le comprimant, dans les deux cas on crée des forces qui sont identiques au niveau de leur intensité et de leurs directions mais dont le sens est inverse.

En plongée, on rencontre au niveau des premiers étages de détendeurs, des ressorts tarés à environs 8 bars. (Nous en reparlerons largement). Comme les surfaces des clapets sont de 5 cm2, on en déduit que les ressorts exercent une force de **40 Kg/cm2.**

le réglage est fonction :

de la surface de contact
de la force



P = F/S = 40/5 = 8bar

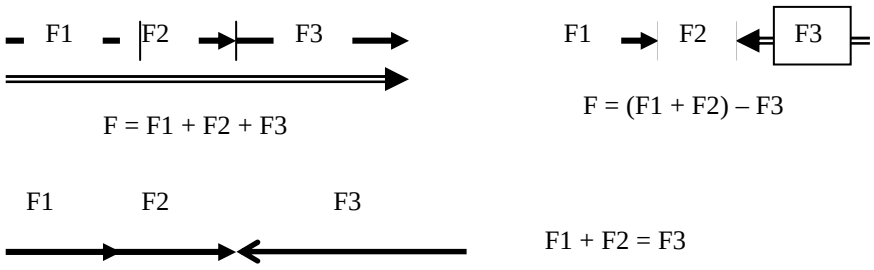
Il est possible de modifier le tarage du ressort soit en l'étirant, soit en le comprimant. Dans ce cas le système n'est pas fixe. Un détendeur Beuchat, par exemple à un ressort sur lequel on peut intervenir par une vis de réglage ,ou chez scubapro en rajoutant des rondelles d'épaisseur.

3) LES FORCES

Elles s'expriment en newton ou Kg/cm2.
Elles sont définies par certaines caractéristiques :

- sens
- origine
- direction
- intensité

Le schéma suivant illustre que les forces peuvent soit s'ajouter les unes aux autres soit au contraire s'annuler parce que leur direction est contraire et leur origine n'est pas la même. Dans un système où interviennent plusieurs forces (générés ou non par des ressorts) on détermine une résultante des forces qui indiquera le sens final de variation du système.



1) LE COMPRESSEUR

- composition :
  - un ensemble de compression
  - un moteur d'entraînement
  - thermique
  - électrique
  - un système de refroidissement
  - un système de décantation
  - un système de filtration
  - système de sécurité
  - manomètre de contrôle

  } Entre les deux une liaison mécanique tel que courroie ou chaine

- généralité : (basé sur la loi de Mariotte pour des P° < 250 b)

il se caractérise par son :

- type
- débit en m^3/h
- la P° service
- le système de refroidissement
- le nombre d'étage

Pour des pression supérieur à 250 bar il faut appliquer un facteur de compressibilité qui varie en fonction de la température et de la P°.
A titre d'exemple : le facteur de compressibilité F est égal à 1/105 pour 300 b à 20°c.

a) son type :
- cylindre :
  - à plat
  - en V
  - en étoile
  - en ligne
- soupape :

- piston fixe
- piston flottant

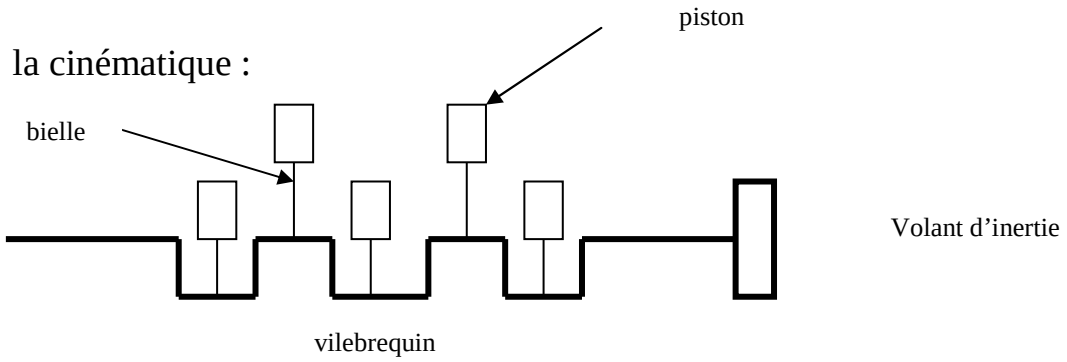
b) son système de refroidissement :

- air
- eau (circuit ouvert ou fermé)
- eau + air

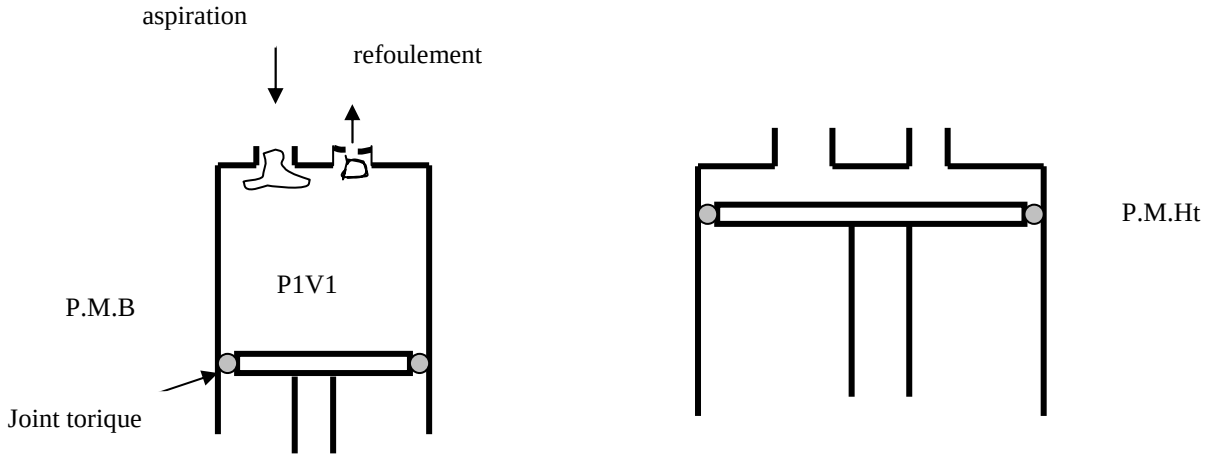
b) sa lubrification :

- huile minérale ou synthétique
- caractéristique alimentaire
- indice de corradson élevé
- miscible à l'eau

c) la cinématique :

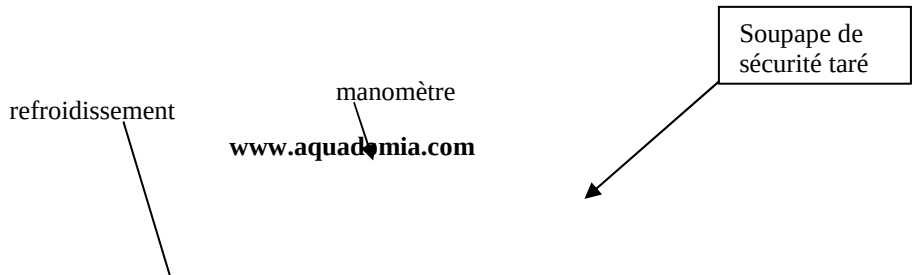


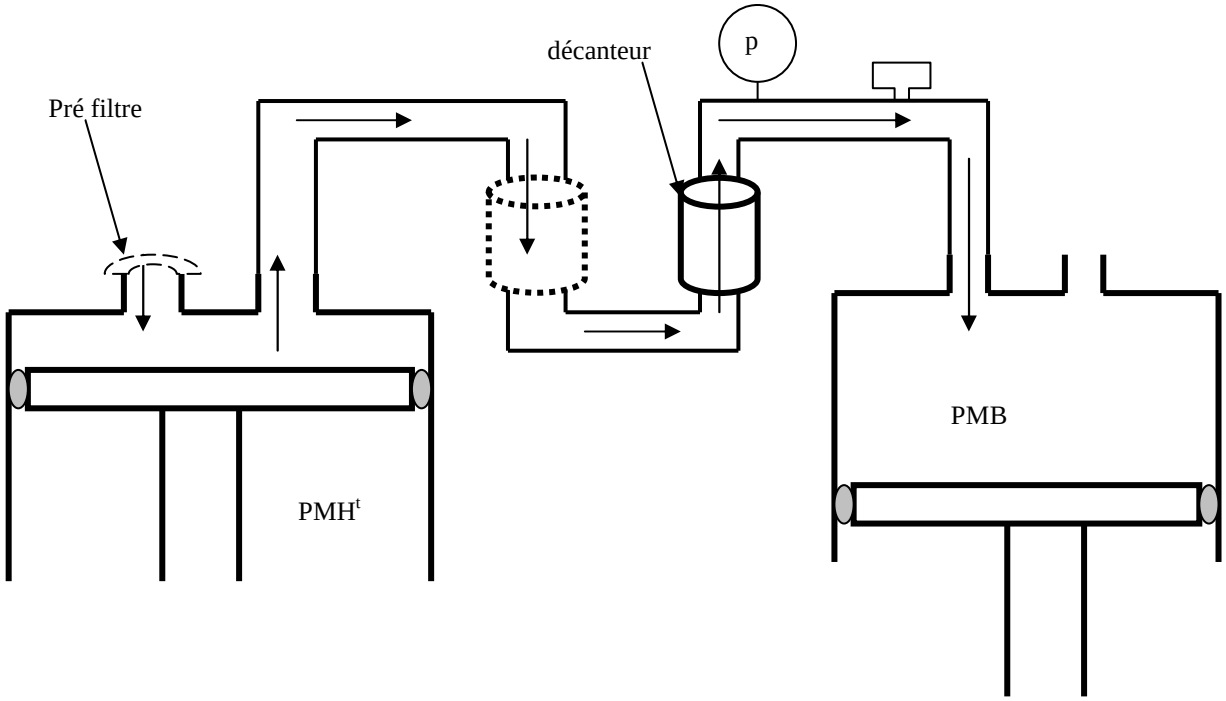
d) le piston :



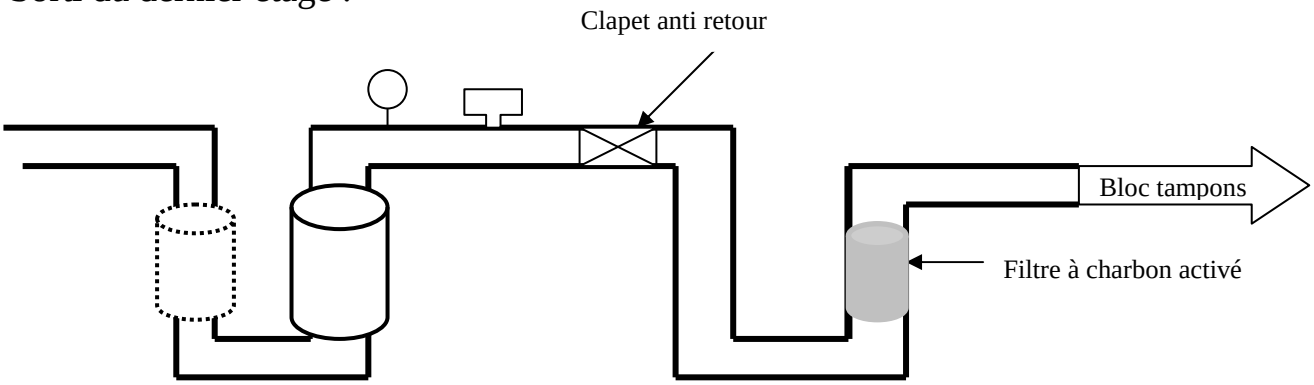
PMB = point mort bas
PMHt = point mort haut
Le point mort bas du deuxième étage est égal au volume du point mort haut du premier étage
Débit = volume du premier étage x nombre de fois ou le volume est aspiré en 1 h

Schéma de principe





Sorti du dernier étage :



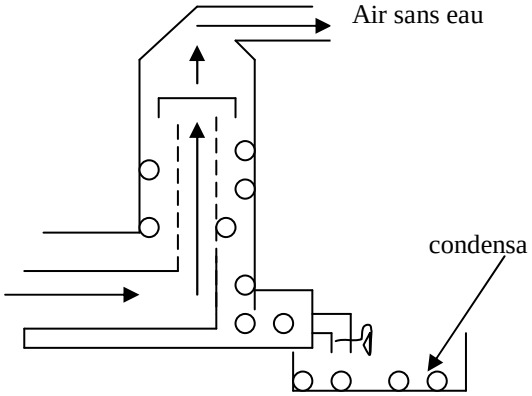
Le clapet anti-retour permet :

- de démarrer le compresseur à vide
- évite à la bouteille de se vider

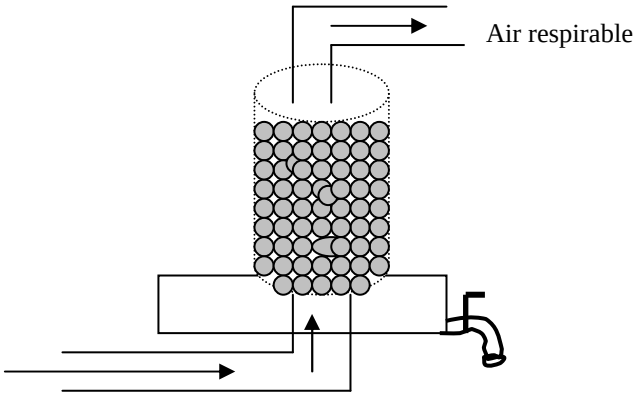
e) la filtration

deux types de filtration

le décanteur :



filtre à charbon actif :



Le stockage de l’air :

A la sortie de mon compresseur l'air que je comprime doit être stocker dans des récipients pour que je puisse l'utiliser par la suite.
Quels sont les différents types de récipients ?

Il existe deux grande familles de bouteilles selon que les matériaux de fabrication sont en acier ou en aluminium.
Le volumes des bouteilles peut varier en fonction de l'utilisation que l'on en fait.

Les bouteilles en acier :
L'acier utilisé est un alliage de fer et de carbone. On a ensuite traité la surface avec d'autres composant tel que le chrome ou le mobyldène, ceci offrant à l'acier des propriété antioxydantes
Il est existe deux type de méthodes de conception de fabrication :

- la méthode française : ROTH qui procède par chauffage et fluotournage, il en résulte que les parois du fond de la bouteille seront plus épaisses.

- la méthode allemande IWK qui procède par emboutissage et filetage à chaud, le résultat en est une constance d'épaisseur des parois.

Les bouteilles aluminium :
Elles présentent l'avantage d'être moins lourdes.

Sur les blocs nous retrouvons un certains nombres d'inscriptions :

- numéro d'identification
- la date de 1er épreuve et poinçon du service des mines
- la pression de service
- la pression d'épreuve
- la température préconisé pour le chargement (15°c)
- la nature du gaz contenu
- le volume en litre
- les dates des différentes réepreuves, assortie du poinçon du service des mines et de l'A.P.A.V..

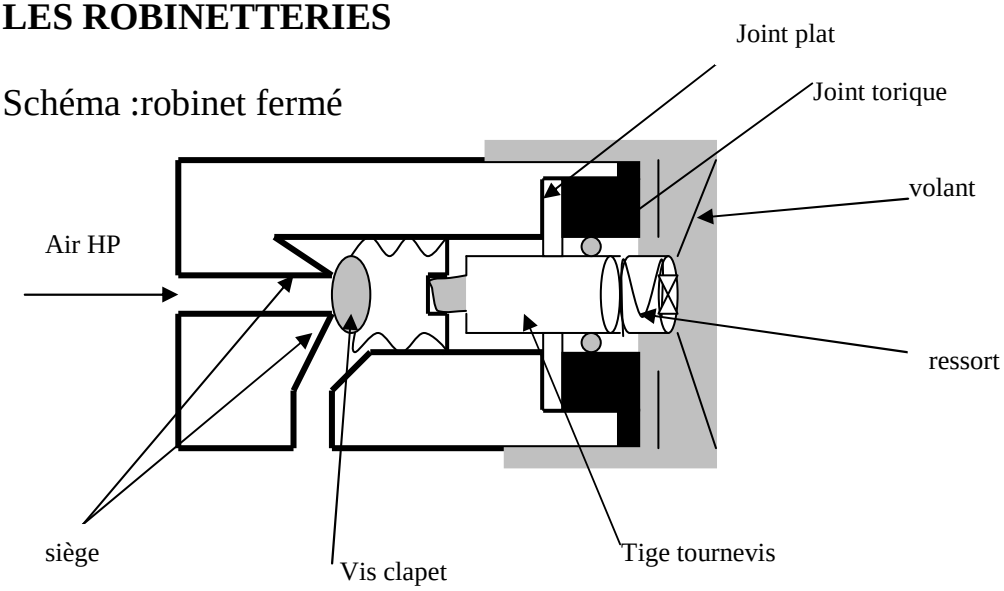
la réglementation des blocs (voir réglementation des bouteilles)

BOUTEILLES	VISITE	REEPREUVES
FIXE	3 ANS	10 ANS
SEMI FIXE	3ANS	5 ANS
MOBILE	ANNUEL SI TIV	5 ANS
		2 ANS

Une fois que l'air est positionner dans les bouteilles il faut pouvoir le maintenir.

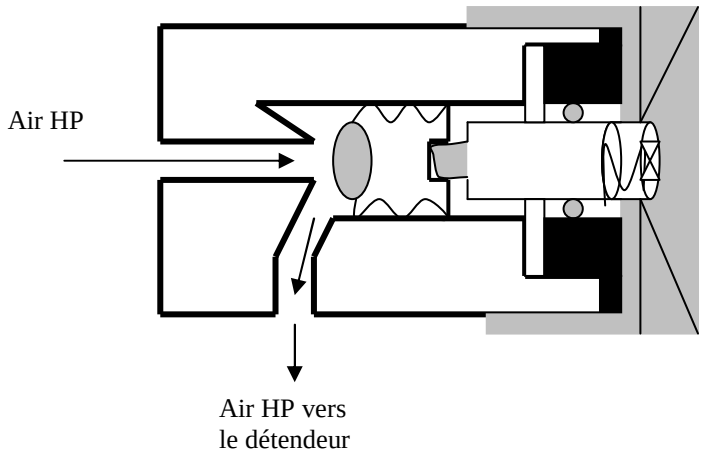
LES ROBINETTERIES

Schéma :robinet fermé



Quand je tourne le volant dans le sens de l'ouverture il y a un mouvement de translation qui se répercute au niveau de ma vis clapet par l'intermédiaire de ma tige tourne vis qui va ainsi faire reculer ma vis clapet laissant ainsi libre le passage de l'air vers mon premier étage.

Robinet ouvert



les pannes :

- problème d'étanchéité au niveau du siège clapet (fuite permanente)
- usure d'un des deux joints du système de manœuvre

LES RESERVES

Nous ne ferons qu'un tour de la question dans cette partie, ceci en raison de l'utilisation importante aujourd'hui des manomètres dans la plongée loisir.

Techniquement il y a deux moyen de savoir si l'on est sur réserve :
La lecture directe sur le manomètre
Des moyens indirects qui fonctionnent mécaniquement en fonction de la pression régnant dans la bouteille et provoquant une gène à l'inspiration quand celle ci atteint environs 50 bars.

Trois système principaux :

- à rampe hélicoïdale
- à barillet
- à excentrique

LES DIFFERENTS MOYENS DE MESURER LA PRESSION

Il existe plusieurs techniques de mesure de la pression.
A quoi cela sert il ?
D'abord à contrôler la quantité d'air qui se trouve dans une bouteille ou dans un tampon, c'est typiquement le cas du manomètre, dans ce cas il s'agit d'une pression d'un gaz. Mais il est également nécessaire de mesurer la pression hydrostatique pour déterminer la profondeur à laquelle on se trouve. Aujourd'hui, ce sont essentiellement les ordinateurs qui remplissent cette fonction, mais les moyens mécaniques, utilisés encore récemment restent toujours fiables même si moins utilisés.
Faisons un tour d'horizon des techniques.

LE TUBE DE BOURDON

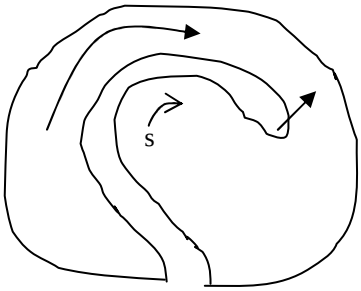
Généralités

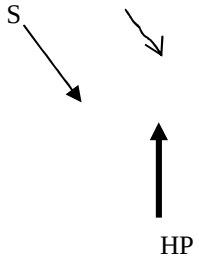
Il s'agit d'un tube en bronze au béryllium ou en acier inoxydable qui se présente sous forme circulaire.
Il y a donc deux circonférences dans un tel tube :

- ✪ la circonférence externe avec un grand rayon **S**
- ✪ la circonférence interne avec un plus petit rayon **s**

C'est sur cette propriété que nous allons jouer, en effet en appliquant une pression quelconque à un tube de bourdon, les forces qui vont s'exercer sur les parois du tube, ne seront pas les mêmes car les surfaces ne son pas les mes mêmes. Il en résulte que le tube va se déformer légèrement en fonction de la pression appliquée. Aussi en intégrant un petit système mécanique à cette déformation, on pourra mesurer proportionnellement, la pression.

Schéma :

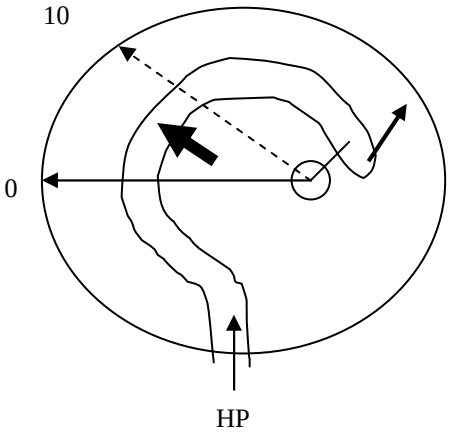




1er cas : pression interne : On introduit de l'air comprimé à l'intérieur du tube, cet air va s'appuyer sur ces parois internes qui sont des sections différentes.

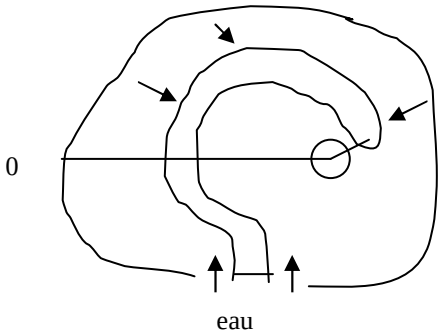
F1 = P * s (petit rayon)
F2 = P * S (grand rayon intérieur)
Conclusion F2>F1 **Le tube se redresse.**

C'est le cas du manomètre.

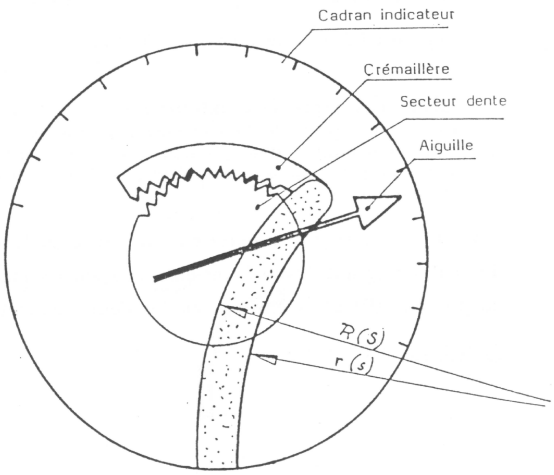


2ème cas : pression externe : on transmet une pression extérieure au système par l'intermédiaire d'un fluide, la relation sera alors

F1 = P *s (petit rayon extérieur)
F2=P*S (grand rayon extérieur)
Conclusion F2>F1 **Le tube se courbe.**



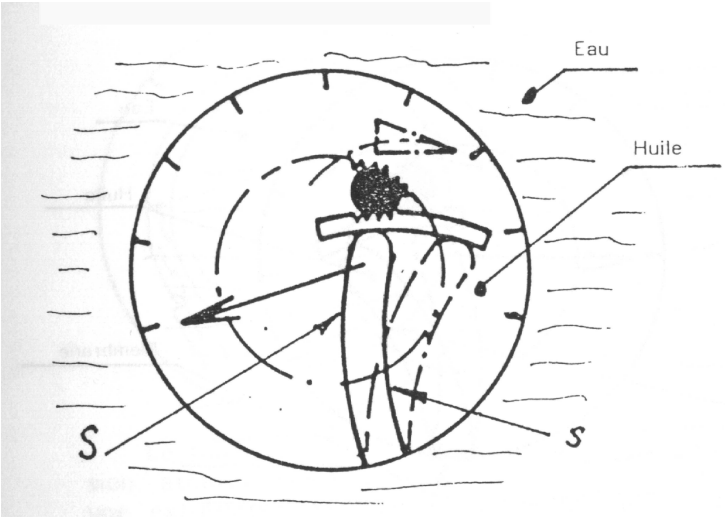
Le petit système mécanique que l'on intègre à la déformation du tube est une crémaillère avec une section dentée reliée à une aiguille.



Quelles applications de ces tubes de bourdon ?

✪Profondimètre a bain d'huile

En immersion, la pression hydrostatique provoque une déformation du boîtier, ce qui va créer une pression à l'intérieur. L'huile transmet cette pression sur les surfaces du tube de bourdon. Dans ce ca s F1 > F2 **le tube se courbe.**



✪Profondimètre à tube de bourdon rempli d'huile

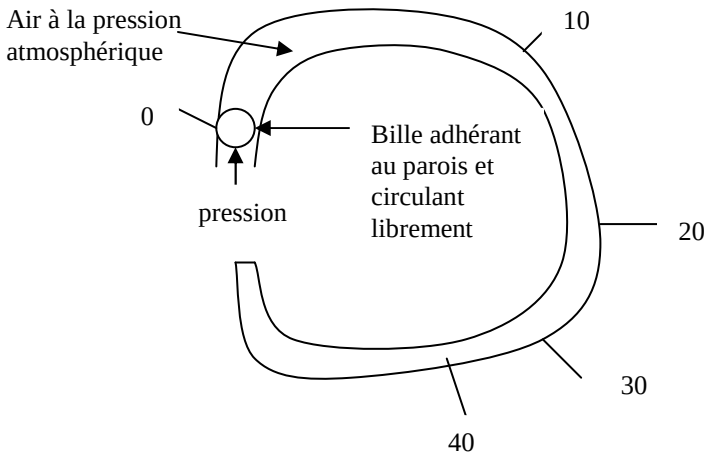
En immersion, la pression de l'eau déforme la membrane en bout du tube de bourdon. Ceci crée une pression de l'huile contenue dans le tube, qui va s'appliquer sur les surfaces internes. F2>F1 le tube se redresse.

Profondimètre à capillaire ou « loi de mariotte »

Le tube transparent est rempli d'air à la pression atmosphérique du lieu de plongée. (il contient une extrémité non fermée)

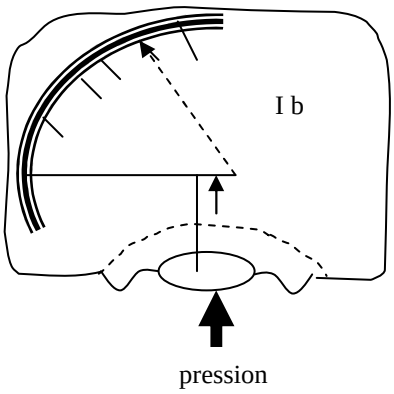
En immersion, l'eau rentre dans le tube et l'air va subir les variations de pression (Mariotte) Un **index** poussé par l'eau assure la lecture de la profondeur inscrite sur le support du tube.

Ce type de profondimètre présente l'avantage d'indiquer la profondeur fictive en altitude, puisqu'il travaille dans le rapport des pressions.
Son inconvénient majeur est son manque de précision dans les profondeurs au-delà de 25 mètres.
Au palier par contre, c'est le bonheur.



Profondimètre à membrane

Un des plus utilisés avant l'arrivée de l'électronique dans ce domaine. Une membrane métallique transmet sa déformation à un système mécanique de pignons qui déplacent une aiguille. Ce système bien que très sur possède néanmoins le désavantage de mal veiller. La membrane ne revient plus à sa position initiale et le profondimètre indique un à un deux mètres en permanence à la surface, l'aiguille en revenant plus à zéro.



Ordinateurs de plongée

Bien que très compliqué, il y a relativement peu de choses à en dire. Je ne reviens pas sur le fait, qu'il présente l'avantage majeur par rapport aux tables, d'intégrer le profil réel de la plongée et de calculer les paliers en conséquence. En clair, sur une plongée moyenne à 20 mètres, une petite incursion à 40 mètres, n'est plus si pénalisante.

Comment il fonctionne ?
La mesure de la pression hydrostatique se fait par un capteur, souvent placé dans un bain d'huile.
Ensuite, comme tout ordinateur il possède une ROM (mémoire morte) dans laquelle sont enregistrés les programmes qui vont décider du type de décompression. Vous avez eu un cours avec Claude à ce sujet, vous savez donc qu'il existe plusieurs types de table. Selon les marques, les ordinateurs utilisent différents types de tables.

Cela pour dire donc que tous les ordinateurs ne sont pas équivalents.
Il existe depuis un moment des ordinateurs où il est possible de régler le taux d'azote du mélange, cela permet d'avoir un seul instrument pour les plongées NITROX.

LE DETENDEUR

C'est un système mécanique qui permet, en jouant sur un équilibre de forces, de fournir de l'air au plongeur à sa demande.
En fait un détendeur doit remplir un cahier des charges bien précis :

❁ Fournir un mélange respiratoire à la pression ambiante, et à la demande du plongeur, ceci de manière automatique.
❁ Fournir le mélange respiratoire sans effort supérieur à 3Hpa
❁ Permettre l'expiration sans effort supérieur à 5Hpa (en effet en plongée il faut également fournir un effort à l'expiration)
❁ Ne pas exiger du plongeur un travail mécanique ventilatoire supérieur à 1.25 joules/litre/minute
❁ Etre capable d'assurer un débit instantané adapté aux besoins du plongeur, y compris en cas d'effort physique intense.

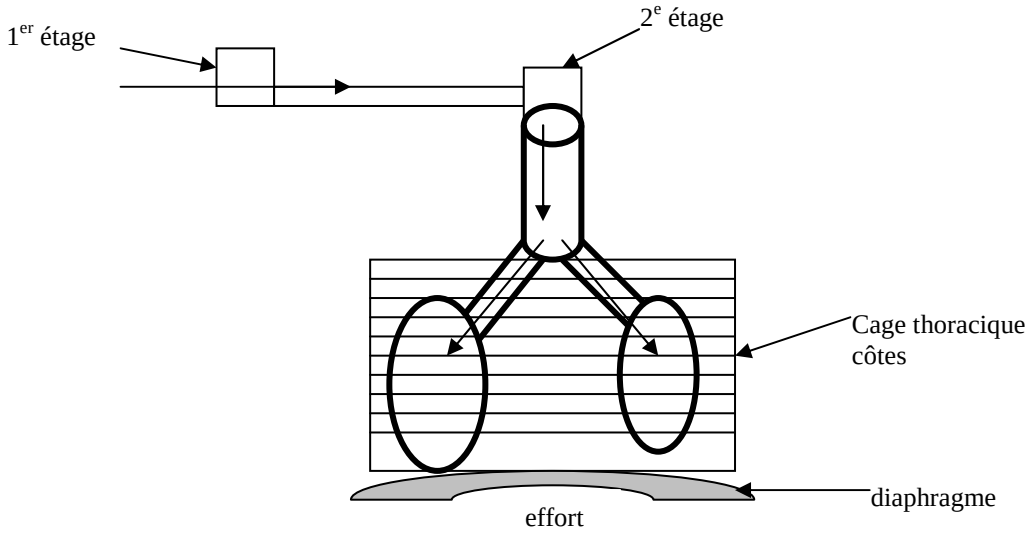
Pour répondre à ces caractéristiques, les choix techniques se portent définitivement sur les détendeurs à 2n étages. Cela signifie que l'air contenu dans la bouteille va être détendu à 2 reprises afin d'être disponible au plongeur à la Pression ambiante.

L'ancêtre de ces détendeurs deux étages est celui à étage unique, le plus connue étant le détendeur Mistral largement utilisé par le commandant Cousteau durant les années 60. Ce détendeur n'est plus utilisé car la détente de l'air n'est pas uniforme selon la position des poumons du plongeur par rapport à la position du détendeur. Il en résulte un inconfort notoire.

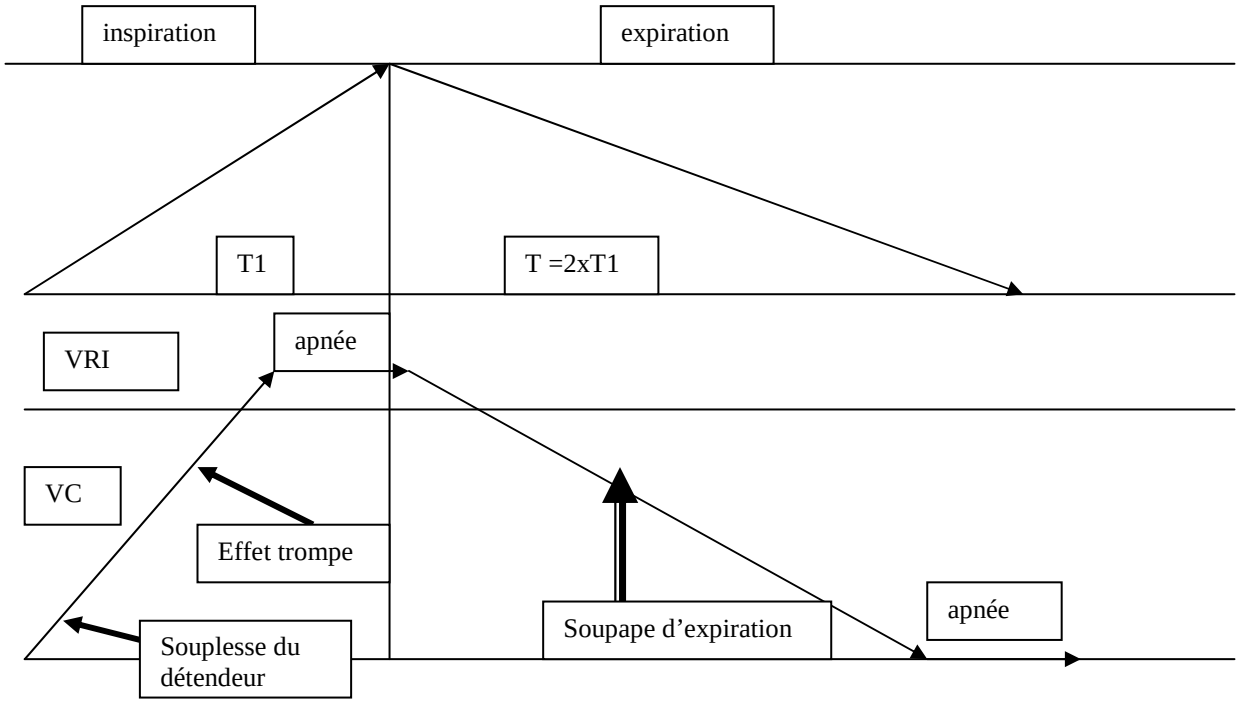
Tout ceci se comprend par le fait, que nous ne sommes capables de respirer de l'air qu'à pression ambiante. Si les variations de pressions entre la source de prise d'air et nos poumons sont supérieurs à 0.1 bar, alors nos muscles intercostaux ne sont plus capables de fournir l'effort nécessaire et nous ressentons alors une gène respiratoire. Essayez donc de respirer avec un tuba de 1 mètre de long en piscine, vous comprendrez.

Le fonctionnement d'un tel détendeur ne sera pas traité dans ce cours mais le principe est le même que celui d'un détendeur deux étages.

Le trajet de l'air :



Schématisons ses efforts sur une courbe :



L'inspiration est active elle nécessite des efforts des muscles inspirateurs.Et ces efforts sont encore plus important en immersion.
Le schéma nous permet de voir les différentes action que l'on peut mener sur les détendeurs pour faciliter l'effort inspiratoire ou expiratoire.

Etudions maintenant les différents détendeurs.

Les détendeurs à deux étages

1) Introduction

Rappelons que le principe de fonctionnement d'un détendeur, est de faire passer une quantité de gaz comprimé par des volumes de plus en plus grands. De ce fait (rappel de la loi de Marriote) ce gaz se dépressurise progressivement et il devient possible de l'utiliser à la pression souhaitée.
En plongée, il s'agit de respirer de l'air à la pression ambiante.

Le premier étage de détente (la partie métallique que l'on gré sur le bloc) ramène la pression du bloc, que l'on appelle HP, à une valeur de 8 à 10 bars selon les marques, c'est la MP.
Le deuxième étage, c'est à dire ce que l'on a dans la bouche, ramène cette MP à la pression ambiante, l'air est donc respirable tranquillement comme en surface.

Ceci est rendu possible grâce à un système d'équilibre de forces qui se modifie en fonction de divers paramètres notamment la pression absolue et de la respiration du plongeur mais également en fonction du tarage des ressorts qui composent le système. Dans un détendeur, tout est question d'équilibre de forces.

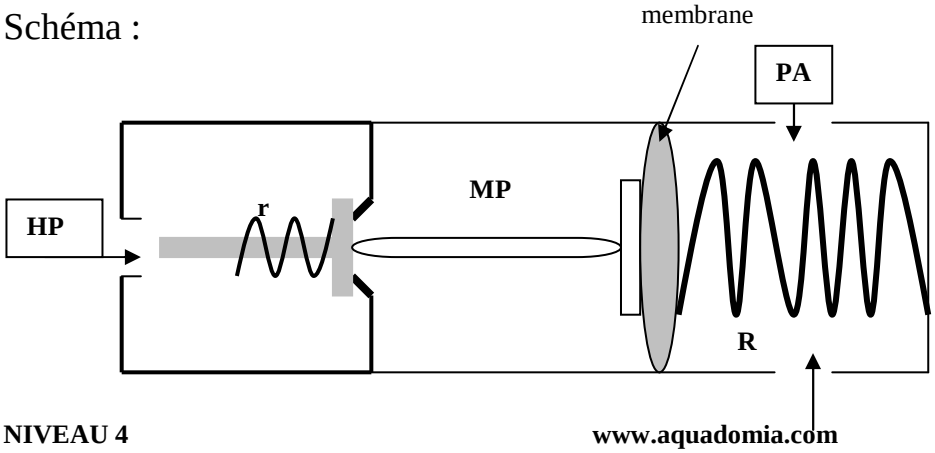
2) LES PREMIERS ETAGES

On rencontre deux types de premiers étages, à piston ou à membrane

a) A membrane

Le schéma suivant représente le système au repos, c'est à dire tel qu'il est dans notre sac. A ce moment, seuls les deux ressorts exercent leurs actions sur les organes mobiles que sont le poussoir et le clapet. Le ressort R plus puissant que r (nécessaire au rappel du clapet) appuie sur la membrane qui se déforme, transmettant ce déplacement au poussoir et au clapet qui est donc écarté du siège.

Schéma :



Fonctionnement

On gré le détendeur sur la bouteille que l'on ouvre. Que se passe t il ?
La HP du bloc entraîne le remplissage de la chambre HP mais également de la MP puisque le passage est ouvert. En aval du tuyau MP le volume est pour le moment fermé. (2 ème étage.)Donc au fur et à mesure que la MP se remplit, la pression augmente. Il y a donc une force qui est crée et qui va s'opposer au ressort R jusqu'à ce qu'elle devienne aussi forte. A ce moment donc, la membrane est repoussée vers sa position d'équilibre et le clapet vient appuyer sur le siège, l'arrivée de la HP est alors fermée. Le système est en équilibre.

A noter :
La valeur de la MP dépend alors de la force de tarage du ressort appuyant sur la surface de la membrane, soit environs 8 à 10 bars.

A ce moment on est en encore en surface, on décide d'immerger le bloc mais sans respirer.

Que se passe t il ?

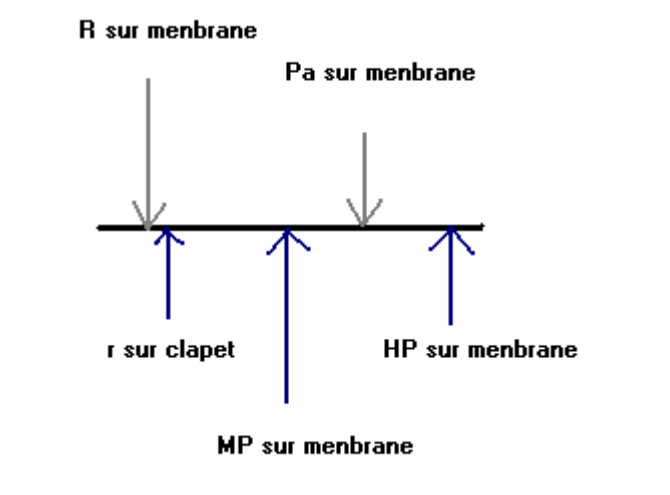
L'eau pénètre dans la chambre humide et vient transmettre l'action de la pression ambiante à la membrane. Du coup son action s'ajoute à celle déjà exercée par R, il en résulte que l'équilibre des forces est modifié. Le poussoir va donc appuyer à nouveau sur le clapet et le décoller de son siège, de l'air provenant de la HP va pénétrer dans la chambre MP et donc augmenter la pression résidant dans cette chambre. Lorsque la nouvelle valeur de cette MP est suffisante pour que la membrane revienne dans sa position d'équilibre, le clapet reviendra en appui sur son siège, et fermera donc le passage.
Cet ajustement de la MP au cours de notre descente est donc **automatique.**

Maintenant, on décide d'inspirer dans le deuxième étage du détendeur (on verra le mécanisme plus loin)

Que se passe t il ?

On prélève une partie de l'air présent dans la chambre MP, on crée alors une dépression. Conséquences : la MP devient beaucoup plus faible et l'équilibre des forces est à nouveau modifié. Les forces exercées par le ressort et la PA deviennent plus important que celle de la MP, le clapet se décolle du siège et de l'ai provenant de la HP revient remplir la chambre de M.P. jusqu'à équilibre. La MP a bien retrouvé sa valeur de départ.

Examinons le bilan des forces :



Important :

La valeur de HP intervient dans ce bilan. Durant notre plongée la HP va diminuer, donc l'équilibre sera réalisé avec une MP différente en début et en fin de plongée.
Quand HP diminue, MP augmente.

PANNES USUELLES

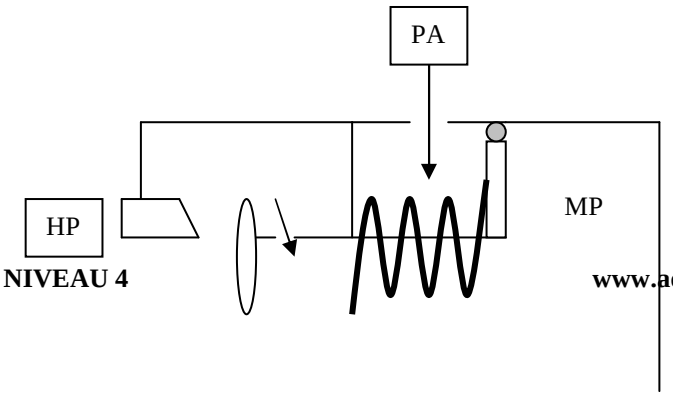
❁ Usure du clapet : non-étanchéité et accroissement non limité de la valeur de la MP, qui pourrait atteindre, sans dispositif de sécurité, la valeur de la HP.
❁ Membrane fissurée : La MP étant plus forte que la PA dans la chambre humide, sortie de bulles par les orifices de prise d'eau.

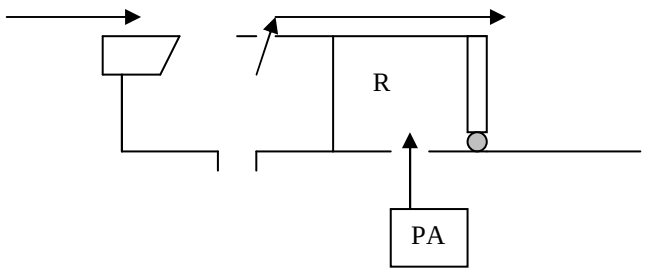
b) A piston

La disposition et la structure des pièces mécaniques, ne sont pas les mêmes, le fonctionnement lui, est très ressemblant car on retrouve toujours cette notion d'équilibre de forces.

La membrane et le poussoir, comme l'illustre le schéma suivant, ont été remplacés par un ensemble métallique en forme de champignon, c'est ce que l'on appelle le piston. Le clapet est en fait intégré à ce champignon, il représente sa base. Il n'y a plus de membrane, l'équilibre des forces va en partie se faire au niveau du toit du champignon, c'est à ce niveau que la surface est la plus importante.

L'air provenant de la chambre HP peut pénétrer jusqu'à la partie plate du piston à travers l'orifice de cette queue de piston.



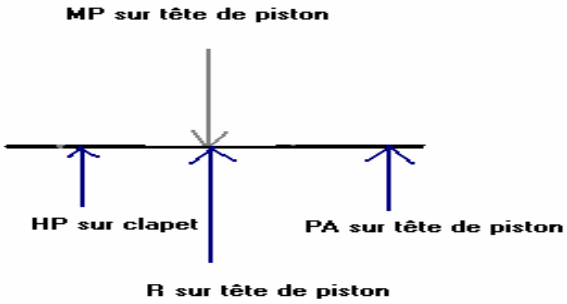


Fonctionnement

Au repos, le clapet ne vient pas appuyer sur son siège car la force du ressort R est alors dominante. Lors de la mise sous pression de ce détendeur, l'air provenant de la HP va venir remplir la chambre de MP, c'est à dire l'intérieur du champignon et sa base. Il se passe qu'une force apparaît, venant s'opposer à celle exercée par R.
De l'air pénétrera jusqu'à ce que cette force devienne aussi importante que celle de R, à ce moment le système est en équilibre car le clapet vient appuyer sur son siège.

La suite du raisonnement est tout à fait identique au premier étage à membrane. En immergeant ce détendeur sans respirer, la PA augmente, venant s'ajouter à R. Ces deux forces sont alors supérieures à la MP et le piston est repoussé. De l'air provenant de la HP va à nouveau pouvoir pénétrer, augmentant la pression de la MP jusqu'à un nouvel équilibre des forces.

Ensuite, lors de la sollicitation en air du plongeur, cette valeur de MP chute, le piston est alors repoussé. C'est à dire que le clapet quitte son siège et de l'air provenant de HP peut pénétrer.
Une fois que le principe de cet équilibre des forces est compris, il est possible de comprendre n'importe quels schémas de détendeur.
Faisons un bilan des forces



Pannes usuelles :

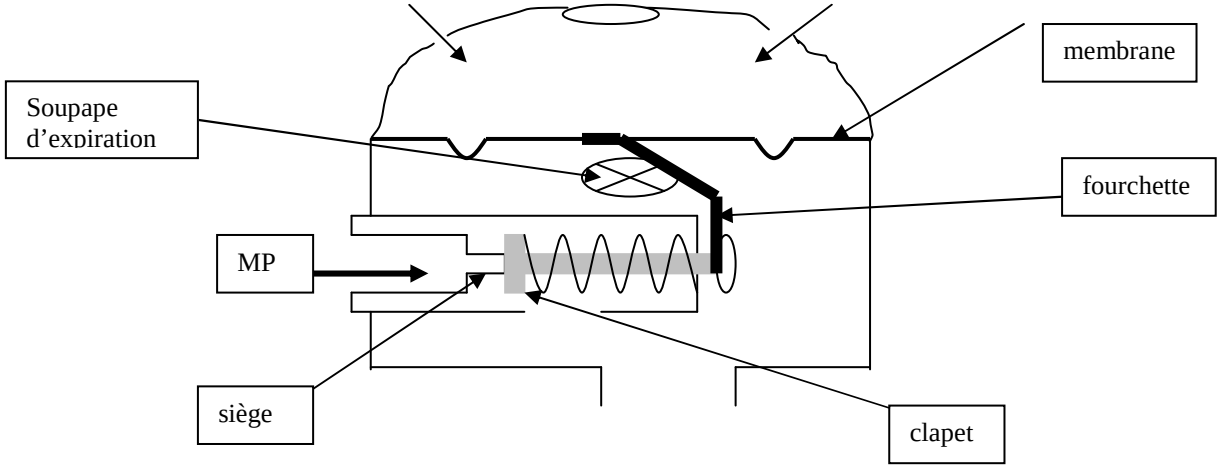
❀ Usure des joints du piston : La MP étant plus forte que la PA de la chambre humide ; il y a échappement de bulles par les orifices de prise d'eau de cette chambre.

3) Les deuxièmes étages

Il existe de nombreux modèles de fonctionnement mais le principe reste à chaque fois le même dans la mesure ou il s'agira toujours d'un équilibre de forces.
Il y a trois modèles que nous rencontrons régulièrement en plongée loisirs, ce sont des deuxièmes étages à
❁ Clapet aval
❁ Clapet amont
❁ Clapet aval ajustable

CLAPET AVAL

Voici le schéma d'un clapet aval tel qu'il est dans notre sac. On voit que le ressort vient appuyer le, clapet sur le siège, fermant ainsi le passage de l'air. A l'autre extrémité de ce ressort, on distingue un petit levier (fourchette) qui est relié à la membrane. En actionnant mécaniquement ce levier, on étire le ressort, le clapet n'appuie plus alors sur son siège et de l'air MP peut alors passer dans la chambre sèche de ce deuxième étage.



Fonctionnement

C'est très simple. La MP provient du premier étage et vient exercer une force contre le clapet, le poussant à quitter son siège. Mais de l'autre coté de ce clapet, il y a d'une part le ressort qui exerce une force contraire et il y a la force exercée pas la pression ambiante sur ce clapet (par l'intermédiaire du levier). Cela suffit à maintenir l'ensemble en fermeture.

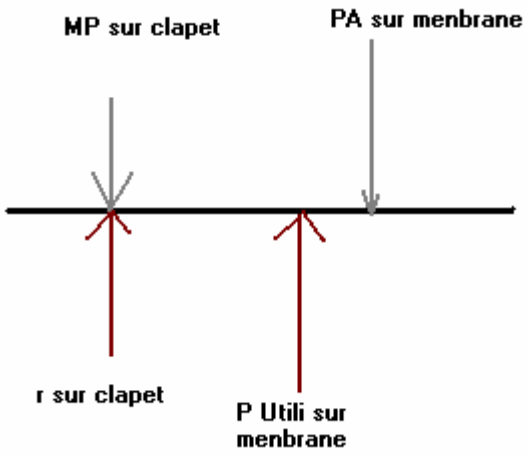
Rappelons que notre objectif c'est de respirer de l'air à pression ambiante à partie de cette chambre sèche.

Imaginons que l'on immerge ce détendeur sans respirer. Que se passe t il ?
La MP provenant du premier étage devient un peu plus importante (c'est ce qu'on a vu précédemment) mais cela ne modifie que partiellement l'équilibre des forces
Il se passe que la PA s'exerçant sur la membrane, va actionner le levier et donc étirer le ressort. A ce moment l'équilibre est modifié, la force de la MP provenant du deuxième étage

devient supérieur à celle du ressort et donc le clapet quitte son siège laissant de l'air pénétrer dans la chambre sèche et se détendre.

De même, lorsque le plongeur inspire, il crée une dépression relative au niveau de cette chambre sèche si bien que la pression ambiante chute. A ce moment il n'y a plus équilibre et la pression absolue vient appuyer sur le levier, qui tire le ressort et qui permet donc une entrée d'air MP, jusqu'à un nouvel équilibre.
De ce fait au premier étage, il en vient que l'équilibre est lui aussi modifié comme nous l'avons tout à l'heure. En inspirant, on fait chuter la MP qui intervient dans le bilan des forces et donc il y ouverture du clapet au premier étage.
Ceci nous amène à dire qu'en fait nous respirons directement sur la bouteille, simplement à deux niveaux, l'air est détendu en passant à des volumes plus importants.

Bilan des forces :



Donc à la question «peux t on respirer directement sur la bouteille en plongée ? » La réponse est « c'est vraiment pas pratique car on ne maîtrise pas bien le débit lors de l'ouverture de la bouteille, mais c'est possible puisqu'on détend bien l'air dans notre bouche ! »
Tout de même déconseillé !

Remarque

La disposition du clapet, du siège et du ressort, joue le rôle de soupape si la MP vient à augmenter au-delà d'un seuil dépendant du tarage du ressort. C'est le cas si le système clapet/siège du 1er étage est usé ou non étanche. C'est le moyen de diagnostiquer ce genre de panne. Si au moment de la mise sous pression du détendeur, une fuite apparaît quelques secondes après (il faut laisser le temps à la MP de s 'établir), c'est le signe d'une fuite au clapet/siège du 1er étage.

Quelles types de pannes :

❁ Membrane déchirée : se manifeste par une aspiration d'eau. Remède : changer la membrane.
❁ Embout buccal fissuré : se manifeste par une aspiration d'eau.
❁ Clapet usé ou non étanche : fuite instantanée à la mise sous pression.

LA DETENTE D'AIR AU DEUXIEME ETAGE : PARTICULARITES
Vous avez dit VENTURI ?

Avant d'aborder les 2émes étages clapet aval ajustable et amont, il faut définir ce qu'est l'effet de trompe. Qui n'a jamais eu de détendeurs qui se mettent à fuser tout seul ou alors lorsqu'on jette le bloc à l'eau ?
(personnellement cela ne m'est jamais arrivé mais je ne savais pas comment l'introduire autrement)

Que se passe t il ?

Lors du passage de l'air MP par l'orifice laisser libre (ouverture du clapet), la vitesse est importante. Le volume de la chambre sèche, n'est pas négligeable, et selon la direction du flux d'air, il peut se produire un effet de trompe. Cela signifie que lors de la dépression, le levier qui sert à détendre le ressort va rester enfoncé, et que de l'air à MP va sortir en débit continu.

Cet effet est habituellement combattu au deuxième étage par un petit trou ou une languette qui permet d'orienter le flux d'air arrivant, et ainsi offrir une meilleure répartition de l'air dans la chambre sèche. C'est ce que l'on appelle l'effet venturi.
C'est bien et c'est pas bien. C'est pas bien car en fait l'effet de trompe tend à diminuer l'effort inspiratoire du plongeur. C'est bien car cela évite de la faire fuser n'importe quand.
En fait le système venturi permet de régler plus ou moins cet effet de trompe, il faut l'adapter à notre respiration.

a) Deuxième étage ajustable

On ne va pas reprendre toute la mécanique de fonctionnement, l'élément nouveau, c'est la présence d'une vis reliée au ressort qui va permettre de jouer sur le tarage du ressort. Le plongeur peut donc au cours de sa plongée, modifier l'effort inspiratoire correspondant à ses besoins. En particulier, il compensera ainsi les effets de la variation de la MP sur la «dureté » de son détendeur.

Tous les détendeurs utilisés en plongée professionnelle sont équipés de ce type de système.
Nous allons bientôt voir que la compensation permet justement de rendre la MP stable tout au cours de sa plongée, ainsi pas de problème de variation entre début et fin de plongée.

DEUXIEME ETAGE A CLAPET AMONT

On les rencontre relativement peu, le modèle de référence c'est le DC 400 de scubapro.

Quelle est la différence majeure ?
La force exercée par la MP provenant du 1er étage ne va plus jouer dans le sens de l'ouverture du clapet mais au contraire de sa fermeture. Du coup, le ressort ne se retrouve plus dans la

chambre sèche à pousser le clapet, il se trouve de l'autre coté du clapet et pour permettre son ouverture, le ressort va tirer sur le clapet. On a en fait inverser la direction des forces par rapport au clapet.
Ensuite on retrouve bien le levier mais en l'actionnant on comprime le ressort plutôt que de l'étirer comme c'était le cas des clapets avals.

Ce système présente un désavantage majeur. Imaginez une fuite au premier étage, la MP va augmenter et dans ce cas il n'y a pas de soupape de sécurité dans le tuyau. Résultat : le tuyau explose. Evidement, les constructeurs y ont pensé en plaçant un joint extrudeur ou un système quelconque de soupape au niveau du premier étage.

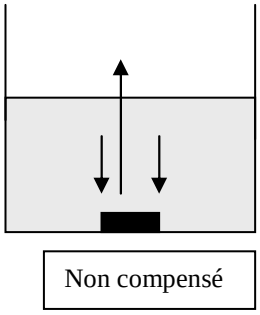
4) COMPENSE

En fait la compensation permet d'établir une MP qui ne sera plus dépendante de la HP au niveau du bilan des forces. Du coup cela permet d'avoir une MP stable tout au long de la plongée et ne pas être gêné par la dureté du détendeur qui varie en fin de plongée.

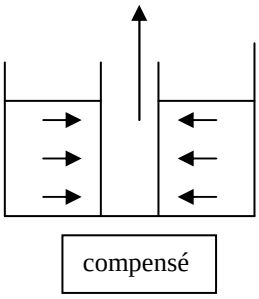
Quel est le principe ?

La force nécessaire à l'ouverture du clapet est :

Lié à la hauteur d'eau (pression)

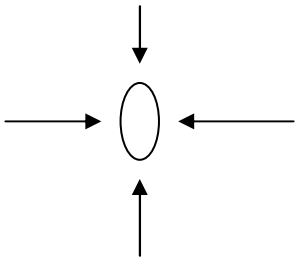


Indépendant de la hauteur d'eau



La compensation rend l'effort inspiratoire du plongeur constant quelque soit la pression dans le bloc.
La HP n'a plus d'incidence sur la moyenne pression.
Elle peut se faire au premier et ou au deuxième étage.
Deux types de compensation :

Arrivé de l'air radiale :



Surface équivalente mais de sens opposé :