

# LES LOIS PHYSIQUES

La plongée est régie par plusieurs lois physiques. Les propriétés de cette physique concernent directement la formation du plongeur et sa sécurité.

Il s'agit de comprendre et d'adapter les différents principes physiques aux modifications physiologiques et mécaniques subies par le plongeur.

# LES PRESSIONS.

- Pression atmosphérique.
- Pression hydrostatique.
- Pression relative.
- Pression absolue.

## BOYLE ET MARIOTTE.

- Paul Bert.
- Lorrain Smith.
- La consommation d'air.

## ARCHIMEDE.

## HENRY.

## DALTON.

# LES PRESSIONS

En surface comme en plongée, le plongeur subit en permanence une pression.

Les unités de pression généralement utilisées par le plongeur sont:

$$\begin{aligned} 1 \text{ bar} &= 1 \text{ atmosphère} = 760 \text{ mm Hg} \\ &= 100000 \text{ Pascal} = 1 \text{ Kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

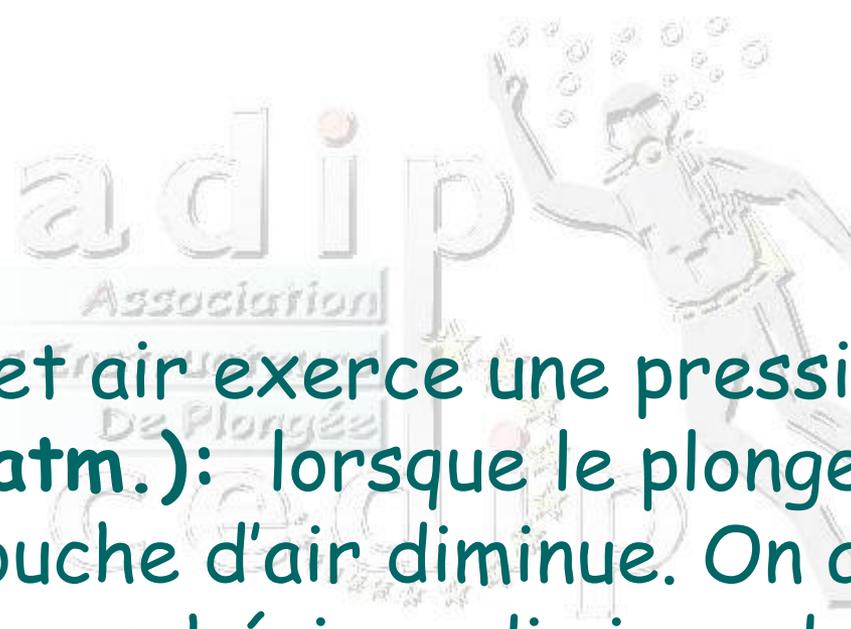
En plongée, on parle de 4 mesures de pression.

# La pression atmosphérique

## La pression de surface:

La couche d'air que nous respirons est mesurée au vide. Un litre d'air pèse 1,293 gramme au niveau de la mer.

La pression atmosphérique au niveau de la mer vaut 760 mm Hg ou 1033 hectopascals. Pour simplifier, nous considèrerons que sa valeur au niveau de la mer est de 1 bar.



Le poids de cet air exerce une pression sur le plongeur ( $P_{atm.}$ ): lorsque le plongeur monte en altitude, la couche d'air diminue. On admettra que la pression atmosphérique diminue de 0,1 bar par 1000 mètres d'altitude.

# La pression hydrostatique

La pression de l'eau représente le poids d'une colonne d'eau de 10 mètres sur une surface de 1 cm<sup>2</sup>.

Un litre d'eau douce pèse 1 Kg et un litre d'eau de mer pèse 1,026 Kg. Cette pression (P. hyd.) varie en fonction du poids de l'eau.

# La pression relative

Elle est mesurée par rapport à une pression de référence.

En plongée, elle représente également la pression hydrostatique.

# La pression absolue

Elle représente la somme de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique ou relative.

$$P. \text{ absolue} = P. \text{ atmosphérique.} + P. \text{ hydrostatique}$$

Ou  $P. \text{ relative.}$

## Schéma des pressions :

Pression atmosphérique : diminue de 0,1 b par 1000 mètres franchis.

Pression absolue :  
Elle représente la  
somme de la  
pression  
atmosphérique et  
de la pression  
hydrostatique ou  
relative.

A 5000 m : la P. atm. est de  $1 \text{ b} - 0,5 = 0,5 \text{ b.}$

A 4000 m : la P. atm. est de  $1 \text{ b} - 0,4 = 0,6 \text{ b.}$

A 3000 m : la P. atm. est de  $1 \text{ b} - 0,3 = 0,7 \text{ b.}$

A 2000 m : la P. atm. est de  $1 \text{ b} - 0,2 = 0,8 \text{ b.}$

A 1000 m : la P. atm. est de  $1 \text{ b} - 0,1 = 0,9 \text{ b.}$

La pression atmosphérique au niveau de la mer : 0 m = 1,013 bar (arrondi à 1 bar) ou à 760 mm

A - 10 m : 1 b de P. atm. + 1 b de P. rel. = 2 bs de P. absolue.

A - 20 m : 1 b de P. atm. + 2 b de P. rel. = 3 bs de P. absolue.

A - 30 m : 1 b de P. atm. + 3 b de P. rel. = 4 bs de P. absolue.

A - 40 m : 1 b de P. atm. + 4 b de P. rel. = 5 bs de P. absolue.

A - 50 m : 1 b de P. atm. + 5 b de P. rel. = 6 bs de P. absolue.

Pression relative : Augmente de 1b par 10 m d'eau franchis.

Le schéma ci-dessus montre que plus le plongeur descend en profondeur, plus la pression va augmenter, et plus la plongée deviendra technique.

On peut dire que les plongées dans la zone entre 0 et 30 mètres font partie de la plongée loisir et que les plongées dépassant les 30 mètres font partie des plongées sportives: elles restent réservées aux plongeurs expérimentés et qualifiés.

# Boyle et Mariotte

Cette loi physique nous explique que la pression et le volume d'un gaz sont inversement proportionnels, ce qui implique qu'elles régissent les accidents dits **mécaniques**.

**A température constante, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il subit.**

P1 : pression en surface et V1 : volume en surface.  
 P2 : pression en plongée et V2 volume en plongée.  
 La formule :  $P1/P2 = V2/V1$  ou  $P1 \times V1 = P2 \times V2$   
 = **CONSTANTE.**



Profondeur	P. absolue	Volume (L)	Constante
0 mètre.	1 bar.	12 l.	12
10 mètres.	2 bars.	6 l.	12
20 mètres.	3 bars.	4 l.	12
30 mètres.	4 bars.	3 l.	12
40 mètres.	5 bars.	2,4 l.	12
50 mètres.	6 bars.	2 l.	12

Zone de plongée entre 0 et 10 m : la variation du volume de gaz est la plus importante.

Dans la zone des dix premiers mètres, le plongeur doit impérativement redoubler de prudence, car les variations de volume et de pression sont proportionnellement plus importantes qu'en profondeur.

« Cette zone constitue un passage à haut risque pour le plongeur débutant mais également pour le plongeur confirmé, aussi bien à la descente qu'à la remontée ».

Il existe deux autres lois qui régissent également la pression et le volume d'un gaz en fonction de sa température.

**La loi de Gay Lussac :**

A pression constante, le volume d'un gaz est directement proportionnel à sa température.

$$V1 / T1 = V2 / T2 = \text{Constante.}$$

**La loi de Charles :**

A volume constante, la pression que le gaz subit est directement proportionnelle à sa température.

$$P1 / T1 = P2 / T2 = \text{Constante.}$$

Ces lois régissent les gaz parfaits. Pour le plongeur, l'air est considéré comme un gaz parfait dans des conditions de plongée où la température et la pression sont normales.

Les lois de Gay Lussac et Charles nous apprennent principalement que la température est un facteur non négligeable lors du gonflage des bouteilles de plongée.

**La température est exprimée en Kelvin :**  
**0 Centigrade = 273 Kelvin.**

On peut dire que la pression dans les bouteilles va diminuer si la température diminue ou qu'elle va augmenter si la température augmente.

En pratique, cela veut dire que si après le gonflage de la bouteille la température diminue, sa pression dans la bouteille diminue donc moins de réserve d'air pour effectuer la plongée.

Plus important encore: si la température augmente, la pression de la bouteille va augmenter également: il y aura un danger d'explosion.

# Exemple

Une bouteille gonflée et laissée dans le coffre d'une voiture, exposée au soleil.

En général, pour les calculs de planification de ses plongées, le plongeur tiendra principalement compte de la loi de **Boyle et Mariotte**.

# La consommation d'air

En surface, un plongeur consomme une moyenne de 20 litres d'air par minute.

Pour le calcul d'une consommation d'air en plongée, on multiplie le nombre de litre d'air par la pression absolue puis par le temps de plongée.

**L'air en litre x la pression absolue x le temps.**

# Exemple



Pour une plongée planifiée à 40 mètres pendant 20 minutes avec une bouteille de 15 litres gonflée à 200 bars.

Quantité d'air disponible avant la plongée:  $15 \times 200 = 3000$  litres moins 15 litres non utilisables (litres restant à l'intérieur de la bouteille) = 2985 litres.

Quantité d'air utilisé pour la plongée :  $20 \times 5$  bars (P. abs.)  $\times$  20 minutes de temps de plongée = 2000 litres.

Quantité d'air utilisée pour les paliers en fonction du mode de décompression choisi (6 minutes à 3 mètres) :  $20 \times 1,3$  bars (P. abs)  $\times$  6 minutes de temps de palier = 156 litres.

**Total :  $2000 + 156 = 2156$  litres.**

# ARCHIMÈDE

La loi d'Archimède nous explique pour quelle raison le plongeur doit porter une ceinture de lest pour l'aider à couler ainsi que la raison pour laquelle il doit rester équilibré pendant toute la plongée.

**Tout corps plongé dans un liquide reçoit de la part de celui-ci une poussée verticale du bas vers le haut égale au poids du volume de liquide déplacé.**

Dans un liquide, le poids réel d'un corps va changer: il devient son poids apparent.

Le poids apparent est plus faible que le poids réel et la différence entre les deux est la **poussée d'ARCHIMÈDE**.

**Poids apparent = poids réel - la poussée d'Archimède.**

# Exemple en eau douce

Pour un plongeur qui pèse tout équipé 80 kg et qui dans l'eau douce déplace un volume de 60 litres.

(1 L d'eau douce = 1 kg)

Il reçoit en retour une poussée d'Archimède de  $60 \times 1 = 60\text{kg}$ , qui va diminuer son poids réel de 60 kg: quel sera son poids apparent ?

Poids réel (80 kg) - poussée d'Archimède (60 kg) = 20 kg de Poids apparent.

# Exemple en eau salée

Un plongeur qui pèse tout équipé 80 kg et qui dans l'eau salée déplace un volume de 60 litres.

(1 litre d'eau salée = 1,026 kg).

Il reçoit en retour une poussée d'Archimède de  $60 \times 1,026 = 61,56$  kg qui va diminuer son poids réel de 61,56: quel sera son poids apparent ?

Poids réel (80 kg) - poussée d'Archimède (61,56 kg) = 18,44 kg de Poids apparent.

# Conclusion



Plus la densité de l'eau est importante, plus la poussée est forte.

La densité de l'eau douce étant inférieure à celle de l'eau de mer, la poussée d'Archimède en eau douce sera toujours, pour un même volume, inférieure à la poussée d'Archimède en mer.

Voilà pourquoi dans l'eau, le plongeur aura une flottabilité différente selon son évolution en plongée. Tout va dépendre du facteur poids et volume, mais également de la densité du liquide.

Le plongeur flotte : Si la poussée d'Archimède est plus grande que le poids réel.

**(flottabilité positive)**

Le plongeur coule : Si la poussée d'Archimède est moins grande que le poids réel.

**(flottabilité négative)**

Le plongeur équilibré : Si la poussée d'Archimède est égale au poids réel.

**(flottabilité nulle)**

Les variations de pression au cours d'une plongée agissent sur les volumes gazeux présents dans les équipements de plongée. Ces variations de volume vont influencer l'équilibre du plongeur.

# Application en plongée :

**Le lestage** : Il augmente le poids apparent et doit être calculé de la manière suivante :

Comme les paliers se font la plupart du temps à 3 m, la bouteille étant presque vide.

- Il faut qu'en fin de plongée, la flottabilité du plongeur soit légèrement nulle aux paliers.
- Il doit donc partir légèrement trop lourd en début de plongée.
- Son équilibrage à 3 m sera ensuite ajusté à l'aide de ses poumons.

# Application en plongée :

**Le gilet** : Lorsqu'un plongeur gonfle son gilet, il augmente son volume sans augmenter son poids réel.

La poussée d'Archimède va augmenter et le plongeur remonter.

Mais l'utilisation principale du gilet est de s'assurer une flottabilité nulle à n'importe quelle profondeur.

# Application en plongée :

**Le tuba** : Il sert à augmenter la poussée d'Archimède.

Lorsque le plongeur évolue en surface avec le tuba pour l'aider à respirer, il a la tête dans l'eau: de cette façon, il bénéficie d'une poussée d'Archimède maximale.

**Le canard** : Il sert à diminuer la poussée d'Archimède.

Lorsque le plongeur effectue un canard et lorsqu'il a les jambes hors de l'eau, la poussée d'Archimède diminue: cela permet au plongeur de couler rapidement sans effort.

# Application en plongée :

**Le parachute de levage** : Si l'on veut remonter un objet lourd du fond, il vaut mieux demander à Archimède de nous aider plutôt que de risquer un essoufflement.

On augmente donc le volume de l'objet sans augmenter son poids.

# DALTON

Cette loi régit les mélanges de gaz et la toxicité des gaz que le plongeur respirent en plongée.

Elle permet d'expliquer les accidents dus à la toxicité des gaz et l'utilisation de mélanges gazeux respirables autres que l'air.

Elle intervient également dans l'élaboration des tables de plongée.

**A température donnée, la pression d'un mélange de gaz est égale à la somme des pressions qu'aurait chaque gaz s'il occupait seul le volume total.**

Dans un mélange de différents gaz, on additionne la pression exercée par chacun d'eux pour obtenir la pression totale du mélange.

De plus, lorsqu'un mélange gazeux est en contact avec l'eau, chaque gaz se comporte comme s'il était seul.

# Les pressions partielles

Cette loi va nous permettre de calculer les pressions partielles des gaz respirés à différentes profondeurs.

La pression d'un gaz mélangé à d'autres est nommée **pression partielle**: elle resterait si on ôtait tous les autres gaz du mélange.

L'air que le plongeur respire en surface comme en plongée est un mélange de différents gaz. Nous pouvons considérer l'air comme un mélange respirable.

La composition de l'air est très importante pour comprendre et calculer les limites toxiques de celui-ci.

Oxygène (O<sub>2</sub>) = 20,9%.

Azote (N<sub>2</sub>) = 78,17%.

Gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) = 0,03%.

Gaz rares = 0,9%.

} = 100%

Pour simplifier les calculs :

Oxygène : 20%

Azote : 80%

} = 100%

# Exemple: Que se passe-t-il de 0 à 80 mètres?



Profondeur	P. absolue	P. partielle d'azote	P. partielle d'oxygène
0 mètre	1 bar	$1 \times 80\% = 0,8 \text{ bar}$	$1 \times 20\% = 0,2 \text{ bar}$
- 10 mètres	2 bars	$2 \times 80\% = 1,6 \text{ bar}$	$2 \times 20\% = 0,4 \text{ bar}$
- 20 mètres	3 bars	$3 \times 80\% = 2,4 \text{ bars}$	$3 \times 20\% = 0,6 \text{ bar}$
- 30 mètres	4 bars	<b><math>4 \times 80\% = 3,2 \text{ bars}</math></b>	$4 \times 20\% = 0,8 \text{ bar}$
- 40 mètres	5 bars	<b><math>5 \times 80\% = 4,0 \text{ bars}</math></b>	$5 \times 20\% = 1,0 \text{ bar}$
- 50 mètres	6 bars	<b><math>6 \times 80\% = 4,8 \text{ bars}</math></b>	$6 \times 20\% = 1,2 \text{ bar}$
- 60 mètres	7 bars	<b><math>7 \times 80\% = 5,6 \text{ bars}</math></b>	<b><math>7 \times 20\% = 1,4 \text{ bar}</math></b>
- 70 mètres	8 bars	<b><math>8 \times 80\% = 6,4 \text{ bars}</math></b>	<b><math>8 \times 20\% = 1,6 \text{ bar}</math></b>
- 80 mètres	9 bars	<b><math>9 \times 80\% = 7,2 \text{ bars}</math></b>	<b><math>9 \times 20\% = 1,8 \text{ bar}</math></b>

La zone bleue: le gaz respiré commence à influencer le plongeur.

La zone orange = limite à ne pas franchir.

La zone rouge = danger.

# HENRY

En plongée, nous respirons l'air sous pression. La loi d'Henry régit les gaz qui vont se dissoudre dans l'organisme du plongeur. Elle intervient également dans l'élaboration des tables de plongée.

**A température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est directement proportionnelle à la pression exercée par ce gaz à la surface du liquide.**

En fait, tous les différents tissus du plongeur ne se dissolvent pas tous de la même manière et à la même vitesse. La dissolution est influencée par différents facteurs :

La nature du gaz pour un tissu donné.

La nature du tissu pour un gaz donné.

La grandeur de la surface de contact.

La pression exercée par le gaz sur le tissu.

La durée pendant laquelle s'exerce cette pression.



En ce qui concerne la température, son influence est minime car durant la plongée, le plongeur conserve une température plus ou moins constante avec de faibles variations. Il faut tenir compte également que si le gaz à la surface du tissu exerce une certaine pression, le gaz dissout dans le tissu exerce aussi une certaine pression sur le tissu et le gaz libre.

Cette dernière pression est appelée **TENSION** de gaz dissous. La vitesse de saturation est définie par la **période**: c'est le temps que va mettre le tissu pour arriver à la moitié de sa saturation. La période se mesure en minutes. On considère qu'un tissu est saturé après 6 périodes. En réalité, après 9 périodes, il est saturé à 99%.

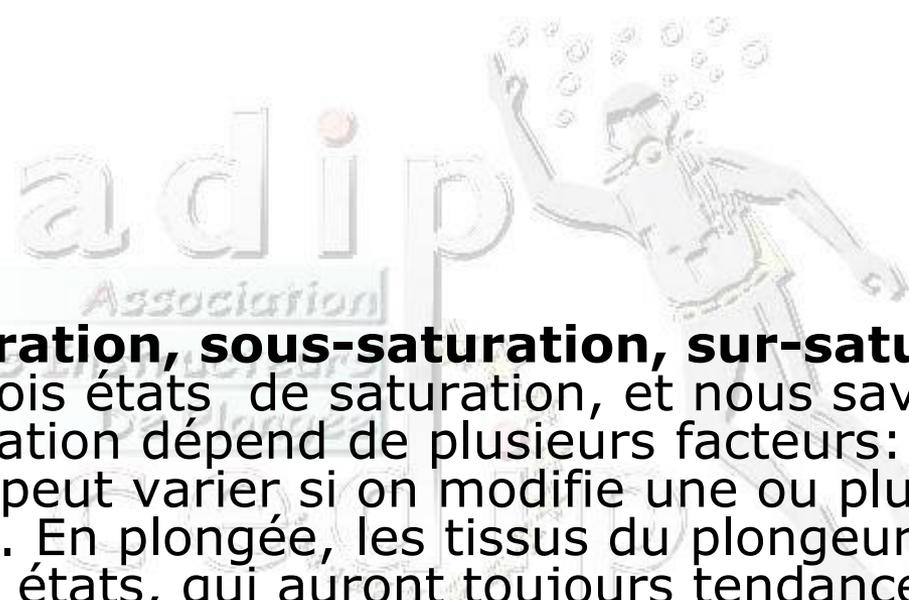
Période	Gaz disponible	Coefficient	Gaz dissous	Saturation
1 ère	100%	$\times \frac{1}{2}$	50%	50%
2 ème	50%	$\times \frac{1}{2}$	25%	50+25 =75%
3 ème	25%	$\times \frac{1}{2}$	12,5%	75+12,5=87,5%
4 ème	12,5 %	$\times \frac{1}{2}$	6,25%	87,5+6,25=93,75%
5 ème	6,25%	$\times \frac{1}{2}$	3,125%	93,75+3,125=96,875%
6 ème	3,125%	$\times \frac{1}{2}$	1,562%	96,875+1,562=98,437%
7 ème	1,562%	$\times \frac{1}{2}$	0,781%	98,437+0,781=99,218%
8 ème	0,781%	$\times \frac{1}{2}$	0,39%	99,218+0,390=99,608%
9 ème	0,39%	$\times \frac{1}{2}$	0,195%	99,608+0,195=99,803%



La saturation et désaturation de l'oxygène ne posent pas de problème: ce gaz est utilisé par les tissus du plongeur et consommé en partie. L'azote représente un problème plus important car son pourcentage est quatre fois plus élevé que l'oxygène et il n'a aucune possibilité d'être métabolisé.



**Le compartiment :** Il se définit par sa période. Les compartiments regroupent les tissus qui saturent et désaturent de la même manière. Il existe des compartiments lents et rapides: les compartiments rapides regroupent des tissus fortement irrigués par le sang. Il arrivent plus vite à saturation que les autres.

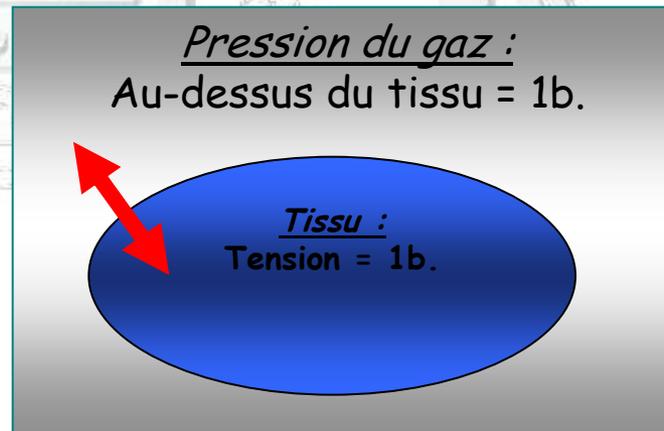


**La saturation, sous-saturation, sur-saturation :** Il existe trois états de saturation, et nous savons que l'état de saturation dépend de plusieurs facteurs: il s'agit d'un état qui peut varier si on modifie une ou plusieurs données. En plongée, les tissus du plongeur vont passer par trois états, qui auront toujours tendance à revenir à saturation.

Etat observé en surface et début de plongée.

La saturation : C'est l'état d'équilibre entre la pression exercée par le gaz au-dessus du tissu et la tension du gaz dissout, à l'intérieur du tissu.

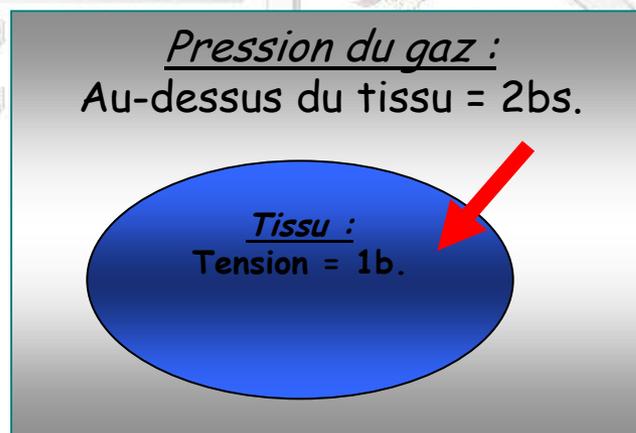
(Quantité maximale de gaz qu'un tissu peut dissoudre)



Etat observé lors de la descente et pendant la plongée.

La sous-saturation : C'est la pression exercée par le gaz au-dessus du tissu qui est supérieure à la tension du gaz dissout, à l'intérieur du tissu.

(Pour tendre vers un état d'équilibre).



Etat observé à la remontée et principalement en surface en fin de plongée.

La sur-saturation : C'est la pression exercée par le gaz au-dessus du tissu qui est inférieure à la tension du gaz dissout, à l'intérieur du tissu.

(Pour tendre vers un état d'équilibre).

Pression du gaz :

Au-dessus du tissu =  $1b$ .

Tissu :

Tension =  $2bs$ .



Nous pouvons observer, qu'à la descente la pression absolue augmente, donc la pression de gaz au-dessus du tissu augmente également et que la teneur en gaz dissous va augmenter pour tendre vers un état d'équilibre.

Par contre à la remontée et principalement en fin de plongée, c'est l'inverse qui se produit: la pression de gaz à l'extérieur du tissu diminue et la teneur de gaz dissout dans le tissu va diminuer pour tendre vers un état d'équilibre.

Ce mécanisme oblige le plongeur à adopter un protocole de décompression, qui lui permettra d'évacuer l'azote dissout en évitant l'apparition de bulles pathogènes.

Le plongeur devra donc respecter la vitesse de remontée et les paliers prévus dans son protocole de décompression choisi.