

Volumes-Pression Flottabilité

Leur influence sur les accidents barotraumatiques

Théorie

Connaissances générales

Lien volume & pression

Flottabilité

Dalton & Henry

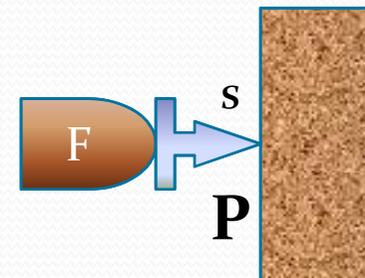
Connaissances générales

- Force et pression sont liées:

$$pression = \frac{force}{surface}$$

- Quelques exemples:

- Enfoncer une punaise dans du liège;
- Marcher avec des raquettes dans la neige;
- Faire du patin à glace.



Quelques ordres de grandeur

- Pression atmosphérique au niveau de la mer:
 $p_0 = 1013 \text{ hPa} (\approx 1 \text{ bar})$
- $1 \text{ bar} = 1000 \text{ hPa} = 760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ kg/cm}^2$
- Poids de l'air: 1.29 g/L

Variation de la pression avec l'altitude et profondeur

$$p_0 = 1013 \text{ hPa}$$

Atmosphérique :

0.1 bar par 1000m

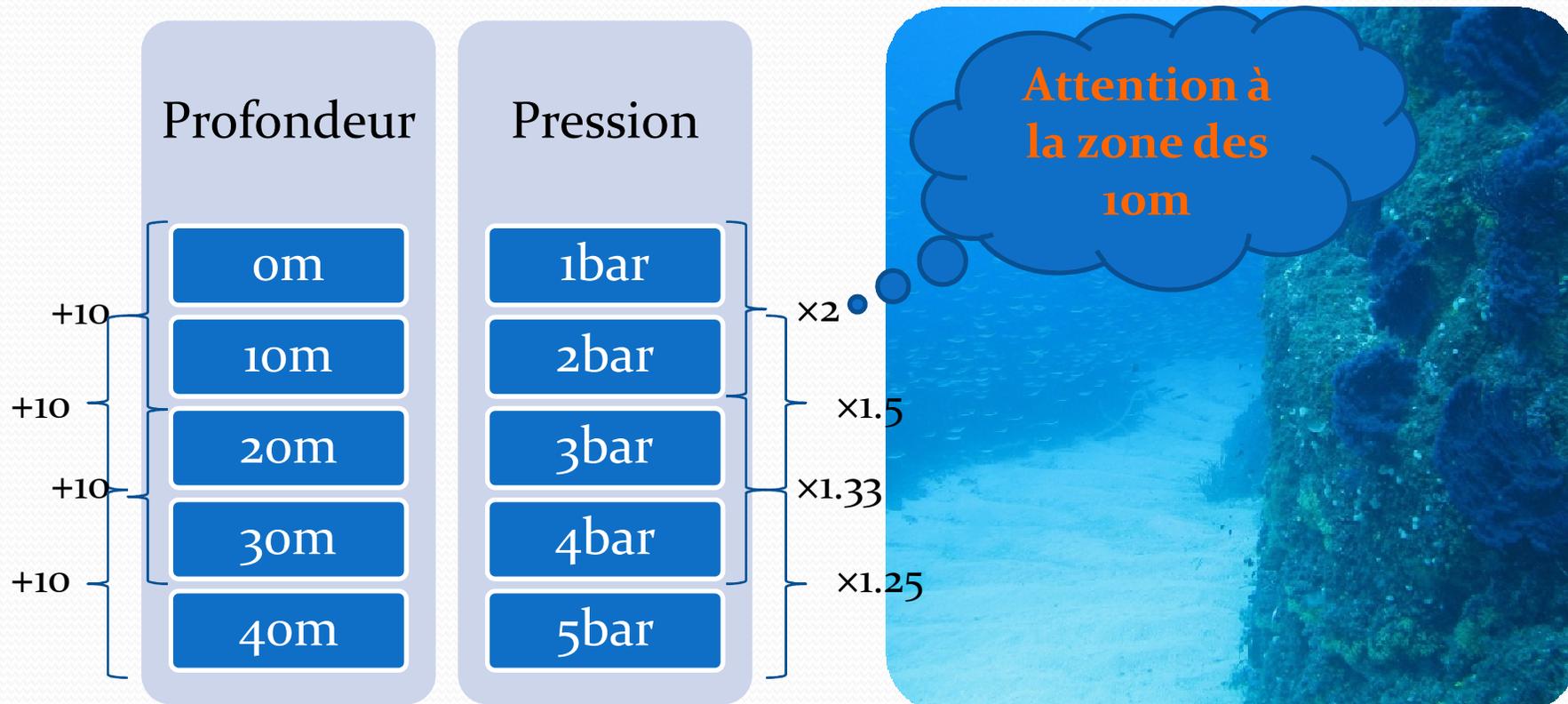
Hydrostatique :

1 bar par 10m d'eau



$$\text{pression absolue} = \left\{ \begin{array}{l} \text{pression atmosphérique} \\ + \\ \text{pression hydrostatique} \end{array} \right.$$

Variation avec la profondeur



Boyle, Mariotte & Charles

- Boyle/Mariotte :

pression × *volume* = *constante*

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

- Charles :

$\frac{\textit{pression}}{\textit{température}} = \textit{constante}$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

La température est en Kelvin (0°C = 273K)

Boyle, Mariotte & Charles

- Applications :
 - Stabilisation ;
 - Calcul d'autonomie ;
 - Accidents barotraumatiques ;
 - Transvasement d'air entre 2 blocs ;
 - Influence de la température du bloc sur la pression.

Les conséquences pour un N4

- Attention au sur-lestage : influence directe sur la consommation ;
- Attention au sous-lestage : ne pas tenir le palier => nécessité d'avoir un sur-lestage ;
- Attention à la consommation des membres de la palanquée ;
- Attention aux barotraumatismes ;
- Ne pas donner d'air à un apnéiste ;
- Positionnement du guide dans la palanquée.

Exercices

- Un N₂ fait un essoufflement à 40m alors qu'il lui reste 100bar dans son bloc de 12l. Sa consommation passe de 20l/min à 80l/min.

- Calcul de la consommation ramenée à la surface :

$$p_0 C_0 = p_1 C_1 \Rightarrow C_0 = \frac{p_1 C_1}{p_0} = \frac{5 \times 80}{1} = 400l / \text{min}$$

- Air disponible dans la bouteille lors de l'accident :

$$p_0 V_0 = p_1 V_1 \Rightarrow V_0 = \frac{p_1 V_1}{p_0} = \frac{100 \times 12}{1} = 1200l$$

- **Dans 3 minutes, le plongeur n'aura plus d'air !**

Exercices

- Un plongeur dépose son bloc à gonfler. Il le récupère à 200bar et sa température est de 40°C. Il se met à l'eau et la température est de 18°C. Quelle pression doit-il lire sur son manomètre?

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = \frac{200 \times (273 + 18)}{273 + 40} \approx 186 \text{bar}$$

- Importance de vérifier sa pression une fois à l'eau mais aussi avant la plongée.

Exercices

- Vous avez un 15l et un bi-10 respectivement à 50 et 70bar que vous voulez remplir à l'aide de deux tampons de 50l à 280 et 300bar.
 - Quelle est la pression dans les blocs après avoir équilibré les deux blocs ?

$$\begin{cases} p_0 V_{01} = p_1 V_1 \\ p_0 V_{02} = p_2 V_2 \end{cases} \quad V_{total0} = V_{01} + V_{02} = \frac{p_1 V_1}{p_0} + \frac{p_2 V_2}{p_0} \quad p_{eq} V_{total} = p_0 V_{total0}$$

$$\Rightarrow p_{eq} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2} = \frac{15 \times 50 + 2 \times 10 \times 70}{15 + 2 \times 10} \approx 61bar$$

Exercices

- Quelle est la pression dans les blocs et tampons si l'on ouvre les deux tampons simultanément ?

$$p_{eq} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3 + p_4 V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} \left(= \frac{\sum_i p_i V_i}{\sum_i V_i} \right)$$

$$\Rightarrow p_{eq} = \frac{61.43 \times 15 + 61.43 \times 2 \times 10 + 280 \times 50 + 300 \times 50}{15 + 2 \times 10 + 50 + 50} \approx 231 \text{ bar}$$

- Nécessiter d'arrêter le gonflage en cours.

Exercices

- Quelle pression aura-t-on dans les 2 tampons si on les ouvre simultanément et on arrête le gonflage des 2 blocs à 200bar ?

$$V_{requis} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{p_0} = \frac{(200 - 61.43) \times 15 + (200 - 61.43) \times 2 \times 10}{1}$$
$$= 4850l$$

$$V_{dispo} = \frac{p_3 V_3 + p_4 V_4}{p_0} = \frac{280 \times 50 + 300 \times 50}{1} = 29000l$$

$$p_{moy} = \frac{29000 - 4850}{50 + 50} = 241.5$$

Exercices

- Quelle pression reste-t-il dans les tampons si l'on ouvre les tampons successivement ?

$$p_{moy1} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3}{V_1 + V_2 + V_3} = \frac{61.43 \times 15 + 61.43 \times 2 \times 10 + 280 \times 50}{15 + 2 \times 10 + 50}$$
$$= 190 \text{ bar}$$

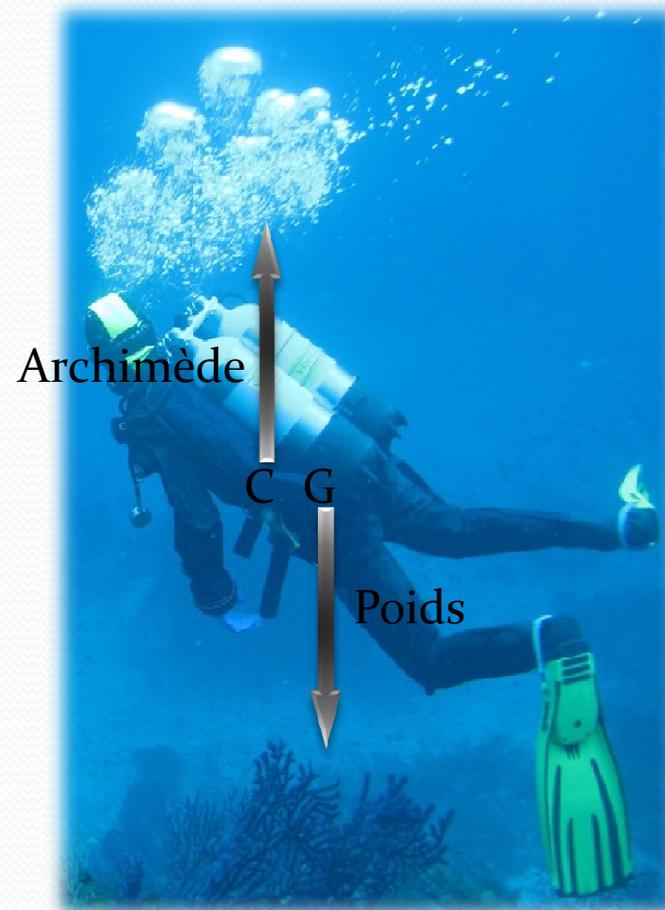
$$V_{requis} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{p_0} = \frac{(200 - 190) \times 15 + (200 - 190) \times 2 \times 10}{1}$$
$$= 350 \text{ l}$$

$$V_{dispo} = \frac{p_4 V_4}{p_0} = \frac{300 \times 50}{1} = 15000 \text{ l} \Rightarrow p_4 = \frac{15000 - 350}{50} = 293 \text{ bar}$$

Archimède

Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume de fluide déplacé.

Cette force s'applique au centre de poussée.



Archimède

Poids apparent = Poids réel – Poussée d'Archimède

- Application : Un plongeur s'immerge en eau douce avec son matériel (poids total de 90kg), il occupe un volume total de 85l. Quel volume d'air devra-t-il mettre dans son gilet?
 - $+90 - 85 \times 1 = +5\text{kg} \Rightarrow 5\text{l}$
- Quel volume devra-t-il mettre en eau salée?
 - $+90 - 85 \times 1.03 = +2.45\text{kg} \Rightarrow 2.45\text{l}$

Archimède

Poids apparent = Poids réel – Poussée d'Archimède

- Il s'immerge avec un bi-10 gonflé à 200bar et être à la surface avec 50bar. Quelle masse d'air va-t-il perdre?
 - $V = (200-50) \times (2 \times 10) = 3000l$
 - $P = 1.29 \times 3000 = 3870g$ soit 3.87kg
- Le plongeur est-il correctement lesté?
 - Poids en fin de plongée: $(90-3.87) - 85 \times 1.03 = -1.42kg$
 - Il devra mettre au minimum **1.5kg** pour tenir ses paliers!

Les influences sur la flottabilité

- Les volumes d'air : poumon ballast (ventilation) & gilet
- Type de bouteille : acier, aluminium, carbone
 - Acier : densité de 7.85
 - Aluminium : densité de 2.70
 - Carbone : densité de 2.25
- Air dans la bouteille : 1.29g/l
- Densité de l'eau : 1 en eau douce à 1.03 en eau très salée
- Lest : compter pour un débutant 350g / 10kg

Les influences sur Archimède

- Combinaison :
 - Shorty : 1l
 - Monopiece 4mm : 4/5l
 - Monopiece 7mm : 5/6l
 - Deux pièces 7mm : 6/7l
- Ecrasement de la combinaison : l'épaisseur diminue de la moitié de la pression absolue
 - à 20m : $p_{abs} = 3\text{bar} \Rightarrow \text{épaisseur} / 1.5$

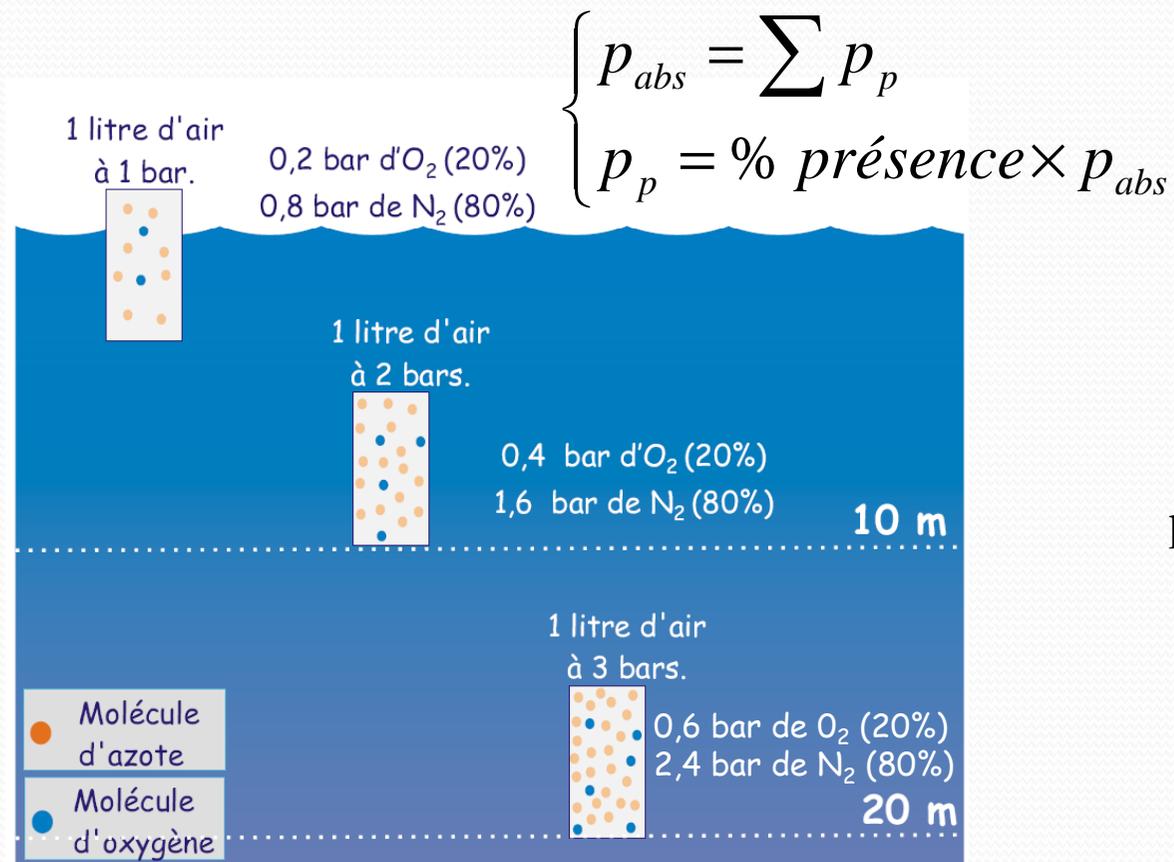
Des idées pour Archimède



- Avoir une ventilation douce et **savoir gérer son poumon-ballast** ;
- Savoir gérer son lestage sachant que l'on va perdre de l'air (attention au sur-lestage et sous-lestage, pour soi et pour sa palanquée) ;
- Mettre dans son carnet de plongée le lestage en fonction de l'eau, combinaison et matériel emporté ;
- Pour l'appareil photo, préférer mettre le lestage dans le caisson (le volume n'est pas modifié).

Les autres lois utiles en plongée

- Loi de Dalton :



Notion de pression partielle d'un gaz respiré

Les autres lois utiles en plongée

- Loi de Henry :
 - A température donnée et à saturation, la quantité de gaz dissoute dans un liquide est directement proportionnelle à la pression exercée par le gaz à la surface du liquide.
 - Sous-saturation : augmentation de la pression du gaz
 - Sur-saturation : diminution de la pression du gaz
- **Un retour à l'équilibre est nécessaire => notion de décompression.**

Incidences en plongée

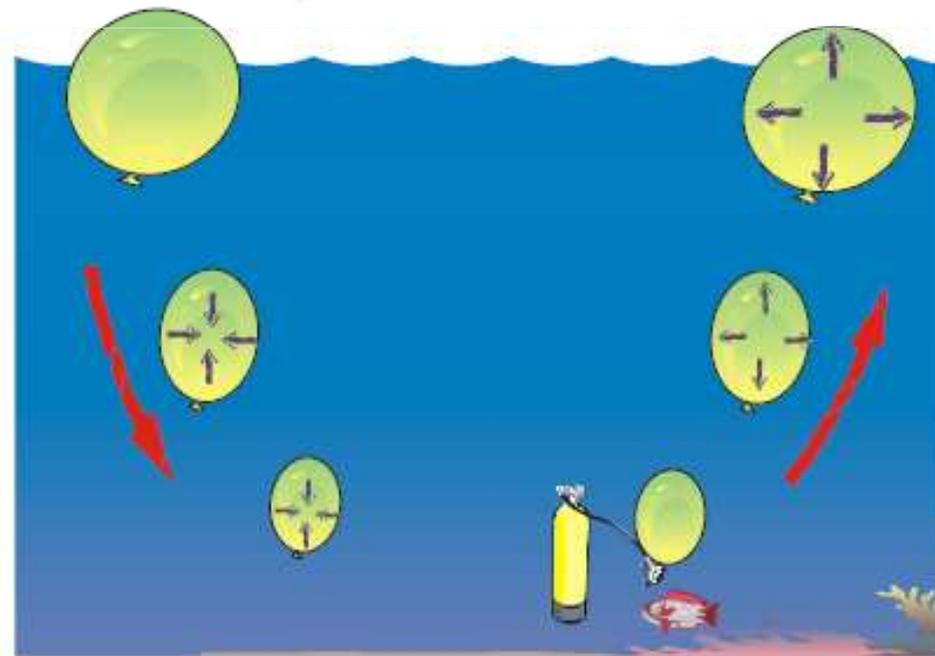
Les différents types d'accidents:

- Barotraumatiques ;
- Décompression ;
- Biochimiques ou toxiques ;
- Froid ;
- Noyade.

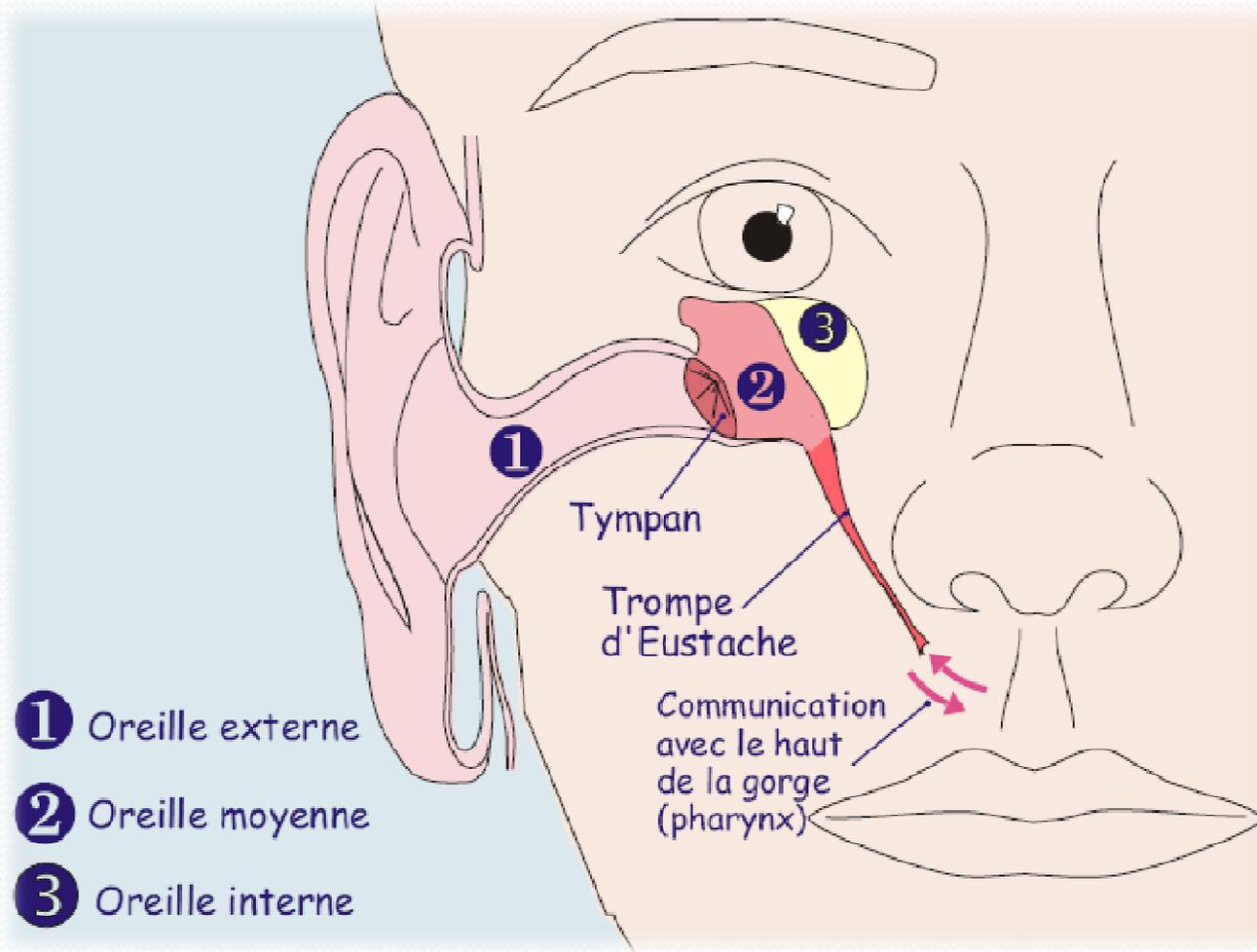
Les accidents barotraumatiques

- Surpression pulmonaire (fera l'objet d'un cours) ;
- Oreilles : vertiges alerno-bariques, perforation du tympan, barotraumatismes de l'oreille interne ou moyenne ;
- Placage de masque ;
- Sinus et dents ;
- Intestins.

Attention à la zone des 10m!



Barotraumatismes des oreilles



Barotraumatismes des oreilles

- Mécanisme & Cause : lors de variations de profondeurs, il y a une différence de pression entre l'oreille moyenne et l'oreille externe. L'équilibre doit être fait *via* la trompe d'Eustache (Vasalva, BTV ou autres), sans quoi l'air fait pression sur le tympan.
- Symptômes : douleurs, saignements, bourdonnements, vertiges, surdité temporaire ;

Barotraumatismes des oreilles

- Prévention & Conduite à tenir :
 - Ne pas plonger enrhumé ou avec des douleurs ;
 - Surveiller la compensation des plongeurs ;
 - En cas de blocage, descendre ou remonter de quelques mètres et attendre la compensation, **sans forcer** ;
 - Faciliter le passage de l'eau dans l'oreille externe (décoller la cagoule) ;
 - Arrêter la plongée si l'équilibre n'est pas possible.

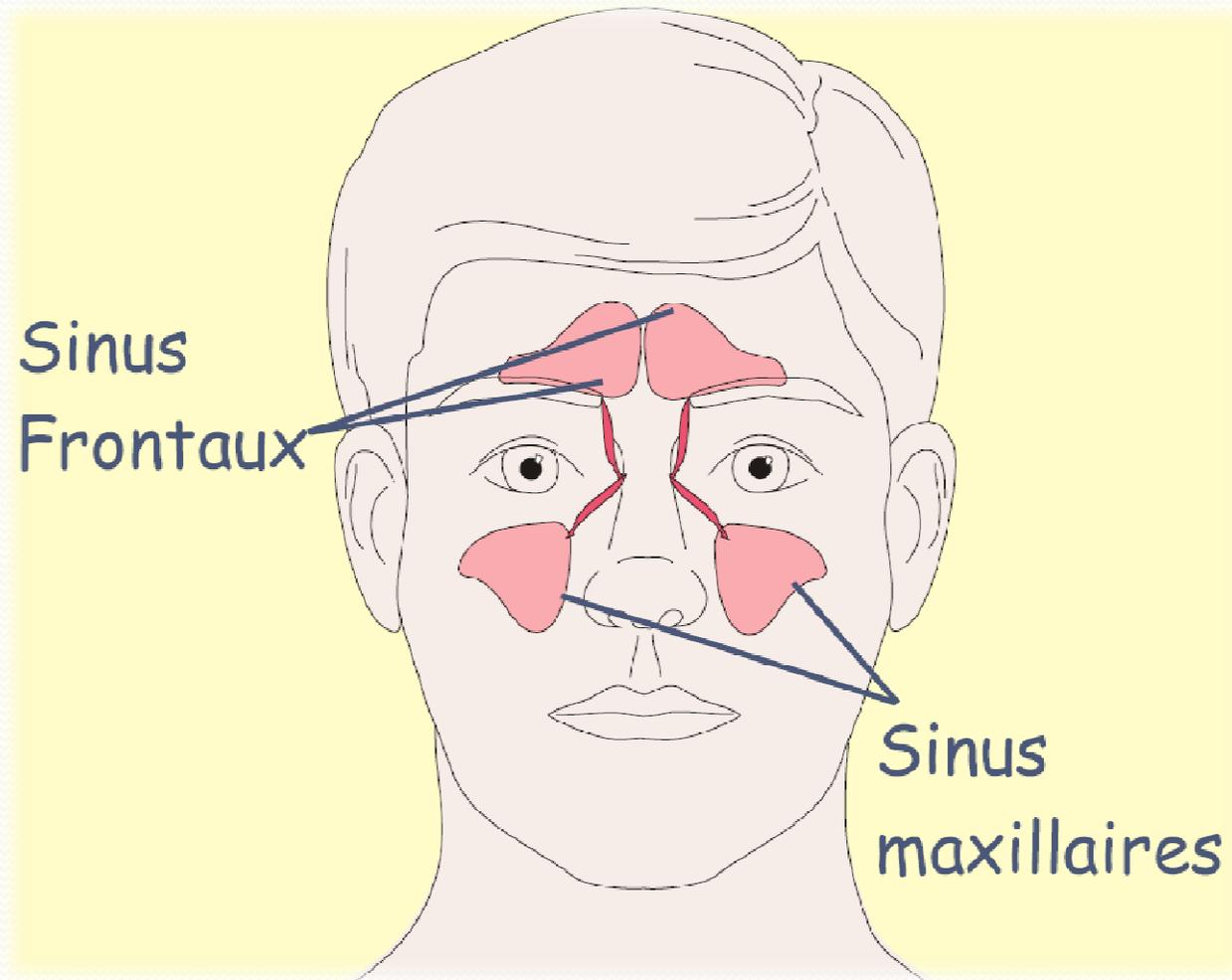
Barotraumatismes des oreilles

- Vertiges alerno-bariques : différence de pression entre les deux oreilles internes entraînant des vertiges soudains et brutaux ;
 - Conduite à tenir : Attendre que ça passe
- Oreille interne/moyenne : l'augmentation de pression dans l'oreille interne ou moyenne peut endommager les tissus et créer des vertiges, surdités.

Placage de masque

- Mécanisme & Cause : à la descente, la différence de pression entre l'eau et l'intérieur du masque augmente. La jupe du masque permet d'absorber les déformations jusqu'à un certain point. Au-delà, une dépression relative dans le masque apparaît.
- Symptômes : yeux rouges, saignements.
- Prévention & Conduite à tenir :
 - Souffler par le nez ;
 - Surveiller attentivement les plongeurs.

Sinus & dents



Sinus & dents

- Mécanisme & Cause : lors de variation de profondeurs, il y a une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur des sinus/dents. Si l'équilibre des pressions ne se fait pas, ces cavités ayant un volume fixe subissent directement les pressions.
- Symptômes :
 - Sinus : douleurs, saignements ;
 - Dents : douleurs vives, éclatement de dent.

Sinus & dents

- Prévention & Conduite à tenir :
 - Ne pas plonger enrhumé ou avec des douleurs ;
 - Surveiller la compensation des plongeurs ;
 - En cas de blocage, descendre ou remonter de quelques mètres et attendre la compensation, **sans forcer** ;
 - L'utilisation de Vasalva n'est pas recommandée car elle risque d'aggraver la situation (remontée de mucosités) ;
 - Pour les dents, prévenir son dentiste ;
 - Arrêter la plongée si l'équilibre n'est pas possible.

Le rôle du guide de palanquée

- Le guide de palanquée doit être **proactif**.
- Avant la mise à l'eau :
 - Adapter le briefing du DP à sa palanquée ;
 - S'assurer de la bonne santé de la palanquée ;
 - Préparer un briefing synthétique mais avec du contenu ;
- A la mise à l'eau :
 - Surveiller le lestage (test éventuel)

Le rôle du guide de palanquée

- A la descente :
 - Prêter attention à la stabilisation ;
 - Descendre doucement ;
 - Prêter attention au passage des oreilles ;
 - Faire attention au placage de masque ;
 - Faire attention au positionnement par rapport aux plongeurs ;
 - Préférer une descente sur un mouillage.

Le rôle du guide de palanquée

- Au fond :
 - Surveiller la stabilisation (poumon ballast & gilet)
 - Limite la consommation d'air ;
 - Prévention de surpression pulmonaire ;
 - Analyser la position du plongeur :
 - Un plongeur à plat est un plongeur équilibré qui ne fait pas d'effort supplémentaire ;
 - Faire attention au positionnement par rapport aux plongeurs ;
 - Vérifier l'expiration à la moindre remontée.

Le rôle du guide de palanquée

- A la remontée :
 - Faire attention à la vitesse de remontée ;
 - Donner le rythme de la remontée
 - Surveiller la stabilisation et l'expiration ;
 - Faire attention au positionnement des plongeurs ;
 - Attention aux plongeurs trop légers ne pouvant pas tenir un palier : nécessité d'un plomb supplémentaire.



Le rôle du guide de palanquée

- A la remontée :
 - En cas de soucis de compensation, pas de Vasalva!
Exécuter l'équilibrage par la manœuvre de Toynbee ;
 - Prêter attention aux vertiges alerno-bariques ;
 - Privilégier les remontées le long d'un repère plutôt qu'en pleine eau.
 - Surveiller un plongeur occupé (parachute, lecture, etc.)

**Merci à tous de votre
attention**

Exercices supplémentaires

- Un plongeur vous dit qu'il a tendance à consommer beaucoup et demande impérativement un 15l. Vous lui gonflez en urgence un bloc qui sort de la rampe à 171bar et 35°C. Le bloc de 12l quant à lui 200bar et il est resté à 15°C toute la nuit.
- Quel sera le volume d'air disponible des deux bouteilles dans une eau à 15°C ?

Exercices supplémentaires

- Quel sera le volume d'air disponible pour chacun des bouteilles dans une eau à 15°C ?

$$p_2 = \frac{15 + 273}{35 + 273} \times 171 = 160 \text{ bar} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V_{15L} = 15 \times 160 \\ V_{12L} = 12 \times 200 \end{cases}$$

$$V_{15L} = V_{12L} = 2400L$$

Exercices supplémentaires

- Vous emmenez 2 N₁ à 20m. Cyrille est correctement équilibré avec 3kg alors que Pierre met 6kg pour le même volume.
 - Surface : Pierre doit mettre 3l dans sa stab.
 - Fond :
 - Cyrille doit mettre 3l ;
 - Pierre doit mettre 9l.
 - Remontée :
 - Pierre doit purger un volume plus important, difficile à gérer.
 - Cyrille s'équilibre aisément avec le poumon-ballast.

Exercices supplémentaires

- Lors d'une plongée à 40m, vous découvrez une statuette en plomb bizarrement intacte de 9l. Le parachute de levage à bord du bateau fait 100l, cela suffit-il?

$$P_{app} = 9 \times 11 - 9 \times 1 = 90kg$$

- Il vous reste 75bar dans votre bouteille (15l), pouvez-vous remonter la statuette ?

$$V_{para} = \frac{25}{5} \times 15 = 75l$$

Exercices supplémentaires

- Jusqu'à quelle profondeur faut-il remonter le parachute pour qu'il remonte tout seul ?

$$p_2 = \frac{5 \times 75}{90} = 4.17 \text{ bar} \Rightarrow 31.7 \text{ m}$$

- Quelle leçon faut-il retenir de l'exercice ?

Astuces de calcul

- Trouver une méthode de calcul adapté à soi ;
- Essayer de ramener les calculs à la surface ($p = 1\text{bar}$) ;
- Simplifier au maximum les calculs :
 - Les deux blocs (15l et bi-10) une fois équilibrés ne font qu'un volume de 35l.
- Garder une certaine cohérence dans les calculs :
 - Si l'on diminue la température d'un bloc, sa pression doit diminuer ;
 - Si l'on augmente la pression, le volume doit diminuer.
- Essayer de se rappeler de certaines équations.