Utiliser le matériel de plongée

II - Détenteurs

Support de cours (GP)

Christophe Libert – Stagiaire pédagogique MF1

Saison 2016/2017

Table des matières

1 Introduction : un peu d'histoire 3
2 Principes de fonctionnement 4
2.1 Un détendeur simple 4
2.2 Application : le « Mistral » (1955) 4
3 Les détendeurs modernes à deux étages (1960) 5
3.1 Principe 5
3.2 Le premier étage 6
3.2.1 Fonctionnement 6
3.2.2 Compensation 6
3.2.3 Détendeurs à membrane 7
3.2.4 Surcompensation 8
3.3 Le deuxième étage 10
3.3.1 Principe 10
3.3.2 La compensation 11
3.3.3 Autres améliorations 12
3.3.3.1 Introduction 12
3.3.3.2 L'effet Venturi 12
3.3.3.3 L'effet Vortex 13
3.4 Les éléments composant un détendeur 14
3.4.1 Sièges et clapets 14
3.4.2 Ressorts 14
3.4.3 Membranes 15
3.4.4 Pistons 15
3.4.5 Pointeaux et leviers 15
3.4.6 Systèmes d'expiration 15
3.4.7 Joints d'étanchéité 16
3.4.8 Boîtiers 16
3.4.9 Tuyaux 17
3.4.10 Fixations sur la bouteille 17
3.4.11 Filtres d'entrée 18
3.4.12 Embout 18
4 Performances 18
4.1 Premier et deuxième étage 18
4.2 Manomètre 19
5 Détendeur et froid 20
5.1 Le refroidissement de l'air et le phénomène de « givrage » 20
5.2 Dispositifs de protection 20
6 Entretien 21
6.1 Hygiène 21
6.2 Entretien périodique 21
6.2.1 Chez le constructeur 21
6.2.2 Par le plongeur 21
6.3 Pannes 22
7 Pour le guide de palanquée 22

Sources :

- Appareil plongeur Rouquayrol/Denayrouse :
  - Schéma brevet http://asor.free.fr/celebrite-plongee/celebrites_plongee.shtml
  - Illustration de couverture : http://www.plongeesout.com/articles%20publication/recycleur/recycleur_bahuet/recycleur_bahuet%20photo04%20grand.JPG
- Site personnel d'Henri LE BRIS (IN 87), section « Détendeurs » : http://hlbmatos.free.fr/
- CODEP01 : cours N4 2010
- FFESSM – Manuel de formation technique (http://www.ffessm.fr/pages_manuel.asp)
- Alain Foret, Plongée plaisir 4 et IllustraPack 3 (http://www.plongee-plaisir.com/fr/)
- Film EN 250 : http://www.scuba-people.info/Detendeurs-de-plongee-suivez-la-courbe_a112.html

1 Introduction : un peu d'histoire

L'ancêtre en ligne directe le plus lointain des détendeurs de plongée est le « régulateur destiné à régulariser l'écoulement des gaz comprimés » breveté par l'ingénieur des mines Benoit Rouquayrol en 1860, destiné aux sauvetages dans les mines en cas de « coup de grisou » ou de galeries inondées.

Il rencontra ensuite le lieutenant de vaisseau Auguste Denayrouze, avec lequel il perfectionna son invention pour l'appliquer à la plongée : ainsi naquit le scaphandre autonome dénommé « appareil plongeur Rouquayrol-Denayrouze » (1864).

Cet appareil resta limité en autonomie (au mieux 30 min. à 10 m) jusqu'en 1943, date à laquelle Emile Gagnan, Jacques-Yves Cousteau, avec l'aide de plusieurs amis, perfectionnèrent l'invention de Rouquayrol et Denayrouze (débit à la demande, fonctionnement en toute position…) et l'associèrent à des réservoirs en acier, capable de supporter des pressions bien plus élevées que les réservoirs en cuivre du XIXème siècle. Ils brevetèrent le « scaphandre Cousteau-Gagnan » en 1943, puis le « CG45 », évolution du précédent, en 1945, et en 1955 le « Mistral », détendeur à un seul étage, simplification du « CG45 ».

Ce fut le début de l'essor de la plongée loisirs : les fabricants se multiplièrent et étoffèrent l'offre de maétriel.

En 1993, la norme européenne EN250 définit une base commune et des critères de qualité et de performance minimaux pour tous les détendeurs commercialisés.

Le cours ci-après détaille l'ensemble des éléments nécessaires pour l'examen GP, et au-delà.

On attend notamment de vous :

- que vous connaissiez les deux types de mécanisme piston et membrane, avec leurs avantages et inconvénients respectifs ;
- que vous puissiez expliquer en quoi consistent un « clapet amont » et un « clapet aval » ;
- que vous puissiez expliquer le fonctionnement d'un détendeur (1er et 2ème étages) à partir du bilan des forces sur un schéma[1] ;
- que vous puissiez décrire les diverses améliorations apportées au mécanisme de base et leur fonctionnement : réglages, compensation, effet Venturi ;
- une capacité à diagnostiquer les pannes et à remédier aux pannes simples ;

… et n'oubliez pas que vous aurez aussi un rôle de conseil auprès des plongeurs !

1 Les équations sur les forces ne sont pas à retenir pour l'examen GP : il suffit de savoir expliquer le fonctionnement à partir du bilan des forces qui ferment et de celles qui ouvrent.

2 Principes de fonctionnement

2.1 Un détendeur simple

Composantes :

- une arrivée d'air comprimé ;
- un dispositif pour réguler le passage de l'air = un clapet (mobile) qui vient fermer le passage de l'air en se posant sur un siège (fixe) ;
- une membrane en contact avec l'eau, reliée par une tige au clapet ;
- un tuyau qui amène l'air à l'utilisateur ;
- un dispositif pour laisser sortir l'air expiré (bec de canard).

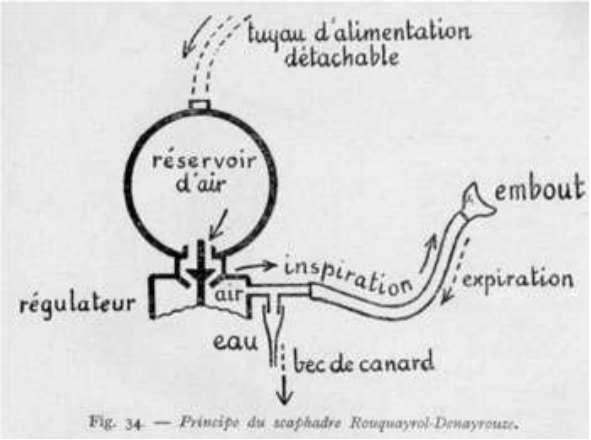


Illustration 1: schéma, extrait du brevet Rouquayrol-Denayrouze (1865) ?

Bilan des forces sur le clapet :

- forces qui ouvrent :
  - force Fa due à pression ambiante (Pa)
- forces qui ferment
  - force due à la pression de l'air arrivant sous pression (F_{HP}, appuie sur le clapet)
  - force due à pression de l'air dans la chambre post-clapet (F_{PI}, appuie sur la membrane)
  - force due à l'élasticité de la membrane (K, tire sur la tige)

A l'équilibre, $Fa = F_{HP} + F_{PI} + K$;

Si on inspire, PI ↘ ⇒ $Fa > F_{HP} + F_{PI} + K$ ⇒ le clapet s'ouvre

2.2 Application : le « Mistral » (1955)

Amélioration du brevet Roquayrol-Denayrouze :

- L'air expiré est rejeté séparément de l'air inspiré
- L'air expiré est ramené au niveau de la membrane (rend le fonctionnement plus stable)
- La membrane comporte une partie rigide (pour appuyer sur le levier)
- La force exercée par l'eau sur la membrane est amplifiée par des leviers
- La membrane appuie sur le clapet par l'intermédiaire d'un pointeau
- Au repos, le clapet est maintenu fermé par un petit ressort
- Exploitation d'un effet Venturi (facilite l'inspiration)

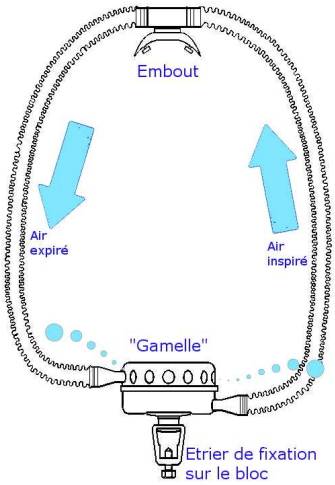


Illustration 2: Détendeur Mistral : vue d'ensemble

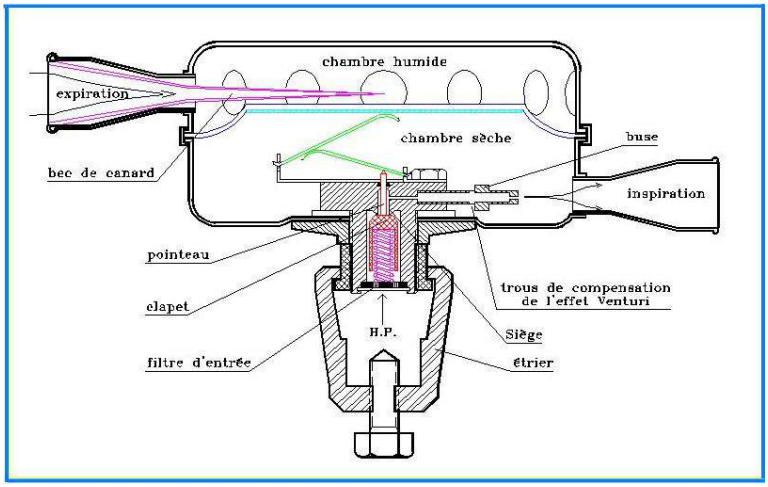


Illustration 3: Le détendeur Mistral

Bilan des forces sur le clapet :

- forces qui ouvrent :
  - force due à la pression ambiante (Pa) sur la membrane (Fa), amplifiée par les leviers (x N)
- forces qui ferment :
  - force du ressort : K
  - force de l'air sous pression : F_{HP}
  - force due à la pression de l'air dans la chambre sèche (F_{PI})

L'équation est la même que dans le cas précédent, mais l'effet de levier provoque une ouverture plus franche du clapet.

Avantages	Inconvénients
→ Simple et robuste → Sortie d'air dorsale, ne gène ni la vue ni l'ouïe	→ Le débit est tributaire de la position de l'embout par rapport au détendeur : • au même niveau : utilisation normale • embout au-dessus : débit continu • embout en-dessous : effort inspiratoire supplémentaire → Clapet et siège soumis à de fortes pressions ⇒ usure rapide → Tuyaux basse pression fragiles → La sensibilité diminue avec la pression dans la bouteille → Nécessite un apprentissage pour passer l'embout ou le reprendre

3 Les détendeurs modernes à deux étages (1960)

3.1 Principe

Tous les détendeurs commercialisés aujourd'hui détendent l'air en deux fois.

Un premier étage, fixé sur la bouteille, fait passer l'air de la pression de la bouteille (200 à 300 bars) à la pression ambiante (pression ambiante à la profondeur considérée) plus 8 à 12 bars selon les fabricants.

Le deuxième étage, tenu en bouche et relié au premier par un flexible, ramène cette pression à la pression ambiante.

Cette configuration permet un contrôle plus fin de la détente de l'air qu'un étage unique. Le débit de l'air détendu est indépendant de la position relative de l'embout et du premier étage. Elle permet également de brancher un système gonflable directement sur le premier étage et de bénéficier d'un débit important.

3.2 Le premier étage

3.2.1 Fonctionnement

Exemple : détendeur à piston, clapet aval.

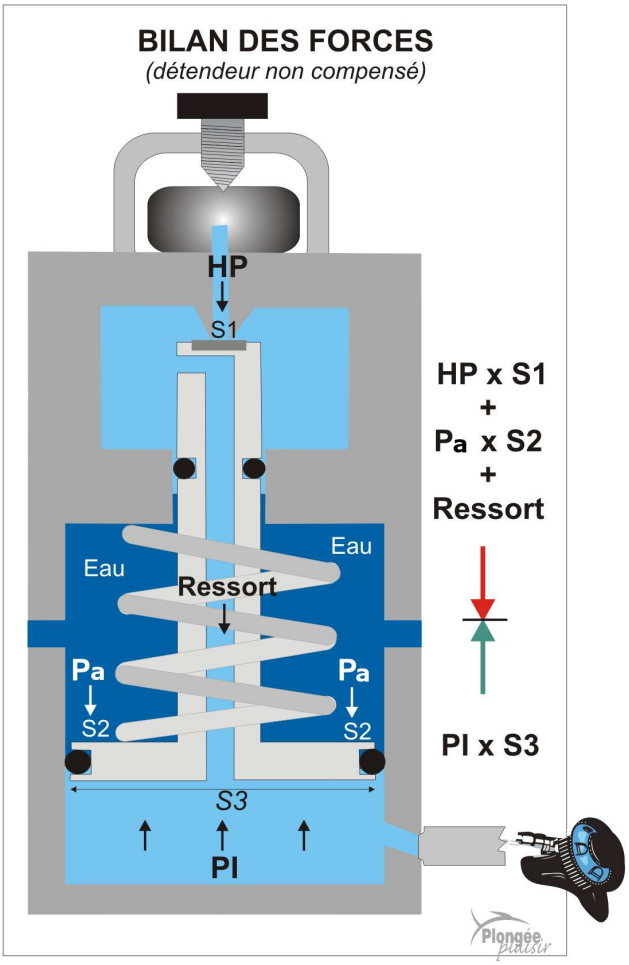
- La pièce mobile est un piston, deux joints toriques assurent l'étanchéité.
- Un ressort ajoute sa force à celle exercée par la pression ambiante.

Bilan des forces :

- forces qui ouvrent :
  - force due à l'air HP sur le clapet : F_{HP} = HP x S1
  - force du ressort : K
  - force force due à la pression de l'eau sur le piston : Fa = Pa x S2
- force qui ferme :
  - force exercée par l'air détendu sur le piston : F_{PI} = PI x S3

A l'équilibre :

$$F_{HP} + Fa + K = F_{PI}$$



Lorsqu'on inspire, PI diminue, les forces dominantes conduisent à l'ouverture du clapet, jusqu'à ce que PI augmente suffisamment pour le fermer à nouveau.

On notera que pour une profondeur donnée, la pression intermédiaire (PI) (= pression de l'air détendu) diminue avec la pression de l'air dans le bloc (HP).

3.2.2 Compensation

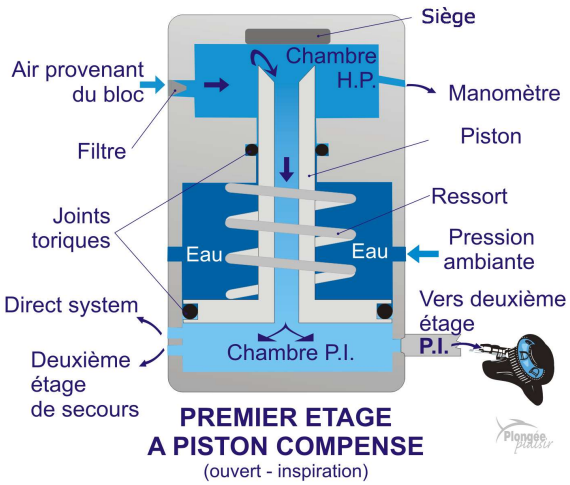
Un premier étage compensé est conçu de manière à rendre la pression intermédiaire indépendante de la haute pression.

Exemple : premier étage à piston.

L'air HP arrive latéralement, et n'exerce pas de force sur le piston.

Bilan des forces :

- forces qui ouvrent :
  - force du ressort : K



- force force due à la pression de l'eau sur le piston : Fa = Pa x S2

- force qui ferme :
  - force exercée par l'air détendu sur le piston : F_{PI} = PI x S3

A l'équilibre :

$$Fa + K = F_{PI}$$

La pression intermédiaire ne dépend plus que de la pression ambiante.

Illustration 4: Piston compensé Scubapro (S2/S3 > 0,95)

Avantages du piston compensé :

- La pression intermédiaire est quasi indépendante de la profondeur (voir ci-après) ;
- Les arrivées HP peuvent être de plus fort diamètre, et donc autoriser un débit important.

Pour aller plus loin : variation de la pression intermédiaire avec la profondeur

En développant l'équation ci-dessus : **Pa x S2 + K = PI x S3 ⟺ PI = Pa x S2/S3 + K/S3**

On peut constater que :

- PI est fonction d'une constante (K/S3) et de la pression ambiante Pa multipliée par le rapport des surfaces S2/S3 :

K/S3	S2/S3	PI-Pa (surface)	PI-Pa (-60 m)	Variation 0-60 m
10	0,96	10	9,7	-2 %
10	0,90	9,9	9,3	-6 %
10	0,70	9,7	7,9	-19 %

⇒ la pression intermédiaire n'est pas rigoureusement constante avec la profondeur, elle diminue légèrement

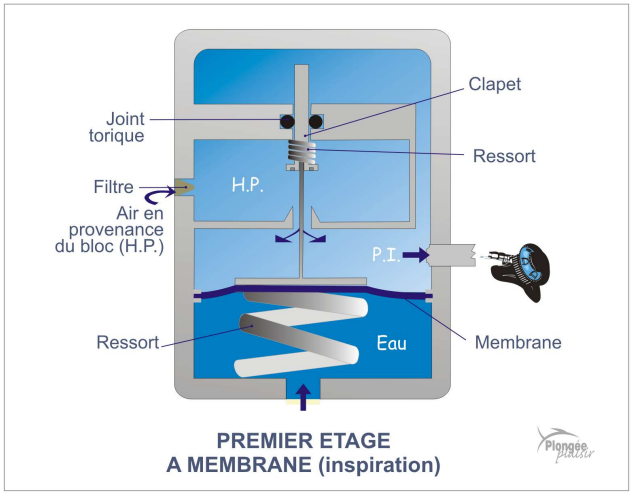
⇒ plus S2/S3 est proche de 1 (i.e. faible diamètre du clapet, fort diamètre du piston), moins cet effet est marqué.

- Le rapport K/S3 (= raideur du ressort ramenée au diamètre du piston) est le principal facteur qui détermine la différence entre pression ambiante et pression intermédiaire (8 à 12 bars selon les fabricants).

3.2.3 Détendeurs à membrane

Exemple : détendeur compensé à membrane, clapet amont.

En dehors des détendeurs à piston, il existe également des détendeurs à membrane, dans lesquels la face du piston en contact avec le milieu extérieur est remplacée par une membrane, qui transmet la poussée de l'eau via un pointeau. L'étanchéité Pa/PI est assurée par la membrane ; l'étanchéité PI/HP par un joint torique.



Bilan des forces :

- forces qui ouvrent :
  - force du ressort : K
  - force force due à la pression de l'eau sur la membrane : Fa = Pa x S
- forces qui ferment :
  - force du ressort de rappel : k
  - force due à la pression intermédiaire sur la membrane : F_{PI} = PI x S

A l'équilibre :

$$K + Fa = k + F_{PI}$$

$$K + Pa \times S = k + PI \times S$$

$$PI = (K-k)/S + Pa$$

La pression intermédiaire est égale à la pression ambiante augmentée d'une constante (K-k)/S et ne dépend pas de la haute pression.

3.2.4 Surcompensation

Les surcompensations sont d'apparition récente (2004). Terme commercial, il désigne des réalités différentes selon la technologie concernée.

Piston surcompensé (ex. Scubapro)

La surcompensation d'un piston vise à rendre la pression intermédiaire dépendante de la HP selon une fonction inverse. La HP est réintroduite dans l'équation par le biais d'un épaulement (surlargeur) sur la face externe à l'extrémité du piston. Cet épaulement subit la HP, qui génère une force qui ferme le clapet :

$$Pa \times S1 + K = F_{PI} + (S3-S2) \times HP$$

Ainsi, en fin de plongée, la HP diminuant, la pression intermédiaire augmente.

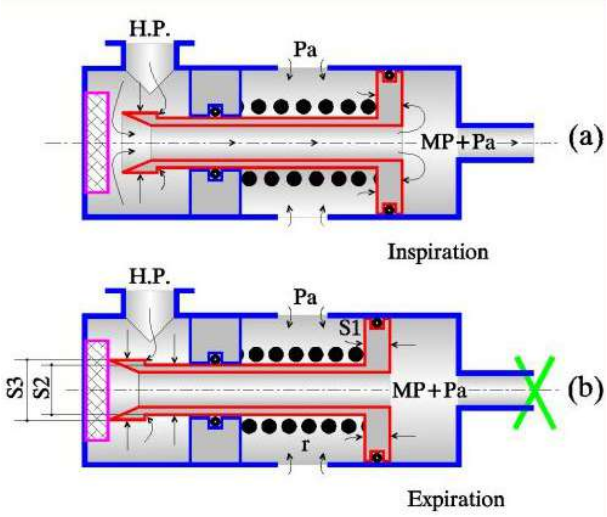


Illustration 5: Détendeur à piston surcompensé

NB : Ce schéma fait apparaître un nouveau terme, la moyenne pression MP. Par convention, la pression intermédiaire PI est la somme de la pression ambiante (ou pression absolue) Pa et de la moyenne pression MP : PI = MP + Pa.

Membrane surcompensée (ex. Aqualung, Beuchat, Apeks, Hollis...)

La surcompensation vise à pallier aux pertes de charges dues à l'augmentation de la viscosité de l'air en profondeur : il s'agit d'une augmentation de la pression intermédiaire avec la profondeur. Cet effet est obtenu par exemple sur les premier étages de la série Legend avec le montage ci-contre :

- Deux membranes isolent le ressort du milieu extérieur.
- L'air entre ces membranes est à la pression ambiante au moment du montage du détendeur (PA).
- Les parties rigides des deux membranes sont reliées entre elles par une tige dont l'extrémité appuie sur le clapet (monté en clapet amont).
- La partie rigide de la membrane externe a un diamètre plus important que celle de la membrane interne.

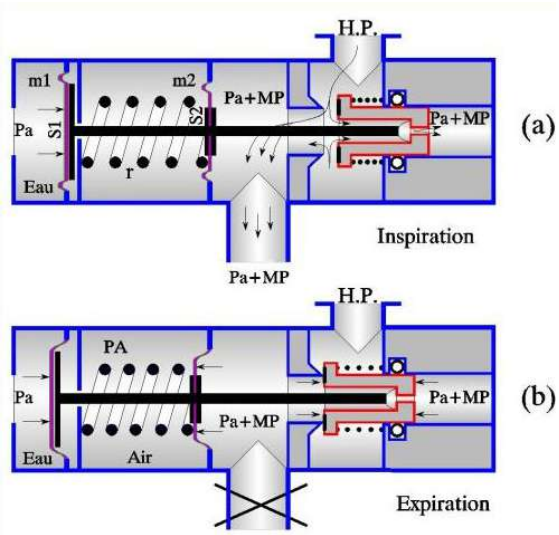


Illustration 6: Détendeur à membrane surcompensé

Bilan des forces :

- forces qui ouvrent :
  - force du ressort : K
  - force due à la pression de l'eau diminuée de PA sur la membrane externe : Fa = (Pa - PA) x S1
- forces qui ferment :
  - force exercée par l'air détendu diminuée de la pression PA sur la membrane interne : F_{PI} = (PI - PA) x S2
  - ressort de rappel : k

A l'équilibre :

$$\mathbf{Fa + K = F_{PI} + k}$$

$$\mathbf{\Longleftrightarrow (Pa - PA) \times S1 + K = (PI - PA) \times S2 + k}$$

$$\mathbf{\Longleftrightarrow PI = (Pa - PA) \times S1/S2 + (K - k)/S2 + PA}$$

$$\mathbf{\Longleftrightarrow PI = PA\,(1 - S1/S2) + (K-k)/S2 + Pa \times S1/S2}$$

On pose :

- C_1 = PA x (1 – S1/S2) + (K – k)/S2 ; PA, S1, S2, K, k sont des constantes ⇒ C_1 est une constante.
- C_2 = S1/S2 ⇒ C_2 est aussi une constante ; comme S1 > S2, C_2 > 1

L'équation se simplifie en :

$$\mathbf{PI = C_1 + Pa \times C_2}$$

⇒ La pression intermédiaire augmente avec la profondeur d'un facteur S1/S2, rapport des surfaces des parties rigides des deux membranes.

3.3 Le deuxième étage

3.3.1 Principe

Le deuxième étage possède les mêmes éléments de base qu'un premier étage :

- Un boitier **rigide**, renfermant le mécanisme, laissant passer l'eau d'un côté de la membrane ;
- Une **arrivée d'air**, fermée par un **clapet** reposant sur un **siège** ;
- **L'ouverture** du clapet est **commandée par une dépression**.

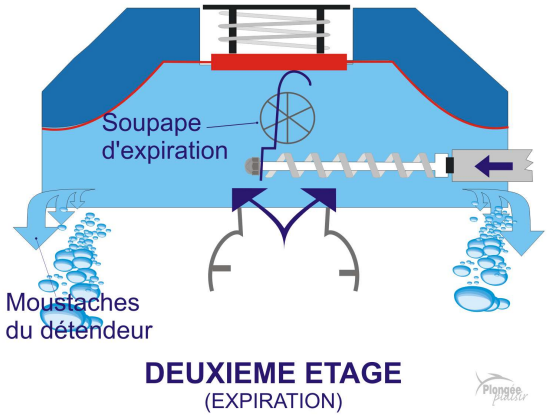


Illustration 7: Deuxième étage en position repos (expiration)

Si un premier étage peut accueillir un clapet amont ou aval, celui du deuxième étage est toujours un clapet aval, par sécurité : si le premier étage fuit, l'air sous pression dans le flexible de raccordement peut en effet s'échapper avec un clapet aval, alors qu'avec un clapet amont la pression augmenterait jusqu'à déchirure du flexible.

Le deuxième étage possède également :

- Un **embout** permettant de tenir le détendeur en bouche, d'inspirer et d'expirer ;
- Au moins une **soupape d'expiration**, chargée de laisser sortir l'air expiré et d'empêcher l'eau de rentrer lors de l'inspiration. Cette soupape est souvent prolongée de « moustaches » qui éloignent le flux d'air expiré sur les côtés du visage ;
- A l'intérieur du boitier d'un second étage, c'est toujours une **membrane** qui sépare le volume en contact avec le milieu ambiant via des ouvertures du boitier (« chambre humide ») de la partie où l'air se détend et circule (« chambre sèche »).

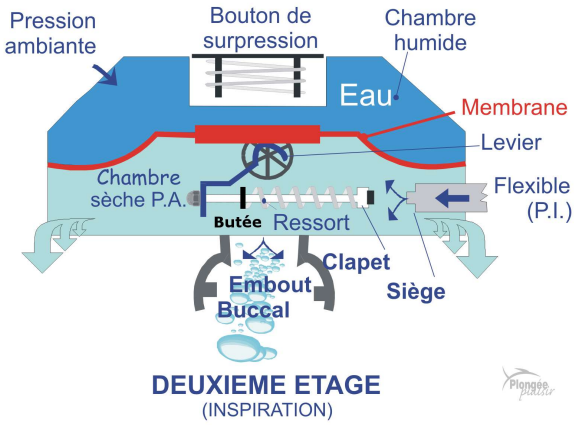


Illustration 8: Deuxième étage, chambre sèche en dépression (inspiration)

- Un « **bouton de surpression** », qui appuie sur la membrane, permet de simuler une augmentation de pression ambiante, qui ouvre l'arrivée d'air.

Un levier communique le mouvement de la membrane au clapet.

Fonctionnement :

- Lorsque le plongeur **inspire**, il crée une dépression dans la chambre sèche. La soupape d'expiration se ferme, la membrane reste la seule partie souple : sous la pression de l'eau, elle se déplace dont vers l'embout, appuyant sur le levier. Celui-ci tire le clapet, ouvrant l'arrivée d'air. Lorsque le

plongeur a assez d'air, il cesse d'inspirer, la chambre sèche revient à pression ambiante, le ressort referme le clapet et, par l'intermédiaire du levier, repousse la membrane.

- Lorsque le plongeur **expire**, il crée une surpression dans la chambre sèche. La soupape d'expiration s'ouvre alors, laissant passer l'air excédentaire. En fin d'expiration, son élasticité lui permet de revenir en place sans laisser passer d'eau.

Bilan des forces :

- forces qui ouvrent :
  - Force due à la pression de l'eau de la chambre humide sur la membrane : Fa
  - Force due à l'air sous pression sur le clapet : F_{PI} = PI x S1 (S1 étant la surface du clapet exposé à PI)
- forces qui ferment :
  - Force due à la pression de l'air de la chambre sèche sur la membrane : Fs
  - Force due au ressort de rappel : Fk

A l'équilibre :

$$\mathbf{Fa + F_{PI} = Fs + Fk}$$

Sans inspiration ni expiration, Fa = Fs, donc Fk = F_{PI}.

La force du ressort est calculée pour s'opposer à la pression intermédiaire qui tend à ouvrir le clapet.

Si la pression intermédiaire diminue, le plongeur doit donc vaincre une force supplémentaire.

Si la pression intermédiaire augmente significativement, le détendeur fuse.

3.3.2 La compensation

Il existe des deuxième étages compensés :

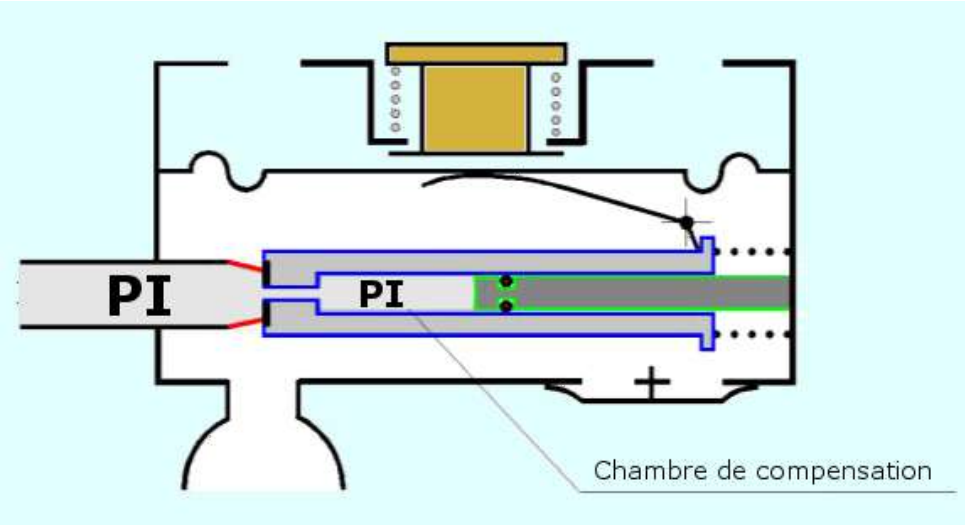


Illustration 9: Deuxième étage compensé

Bilan des forces :

- forces qui ouvrent :
  - Force due à la pression de l'eau de la chambre humide sur la membrane : Fa
  - Force due à l'air sous pression sur le clapet : F_{PI} = PI x S1 (S1 étant la surface du clapet exposé à PI)
- forces qui ferment :
  - Force due à la pression de l'air de la chambre sèche sur la membrane : Fs
  - Force due à l'air de la chambre compensation appuyant sur la face interne du clapet : F_{CC} = PI x S2.
  - Force due au ressort de rappel : Fk

A l'équilibre :

$$\mathbf{Fa + F_{PI} = Fs + F_{CC} + Fk}$$

Pour une compensation parfaite, S1 = S2, ainsi les deux forces de part et d'autre du clapet F_{PI} et F_{CC} s'équilibrent, et l'équation devient :

$$\mathbf{Fa = Fs + Fk} \quad \text{ou encore} \quad \mathbf{Fa\text{-}Fs = Fk}$$

Le clapet s'ouvre dès que Fa-Fs>Fk : l'effort inspiratoire initial sert uniquement à vaincre la force du ressort de rappel. Par ailleurs, la pression intermédiaire n'intervient plus, et, si elle augmente, le détendeur ne fusera pas.

On en déduit également qu'un premier étage surcompensé, dont la pression intermédiaire augmente au cours de la plongée, doit impérativement être associé à un deuxième étage compensé !

3.3.3 Autres améliorations

3.3.3.1 Introduction

L'ouverture des clapets et leur maintien en position ouverte, tant au premier qu'au deuxième étage, requiert un effort : c'est l'effort que fournit le plongeur pendant toute l'inspiration.

Les fabricants usent de plusieurs dispositifs pour minimiser l'effort inspiratoire : nous avons vu précédemment les dispositifs de compensation et surcompensation.

Sur certains modèles de deuxième étage, le plongeur peut régler lui-même, avant ou pendant la plongée, la dureté du ressort de rappel du clapet.

Au-delà de ces dispositifs statiques, les fabricants exploitent également deux effets dynamiques (= qui se manifestent une fois l'air en mouvement) : l'effet venturi, très répandu et l'effet vortex (brevet Mares).

3.3.3.2 L'effet Venturi

<u>Description</u>

Lorsqu'un fluide (par exemple de l'air) circulant dans un conduit rencontre un resserrement de ce conduit, sa vitesse augmente.

Cette accélération crée une dépression à la sortie de la buse, qui entraîne l'air environnant jusqu'à doubler le flux total. Il en résulte un écoulement plus facile, demandant un effort moindre pour maintenir l'ouverture du clapet : c'est une véritable assistance respiratoire.

Dans un détendeur

L'effet Venturi peut être exploité au premier comme au deuxième étage :

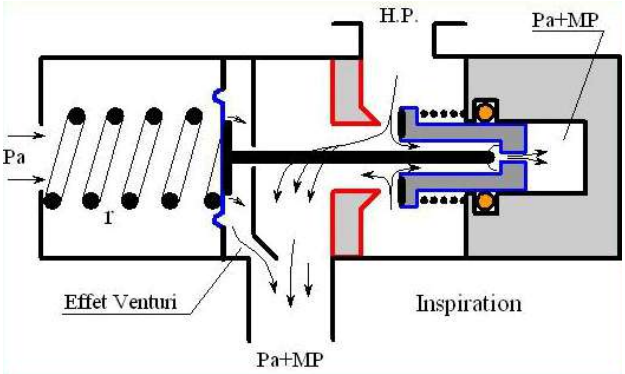


Illustration 10: Effet venturi au premier étage

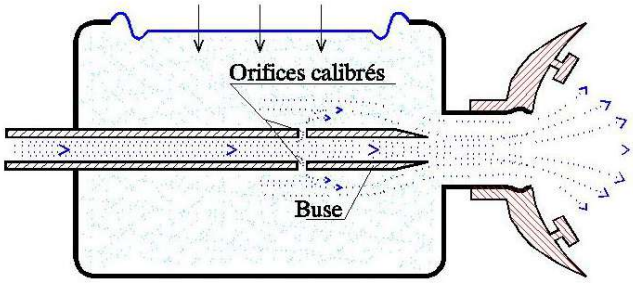


Illustration 11: Effet Venturi au deuxième étage

Utilisation

Si le clapet d'un deuxième étage équipé d'un Venturi s'ouvre sans que le plongeur ait le détendeur en bouche, celui-ci passe en débit continu. Pour éviter cela pendant le transport comme pendant la plongée (octopus), les détendeurs à effet Venturi sont équipés d'un volet mobile. En position fermée (« no dive », « predive », « - »), ce volet se place devant la buse, brisant ainsi le flux et annulant l'effet Venturi. Pour bénéficier d'une assistance respiratoire, il faut placer ce volet en position « dive » ou « + » avant de s'immerger ou lorsqu'on donne son détendeur de secours.

Certains fabricants (Atomic) proposent une version « automatique » : le volet mobile est fixé sur une membrane qui ferme une chambre étanche. En surface, l'air contenu dans cette chambre appuie sur la membrane, et le volet est en travers du flux d'air (pas d'effet Venturi). En immersion, la pression enfonce la membrane, qui entraîne le volet mobile et libère le flux d'air de tout obstacle : l'effet Venturi est opérationnel.

3.3.3.3 L'effet Vortex

L'effet Vortex consiste à diriger le flux d'air de manière à faire tournoyer l'air dans l'embout sans passer par la chambre sèche. L'air passe dans un tuyau latéral à l'embout (visible sur le côté) puis s'écoule sur la périphérie du conduit de l'embout.

Le plongeur profite ainsi directement du débit élevé à la sortie de la buse sans être exposé à un flux froid et violent, tandis que la chambre sèche reste en dépression.

Lorsque l'inspiration s'arrête, l'air arrivant est refoulé dans la chambre sèche, rééquilibrant ainsi les pressions et fermant le clapet.

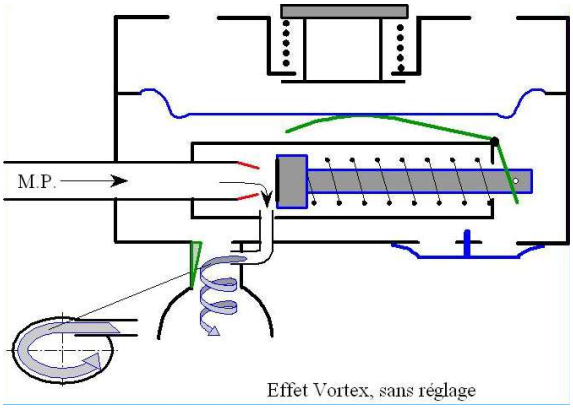


Illustration 12: Deuxième étage à effet vortex

Il n'y pas d'assistance respiratoire, le détendeur ne peut pas passer en débit continu du fait de l'effet vortex. Il n'y a donc pas besoin de volet Dive/ No dive pour le mettre hors service.

Par ailleurs, l'air froid ne rentrant pas en contact avec le mécanisme, ce type de détendeur est par construction moins sensible au froid.

L'utilisation de l'effet vortex sur les détendeurs de plongée fait l'objet d'un brevet Mares. Il n'est utilisé que sur les deuxième étage de ce constructeur.

3.4 Les éléments composant un détendeur

3.4.1 Sièges et clapets

Par convention, on nomme « clapet » la partie mobile et « siège » la partie fixe.

Le dispositif clapet/siège constitue le coeur de tout détendeur : c'est lui qui autorise ou interrompt le passage de l'air.

Ces pièces sont soumises à des pressions élevés appliquées sur des petites surfaces, et doivent garantir une étanchéité parfaite.

Pour garantir l'étanchéité, une matière « souple » est insérée entre les deux pièces en acier.

Le clapet peut être « amont » (l'air sous pression appuie dessus et le ferme) ou « aval » (l'air sous pression appuie dessus et l'ouvre).

A noter que dans un détendeur compensé, bien que l'air sous pression n'influe pas sur le clapet, on conserve les dénominations « amont » et « aval » pour décrire le montage.

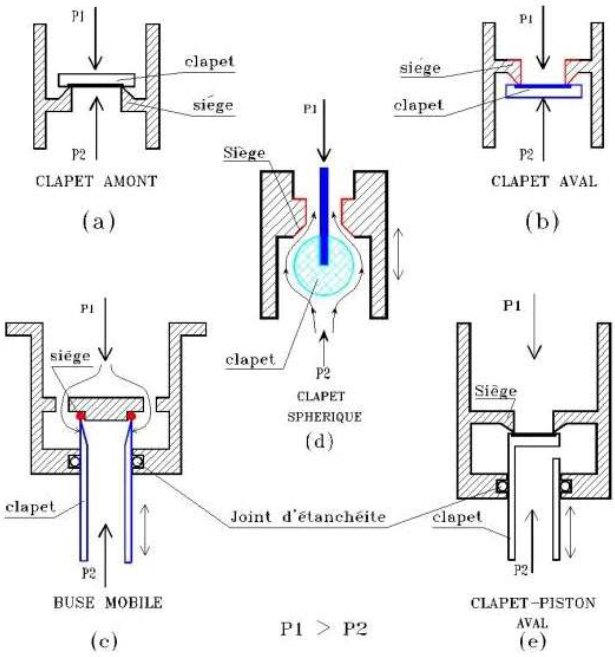


Illustration 13: Différents types de clapets

Le premier étage utilise autant le clapet amont que le clapet aval. A noter que dans beaucoup de 1er étage, le clapet reste ouvert en l'absence de haute pression, diminuant d'autant l'usure de l'ensemble clapet/siège.

Le deuxième étage est toujours en clapet aval, par sécurité.

Le « direct system » (DS) du gilet ou de l'étanche utilise toujours un clapet amont, rustique et peu coûteux. Il ne faut donc jamais brancher un DS seul sur un premier étage : en cas de fuite de celui-ci, on encourt une détérioration du flexible.

3.4.2 Ressorts

Tout détendeur comprend au moins un ressort de rappel du clapet, qui permet de vaincre les frottements résiduels et de l'asseoir sur son siège.

Ce sont des pièces sollicitées à chaque inspiration et à chaque expiration.

Certains détendeurs (1er et 2ème étages) disposent de système de réglage de la dureté du ressort.

3.4.3 Membranes

Les membranes sont constituées de 3 parties :

- une collerette de fixation en périphérie ;
- une partie centrale rigide ;
- une partie souple qui relie les deux précédentes.

La partie centrale sert à appuyer sur un levier ou un pointeau. Le centre de la membrane est parfois solidaire du pointeau.

Le levier ou le pointeau transmet la force exercée sur la membrane.

L'étanchéité en périphérie est assurée en emprisonnant la collerette de fixation entre deux pièces qu'on serre.

3.4.4 Pistons

Le piston est une pièce rigide, dont l'étanchéité périphérique est assurée par un joint torique.

Il est solidaire d'un clapet (on parle alors de « clapet-piston »), qui coulisse au travers d'un support, avec une étanchéité assurée également par joints toriques (Cf. 3.2.1).

Le clapet-piston (Illustration 4) est une pièce soumise à de fortes contraintes et usinée avec de faibles tolérances. Elle est la pièce constitutive principale du coût d'un détendeur à piston.

3.4.5 Pointeaux et leviers

Les pointeau transmettent une force. Ils peuvent être indépendants, ou solidaires d'une membrane, d'un piston, d'un clapet.

Les leviers transmettent une force en l'amplifiant et en modifiant sa direction. Ils nécessitent un axe de rotation.

3.4.6 Systèmes d'expiration

En sortie de deuxième étage, un dispositif est chargée de laisser sortir l'air expiré, et d'empêcher l'eau de rentrer lors de l'inspiration.

Il s'agit le plus souvent d'une soupape d'expiration souple en caoutchouc.

Pour plus de souplesse (minimisation de l'effort expiratoire), les fabricants en conçoivent de grand diamètre (détendeurs Poséidon), ou encore en mettent plusieurs.

Pour limiter la gêne visuelle causée par l'air expiré, les détendeurs classiques sont équipés de « moustaches » qui éloignent le flux expiré du visage. Il existe également des détendeurs sur lesquels la soupape d'expiration est positionnée sur le côté.

Il existe des variantes : soupape d'expiration au centre de la membrane, membrane à double fonction qui permet l'expiration sur une partie de sa périphérie, bec de canard.

3.4.7 Joints d'étanchéité

En plongée, le joint torique (joint circulaire, à section ronde) est roi !

Il est réalisé en élastomère (polymère présentant des propriétés élastiques) aux propriétés (dureté et coefficient de frottement) adaptées à l'usage.

On en trouve sur les blocs (raccords DIN et étrier), à l'intérieur des premier et deuxième étage, au niveau des raccords (flexibles, raccord tournant du manomètre), du « direct system »…

Ce sont des pièces d'usure, changées lors des révisions.

Les joints de bloc existent en deux tailles (diamètre interne x section) :

- DIN R10 : 11,92 x 2,62 mm
- Etrier R9 : 10,77 x 2,62 mm

Illustration 14: joints de bloc (source : catalogue du Vieux Plongeur)

3.4.8 Boîtiers

Matériau

Les boitiers peuvent être réalisés en métal ou en matière plastique.

Pour les hautes pressions (1er étage), le métal est obligatoire (laiton ou bronze, parfois en acier inoxydable), parfois habillé de plastique.

Le deuxième étage est le plus souvent réalisé entièrement en plastique ; les détendeurs « froid » comprennent des parties métalliques (capot) pour faciliter le réchauffement du mécanisme et de l'air.

Matériau	Métal	Plastique
Poids	+ lourd	- lourd
Conduction de la chaleur	++	-
Réaction aux chocs	Se cabosse	Absorbe le choc Se fend

Sorties du premier étage

Le premier étage est doté d'au moins une sortie « haute pression » (HP), destinée à recevoir le manomètre et d'au moins une sortie « moyenne pression » (MP) qui délivre l'air détendu au deuxième étage.

Selon les fabricants, les sorties HP et MP peuvent être plus ou moins nombreuses ; pour un plongeur n'utilisant qu'un seul premier étage, 3 sorties MP sont nécessaires (principal, secours, DS).

Une deuxième sortie HP est nécessaire pour brancher la sonde de pression d'un ordinateur.

Les pas de vis « HP » et « MP » sont différents, empêchant tout mauvais branchement.

Illustration 15: Sorties du premier étage

3.4.9 Tuyaux

Les différents équipements sont reliés au premier étage par des « flexibles moyenne pression ».

Leur diamètre est un compromis entre débit et flexibilité :

- pour alimenter un deuxième étage, besoin d'un débit non limité (confort respiratoire) ⇒ forte section
- pour un manomètre, pas besoin de débit ⇒ possibilité de faible section

Les extrémités sont serties sur des pièces en métal : ce montage présente un point de faiblesse à la jonction entre les deux matériaux, en particulier au niveau des sorties du 1er étage, au niveau desquelles certains flexibles peuvent prendre des angles vifs. Pour limiter le cisaillement des flexibles, on ajoute des protections en caoutchouc.

Sur les détendeurs labellisés « froid », les flexibles peuvent être équipés d'ailettes pour réchauffer l'air, au niveau des extrémités ou au milieu du flexible.

Illustration 16: Protection de flexible

Illustration 17: Ailettes pour réchauffer l'air

3.4.10 Fixations sur la bouteille

Deux systèmes de fixation coexistent : DIN et étrier.

Système	Etrier	DIN
Poids	+ lourd	+ léger
Variantes	→ Etriers anciens, plus étroits, pas d'opercule amovible → Etriers modernes, plus larges, opercule amovible	→ DIN 230 bars (pas de vis court) → DIN 300 bars (pas de vis long)
Robustesse	Peut s'accrocher (rocher, épave…) Le joint peut s'extruder	Très robuste
Pression de service	Limité à 230 bars	Permet 300 bars *La longueur du pas de vis permet de monter un DIN 300 sur un bloc 200 bars, mais pas l'inverse.*
Où ?	Répandu dans le monde entier	Répandu en Europe

On peut fixer un étrier sur un bloc à sorties DIN en ajoutant un insert également appelé « opercule ». Pour les blocs anciens, l'inverse est également possible en utilisant un adaptateur étrier vers DIN.

Illustration 19: Insert ou "opercule"

Illustration 18: Adaptateur étrier/DIN

3.4.11 Filtres d'entrée

Le premier étage est doté d'un filtre d'entrée destiné à retenir les particules pouvant provenir de la bouteille.

Il peut être réalisé classiquement en bronze fritté (petites billes soudées entre elles), céramique, ou fil inoxydable tressé (Scubapro). Ce filtre se colmate, et doit régulièrement être changé.

3.4.12 Embout

L'embout permet de tenir le détendeur en bouche.

Il est interchangeable, tenu en place par un collier.

Les fabricants proposent diverses améliorations pour le tenir en bouche (application contre le voile du palais chez Aqualung, embout orthodontique chez Mares…) et commercialisent des embouts de petite taille, adaptés aux enfants et aux personnes de petite taille.

Illustration 20: Différents embouts

4 Performances

Depuis la promulgation de la norme européenne EN250 (1993), tous les détendeurs commercialisés doivent répondre à des critères minimum, manomètre compris.

4.1 Premier et deuxième étage

Les critères normés sont :

- la **sensibilité** (= dépression nécessaire dans la chambre sèche pour provoquer l'ouverture du clapet – exprimé en millibars). Dans le langage courant, on parle également de « dureté » pour qualifier un détendeur peu sensible.
- le **travail respiratoire** (= énergie nécessaire pour vaincre frottements, inertie des pièces mécaniques, des masses d'air et d'eau mises en mouvement à chaque inspiration et expiration – exprimé en Joule par litre d'air inspiré et expiré).
- les conditions de test : **débit, température, pression**

Les tests sont effectués à 50 bar (HP), 6 bar de pression ambiante (50 mètres), avec une amplitude ventilatoire de 2,5 l (inspiration/expiration), le débit ventilatoire est de 62,5 litres/minutes (25 cycles/minutes), la température doit être de 10°C et 4°C pour la mention "eau froide".

Avec la version actuelle de la norme (2014), le détendeur doit être conforme aux exigences suivantes :

- le travail respiratoire ne doit pas excéder 3,0 J/l,
- les pics de pression pendant l'inspiration et l'expiration doivent se situer dans un créneau de ± 25 mbar,
- le travail respiratoire positif pendant l'inspiration ne doit pas excéder 0,3 J/l,
- les pics de pression lorsque le travail respiratoire positif n'est pas mesurable ne doivent pas excéder 10 mbar,
- les pics de pression lorsque le travail respiratoire est mesurable ne doivent pas excéder 5 mbar.

Illustration 21: Courbes de contrôle de détendeur (gauche : détendeur avec venturi ; droite détendeur avec défauts)

Pour un confort optimal, un premier étage doit au moins pouvoir délivrer 1000 l/min.

Le constructeur atteste la conformité des détendeurs à la norme EN250 pour un détendeur monté selon ses préconisations, associant premier et deuxième étage prévus pour fonctionner ensemble, et reliés par un flexible approprié. Cette conformité se traduit par un marquage « CE » sur les différents éléments.

Le non-respect de ces règles (p. ex. associer un deuxième étage et un premier étage non prévus pour fonctionner ensemble, notamment un premier et un deuxième étage de marques différentes) dégage le constructeur de toute responsabilité en cas d'accident imputable au détendeur.

4.2 Manomètre

La norme EN250 cadre notamment les éléments suivants :

- le manomètre doit être conçu et placé pour que le plongeur puisse le lire sans difficulté ;
- la plage de pression mesurée (+20 % de la pression maximale à mesurer) ;
- les graduations ne doivent pas dépasser 10 bars ;
- la plage inférieure à 50 bars doit clairement être différenciée ;
- la tolérance (précision de la mesure) : + 5 bars à 40 bars, + 10 bars à 100, 200 et 300 bars ;
- le manomètre doit être étanche à l'eau jusqu'à une pression externe supérieure de 10 bars à la pression atmosphérique pendant au moins 15 min ;
- le verre doit être constitué d'un matériau qui ne produit pas d'éclats en se brisant ;
- le manomètre doit être doté d'un dispositif de sécurité qui protège le plongeur de tout risque d'éclatement ;
- ...

5 Détendeur et froid

5.1 Le refroidissement de l'air et le phénomène de « givrage »

Lorsque l'air se détend, il se refroidit. Le refroidissement est fonction du rapport de détente.

Par exemple, pour un bloc à 200 bars dont le premier étage ramène la pression du bloc à 10 bars (rapport de détente de 1/20) le coefficient de refroidissement est de 0,55.

Pour un détendeur à 27 °C (300 kelvins), la température instantanée peut alors atteindre 300 * 0,55 = 165 K, soit **-108 °C** !

Ce refroidissement se concentre sur la partie siège/clapet ; si de l'eau est présente au niveau du clapet, elle peut geler et bloquer sa fermeture. Le détendeur entre alors en débit continu, le gel de l'eau est auto-entretenu.

Au deuxième étage et au niveau du « direct system », le rapport de détente reste de 1/10, avec un coefficient de refroidissement de 0,62 : 300 *0,62 = 186 K, soit -87 °C. Le givrage peut donc également se produire au niveau de ces équipements.

5.2 Dispositifs de protection

Pour lutter contre les effets du froid et prévenir le givrage, les équipements doivent faciliter au maximum l'apport de calories du milieu ambiant, voire limiter leur production :

- boitiers entièrement métalliques (premier et deuxième étage)
- conception du 1er étage (positionner clapet/siège proche de la paroi)
- utiliser une pression intermédiaire plus faible pour limiter le risque de givrage du 2ème étage
- au 1er étage, isoler la chambre PI de la zone où l'air se détend
- limiter le débit vers le deuxième étage
- ailettes de réchauffement (1er étage, flexibles)

A noter que :

- L'eau étant bien meilleur conducteur que l'air, les équipements se réchauffent nettement plus vite dans l'eau que dans l'air : par temps froid, ne pas tester son équipement avant la mise à l'eau !
- Si la norme EN 250 prévoit une labellisation « froid » avec une procédure de test à 4°C, cette labellisation ne garantit pas l'absence de givrage ! En effet, la labellisation « froid » ne prévoit qu'un test dans des conditions précises 6 bars, 4°C, montage standard, débit de 62,5 l/min.), et n'indique rien quant au comportement du détendeur dans d'autres conditions (à 40 m, en gonflant simultanément la stab avec un coéquipier inspirant sur l'octopus…).

6 Entretien

6.1 Hygiène

Au sein d'une structure, les détendeurs doivent être désinfectés entre deux utilisations (obligation réglementaire : Art. A. 322-81. du code du sport).

On utilise pour cela un produit désinfectant non agressif pour le matériel : Esculase du laboratoire Rivadis ou Hexanios du laboratoire Anios (plonger le deuxième étage dans la solution pendant 10 minutes, puis rincer abondamment). L'eau de Javel ne suffit pas à éliminer tous les germes, et c'est un produit corrosif qui dégrade le matériel.

A titre personnel, on peut utiliser les mêmes mesures de prévention.

6.2 Entretien périodique

Les détendeurs comportent des pièces mobiles, et par conséquent craignent les chocs, qui dérèglent le mécanisme. Par ailleurs, ces pièces mobiles s'usent aux surfaces de contact, d'autant plus lorsque des impuretés (sable…) pénètrent dans le mécanisme. Enfin, les joints et autres pièces en matière synthétique vieillissent naturellement, et de façon accélérée lorsqu'elles sont exposées à la lumière, aux hydrocarbures...

6.2.1 Chez le constructeur

Les détendeurs se révisent périodiquement de manière préventive. Lors de cette révision, le détendeur sera entièrement démonté, les pièces d'usure (flexibles abîmés, filtre d'entrée, joints, éventuellement sièges de clapets…) seront changés, et le mécanisme sera réglé après remontage. Certains ateliers pourront même vérifier les performances après remontage et fournir une courbe de contrôle.

Tous les constructeurs préconisent une périodicité d'un an. Celle-ci est adaptée à un usage intensif (>150 plongées/an) et obligatoire pour un usage professionnel (assurances).

Pour un usage loisirs moins intensif, on peut espacer les révisions à 2 (100-150 plongées/an) ou 3 ans (< 100 plongées/an).

6.2.2 Par le plongeur

S'il n'est plus question aujourd'hui qu'un plongeur démonte ou règle lui-même un premier étage, certaines opérations restent de son ressort :

- Vérifier avant chaque plongée le fonctionnement de son matériel
- Après chaque plongée, rincer et sécher son équipement à l'abri du soleil
- En-dehors de la saison de plongée, entreposer le matériel au sec, à l'abri du soleil, des sources de chaleur importantes et des vibrations.
- Une fois par saison au moins, le deuxième étage peut être ouvert, nettoyé et rincé, en vérifiant au passage l'état de la membrane et l'aspect extérieur du mécanisme.

6.3 Pannes

Symptôme	Causes possibles	Que faire ?
Détendeur dur à l'inspiration	• Second étage déréglé • Filtre d'entrée encrassé • Second étage encrassé • Premier étage déréglé (MP faible) • Premier étage encrassé	Révision
Détendeur dur à l'expiration	• Soupape d'expiration collée	Changer la soupape, révision
Entrée d'eau à l'inspiration	• Boîtier déformé ou desserré • Membrane détériorée • Soupape d'expiration endommagée • Corps étranger pris dans la soupape d'expiration	Révision
Fuite d'air à la fixation sur la bouteille	• Joint défectueux ou inadapté (taille ou dureté) • Joint extrudé (étrier) • Joint déplacé après mise en pression • Portée de joint abîmée	Changer le joint Recommencer le montage Selon gravité, remplacer robinetterie
Fuite d'air par la chambre humide (1er étage)	• Membrane ou joint de piston du 1er étage détérioré	Révision
Fuite d'air au départ d'un flexible	• Joint détérioré • Serrage inadapté	Changer le joint Corriger le serrage
Fuite d'air le long d'un tuyau	• Flexible détérioré	Changer le flexible
Fuite d'air apparaissant par l'embout	<u>1er étage</u> • Blocage du premier étage par encrassage de la chambre humide. • Moyenne pression trop élevée • Détérioration du siège ou du clapet <u>2éme étage</u> • Entartrage ou corps étranger dans l'une des chambres • Système du débit assisté coincé • Boîtier déformé • Déréglage • Siège ou clapet endommagé	 Révision Nettoyage Révision/remplacement
Flexible entaillé	• Se produit souvent au niveau des sertissages	Changer le flexible

7 Pour le guide de palanquée

Savoir conseiller pour le choix d'un détendeur selon l'usage.

Connaître la réglementation (code du sport, norme EN 250) :

- Performance du matériel
- Sécurité (conformité à la norme EN 250 : ensemble 1er et 2ème étages + flexible homologués par le constructeur)
- Dotation obligatoire (code du sport : 2 détendeurs complets quand on encadre)
- Entretien du matériel
- Hygiène en club (Esculase)

Prêter attention au matériel des plongeurs guidés

Connaître le fonctionnement des détendeurs pour :

- conseiller les plongeurs sur l'utilisation (notamment réglages de dureté et du Venturi)
- pouvoir remédier aux pannes les plus simples.