PRINCIPES DES DÉTENDEURS DE PLONGÉE SUBAQUATIQUE

TABLES DES MATIÈRES PANORAMIQUE

(Édition 2021)

INTRODUCTION

I RAPPELS DE PHYSIQUE
Grandeurs physiques et unités
Pressions relatives et pressions absolues
Principe de Pascal
Forces, déplacement et travail

II LE DÉTENDEUR DE BASE
Description
Fonctionnement
Calcul du seuil d'ouverture
Fonctionnement dynamique
Pertes de charges
Effet Venturi
Refroidissement

III LES PRINCIPAUX COMPOSANTS
Sièges et clapets
Clapet amont, clapet aval
Autres fonctions des clapets
Différents types de clapets
Pression entre siège et clapet
Pression sur clapet aval ou amont
Ressorts
Membranes et pistons
Membrane-Leviers-pointeaux
Systèmes d'expiration
Joints d'étanchéité
Fonctionnement
Lubrification
Les boîtiers
Les embouts
Les tuyaux
Les manchons de protection
Les raccordements aux bouteilles
La protection contre les impuretés
Les filtres d'entrée
Les bouchons de protection
Les fermetures automatique

IV LES DÉTENDEURS À UN ÉTAGE
Généralités
Détendeur un étage type" MISTRAL "

V LES DÉTENDEURS À DEUX ÉTAGES
Le premier étage
Fonctionnement
Éléments de calculs
Le deuxième étage
Description
Fonctionnement
Éléments de calcul
Association premiers et deuxièmes étages
Le narguilé

VI LES DÉTENDEURS COMPENSÉS
Compensation manuelle
Compensation automatique
Compensation par piston
Au premier étage
Calcul de la Moyenne Pression
Au deuxième étage
Compensation par chambre de compensation
Au premier étage
Au deuxième étage
Compensation par siège mobile
Compensation au premier étage
Calcul de la Moyenne Pression
Compensation au deuxième étage
Compensation par buse mobile
Au premier étage
Au deuxième étage
Avantages de la compensation
Dans un premier étage
Dans un second étage
Inconvénients de la compensation
La sous-compensation

VII LES DÉTENDEURS SURCOMPENSÉS
Surcompensation par la haute pression
Détendeur à buse mobile
Calcul de surcompensation par la haute pression
Interprétation des résultats
Détendeur à membrane
Surcompensation par la pression ambiante
Analyse du fonctionnement statique
Calcul de surcompensation par pression ambiante
Interprétation du résultat
Notes sur les surcompensations :

VIII LES DÉTENDEURS PILOTÉS
Généralités
Clapet piloté par fuite d'air
Clapet piloté par clapet pilote
Clapets souples pilotés
Clapet constitué par un tuyau souple.
Clapet constitué par une membrane souple.
Clapet constitué par une membrane semi-souple.

IX LES DÉTENDEURS À EFFET DYNAMIQUE
Généralités
L'effet Venturi
Au premier étage
Au deuxième étage
L'effet buse mobile
Au premier étage
Au deuxième étage
L'effet Vortex

X LES DÉTENDEURS ET LE FROID
Influence de la température
Le refroidissement de l'air
Le givrage des détendeurs
Influence sur la conception des détendeurs
Au premier étage
Au deuxième étage
Mesures de protection anti givrage
Au gonflage
Au premier étage
Au deuxième étage

XI LES DÉTENDEURS ET L'OXYGÈNE
Processus d'un accident
Les éléments combustibles
La graisse
Les joints
Les poussières
Normalisation oxygène
Rappel des précautions à prendre

XII LES ACCESSOIRES
Les sorties d'un premier étage
Les sorties "Haute Pression"
Les sorties "Moyenne Pression"
Utilisation de deux seconds étages
L'Octopus
Le manomètre Haute Pression immergeable
L'ordinateur de plongée et la gestion de l'air
Le "Direct System "
Connecteur pneumatique à valve Schrader
Connecteur pneumatique à gros débit
Les combinés
Le combiné " Air Two " de Scubapro
Le combiné "Auto-Air" de Buddy
Le combiné " Air Source " d'Aqualung
Le détendeur " Shadow " de Sherwood
Les masques faciaux

XIII ASTUCES, GADGETS OU AVENIR ?
Généralités
Verrou de stockage
La position "Pré-Dive"
Roulette antifriction
Leviers "Pied de biche"
Humidificateur
Tourelle pivotante
Stabilisation de l'effet Venturi
Embout réglable
Embout amovible
Les rotules
Les protège lèvres
Surveillance électronique du premier étage
Contrôle du débit continu au 2e étage
Filtre au 2e étage
Réglages combinés
Déflecteur latéral
Échange de moustaches d'expiration
Mini manomètres H.P. immergeables
Mini scaphandres et micro-scaphandres
Les recycleurs

XIV NORMALISATION ET PERFORMANCES
Normalisation
Pressions et travail respiratoire
Tenue en température
Le simulateur respiratoire
Courbes respiratoires
Diagramme théorique Pression /Volume
Diagramme pratique
Conservation des performances
Le travail respiratoire
Influence de la haute pression
Influence de la profondeur
Influence de la position des membranes

XV LES TESTS DE VOS MAGAZINES

XVI MAINTENANCE DES DÉTENDEURS
La fiabilité
Maintenance préventive
Maintenance curative
Symptômes et diagnostics de pannes
Démontages, nettoyage, remontage
Réglages
Inspection et tests simplifiés
Les rechanges
L'outillage
Liste d'outillage
La caisse d'outillage
L'atelier
Les règles d'hygiène

XVII ANNEXES
L'INSPECTION D'UN DÉTENDEUR
LES ÉCLATÉS
LE LANGAGE DES FABRICANTS
LE LANGAGE DES PLONGEURS
LISTE DES FIGURES
LISTE DES PHOTOS

LIVRE D'OR

XiTi

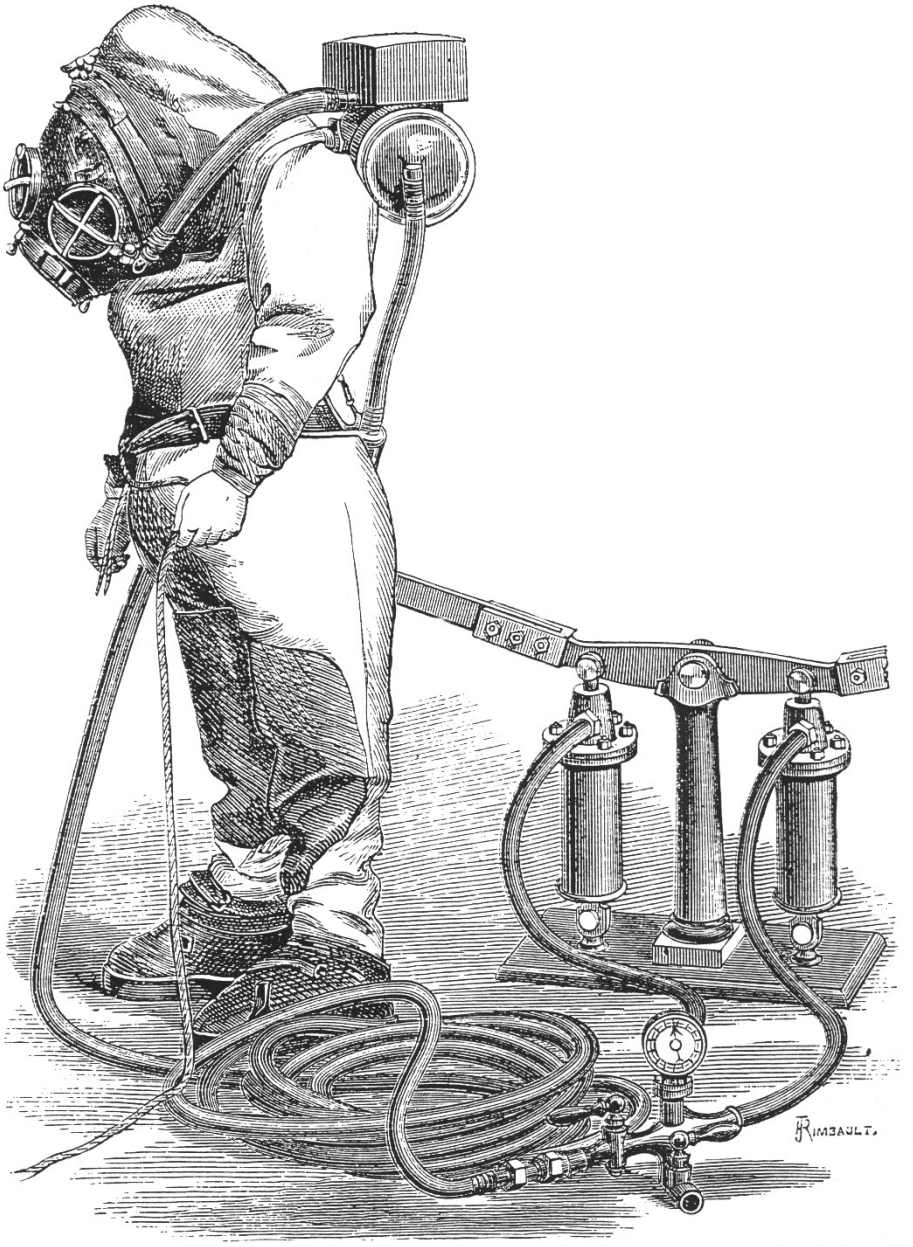


Photo 1 - Scaphandre Rouquayrol et Denayrouze 1859
alimenté par une pompe à brinquebale

PRINCIPES DES DÉTENDEURS

de plongée

Édition 2017
revue, augmentée et mise en couleurs en 2021

Remerciements

Cet ouvrage est le fruit de plusieurs années d'études et de recherches. Heureusement, de nombreux amis ont bien voulu me relire et me conseiller tant sur le fond que sur la forme. Je les en remercie chaleureusement.

Ce sont :
Bahuet Eric - Césarano Serge – Chauvière Pascal – Coppola Georges - Duboc Claude – Gélébart Camille – Le Bris Nicole – Le Péchon Jean-Claude - Livet Georges – Sadin Olivier - Peyron Nicolas – Rousseau Philippe - Winterhalter Marc - Zonberg Guy.

Et tous ceux qui m'ont précédé et formé dans ce domaine.

Henri LE BRIS

AUTEUR AUTOÉDITÉ

© Henri LE BRIS

(Du même auteur)

LES SYSTÈMES GONFLABLES DE STABILISATION 2020

LES INSTRUMENTS DE PLONGÉE 2020

COMPRESSEURS ET STATIONS DE GONFLAGE 2020

LES BOUTEILLES DE PLONGÉE 2020

PRINCIPES DES DÉTENDEURS 2020

LES ÉCLAIRAGES

LES RECYCLEURS

RETOUR À L'ACCUEIL

Avertissements :

- Les informations et indications données dans cet ouvrage n'ont rien d'exhaustives. Elles ne sont données qu'à titre indicatif et ne sauraient engager la responsabilité de l'auteur. Celui-ci ne pourra être tenu pour responsable de toute erreur, omission ou lacune qui aurait pu s'y glisser ainsi que des conséquences, quelles qu'elles soient qui résulteraient de leur utilisation.

- Le code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation, traduction ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement écrit de l'auteur ou des ses ayants droit est illicite et constitue une contrefaçon, aux termes des articles L.335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

Je remercie d'avance les visiteurs qui me communiqueraient les remarques et corrections qu'ils jugeraient utiles.

TABLES DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....16

RAPPELS DE PHYSIQUE.....17

I-1 Grandeurs physiques et unités.....17

I-2 Pressions relatives et pressions absolues.....17

I-3 Principe de Pascal.....17

I-4 Forces, déplacement et travail.....18
I-4-1 Les leviers.....18

LE DÉTENDEUR DE BASE.....21

II-1 Description.....21

II-2 Fonctionnement.....22

II-3 Calcul du seuil d'ouverture.....23

II-4 Fonctionnement dynamique.....25
II-4-1 Pertes de charges.....25
II-4-2 Effet Venturi.....25
II-4-3 Refroidissement.....25

LES PRINCIPAUX COMPOSANTS.....29

III-1 Sièges et clapets.....29
III-1-1 Clapet amont, clapet aval.....29
III-1-2 Différents types de clapets.....30
III-1-3 Pression entre siège et clapet.....31
III-1-4 Pression suivant que le clapet est aval ou amont.....33

III-2 Ressorts.....34

III-3 Membranes et pistons.....35

III-4 Leviers et pointeaux.....36

III-5 Systèmes d'expiration.....37

III-6 Joints d'étanchéité.....39
III-6-1 Fonctionnement.....40
III-6-2 Lubrification.....41

III-7 Les boîtiers.....41

III-8 Les embouts.....42

III-9 Les tuyaux.....42

III-10 Les manchons de protection.....43

III-11 Les raccordements aux bouteilles.....43
III-11-1 Le système "DIN".....43
III-11-2 Le système à étrier ou international.....43

III-12 La protection contre les impuretés.....46
III-12-1 Les filtres d'entrée.....46
III-12-2 Les bouchons de protection.....46
III-12-3 Les fermetures automatiques.....47

LES DÉTENDEURS À UN ÉTAGE.....49

IV-1 Généralités.....49

IV-2 Détendeur à un étage type " MISTRAL ".....49
IV-2-1 Caractéristiques de fonctionnement.....49
IV-2-2 Avantages.....51
IV-2-3 Inconvénients.....51

LES DÉTENDEURS À DEUX ÉTAGES.....55

V-1 Le premier étage.....55
V-1-1 Fonctionnement.....57
V-1-2 Éléments de calculs.....58

V-2 Le deuxième étage.....60
V-2-1 Description.....60
V-2-2 Fonctionnement.....60

V-2-3 Éléments de calcul....62

V-3 Association de premiers et deuxièmes étages disparates....64

V-4 Le narguilé....65

LES DÉTENDEURS COMPENSÉS....67

VI-1 Compensation manuelle....67
VI-1-1 Au premier étage....67
VI-1-2 Au deuxième étage....67

VI-2 Compensation automatique....68

VI-3 Compensation par piston....69
VI-3-1 Au premier étage....69
VI-3-2 Calcul de la Moyenne Pression....70
VI-3-3 Au deuxième étage....72

VI-4 Compensation par chambre de compensation....73
VI-4-1 Au premier étage....73
VI-4-2 Au deuxième étage....74

VI-5 Compensation par siège mobile....75
VI-5-1 Au premier étage....75
VI-5-2 Calcul de la Moyenne Pression....76
VI-5-3 Au deuxième étage....78

VI-6 Compensation par buse mobile....80
VI-6-1 Au premier étage....82
VI-6-2 Au deuxième étage....82

VI-7 Avantages de la compensation....82
VI-7-1 Dans un premier étage....82
VI-7-2 Dans un second étage....83

VI-8 Inconvénients de la compensation....83

VI-9 La sous-compensation....84

LES DÉTENDEURS SURCOMPENSÉS....86

VII-1 Surcompensation par la haute pression....86

VII-1-1 Détendeur à buse mobile.....86
VII-1-2 Calcul de la surcompensation par la haute pression.....87
VII-1-3 Interprétation des résultats.....87
VII-1-4 Détendeur à membrane.....85

VII-2 Surcompensation par la pression ambiante.....89
VII-2-1 Analyse du fonctionnement statique.....90
VII-2-2 Calculs de la surcompensation par la pression ambiante.....90
VII-2-3 Interprétation du résultat.....91

VII-3 Notes sur les surcompensations :.....91

LES DÉTENDEURS PILOTÉS.....94

VIII-1 Généralités.....94

VIII-2 Clapet piloté par fuite d'air.....94

VIII-3 Clapet piloté par clapet pilote.....95

VIII-4 Clapets souples pilotés.....97
VIII-4-1 Clapet constitué par un tuyau souple.....97
VIII-4-2 Clapet constitué par une membrane souple.....97
VIII-4-3 Clapet constitué par une membrane semi-souple.....97

LES DÉTENDEURS À EFFET DYNAMIQUE.....100

IX-1 Généralités.....100

IX-2 L'effet Venturi.....100
IX-2-1 Au premier étage.....100
IX-2-2 Au deuxième étage.....101

IX-3 L'effet buse mobile.....101
IX-3-1 Au premier étage.....101
IX-3-2 Au deuxième étage.....101

IX-4 L'effet Vortex.....103

LES DÉTENDEURS ET LE FROID.....106

X-1 Influence de la température.....106

X-2 Le refroidissement de l'air.....106

X-3 Le givrage des détendeurs.....107

X-4 Influence sur la conception des détendeurs.....108
X-4-1 Au premier étage.....108
X-4-2 Au deuxième étage.....110

X-5 Mesures de protection anti-givrage.....112
X-5-1 Au gonflage.....112
X-5-2 Au premier étage.....112
X-5-3 Au deuxième étage.....114

DÉTENDEURS ET OXYGÈNE.....119

XI-1 Processus d'un accident.....119

XI-2 Les éléments combustibles.....120
XI-2-1 La graisse.....120
XI-2-2 Les joints.....120
XI-2-3 Les poussières.....120

XI-3 Normalisation oxygéne.....121

XI-4 Rappel des précautions à prendre.....121

LES ACCESSOIRES.....124

XII-1 Les sorties d'un premier étage.....124
XII-1-1 Les sorties "Haute Pression".....124
XI1-1-2 Les sorties "Moyenne Pression".....125

XII-2 Utilisation de deux seconds étages.....125
XII-2-1 L'Octopus.....125

XII-3 Le manomètre Haute Pression immergeable.....128

XI1-4 L'ordinateur de plongée et la gestion de l'air.....128

XII-5 Le "Direct System ".....129
XII-5-1 Connecteur pneumatique à valve Schrader.....130
XII-5-2 Connecteur pneumatique à gros débit.....130

XII-6 Les combinés.....131
XII-6-1 Le combiné " Air Two " de Scubapro.....131
XII-6-2 Le combiné "Auto-Air" de Buddy.....132
XII-6-3 Le combiné " Air Source " d'Aqualung.....132
XII-6-4 Le détendeur " Shadow " de Sherwood.....1354

XII-7 Les masques faciaux.....135

ASTUCES, GADGETS OU AVENIR ?.....138

XIII–1 Généralités.....138
XIII–1-1 Verrou de stockage.....138
XIII–1-2 La position "Pré-Dive".....138
XIII–1-3 Roulette antifriction.....139
XIII–1-4 Leviers "Pied de biche".....139
XIII–1-5 Humidificateur.....139
XIII–1-6 Tourelle pivotante.....139
XIII–1-7 Stabilisation de l'effet Venturi.....139
XIII–1-8 Embout réglable.....141
XIII–1-9 Embout amovible.....141
XIII–1-10 Les rotules.....141
XIII–1-11 Les protège lèvres.....141
XIII–1-12 Surveillance électronique du premier étage.....141
XIII–1-13 Contrôle du débit continu au 2e étage.....143
XIII–1-14 Filtre au 2e étage.....144
XIII–1-15 Réglages combinés.....144
XIII–1-16 Déflecteur latéral.....144
XIII–1-17 Échange de moustaches d'expiration.....144
XIII–1-18 Mini manomètres H.P. immergeables.....144
XIII–1-19 Mini scaphandres.....145
XIII–1-20 Les micro-scaphandres.....146

XIII–2 Les recycleurs.....146

NORMALISATION ET PERFORMANCES.....148

XIV–1 Normalisation.....148

XIV-2 Pressions et travail respiratoire.....148

XIV-3 Tenue en température.....149

XIV-4 Le simulateur respiratoire.....150

XIV-5 Courbes respiratoires.....151
XIV-5-1 Diagramme théorique Pression /Volume.....151
XIV-5-2 Diagramme pratique.....152

XIV-6 Conservation des performances.....156

XIV-7 Le travail respiratoire.....157
XIV-7-1 Influence de la haute pression.....157
XIV-7-2 Influence de la profondeur.....157
XIV-7-3 Influence de la position des membranes.....157

LES TESTS DE VOS MAGAZINES.....160

MAINTENANCE DES DÉTENDEURS.....162

XVI-1 La fiabilité.....162

XVI-2 Maintenance préventive.....164

XVI-3 Maintenance curative.....164
XVI-3-1 Symptômes et diagnostics de pannes.....165
XVI-3-2 Démontages, nettoyage, remontage.....169
XVI-3-3 Réglages.....170
XVI-3-4 Inspection et tests simplifiés.....172

XVI-4 Les rechanges.....173

XVI-5 L'outillage.....173
XVI-5-1 Liste d'outillage.....174
XVI-5-2 La caisse d'outillage.....176

XVI-6 L'atelier.....176

XVI-7 Les règles d'hygiène.....177

ANNEXES.....179

XVII-1 FICHE D'INSPECTION D'UN DÉTENDEUR.....180

XVII-2 LES ÉCLATÉS.....182

XVII-3 LE LANGAGE DES FABRICANTS.....184

XVII-4 LE LANGAGE DES PLONGEURS.....187

XVII-4 LISTES DES FIGURES.....189

XVII-5 LISTE DES PHOTOGRAPHIES.....193

Photo 2 - Le SCANUBA, (1990) préparation d'une plongée
avec Yves LE MASSON, inventeur de génie – (Photo J.C. Le Péchon)
Le casque bulle LAMA est visible aux pieds du plongeur.
Le Scanuba, coffret sur la droite, devant la bouteille.

En avance sur son temps, c'est à partir d'équipements de plongée profonde qu'a été fabriqué le SCANUBA, alimenté par du Nitrox de la surface jusqu'à 60 m ou par un Trimix de 50 à 80 m.

À partir d'une bouteille d'air comprimé (ou trimix) et d'un biberon d'oxygène pur, un petit mélangeur pneumatique produit automatiquement en surface le mélange nécessaire au semi-fermé pour la profondeur du plongeur.

Le tout connecté à un PC portable va contrôler la qualité du gaz, enregistrer le profil, tous les paramètres, les alarmes en cas de défaillance et déterminer la décompression à effectuer etc.

****

INTRODUCTION

"La pratique sans théorie est aveugle,

la théorie sans pratique est absurde"

Emmanuel KANT (1724 – 1804)

Le but de cet ouvrage est de faire connaître les différents principes de fonctionnement des détendeurs de plongée, leurs avantages et leurs inconvénients. C'est un ouvrage de vulgarisation. Nous avons cependant réservé des parties en italique encadrées pour les passionnés ou les "matheux". Elles pourront être étudiées en deuxième lecture. (*Néanmoins certaines approximations n'échapperont pas à des spécialistes*)

L'homme a depuis très longtemps tenté d'évoluer sous l'eau d'une façon autonome, comme un poisson. On peut imaginer que la première solution qui lui soit venue à l'esprit ait été de respirer à l'aide d'un tuyau suffisamment long pour atteindre la profondeur voulue.

Malheureusement, l'air qu'il voulait ainsi respirer était à la pression atmosphérique alors que celle qui s'exerçait sur sa poitrine augmentait rapidement avec la profondeur. Ses muscles respiratoires, trop faibles, ne lui permettaient de s'immerger qu'à quelques dizaines de centimètres sous l'eau.

On voit immédiatement que l'une des conditions à remplir par un appareil respiratoire est de fournir de l'air à une pression égale à celle qui s'exerce sur la poitrine du plongeur. On dit alors qu'il y a "équipression".

La première étape, dans ce sens, a été d'utiliser une cloche de plongée. Avec cet appareil, le plongeur se trouve à l'intérieur du réservoir d'air et l'équipression est automatiquement réalisée, quelle que soit la profondeur. (333 ans avant J.C.)

Une autre étape a consisté à mettre la cloche de plongée autour de la tête du plongeur et à l'alimenter par un tuyau à l'aide d'une pompe située en surface. Sous certaines conditions, (admission d'air suffisante et soupape d'air de trop plein) l'équipression se trouve automatiquement réalisée. Il s'agit du scaphandre dit "Pieds Lourds", en raison des chaussures de lest utilisées. (1754)

L'étape déterminante a été de doter le plongeur d'un régulateur réalisant l'équipression et d'un réservoir d'air comprimé lui donnant une véritable autonomie. Ce pas a été franchi en 1863 avec l'aérophore, appareil conçu par Benoît Rouquayrol et Auguste Denayrouze, réalisant ainsi le premier scaphandre autonome commercialisé.

En 1926, Yves Le Prieur le redécouvre et l'améliore. En 1945, Cousteau et Gagnan réalisent le "CG 45" suivi rapidement par "le Mistral" bien connu.

Par la suite, sont apparus les détendeurs à deux étages, les détendeurs compensés, surcompensés, pilotés, assistés, en même temps que différents types de bouteilles, de robinetteries et de sanglages.

Nous avons remarqué que de vieux principes revoyaient parfois le jour, grâce à l'évolution des moyens de fabrication. C'est pourquoi nous avons tenu tout de même à les présenter. À défaut, ils pourront être utiles aux collectionneurs.

Nous souhaitons que cet ouvrage constitue un document de référence pour analyser les équipements anciens ou nouveaux. Qu'il permette aux responsables du matériel, après une indispensable formation pratique, de reconnaître les différents modèles, de les entretenir et éventuellement de les réparer. Qu'il aide les moniteurs à préparer leurs cours et répondre aux questions de leurs élèves et ainsi transmettre à leur tour ces connaissances à ceux qui les suivront.

Les publicités des fabricants sont parfois rédigées dans un langage ésotérique à but purement commercial. Nous essayerons de les démystifier de façon à permettre aux plongeurs de mieux choisir leur matériel et de mieux l'utiliser. *

Il est compréhensible qu'un plongeur ne s'intéresse qu'à son propre matériel. Par contre un moniteur doit avoir des connaissances plus larges. (S'il ne peut être bon partout, il n'a le droit d'être mauvais nulle part)

Les moniteurs doivent savoir ce qu'ils enseignent.

Les plongeurs ont le droit de savoir ce qu'ils achètent et ce qu'ils utilisent.

Les vendeurs doivent savoir ce qu'ils vendent

J'espère que cet ouvrage les y aidera.

****

* Voir en annexe "Le langage des fabricants"

CHAPITRE I

RAPPELS DE PHYSIQUE

Afin de parler le même langage, il nous a semblé utile de rappeler les unités et quelques-uns des principes de physique que nous utiliserons fréquemment dans cet ouvrage.

I-1 Grandeurs physiques et unités

Six grandeurs sont fréquemment utilisées :

- Les longueurs représentées par L sont exprimées en mètres.

  (Symbole m)

- Les surfaces représentées par S sont exprimées en mètres carrés.

  (Symbole m^2)

- Les forces représentées par F sont exprimées en newtons.

  (Symbole N)

- Les pressions représentées par P sont exprimées en pascals.

  (Symbole Pa, peu utilisé)

- Les volumes représentés par V sont exprimés en mètres cubes.

  (Symbole m^3)

- Les temps représentés par t sont exprimés en secondes.

  (Symbole s)

Ces grandeurs sont liées entre elles par les relations suivantes :

$$P = F/S \quad \text{ou} \quad F = P \times S$$

P en pascals, F en newtons, S en mètres carrés.

Les surfaces circulaires de diamètre D que nous rencontrerons fréquemment, ont une valeur :

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

Pour des raisons pratiques, on utilise couramment des sous-multiples ou des multiples des grandeurs ci-dessus :

- Le centimètre pour les longueurs ; 1cm = 1 centième de mètre ;
- Le centimètre carré pour les surfaces ; $1cm^2$ = 1 dix-millième de mètre carré ;
- Le kilogramme-force pour les forces ;

(1kgF est environ égal à 10 newtons soit 1 déca newton, symbole daN)

- Le bar pour les pressions ; 1 bar = 100.000 pascals ; Symbole "bar".
- Le kilogramme par centimètre carré ;

(Symbole kg/cm² ; 1 kg/cm² égal environ 1 bar)

- Pour les temps, on utilise souvent les minutes ;

(Symbole min) et parfois les heures (Symbole h)

- Les volumes d'air sont exprimés en litres détendus, appelés aussi normo-litres, (lorsqu'il s'agit d'air détendu à la pression atmosphérique)

Remarques :

1. En utilisant le bar, le cm et le newton, on obtient : 1bar x $1cm^2$ = 10 N. (On utilisera fréquemment le daN, égal à 10 newtons, car appliqué sur 1 cm² il donne, à peu près, la pression atmosphérique)
2. Le kilogramme-force et le kilogramme par centimètre carré ne sont pas normalisés mais sont parfois utilisés pour des raisons pratiques.
3. Il est bon aussi de se souvenir que, si une colonne d'eau de 10 m de haut crée une pression de 1 bar, une colonne d'eau de 1 centimètre crée une pression de 1 millibar.
4. L'hectopascal qui vaut 1 millibar est surtout utilisé en météorologie.
5. La pression atmosphérique de référence au niveau de la mer est de 1013 millibars.

I-2 Pressions relatives et pressions absolues

La plupart des manomètres utilisés dans l'air indiquent des pressions relatives. C'est-à-dire qu'ils mesurent l'écart de pression par rapport à la pression atmosphérique du lieu. Pour connaître la pression absolue, il faut donc y ajouter cette pression atmosphérique.

Par contre, les manomètres immergeables, mécaniques ou électroniques indiquent toujours la pression absolue, c'est-à-dire par rapport au vide.

Dans les calculs qui vont suivre, nous utiliserons la Pression Atmosphérique (PA) la Pression ambiante relative (Pa) la pression ambiante absolue (Paa) la moyenne pression (MP) et la Haute Pression (HP).

I-3 Principe de Pascal

Toute pression exercée sur un fluide se transmet par lui intégralement et dans toutes les directions.

Les figures ci-dessous sont inspirées d'un ancien fascicule Fédéral sur les détendeurs dont les auteurs sont : Gérard ALTMAN et Jean-François BIARD.

La force résultant de la différence de pression qui existe de part et d'autre d'une membrane, d'un piston, d'un clapet ou de tout autre système obturant l'orifice d'une enceinte de forme quelconque est toujours :

- Normale au plan de l'orifice.
- Indépendante de la forme intérieure ou extérieure de cet élément ou de celle de l'orifice.
- Égale au produit de la différence de pression par la surface de l'orifice :

$$F = (P2 - P1) \times S$$

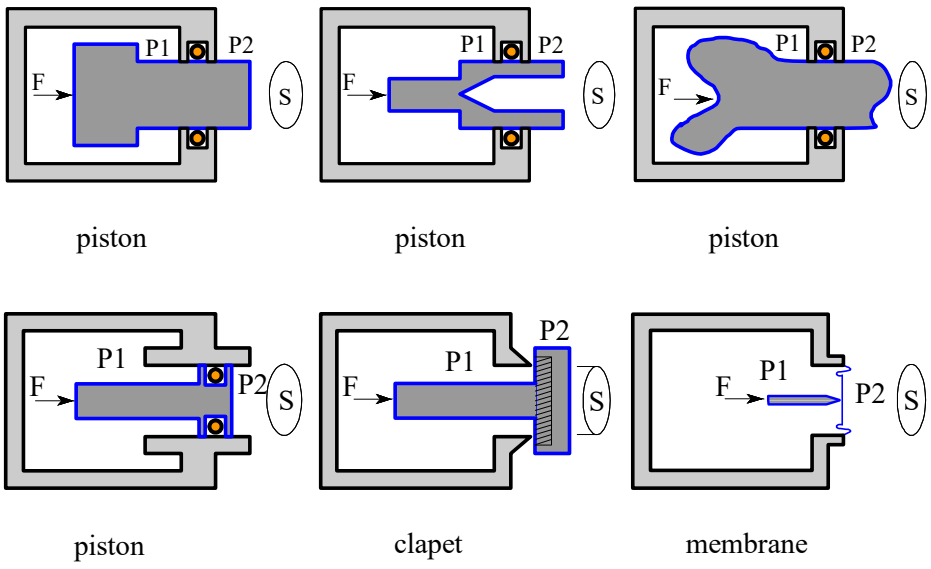


Figure 1 - Forces et pressions

Dans la figure 1, toutes les surfaces S étant égales, les forces F le sont aussi. Pour que ces systèmes soient en équilibre, il faut leur appliquer des forces F' égales et opposées.

I-4 Forces, déplacement et travail

Ce qui nous intéresse, c'est le travail J nécessaire pour effectuer une action. Le travail est le produit d'une force F par un déplacement D.
J s'exprime en joules. (Symbole j)
F s'exprime en newtons.
D s'exprime en mètres.

$$J = F \times D$$

I-4-1 Les leviers

Donnez-moi un point d'appui et je soulèverai le monde. (Archimède)
Le levier divise l'amplitude et multiplie la force dans un rapport K = L2/L1. (Voir figure 2 ci-dessous)

$$F_1 = K \times F_2$$

On peut aussi écrire que :

$$L_1 \times F_1 = L_2 \times F_2$$

Lorsqu'on utilise un levier, le travail réalisé pour soulever une charge est le même, quelle que soit la position du point d'appui car le produit de la force par le déplacement est constant.

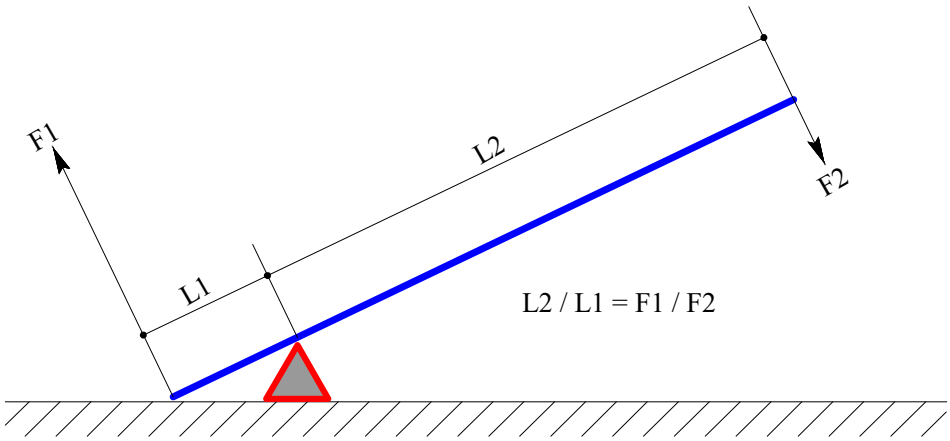


Figure 2 - Principe du levier

****

CHAPITRE II

LE DÉTENDEUR DE BASE

Le détendeur de base est un détendeur très simplifié, imaginé uniquement dans un but didactique. Nous le ferons évoluer au fur et à mesure de nos explications. Il ne se réfère à aucun détendeur existant mais il est toujours possible de s'y rapporter.

II-1 Description

Un détendeur est essentiellement constitué d'un boîtier dans lequel se trouvent généralement les éléments suivants : (Voir figure 3a)

1 - un clapet,

2 - un siège,

3 - un ou plusieurs ressorts,

4 - une membrane d'inspiration,

5 - un pointeau parfois associé à des leviers,

6 - un système d'expiration,

7 - un embout.

A ceci nous devons ajouter :

8 - une chambre humide à la pression ambiante ;

9 - une chambre sèche à la pression d'inspiration ;

10- une chambre haute ou moyenne pression.

Nous verrons que ces éléments se retrouveront, sous plusieurs formes, dans tous les détendeurs que nous étudierons par la suite.

Pour faciliter l'étude des différents modèles, nous donnons des schémas dépouillés permettant de comprendre les principes de fonctionnement du matériel mais parfois assez éloignés des réalisations pratiques.

Pour compléter ces informations, il est possible de consulter les documents "Constructeur", quelquefois les éclatés, beaucoup plus proches de la réalité mais dont l'analyse est parfois difficile.

II-2 Fonctionnement (Voir figure 3a)

Au repos, l'air ne passe pas car le clapet est appuyé sur son siège à la fois par le ressort et par la Haute Pression.

À l'inspiration par l'embout buccal, la dépression provoquée sous la membrane produit une force qui, par l'intermédiaire du pointeau, repousse le clapet, libérant l'arrivée de l'air dans la chambre sèche. Le système d'expiration est fermé par la Pa de façon à empêcher l'eau extérieure d'être aspirée. (Figure 3b)

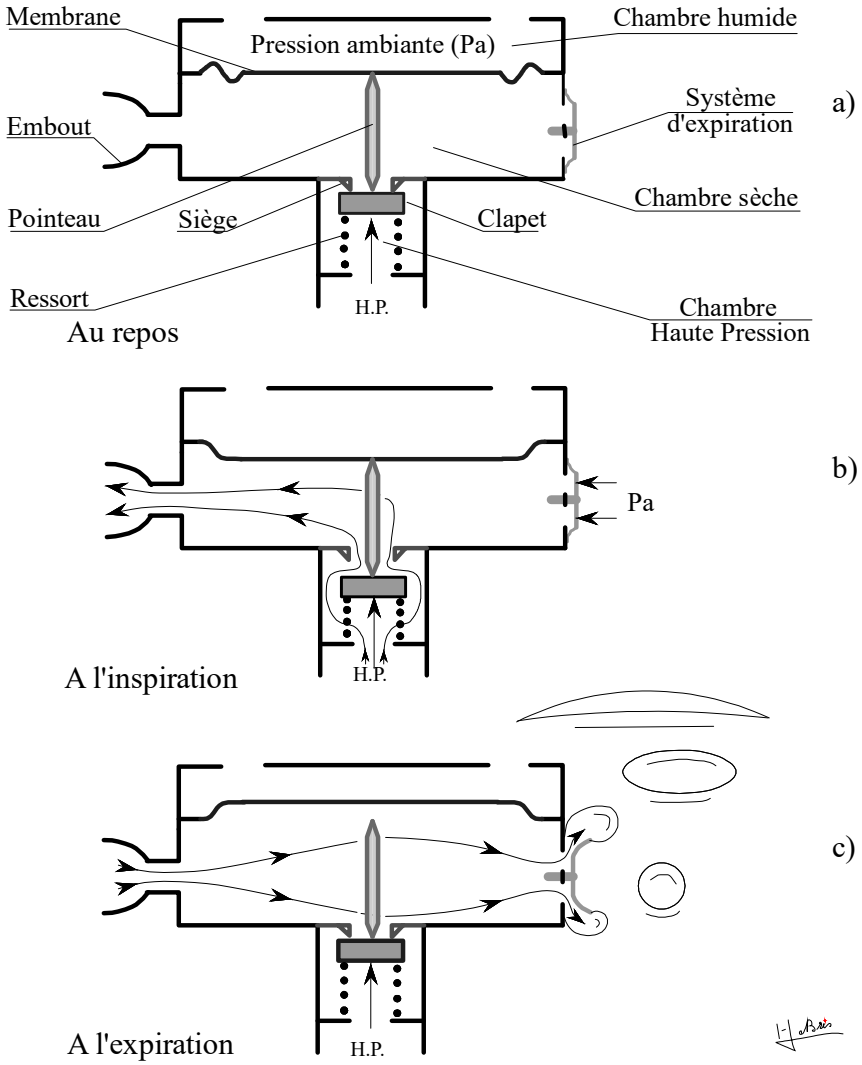


Figure 3 - Le détendeur de base

- Lorsque le plongeur descend, la pression ambiante (Pa) augmente et le détendeur réagit en fournissant une pression égale à la pression extérieure.

- S'il remonte, sans inspirer, le trop plein d'air s'échappe par le système d'expiration.

- Il y a donc une véritable régulation de la pression à l'intérieur de la chambre sèche, même si le détendeur n'est pas utilisé durant la plongée.

À l'expiration, la membrane d'inspiration est repoussée, le clapet se referme sous l'action du ressort et de la Haute Pression. La pression dans la chambre sèche repousse la membrane du système d'expiration, qui laisse échapper vers l'extérieur l'air chargé de CO_2. (Voir figure 3c)

II-3 Calcul du seuil d'ouverture

Selon la norme, on l'appelle aussi "Pic inspiratoire". C'est la variation de pression (ΔPm) qui est nécessaire pour décoller le clapet de son siège.

Les paramètres qui interviennent sont :

HP = Haute Pression d'alimentation du détendeur,

Pa = Pression ambiante,

ΔPm = Dépression d'inspiration,

Sm = Surface de la membrane,

Sc = Surface du clapet,

Fr = Force du ressort,

K = rapport de démultiplication des leviers. (Ajoutés au détendeur de base)

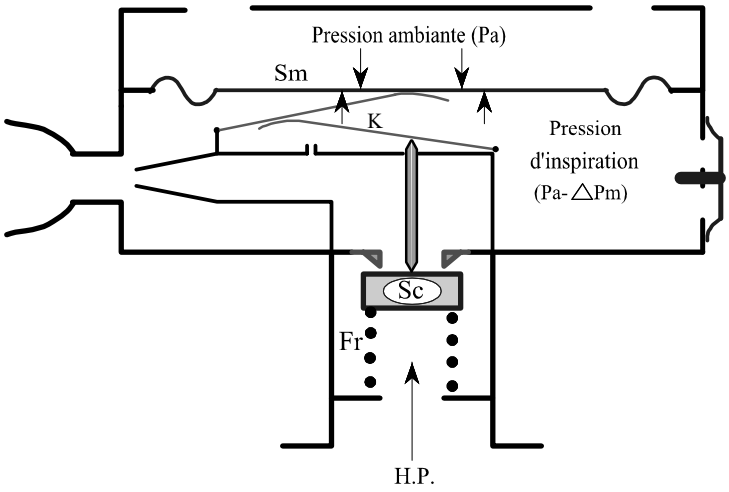


Figure 4 - Éléments pour le calcul du seuil d'ouverture

Nous avons ajouté au schéma ci-dessus une buse pour diriger le flux d'air vers l'embout pour éviter qu'il ne frappe directement la membrane et ne provoque des instabilités. Ceci n'intervient pas dans les calculs qui suivent :

Les forces en présence sont :

1) Celles qui tendent à ouvrir le clapet :

- Force due à la pression sur la surface externe de la membrane :

Pa x K x Sm.

- Force due à la pression sur la surface aval du clapet :

(Pa - ΔPm) x Sc

2) Celles qui tendent à fermer le clapet :

- Force du ressort de rappel du clapet : Fr

- Force due à la haute pression sur la face amont du clapet : HP x Sc

- Force due à la pression sur la surface interne de la membrane :

(Pa -ΔPm) x K x Sm

À l'équilibre on peut écrire :

(Pa x K x Sm) + (Pa - ΔPm) x Sc = Fr+(HP x Sc)+(Pa - ΔPm) x K x Sm

L'équation devient alors :

(Pa x K x Sm)+(Pa x Sc)– (ΔPm x Sc) =

Fr + (HP x Sc) + (Pa x K x Sm) – (ΔPm x K x Sm)

Et : (ΔPm x K x Sm) - (ΔPm x Sc) = Fr + (HP x Sc) - (Pa x Sc)

Puis : ΔPm[(K x Sm) – Sc] = Fr + Sc (HP – Pa)

On en tire : $\Delta Pm = \frac{Fr + Sc\,(HP - Pa)}{(K \times Sm) - Sc}$

En fait, dans la plupart des cas, Pa est négligeable devant Hp et Sc devant K x Sm. On en déduit :

$$\Delta Pm = \frac{Fr + (HP \times Sc)}{Sm} \times \frac{1}{K}$$

ΔPm est le seuil d'ouverture du détendeur

Interprétation des résultats

1. Avec ce type de clapet, le seuil d'ouverture diminue lorsque la Haute Pression (HP) diminue. Ceci oblige à régler le détendeur suffisamment dur lorsque la pression est élevée pour qu'il ne fuse pas lorsqu'elle est faible.
2. Le seuil d'ouverture est inversement proportionnel à la surface de la membrane, ce qui conduit à des détendeurs de dimensions importantes.
3. La pression ambiante n'intervient que lorsqu'elle n'est pas négligeable devant la HP, c'est-à-dire lorsque la profondeur est grande et que la bouteille est presque vide, ce qui est une situation anormale.
4. Pratiquement ces résultats sont affectés par la forme et la nature du matériau qui constitue la membrane, ainsi que par les frottements secs du mécanisme.

Exemple :

Sc = 0,04 cm² ; Fr = 2 decaN ; K = 40 ; Sm = 65 cm².

1) Pour HP = 210 bar

$$\Delta Pm = \frac{[2 + (210 \times 0{,}04)]}{65} \times \frac{1}{40} \Rightarrow 4 \text{ millibars (4 cm d'eau)}$$

2) Pour HP = 15 bar

$$\Delta Pm = \frac{[2 + (15 \times 0{,}04)]}{65} \times \frac{1}{40} \Rightarrow 1 \text{ millibar (1 cm d'eau)}$$

Les efforts sont 4 fois plus faibles, bouteille vide que bouteille pleine.

II-4 Fonctionnement dynamique

Nous venons d'étudier le fonctionnement statique d'un détendeur en considérant que l'air ne circulait pas. En réalité, dès qu'un clapet s'ouvre, l'air se met en mouvement, ce qui modifie profondément les pressions et les forces qui entrent en jeu. Ce sont les études récentes de ces phénomènes qui ont permis les améliorations les plus spectaculaires des performances des détendeurs.

Sans entrer dans la technique fort complexe de la mécanique des fluides, nous allons évoquer certains des phénomènes qui interviennent le plus souvent dans le fonctionnement des détendeurs et en influencent fortement la morphologie.

II-4-1 Pertes de charges

Lorsque l'air circule à l'intérieur du mécanisme, il y rencontre des obstacles provoquant des turbulences qui freinent le passage de l'air et entraînent des chutes de pression que l'on appelle "Pertes de charges".

Une perte de charge est une Différence De Pression. (DDP) Elle est égale au produit de la résistance dynamique R par le débit D, en mètres cubes par seconde.

$$DDP=RxD$$

Les pertes sont d'autant plus fortes que les obstacles sont importants mais aussi que la vitesse de l'air est grande. Un simple tuyau, par frottement sur ses parois, un filtre, un clapet même ouvert, un coude, un rétrécissement entre deux chambres, peuvent provoquer des chutes de pression non négligeables.

Pour éviter ces inconvénients, les sections de passage de l'air doivent être augmentées, les surfaces à l'intérieur des tuyaux et des détendeurs doivent être polies, les angles vifs arrondis, les formes étudiées de façon à éviter les turbulences.

Dans un détendeur, la principale perte de charge reste celle causée par le filtre d'entrée. On s'en aperçoit aisément en essayant d'inspirer sur un détendeur qui n'est pas relié à une source d'air haute pression.

Remarque :

Les lois de la physique nous disent que dans un tuyau, la vitesse de l'air ne peut excéder la vitesse du son. En conséquence, le débit maximum, dans un tuyau de section donnée, est égal au produit de sa section par la vitesse du son.

Exemple : Dans un tuyau de 1 cm², le débit est toujours inférieur à 1980 litres/minute, quelle que soit la pression en amont. (3300x60x0,01)

II-4-2 Effet Venturi *(Voir figure 5)*

Lorsqu'un gaz s'échappe à l'extrémité d'un tuyau, qu'on appelle dans ce cas une "Buse", il entraîne avec lui, par frottement, les molécules d'air environnantes provoquant ainsi une dépression autour de cette buse dans le boîtier.

Pour suivre le langage courant, dans cet ouvrage, nous appelons cet effet "Effet Venturi", bien que certains préfèrent l'appeler "Effet de trompe".

Il est d'autant plus important que la vitesse à la sortie de la buse est importante.

Dans les détendeurs, l'effet Venturi a pour effet d'aspirer la membrane et de provoquer ainsi un débit continu sur une simple inspiration, un choc ou une variation de pression.

Pour pallier cet inconvénient, un ou plusieurs orifices calibrés sont percés latéralement dans la buse de façon à fournir la quantité d'air juste nécessaire pour éviter la dépression sous la membrane.

Aux orifices calibrés sont souvent associés des déflecteurs qui dirigent l'air de façon à stabiliser le fonctionnement.

Nous verrons plus loin que cet effet, considéré à l'origine comme un défaut, peut être exploité pour augmenter les performances des détendeurs en assistant le déplacement de la membrane.

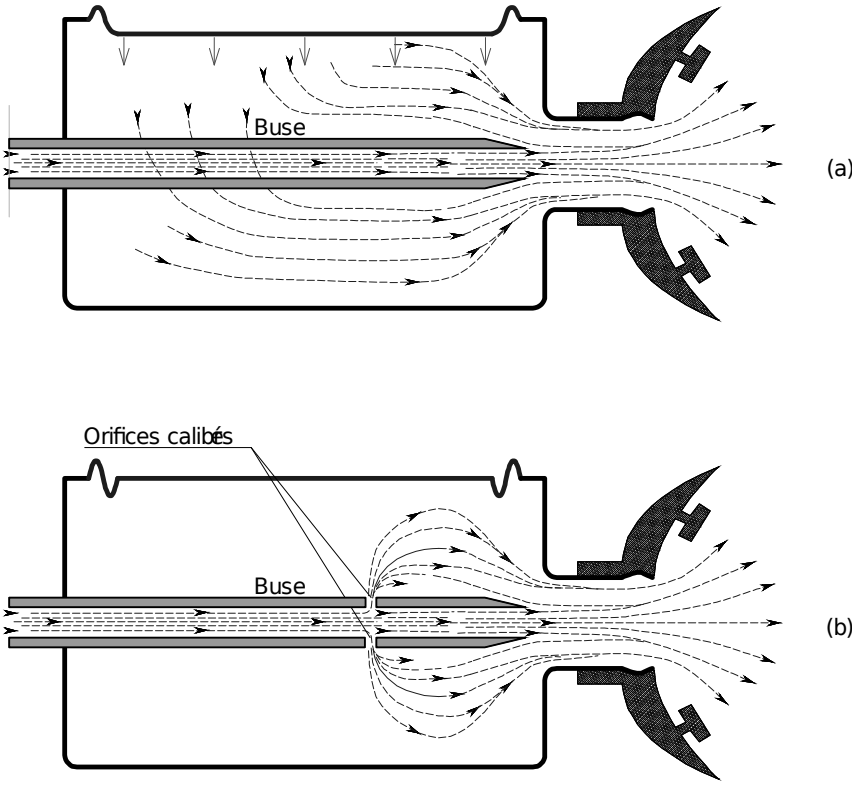


Figure 5 - Effet Venturi

II-4-3 Refroidissement

Lorsqu'un gaz se détend, il se refroidit. La température peut ainsi descendre bien en dessous de zéro degré. La vapeur d'eau contenue dans l'air peut se condenser puis givrer, de même l'eau contenue dans la chambre humide peut geler ce qui peut provoquer le blocage du mécanisme.

L'augmentation des performances de débit des détendeurs n'a fait qu'accentuer ce phénomène.

Au chapitre X, vous trouverez un développement détaillé de l'influence du froid sur le fonctionnement des détendeurs et les remèdes possibles.

On notera qu'en régime permanent, le débit massique du gaz est le même en tout point du détendeur.

****

Photo 3 - Le "MK25 / X600" de Scubapro

(Premier étage compensé, à piston et surcompensé par la haute pression
Deuxième étage à chambre de compensation)

CHAPITRE III

LES PRINCIPAUX COMPOSANTS

III-1 Sièges et clapets

(Voir la figure 6)

Ils constituent ce que l'on appelle des soupapes. Ils sont destinés à permettre ou à interrompre, voire à réguler à la demande, le passage de l'air.

Par définition, le siège est la partie fixe, le clapet est la partie mobile. (Larousse) Pour les Anglo-saxons, la partie souple est le siège "Seat", la partie dure s'appelle la couronne "Crown" ou "Orifice". Le siège et le clapet sont souvent démontables pour permettre leur remplacement en cas d'usure.

III-1-1 Clapets : Amont, aval

Lorsque la différence de pression de part et d'autre du clapet a tendance à le fermer, on dit que l'on a affaire à un "Clapet amont". En principe, un ressort de maintient n'est pas nécessaire mais il peut s'avérer utile dans certains cas pour assurer un minimum de pression et vaincre les frottements. (Voir figure 6b)

A l'inverse, lorsque la différence de pression de part et d'autre du clapet a tendance à l'ouvrir, (P1>P2) on dit que l'on a affaire à un "Clapet aval". (*Voir figure 6a*) Un ressort de maintien est toujours nécessaire pour le maintenir fermé. Son intérêt est de protéger le tuyau MP en cas de surpression en amont.

Remarques :

- En inversant les pressions un clapet aval devient amont et vice et versa.
- Un clapet compensé n'est ni amont ni aval "Voir la compensation"
- Un clapet sous-compensé permet de protéger le tuyau MP contre les fuites d'un 1er étage. (Voir aussi le lien ci-dessus)

Matériaux utilisés

Le siège et le clapet sont en cupro nickel ou en acier inoxydable. Le contact métal contre métal est difficilement étanche, le clapet ou le siège porte donc une pastille de matériau semi-souple destinée à absorber les imperfections de parallélisme ou d'usinage.

Cette pastille prend parfois la forme d'un joint torique qui, au-delà d'une certaine pression se déforme, laisse passer l'air, jouant ainsi le rôle d'une soupape de sûreté. (Voir figure 6d)

III-1-2 Différents types de clapets

(Voir figure 6 ou P1>P2)

Le clapet simple : L'air passe à travers le siège lorsque le clapet s'en écarte. (Voir figure 6a, clapet aval et 6b, clapet amont)

Le clapet souple : Il est constitué d'une membrane ou parfois d'un tuyau souple. (Figure 6c)

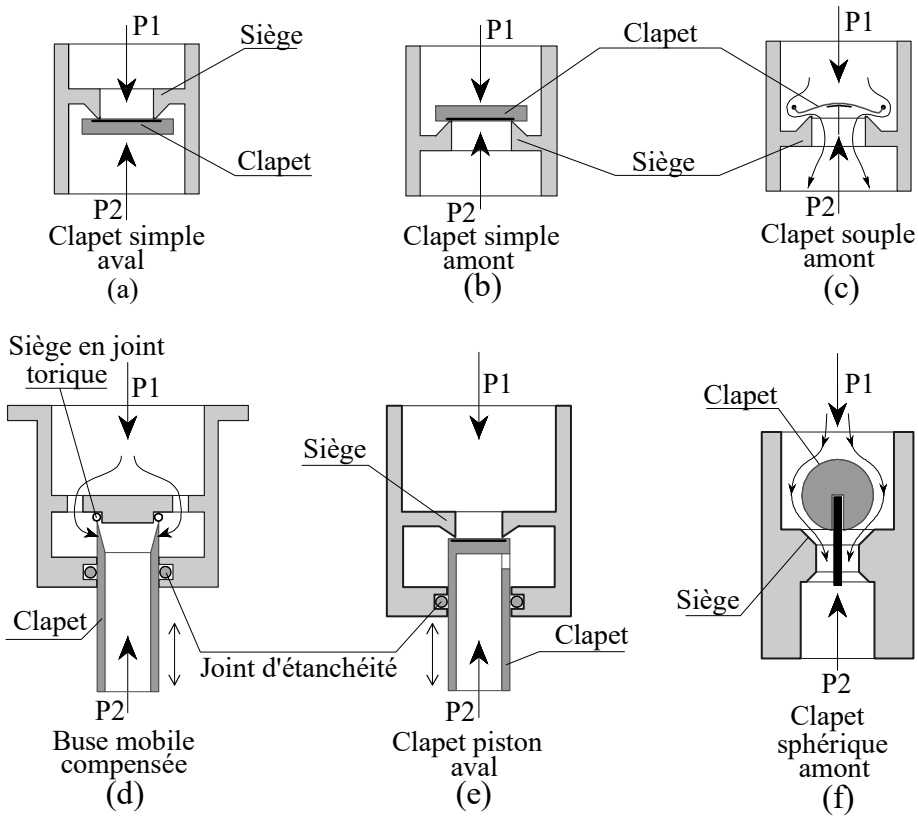


Figure 6 - Différents types de clapets

La buse mobile : L'air passe à travers le clapet lorsque celui-ci s'écarte de son siège. Ce montage nécessite un joint d'étanchéité. (Voir figure 6d) Nous verrons au chapitre VI qu'il est naturellement "compensé".

Le clapet piston : L'air passe à travers le siège et le clapet. Il nécessite aussi un joint d'étanchéité. Il n'est pas compensé. (Voir figure 6e)

Le clapet sphérique ou hémisphérique : Ce type de clapet utilise des matériaux très durs comme l'acier ou le rubis synthétique, d'où une bonne résistance à l'usure. La portée du clapet est constituée par la tangente entre la sphère et le tronc de cône formé par le siège.

Associé à une portée à 45°, il permet un meilleur écoulement du gaz. La composante axiale est la même que s'il s'agissait d'une surface plane. Il a aussi l'avantage de tolérer davantage de jeu car il se centre automatiquement. (Voir figure 6f) Il a tout de même connu des déboires, sous forme hémisphérique, dans le détendeur "Rubis" de Marès.

III-1-3 Pression entre siège et clapet

(Voir figure 7)

Cas du clapet simple :

Pour qu'il n'y ait pas de fuite, lorsque la soupape est fermée, il faut que la pression exercée par le clapet sur la lèvre du siège soit supérieure à celle de l'air à retenir.

C'est la raison pour laquelle, le siège présente une lèvre amincie de façon qu'une faible force suffise à provoquer une forte pression.

$$(P = F/S)$$

Plus la lèvre est fine, plus la pression est forte. Il y a cependant une limite à cette finesse en raison de la résistance nécessaire à l'usure et à la rupture.

Exemple : Un siège à un diamètre moyen D = 0,5cm et une lèvre de largeur l = 0,01cm.. La pression à retenir est de 10 bars.

La surface de la lèvre est :

$S \approx \pi \times D \times l = \pi \times 0{,}5 \times 0{,}01 = 0{,}0157 cm^2$

Pour retenir une pression de 10 bars, il faut donc une force de :

$$F \approx P \times S = 10 \times 0{,}0157 = \mathbf{0{,}157\ daN}$$

Celle-ci peut être obtenue par un ressort ou par une contre-pression. C'est ce que nous verrons plus loin.

Remarques :

1) Dans la figure 7, la pression amont passe de P1 à P3 suivant les vues repérées de **a** à **c**. Il en résulte que la partie souple du clapet est de plus en plus repoussée. A la limite, en **7c**, l'air finit par passer. Dans le cas extrême, la partie souple peut même se déchirer provoquant une fuite permanente

2) La lèvre du siège, vue au microscope, est plutôt rugueuse. La pression en tout point doit être supérieure à celle à retenir. En pratique, il faut une pression moyenne de contact d'environ 2 fois la pression à étancher. Pour cette raison, dans un détendeur, à l'équilibre des forces, il faut toujours ajouter un ressort d'appoint pour assurer l'étanchéité.

3) Nous avons vu que, sous l'effet de la pression, un clapet aval avait tendance à s'ouvrir, et qu'un clapet amont avait tendance à se fermer. Il en résulte qu'il faut toujours une certaine force pour assurer la fermeture d'un clapet aval ou l'ouverture d'un clapet amont. Ce point est développé dans l'encadré III-1-4.

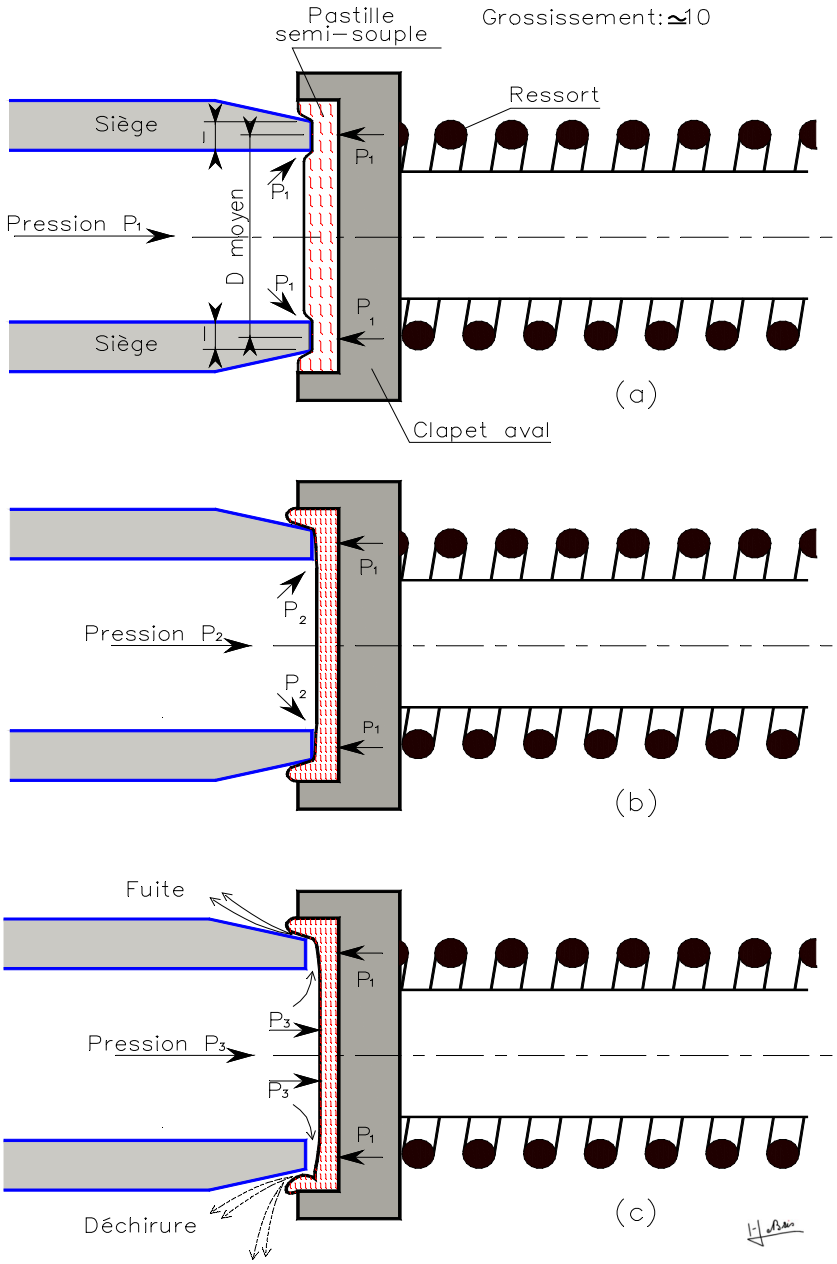


Figure 7 - Pression entre siège et clapet

III-1-4 Pression suivant que le clapet est aval ou amont

1) Cas du clapet aval :

Reprenons les données utilisées dans l'encadré en III-1-3

La pression exercée en amont sur le clapet entraîne une force d'ouverture :

F = P x S

$$F = 10 \times \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow 1{,}963 \text{ décaN}$$

Pour éviter une fuite, il faut donc ajouter cette force à celle calculée en

III-1-3 de façon à retenir la pression de 10 bar.

Ceci est obtenu par un ressort d'appoint dont la force devra être :

Fr = 0,157 + 1,963 = 2,12 décaN

En l'absence de pression de l'air, la force du ressort s'exerce seule. En conséquence, la pression mécanique sur le siège est :

$$P = \frac{F}{S} = \frac{2{,}1200}{0{,}0157} = 135 \text{ bar}$$

Cette pression ne manque pas de marquer le siège et, à la longue, de l'endommager.

2) Cas du clapet amont :

En raison de la pression, la force nécessaire à l'ouverture du clapet est :

$$10 \times \frac{\pi D^2}{4} = 1{,}963 \text{ décaN}$$

En présence de la pression de l'air, la pression mécanique sur le siège est donc :

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1{,}9630}{0{,}0157} = 125 \text{ bar}$$

A l'inverse du clapet aval, c'est en présence de pression que le clapet amont risque d'être endommagé.

Remarque

Dans les deux cas, lorsqu'un jeu latéral existe entre le clapet et le siège, la pression exercée risque de provoquer, sur l'un ou sur l'autre, des empreintes circulaires sécantes. Celles-ci peuvent être la source de fuites.

Autres fonctions des clapets

Nous les reverrons dans le cadre des détendeurs dans lesquels ils sont utilisés.

- "**Clapet compensé**" : Les variations de pression sont sans effet sur ce clapet. (Ce n'est ni un clapet amont, ni un clapet aval)

- "**Clapet sous-compensés aval**" : Se comporte comme un clapet aval de faible surface.
Au 2e étage, il permet de protéger le tuyau MP contre une fuite du 1er étage.

- "**Clapet sur-compensé amont**" : Se comporte comme un clapet amont de faible surface.
Au 1er étage, il permet d'améliorer la tenue du clapet en haute pression et de bénéficier d'une petite augmentation de la MP en fin de plongée lorsque la HP a diminué.

III-2 Ressorts

Les ressorts sont des systèmes élastiques qui, lorsqu'ils sont sollicités, fournissent une force proportionnelle à la déformation qu'on leur fait subir. Dans les détendeurs, ils sont souvent réalisés en acier inoxydable. On utilise surtout des ressorts de compression, en hélice cylindrique, dits "Ressorts à boudins".

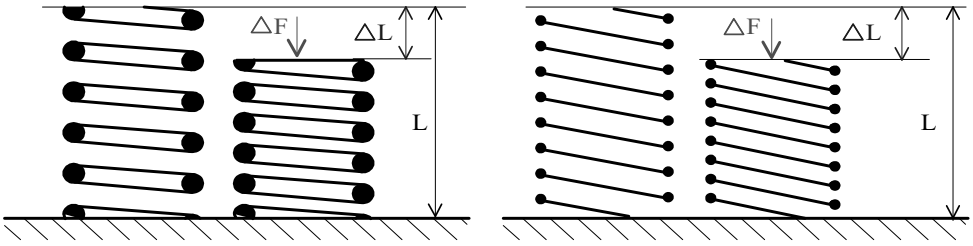
Un ressort est caractérisé par la variation ΔF de la force qu'il produit pour une variation de longueur ΔL donnée. Le rapport entre ces 2 valeurs s'appelle la raideur (K). (Prononcer delta F et delta L)

Dans les détendeurs, la force varie peu, car les déplacements ΔL sont faibles par rapport à la longueur du ressort.

La force fournie par certains ressorts est parfois réglable à l'aide d'une vis de compression. (Une rondelle antifriction est alors nécessaire pour éviter la torsion du ressort sur lui-même)

Un ressort taré est un ressort qui, comprimé d'une longueur précise, produit une force bien définie. Un ressort de rappel est un ressort qui, après un mouvement, ramène une pièce dans sa position initiale.

Un ressort d'appoint ou de maintient permet d'assurer un minimum de pression entre un siège et un clapet. À la longue, les ressorts s'avachissent et peuvent nécessiter un nouveau tarage ou un remplacement.



$\Delta F = K \times \Delta L$ et $\Delta L = \Delta F / K$

Figure 8 - Représentation des ressorts

La représentation fidèle d'un ressort par un dessin n'est pas facile, aussi nous vous proposons (figure 8) deux représentations schématiques. Afin de les distinguer dans un schéma, nous suggérons d'utiliser la figure 8a pour les ressorts de force importante et celle de la figure 8b pour ceux de force plus faible.

(On peut, dans certains cas, pour alléger le dessin, supprimer les traits entre les cercles ou les points)

III-3 Membranes et pistons

(Voir figure 9 et 10)

Ce sont des capteurs de différences de pression. Ils fournissent une force en newtons $F = \Delta P \times S$ ou ΔP est la différence de pression qui règne de part et d'autre de la membrane, S étant sa surface.

Ils sont constitués d'une partie rigide qui sert d'appui à un levier ou à un pointeau et pour l'étanchéité, d'une partie circulaire souple pour les membranes, d'un joint élastique pour les pistons.

Le rendement est à la fois fonction de la forme et du matériau utilisé. Lorsque les différences de pression sont très faibles, les membranes, qui ont de faibles frottements, sont mieux adaptées que les pistons.

Elles peuvent être considérées comme une succession de surfaces annulaires concentriques agissant toutes sur le levier. (Voir figure 9c où toutes les surfaces horizontales participent à la force fournie)

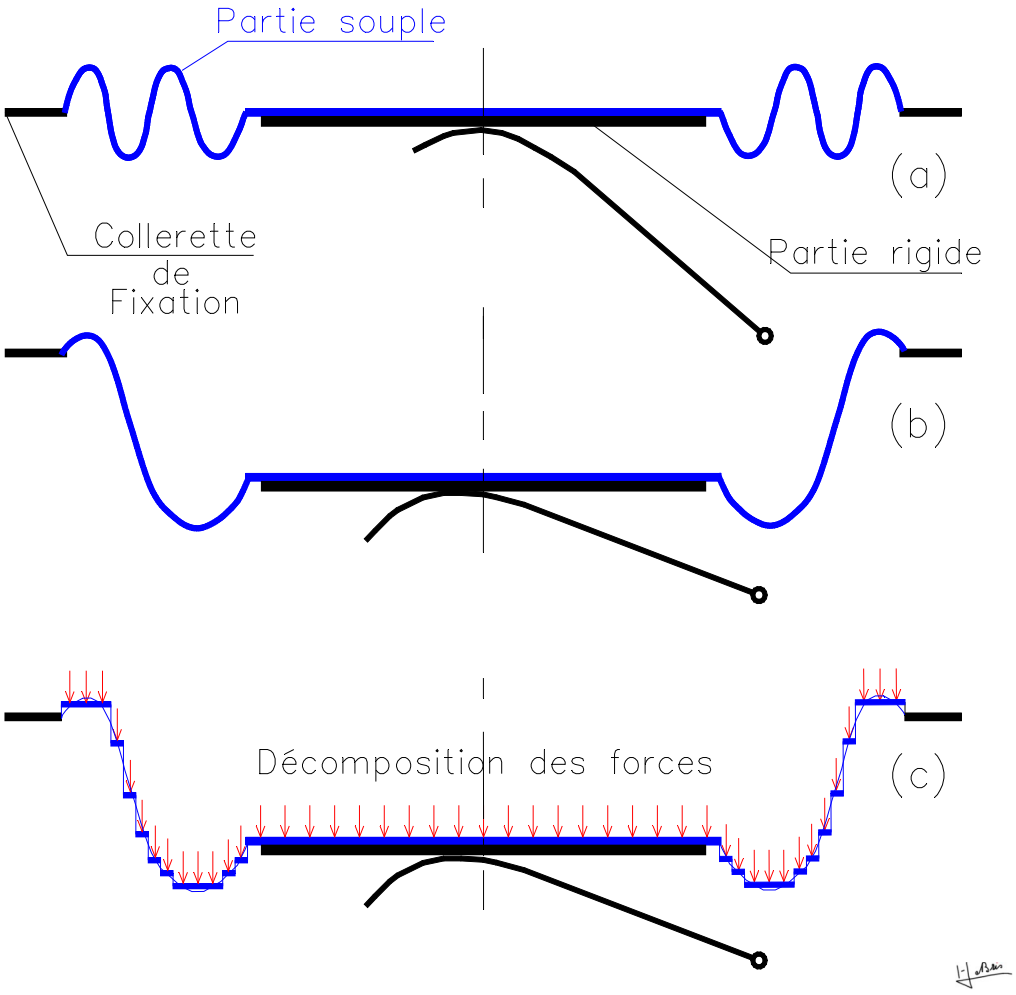


Figure 9 - Membrane d'inspiration

Les parties rigides des membranes ou des pistons sont réalisées en matière plastique ou en métal. Les parties souples et les joints sont en silicone ou autres élastomères. Autrefois, ils étaient en néoprène.

Pour éviter de froisser la membrane, lors de son serrage sur le boîtier, il peut être nécessaire de disposer une rondelle antifriction entre la vis de fixation et le bord de la membrane.

III-4 Leviers et pointeaux

(Voir figure 10)

Ce sont les éléments du mécanisme qui transmettent les mouvements de la membrane au clapet. Les pointeaux sont parfois intégrés aux clapets ou aux pistons.

Souvent, ces 3 parties constituent une seule pièce. (Il ne faut cependant pas la confondre avec le clapet piston de la figure 6e)

Comme nous l'avons vu en rappels de physique, les leviers assurent une multiplication de la force fournie par la membrane en contrepartie d'une démultiplication de l'amplitude. Ils assurent parfois le changement de direction nécessaire à la commande du clapet.

Pointeaux et leviers sont soumis à des frottements qui réduisent le rendement du mécanisme, il n'est toutefois pas recommandé d'utiliser certaines graisses qui risquent de retenir des corps étrangers et de bloquer le fonctionnement.

De plus, le mécanisme des détendeurs fonctionnant sous un taux d'oxygène élevé nécessite une graisse "Spéciale Oxygène".

Le jeu entre la membrane et le clapet doit être aussi faible que possible pour ne pas limiter la course du clapet donc l'arrivée d'air. Par contre, il doit être suffisant pour assurer un fonctionnement correct sans risque de provoquer une fuite continue du détendeur.

Pour cette raison, nous verrons qu'un réglage du jeu est toujours prévu, soit par un système à vis et écrou, soit par torsion des leviers.

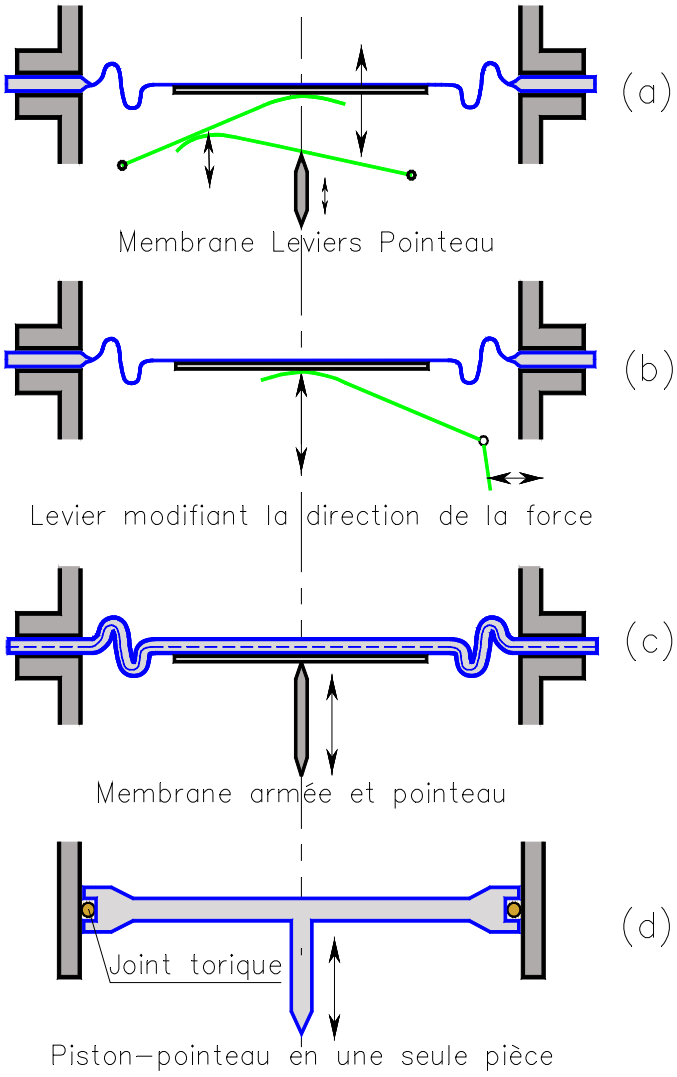


Figure 10 - Membrane - Pointeaux et leviers

III-5 <u>Systèmes d'expiration</u> *(Voir figure 11)*

Ils sont, en général, constitués par des membranes de néoprène ou de silicone fonctionnant sous l'effet de la pression. Ce sont des valves anti-retour. Elles laissent l'air s'échapper facilement vers l'extérieur à l'expiration et empêchent l'eau de pénétrer dans la chambre sèche lors de l'inspiration. Suivant la norme EN250, la surpression nécessaire à leur ouverture s'appelle le pic expiratoire.

Les premiers systèmes réalisés étaient constitués de tuyaux très souples et aplatis appelés "Becs de canards". (Voir figure 11a) Aujourd'hui ils sont généralement réalisés sous forme de membranes circulaires, parfois ovales faisant office de clapets souples. (Voir figure 11b)

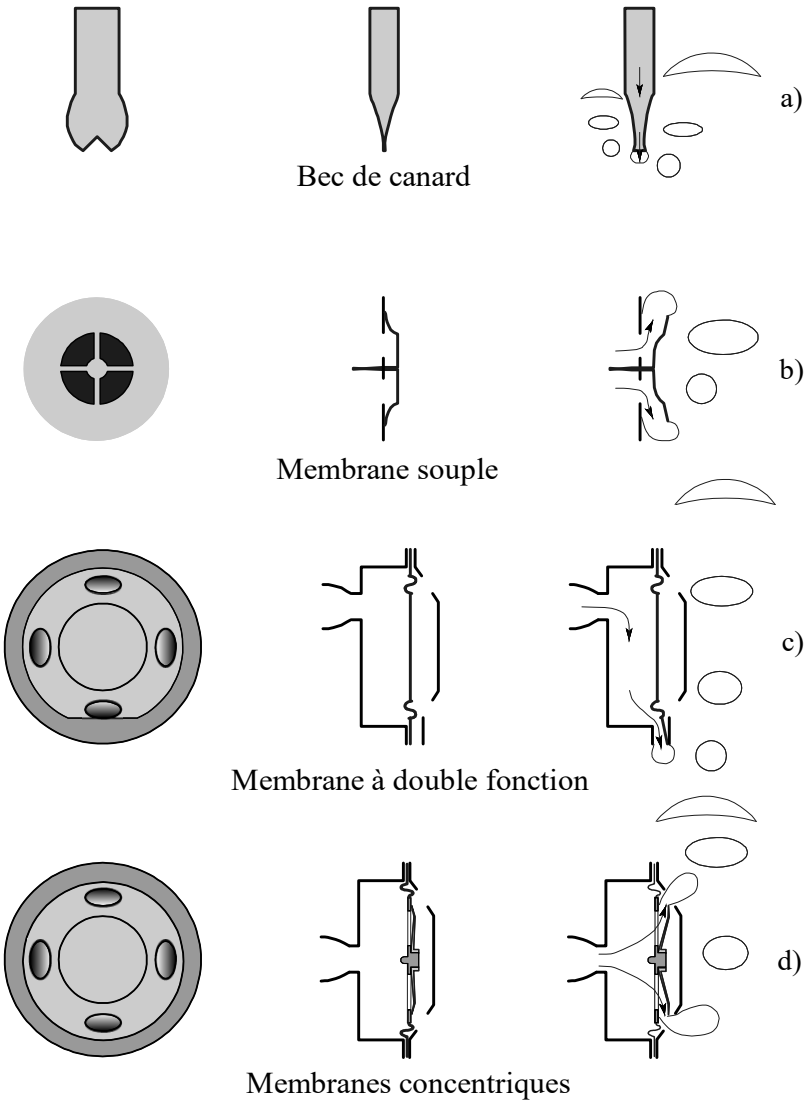


Figure 11 - Systèmes d'expiration

Certains sont à double fonction, inspiration et expiration, (Scubapro, figure 11c) parfois latérales et concentriques. (Poseidon, figure 11d) D'autres sont doublées.

Remarques :

1) L'étanchéité de la chambre sèche dépend de celle du système d'expiration. Celle-ci dépend de la qualité de la surface et de la force d'appui qui dépend elle-même de l'élasticité du matériau et de la pression extérieure.

2) Quand le système d'expiration se trouve au bas de la chambre sèche, le travail expiratoire est plus grand mais l'étanchéité est meilleure car la pression extérieure ferme le système.

   Si malgré tout, une petite quantité d'eau pénètre dans le détendeur elle n'est pas immédiatement inspirée par le plongeur, mais éliminée à l'expiration suivante. À l'inverse, si le système d'expiration se trouve au haut de la chambre sèche, le travail expiratoire est plus faible mais on risque davantage d'absorber de l'eau. (Voir le travail respiratoire chapitre XIV-7)

3) Ceci explique qu'un plongeur absorbe plus facilement de l'eau lorsqu'il descend tête en bas.

4) Les membranes concentriques sont moins sensibles à leur orientation en ce qui concerne l'expiration mais un peu plus sensibles aux entrées d'eau.

III-6 Joints d'étanchéité

Il existe de nombreux types de joints. Dans le matériel de plongée, le plus utilisé pour ne pas dire le seul, est le joint torique.

Brevet américain déposé par Niels CHRISTENSEN d'origine danoise, N°2.180.795 délivré le 21 novembre 1939. (*Merci Philippe Rousseau*)

Un joint torique est un joint de section ronde et de forme circulaire (Tore) mais pas toujours utilisé sous cette forme. Il peut être réalisé en élastomère : néoprène, éthylène propylène à faible coefficient de frottement, silicone, viton ou nitrile pour les mélanges suroxygénés en hypertane ou teflon pour les fortes pressions.

Les joints sont adaptés à leur fonction. Ils sont caractérisés par leur dureté Shore qui dépend de leur utilisation, basse ou haute Pression (Joint série I ou série R) ainsi que leur tenue en température car le néoprène, par exemple, durcit au froid. Ils sont élastiques mais peu compressibles. Certains joints peuvent subir de larges variations de pression, de quelques bars à plus de 300 bars. Les dimensions de leur logement doivent être très précises.

On associe parfois une bague anti-extrusion au joint torique. C'est une bague élastique fendue en biais pour faciliter sa mise en place. Elle est réalisée dans un matériau plus dur que le joint lui-même. (Téflon par exemple)

Elle permet de réduire les interstices entre les pièces et donc les possibilités d'extrusion. Ces bagues sont surtout utilisées en présence de pièces mécaniques en mouvement ou sous de fortes pressions.

Les joints toriques ont une durée de vie limitée, car la matière se déforme sous l'effet de la pression, se déchire sous l'effet de mises sous pression successives ou perd de sa souplesse sous celui de la température et du temps. Ceux qui sont soumis à des frottements finissent par s'user.

Certains se désagrègent sous l'effet des hydrocarbures. D'une façon générale il y a lieu, lors du remplacement, de suivre les recommandations du fabricant.

III-6-1 Fonctionnement

Lorsque le joint se trouve sans pression dans son logement, il vient s'appuyer légèrement sur les faces de celui-ci. (Voir figure 12)

Lorsqu'on applique la pression, le joint a tendance à fluer, on dit aussi qu'il "s'extrude", cela signifie qu'il est poussé vers tous les interstices en aval de la pression appliquée, de telle façon qu'il colmate toutes les fuites.

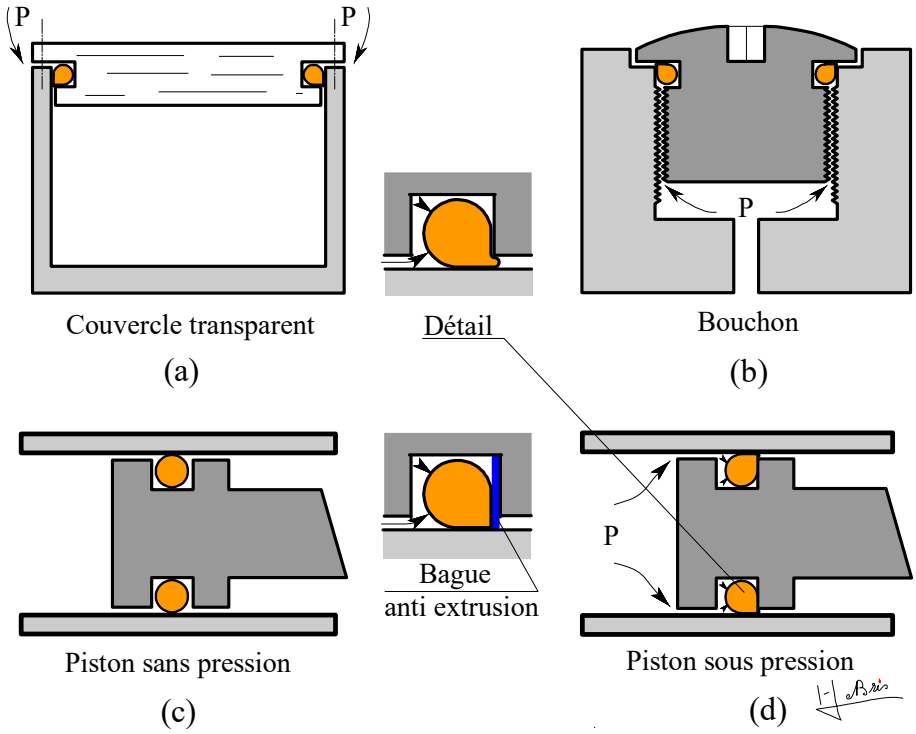


Figure 12 - Joints d'étanchéité

S'il est trop souple ou que le jeu est trop important, il s'introduit dans les interstices et risque de se déchirer. S'il est trop dur, il ne peut se déformer suffisamment et ne bouche pas les fuites.

En cas de changement il faut donc s'assurer qu'on le remplace bien par le modèle prévu dans toutes ses caractéristiques.

Comme nous pouvons le voir figure 12, il existe plusieurs montages d'utilisation de ces joints. De plus, ceux-ci peuvent fonctionner entre des pièces statiques ou en mouvement.

Les joints eux-mêmes ainsi que les surfaces sur lesquelles ils s'appliquent doivent avoir un état de surface aussi parfait que possible pour permettre leur mouvement sous l'effet de la pression. Mais cela ne suffit pas, ils nécessitent aussi une lubrification.

III-6-2 Lubrification

Le coefficient de frottement est plus élevé lorsqu'un joint se meut sur une surface sèche que lorsqu'il se meut sur un film lubrifiant. Au repos, même après un temps très court, le joint torique, par suite de la pression qu'il exerce sur les surfaces d'étanchéité, a tendance à rompre le film gras provoquant ainsi une friction à sec.

Heureusement, lorsqu'on applique la pression ou au début d'un mouvement, le joint roule sur lui-même et permet au film gras de se reconstituer.

Le roulement se transforme alors en glissement. Sans lubrifiant et sans ce mouvement, l'étanchéité à la mise sous pression serait mauvaise et la résistance de frottement serait plus élevée.

On veillera donc à lubrifier correctement les joints toriques. Il faut tout de même prendre garde à ne mettre que la quantité de lubrifiant juste nécessaire pour ne pas attirer les impuretés lors de la mise en place.

Les graisses les plus courantes sont celles au silicone car elles sont neutres et, sauf les silicones eux-mêmes, elles n'attaquent généralement pas les matières dans lesquelles sont fabriqués les différents types de joints.

Il y a donc lieu de consulter le fabricant lorsqu'il y a un doute. Il existe des graisses spéciales au silicone avec de la silice en suspension colloïdale qui sous l'action du brassage de l'eau évite à la graisse de migrer hors des zones utiles.

Dans certaines applications : boîtiers étanches à charnière, joints de bouteilles avec raccord par étrier, il est préférable de ne pas lubrifier ou alors très peu. Il convient alors de se fier aux recommandations du fabricant.

Il est est bon de rappeler que certaines graisses sont incompatibles avec l'utilisation de mélanges de gaz enrichis en oxygène. Le risque est grand d'inflammation voire d'explosion.

Les plus utilisés :

Cotes intérieure et diamètre de la section

R9 : 10,5x2.70 – Coté extérieur de l'opercule

R10 : 12,1x2.70 – Coté intérieur de l'opercule ?

R19 : 24,60x3.60 – Col de bouteille

AN3 : 1,42x1.52 – "Swivel joint" ou joint tournant du manomètre HP

III-7 Les boîtiers

Les boîtiers hautes pressions sont le plus souvent réalisés en bronze matricé ou forgé.

Une protection très solide du bronze et d'un bel aspect se fait par vaporisation d'un alliage de titanium, zirconium et chrome. (PVD, Physical Vapor Deposition) avec une protection finale en polyuréthane Ils sont aussi parfois en laiton ou en acier inoxydable usiné, en titane très résistant à la corrosion, très solide et léger mais coûteux, en aluminium ou en magnésium.

Ces matériaux ne sont pas toujours compatibles avec les graisses et les mélanges enrichis en oxygène. Certains comme le titane ou l'aluminium n'aiment pas les filetages. Ceux-ci grippent facilement, ce qui gène la maintenance.

Les boîtiers, basses pressions, étaient autrefois en laiton embouti ce qui favorisait les échanges thermiques mais aussi leur déformation. Aujourd'hui, on les trouve en plastique armé (composite, polyamide renforcé graphite et fibre de verre, techno-polymère) teinté dans la masse. Ces matériaux sont plus légers, indéformables et absorbent bien les chocs.

Pour les enfants, les détendeurs doivent être aussi petit et légers que possible.

III-8 Les embouts

Ils étaient par le passé exclusivement en néoprène. Aujourd'hui, ils sont en silicone plus souple et plus résistant, noir ou translucides. Leur forme est étudiée par des spécialistes pour éviter fatigue et irritation. Ils sont aussi anallergiques. Pour les enfants surtout, afin éviter de déformer leur dentition, ils doivent être orthodontiques, s'appuyant sur le palais ou occlusal, s'appuyant sur le maximum de dents. On trouve aussi des embouts thermo-formables. Après les avoir mis dans de l'eau chaude qui les ramollit, l'utilisateur y imprime l'empreinte de ses mâchoires. Ce type d'embout peut poser un problème lors d'échange d'embout. Il est confortable mais n'a cependant pas le succès qu'il mérite.

III-9 Les tuyaux

On trouve sur les détendeurs des tuyaux Moyenne Pression et Haute Pression. Ils utilisent de plus en plus le kevlar, qui est un matériau très résistant. La dernière couche de protection est volontairement munie de micro trous de façon à éviter les hernies, en cas de fuites des couches inférieures.

Les tuyaux doivent, selon la norme, supporter une pression d'au moins 4 fois celle de la pression de service. Au contact de l'eau ambiante, les tuyaux

participent au réchauffement du gaz qui les traverse. Pour l'alimentation de seconds étages, ils mesurent en standard 80 cm de longueur. Pour les détendeurs de secours, ils peuvent atteindre 100 cm, voire beaucoup plus pour les narguilés.

Un type de tuyau produit par la société anglaise "Miflex" est apparu en 2008. Le détendeur Mikron d'Aqualung, en a été l'un des premiers muni. Ce tuyau MP assez souple facilite le rangement du détendeur dans le sac de plongée. Il diminue les contraintes sur la bouche du plongeur. Bien qu'il retrouve une certaine rigidité sous l'effet de la Moyenne Pression.

Il est composé de 3 couches : Intérieur en polyuréthane pour l'étanchéité, armature en polyester pour la pression et extérieur recouvert d'une tresse en polyamide pour la protection contre les agressions du milieu. Il se décline en plusieurs couleurs : Noir, bleu, jaune et fluo. Un modèle HP est prévu. Il présente néanmoins l'inconvénient d'isoler davantage l'air qui y circule et donc son réchauffement par l'eau ambiante.

III-10 Les manchons de protection

Ces accessoires destinés à protéger le sertissage contre les pliages excessifs du tuyau ont cependant l'inconvénient d'accumuler sel et impuretés et de masquer les défauts éventuels des raccords sertis. Pour ces raisons, certains plongeurs préfèrent s'en passer

III-11 Les raccordements aux bouteilles

(Voir la page concernant les bouteilles)

La robinetterie des bouteilles possède un filetage femelle normalisé pour recevoir directement un détendeur répondant à la norme DIN. Il peut aussi recevoir un montage par étrier par l'intermédiaire d'un opercule. L'opercule est une pièce filetée comportant 2 joints toriques HP. L'un, coté robinetterie, est du type R10 de dimensions 12,10x2,7mm, l'autre coté détendeur est du type R9 de dimensions 10,5x2,7mm. C'est celui qu'il faut changer le plus souvent.

III-11-1 Le système "DIN"

C'est une norme d'origine allemande, courante dans ce pays. (Deutsch Institut fur Normung) = Institution allemande en charge de la normalisation. Ce mode de raccordement a une bonne étanchéité, il est peu protubérant et ne s'accroche pas facilement en plongée. C'est pourquoi il gagne du terrain, surtout auprès des plongeurs techniques ou souterrains.

Les filetages sont au pas du gaz G5/8. Le raccord DIN existe en deux versions avec détrompage 200/300 bars dont le 200 bars est plus court pour qu'il ne puisse se monter sur une bouteille en 300 bars. (*Voir figure 13 b*)

Inconvénient

- Il peut arriver qu'après un choc sur la robinetterie, on ne puisse plus monter un détendeur. Il est donc recommandé de toujours protéger le filetage par une pièce adaptée.

III-11-2 Le système à étrier ou international

C'est le plus utilisé pour l'instant. Il en existe deux modèles : le plus récent est plus large et plus solide, sa pression de service est de 232 bars. Il se monte sur toutes les bouteilles. (Voir figure 13a) Le plus ancien, plus étroit, ne se monte que sur les anciens modèles de bouteilles, sa pression de service est inférieure à 200 bars. Son étanchéité, très contestable il y a quelques années, s'est bien améliorée grâce à la qualité des opercules. (Voir l'étrier du Flight de Apeks ?)

Normalisation des raccords à étrier

Elle a pour objet de faciliter l'interchangeabilité des équipements. Or, il existe deux types de sièges que l'on peut encore rencontrer : L'un de type "I" comme International, de 17,8 mm de diamètre ; l'autre de type "F" comme Français, de 18,5 mm de diamètre. Ces 2 modèles sont abandonnés grâce à l'utilisation de nouveaux opercules.

Il y a donc lieu, avant de monter un détendeur, de s'assurer qu'il y a compatibilité, surtout avec les anciennes robinetteries.

Inconvénients

- L'étrier est protubérant et est susceptible de s'accrocher en plongée ou d'accrocher tout engin de pêche dont il est alors difficile de se défaire.

- L'accumulation de sel ou de calcaire dans le filetage de l'opercule peut le rendre indémontable sans risque d'abîmer la robinetterie.

- Une situation embarrassante est de ne pouvoir monter un détendeur en DIN parce que l'on ne peut démonter l'opercule de la robinetterie.

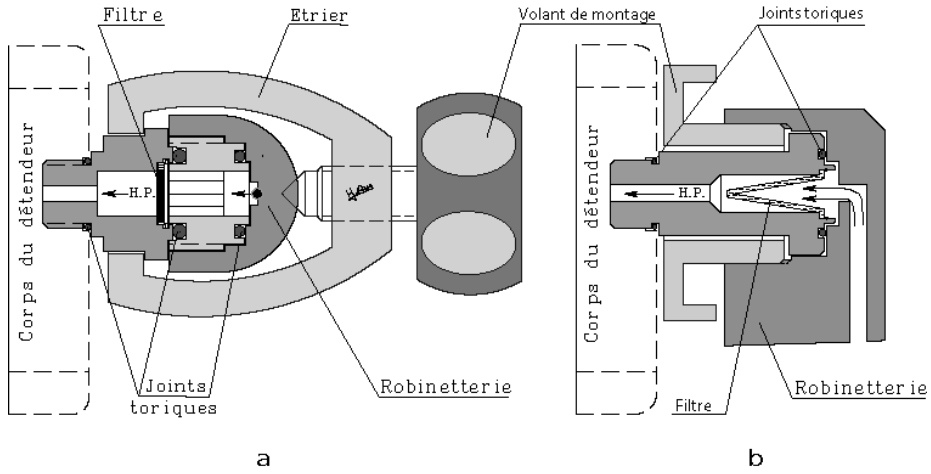


Figure 13 - Raccord à étrier et raccord DIN

Détrompage des raccords à étrier

La réglementation dit qu'il est interdit de raccorder une bouteille à une rampe pouvant délivrer une pression supérieure à la pression de service de celle-ci.

Dans l'état actuel des choses, il est cependant possible de monter des détendeurs de 176 bars sur des bouteilles de 200 bars, de gonfler à 232 bars des bouteilles prévues pour 200 ou 176 bars car aucun détrompeur n'est prévu.

Il serait pourtant facile d'utiliser des doigts détrompeurs de diamètres variables mais cela n'est pratiquement jamais utilisé.

Remarques

- Sur les détendeurs récents, il est parfois mais pas toujours possible d'utiliser l'un ou l'autre des 2 systèmes grâce à des pièces d'adaptation. Quel que soit le système utilisé, il doit porter visiblement l'indication de la pression maximum admissible.
- Les détendeurs avec raccordement par étrier sont de 15 à 20% plus lourds que ceux qui utilisent le système DIN.
- Il ne faut pas orienter le détendeur avec ses tuyaux après avoir serré la fixation sur la bouteille. Sinon, on risque de desserrer la fixation au détendeur et, sous l'effet de la pression, de détruire le joint entre le corps du détendeur et le système de raccordement. (DIN ou Étrier)

III-12 La protection contre les impuretés

Les impuretés venant de l'extérieur peuvent s'introduire dans le mécanisme du premier ou du deuxième étage et même remonter dans le manomètre

immergeable ou la sonde HP. Elles peuvent bloquer les mécanismes, détériorer les sièges ou les clapets ou s'enflammer en présence de mélanges sur oxygénés.

III-12-1 Les filtres d'entrée

Tous les détendeurs sont équipés, à l'entrée, d'un filtre dont le but est de retenir les particules qui pourraient venir de la bouteille. On peut regretter que sur beaucoup de détendeurs récents, on ne puisse plus les contrôler sans démontage.

Ils sont réalisés en bronze fritté souvent nickelé, en céramique poreuse ou en fil d'acier inoxidable tressé. Le bronze fritté est constitué de petites billes soudées entre elles. Les chicanes, ainsi constituées, laissent passer l'air mais retiennent les poussières d'une certaine dimension.

Les filtres constituent un obstacle au passage de l'air. Ils peuvent aussi se colmater complètement. Dans ce cas, il y a risque qu'ils se détruisent et projettent des particules solides dans le détendeur ce qui peut causer de gros dégâts.

Le fil d'acier ne présente pas ce risque mais sa filtration est plus difficile à contrôler. Les filtres doivent de toute façon être nettoyés ou changés avant d'être saturés de façon à ne pas réduire les performances des détendeurs. La tendance actuelle est d'en augmenter la surface en leur donnant une forme conique de façon à leur permettre un débit plus important et à retarder leur colmatage. (Comparer les figures 13a et b)

III-12-2 Les bouchons de protection

Ils ont pour but d'empêcher l'eau et les impuretés extérieures de pénétrer dans le détendeur par l'entrée HP. Ils sont réalisés dans différents matériaux. (Souvent du néoprène) Ils évitent l'entrée de poussières et d'eau dans le premier étage lorsqu'il n'est pas monté sur la bouteille.

Pour cela, les modèles les plus sérieux, en plastique dur, sont munis d'un joint torique. Il faut cependant faire attention de ne pas y enfermer de l'eau. Pour cela, lors du rinçage, il est indispensable qu'il soit en place. Par contre après, il peut être enlevé pour permettre au chlore (en piscine) de s'évaporer.

III-12-3 Les fermetures automatiques

Océanic a mis au point un système de fermeture pneumatique de l'entrée HP du détendeur. Il s'agit en fait d'un clapet aval qui ne s'ouvre que sous l'effet de la pression, dès l'ouverture de la bouteille.

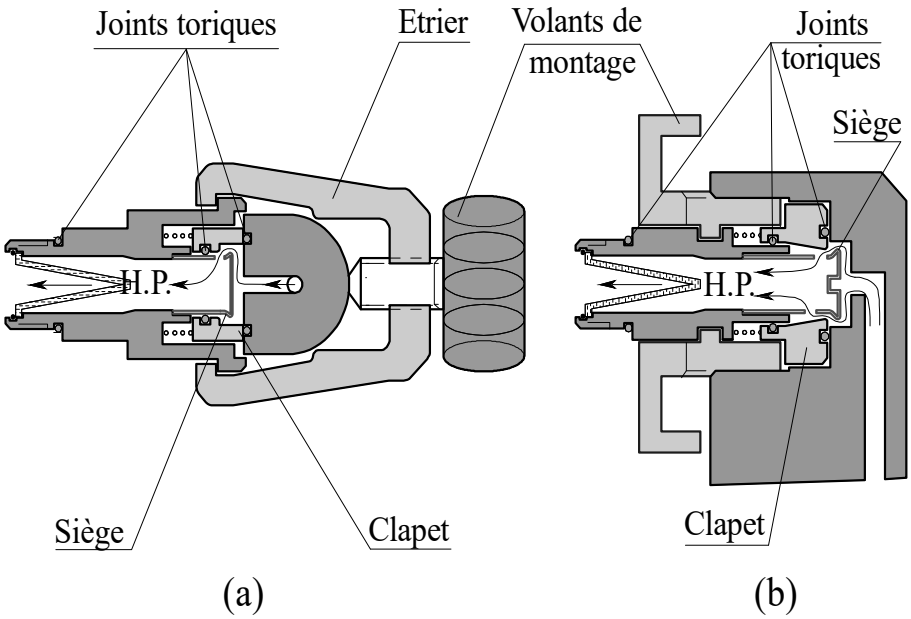


Figure 14 - Raccords "Aqualung" avec fermeture automatique

Au contraire, le système Aqualung est mécanique et s'ouvre lorsque le détendeur est connecté sur la bouteille, même fermée. (Voir la figure 14)

Au repos, repoussé par un ressort, le clapet ferme l'entrée de détendeur empêchant l'entrée d'eau. Lorsque l'étrier ou le raccord DIN est mis en place, la bouteille appuie sur le clapet. Celui-ci s'écarte du siège libérant le passage de l'air.

Ces systèmes n'empêchent pas l'eau qui peut rester dans la sortie de la robinetterie de pénétrer dans le mécanisme. Il est donc toujours recommandé de la purger avant de monter le détendeur.

****

CHAPITRE IV

LES DÉTENDEURS À UN ÉTAGE

IV-1 Généralités

A partir des éléments de base et des principes de fonctionnement décrits ci-dessus, nous pouvons maintenant étudier tous les types de détendeurs que nous trouvons sur le marché. Nous verrons que, dans certains cas, bien que ces principes restent les mêmes, les réalisations et les résultats peuvent être très différents.

Il existe deux principaux types de détendeurs : ceux qui détendent l'air en une seule fois, dits à un étage et ceux qui détendent l'air en deux étapes, dits à deux étages.

Les premiers ne sont plus guère utilisés. Nous les étudierons toutefois dans un but didactique.

IV-2 Détendeur à un étage type " MISTRAL "

(Voir figures 15, 16, 17 et photo 02)

IV-2-1 Caractéristiques de fonctionnement

L'étage unique de ce détendeur est fixé sur la robinetterie de la bouteille. Son schéma et son fonctionnement sont voisins de celui de base, vu précédemment. L'air est détendu directement de la haute pression à la pression ambiante.

Il se caractérise par le fait que l'embout est relié au détendeur par deux tuyaux annelés basse pression, l'un pour l'inspiration, l'autre pour l'expiration. Il en résulte une utilisation très particulière : en effet, d'après les principes exposés au chapitre II, le détendeur fournit de l'air à la pression où se trouve la membrane.

Si l'embout est élevé au-dessus de celle-ci, le tuyau se remplit d'air à une pression de quelques dizaines de millibars au-dessus de celle qui règne au niveau de l'embout et celui-ci se met à fuser.

C'est pour ces raisons que l'extrémité du tuyau d'expiration a été ramenée au niveau de la membrane. De cette façon, lorsque l'embout est en bouche, il n'a pas tendance à fuser et l'effort expiratoire est réduit au minimum.

Inversement, si l'embout se trouve au-dessous de la membrane, la pression dans la chambre sèche est plus faible qu'au niveau de celui-ci et l'effort inspiratoire nécessaire est plus important.

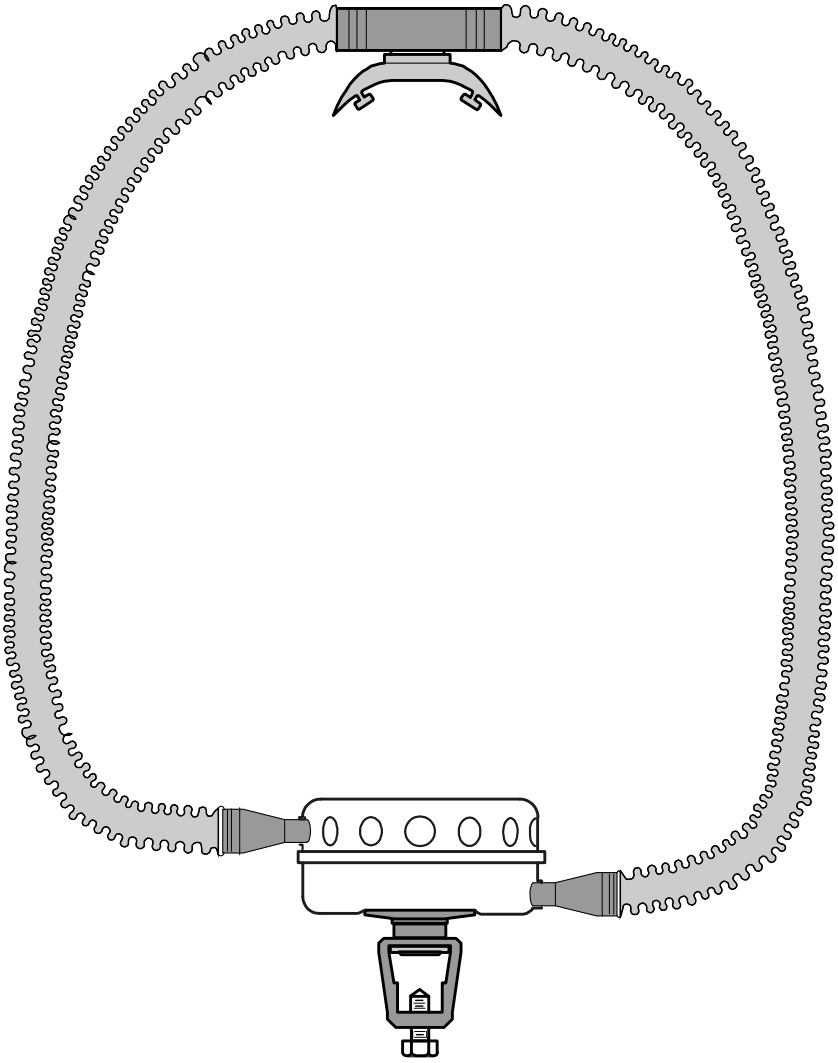


Figure 15 - Le Mistral de la Spirotechnique

Ce tuyau est terminé par une extrémité aplatie, du type "bec de canard", qui joue le rôle de soupape anti-retour. (*Voir figure 11a*)

Dans le modèle "Royal Mistral" (*Voir figure 17*), on remarque au niveau de l'embout un dispositif appelé "Aquastop" avec deux soupapes de non-retour qui fonctionnent alternativement à l'inspiration et à l'expiration.

Au repos, il empêche l'eau de pénétrer dans les tuyaux mais en fonctionnement il empêche surtout de ré inspirer une partie des gaz expirés, en réduisant le volume mort.

IV-2-2 Avantages

Ces détendeurs sont simples et robustes. L'air, en s'échappant dans le dos du plongeur, ne gêne ni sa vue ni son audition. C'est pourquoi, ils ont longtemps été appréciés par les photographes et les archéologues sous-marins.

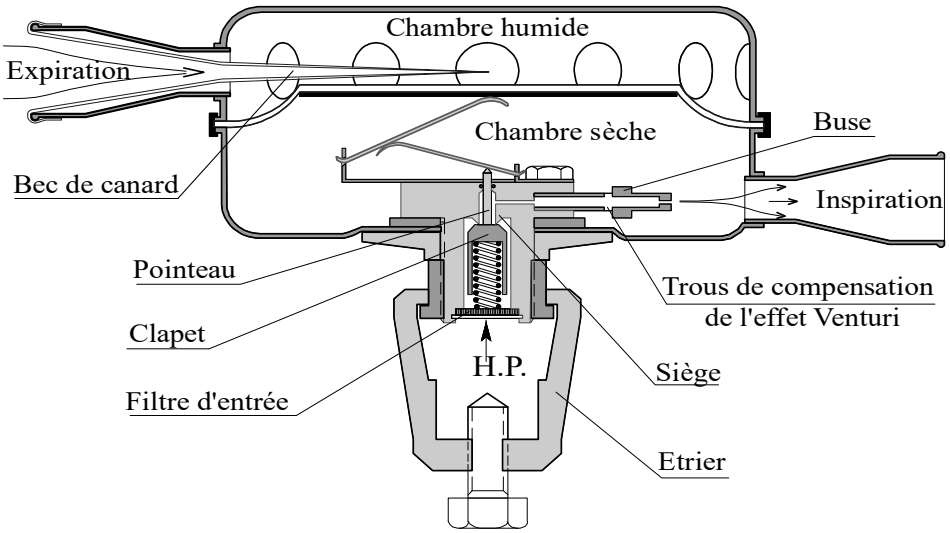


Figure 16 - Le mécanisme de l'ancien "Mistral"

IV-2-3 Inconvénients

- Ils sont peu commodes pour donner ou recevoir de l'air ainsi que pour remplir un parachute.

- En raison de la position relative que doivent occuper la membrane et l'embout, ils nécessitent un entraînement particulier pour effectuer certains exercices.

- Leur seuil d'ouverture varie avec la haute pression. (Voir paragraphe II-3)

- Les tuyaux, basse pression, sont fragiles et relativement exposés à des coupures.

- Les sièges et clapets sont soumis à des pressions très élevées. De ce fait, ils s'endommagent très vite.

- La position du détendeur dans le dos du plongeur est parfaite lorsque celui-ci est en position verticale, par contre, des différences non négligeables de sensibilité apparaissent en position ventrale et surtout dorsale.

- C'est pourquoi, ces détendeurs ont pratiquement disparu. Il faut toutefois leur rendre l'hommage d'avoir été ceux des pionniers de la plongée dans le monde.

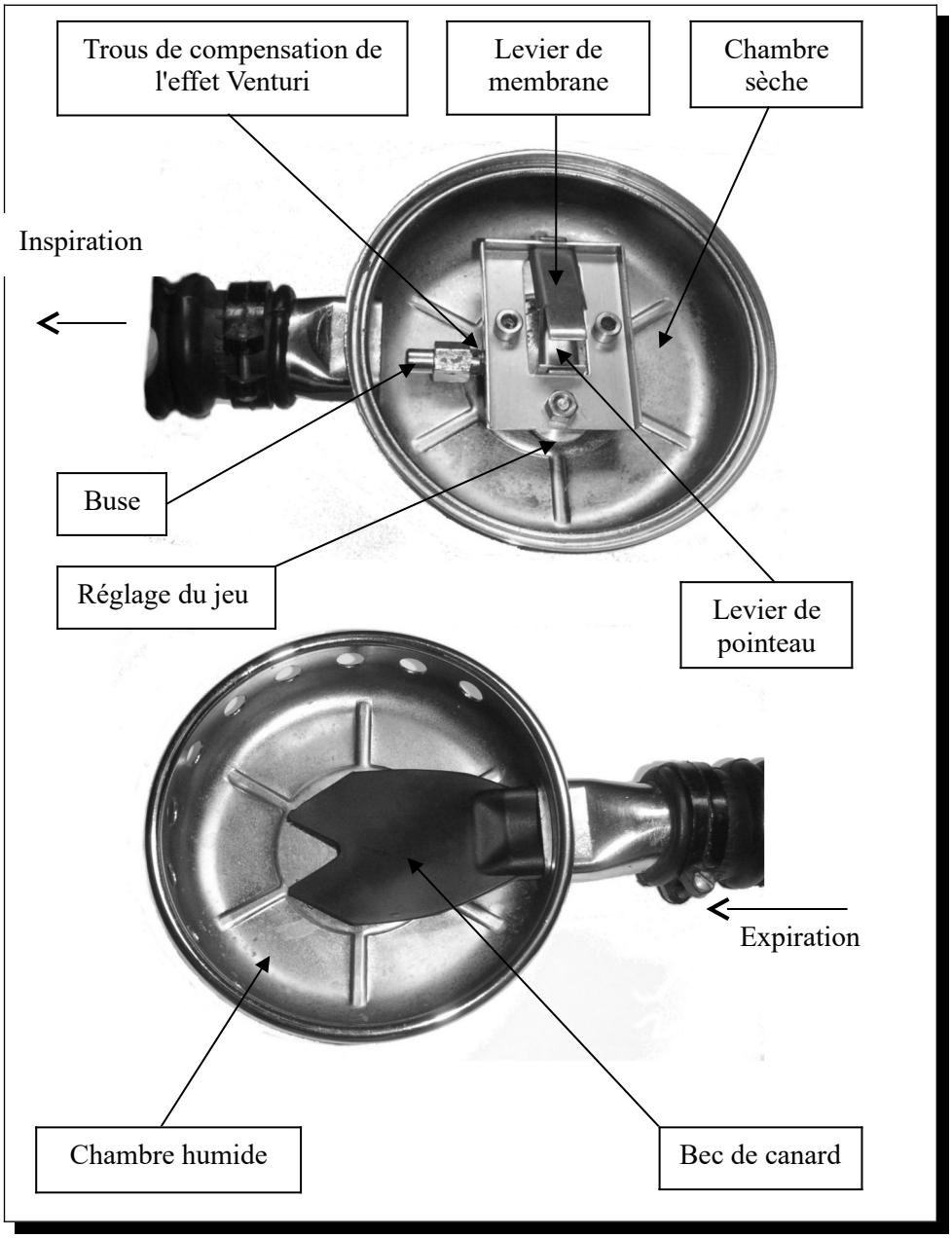


Photo 4 - Mécanisme de l'ancien Mistral

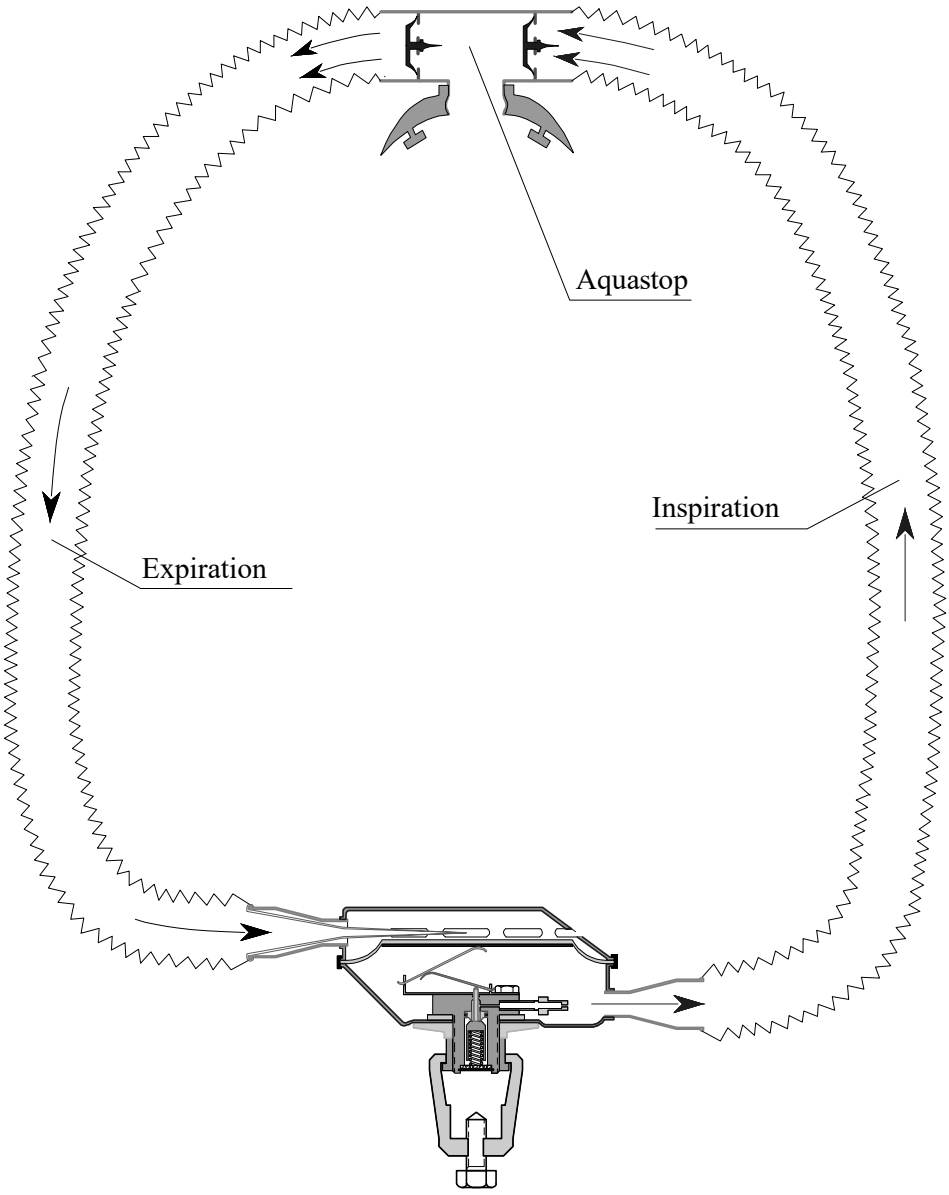


Figure 17 - Le détendeur "Royal Mistral"

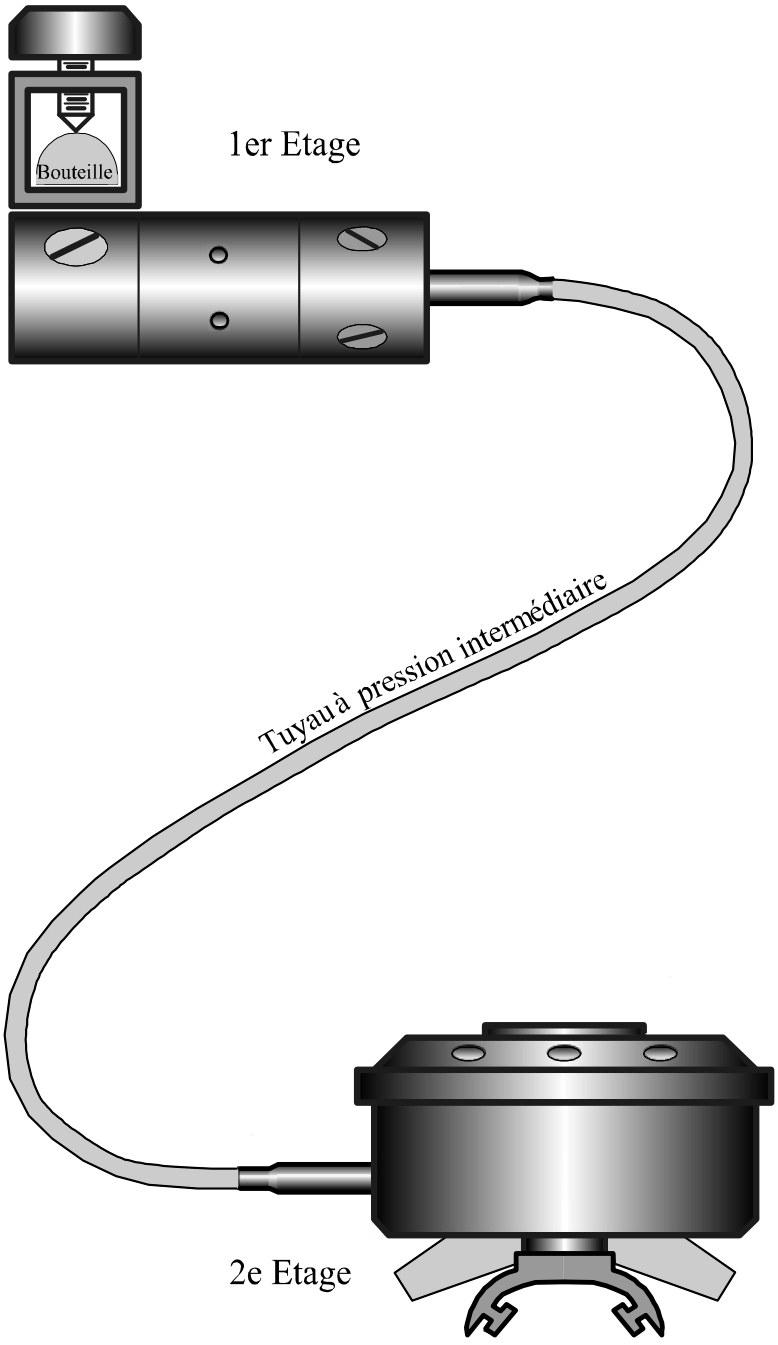


Figure 18 - Détendeur à deux étages

CHAPITRE V

LES DÉTENDEURS À DEUX ÉTAGES

(Le premier détendeur à 2 étages et un seul tuyau a été le "Porpoise" fabriqué par l'australien Ted Elder en 1952 mais il n'a jamais été breveté)

Jean Bronnec et Raymond Gautier, deux centraliens de la promotion 1952 ont déposé un brevet le 26/11/1956 sous le n° 1126597. Il a été commercialisé dès 1960 sous le nom de "Cristal".

Ce type de détendeur est caractérisé par le fait que l'air est détendu en 2 étapes. Un premier étage, fixé sur la robinetterie de la bouteille détend l'air de la haute pression à une pression P qui est supérieure de plusieurs bars à la pression ambiante Pa.

$$P = MP + Pa$$

D'après la norme EN250 on appelle ce premier étage "Réducteur de pression". La Moyenne Pression MP est la partie constante de P tandis que la Pression ambiante Pa en est la partie variable avec la profondeur.

Un deuxième étage, relié au premier par un tuyau souple, détend ensuite l'air à la pression ambiante. Dans la norme, il est appelé "Détendeur à la demande".

Remarques :

1. Le paragraphe 3.3 de la norme EN250 définit ce que nous appelons la Moyenne Pression (MP) comme une "Pression Intermédiaire" relative à la pression ambiante en sortie du deuxième étage.
2. Il faut noter que le très ancien "CG45", dont nous avons parlé en introduction, ainsi que le nouveau Mistral de la société "Aqualung", sont des détendeurs à deux étages regroupés dans un seul boîtier ou en un seul bloc. Ils sont munis de tuyaux annelés. (*Voir la photo N° 05*)

V-1 Le premier étage (Voir figure 19)

C'est un détendeur dont le schéma est voisin de celui du détendeur de base défini au chapitre II. Toutefois, pour obtenir dans la chambre sèche, une pression supérieure de plusieurs bars à la pression ambiante, un ressort taré $\mathbf{r_1}$ est ajouté dans la chambre humide où il vient appuyer sur la membrane. La chambre sèche est alors appelée chambre Moyenne Pression.

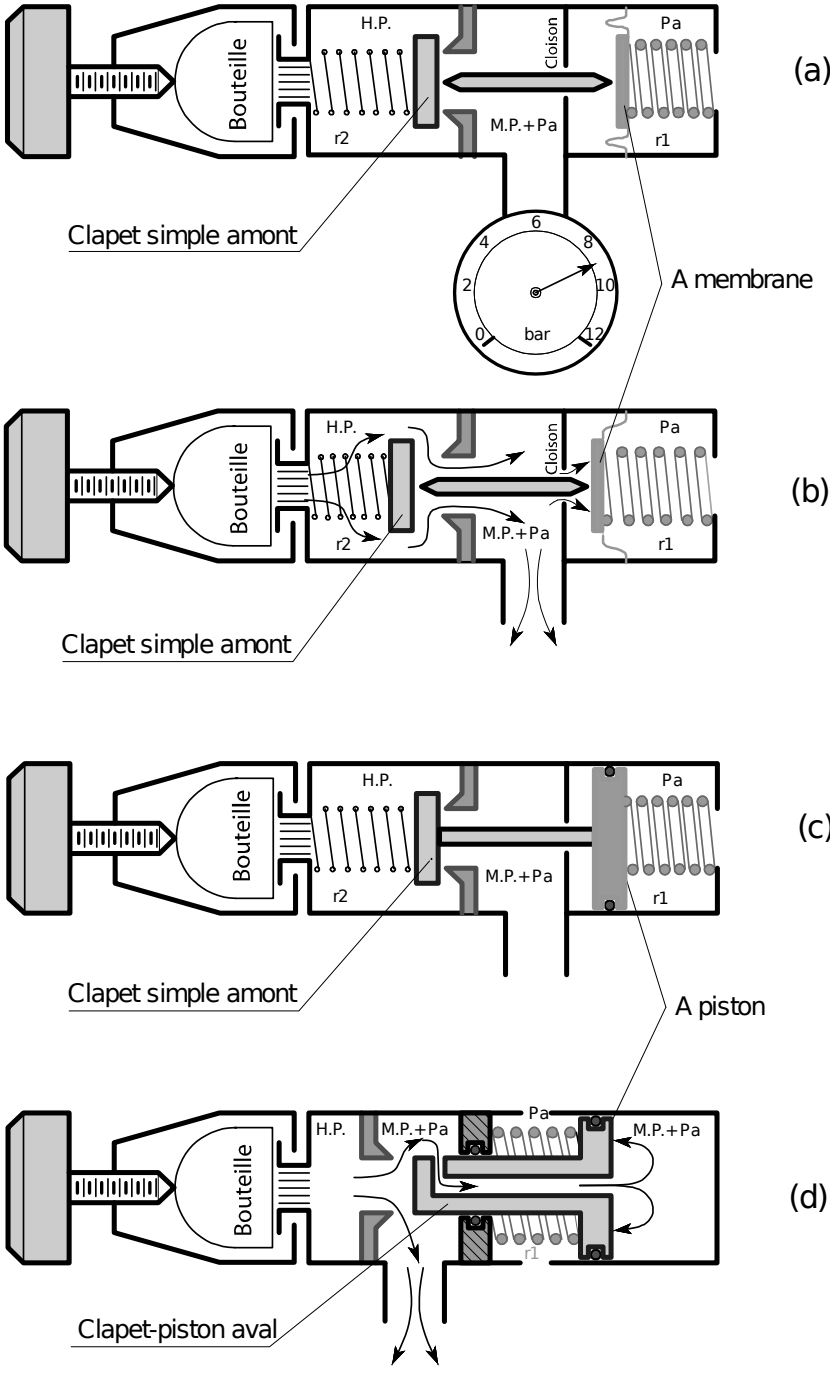


Figure 19- Différents types de premier étage

La cloison dans la chambre moyenne pression évite que le flux d'air ne vienne frapper directement la membrane et ne provoque des instabilités.

Sur ce même principe, des appareils de conceptions très différentes ont été réalisés. Le clapet peut être amont ou aval. La membrane est souvent remplacée par un piston en plastique ou métallique.

On notera chez Beuchat l'intégration de deux 1er étages dans le même boîtier. Ceci permet d'alléger le poids lorsqu'on utilise un détendeur de secours et surtout quand on a qu'une bouteille avec une seule robinetterie. (Voir en VI-6)

V-1-1 Fonctionnement

(Voir la figure 20)

Au repos, bouteille fermée, le gros ressort $\mathbf{r_1}$ appuyant sur la membrane maintient le clapet ouvert. Mettons un manomètre à la sortie MP. Quand nous ouvrons la bouteille, l'air passe dans la chambre MP, où la pression monte jusqu'à ce qu'elle soit suffisante pour comprimer le ressort r_1 à travers la membrane. La HP aidée par le petit ressort $\mathbf{r_2}$ ferme alors le clapet.

Laissons maintenant l'air fuir légèrement par la sortie MP, cette pression va avoir tendance à diminuer, le ressort $\mathbf{r_1}$ va repousser la membrane, le pointeau et le clapet. L'air, haute pression, va pénétrer à nouveau dans la chambre MP jusqu'à obtenir un nouvel équilibre des forces en présence.

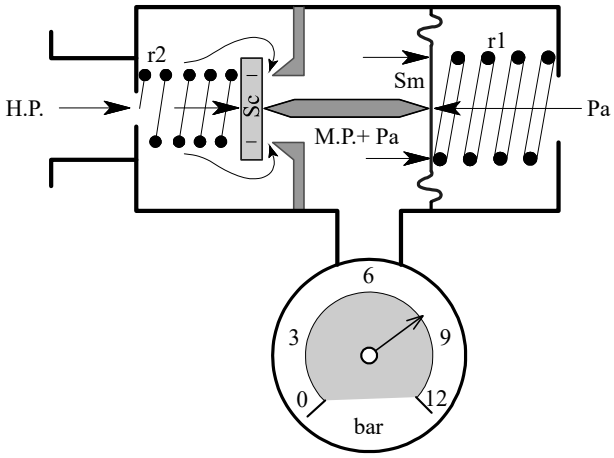


Figure 20 - Éléments pour le calcul d'un premier étage

Si la moyenne pression diminue, le clapet s'ouvre. Si la pression augmente, le clapet se ferme. Il y a donc régulation automatique de la moyenne pression autour d'une valeur qui est fonction des différents éléments du détendeur. (Voir le calcul au paragraphe suivant)

V-1-2 Eléments de calculs

(Voir figure 20)

Ce calcul se fera de la même façon que pour le détendeur de base vu au chapitre II.

Convenons que :

Pa = Pression ambiante ;

MP = Moyenne Pression ;

Fr_1 = Force du ressort r_1 ;

Fr_2 = Force du ressort r_2 ;

HP = Haute Pression ;

Sc = Surface utile du clapet ;

Sm = Surface de la membrane.

Comme ΔPm dans la formule du paragraphe II-3, MP représente ici la différence de pression de part et d'autre de la membrane.

Les forces tendant à fermer le clapet sont :

Fr_2 ; (HP x Sc) ; (MP + Pa) x Sm

Les forces tendant à l'ouvrir sont :

Fr_1 ; (Pa x Sm) ; (MP + Pa) x Sc

À l'équilibre, on peut écrire :

$$Fr_2 + (HP \times Sc) + (MP+Pa) \times Sm = Fr_1 + (Pa \times Sm) + (MP+Pa) \times Sc$$

$$Fr_2 + (HP \times Sc) + (MP \times Sm)+(Pa \times Sm) = Fr_1 + (Pa \times Sm) + (MP \times Sc)+(Pa \times Sc)$$

$$D'où\ l'on\ déduit : MP(Sm - Sc) = (Fr_1 - Fr_2)-(HP - Pa)\ Sc$$

$$Et : MP = \frac{(Fr_1 - Fr_2) - (HP - Pa)Sc}{(Sm - Sc)}$$

En général, Sc est négligeable devant Sm et Pa devant HP.

Si de plus, on convient que $Fr_1 - Fr_2 = Fr$

On en déduit :

$$M.P. = \frac{Fr - (HP \times Sc)}{Sm}$$

C'est l'équation d'un premier étage simple

Remarques sur ce calcul

1. En changeant la force Fr_1 du ressort r_1 il est possible de modifier la valeur de la moyenne pression. Nous verrons que la plupart des premiers étages de détendeur ont un réglage à cette fin.
2. Les défauts de parallélisme entre le plan du clapet et celui de la lèvre, ainsi que la rugosité de celle-ci, sont rattrapés par l'élasticité de la pastille souple du clapet.
3. La pression n'est pas la même en tous les points et pour que l'étanchéité soit assurée, il faut que la MP soit supérieure à celle calculée pour retenir la HP. C'est aussi pour cela qu'un réglage est nécessaire. Un mauvais état du siège ou du clapet se traduit par une augmentation du temps nécessaire à la stabilisation car le passage de l'air ne s'arrête que progressivement.
4. Avec un clapet amont comme ici, lorsque la HP diminue, la MP augmente. Ceci se comprend par la formule mais on peut aussi l'expliquer de la façon suivante : la HP aide à la fermeture du clapet ; Quand elle diminue, pour le nouvel équilibre, il faut donc davantage de MP pour le refermer.
5. Par contre, avec un clapet aval, le calcul ou le raisonnement montre à l'inverse que la MP diminue quand la HP diminue. Dans les deux cas, la valeur de la Haute Pression influe sur la moyenne pression, entraînant des variations dans les performances du 2^e étage.
6. La moyenne pression dépend des détendeurs, elle est généralement de l'ordre de 9 bars, mais peut varier de 5 à 30 bars, suivant les modèles.
7. Dans la formule du paragraphe II-3, ΔPm est négatif par rapport à la pression ambiante puisqu'il s'agit d'une dépression. Par contre, ici, la MP est positive, toujours par rapport à la pression ambiante.
8. En stockage, le clapet reste ouvert ce qui évite le marquage du siège.
9. On fera bien attention de ne pas confondre la pression "P", qui est la moyenne pression dans la chambre sèche, avec la pression ambiante "Pa" qui varie avec la profondeur ou avec la moyenne pression "MP" qui, en théorie, est indépendante de la pression ambiante donc de la profondeur.

Nous rappelons que : (P = MP + Pa)

10. La Moyenne Pression est relative à l'ambiante. Si on l'additionne à une pression relative elle reste une pression relative, si on l'additionne à une pression absolue, le résultat est une pression absolue.
11. Lorsqu'on effectue des calculs, il faut s’assurer que les équations utilisées soient homogènes c'est à dire qu'il ne faut pas mélanger indûment les unités. (Bien que cela dépende du contexte, on évitera de mélanger des choux et des carottes)

V-2 Le deuxième étage

(*Voir figure 21*)

V-2-1 Description

Le schéma d'un tel étage pourrait être le même que celui du détendeur de base du chapitre II mais, l'utilisation d'un clapet amont peut s'avérer dangereuse. En effet, en cas de fuite du premier étage, rien ne vient limiter la pression dans le tuyau qui risque donc d'exploser.

Il est certes possible d'utiliser une soupape de sûreté, ceci se fait chez Poseidon. Mais la solution généralement retenue consiste plutôt à utiliser un clapet aval qui joue automatiquement ce rôle. (Si la MP augmente, il a tendance à s'ouvrir)

La buse est souvent remplacée par un déflecteur. La compensation de l'effet Venturi se fait par un ou plusieurs orifices ou encore par un volet judicieusement placé sur le trajet de l'air.

On trouve certains modèles où le levier est inversé. (Voir figure 23a) D'autres ont le boîtier déporté sur le côté, de façon à donner une symétrie au détendeur, ce qui permet de l'utiliser aussi bien à droite qu'à gauche et surtout de donner facilement de l'air à un équipier se trouvant en face. (Voir figure 23b)

Le système d'expiration est généralement celui de la membrane circulaire. (Voir figure 11b)

Ces détendeurs sont toujours équipés d'un bouton de surpression permettant d'appuyer directement sur la membrane d'inspiration et de provoquer ainsi un débit continu. Ceci permet de purger le détendeur avant son démontage de la bouteille, d'éliminer l'eau, les impuretés et de gonfler un parachute.

V-2-2 Fonctionnement

(Voir figure 21)

Lorsque le plongeur inspire dans la chambre sèche, la membrane (**m**) s'abaisse, appuie sur le levier (**l**), ce qui modifie la direction du mouvement et tire sur le clapet (**c**) en comprimant le ressort (**r**).

L'air jaillit alors, en partie par un orifice principal dirigé vers l'embout (**a**) et en partie par un ou plusieurs petits orifices (**o**) pour la compensation de l'effet Venturi.

Lorsque le plongeur n'inspire plus, la membrane d'inspiration remonte et le ressort de rappel referme le clapet. Lorsqu'il expire, la soupape d'expiration (**e**) s'écarte pour laisser échapper l'air vers l'extérieur.

Lorsque le plongeur appuie sur le bouton de surpression, le clapet s'écarte de son siège. L'air jaillit alors par l'embout.

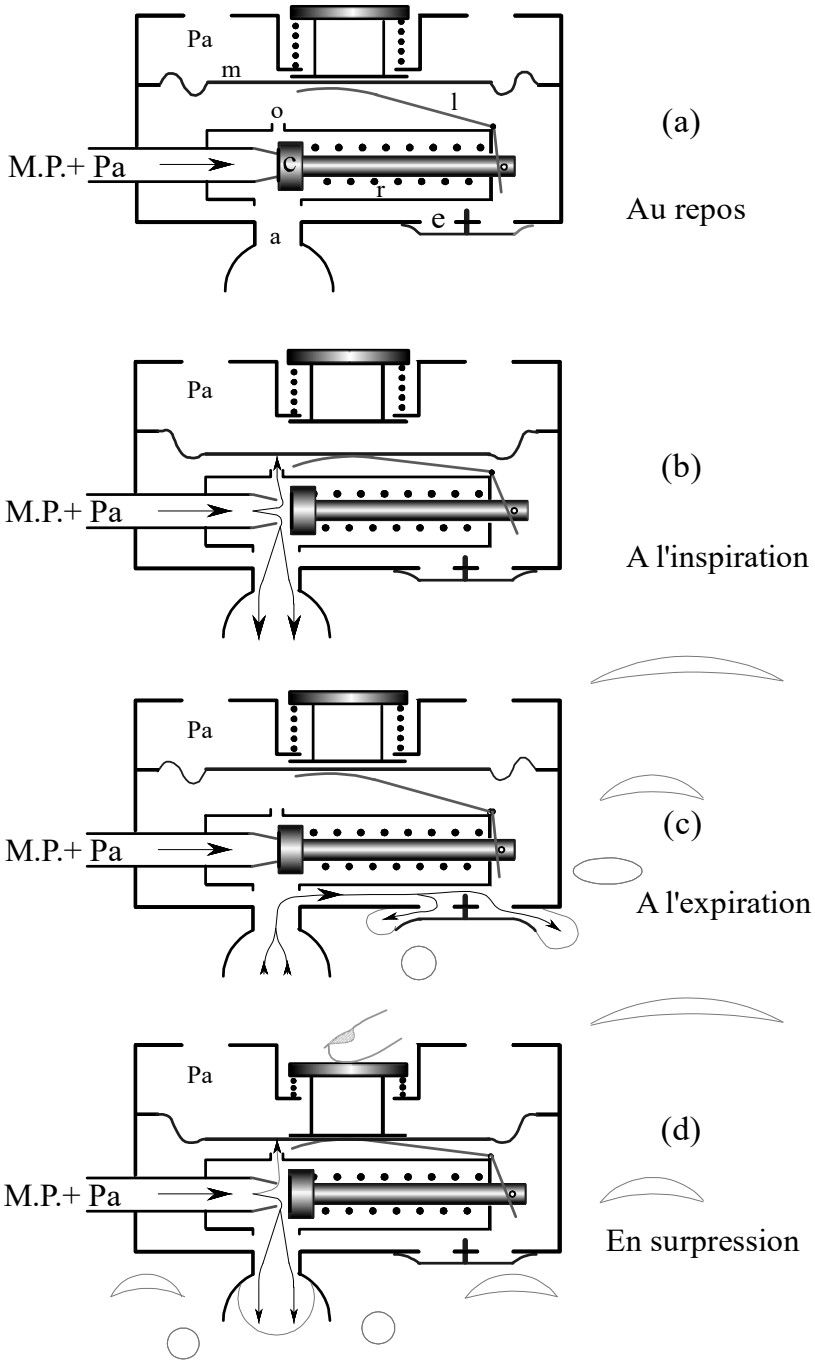


Figure 21 - Le deuxième étage

V-2-3 Éléments de calcul

(Voir figure 22)

Les forces en présence sont :

Celles qui tendent à fermer le clapet

- Force du ressort de rappel : ***Fr***

- Force due à l'action de la pression sur la surface interne de la membrane multipliée par le rapport K du levier : ***(Pa - ΔPm) x Sm x K***

-Force due à l'action de la pression sur la surface aval du clapet :

(Pa - ΔPm) x Sc

Celles qui tendent à ouvrir le clapet :

- Force due à la pression sur la surface externe de la membrane multipliée par le rapport K du levier : ***Pa x Sm x K***

- Force due à l'action de la pression sur la surface amont du clapet :

(Pa + MP) x Sc

À l'équilibre, on peut écrire :

$Fr + (Pa - \Delta Pm) \times Sm \times K + (Pa - \Delta Pm) \times Sc =$

$Pa \times Sm \times K + (Pa + MP) \times Sc$

En développant et en simplifiant :

$\Delta Pm(K \times Sm + Sc) = Fr - (MP \times Sc)$

En fait comme Sc est toujours négligeable devant K x Sm.

On en déduit :

$$\Delta Pm \cong \frac{Fr - (MP x Sc)}{Sm} x \frac{1}{K}$$

<u>ΔPm est le seuil d'ouverture du détendeur.</u>

Remarques :

1. Cette formule est très voisine de celle du détendeur de base à un étage (Voir formule au paragraphe II-3) ou HP est remplacé par MP. La différence essentielle, celle du signe négatif de (MP x Sc) tient au fait que le clapet utilisé est du type aval. La moyenne pression a tendance à l'ouvrir et non à le fermer comme c'est le cas pour la H.P sur le clapet amont du détendeur à un seul étage.

2. Dans le détendeur à un étage le seuil varie avec la HP, ici il varie avec la MP, mais en sens inverse toujours parce que le clapet est du type aval.
3. Pour obtenir un seuil indépendant des pressions mises en jeu, il est possible soit de rendre la MP indépendante de la HP soit de rendre le deuxième étage insensible aux variations de la MP

   Nous verrons dans le prochain chapitre que les deux méthodes peuvent être utilisées séparément ou conjointement.

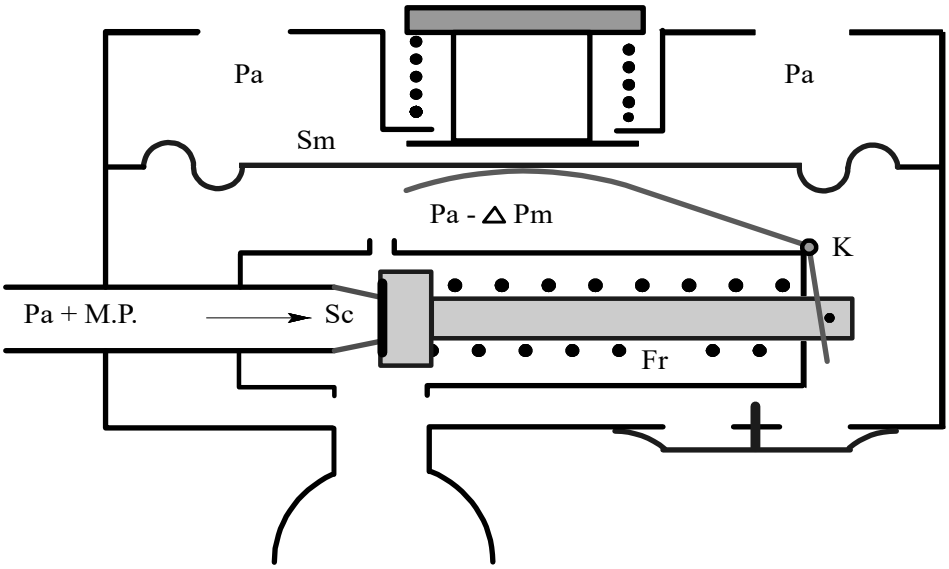
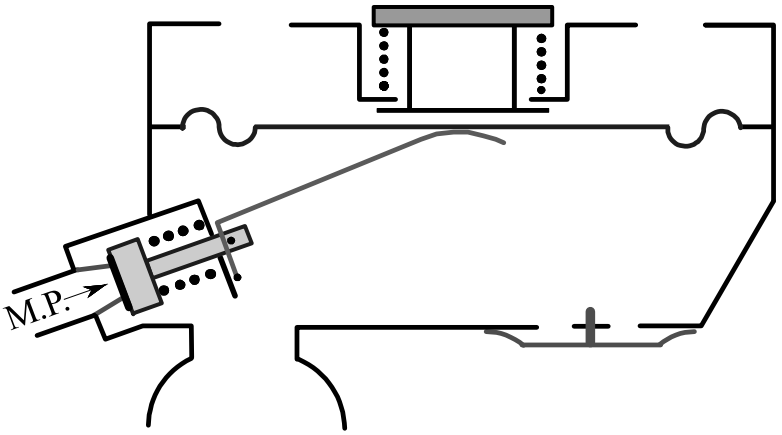


Figure 22 - Éléments pour le calcul d'un deuxième étage

4. Le tuyau entre les deux détendeurs contient une certaine quantité d'air qui constitue un réservoir tampon entre les deux étages. Si le tuyau a un diamètre interne de 0,5 cm, une longueur de 76 cm et que la moyenne pression est de l'ordre de 10 bars, il contient environ 1,5 litres d'air.

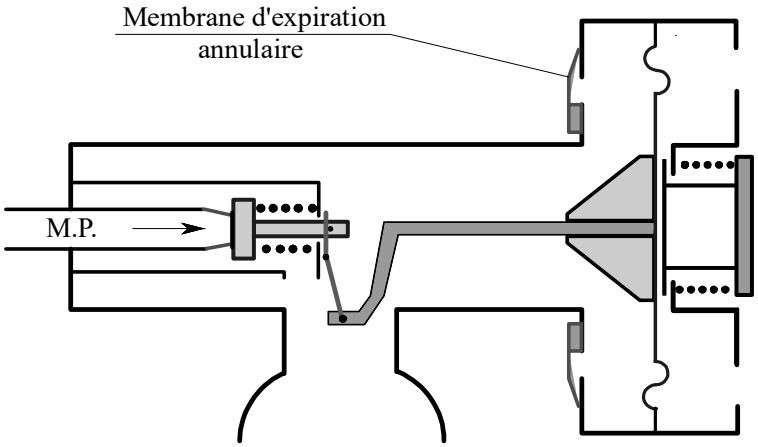
   Ceci présente l'avantage de tolérer un certain retard dans l'ouverture du premier étage. Par contre, lorsqu'on essaie le détendeur avant de s'immerger, il est préférable d'effectuer plusieurs inspirations pour être sûr que la bouteille est bien ouverte.

   La tendance actuelle est d'augmenter le diamètre du tuyau Moyenne Pression pour réduire les pertes de charges. Ceci, comme nous l'avons déjà vu, a tout de même l'inconvénient, sous l'effet de la pression, d'en réduire la souplesse.



(a)

Levier inversé



(b)

Membrane d'inspiration sur le c ôté

Figure 23 - Différents deuxièmes étages

V-3 Association de premiers et deuxièmes étages disparates

Il est théoriquement possible d'associer différents types de premiers et de seconds étages qui à l'origine n'étaient pas prévus pour cela. Cependant beaucoup de paramètres doivent être pris en compte, tels que la valeur de la MP ou sa stabilité, la tenue en température et le débit maximum.

Ces paramètres ne sont pas toujours connus ou mesurables, il convient donc d'être très prudent.

La norme européenne EN250 prévoit que c'est l'ensemble scaphandre : détendeur 1er et 2e étage, associés à une robinetterie et à une bouteille qui est testé. On ne peut donc commercialiser dans la Communauté Européenne un scaphandre avec des éléments hétéroclites, sans passer par un test de qualification.

V-4 Le narguilé

C'est un dispositif surtout utilisé en plongée professionnelle. La moyenne pression est produite en surface ou dans une tourelle de plongée, à partir d'un compresseur ou de bouteilles tampons.

Le plongeur emporte le second étage à l'extrémité d'un tuyau souple de grande longueur lui permettant de se déplacer. Il reste ainsi relié à la surface.

Ce système permet de disposer d'une grande autonomie en air. Pour pallier d'une part, la perte de charge dans le tuyau et d'autre part, la différence de pression indispensable entre les deux étages, il est nécessaire de disposer d'une MP importante et surtout ajustable en fonction de la profondeur.

À cette fin, un préposé doit en permanence régler cette MP. Il dispose pour cela d'une liaison acoustique ou téléphonique avec le plongeur. Il peut aussi utiliser un appareil très simple, appelé "Bulleur", qui lui indique en permanence la pression nécessaire.

Pour que le plongeur puisse évoluer verticalement, dans certaines limites, le narguilé doit posséder un 2e étage compensé et un clapet anti-retour.

En plongée loisir, le narguilé est de plus en plus utilisé pour effectuer des décompressions au nitrox ou à l'oxygène pur. Dans ce cas, le plongeur se rend à la profondeur déterminée à l'avance où il trouve un ou plusieurs seconds étages correctement alimentés.

V-5 Autre approche du fonctionnement d'un détendeur à 2 étages

1) Pour que le plongeur puisse respirer sans effort, il faut qu'à la sortie du 2e étage, la pression soit égale à la pression ambiante (Pa)
2) Pour que ce 2e étage fonctionne correctement, il lui faut une pression supplémentaire que l'on appelle moyenne pression (MP)

3) À la sortie du 1er étage, il faut donc disposer d'une pression égale à MP+Pa.
Pour fournir la MP, un ressort de force Fr appuie sur la membrane de surface Sm.
Pour y ajouter la Pa, on l'applique sur la membrane dans la même chambre humide que le ressort.
Cette pression MP+Pa a tendance à ouvrir le clapet.

4) Quand celui-ci s'ouvre, la pression à la sortie de ce 1er étage augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur égale à MP+Pa qui s'appuyant en sens inverse referme le clapet.
5) Il y a alors équilibre des forces ayant tendance à ouvrir et à fermer le clapet.
6) Toute diminution de cette pression de sortie entraîne une ouverture du clapet et le cycle recommence.
On peut montrer que dans un 1er étage, d'autres paramètres interviennent dans le fonctionnement comme la différence de surface de chaque coté d'un piston, la dureté de la membrane, les frottements des joints etc.
Cela est parfois négligeable ou négligé dans l'explication du fonctionnement.

****

Photo 5 - Le nouveau MISTRAL

(Deux étages en un seul bloc et surtout des tuyaux annelés)

Premier étage compensé par chambre de compensation

CHAPITRE VI

LES DÉTENDEURS COMPENSÉS

Avec ce chapitre, nous abordons les amélioration apportées au fil du temps aux performances des détendeurs. La compensation a fait l'objet de nombreuses recherches de la part des fabricants. Différentes solutions ont été expérimentées. Certaines abandonnées et quelquefois reprises.

Nous avons vu précédemment que les performances d'un 1er étage varient, avec la haute pression (HP), celles d'un 2e étage varient avec la moyenne pression (MP) et pour les deux étages, elles varient avec la pression ambiante (Pa). Il est possible d'éviter ces inconvénients de plusieurs façons.

VI-1 Compensation manuelle

Elle consiste à utiliser des réglages accessibles par le plongeur pour qu'il puisse à tout moment ajuster au mieux les performances de son détendeur. On peut considérer qu'il s'agit alors d'une compensation manuelle des effets des différentes variations de pression.

VI-1-1 Au premier étage

Le réglage de la moyenne pression au niveau du premier étage permet de régler le seuil du deuxième étage. Malheureusement, ceci conditionne aussi le débit maximum de l'ensemble.

Il est donc risqué de le laisser à la disposition du plongeur, même hors de l'eau. Heureusement, il est en général difficilement accessible.

VI-1-2 Au deuxième étage

Le seuil du deuxième étage et sa sensibilité peuvent être ajustés grâce à un bouton de réglage modifiant la force du ressort de rappel R.

(Voir figure 24)

Cependant, la manœuvre fréquente de ce bouton peut s'avérer contraignante, surtout en eau froide. En outre, un tel réglage est très subjectif. De plus ce réglage doit-être limité pour qu'en aucun cas on puisse fermer complètement le clapet ou passer en débit continu.

Remarques :

1. Ce réglage permet de compenser les différences entre la pression qui règne au niveau des lèvres du plongeur et de ses poumons. (Par exemple tête en haut ou tête en bas)
2. Le régler au plus dur ne fait pas économiser de l'air. Au contraire, cela augmente le travail respiratoire ce qui augmente le besoin en air.
3. En stockage, il est préférable de desserrer ce réglage au maximum pour limiter le marquage du clapet.
4. Lors du rinçage, il est souhaitable de le faire sous pression. Sans la pression, il faut serrer ce réglage pour éviter les entrées d'eau dans le tuyau.

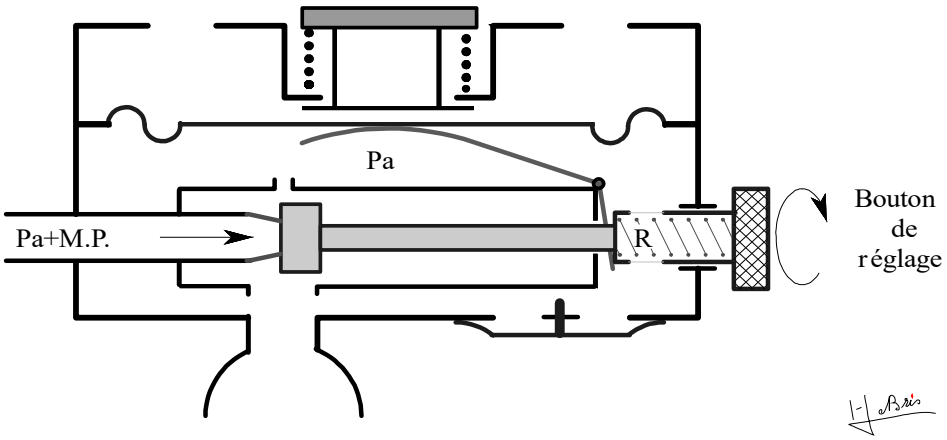


Figure 24 - Réglage manuel

VI-2 Compensation automatique

De nombreux détendeurs récents possèdent au deuxième étage un réglage manuel du seuil pour compenser les effets de la variation de profondeur. Au premier et/ou au deuxième étage, ils possèdent, en plus, une compensation automatique pour éviter les effets des variations de la MP.

La méthode de compensation automatique la plus simple consiste à opposer à la force variable qui s'exerce sur un clapet, une force égale mais opposée. Nous avons vu que la pression avait tendance à fermer un clapet amont et à ouvrir un clapet aval.

Il suffit donc, théoriquement, d'utiliser simultanément ces deux types de clapets, réunis entre eux, pour obtenir la compensation désirée. Si les surfaces utiles des clapets sont égales, les forces opposées s'annulent et un effort faible suffit pour ouvrir ou fermer les clapets quelle que soit la pression en amont.

On obtient ainsi un clapet amont et un clapet aval se compensant réciproquement.

On notera que les surfaces vues par la HP aussi bien que par la MP sont égales. (Voir Figure 25a) Ce montage, à 2 clapets, n'est cependant pas utilisé car il nécessite un usinage très précis pour éviter les fuites.

VI-3 Compensation par piston

VI-3-1 Au premier étage

Du schéma de la figure 25a, on a dérivé ceux des figures 25b et 25c ou l'un des clapets est remplacé par un piston. Suivant le cas, on obtient un "Clapet amont compensé par piston" (figure 25b) ou un "Clapet aval compensé par piston". (figures 25c et d)

Ne pas confondre ce piston "de compensation" avec celui des figures 19c et d, où le rôle du piston est de remplacer la membrane.

Ce type de compensation est surtout utilisé dans le premier étage des détendeurs. Exemple : Le déjà ancien "Aquilon" de la "Spirotechnique" auquel correspond la figure 25b que nous utilisons, à titre d'exemple, dans les calculs qui suivent.

Les forces dues à la HP et à la pression (MP + Pa), sur le clapet, sont égales et s'annulent.

Il reste donc :

- La force (MP + Pa) x Sm qui a tendance à fermer le clapet ;
- La force Fr du ressort qui a tendance à l'ouvrir
- La force (Pa x Sm) qui a tendance à l'ouvrir.

À l'équilibre : (MP x Sm) + (Pa x Sm) = (Pa x Sm) + Fr

Il en résulte que :

$$MP = \frac{Fr}{Sm}$$

(C'est la formule de base d'un détendeur compensé)

Le calcul est développé d'une façon plus complète dans l'encadré suivant. Voir la figure 25b où la sortie fermée par une croix signifie que le détendeur ne débite pas.

VI-3-2 Calcul de la Moyenne Pression

(Pour ceux qui aiment les math.)

Les forces en présence sont :

- Celles tendant à fermer le clapet :

Fr_2 ; $(HP \times Sc)$; $(MP + Pa) \times Sm$; $(MP + Pa) \times Sp)$

- Celles tendant à l'ouvrir :

Fr_1 ; $(HP \times Sp)$; $(Pa \times Sm)$; $(MP + Pa) \times Sc$

- À l'équilibre, on peut écrire :

$$Fr_2 + (HP \times Sc) + (MP + Pa)Sm + (MP + Pa)Sp = Fr_1 + (HP \times Sp) + (Pa \times Sm) + (MP + Pa)Sc$$

Ce qui donne :

$$(MP + Pa)(Sm + Sp - Sc) = (Fr_1 - Fr_2) + HP(Sp - Sc) + (Pa \times Sm)$$

D'ou

$$MP + Pa = \frac{(Fr_1 - Fr_2) + HP(Sp - Sc) + (Pa \times Sm)}{(Sm + Sp - Sc)}$$

et

$$MP = \frac{(Fr_1 - Fr_2) + HP(Sp - Sc) + (Pa \times Sm) - (Pa \times Sm) - (Pa \times Sp) + (Pa \times Sc)}{(Sm + Sp - Sc)}$$

On en tire la formule générale :

$$MP = \frac{(Fr_1 - Fr_2) + (HP - Pa)(Sp - Sc)}{(Sm + Sp - Sc)}$$

Si Sp= Sc et que, pour condenser, nous convenons que $(Fr_1 - Fr_2) = Fr$

La formule devient comme précédemment :

$$\mathbf{MP = \frac{Fr}{Sm}}$$

Le ressort r2 de la figure 25b se justifie de 2 façons. Un clapet parfaitement compensé ne se refermerait pas de lui-même. De plus, toujours s'il est parfaitement compensé aucune pression n'existe entre le siège et le clapet. Pour ramener le clapet et obtenir une bonne étanchéité, il faut donc une certaine force obtenue par ce ressort.

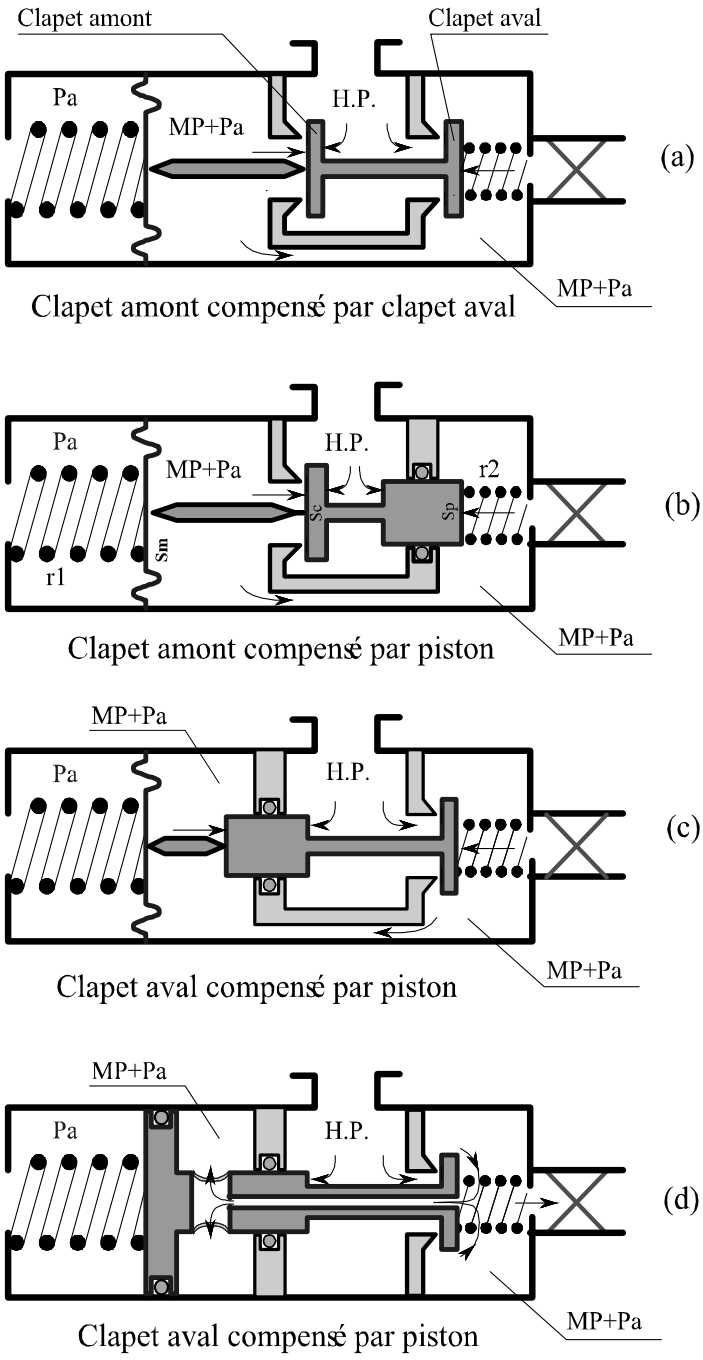


Figure 25 - Compensation par clapet ou par piston

VI-3-3 Au deuxième étage

On rencontre aussi ce système de clapet aval compensé par piston au second étage chez Scubapro. On remarque aussi les 2 membranes concentriques.

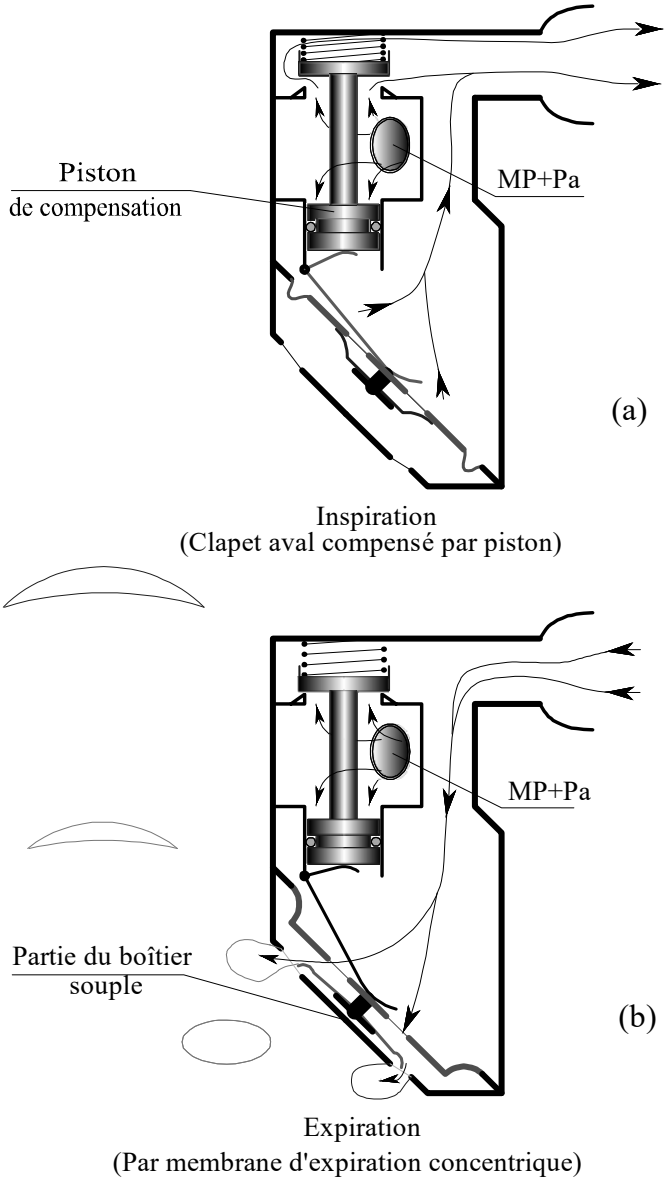


Figure 26 - Deuxième étage Scubapro

Il faut noter que lors de l'ouverture une dépression se produit au niveau du clapet mais pas au niveau du piston. Ceci fait qu'il n'y a pas compensation parfaite en fonctionnement dynamique. (Revoir l'Effet Venturi)

VI-4 Compensation par chambre de compensation

Une autre version du même principe consiste à introduire la MP, à travers l'axe du clapet, dans une chambre dite de compensation où elle exerce une force égale et opposée à celle reçue par le clapet. Le clapet est ainsi compensé aussi bien en position fermée qu'en position ouverte.

On notera que chez Apeks, la chambre de compensation est alimentée par un conduit latéral, comme représenté plus loin dans la Photo 22. La pression de compensation est ainsi prélevée à la sortie MP, à l'endroit précis où l'on veut obtenir la compensation.

Par contre, on constate que ces chambres de compensation créent des espaces confinés dans lesquels peuvent s'accumuler des dépôts pouvant nuire au fonctionnement.

VI-4-1 Au premier étage (Voir figure 27)

Lorsque le premier étage est immergé sans protection, de l'eau peut polluer la chambre HP, la chambre de compensation et même atteindre le 2e étage.

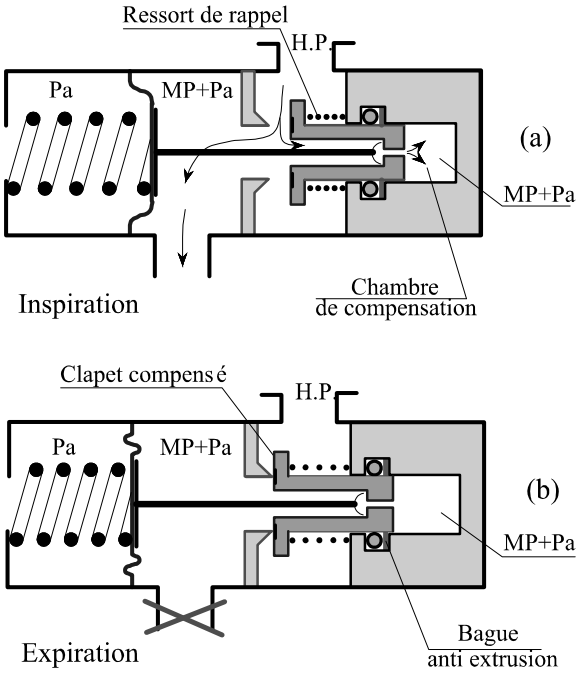


Figure 27 - Premier étage à chambre de compensation

Les systèmes de fermeture automatique de la chambre HP ne répondent que partiellement à ce problème. (Voir en III-12-3) Si de l'eau se trouve à la sortie de la robinetterie, ce système ne l'empêche pas de pénétrer dans le détendeur.

VI-4-2 Au deuxième étage (Voir figure 28)

Lorsque le clapet est ouvert, l'eau peut aussi pénétrer dans la chambre de compensation et même remonter jusqu'au premier étage.

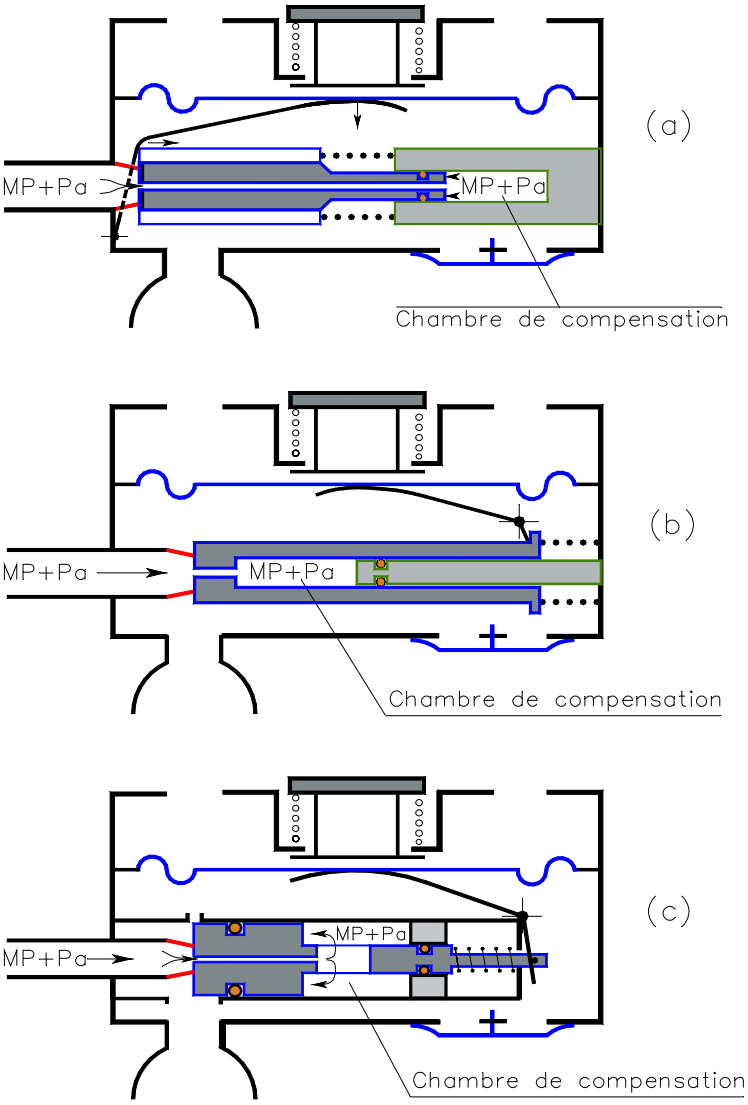


Figure 28 - Deuxième étage à chambre de compensation

La figure 28 montre différentes chambres de compensation au 2e étage. En (a) Aqualung et Scubapro et en (c) l'ancien détendeur Atmos de chez Beuchat qui fut l'un des premiers détendeurs à chambre de compensation.

Seuil du 2e étage

Un calcul similaire à celui du premier étage, en remplaçant MP par ΔPm, HP par PM et en supprimant Fr_2, dans la formule de VI-3-2 montre que le seuil d'ouverture du 2e étage dépend de la différence de surface (Sc – Sp) entre le clapet et le piston de la chambre de compensation et bien entendu, de la force du ressort de rappel.

VI-5 Compensation par siège mobile (Voir figure 29, 30 et 31)

VI-5-1 Au premier étage

Ce type de compensation a été utilisé par Sherwood avec un clapet aval. Aujourd'hui il est repris par Poséidon, avec un clapet amont, dans le premier étage du fameux détendeur "XStream".

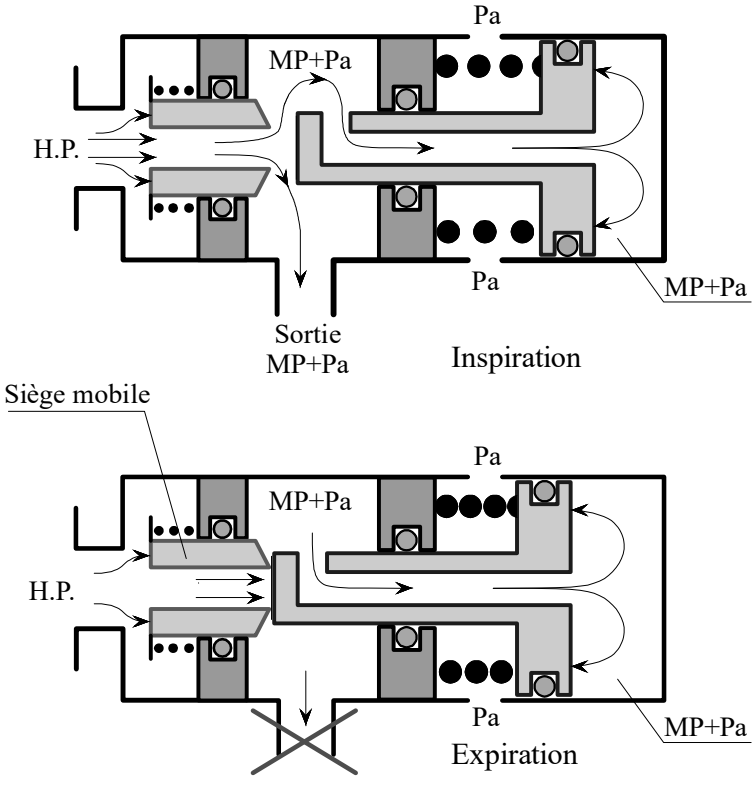


Figure 29 - Siège mobile à clapet aval

Le principe consiste à déplacer le siège du détendeur en fonction de la HP. Dans un tel détendeur, l'action des forces dues aux pressions sur le siège et le clapet s'opposent et s'annulent si les surfaces sont égales.

Sur un clapet amont, la HP a tendance à fermer le clapet. Sur le siège mobile, elle a tendance à l'ouvrir. Sur un clapet aval, c'est l'inverse.

VI-5-2 Calcul de la Moyenne Pression

*(*Voir *Le langage des plongeurs* Exemple 7*)*

Dans le schéma de principe de la figure 30, appelons :

- Pa : la pression ambiante ;
- HP : la Haute Pression ;
- Fr_1 : le ressort principal ;
- Fr_2 : le ressort de rappel du siège ;
- Fr_3 : ressort de rappel ; (Il sera négligé dans les calculs)
- Sm : la surface de la membrane principale ;
- Sc : la surface que ferme le clapet ;
- Ss : la surface de la couronne sur laquelle s'applique la HP.

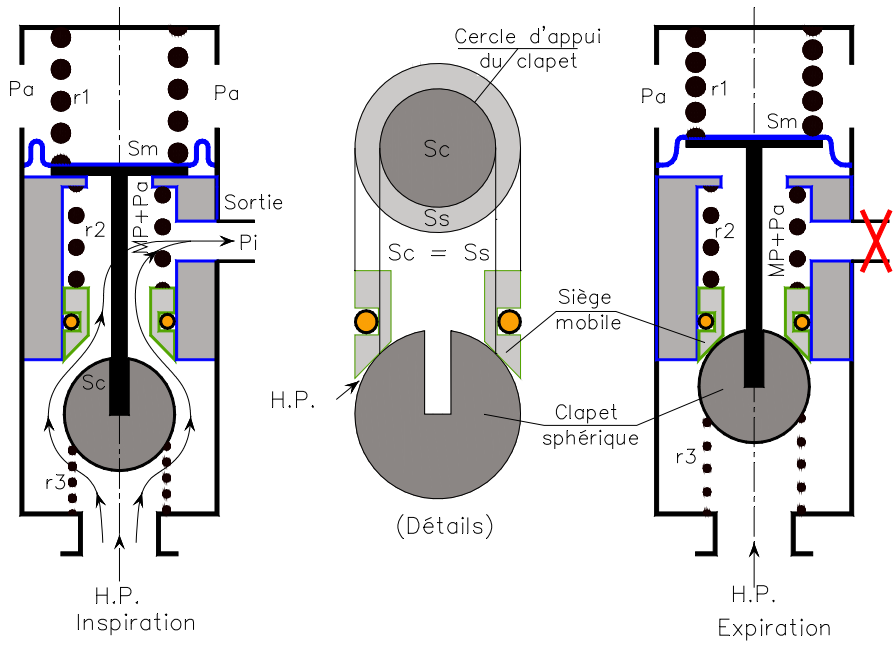


Figure 30- Siège mobile à clapet amont

Si la surface utile du clapet est égale à celle de la couronne formée par le siège, les forces qui s'y exercent sont égales et opposées. Les forces restant en jeu sont alors : celle due au ressort principal (Fr1) et celle due à l'action de la MP sur la membrane. (MP x Sm)

Il en résulte que :

$$MP = \frac{Fr}{Sm}$$

Ce calcul est développé ci–dessous d'une façon plus complète.

Calcul de la Moyenne Pression

Forces qui ont tendance à fermer le clapet :
Fr_2 ; $(MP + Pa)(Sm + Ss)$; $(HP \times Sc)$

Forces qui ont tendance à ouvrir le clapet :
Fr_1 ; $(Pa \times Sm)$; $(HP \times Ss)$; $(MP + Pa) \times Sc$

À l'équilibre :

$$Fr_2 + (MP + Pa)(Sm + Ss) + (HP \times Sc) = Fr_1 + (Pa \times Sm) + (HP \times Ss) + (MP + Pa) \times Sc$$

$$Ou : (MP+Pa)(Sm + Ss – Sc)=(Fr_1 – Fr_2)+ (Pa \times Sm)+ HP(Ss – Sc)$$

Les forces des ressorts se retranchent, nous pouvons donc convenir qu'il n'y a qu'un seul ressort tel que : $Fr = (Fr_1 – Fr_2)$

$$D'où : MP = \frac{Fr+(Pa \times Sm) - (Pa \times Sm)+Pa(Sc - Ss)+ HP(Ss - Sc}{(Sm + Ss - Sc)}$$

$$En\ simplifiant : MP = \frac{Fr+(Pa - HP)(Sc - Ss)}{(Sm + Ss - Sc)}$$

Et, quand les surfaces Sc et Ss sont égales, on obtient à nouveau :

$$MP = \frac{Fr}{Sm}$$

Comme on peut le voir figure 31, le premier étage du "Xstream" présente la particularité d'utiliser un clapet sphérique. (Voir § III-1-2)

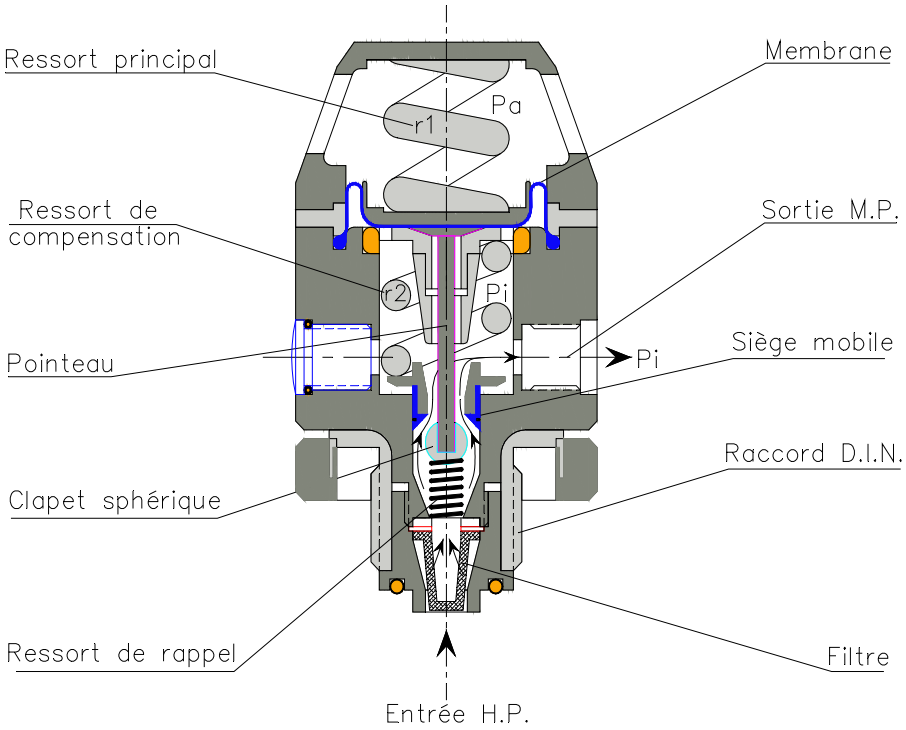


Figure 31 - Le "Xstream"réalisation pratique

VI-5-3 Au deuxième étage

(Voir figure 32)

Comme pour le premier étage, cette disposition sert à compenser les variations de la pression à l'entrée du détendeur. De plus, comme dans les autres deuxièmes étages compensés, elle permet d'éviter une détérioration prématurée du siège.

En effet, en l'absence de MP, sous l'action du ressort (**r**), le clapet (**c**) repousse le siège (**s**). Mais, comme il est limité dans sa course par la butée (**b1**) du levier, il n'exerce aucun effort sur le siège.

C'était, à l'origine, le but recherché. (Ce type de siège est aussi appelé "Siège flottant")

À l'inspiration, lorsque le levier de membrane s'abaisse, le clapet recule, libérant le passage de l'air comme dans un détendeur classique.

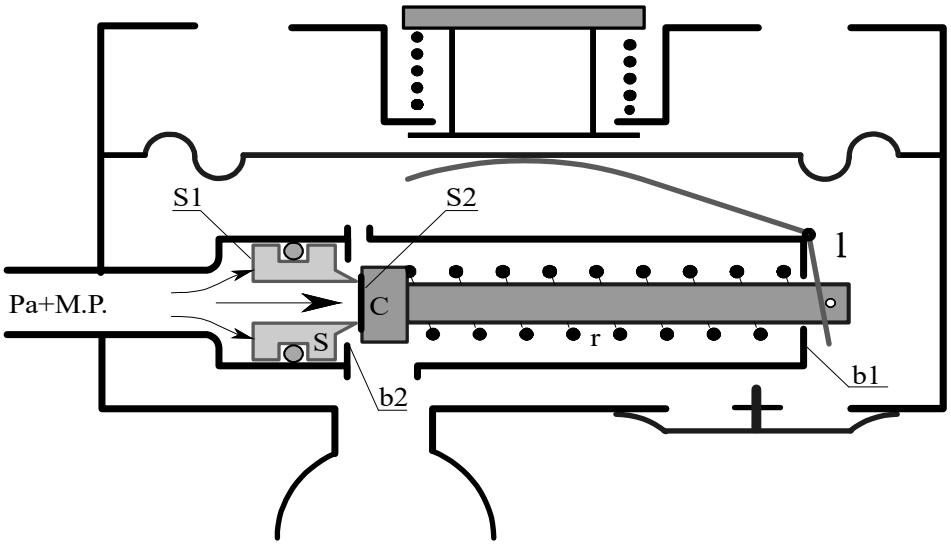


Figure 32 - Le siège mobile au deuxième étage

À l'usage, on constate que ce type de détendeur est sujet à des fuites car il s'encrasse facilement. Il faut donc le maintenir en parfait état de propreté.

Remarque :

Si : S_1 est la surface arrière du siège mobile.

S_2 la surface utile du clapet.

S_3 la surface de la lèvre du siège.

La pression "P" qui s'exerce entre le siège et le clapet est telle qu'au repos et en présence de MP, lorsque $S_1 = S_2$,, cette MP n'intervient plus. La seule force en jeu est celle due au ressort **r**.

Elle doit être suffisante pour assurer l'étanchéité. Cette force dépend de la surface S_3 de la lèvre. Si celle-ci a une épaisseur de 0,1 mm, que le siège a un diamètre de 5mm et que la pression à retenir est de 10 bars, il faut une force d'environ 0,16 daN. En fait, par sécurité, on mettra le double ce qui au repos donne une pression de 20 bars. On reste loin des 135 bars vus en III-1-4.

VI-6 Compensation par buse mobile

VI-6-1 Au premier étage

Lorsqu'il est apparu, on a prêté à ce principe toutes les vertus. Il y a cependant lieu de l'examiner plus en détail. (Voir figure 33a)

Dans les détendeurs que nous avons vus précédemment, l'air arrive à travers le siège. Celui-ci est ouvert ou fermé par le clapet qui assure l'étanchéité. Ici par contre, comme on peut le voir, le clapet a la forme d'une buse mobile (tuyau cylindrique de faible longueur) qui, lorsqu'elle s'écarte du siège, permet à l'air de la traverser.

On voit que la pression s'exerce radialement à la buse et quelle que soit cette pression, il n'existe théoriquement aucune force axiale tendant à l'ouvrir ou à la refermer. L'effort pour fermer ou ouvrir ce type de clapet est donc en principe nul.

> ***Remarque***
>
> *Ceci suppose qu'à son extrémité, l'épaisseur de la buse est infiniment fine et que le siège est rigide. (Voir les détails de la figure 33)*
>
> *Sous l'effet de la HP, la partie souple du siège s'extrude (se déforme). La lèvre, plus ou moins arrondie a donc toujours une partie extérieure exposée à la HP créant ainsi une petite composante axiale qui a tendance à ouvrir le clapet.*
>
> *Il en résulte que :*
>
> *- Pour que le clapet soit étanche, la MP doit être plus forte que celle calculée.*
>
> *- Que la MP diminue en même temps que la HP. Ce qui a pour effet de réduire les performances du 2e étage en fin de plongée. Nous verrons au chapitre suivant comment ce problème peut être résolu.*

Au premier étage, la buse constitue généralement, avec le piston, une pièce unique qui assure la compensation en même temps que l'asservissement de la moyenne pression.

On appelle fréquemment cette disposition "Piston compensé". Cette expression est impropre car elle laisse entendre que le piston est compensé alors que c'est toujours le clapet qui l'est. Il serait plus juste d'écrire "Compensé, à piston", de même qu'il existe un type de détendeur "Compensé, à membrane" et non à "Membrane compensée". Nous insistons sur ce point :

Contrairement à ce qui s'énonce souvent, c'est toujours le clapet qui est compensé, jamais la membrane, pas plus que le piston.

La buse mobile a été inventée dans les années 60 par Mr Bonnot Père et fils de la société STAR-FRANCE (SF) devenue plus tard AIRTRONIC. Le principe en a été utilisé par la COMEX sous le nom CX2000 de COMEX PRO. Ils furent parmi les meilleurs détendeurs de leur temps.

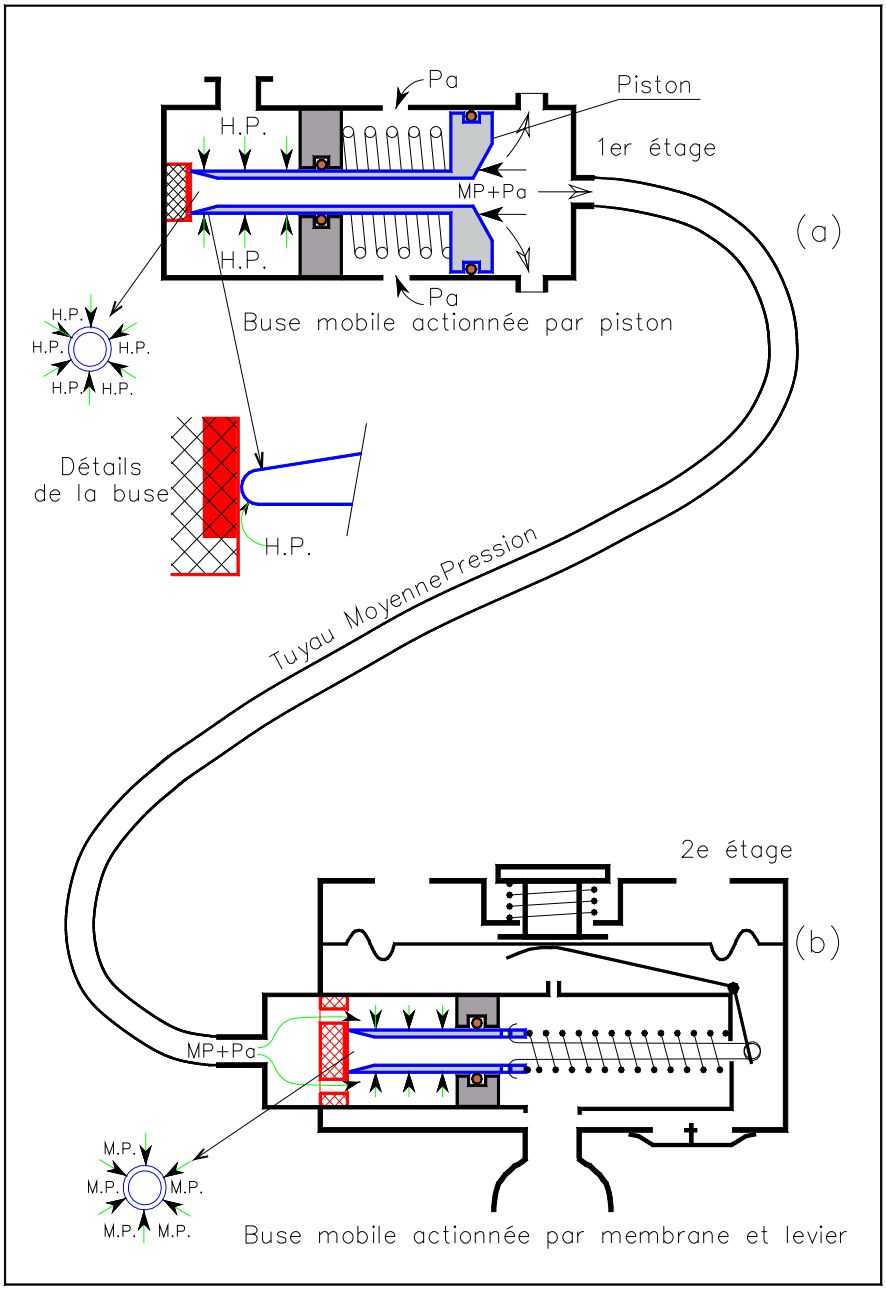


Figure 33 - Compensation par buse mobile

Pour faciliter le passage de l'air vers les sorties latérales, le piston est parfois évasé en forme de trompette ; le siège, quant à lui, a parfois celle d'un cône en creux pour améliorer le centrage de la buse.

On notera chez Beuchat l'intégration de deux 1er étages dans le même boîtier. Ceci permet d'alléger le poids lorsqu'on utilise un détendeur de secours et surtout quand on a qu'une bouteille avec une seule robinetterie.

Photo 6 - Un double premier étage

VI-6-2 Au deuxième étage

(Voir figure 33b)

Dans un deuxième étage parfaitement compensé, quel que soit son principe, la pression entre siège et clapet est théoriquement nulle. Pour retenir la moyenne pression, il faut donc aussi ajouter un ressort d'appoint. À ne pas confondre avec un ressort de rappel. Le ressort d'appoint applique la buse contre le siège. Ce siège est souvent constitué par un joint torique qui par "extrusion", c'est-à-dire par déformation, sert de soupape de sûreté.

Les détendeurs compensés par buse mobile, n'ayant pas d'espaces confinés, sont auto nettoyants. Le flux d'air qui les traverse, élimine l'eau et les dépôts qui peuvent s'y introduire. C'est là l'un de leurs avantages, ce qui est rarement évoqué.

VI-7 Avantages de la compensation

VI-7-1 Dans un premier étage

Elle stabilise la moyenne pression en dépit des variations de la haute pression. Ceci permet de régler l'étage suivant avec plus de précision et donc d'améliorer ses performances. Le travail inspiratoire ne varie théoriquement pas au cours de la plongée.

VI-7-2 Dans un second étage

Elle permet de réduire la pression exercée par le clapet sur le siège lorsque le détendeur n'est pas sous pression. Elle évite ainsi la détérioration du siège par la réduction de la force du ressort. Ceci permet à certains fabricant de n'exiger les contrôles des détendeurs que tous les 3 ans.

Elle limite surtout l'effet de la perte de charge (perte de pression) qui se produit dans le tuyau MP et qui varie d'autant plus que le débit est élevé et que la pression ambiante est grande.

Elle permet de réduire le seuil d'ouverture à une valeur très basse, c'est à dire quelques centimètres d'eau, tout en conservant une bonne stabilité. (Cette hauteur correspond environ à la distance entre l'embout et le plan de la membrane)

VI-8 Inconvénients de la compensation

1. Dans les schémas précédents, on peut voir qu'il est inévitable d'introduire des frottements pour garantir, par un joint torique, l'étanchéité du piston, de la chambre de compensation ou de la buse mobile.

   Bien que les fabricants utilisent des matériaux à faible coefficient de frottement tels que les techno polymères à haute densité, ils sont obligés de réaliser des pièces d'une très grande précision et finition.

   Ces pièces reviennent beaucoup plus cher et sont plus fragiles que les pièces conventionnelles. Malgré cela les frottements existent et peuvent varier en fonction de la profondeur, de la température et du vieillissement des joints.

2. La compensation retarde le signal d'alarme fourni par le système de réserve de la robinetterie. En effet, le détendeur est ainsi moins sensible à la perte de charge qui se produit dans le mécanisme de celle-ci. C'est une raison supplémentaire d'abandonner ce système de réserve mécanique et d'utiliser un manomètre immergeable.

3. Comme nous l'avons déjà dit, certains types de compensation créent des espaces confinés. Si l'eau y pénètre, il risque de s'y créer des dépôts nuisant à leur fonctionnement. Ceci provoque soit une modification du seuil qui peut conduire à un débit continu soit à une augmentation du travail respiratoire. D'où la nécessité d'un bon entretien.

4. La compensation ne limite pas les efforts nécessaires pour vaincre l'inertie des pièces mécaniques et de la masse d'eau mise en mouvement par la membrane.

5. Lorsque la profondeur augmente, la masse spécifique de l'air augmente ce qui limite les performances du détendeur dans une situation où le plongeur en a le plus besoin. Ceci n'est pas corrigé par la compensation.

6. La compensation ne peut pas toujours tenir compte des effets dynamiques de l'air en mouvement.
7. Lorsqu'un premier étage fuit et que le deuxième étage est parfaitement compensé, rien ne peut théoriquement limiter la moyenne pression, il y a donc un risque d'explosion du tuyau MP. C'est ce qui se produisait sur les premiers détendeurs à buse mobile. Ce problème a été résolu par l'utilisation d'un siège à joint torique. (Voir figure 6d)

Malgré les quelques inconvénients que nous venons d'évoquer, les compensations ont apporté une nette amélioration des performances des détendeurs.

À quelques exceptions prés, les modèles haut de gamme sont compensés aussi bien au premier qu'au deuxième étage, les modèles de gamme moyenne ont au moins le premier étage compensé alors que les modèles bas de gamme ne le sont pratiquement jamais.

C'est en partie ce qui distingue les gammes de qualité des détendeurs.

VI-9 La sous-compensation

Pour éviter l'explosion du tuyau MP, on peut disposer une soupape de sûreté sur la MP comme chez Poséidon.

Une autre solution consiste à ne compenser que partiellement le clapet, d'où le nom de "Sous-compensation".

Il suffit pour cela que le diamètre de la chambre de compensation du 2e étage soit un peu plus petit que celui du clapet, ce qui permet à celui-ci d'agir comme un petit clapet aval et de servir de soupape de sûreté pour une pression compatible avec la résistance du tuyau.

Il s'agit dans tous les cas, d'un compromis entre la sécurité du tuyau et les avantages de la compensation. Nous rappelons que la norme EN250 fixe à un minimum de 4 fois la pression de service à laquelle le tuyau MP doit résister.

Tout ceci marque la limite des possibilités des détendeurs compensés.

****

Photo 7- Le "Legend" d'Aqualung

Premier et deuxième étage à chambre de compensation.

Premier étage surcompensé par la pression ambiante

CHAPITRE VII

LES DÉTENDEURS SURCOMPENSÉS

L'apparition de la norme EN250 en 1994 a lancé une compétition qui n'est pas prête de s'arrêter. Aujourd'hui, les principaux fabricants recherchent les moyens de faire mieux que leurs concurrents. Cette compétition ne peut donc que profiter aux utilisateurs.

Une des voies d'amélioration étudiée par les fabricants consiste à augmenter la moyenne pression pour corriger la baisse de performance.

Considérant que le seul fait de maintenir la moyenne pression constante constituait une compensation, les fabricants ont cherché un nouveau terme pour désigner son augmentation.

Tant qu'à faire, il leur fallait un mot qui commercialement frappe les esprits.

Ils l'ont donc appelé "Surcompensation".

On peut se poser la question de la justesse de cette expression. En fait, un tel choix est purement commercial et prend certaines libertés avec la technique.

VII-1 Surcompensation par la haute pression

(Voir la figure 34)

Certains fabricants, pour la distinguer de la surcompression par la pression ambiante, que nous verrons plus loin, ont préféré l'appeler l'hypercompensasion.

Elle s'applique au premier étage. Elle consiste à provoquer l'augmentation de la moyenne pression à la sortie lorsque la haute pression diminue à l'entrée.

Ceci a pour effet de retarder la perte de performance du détendeur lorsque la haute pression diminue, notamment en fin de plongée.

VII-1-1 Détendeur à buse mobile

Dans ce cas, la buse mobile est munie d'un épaulement qui reçoit une composante axiale de la HP de façon que la MP augmente lorsque la HP diminue. Le calcul correspondant est développé ci-après.

Remarque :

Cette particularité, à l'origine, avait été conçue de façon à améliorer l'étanchéité pour les Hautes Pressions allant jusqu'à 300 bars.

VII-1-2 Calcul de la surcompensation par la haute pression

Dans le schéma de la figure 34b, appelons :

- *S_1 la surface utile du piston;*
- *S_2 la surface au niveau du corps de la buse ;*
- *S_3 la surface au niveau de l'épaulement de la buse.*

Les forces tendant à fermer la buse sont :

$(MP+Pa) \times S_1$ et $HP \times (S_3 - S_2)$

***Les forces tendant à l'ouvrir sont** :*

$(Pa \times S_1)$ et Fr

À l'équilibre on obtient : $(MP+Pa) \times S_1 + HP(S_3-S_2) = (Pa \times S_1) + Fr$

D'ou $MP + Pa = \frac{(Pa \times S_1) + Fr - HP\,(S_3 - S_2)}{S_1} = Pa + \frac{Fr}{S_1} - \frac{HP\,(S_3 - S_2)}{S_1}$

Pour simplifier, écrivons que $k_1 = (S_3 - S_2) / S_1$

$$MP = \frac{F_r}{S_1} - k_1\, HP$$

C'est l'équation de la surcompensation par la Haute Pression

(k_1 en est le coefficient de surcompensation)

VII-1-3 Interprétation des résultats

Si $Fr / S_1 = 10$, $S_1 = 500$ mm², $S_2 = 12$ mm² et $S_3 = 14$ mm² ($k_1 = 0{,}004$)

Pour HP = 200 bar, MP = 9,2 et pour HP = 50 bar, MP = 9,8 bar.

La MP augmente de 0,6 bar pour une baisse de la HP de 150 bars

Cette surcompensation permet de réaliser des détendeurs fonctionnant dans une grande plage de haute pression. En effet lorsque celle-ci augmente, la pression sur le siège augmente, ce qui maintient l'étanchéité. Lorsqu'elle diminue, la MP augmente, ce qui maintient les performances du 2ᵉ étage. En l'absence de l'épaulement, $k_1 = 0$ et l'on retrouve l'équation classique d'un détendeur compensé.

$$MP = \frac{Fr}{S_1}$$

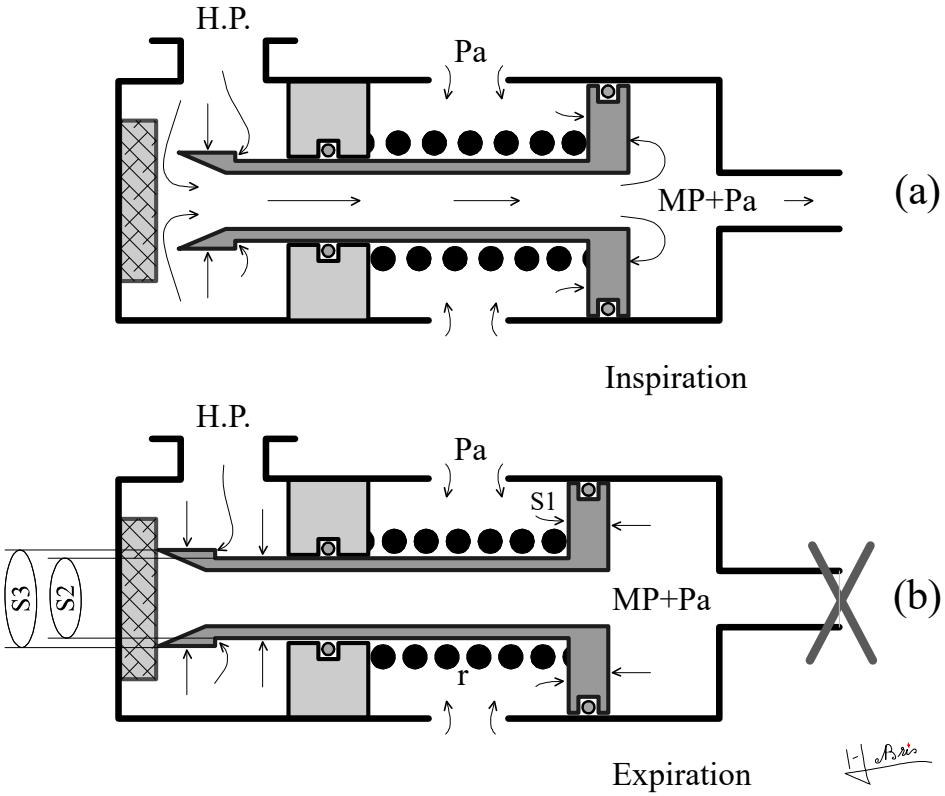


Figure 34 - Surcompensation par la HP

VII-1-4 Détendeur à membrane

On notera qu'un même résultat peut être obtenu dans un détendeur à membrane compensé par piston ou par chambre de compensation. Il suffit pour cela que la surface de la section de la chambre ou du piston soit légèrement plus faible que celle du clapet. (Sp < Sc)

Si dans la formule générale du paragraphe VI-3-2 on simplifie en écrivant que Fr = (Fr_1 – Fr_2) et si l'on considère que la Pa est négligeable devant la HP, cette formule devient :

$$\mathbf{MP = \frac{Fr - HP(Sc - Sp)}{Sm + Sp - Sc}}$$

Ce qui montre bien que la MP augmente quand la HP diminue.

VII-2 Surcompensation par la pression ambiante (Figure 35)

Le fait de maintenir la MP constante à la sortie d'un 1er étage ne suffit pas à maintenir constantes les performances du 2e étage. En effet, lorsque la profondeur augmente, des pertes de charges supplémentaires se produisent dans les différentes parties du détendeur. D'autre part, les échanges gazeux au niveau des poumons se font aussi plus difficilement. La baisse de température et le stress rencontré en profondeur provoquent une demande d'air et donc un travail respiratoire supplémentaire.

Pour compenser cela, le moyen consiste à augmenter la MP en fonction de la pression ambiante, ce qui facilite le travail respiratoire. Mais, comment obtenir ce résultat, sans risquer des instabilités ?

Si ces calculs vous rebuttent, cliquez sur le lien ci-dessous :

La surcompensation : Mais c'est facile !

(Voir aussi Exemple 7 : Le langage des plongeurs)

La figure 35 représente le 1er étage du détendeur "Legend" d'Aqualung. On notera que ce premier étage est à la fois compensé et surcompensé.

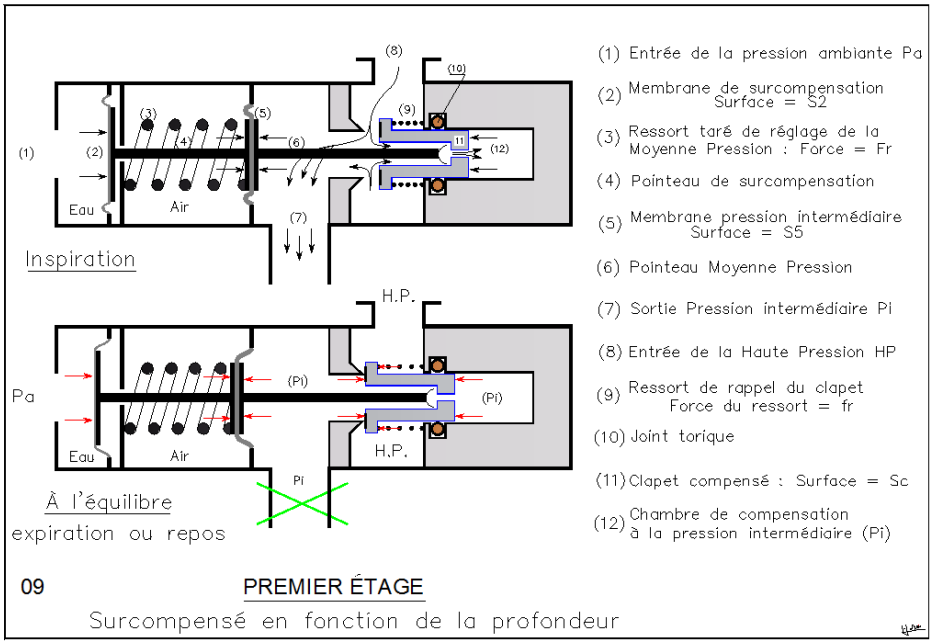


Figure 35 - Surcompensation à membranes par la pression ambiante

VII-2-1 Analyse du fonctionnement statique

On remarque que la surface S_2 de la membrane de surcompensation (2) qui reçoit la pression ambiante (Pa), est plus grande que la surface S_5 de la membrane (5) qui reçoit la Pression intermédiaire (Pi). À l'équilibre, (en

expiration ou au repos) le clapet est fermé. La position relative des 2 membranes est constante, quelle que soit la profondeur. Le volume qu'elles délimitent est donc constant ainsi que la pression qui y règne. Celle-ci est voisine de la pression atmosphérique (PA) enfermée au montage.

Équilibre des forces : (*Voir figure 35*)

- D'un coté de la petite membrane, nous avons la force du ressort à laquelle s'ajoute celle générée par la Pa sur la grande membrane. De l'autre, nous avons la force générée par la Pi sur la petite membrane. Quand la Pa augmente, pour fermer le clapet, la différence de surface des deux membranes, nécessite que la Moyenne Pression (MP_2) dans la chambre sèche augmente proportionnellement à celle de la Pa.

VII-2-2 Calculs de la surcompensation par la pression ambiante

Par convention :

Pa = Pression ambiante et Pi = Pression intermédiaire

MP_1 = Moyenne Pression obtenue par la compensation = Fr/S_5

MP_2 = Moyenne pression obtenue par la surcompensation

Les forces en jeu sont :

Celle tendant à fermer le clapet : *($Pi \times S_5$)*

Celles tendant à l'ouvrir : *(Fr) et ($Pa \times S_2$)*

À l'équilibre on a donc :

$Pi \times S_5 = Fr + (Pa \times S_2)$

ou $Pi = \frac{Fr}{S_5} + Pa \frac{S_2}{S_5}$

On peut écrire que : $\mathbf{MP_2} = Pi - Pa$

On peut aussi écrire : $\mathbf{MP_2} = \frac{Fr}{S_5} + Pa \frac{S_2}{S_5} - Pa = \frac{Fr}{S_5} + Pa \frac{S_2}{S_5} - 1$

Si pour simplifier, on écrit que $\frac{S_2}{S_5} - 1 = k_2$

On obtient : $$MP_2 = \frac{Fr}{S_5} + k_2 Pa$$

C'est l'équation de la surcompensation par la pression ambiante

(k_2 en est le coefficient de surcompensation)

On notera que l'on peut écrire : $MP_2 = MP_1 + k_2 Pa$

On voit donc qu'il y a 2 façons de calculer la moyenne pression surcompensée en fonction de la Pression ambiante.
Soit par la mesure en caisson de Pi et Pa et l'on a : ($MP_2 = Pi - Pa$)
Soit par le cacul ($MP_2 = MP_1 + k_2Pa$) ce qui nécessite de connaître MP_1 qui est de l'ordre de 9 bars et le coefficient de surcompensation de l'ordre de 0,4.

VII-2-3 Interprétation du résultat

- Si PA est la pression atmosphérique, (Paa – PA) = Pa pression ambiante relative. Pa est une fonction linéaire de la profondeur.

- L'augmentation de moyenne pression par mètre de profondeur est égale à k_2. Si les membranes étaient égales, ($k_2 = 0$) on obtiendrait le même résultat qu'un détendeur uniquement compensé en fonction de la HP.

- À l'équilibre, la pression entre les deux membranes est constante. Elle n'intervient pas dans les calculs.

Résultats pratiques

Avec Fr / $S_5 = 9$ et $k_2 = 0,4$.

- En surface : Pa = 0 bar ; Pi = 9,o bar ; MP_2 = 9,0 bar

- A 20 mètres : Pa = 2 bar ; Pi = 11,8 bar ; MP_2 = 9,8 bar

- A 50 mètres : Pa = 5 bar ; Pi = 16,0 bar ; MP_2 =11,0 bar

La MP_2 augmente de 0,8 bar entre 0 et 20 m et de 2 bar entre 0 et 50 m

C'est cette augmentation de pression qui permet au détendeur de conserver ses performances en profondeur. Les résultats obtenus avec la famille des "Légend" d'Aqualung ou des "ATX" d'Apeks sont exceptionnels à cet égard puisqu'ils fonctionnent au-delà de –80 m sans sortir des exigences de la norme. Ce sont ces détendeurs qui ont permis à Pascal Barnabé de porter le record de profondeur en scaphandre autonome à –330 m le 5 juillet 2005 dans le golfe de Sagone en Corse.

La figure 36 montre une surcompensation avec des pistons au lieu de membranes. Le principe en est le même. Elle est utilisée par Omer Sub sur son détendeur "Oasis". Les joints introduisent des frottements qui en réduisent l'intérêt. On remarque, comme entre les deux membranes précédentes, qu'il existe un espace entre les 2 joints des pistons.

On remarque que S_2/S_5 étant plus grand que 1,

la pression intermédiaire (Pi) croît plus vite que la pression ambiante (Pa)

VII-3 Notes sur les surcompensations :

- La surcompensation permet de pallier les insuffisances de la compensation, notamment en fonction des variations de la HP et de la profondeur.
- Il faut noter que la surface des membranes n'est pas seule à intervenir ; leur dureté et leur profil doivent également être pris en considération.
- La disposition à 2 membranes protège le détendeur contre le givrage et maintient propre le mécanisme.
- L'augmentation relative de la MP favorise le gonflage des bouées en profondeur.
- En théorie, pour que l'augmentation de la MP ne provoque pas un passage en débit continu, ces deux systèmes de surcompensation ne devraient fonctionner correctement qu'avec des 2e étages compensés. La surcompensation par la HP y est cependant moins sensible car moins importante.
- Pour cette raison, on ne doit jamais ajouter un détendeur de secours (octopus) non compensé sur un détendeur surcompensé par la pression ambiante.

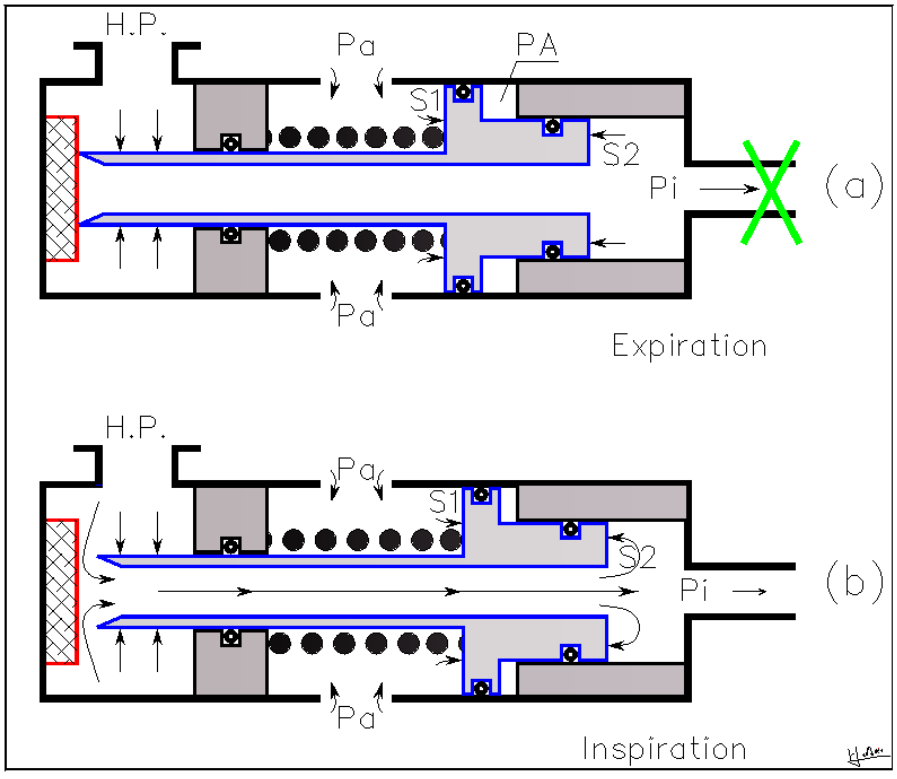


Figure 36 - Surcompensation à piston par la pression ambiante

Il y a une contradiction apparente entre la définition de la surcompensation en fonction de la HP et la sous-compensation pour éviter que le tuyau MP n'éclate. (Voir le paragraphe VI–9) En effet, ces deux systèmes suivent le même principe alors qu'ils utilisent des préfixes opposés. Cela provient de ce que la sous compensation s'applique au deuxième étage où le clapet est du type aval alors que la surcompensation s'applique au premier étage où le clapet est du type amont.

Nous verrons en IX–2–2 qu'il existe un autre moyen, au 2e étage, pour maintenir automatiquement les performances en profondeur. *(Voir figure 41c)*

Photo 8 - Détendeur original conçu par Yves Le Masson
Premier étage compensé, deuxième étage piloté par fuite d'air.
(Archives Philippe Rousseau)

CHAPITRE VIII

LES DÉTENDEURS PILOTÉS

VIII-1 Généralités

Dans les voitures, on utilise une partie de l'énergie produite par le moteur pour actionner le volant ou les freins et ainsi réduire les efforts du conducteur. On parle alors de direction ou de freins assistés.

Dans les détendeurs, on peut de la même façon, utiliser une partie de l'énergie disponible dans l'air comprimé pour réduire le travail inspiratoire.

Les détendeurs pilotés possèdent toujours 2 clapets. L'un, de grande dimension, fournit le débit nécessaire tandis que l'autre n'a pour fonction que de commander le premier. Plus petit, il est plus facile à fermer ou à ouvrir.

VIII-2 Clapet piloté par fuite d'air

(*Figure 37a*)

Dans ce montage le clapet (**c**) contient une chambre (**a**) qui, d'une part, se remplit par un petit orifice calibré (S_1) et d'autre part, se vide par un orifice plus grand (S_2) laissé normalement ouvert. La fuite d'air est très faible, environ 1 normo litre / heure.

Au repos l'orifice (S_2) laisse échapper l'air, la pression dans la chambre (**a**) est donc voisine de la pression ambiante, le ressort (**r**) appuie le clapet principal (**c**) sur son siège (**b**) constitué par un joint torique.

Lorsque le plongeur inspire, la membrane (**m**) ferme l'orifice (S_2). La pression monte alors dans la chambre (a) et repousse vers la droite le clapet (**c**) qui laisse passer l'air par son pourtour en (**q**).

Lorsque le plongeur expire, la membrane est repoussée et s'écarte de l'orifice (S_2). La pression dans la chambre (**a**) diminue, le clapet s'appuie à nouveau sur son siège fermant l'arrivée d'air sous l'action du ressort (**r**). Le clapet (**c**) est appelé "Clapet piloté".

Ce système, très performant pour l'époque, était utilisé sur le "Micronic", détendeur conçu par Yves Le Masson et commercialisé par Piel. Il fut l'un des premiers détendeurs pilotés.

VIII-3 Clapet *piloté* par clapet *pilote* (Voir la figure 37b)

Notez bien la différence entre clapet *piloté* et clapet *pilote.* Dans un détendeur compensé, dans la chambre de compensation, qu'on appelle alors chambre intermédiaire, disposons un nouveau clapet de section S_3 beaucoup plus petite que S_1. Les pressions sur ces 2 clapets sont les mêmes. Le premier nécessite donc un ressort d'appoint beaucoup plus faible que ne nécessite le deuxième. (Voir chapitre III, "Pression entre siège et clapet")

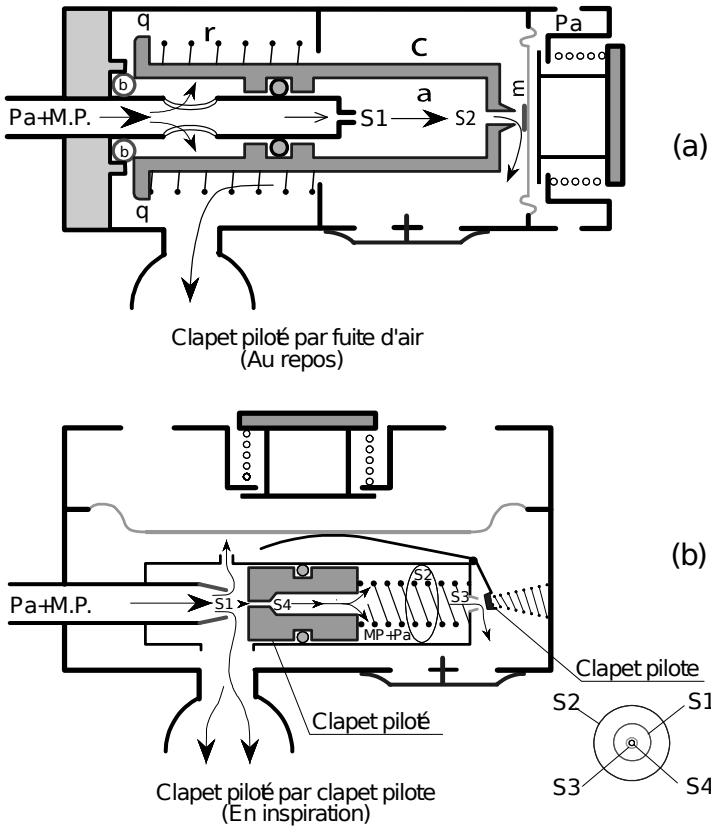


Figure 37 - Clapets pilotés

Le clapet de surface S3 est le "Clapet *pilote*".

Tandis que celui de surface S1 est le clapet *piloté*.

Lorsque ce clapet *pilote* est fermé, la force produite, dans la chambre intermédiaire, par la moyenne pression ferme le clapet principal avec l'aide du ressort d'appoint. Lorsque le clapet *pilote* s'ouvre, la pression dans la chambre intermédiaire chute car le trou qui traverse le clapet est très petit et ne permet pas de maintenir la pression. (S_4 est plus petit que S_3)

Sous l'effet de la moyenne pression sur la surface S_1, le clapet principal s'ouvre donc lui aussi. C'est pourquoi il est appelé "Clapet *piloté*".

Lorsque le clapet *pilote* se referme, la chambre intermédiaire se remplit. Sous l'effet de la MP sur la surface S_2, une force importante a alors tendance à fermer le clapet principal.

La force nécessaire pour ouvrir le clapet *pilote* est beaucoup plus faible que celle nécessaire à l'ouverture du clapet principal. Il y a donc amplification de force.

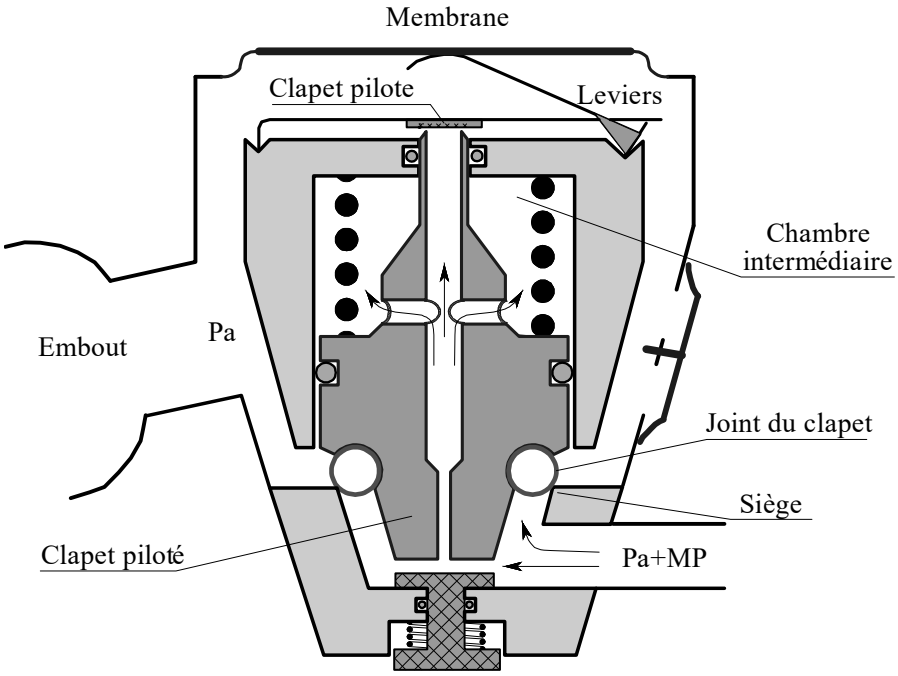


Figure 38 - Détendeur "Alizé"

Les figures 37b et 38 permettent de comparer le schéma de principe avec le schéma constructeur du détendeur "Alizé" de Spirotechnique. Ce détendeur des années 70 poussait ce principe à ses limites. Il était très sensible mais en contre-partie, n'était pas très stable.

Ce type de détendeur n'est pas compensé. Par contre, en cas de surpression de la Moyenne Pression, le clapet *pilote* joue le rôle de soupape de sûreté.

VIII-4 Clapets souples *pilotés*

Le principe de ces détendeurs est le même que celui ci-dessus. Mais le clapet est remplacé par une membrane souple faisant partie de la chambre intermédiaire. Elle se déforme sous l'action de la pression.

Avantages :

L'utilisation d'une membrane souple, comme clapet, procure une excellente étanchéité car le parallélisme et la finition entre siège et clapet interviennent peu. Ces détendeurs sont fiables car il n'y a pas de joint et peu de frottement.

On distingue trois réalisations originales :

VIII-4-1 Clapet constitué par un tuyau souple.

(*Voir figure 39a*)

À la mise sous pression, le clapet pilote (c1) étant fermé, le "Tuyau clapet" (c2) se gonfle et vient obturer les orifices de sortie (S) qui tiennent lieu de siège et sont constitués d'une série de petits trous latéraux.

Lors de l'inspiration, le clapet *pilote* s'ouvre, le tuyau clapet se dégonfle laissant passer l'air vers les orifices de sortie. Le fonctionnement n'est pas très progressif. L'air arrive par "tout ou rien". La quantité d'air reçue dépend beaucoup plus de la durée de l'inspiration que de l'effort inspiratoire.

Ce type de détendeur peut fournir beaucoup d'air mais nécessite une accoutumance de la part du plongeur.

VIII-4-2 Clapet constitué par une membrane souple.

(Voir figure 39b)

À la mise sous pression, la membrane clapet ($\mathbf{m_c}$) est repoussée, laissant échapper un peu d'air par la sortie mais rapidement, la moyenne pression s'établit de l'autre côté par un petit orifice (**S**) qui y est percé. La membrane vient alors s'appliquer sur l'orifice de sortie (**c2**) empêchant l'air de passer.

À l'inspiration, le clapet *pilote* (**c1**) s'ouvre, la chambre intermédiaire se vide, la membrane clapet se soulève sous l'action de la MP ce qui libère le passage de l'air. Ce type de détendeur était fabriqué par la société "GSD".

VIII-4-3 Clapet constitué par une membrane semi-souple.

(Voir figure 39c

Il s'agit d'un détendeur de même principe, à membrane sur le coté. Il est donc réversible. Ce type de boîtier est parfois transparent, ce qui permet d'en contrôler le mécanisme.

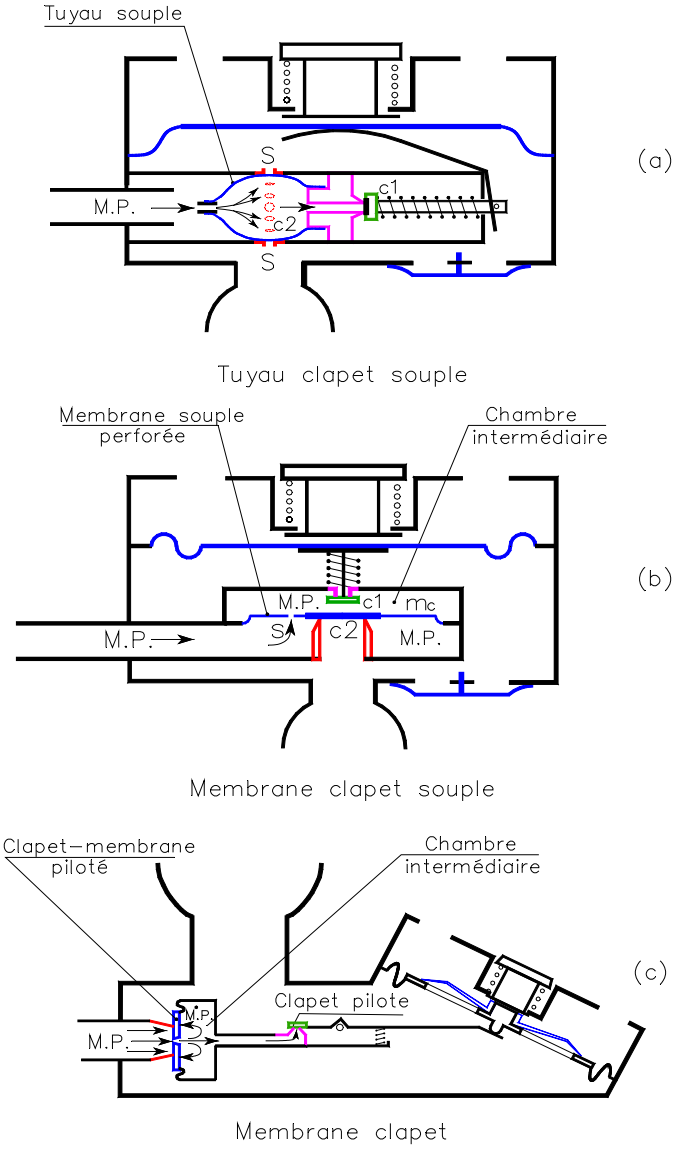


Figure 39 - Clapets souples pilotés

Remarques :

1. Dans ce type de détendeur, la dimension de l'orifice d'alimentation de la chambre intermédiaire ainsi que le volume de celle-ci peuvent provoquer de légers retards à l'ouverture et à la fermeture. Leur utilisation n'est qu'une question d'habitude.
2. Le rapport des surfaces du clapet *piloté* et du clapet *pilote* détermine la limite de sensibilité que l'on peut atteindre. Elle est fixée par le plus petit trou que l'on sache réaliser, sans qu'il risque de se boucher.
3. Le système à membrane perforée est avantageux sur ce dernier point car, en raison de son élasticité, il risque moins de s'obstruer. (figure 39b)
4. Il n'y a pas de lien mécanique entre le clapet piloté et la membrane.
5. La caractéristique essentielle des détendeurs pilotés est que leurs performances sont peu affectées par l'effet Venturi et que leur seuil d'ouverture est très bas. Ils sont ainsi peu sensibles à la profondeur et ne nécessitent pas de réglage durant leur utilisation. C'est là leur gros avantage.
6. Chez Poséidon, le 2e étage dont le principe est représenté par la figure 39a constitue, avec le 1er étage représenté en figure 30, un ensemble qui est l'un des meilleurs du marché, pour ses performances en profondeur.

Photo 9 - Détendeur LAMA conçu par Yves Le Masson (1985)
Le premier étage compensé était celui du Micronic**.**
Collection Philippe Rousseau

CHAPITRE IX

LES DÉTENDEURS À EFFET DYNAMIQUE

IX-1 Généralités

L'utilisation d'effets dynamiques, sous différentes formes, s'est généralisée, sur les premiers comme sur les deuxièmes étages.

IX-2 L'effet Venturi

Cet effet exploite l'énergie du flux d'air pour provoquer une amplification du débit. Il y a donc une véritable assistance au travail respiratoire. Le seuil d'ouverture ne change pas mais son franchissement ne dure que peu de temps, après quoi l'assistance prend le relais. Cet effet ne peut être obtenu que lorsque le détendeur débite donc après avoir été amorcé. Le travail inspiratoire s'en trouve réduit. Par contre, le travail expiratoire ne change pas. (Voir chapitre XIV)

IX-2-1 Au premier étage

(Voir figure 40 et photo 14)

Il évite une chute de la moyenne pression et permet d'augmenter le débit.

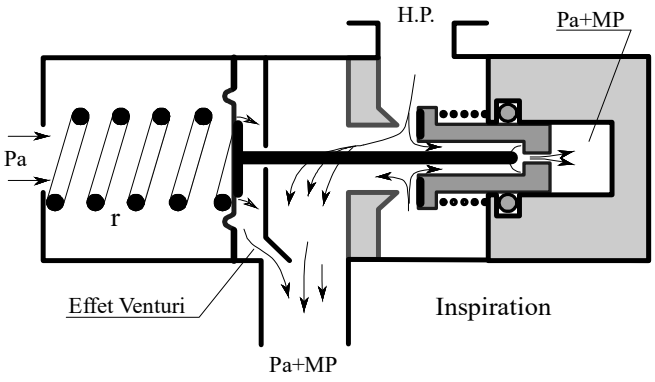


Figure 40 - Effet Venturi au 1er étage

Il consiste à créer une dépression sous la membrane au moyen d'un petit volet ou d'un orifice judicieusement placé. Comme nous le verrons plus loin, toutes les sorties MP n'en bénéficient pas forcément car la réalisation en est difficile.

IX-2-2 Au deuxième étage

Nous avons vu au paragraphe II-4-2 que dans un détendeur l'effet Venturi avait tendance à faire passer cet étage en débit continu.

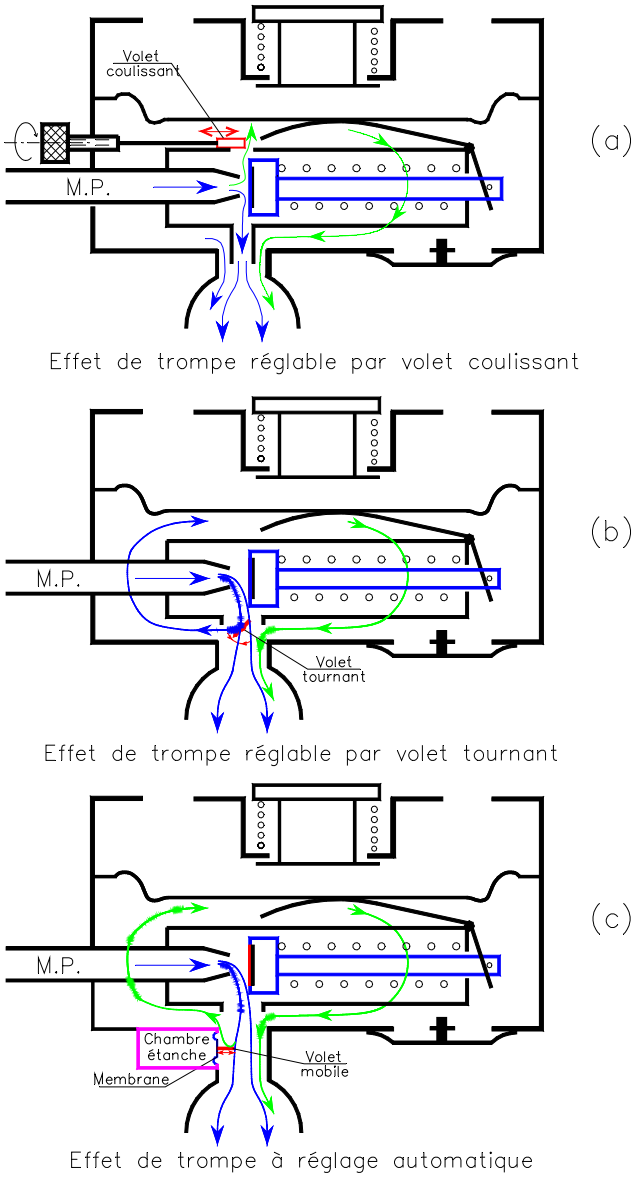


Figure 41 - Effet Venturi au 2e étage

Ce phénomène, à l'origine, était une source d'instabilité. Aujourd'hui, il est assez bien maîtrisé grâce à des volets déflecteurs, à une forme appropriée de la chambre sèche, de la buse et parfois de l'embout de façon à obtenir sans risque une forte amplification. Ce type de détendeur est aussi dit à "Effet de trompe" ou à "Injection". Certains sont ajustés d'une façon fixe, en usine, à l'aide d'un déflecteur déformable ou d'une languette que l'on déplace dans une série de rainures.

Commande manuelle

Mais cet effet varie avec la profondeur. Il est donc souhaitable de pouvoir le régler en plongée pour en optimiser le fonctionnement suivant les conditions d'utilisation. Pour cela, les fabricants ont prévu des commandes manuelles, soit par un volet de déflexion orientable placé dans le flux d'air, soit par un système d'obturation progressive du trou de compensation de l'effet, voire une orientation variable de ce trou. (Voir figure 41a et b)

Commande automatique

Une version très originale des fameux détendeurs "ATOMIC" utilise la pression ambiante, agissant sur une membrane fermant une chambre étanche, pour déplacer un volet mobile qui augmente automatiquement l'effet Venturi avec la profondeur pour faciliter l'inspiration. (Voir figure 41 c et photo 9) Ce dispositif, comme la surcompensation vue en VII-2 mais ici au 2^{e} étage, il a pour but de maintenir les performances en profondeur. (*Voir Ripoll P132*) Un léger seuil empêche l'effet Venturi de déclencher un flux continu en surface.

Photo 10 - Deuxième étage du détendeur T2 de Atomic

On distingue prés de l'embout la protubérance qui contient la chambre étanche et sa membrane (Voir figure 41 c)

IX-3 L'effet buse mobile

IX-3-1 Au premier étage

Au chapitre VI, nous avons vu que la buse avait un chanfrein intérieur destiné à lui donner une lèvre aussi fine que possible.

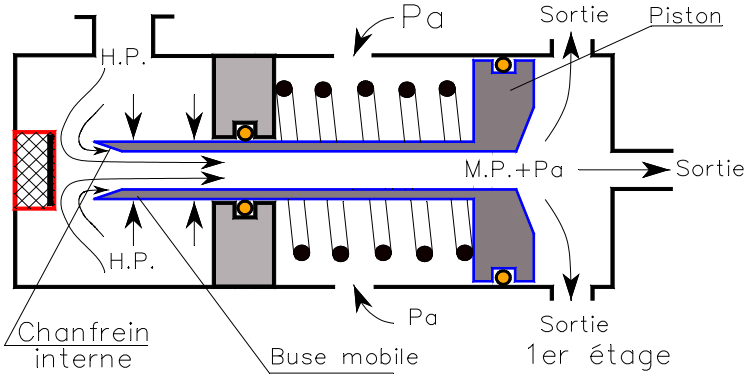


Figure 42 - Effet buse mobile au 1er étage

Sous pression, le système se met en équilibre, clapet fermé mais, dès le début de l'ouverture, le flux d'air qui franchit l'entrée de la buse provoque sur le chanfrein de celle-ci une poussée axiale qui a tendance à favoriser l'ouverture. (Ce que Scubapro appelle "Compensation active")

IX-3-2 Au deuxième étage

L'effet buse mobile apparaît aussi au second étage où il est aussi possible d'utiliser les autres effets.

Remarques :

- Lorsqu'un premier étage utilise l'effet "Buse mobile", toutes les sorties sont, de ce fait, assistées car cet effet se produit au niveau de l'extrémité fine de la buse et non pas au niveau de chaque sortie. (Voir la figure 42 et "Les sorties Moyenne Pression" au paragraphe XII-I-2)

- L'effet buse mobile, obtenu à la conception ne peut être réglé manuellement.

IX-4 L'effet Vortex

(Voir figure 43 et photo 10)

Pour améliorer la stabilité d'un détendeur tout en lui demandant un grand débit, on peut réduire l'effet Venturi en dirigeant la buse de façon à faire tournoyer l'air dans l'embout sans passer par la chambre sèche. C'est l'effet "Vortex" que l'on peut aussi traduire par "Effet tourbillon".

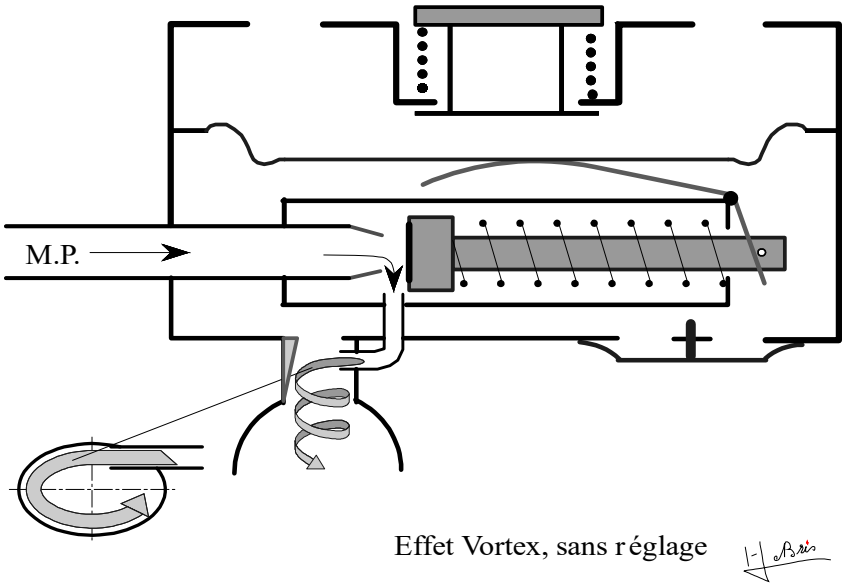


Figure 43- Effet Vortex au 2e étage

Avec cet effet, le débit d'air à la sortie de la buse peut être très élevé tout en ne provoquant qu'une faible aspiration de l'air sous la membrane.

La pression sous la membrane dépend de la dépression provoquée par l'inspiration du plongeur au centre du tourbillon ou de la pression ambiante, lorsque l'embout n'est pas tenu en bouche.

Une bonne démonstration de ce principe consiste à vider une bouteille d'eau en la retournant :

- On constate d'abord que la bouteille se vide mal car le flux d'eau qui tente d'en sortir est contrarié par celui de l'air qui essaye d'y pénétrer.

- Par contre, si l'on fait tournoyer l'eau, on s'aperçoit que la bouteille se vide très vite car l'eau s'échappe par la périphérie du goulot tandis que l'air pénètre par son centre. Ces deux flux pourtant contraires ne se gênent pas. Il ne s'agit pas d'une assistance dynamique comme avec l'effet Venturi.

Ce système, mis au point par la société "National" dans les années 70, est actuellement utilisé par Marès et Dacor d'une façon qui donne de très bons résultats.

(Cet effet n'est utilisé qu'au deuxième étage)

Avantages :

Le flux d'air froid est réchauffé lors de son passage dans le tuyau latéral. Celui-ci est métallique et pourrait en plus être muni d'ailettes de réchauffement.

(Voir le chapitre X)

Ce flux ne rencontre pas le mécanisme du détendeur ce qui réduit les risques de givrage.

On notera que l'effet Vortex est plus stable que l'effet Venturi et ne nécessite donc pas de réglage par l'utilisateur. Ceci facilite l'utilisation et réduit les coûts.

Inconvénient :

Il ne semble pas que l'effet Vortex permette d'atteindre un travail inspiratoire aussi faible qu'avec l'exploitation de l'effet Venturi.

Photo 11 - Le détendeur "Abyss" de Mares

On distingue parfaitement le petit tuyau latéral qui caractérise l'utilisation de l'effet "Vortex" (Voir en IX – 4)

****

CHAPITRE X

LES DÉTENDEURS ET LE FROID

En eau froide vous devez utiliser un détendeur approprié.

La norme EN250 de mai 2000 impose qu'un scaphandre autonome à circuit ouvert, conçu pour être utilisé dans une eau de température inférieure à 10°C, soit soumis à essai, dans l'état, prêt à l'emploi, dans une eau douce à la température de 4°C (+ 0 /–2°C) pendant 5 minutes, à une pression absolue de 6 bars.

X-1 Influence de la température

Ce chapitre est inspiré d'un article de Christian THOMAS, paru dans "Le SIFON", bulletin de la commission de plongée souterraine de l'Ile de France.

D'une façon générale lorsque l'air se détend, il se refroidit. En plongée, ce phénomène se produit dans chaque étage du détendeur. Si l'eau environnante n'est pas suffisamment chaude pour le réchauffer, elle peut geler et bloquer les mécanismes de contrôle de l'arrivée de l'air.

Le détendeur entre alors en débit continu et se refroidit encore davantage.

C'est le cercle vicieux du givrage.

X-2 Le refroidissement de l'air

La courbe de la *figure 44* donne le coefficient de refroidissement en fonction du rapport de détente de l'air. Exemple, dans un détendeur à 27°C, (300K) pour un rapport de détente de 1/20, (0,05) ce coefficient est de 0,55.

La température instantanée peut alors, théoriquement, atteindre :

0,55 x 300 = 165K

ou 165 – 273 = **-108°C**.

Il faut remarquer qu'un bon compresseur actuel fournit un air dont le point de rosée atteint -70°C. C'est-à-dire qu'il faut que l'air qu'il fournit soit à moins 70°C pour que la vapeur d'eau qui s'y trouve se condense.

Du calcul ci-dessus, il résulte qu'un détendeur peut toujours givrer pour peu qu'on le sollicite violemment.

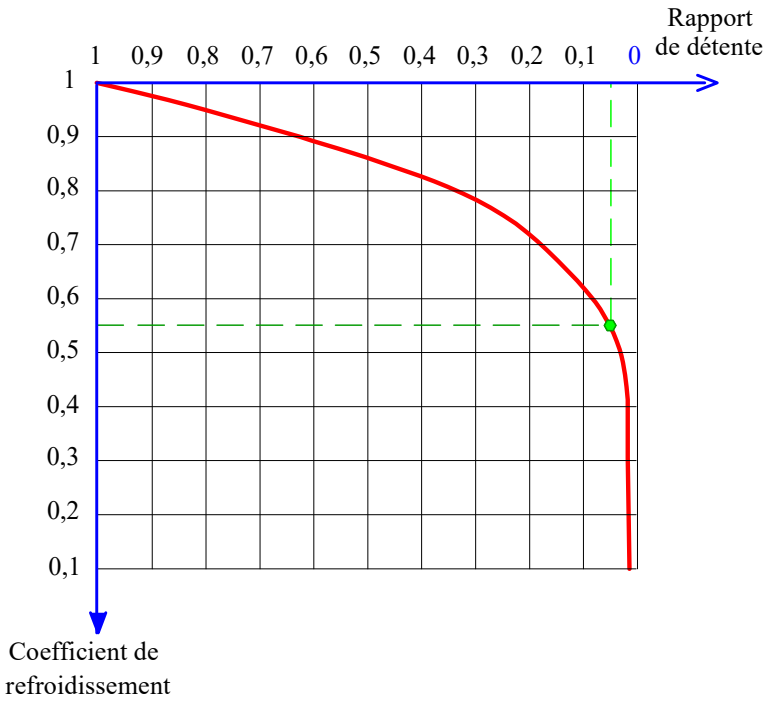


Figure 44 - Courbe détente / refroidissement

X-3 Le givrage des détendeurs

Il est dû simultanément à la présence d'eau, à une température basse, à la chute de pression et surtout au débit qui, en renouvelant l'air froid, empêche le détendeur de se réchauffer. L'augmentation des performances en débit en a augmenté le risque et en conséquence la nécessité de s'en protéger.

L'eau est toujours présente dans la chambre humide d'un 1er et d'un 2e étage d'un détendeur mais elle peut l'être accidentellement dans la chambre sèche. En dehors de l'abaissement naturel de la température ambiante, l'étude de la production du froid montre qu'elle est fonction du débit d'air, en normolitres par minute et du logarithme népérien du rapport de détente.

Plus la plongée est profonde, plus on consomme d'air et plus on risque de provoquer le givrage.

Le premier étage, où le rapport de détente est plus fort, se refroidit théoriquement plus que le deuxième. Pratiquement, étant entièrement métallique, il se réchauffe aussi davantage au contact de l'eau ambiante.

X-4 Influence sur la conception des détendeurs

Différentes considérations sont prises en compte dans la conception des détendeurs.

Une loi, dite de Fourier, nous enseigne que l'évacuation du froid est proportionnelle à l'écart de température entre les cavités émettrices et réceptrices. Le coefficient de proportionnalité est connu sous le nom de "Coefficient d'échange thermique" ou de son inverse la "Résistance thermique".

Pour compenser les frigories produites, le détendeur doit pouvoir se réchauffer au contact de l'eau environnante dont la température ne peut être que de quelques degrés en dessous de zéro. (En eau salée)

Cependant tous les détendeurs n'évacuent pas le froid d'une façon semblable. Les échanges entre la chambre humide et l'eau ambiante doivent être aussi grands que possible. C'est relativement facile dans les systèmes à membrane mais difficile dans les systèmes à piston et les buses mobiles.

En effet, les fabricants cherchent à éviter la pénétration de corps étrangers en diminuant la dimension des orifices de communication avec l'eau ambiante, ce qui nuit aux échanges thermiques.

D'autre part, la glace ou le givre se fixe moins facilement sur les pièces en plastique isolant que sur les pièces métalliques car la capacité thermique du plastique est beaucoup plus faible que celle du métal.

X-4-1 Au premier étage

(Voir figures 45)

La conception du détendeur, et notamment la disposition spatiale des diverses cavités, influe considérablement sur la sensibilité au givrage.

Le détendeur idéal, du point de vue du givrage, doit évacuer facilement, vers l'extérieur, le froid produit dans la cavité moyenne pression et difficilement, vers la cavité à pression ambiante, qui contient de l'eau.

On notera que certains dispositifs de protection n'améliorent pas les caractéristiques radiatives des détendeurs, bien au contraire. Signalons, à cet égard, l'effet désastreux des bas nylon ou autres protections bricolées autour du premier étage.

Le meilleur détendeur, du point de vue du givrage, sont ceux, compensés à membrane, tel que représentés dans les figures 25c et d. La cavité HP est située au centre du détendeur. La sortie où l'air se détend se trouve à une extrémité tandis que la chambre moyenne pression située à l'opposé élimine facilement le froid vers l'extérieur.

La chambre moyenne pression est ainsi divisée en deux parties. D'un côté celle où l'air se détend et se refroidit. De l'autre celle, fermée par la membrane ou le

piston, où l'air est déjà détendu et se réchauffe au contact de l'eau ambiante. Hélas ! ces détendeurs ne sont pratiquement plus fabriqués.

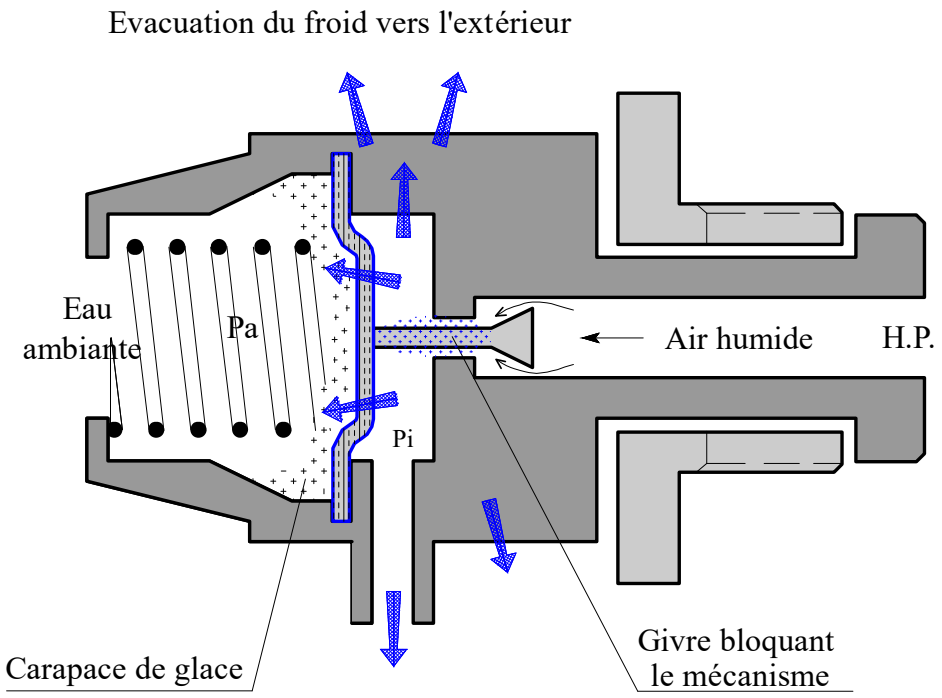


Figure 45 - Le froid au premier étage

Les systèmes à chambre de compensation, où la membrane isolante sépare de la pression ambiante la chambre où l'air se détend, sont de qualité moyenne. (*Voir figure 27*)

Celui à piston non compensé de la *figure 19d* est de qualité médiocre car la chambre où l'air se détend et celle à la pression ambiante ne sont séparées que par une paroi métallique peu isolante.

Par contre, les plus mauvais sont ceux à buse mobile, tel celui de la figure 33a. En effet, l'air se détend dans la buse qui traverse la chambre humide. Ceci constitue un véritable échangeur thermique entre l'air détendu à très basse température et l'eau ambiante.

Leur givrage est donc très facile. Malheureusement, ce sont des détendeurs communément fabriqués aujourd'hui.

Les dispositifs antigivrants ne sont, dans ce cas, que des palliatifs partiels à ce problème. Cependant, ces dernières années, certains fabricants, comme Scubapro, ont réalisé de gros progrès en utilisant des pièces ou des revêtements isolants.

Les détendeurs à membrane et à clapet compensé ou non, ont une disposition assez satisfaisante, mais peuvent tout à fait givrer, en cas de froid intense.

Quand le détendeur débite, une carapace de glace se forme sur la membrane, la maintenant en position enfoncée. C'est le débit continu. La formation de cette carapace de glace n'est toutefois pas instantanée.

Dans le cas du détendeur à piston, le joint torique qui entoure le piston se colle au métal. Le piston se bloque alors, en général en position ouverte. Les détendeurs à piston peuvent givrer instantanément en une seule inspiration !

Les mêmes phénomènes se produisent, avant ou après la plongée, surtout en surface lorsque l'air est froid. En effet, l'air environnant le premier étage évacue moins bien les frigories que l'eau.

La température du premier étage chute alors rapidement et congèle l'eau ou la vapeur résiduelle qui se trouve dans la chambre humide à pression ambiante. Le givrage intervient ainsi très rapidement. En conséquence, à basse température, il est préférable de tester un détendeur dans l'eau plutôt que dans l'air.

L'endroit le plus froid du détendeur se trouve à la sortie du clapet, dans la cavité moyenne pression du premier étage. C'est en effet là que se produit la détente de l'air la plus importante.

Comme nous l'avons déjà vu, des températures de l'ordre de -100 degrés Celsius peuvent y exister de façon transitoire. La cloison qui protège la membrane (Voir figure 19) empêche l'air glacé d'être projeté sur celle-ci et réduit donc la possibilité de geler l'eau qui se trouve de l'autre coté.

L'air présent dans la bouteille devrait être parfaitement sec. Toutefois, il arrive que certaines bouteilles contiennent un peu d’eau ou de vapeur d'eau.

Si cette eau est injectée dans le premier étage du détendeur, elle se congèle immédiatement et bloque le clapet en position ouverte. (Voir figure 45)

X-4-2 Au deuxième étage

(*Voir figure 46*)

Les boîtiers métalliques sont, en théorie, moins sensibles au givrage. Cependant une accumulation rapide de glace peut se produire sur les zones sensibles comme la portée de la soupape d'expiration. Ceci, par la suite, génère des entrées d'eau.

Au test de givrage, dès l'entrée d'eau, le phénomène s'accélère et ces boîtiers accumulent très vite une grande quantité de glace.

La détente étant moins importante, la production de froid est plus faible dans le deuxième étage que dans le premier. D'autre part, l'air expiré par le plongeur le réchauffe.

Toutefois, cet air expiré contient de la vapeur d'eau qui, dans certaines configurations, peut se condenser, puis geler sur les parties métalliques de l'ensemble levier, clapet et siège.

Ceci provoque un défaut d'étanchéité et un débit continu, d'abord léger puis plus violent, entraînant parfois aussi le givrage du premier étage. On peut essayer, tout au début, de noyer le deuxième étage dans l'espoir de le réchauffer tout de suite et de stopper le débit continu.

Ces phénomènes assez complexes ont donné lieu à de nombreuses améliorations ces dernières années.

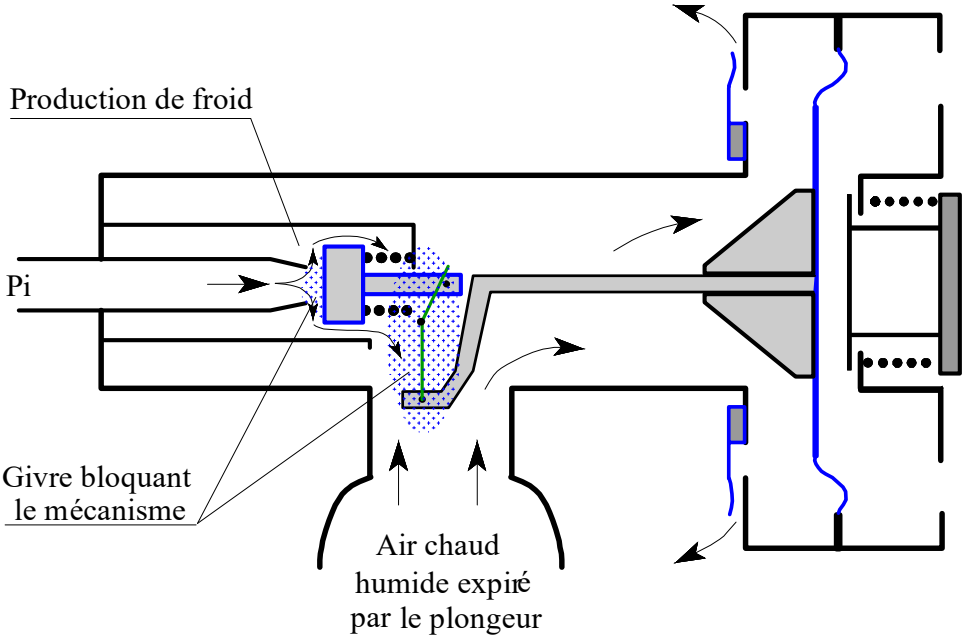


Figure 46- Le froid au deuxième étage

Dans un détendeur à tuyaux annelés, l'expiration étant bien séparée de l'inspiration, ce risque n'existe pratiquement pas. Voir l'ancien Mistral de Spirotechnique et le nouveau Mistral d'Aqualung.

X-5 Mesures de protection anti-givrage

En raison des refroidissements évoqués ci-dessus, il suffit que la température ambiante soit de l'ordre de quelques degrés pour que la vapeur d'eau qui vient de la bouteille puisse se condenser et geler.

Il en est de même pour celle expirée par le plongeur, celle qui se trouve dans les chambres humides ou pour l'eau qui a pénétré accidentellement dans les chambres sèches du détendeur.

Différentes précautions peuvent être prises :

X-5-1 Au gonflage

Éviter la pénétration d'eau dans les bouteilles en commençant par bien purger la robinetterie. (Certaines robinetteries se purge moins facilement que d'autres) En vérifier régulièrement l'intérieur. Rendre l'air des bouteilles aussi sec que possible. Ceci est obtenu par différentes purges et filtrations du compresseur mais peut aussi être considérablement amélioré par congélation de la vapeur d'eau, contenue dans l'air de sortie. Cette solution, très chère, n'est guère utilisée que dans le domaine professionnel.

X-5-2 Au premier étage

Isolation par un liquide *(Voir figure 47)*

Interposer une chambre remplie de glycol ou d'huile au silicone entre la membrane et l'eau ambiante. Cette huile est séparée du milieu ambiant par une membrane souple. Elle évite la formation de glace sur la membrane principale.

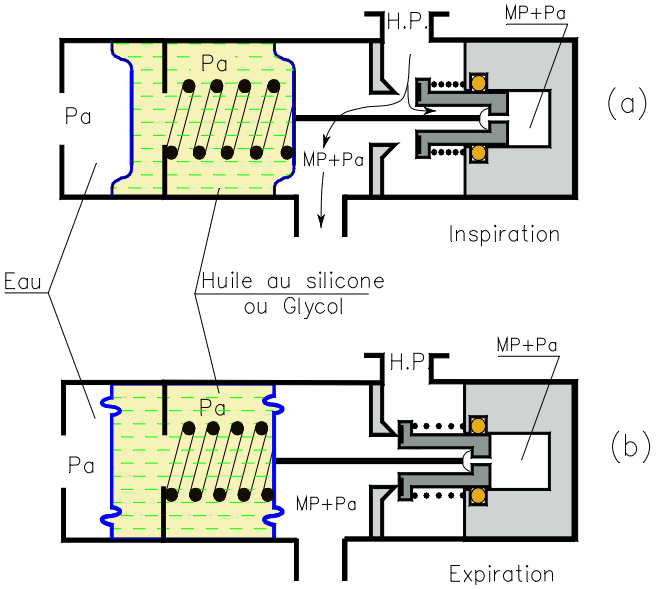


Figure 47- Protection du premier étage par de l'huile

Plus la température de l'eau ambiante est basse, plus le risque de givrage est grand. La température limite est généralement de l'ordre de quelques degrés au-dessus de zéro mais elle est d'autant plus basse que la température de solidification du liquide d'isolement est elle-même basse.
De plus les huiles ou graisses utilisées sont incompatibles avec l'oxygène. Voir le chapitre suivant.

Isolation par de l'air

(Voir figure 48)

La chambre du ressort principal peut aussi être maintenue pleine d'air par une micro fuite et une soupape de non-retour, similaire à celle d'expiration. (Exemple le détendeur Sherwood de la figure 48a) Elle peut également être remplie d'air, l'huile étant remplacée par un pointeau poussoir. (figure 48b)

Cette solution est très performante et, comme nous l'avons déjà vu, elle permet en plus de réaliser une surcompensation en fonction de la pression ambiante.

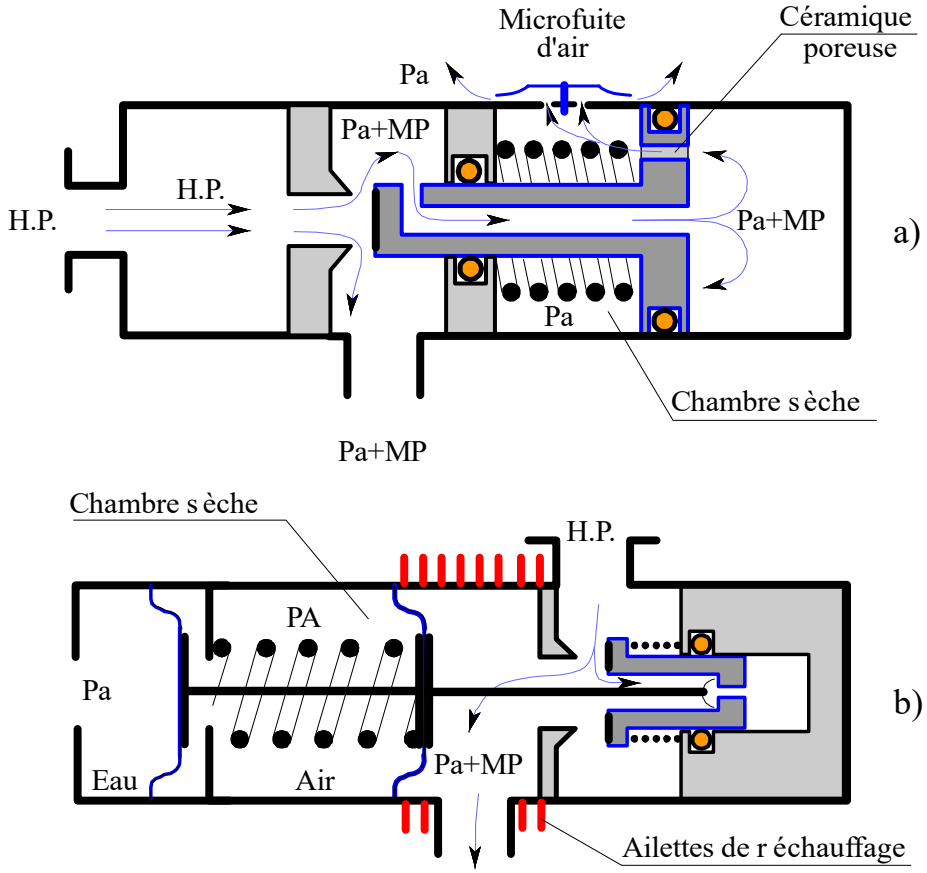


Figure 48 - Protection du premier étage par chambres sèches

Ces trois systèmes ont en outre l'avantage d'isoler le mécanisme du détendeur du milieu ambiant et de lui permettre de fonctionner en eaux très chargées.

Nous devons noter le cas particulier du détendeur "Sherwood SR[1]" dont la chambre du ressort principal du 1[er] étage à piston est aussi isolée par une membrane.
On utilise souvent des ailettes de réchauffement sur la chambre où l'air se détend. (Voir figure 48b) Les calories de l'eau ambiante réchauffent le mécanisme.

Les raccords DIN sont supposés être supérieurs aux étriers pour faciliter les échanges thermiques avec l'eau ambiante mais ce n'est pas prouvé.

X-5-3 Au deuxième étage

(Voir figure 49)

Le problème est devenu plus crucial depuis que les boîtiers, au lieu d'être métalliques, sont réalisés en résines synthétiques. Les fabricants, conscients de ce problème, réutilisent le métal dans les deuxièmes étages.

Plusieurs moyens sont simultanément utilisés :

- Réchauffer les pièces par l'eau ambiante, forcément plus chaude, en ajoutant des échangeurs thermiques, sous forme d'ailettes. (Voir figure 49)
- Disposer les pièces sensibles à l'opposé des sources froides ou humides et de l'air expiré.

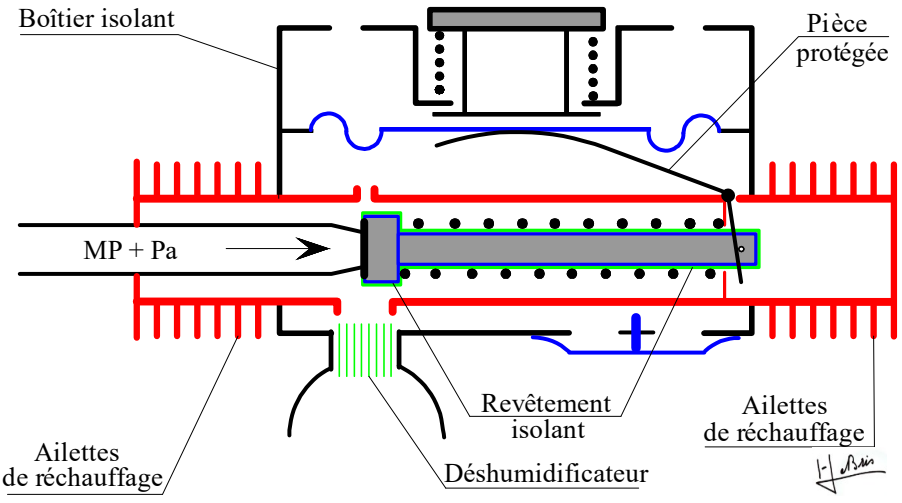


Figure 49 - Protection du deuxième étage

- Réduire la détente de l'air en réduisant la MP de près de 10%, au dépend d'une légère perte de performance.
- Limiter le débit maximum que l'on peut provoquer, en limitant la course du bouton de purge ou celui du levier, en position pré dive.
- Empêcher les cristaux de glace de se fixer sur la plupart des pièces en les réalisant en matières isolantes ou en les recouvrant d'isolant tel que le téflon ou le rilsan.

Froid + eau ⇒ glace compacte ; Froid + vapeur d'eau ⇒ givre.

Dans les détendeurs Sherwood, la vapeur d'eau venant de la respiration du plongeur est récupérée par un déshumidificateur avant qu'elle ne se dépose sur le mécanisme où elle risquerait de provoquer du givre.

- Au milieu du tuyau MP, on ajoute un échangeur thermique qui réchauffe l'air venant du premier étage. (Voir photo 11)

On remarque à ce sujet que dans le nouveau Mistral, Aqualung propose pour la même raison un tuyau court pour les eaux tempérées et un tuyau long pour les eaux froides ce qui permet un meilleur réchauffement de l'air.

Marès réalise les boîtiers de ses seconds étages dans un matériau non métallique à bonne conductibilité thermique : "Thermoconductive nano technopolymers"

Pour éviter le givrage, lors de l'utilisation, les précautions suivantes sont nécessaires :

- Vérifier que les bouteilles utilisées sont parfaitement sèches à l'intérieur et renouveler fréquemment le filtre assécheur du compresseur
- Respecter les consignes de gonflage en purgeant les robinetteries avant de raccorder les bouteilles.
- Ne pas utiliser de détendeur ordinaire à premier étage à buse mobile, même muni d'accessoires antigivrants.
- Éviter les détendeurs dans lesquels l'air expiré par le plongeur vient lécher le clapet.
- Ne pas protéger le premier étage par une protection contre les eaux chargées. Elles empêchent une bonne circulation de l'eau.
- Ne pas utiliser les détendeurs qui ont déjà une tendance au débit continu.
- Ne pas actionner le bouton de purge dans l'air, préférer tester cette fonction en immersion.
- En immersion, lorsqu'il y a risque de givrage, expirer de préférence par le nez pour éviter d'envoyer de la vapeur d'eau sur le mécanisme du 2^{e} étage.

- Garder bien en tête que le débit est la première cause de givrage. Contrôler sa respiration et éviter les efforts trop violents en eau froide.
- Ne pas utiliser le même premier étage pour simultanément respirer et gonfler un gilet, un vêtement sec, un parachute ou donner de l'air en assistance.
- Pour plonger en eau froide, choisir un détendeur conçu pour cela. (Depuis la sortie de la norme EN250-2000, chez Aqualung, ils sont repérés par un logo représentant un cristal de glace)

Conclusions :

Le givrage est un incident qui peut conduire à un accident. Les mêmes causes produisant les mêmes effets, il peut impliquer les deux étages. Par ailleurs, la formation de glace n'étant pas instantanée, le givrage peut survenir lorsque le plongeur, par exemple en plongée souterraine, est profondément engagé.

La règle du matériel en double ne constitue donc pas une réponse suffisante à ce problème.

On peut regretter que la résistance au froid des détendeurs ne soit pas mieux quantifiée. Nous savons certes qu'ils dépassent les exigences de la directive mais de combien, nous n'en savons rien. On ne peut donc comparer différents détendeurs du point de vue de leur résistance aux basses températures.

Il serait intéressant que l'on connaisse les performances des détendeurs en donnant, par exemple, la température minimum qu'ils peuvent supporter sans givrer, toutes choses étant égales par ailleurs.

****

Premier étage V32 à membrane compensé

Deuxième étage Proton Ice Extreme

Exclusif ?

Actuellement, Mares propose un détendeur, le Proton Ice Extreme, répondant à la norme de l'US Navy beaucoup plus restrictive (60 minutes à 50m, avec un débit de 62.5lt./min dans de l'eau à -1.7°C). Autrement, dans les modèles ayant fait leurs preuves, ont trouvera la gamme Apeks (laquasi totalité des modèles), l'Abyss et le Proton métal de Mares, les Poséidons X-stream et Jetstream, ainsi que l'ancien Spiro Artic. Le triton 2000 de Poséidons est par contre à éviter. Chez **Scubapro**, les modèles avec le 1er étage MK19 à membrane sont particulièrement résistant au givrage, par exemple le MK19-G250V répond aussi à la norme US.

Remarque : *Aucun fabricant ne peut garantir le bon usage d'un détendeur ainsi que la qualité de l'air utilisé. En conséquence, aucun détendeur n'est garanti à 100 % contre le givrage.*

Photo 12 - Le "Glacia" de Aqualung
Ce détendeur est conçu spécialement pour résister au froid.
On distingue très bien les radiateurs : au premier étage, au deuxième étage et au milieu du tuyau MP

Photo 13 - Le casque bulle LAMA (années 80)
Il était équipé de différents types de détendeur suivant le contexte de son utilisation. On a pu le voir dans une séquence du film « Grand Bleu ».

Il est impossible de citer toutes les inventions de Yves Le Masson tant la liste en est impressionnante.

- Un premier recycleur en circuit semi-fermé dès 1949. (Il avait 16 ans)

- Les détendeurs pilotés à fuite d'air "Micronic" parmi les plus petits détendeurs jamais réalisés. (1965)

- Le cyclo-Flow pour récupérer les gaz expirés lors des plongées profondes ou dans les caissons hyperbares. (Années 60)

- Le SCANUBA développé en collaboration avec J.C Le Péchon (1990)

- La machine à respirer (1996) destinée à simuler la respiration humaine pour l'évaluation des appareils respiratoires, automatique, pilotée par ordinateur est susceptible de reproduire outre la respiration sinusoïdale imposée par la normalisation mais aussi et surtout n'importe quel cycle respiratoire pré-enregistrés sur l'homme. (exercice physique calibré, mais aussi toux, chant, langage parlé…)

Cette machine qui consomme l'oxygène et produit du gaz carbonique avec un quotient respiratoire choisi par l'utilisateur est une pure merveille technologique.

CHAPITRE XI

DÉTENDEURS ET OXYGÈNE

L'utilisation de mélanges enrichis, voire d'oxygène pur pose des problèmes de sécurité pour l'ensemble du matériel concerné et plus particulièrement les détendeurs. La plupart des matériaux s'enflamment spontanément si la température et la pression partielle d'O_2 sont suffisantes.(*Voir figure 15*)

XI-1 Processus d'un accident

Lorsqu'on ouvre une bouteille pour alimenter un détendeur, le premier étage se referme rapidement et la pression dans la chambre haute pression peut passer brusquement de 1 à 200 bars. Il en résulte une forte augmentation de la température.

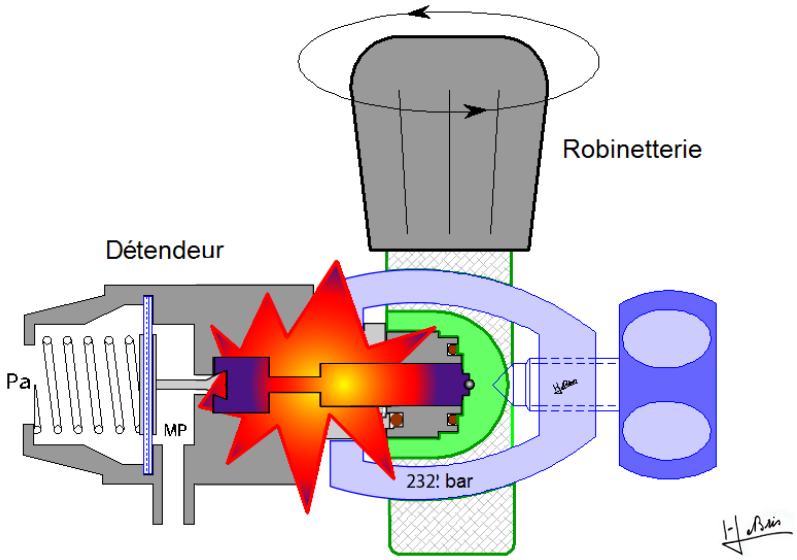


Figure 50 - Le coup de feu

Si l'on a affaire à un mélange enrichi en oxygène et que dans cette chambre se trouve la moindre trace de combustible, celui-ci risque de s'enflammer en auto allumage puis d'enflammer le métal environnant. Cette inflammation va se propager jusqu'à l'explosion du volume concerné avec projection de gaz à haute température et de métal en fusion. C'est ce qu'on appelle un "**Coup de feu**".

L'augmentation de température dépend de la variation de pression et de la vitesse à laquelle elle s'établit. Le contact du corps du détendeur avec l'extérieur participe certes à son refroidissement mais, si l'élévation est très rapide, on se trouve dans une compression adiabatique, comme s'il n'y avait pas d'échange thermique avec l'extérieure.

L'inflammation dépend de la "disponibilité de l'oxygène" donc de sa pression partielle qui peut être extrêmement élevée (Sous 200 bars un 50/50 fait un peu plus de 100 bars de PO_2 ce qui n'est pas rien), avec cependant un effet retardateur important du fait de la présence de gaz diluant qui limite la diffusion de l'oxygène au point de combustion et, dans le cas de l'hélium, favorise le refroidissement et donc ralenti la vitesse de combustion.

XI-2 Les éléments combustibles

XI-2-1 La graisse

Pour éviter les frottements secs, les détendeurs sont lubrifiés avec de la graisse mais celle-ci peut aussi être introduite par sa présence dans l'air, d'un manque de propreté lors du montage ou de la maintenance, des mains grasses ou tout simplement par la transpiration. Or la graisse constitue un combustible idéal.

Il existe cependant des graisses O_2 haute pression qui permettent leur utilisation dans les détendeurs. Sous toute réserve, nous en avons noté quelques unes :

"AbyssNaut ITN25" – "Tribolub71" – "Fomblin" -– Krystox 250AC – Oxygenox FF250 – "Christo-lube^{TM}(MCG111) Cette dernière semble faire l'unanimité. On notera que quelques fabricants utilisent systématiquement ces graisses pour tous leurs détendeurs.

Il faut toujours utiliser la graisse recommandée par le fabricant et surtout ne pas les mélanger. En fait, il n'y a pas de graisse qui résiste parfaitement à une inflammation en présence d'oxygène. On prend donc la meilleure possible. Il faut de plus que les précautions nécessaires soient prises pour éviter les autres causes de pollution.

XI-2-2 Les joints

Tous les détendeurs possèdent des joints. Ceux-ci doivent être en matériau répondant à une norme qui impose une résistance à l'inflammation, à la pression et à la chaleur. Ils sont réalisés en Silicone, Viton ou nitrile, hypertane pour les hautes pressions. Mais la norme a des limites.

XI-2-3 Les poussières

Elles peuvent être constituées d'éléments organiques ou métalliques. Elles peuvent avoir été introduites accidentellement soit à la sortie de la robinetterie soit à l'entrée du détendeur.

XI-3 Normalisation oxygéne

Afin de faciliter le respect des directives européennes deux normes ont été crées. :

- La norme NF EN1349 de novembre 2003 concerne plus particulièrement le matériel destiné aux "*Appareils respiratoires de plongée autonome à circuit ouvert utilisant du nitrox et de l'oxygène comprimé".*

Elle concerne des teneurs en O_2 supérieure à 25%. Au paragraphe 5-2, cette norme spécifie les conditions d'essai de résistance à l'inflammation. On notera qu'aux USA, la limite de l'O_2 est fixée à 40%

Les détendeurs doivent résister à une vingtaine de montées brutales à 240 bars d'O_2 à une température ambiante de 60°C.

La norme NF EN 144-3, d'application obligatoire depuis novembre 2008, s'applique aux raccords filetés entre les robinetteries des bouteilles et les détendeurs.

Elle en spécifie les dimensions et les tolérances. Elle a pour but d'éviter de mélanger le matériel utilisant des mélanges enrichis, voire de l'oxygène pur, avec celui n'utilisant que de l'air.

Ces raccords sont similaires au DIN mais avec filetage ISO M26x2 6H. Comme pour les raccords air, un détrompage existe entre le 200 et le 300 bars. Le marquage "Nitrox" ou "O_2" ou "Nitrox/O_2" doit être apposé sur les sous-ensembles suivants : le corps du robinet de la bouteille, le détendeur à la demande, le ou les dispositifs de sécurité.

On notera que ceci concerne la mise sur le marché de nouveaux matériels. Pour l'instant, les anciens raccords conformes à la norme en vigueur au moment de leur achat sont toujours utilisables.

Cependant, il deviendra de plus en plus difficile de charger avec du nitrox des bouteilles non conformes à cette norme. De même on ne pourra plus monter les nouveaux détendeurs sur des anciennes bouteilles sans changer de robinetterie.

XI-4 <u>Rappel des précautions à prendre</u>

- Toujours ouvrir lentement une bouteille contenant un mélange suroxygéné pour éviter une montée trop rapide de pression dans le premier étage du détendeur. C'est une des raisons pour lesquelles la norme impose l'ouverture des robinetteries en un minimum de 2 tours.
- Protéger les sorties des robinetteries et les entrées des détendeurs contre les contaminations.
- Effectuer une purge de la robinetterie vers un espace libre et vérifier la propreté de l'entrée du détendeur et de son filtre avant de le raccorder.

- Maintenir la compatibilité des robinetteries et des détendeurs avec l'utilisation d'oxygène. Pour cela, il faut périodiquement et à chaque fois qu'ils ont pu être contaminés, les démonter complètement, procéder à un nettoyage méticuleux pour éliminer tous les contaminants et particulièrement les graisses autres que celles prévues.
- Remplacer les joints par des joints et de la graisse compatible oxygène.
- Opérer dans de bonnes conditions de propreté.
- En cas de fuite, même légère, imposer une distance de sécurité et si possible mettre la bouteille et le détendeur en espace libre.
- Faire contrôler et entretenir le matériel oxygène par un spécialiste.
- Respecter la procédure oxygène des Techniciens en Inspection Visuelle ainsi que les recommandations des constructeurs.
- Surveiller le compresseur et les filtres, mal entretenus, ils peuvent diffuser des vapeurs de graisse dans les bouteilles de plongée, graisse qui va donc se retrouver dans les détendeurs.
- Ne pas mélanger le matériel ou l'outillage destiné aux mélanges avec celui destiné à l'air comprimé.

Photo 14 - Filtre complémentaire

- Sous le nom de "Bio-Filter", il est possible d'utiliser un filtre complémentaire à la sortie du premier étage pour éliminer les particules très fines susceptibles de s'enflammer. Il permet aussi d'injecter de l'eau pour humidifier le mélange respiré. (*Par contre, cela est contraire à toutes les recommandations contre le givrage*) Voir la photo ci-dessus.

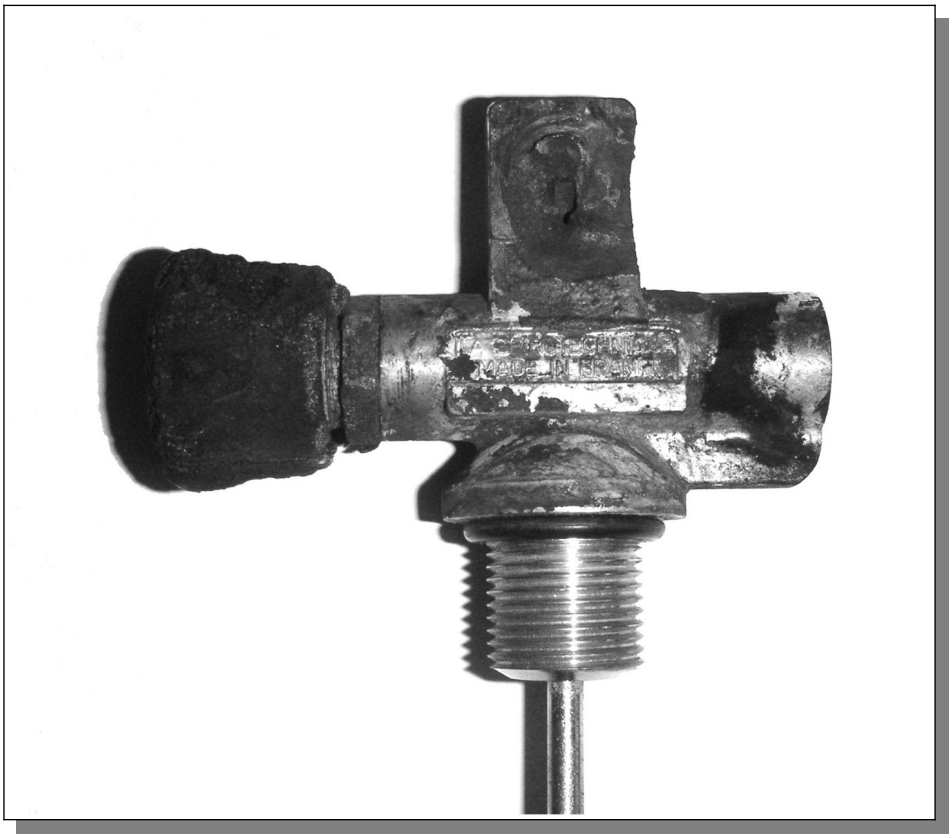


Photo 15 - Coup de feu dans une robinetterie
Photographie : Didier Lefevre

****

CHAPITRE XII

LES ACCESSOIRES

Les détendeurs modernes sont souvent équipés d'accessoires utiles voire indispensables. Pour cela, le premier étage possède un certain nombre de sorties hautes et moyennes pressions. (*Voir figure 51*)

XII-1 Les sorties d'un premier étage (*Voir photo 16*)

En général, on trouve 2 sorties HP en 7/16 de pouce et 3 sorties MP en 3/8 de pouce ce qui permet de les détromper. On trouve quelque-fois une sortie MP en ½ pouce pour le détendeur principal. (*Le pouce est une mesure anglaise qui vaut 25,4 mm*)

Lorsque le premier étage est muni d'une tourelle, on trouve jusqu'à 5 sorties MP. C'est souvent le cas des détendeurs à buse mobile.

XII-1-1 Les sorties "Haute Pression"

Elles permettent de connecter un manomètre Haute Pression ou/et un émetteur pour transmettre, sans fil, la pression vers un ordinateur de plongée fixé au poignet du plongeur.

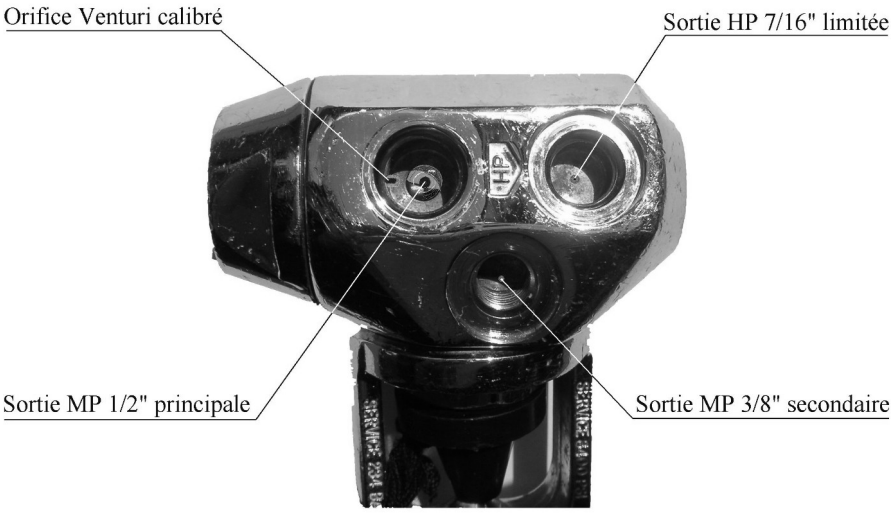


Photo 16 - Sorties hautes et moyennes pression

Elles ne nécessitent pas de débit. Dans les détendeurs actuels, un trou très petit est intégré dans les sorties HP du premier étage de façon qu'en cas de rupture du tuyau la bouteille ne puisse se vider que très lentement. Il évite aussi de provoquer un coup de bélier sur le manomètre à l'ouverture de la bouteille.

Ceci explique que, pour purger un détendeur, il est nécessaire d'insister un temps suffisamment long pour purger à la fois le tuyau et le manomètre. Dans les détendeurs anciens, ce petit trou n'existant pas, on ajoutait un raccord spécial percé lui-même d'un petit trou.

XI1-1-2 Les sorties "Moyenne Pression"

Les sorties M.P. ne sont pas toujours identiques. L'une d'entre elles, au moins, est destinée à alimenter un deuxième étage. Elle est appelée sortie principale. Elle permet un haut débit et pour cela possède souvent une assistance par effet Venturi. (Voir le chapitre IX) Cette sortie Parfois appelée "Super Flow" n'est pas toujours repérée, l'utilisateur devra donc lui-même l'identifier. Une telle sortie, à défaut de repérage, se reconnaît, soit par un bouchon plus gros, soit bouchon enlevé, par la présence d'un petit orifice latéral, à coté du trou principal. (Voir & IX-2-1, figure 40 et photo 16)

Pour des raisons de réalisation, il n'est pas toujours facile d'assister toutes les sorties MP sauf pour les détendeurs à buse mobile. (*Voir la figure 42*) Les sorties non assistées, secondaires, sont utilisées pour gonfler la bouée, le vêtement sec ou pour un outillage particulier. Pour alimenter un second deuxième étage, elles s'avèrent de débit insuffisant.

XII-2 Utilisation de deux seconds étages

Nous avons vu, au paragraphe V-3, qu'il fallait prendre quelques précautions pour associer premiers et deuxièmes étages. Ce cas devient encore plus critique lorsqu'on veut utiliser 2 deuxièmes étages sur un seul premier étage.

Pour qu'un deuxième étage fonctionne correctement, à moins qu'il ne soit compensé, il faut qu'il soit alimenté avec une pression bien précise, variable selon les modèles mais ceci n'est pas toujours suffisant.

XII-2-1 L'Octopus

C'est un deuxième étage supplémentaire, de secours, qui se branche sur l'une des sorties MP disponibles mais, comme nous l'avons vu plus haut, il n'y a pas toujours de sorties à grand débit disponibles. On risque alors de se connecter à une sortie à faible débit ne permettant pas de tenir les performances requises.

Il faut savoir que la norme EN250 prévoit un débit de 62,5 litres minute à 50 mètres pour chaque source d'air et que le débit du premier étage peut donc dans certains cas être insuffisant pour deux deuxièmes étages. De plus, il faut que la MP nécessaire à l'entrée de chacun des seconds étages soit compatible avec la MP à la sortie du premier.

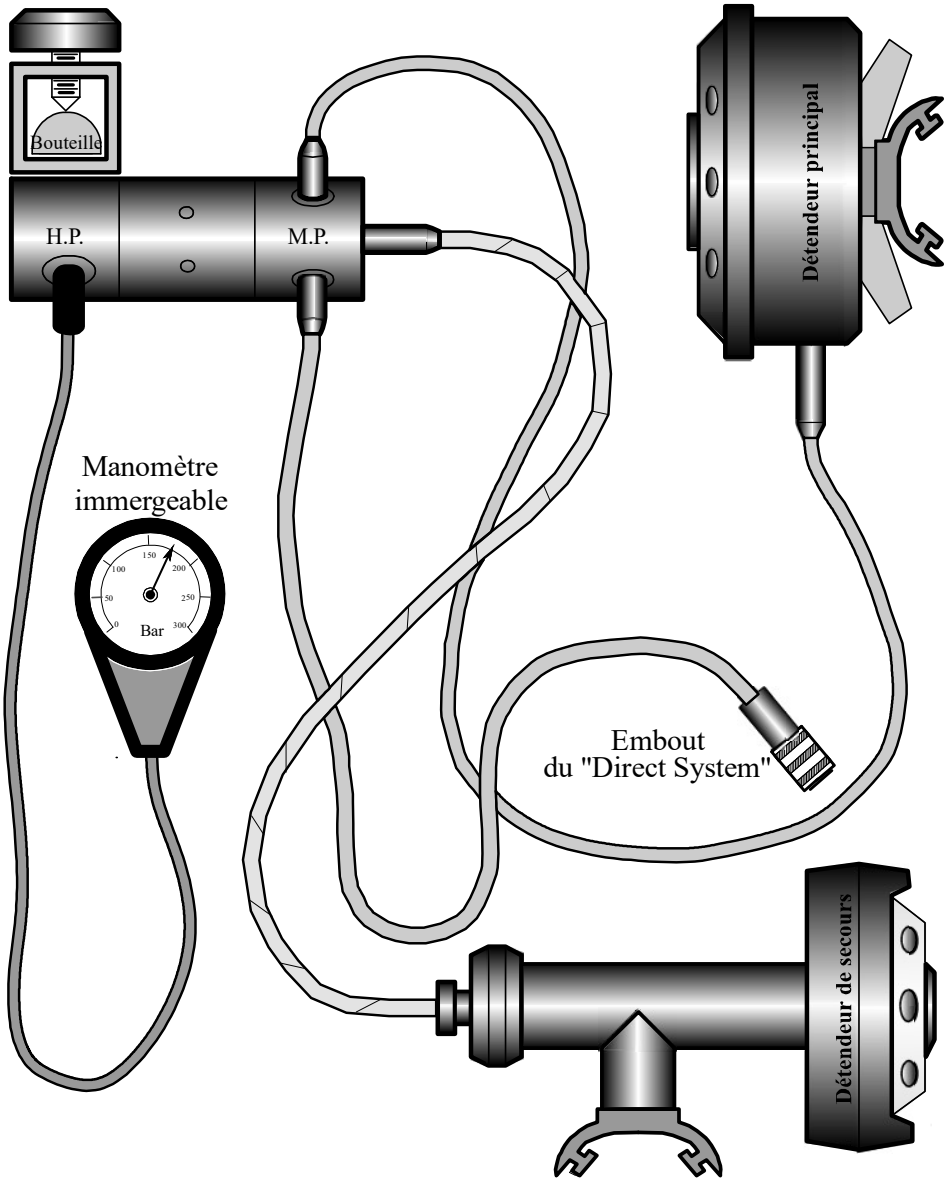


Figure 51 - Les accessoires dans le système Octopus

L'utilisation de 2 seconds étages différents ne doit pouvoir se faire qu'après avoir subi un test de qualification.

Certains mariages peuvent se faire sans problèmes à condition de suivre les conseils des fabricants. Cependant, il arrive que les plongeurs associent des deuxièmes étages très différents. Soit qu'ils veulent faire l'économie d'un

détendeur haut de gamme soit qu'ils disposent déjà d'un deuxième étage différent, voire ancien.

Ceci peut être dangereux car, si un plongeur utilise le détendeur principal, il risque d'absorber la plus grande partie de l'air disponible au premier étage. Le plongeur respirant sur le deuxième étage de secours risque alors de ne pas disposer d'un débit suffisant, surtout si les 2 plongeurs respirent en phase. Il est donc souhaitable que les deux deuxièmes étages soient testés simultanément, qu'ils soient compensés et mieux encore, qu'ils soient identiques.

Un détendeur ainsi équipé est assimilé à une pieuvre d'où le nom "Octopus" ou "Système octopus" donné à cet ensemble. (Voir figure 51) Cependant une dérive de langage, venant des Anglo-saxons, fait qu'on appelle "Octopus" le détendeur de secours seul.

Le tuyau du détendeur usuel a en général une longueur de l'ordre de 80 cm. Celui du détendeur de secours une longueur de l'ordre de 100 cm, voire davantage. Ce dernier est souvent de couleur jaune pour être facilement repérable. Pour éviter que le détendeur ne traîne sur le fond et ne s'abîme, il est souhaitable qu'il soit fixé par une attache facile à décrocher et visible, en un endroit accessible, de préférence sur la poitrine du plongeur.

Photo 17 - Détendeur de secours réversible "Egress" de Apeks

Remarques :

1) Quand on achète un deuxième étage de ce type avec son tuyau, il faut s'assurer que les filetages sont compatibles, soit en 3/8, soit en ½ pouce. Il est aussi souhaitable qu'il soit réversible, c'est-à-dire qu'il puisse être utilisé aussi bien à droite qu'à gauche, par soi-même ou par un autre, sans contrainte sur le tuyau. (Voir photo 17)
2) Le détendeur de secours est destiné à assister un plongeur en manque d'air. Il doit donc être positionné au mieux pour cet usage, ce qui ne doit pas exclure son utilisation par son propriétaire.
3) Lorsqu'on utilise une double robinetterie, avec 2 détendeurs indépendants, si l'un des joints saute, on a la ressource de fermer le robinet correspondant. Avec une robinetterie à une seule sortie, la probabilité de rupture est 2 fois plus faible. Par contre, si cela se produit, il n'y a pas de possibilité d'y remédier pendant l'immersion.

XII-3 Le manomètre Haute Pression immergeable

(*Voir figure 51*)

C'est un manomètre connecté par un tuyau souple à la chambre HP du détendeur. Il indique une pression absolue. Il permet au plongeur de connaître à tout moment, en plongée, la pression restant dans sa bouteille et par conséquent d'estimer son autonomie.

Il est parfois incorporé dans une console avec le profondimètre et le compas. Il remplace avantageusement le système de réserve dont la fiabilité s'avère insuffisante.

XI1-4 L'ordinateur de plongée et la gestion de l'air

Lorsqu'il gère la consommation d'air, l'ordinateur est relié à une sortie HP du premier étage du détendeur. La liaison peut se faire par un tuyau souple comme pour le manomètre immergeables. Le capteur se trouve alors dans l'ordinateur lui-même.

La tendance est aujourd'hui d'utiliser une liaison sans support physique. On utilise pour cela un champ magnétique modulé en phase. (Phase Shift Keyed) Le capteur se trouve alors associé à un émetteur fixé à une sortie HP du détendeur. (Voir, entre autre, l'Aladin Air Z, le Galileo d'Uwatec, le Vytec et la montre ordinateur D9 de Suunto ...)

Pour une meilleure transmission, l'axe de l'émetteur doit généralement être parallèle à la ligne des épaules du plongeur. A ce sujet, vous pouvez consulter "Les ordinateurs de plongée", ou le site < http://hlbmatos.free.fr > du même auteur.

L'ordinateur complet peut aussi être fixé au 1er étage du détendeur. Seul l'affichage se trouve alors avec le récepteur fixé au poignet du plongeur. (Voir les ordinateurs du fabricant Cochran)

XII-5 Le "Direct System "

(Voir figure 51)

Il est constitué par un tuyau souple relié à la chambre moyenne pression du détendeur. Il se termine par un connecteur pneumatique rapide avec une valve d'obturation automatique. La partie mâle au bout du tuyau s'appelle "l'about". La partie femelle solidaire de la bouée s'appelle "l'embout".

Ce système permet, en immersion, de gonfler rapidement une bouée de stabilisation ou un vêtement sec. Il est alors associé à un "combiné" qui comporte un inflateur, une purge et parfois un détendeur de secours. On peut y adjoindre un sifflet d'alarme pneumatique (Voir figure 52d) ou même, en cas de nécessité, y connecter la trompe de brume du bateau.

Éventuellement, il peut alimenter un petit outil pneumatique. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser une source d'air séparée avec un premier étage indépendant et une soupape de sûreté.

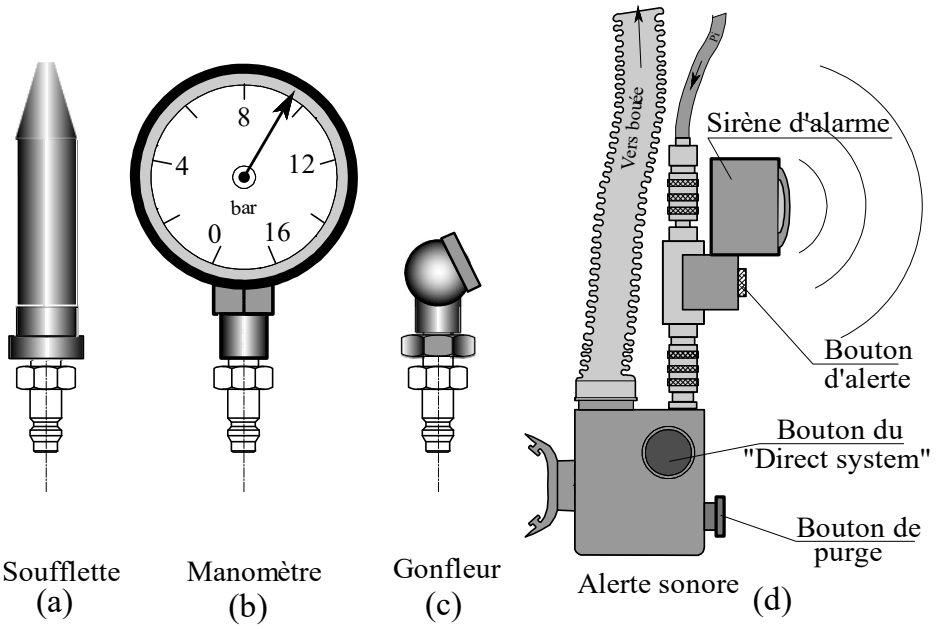


Figure 52 - Accessoires divers

À terre, le "Direct system" permet, à l'aide d'accessoires appropriés, de gonfler un bateau pneumatique, une chambre à air de voiture ou de vérifier la moyenne pression à la sortie d'un premier étage.

Il permet aussi de disposer d'une soufflette à air comprimé bien utile pour effectuer certains nettoyages mais aussi pour allumer le barbecue. Il peut même, sous certaines réserves, être connecté à un pistolet à peinture.

On distingue deux types de valves plus ou moins standardisées à la sortie de l'embout. Ces valves ont pour but d'éviter les fuites d'air lorsque l'embout est déconnecté. (Il existe des adaptateurs pour les différents modèles)

XII-5-1 Connecteur pneumatique à valve Schrader

C'est le plus répandu, le débit en est moyen. La valve est similaire à celles utilisées pour les chambres à air de voiture. (Voir figure 53)

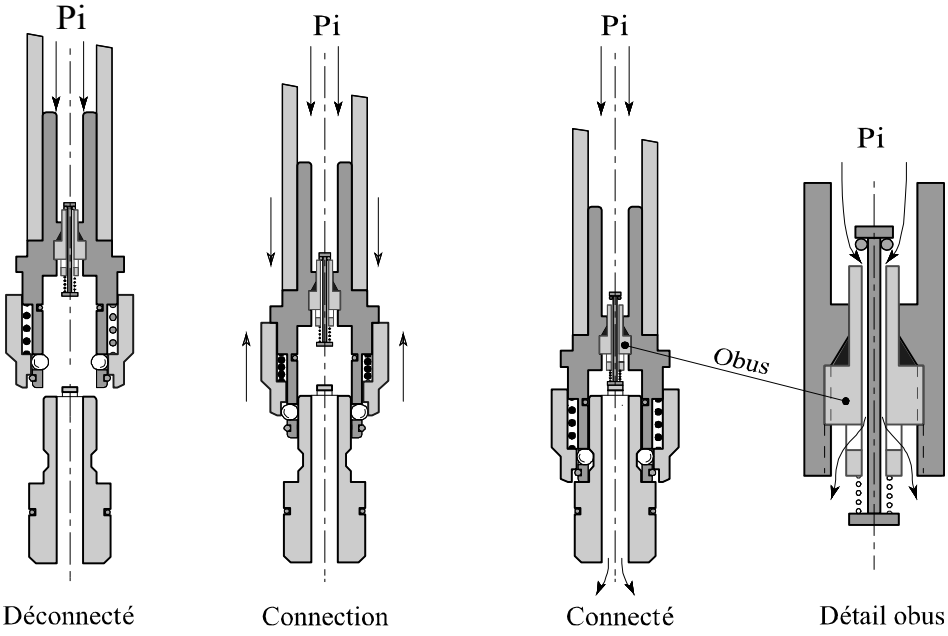


Figure 53 - Connecteur à valve Schrader

XII-5-2 Connecteur pneumatique à gros débit

Il a un débit beaucoup plus important que la valve Schrader ce qui est avantageux pour le gonflage des bouées en profondeur. Il permet aussi d'utiliser un combiné intégrant un 2e étage de secours. (Voir figure 54)

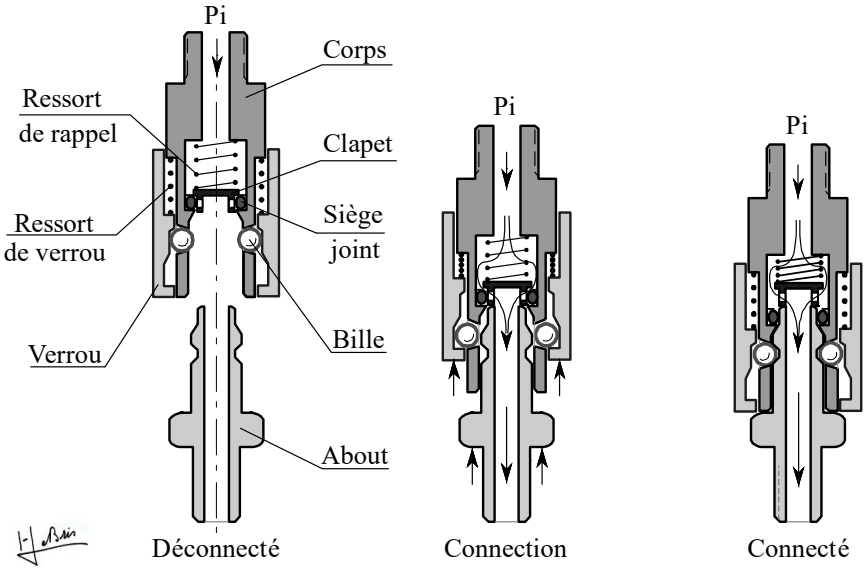


Figure 54 - Connecteur à gros débit

XII-6 Les combinés

XII-6-1 Le combiné " Air Two " de Scubapro

Conformément aux figures 55 et 56, dont elles s'inspirent, il comporte 3 boutons pour son utilisation : (Voir aussi la photo 16)

- Le bouton (1) permet de gonfler la bouée à partir de la MP (Sur certains, il actionne une valve du type Schrader)

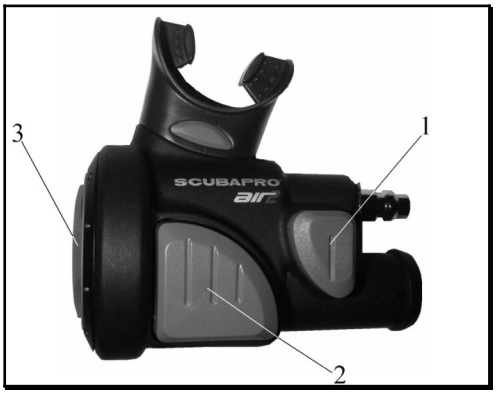


Photo 18 - AIR 2 de Scubapro (Version 4)

- Le bouton (2) permet de fermer la soupape d'expiration du détendeur et simultanément d'ouvrir l'accès à la bouée, ce qui permet de gonfler celle-ci à la bouche ou de la purger.

• Le bouton (3) permet de faire fuser le détendeur.

Remarques :

1. Ces combinés : inflateur, purge et deuxième étage de secours sont plutôt des accessoires de bouées. Nous en parlons à cause de leur fonction détendeur. Il existe d'ailleurs des combinés, sans détendeurs, intégrés aux enveloppes de bouées.
2. Pour des raisons physiologiques, le gonflage à la bouche n'est pas recommandé en immersion et particulièrement pendant la remontée. Cependant, en cas de nécessité, pour gonfler la bouée de cette façon, il faut pousser à fond sur le poussoir sinon, le clapet se trouve en position intermédiaire et la bouée se vide par la soupape d'expiration. (6) Si le connecteur MP est débranché et que l'on tente de respirer par l'embout, on risque d'aspirer de l'eau.
3. Le siège (4) est réglable, avec un simple tournevis, après avoir déconnecté l'about. Il existe un outillage spécifique pour le régler sous pression.
4. Le clapet de gonflage manuel (1) est du type aval, compensé par piston. Cela permet de l'utiliser quelle que soit la moyenne pression.
5. Quand le connecteur moyenne pression est déconnecté, de l'eau chargée ou du sable peut pénétrer dans le détendeur et venir bloquer l'un des mécanismes. Auquel cas, le détendeur peut fuir ou la bouée se gonfler toute seule. Ce sont les pannes les plus fréquentes. Certains fabricants fournissent un bouchon de protection pour éviter cet inconvénient.
6. Dans les premières versions de ce combiné, le siège réglable était du type mobile et le clapet de gonflage n'était pas compensé.

L'Air Two de Scubapro est apparu sur le marché français vers 1979. D'autres Inflateurs/Détendeurs, qui lui ressemblent fortement, sont apparus par la suite.

XII-6-2 Le combiné "Auto-Air" de Buddy

Il est de conception classique avec un clapet aval simple. Par contre, il tient la norme EN250. Cet Inflateur/Détendeur aurait été inventé fin 1972 pour le fabricant "AP Valves" par David Parker, un instructeur du BSAC.

XII-6-3 Le combiné " Air Source " d'Aqualung

Il remplit les mêmes fonctions que l'Air Two avec un inflateur à gros débit. Il a un clapet simple. Il a un orifice différent pour gonfler la bouée et pour respirer. Ceci pour éviter de respirer directement dans la bouée. Dans la version 2008 le détendeur peut se séparer du combiné pour être rangé à part.

Attention cela peut faciliter les vols.

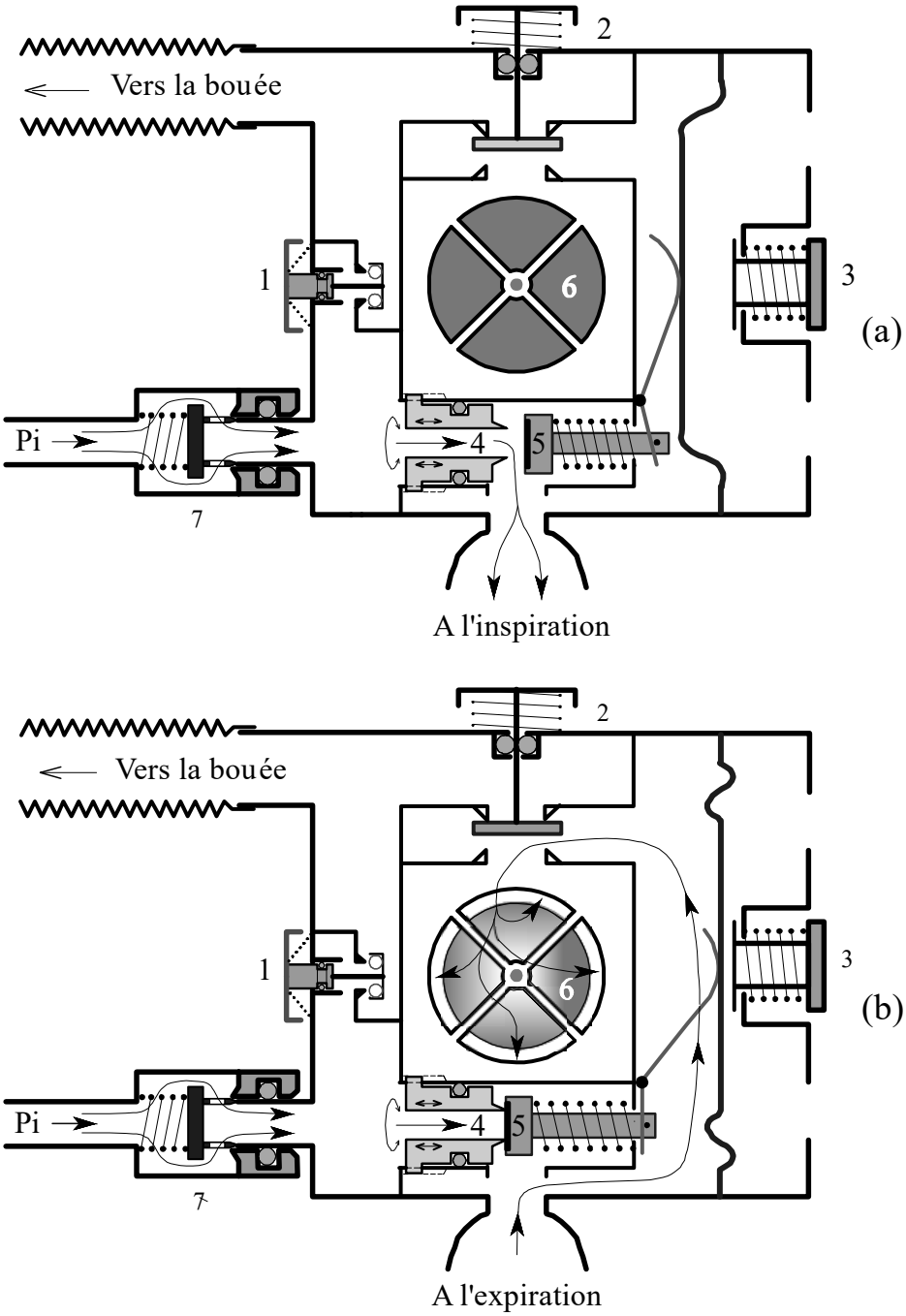


Figure 55 - Le combiné détendeur / inflateur (respiration)

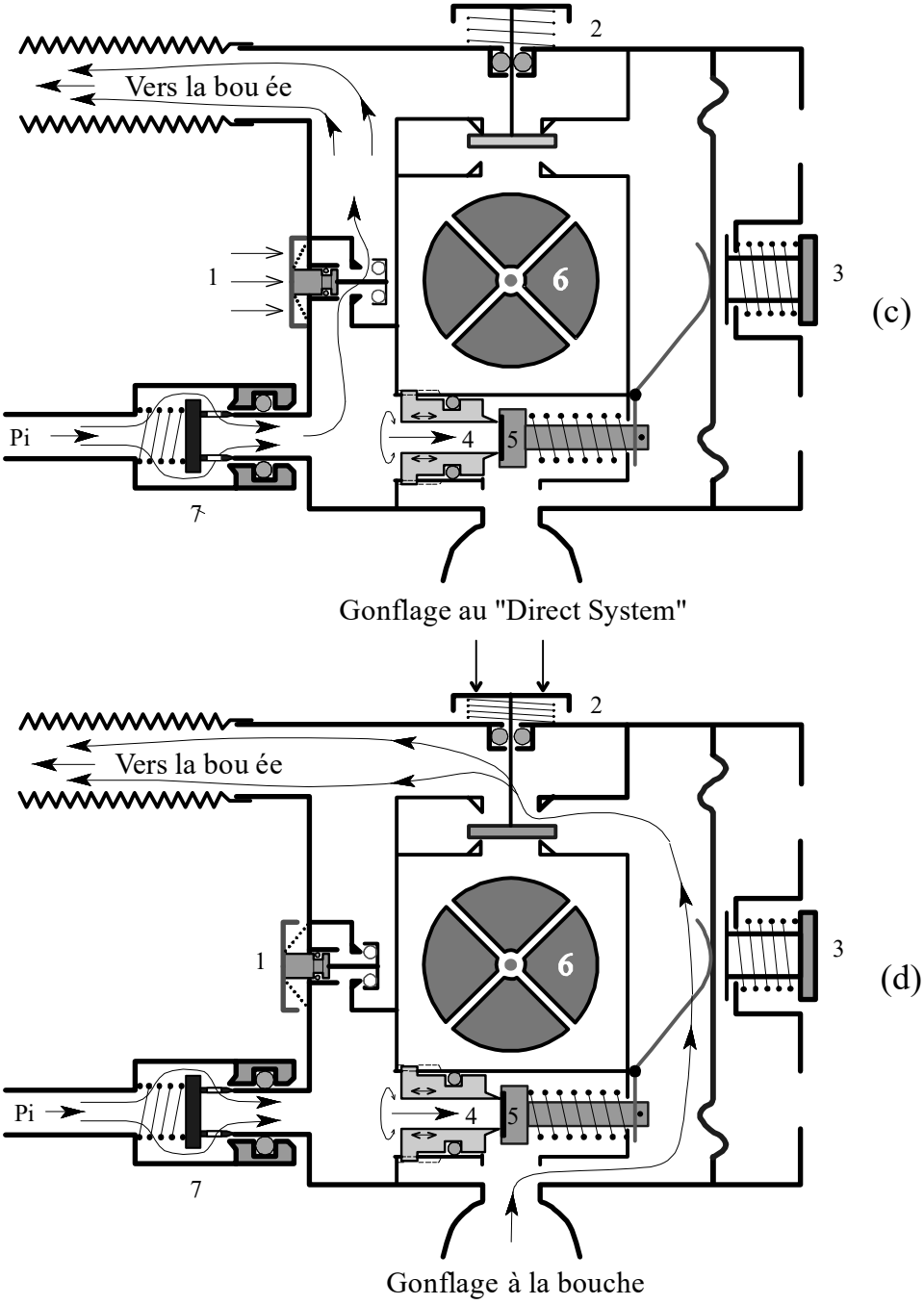


Figure 56 - Le combiné détendeur / inflateur (Gonflage de la bouée)

XII-6-4 Le détendeur " Shadow " de Sherwood

C'est un deuxième étage classique qui se connecte sur le tuyau du "Direct System" par l'intermédiaire d'une déviation en "Y". Ce n'est donc pas un véritable combiné. (Détendeur + inflateur + purge) Néanmoins, il en assure les fonctions.

Remarques importantes :

1. Lorsqu'on utilise un 1er étage sans 2e étage, on ne bénéficie pas de la soupape de sûreté que constitue ce dernier. En effet, si le 2e étage est déconnecté, en cas de fuite du 1er étage, le tuyau d'alimentation risque d'exploser. En aucun cas, un 2e étage dé-connectable ne doit donc être alimenté par un 1er étage séparé sans soupape de sûreté.
2. Il faut rappeler qu'en France, l'encadrement doit être équipé de deux détendeurs entièrement séparés.
3. La Norme EN250 prévoit que c'est l'ensemble du scaphandre : (détendeur 1er et 2e étage, associé à une robinetterie et à une bouteille) qui est testé. La mise sur le marché de l'association, d'un premier et d'un deuxième étage, n'est admise qu'après avoir été soumise à un test de qualification avec les autres éléments.
4. La respiration de l'air contenu dans la bouée a autrefois été enseignée. Aujourd'hui, cette pratique est déconseillée, voire interdite, parce qu'elle nécessite un bon entraînement et que l'air qu'elle contient peut être pollué.

Photo 19 - Air Source de Aqualung (Version 2008)

XII-7 Les masques faciaux

(Voir photo 20)

Notre but n'est pas de décrire ces masques mais simplement d'indiquer les particularités qu'ils présentent lors de leur association avec les détendeurs, objets de cet ouvrage.

Un masque facial est un masque qui contrairement aux masques ordinaires couvre la totalité du visage du plongeur. Cela présente entre autres avantages d'obtenir un large champ de vision, de protéger le visage du froid, des agressions du milieu et surtout permettre l'utilisation d'un système de communication. Le vidage du masque est très facile, la respiration par le nez est aussi appréciée.

Photo 20 - Le masque facial Scubapro

Par contre, il peut être difficile d'équilibrer ses oreilles, voire de s'équiper ou de se déséquiper seul.

L'adaptation d'un détendeur pose parfois quelques problèmes. En effet, le volume mort parfois important favorise l'essoufflement par la ré inspiration du CO_2 que l'on a expiré.

De plus, la distance du détendeur aux lèvres du plongeur rend le seuil d'ouverture du clapet variable en immersion. Il faut donc un réglage spécifique pour ne pas passer en débit continu dans certaines positions.

Cela peut être gênant sur les détendeurs qui ne possèdent pas de réglage accessible. Quelques fabricants de masques fournissent des détendeurs sans réglage accessible mais préréglés en fabrication pour tenir compte de cette particularité.

Certains modèles ne sont pas compatibles avec tous les visages. Un autre inconvénient et non des moindres est la difficulté d'assister un plongeur en panne d'air lorsqu'il est ainsi équipé.

Il faut ajouter que son coût est beaucoup plus élevé que celui d'un masque ordinaire.

Ces avantages et inconvénients font que ce type de masque est surtout utilisé en plongée technique ou professionnelle. De constantes améliorations permettent d'envisager son extension à la plongée loisir.

On pourra le comparer avec le casque bulle professionnel de la photo 13.

Photo 21 - Le second étage du Mares "Prestige"
La commande Dive Prédive limite la course du levier pour éviter le débit continu. (Astuce, gadget ou avenir ?)

CHAPITRE XIII

ASTUCES, GADGETS OU AVENIR ?

XIII–1 Généralités

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié les grands principes utilisés pour améliorer les performances des détendeurs.

Il existe d'autres caractéristiques pouvant être améliorées par des astuces de réalisation. Celles-ci ont pour but d'augmenter la fiabilité, de réduire les frottements, d'améliorer la résistance au froid ou le confort voire de réduire les coûts...

De nouvelles idées ne sont souvent utilisées qu'à des fins commerciales. Pour vendre, il faut toujours avoir du nouveau. Si certaines s'apparentent à des gadgets, d'autres nous paraissent très intéressantes voire géniales. L'avenir nous le dira. (Voir quelques exemples dans la figure 57) On notera que plusieurs de ces astuces peuvent se retrouver sur un même détendeur.

XIII–1-1 Verrou de stockage

Nous avons vu au chapitre III qu'en absence de pression, un clapet aval se trouve plaqué sur son siège par le ressort de rappel et que ceci peut endommager l'un ou l'autre, surtout pendant les longues périodes de stockage.

Pour tourner cette difficulté, quelques fabricants ont réalisé une clé ou un verrou que l'on met en place, sur le deuxième étage, pendant le stockage. Il maintient le clapet ouvert empêchant le marquage de la partie souple du siège ou du clapet. (Voir certains détendeurs Dacor, Sherwood, Scubapro …)

XIII–1-2 La position "Pré-Dive"

C'est un bouton de commande placé sur le coté du détendeur. Il a pour but d'empêcher que le deuxième étage ne passe en débit continu avant la plongée ou lorsqu'il est en secours.

Cette commande se confond souvent avec celle qui permet de rendre le 2^{e} étage plus ou moins sensible, en comprimant plus ou moins le ressort de rappel du clapet. (Voir en VI-1-2)

La différence est que ce bouton n'a souvent que 2 positions "Dive ou Prédive" et n'est donc pas progressif. Le principe est souvent le même que celui représenté à la figure 24.

En stockage il n'est pas recommandé d'utiliser ce type de position "Pré dive". En effet, il augmente la pression sur le siège et risque de marquer celui-ci. Sauf lorsqu'on utilise en plus un verrou ou une clé de stockage.

Dans le même but, Marès a mis au point sur ses derniers modèles une commande manuelle qui consiste à limiter la course de la membrane du 2° étage de façon que le clapet ne puisse s'ouvrir que partiellement.

XIII–1-3 Roulette antifriction

Au chapitre III nous avons écrit que les leviers étaient soumis à des frottements. Pour les réduire, le levier au contact de la membrane est quelques fois munis d'une roulette antifriction.

XIII–1-4 Leviers "Pied de biche"

De façon à vaincre plus facilement les frottements secs qui se manifestent surtout au début des mouvements, on trouve parfois des leviers qui roulent sur leur point d'appui. De cette façon, au début du mouvement, le rapport de démultiplication est plus élevé, facilitant l'ouverture du clapet. C'est le principe de l'outil dit "Pied de biche".

XIII–1-5 Humidificateur

Pour éviter le dessèchement des muqueuses pendant la plongée, un constructeur a eu l'idée de mettre sur le trajet de l'air, dans le deuxième étage, des plaques métalliques qui se refroidissent à l'inspiration, durant la détente de l'air. Lorsque le plongeur expire, la vapeur d'eau se condense sur ces plaques au lieu de se condenser sur le mécanisme.

Lors de l'inspiration qui suit, ces gouttelettes sont ré-aspirées et viennent humidifier les muqueuses du plongeur. Ce procédé a donc deux effets : Il humidifie les muqueuses et, comme nous l'avons déjà vu, il réduit le risque de givrage.

XIII–1-6 Tourelle pivotante

Sur certains détendeurs, les sorties MP se trouvent sur une tourelle tournante qui offre la possibilité de mieux positionner les tuyaux par rapport au plongeur. Cette disposition permet en plus d'augmenter le nombre de sorties MP. Ce n'est pas vraiment une nouveauté mais elle n'est pourtant pas généralisée.

XIII–1-7 Stabilisation de l'effet Venturi

L'effet Venturi est difficile à maîtriser car il est variable en fonction du débit et de la profondeur. On peut le stabiliser grâce à un volet solidaire du levier de membrane. Ce volet ouvre progressivement le trou de compensation au fur et à mesure que la demande d'air augmente. Sur une forte inspiration, il y a ainsi limitation de cet effet. En théorie, cela permettrait de supprimer le réglage de l'effet Venturi. En pratique très peu de fabricants l'ont adopté.

Ne pas confondre cette stabilisation avec la compensation de cet effet par la profondeur. (Voir en IX-2-2, figure 41c)

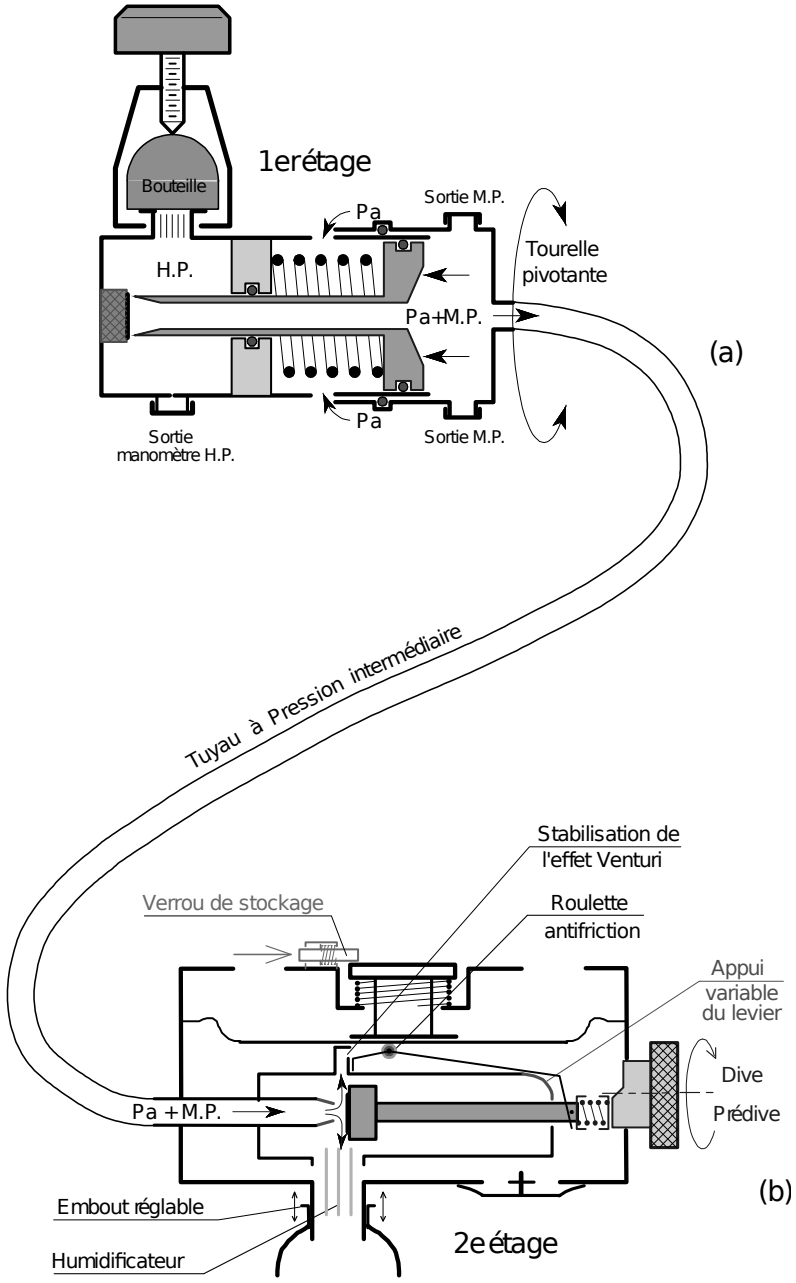


Figure 57 - Astuces ou gadgets ?

XIII–1-8 Embout réglable

L'ergonomie des détendeurs est fixée définitivement par les constructeurs en fonction de critères généraux qui, malheureusement, ne conviennent pas à tout le monde.

Le menton des plongeurs en particulier est plus ou moins proéminent. Sherwood a imaginé pour cela un réglage de la position de l'embout, de façon à rendre la tenue en bouche du détendeur plus confortable. (Voir figure 57b)

XIII–1-9 Embout amovible

Dans un souci d'hygiène, on trouve aujourd'hui des embouts amovibles qui peuvent être utilisés à titre personnel.

Ils trouvent leur utilisation, surtout dans les clubs ou les structures commerciales lorsqu'il y a partage de détendeurs entre plongeurs.

Ils ne répondent cependant que partiellement au problème d'hygiène car l'intérieur du détendeur peut aussi être pollué.

En dehors de cet aspect, ils permettent à chacun de choisir l'embout qui lui semble le plus confortable.

XIII–1-10 Les rotules

Ce sont des articulations, ajoutées à l'entrée du second étage. Elles permettent son orientation dans toutes les directions, évitant notamment les contraintes sur la mâchoire du plongeur.

Une rotule présente l'inconvénient de provoquer des pertes de charges préjudiciables aux performances. Elle devrait donc être soumise à un test de qualification, avec le détendeur, avant d'être commercialisée.

XIII–1-11 Les protège lèvres

Ce sont des accessoires destinés à protéger les lèvres des plongeurs contre le froid. Il suffit d'une bande de néoprène percée d'un trou par lequel on fait passer l'embout du détendeur ou du tuba. Les bords de cette bande de néoprène se glissent sous la cagoule et sur le bas du masque. Avec ce système, l'ensemble du visage du plongeur est bien protégé contre le froid et éventuellement contre les méduses. Depuis quelque temps, Aqualung commercialise un dispositif de ce genre, livré avec les détendeurs destinés aux eaux froides.

XIII–1-12 Surveillance électronique du premier étage

(*Photos 22 et 23*)

La société Apeks équipe certains de ses premiers étages avec un micro contrôleur électronique appelé "XTX Status". Il surveille la valeur de la Moyenne Pression et indique lorsqu'il est temps de procéder à une révision. Un micro contrôleur électronique est disposé entre la membrane principale et la

membrane secondaire. Celle-ci, transparente, permet d'assurer la surcompensation et de lire l'écran LCD qui se trouve derrière.

La pression atteint le capteur à travers le poussoir perforé. (Pointeau) Ce dispositif mesure la pression absolue. Pour s'assurer de l'état de la MP, il faut donc nécessairement être en surface. (Voir figure 58 et photo N°20)

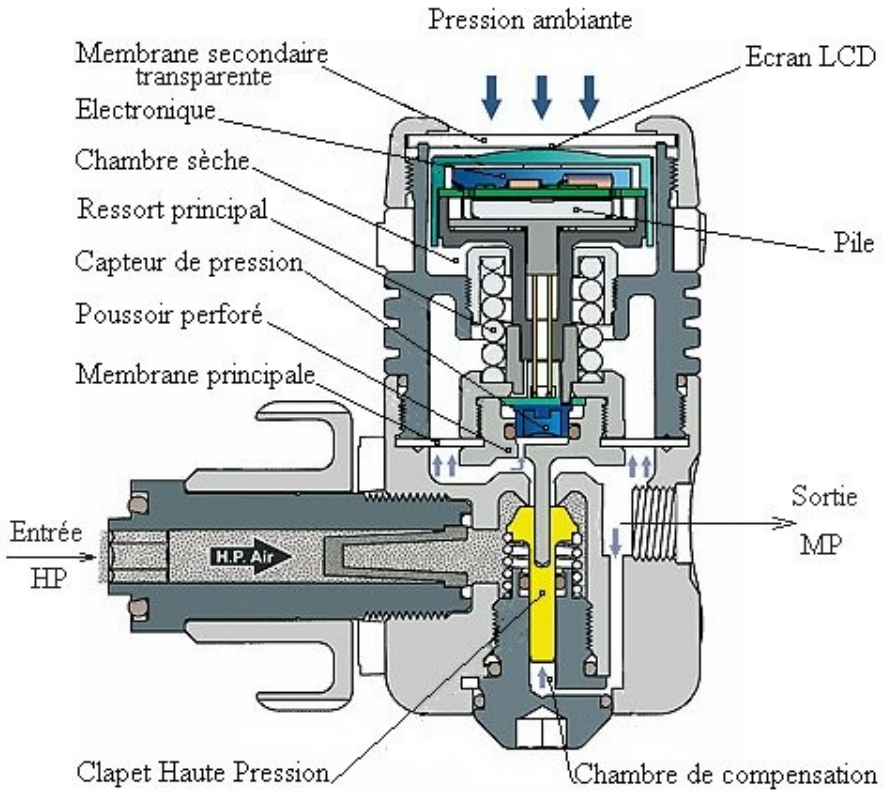


Photo 22 - Dispositif de surveillance électronique XTX50

Les informations sont obtenues dès la mise sous pression du détendeur :

- Lorsque la MP est correcte, le signal "OK" apparaît sur l'écran.
- Lorsqu'elle est trop haute, vous lisez "HI".
- Lorsqu'elle est trop basse, vous lisez "LOW".
- Lorsque vous lisez "SVC", vous devez faire procéder à la révision de votre détendeur. La pile est remplacée à cette occasion.

Introduire de l'électronique dans un détendeur est une première. Cela nous conduira peut être un jour vers le détendeur électrique, voire électronique.

L'utilisation d'électrovannes très sensibles comme dans les recycleurs permet de l'envisager. Cela devrait permettre d'obtenir un seul étage très petit, une courbe inspiratoire quasi-parfaite, une résistance au froid exceptionnelle. Des essais encourageants ont déjà été réalisés dans ce sens. Par contre, le travail expiratoire reste difficile à réduire...

Photo 23 - Le premier étage du XTX50 de Apeks

XIII–1-13 Contrôle du débit continu au 2e étage

Apeks fournit un accessoire, à placer à l'entrée du deuxième étage, qui permet de limiter le débit continu. Il s'agit d'une douille coaxiale au tuyau MP qui lorsqu'elle est déplacée réduit le diamètre de passage de l'air.

Ceci à pour avantage, en cas de débit continu du détendeur, de faciliter le dégivrage des deux étages. Cet accessoire est commercialisé par Apeks sous le nom de "Freeflow Control Device" ou "FCD".

XIII–1-14 Filtre au 2e étage (*Voir photo 14*)

La société Appolo propose un filtre "Bio-Micro" qui s'insère à la sortie du premier étage. Son but est d'éliminer les fines particules qui peuvent subsister dans le bloc ainsi que les odeurs. Il est constitué par une cartouche interchangeable composé d'un filtre électrostatique et d'une couche de charbon actif. La durée d'efficacité est de 50 heures.

La cartouche se monte à l'intérieur d'un petit boîtier cylindrique dont les dimensions sont comparables à celles d'un émetteur d'ordinateur de plongée.

XIII–1-15 Réglages combinés

Les réglages séparés du seuil et de l'effet Venturi sont souvent subjectifs et il est difficile de les optimiser en cours de plongée. Aqualung, sur son détendeur Kronos puis sur les légends LX et LUX a simplifié le réglage en combinant les deux réglages en un seul c'est ce qu'ils appellent le système MBS. Sherwood a aussi installé un tel système sur son détendeur SR[1].

En position "Maxi", l'effet Venturi est au maximum et le seuil au minimum. En position "Mini", l'effet Venturi est au minimum et le seuil au maximum.

XIII–1-16 Déflecteur latéral

(Voir photo 24) Toujours sur le "Kronos", on trouve un nouveau déflecteur de bulles. Tout en utilisant une soupape d'expiration classique, en partie basse, ce déflecteur envoie l'air expiré autour du radiateur d'entrée de la moyenne pression. Ce dispositif astucieux présente deux avantages :

- L'air, relativement chaud, vient réchauffer le mécanisme et améliore ainsi la résistance au froid.

- Dans la plupart des positions du plongeur, les bulles d'air se forment et s'échappent loin de son visage, sans gêner sa vision.

XIII–1-17 Échange de moustaches d'expiration

Comme précédemment, le but est d'éviter la gêne du passage des bulles dans le champ de vision. Il s'agit d'un kit permettant de remplacer les moustaches courtes par des moustaches longues qui rejettent les bulles plus en arrière. ("DCE" de Apeks ou Scubapro) Des orifices de sortie supplémentaires évitent l'augmentation du travail expiratoire dans certaines positions.

XIII–1-18 Mini manomètres H.P. immergeables

Ce sont des manomètres miniatures que l'on monte directement sur les détendeurs. Ils sont utiles lorsqu'on emporte plusieurs bouteilles et que l'on ne

veut pas s'encombrer d'un grand nombre de tuyaux. Ils existent en version oxygène. Leur précision n'est pas très grande mais parfois suffisante.

Photo 24 - Le Kronos d'Aqualung

- Le premier et le deuxième étage sont compensés.
- Le premier étage est équipé d'une fermeture automatique de l'entrée HP.
- Le second étage, est muni d'un nouveau déflecteur latéral et d'un bouton de réglage unique pour le seuil d'ouverture et l'effet Venturi.

(Voir en XIII-1-15 et 16)

Photo 25 - Mini manomètre immergeable
Diamètre 28 millimètres

XIII–1-19 Mini scaphandres

("*Pony cylinder" en anglais*)

Ils sont constitués de détendeurs à un étage fixés directement sur des bouteilles de quelques litres. Il n'y a pas de tuyau. Ils sont utilisés comme source d'air de secours pour sois-même ou pour d'autres plongeurs. Leur schéma est voisin du détendeur de la figure 4 au chapitre II.

Ils se fixent souvent, à l'aide de sandows, sur un bloc principal pour être facile à saisir. Ils sont surtout utilisés par les plongeurs anglo-saxons.

XIII–1-20 Les micro-scaphandres

Les micro-scaphandres ont été l'innovation de l'année 1989. Ils sont constitués d'un détendeur sur lequel sont directement fixées de petites bouteilles de capacité totale en eau inférieure au litre.

L'un de ces modèles était proposé par la firme américaine "LASLIP", l'autre, "l'EOBA" par une firme japonaise. Ce dernier était un véritable recycleur à circuit fermé. En effet, il comportait deux petites bouteilles d'oxygène et une cartouche de filtration pour absorber le CO_2.

Ces appareils procurent une autonomie de quelques minutes à quelques mètres de profondeur, ce qui limite considérablement leur intérêt. Ils ont un "Design" futuriste qui constitue leur principal attrait... Ils étaient surtout conçus pour le tournage de films, genre "OSS117".

Ils n'existent pratiquement plus mais sont recherchés par les collectionneurs.

XIII–2 Les recycleurs

Aujourd'hui, la plongée s'oriente vers les recycleurs. Ils ont existé bien avant les détendeurs. Ceux-ci les ont supplantés parce qu'ils étaient plus simples à réaliser et surtout à utiliser.

Ce sont des appareils complexes mais qui procurent une grande autonomie, indépendante de la profondeur car ils réutilisent l'air ou le mélange expiré après en avoir éliminé le CO_2 produit et restitué l'O_2 consommé.

De plus, grâce à une adaptation permanente de la valeur du mélange en fonction de la profondeur, certains d'entre eux permettent, entre autres avantages, de réduire la durée de la décompression. On ne peut pas dire alors que ce sont des gadgets.

Une évolution certaine des recycleurs se fait jour vers leur utilisation en plongée loisir. Elle tend vers une simplification des procédures et par conséquent de la formation obligatoire avant tout achat. Les 2 photos ci-jointes montrent déjà une certaine évolution de ces machines.

C'est probablement l'une des voies pour l'avenir de la plongée.

Ils utilisent des composants voisins de ceux des détendeurs classiques.

Nous ne nous étendrons pas sur ce sujet assez complexe.

Ce sera peut-être l'objet d'un prochain ouvrage.

****

Photo 26 - Le recycleur "Buddy Inspiration"
(Circuit fermé à gestion électronique (é-ccr)

Photo 27 - Le recycleur Triton
(Circuit fermé à gestion mécanique (m-ccr)

CHAPITRE XIV

NORMALISATION ET PERFORMANCES

XIV–1 Normalisation

La norme NF EN250/A1 de septembre 2006 vient à l'appui de la Directive Européenne UE 89/686/CEE - annexe II, sur les Équipements de Protection Individuelle. (EPI) *

Elle fixe les exigences de sécurité des scaphandres autonomes à air comprimé et à circuit ouvert utilisés pour la plongée, les essais permettant de vérifier ces exigences ainsi que le marquage obligatoire. Elle a le statut de norme nationale. Nous ne traiterons ici que des principales performances respiratoires exigées des détendeurs. (Celles qui devraient toujours être communiquées par les fabricants)

Les textes issus de la norme sont ici en italique. La numérotation est celle de la norme. (*Ces textes peuvent évoluer dans le temps*)

XIV-2 Pressions et travail respiratoire

Ils sont définis pour une inhalation de 2,5 litres, 25 fois par minute, soit au total 62,5 l/min :

Texte de la norme

Le travail représenté par "J" s'exprime en joules. (Symbole " j")

5-6-1 Le détendeur à la demande doit être conforme aux exigences suivantes lorsqu'il est soumis à essai à une pression absolue de 6 bars :

le travail respiratoire ne doit pas excéder 3 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 positif est mesurable ne doivent excéder 5 millibars.

Pour vous procurer le texte d'une norme, vous devez vous adresser à L"AFNOR" (Association Française de Normalisation)

Il est bon de noter que :

- Lors des tests, le détendeur est réglé pour obtenir les meilleures performances.

- Le travail respiratoire exigé par le standard classe A de l'US Navy est de 1,4 joules/litre à 60 mètres, avec 100 bars de HP contre 3 joules/litre à 50 mètres, avec 50 bars pour la norme européenne.

- Contrairement aux apparences, cette dernière est la plus contraignante à cause de la valeur de la HP imposée mais est-il raisonnable de se trouver à 50 mètres avec seulement 50 bars dans sa bouteille ?

XIV-3 Tenue en température

Texte de la norme

5.11.2 Performances (dans l'air)

Aucune fuite ou mise en débit continu ne doit se produire lors d'essais effectués à une température de 50°C.

Si le scaphandre autonome à circuit ouvert est équipé d'un détendeur à la demande prévu pour des températures d'eau inférieure à 10 °C, on ne doit constater ni fuite importante et/ou permanente ni mise en débit continu lors d'essais effectués à une température de -20°C.

5.11.3 Performances en eau froide

Un scaphandre autonome à circuit ouvert équipé d'un détendeur à la demande conçu pour être utilisé dans une eau de température inférieure à 10°C doit également fonctionner comme spécifié à une température d'eau de 4°C.

Il est important de noter que ce n'est pas le détendeur seul qui doit répondre à la norme mais l'ensemble du scaphandre : bloc bouteille, robinetterie, détendeur, masque.

Avant l'apparition de cette norme, les fabricants procédaient empiriquement ou avec l'aide de bancs d'essai simples. Les détendeurs étaient alors testés par des plongeurs spécialistes, il était très difficile d'estimer objectivement le travail et les efforts respiratoires.

Aujourd'hui, pour concevoir des détendeurs capables de satisfaire aux exigences de la norme, les fabricants ont été amenés à utiliser des simulateurs respiratoires sophistiqués. Selon la norme on les appelle "Machines à respirer".

A noter que la norme US est plus sévère que la norme EU.

Les essais sont toujours complétés par des tests en plongée mais cela concerne surtout l'ergonomie, le confort et l'utilisation pratique.

Nous rappelons que la norme EN13949 de novembre 2003 concerne plus particulièrement le matériel destiné aux "*Appareils respiratoires de plongée autonome à circuit ouvert utilisant du nitrox et de l'oxygène comprimé".*

XIV-4 Le simulateur respiratoire (Voir photo 28 en fin de chapitre)

Un tel équipement est destiné au travail de laboratoire. Il permet d'étudier le comportement des détendeurs dans différentes conditions de débit, de pression, de température et de mélange utilisé.

Un simulateur respiratoire est constitué principalement d'une cuve hyperbare partiellement remplie d'eau dans laquelle on peut faire varier la pression relative, par exemple, entre 0 et 8 bars. (0 à 80 mètres)

Les machines les plus évoluées permettent en plus de faire varier la température de l'eau, l'humidité de l'air utilisé et sa température, d'injecter du CO_2 dans l'air expiré et de mesurer la teneur en CO_2 ré inspiré.

La machine est calibrée à 6 bars absolus à l'aide d'un orifice de calibration mis à l'emplacement du détendeur.

Le scaphandre à étudier est immergé à l'intérieur de la cuve, comme si la tête du plongeur était en position verticale, à au moins 20 cm de profondeur, pour éviter l'effet de surface. L'une des sorties du bloc bouteille est alimentée de l'extérieur à l'aide d'une bouteille tampon à travers un détendeur HP.

Ceci a pour but de conserver une HP constante sur la deuxième sortie qui alimente le premier étage du détendeur testé.

L'embout du deuxième étage est relié à une pompe constituée par un cylindre, dans lequel se déplace un piston. Le mouvement est quasi sinusoïdal ce qui, par convention, simule la ventilation pulmonaire.

Les pressions sont mesurées par un capteur placé aussi près que possible de l'embout du détendeur. Outre la vérification de chaque point de la courbe des pressions, tant à l'inspiration qu'à l'expiration, ce type d'appareil permet de déterminer le travail respiratoire fonction de la surface de la courbe.

Le système est géré par un ordinateur qui donne les résultats des tests avec le diagramme respiratoire, le tout sous forme d'une fiche imprimée.

C'est la société anglaise "ANSTI" qui aujourd'hui réalise les machines les plus communément utilisées. Il en existe 2 versions, l'une fonctionne dans l'air, l'autre fonctionne avec le matériel immergé dans l'eau. Cette dernière version est évidemment plus réaliste.

Nous rappelons ici la fabuleuse machine à respirer conçue par Yvon le MASSON. (Elle équipe la Marine Nationale et a été vendue jusqu'au japon)

XIV-5 Courbes respiratoires

XIV-5-1 Diagramme théorique Pression /Volume

Le rôle de la machine est de déterminer les dépressions ou pressions nécessaires dans l'embout du détendeur pour assurer le débit jusqu'à une profondeur de 50 mètres.

Les mesures se font au niveau de l'embout, au raccordement à la machine. (Les pressions sous la membrane et au niveau de l'embout peuvent être légèrement différentes)

Si le détendeur était un organe passif, la courbe de pression aurait la forme d'une sinusoïde. La respiration de cet organe peut certes être affichée sous cette forme mais pour des raisons pratiques, il est plus commode de replier la courbe sur elle-même, de façon à obtenir un diagramme limité dans l'espace et facile à interpréter. (Voir la figure 58)

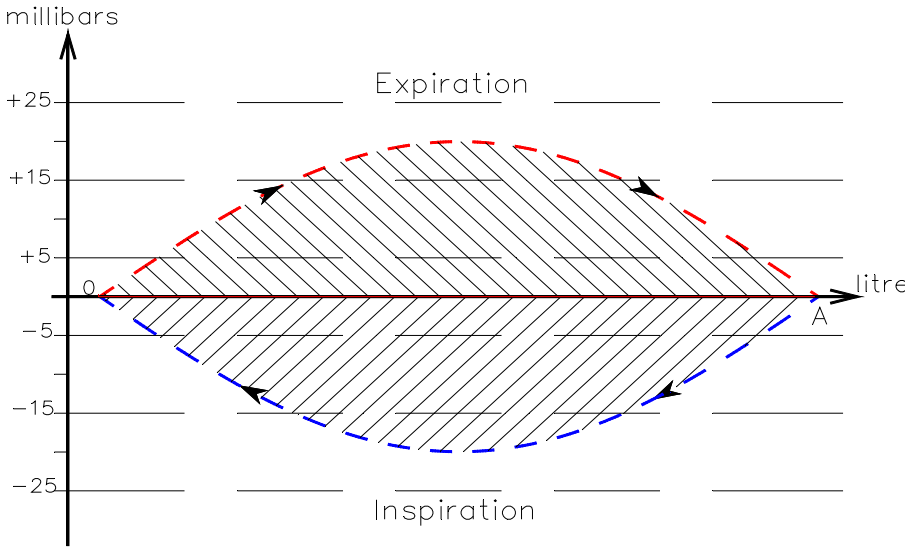


Figure 58 - Courbes respiratoires théoriques

Ce diagramme est parcouru dans le sens des aiguilles d'une montre en partant du début de l'inspiration au point A. L'inspiration se trouve en dessous et l'expiration au-dessus de l'axe des abscisses. En fait, cette courbe est théorique. En pratique, elle est fortement influencée par le comportement du détendeur.

De nombreux paramètres, volontairement ou involontairement, viennent la modifier. Considérons en premier lieu que le premier étage est parfait et délivre une moyenne pression constante, en toute circonstance. Étudions alors ce qui se passe dans le deuxième étage.

XIV-5-2 Diagramme pratique

(Voir la figure 59 ci-dessous)

- Pour débiter, le détendeur nécessite une dépression minimum qui apparaît au point B. Nous l'avons appelée "Seuil d'ouverture" mais dans la norme, on l'appelle "Pic inspiratoire". Il correspond en fait à la dépression nécessaire pour vaincre l'ensemble des forces qui maintiennent le clapet fermé.

- Au moment du franchissement de ce seuil, le clapet s'ouvre parfois brutalement libérant trop d'air avant de se stabiliser en fonction de la demande. Ceci crée des oscillations plus ou moins importantes. (Surtout sur les machines où le détendeur est dans l'air)

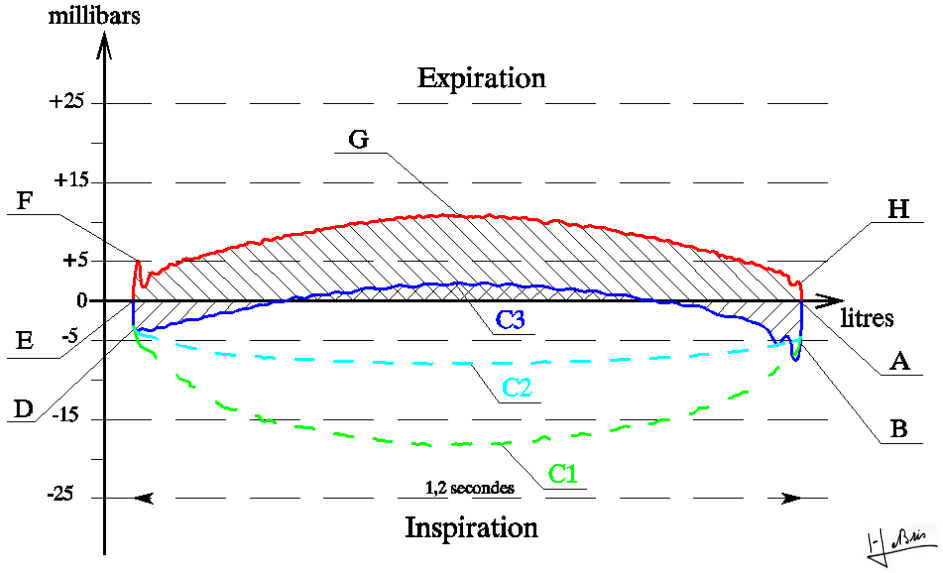


Figure 59 - Courbes respiratoires pratiques

À l'inspiration

- Pendant l'inspiration, la courbe en "C1", au-dessous du seuil, s'apparente à une portion de sinusoïde.
- En fait, l'effet Venturi procure une aide à l'inspiration qui permet d'aplatir la courbe comme en "C2" et même de la faire passer par des valeurs positives comme en "C3".

- Ceci conduit à une diminution de l'effort inspiratoire pouvant aller jusqu'au débit continu.

- Le détendeur donne alors plus d'air qu'on ne lui en demande. C'est lui qui fournit de l'énergie. La pression dans l'embout devient positive et donne parfois lieu à des oscillations importantes. Le détendeur s'ouvre et se ferme de façon erratique.

- Les études réalisées à l'aide des machines à respirer ont permis de maîtriser ces phénomènes. Il est certes difficile de réduire les pics inspiratoires mais ceux-ci représentent peu d'énergie.

- Il y a parfois un seuil en "D" en fin d'inspiration. À ce point, l'effet Venturi diminue et la dépression sous la membrane n'est plus suffisante pour maintenir le faible débit demandé. La pression remonte alors vers zéro. Le clapet se referme de lui-même au point E, sous l'effet du ressort de rappel.

À l'expiration

- Pour que la membrane d'expiration soit étanche, elle doit exercer une pression sur son pourtour. Celle-ci doit être vaincue pour que l'expiration commence. Cela nécessite une certaine pression qui apparaît au point F. C'est ce qu'on appelle le pic expiratoire.

- Le travail expiratoire dépend en grosse partie de ce seuil. On ne peut cependant le réduire sans augmenter le risque d'entrée d'eau pendant l'inspiration. Ce seuil est lié à la distance verticale entre la soupape d'expiration et l'embout, à sa forme, à sa souplesse ainsi qu'à la finition de son siège.

- En fait, au-delà d'une certaine pression, cette soupape se soulève rapidement. Il y a un effet de bascule qui libère brutalement l'air ce qui s'explique par la forme en assiette de la soupape. Ceci produit parfois aussi de petites oscillations de la courbe.

- En cours d'expiration, en "G", la courbe a approximativement la forme d'une portion de sinusoïde. Elle est cependant perturbée par la sortie irrégulière des bulles. La forme des "moustaches" produit aussi un effet qui modifie le travail expiratoire.

- En fin d'expiration, en "H", on peut encore trouver de petites oscillations dues à la fermeture rapide de la soupape d'expiration, car la diminution du flux ne lui permet pas de rester en position grande ouverte.

Remarques :

1. Les améliorations apportées aux détendeurs ont permis de réduire le travail inspiratoire. Cependant, le travail expiratoire reste important et c'est lui qui constitue la part la plus grande du travail total. Il ne peut être réduit sans augmenter le risque d'entrée d'eau, particulièrement, tête en bas, pour certains détendeurs.

2. D'après la norme, l'effet Venturi doit être limité. La partie positive de la courbe, où les hachures se croisent, ne doit pas représenter plus de 0,3 J/l. De plus, elle ne doit pas être prise en compte pour la mesure du travail respiratoire.
3. Les machines à respirer, fonctionnant dans l'eau, amortissent davantage les oscillations que celles fonctionnant dans l'air. Les résultats de ces dernières sont donc plus pessimistes, de ce point de vue en tout cas.
4. Les machines fonctionnant dans l'air ne prennent pas en compte le travail nécessaire pour mettre en mouvement la masse d'eau qui appuie sur la membrane. Surtout si des chicanes, destinées à éviter le débit face au courant, freinent le passage de l'eau. Elles ne tiennent pas compte non plus des pressions nécessaires pour évacuer les bulles qui se forment dans l'eau.
5. Le seuil d'ouverture est indispensable pour éviter que le détendeur ne passe spontanément en débit continu. Il agit aussi sur le travail respiratoire. Il peut être réglable soit progressivement soit par bonds. Il consiste, dans la plupart des cas, en un réglage de la force du ressort de rappel. (*Voir la figure 24*)
6. L'effet Venturi est, lui aussi, souvent réglable pour optimiser le travail respiratoire. (Pour une profondeur donnée) Il consiste souvent en un volet mis, sur le trajet de l'air, pour l'orienter plus ou moins vers la membrane ou la sortie.
7. Les réglages progressifs sont souvent subjectifs et, pour les détendeurs de secours, on peut préférer des réglages par tout ou rien ou par bonds.
8. Le débit de 62,5 litres par minute imposé par la norme est bien supérieur aux "20 litres moyens par minute" enseigné aux plongeurs. Cependant certains détendeurs récents peuvent débiter bien davantage.
9. Ces machines ne se comportent pas comme de véritables poumons. Le débit sinusoïdal est souvent loin de la réalité. Elles introduisent en plus des fluctuations, superposées aux courbes qui, malgré des filtres appropriés, ne sont pas faciles à maîtriser.
10. La courbe pratique d'un bon détendeur se rapproche de celle représentée en trait continu dans la figure 59.
11. Malheureusement, beaucoup d'entre eux s'en écartent notablement, parfois même de façon surprenante. On trouve notamment, dans les détendeurs bas de gamme, des courbes d'inspiration qui révèlent des tendances à sortir des exigences de la norme ou à des instabilités. (Voir figure 60)
12. La norme ne prévoit pas de débit minimum pour la soupape d'expiration. Lorsqu'un plongeur remet, en fusant, un détendeur dans la bouche d'un accidenté, la soupape d'expiration devrait jouer le rôle de soupape de sûreté pour éviter une surpression. Malheureusement, les détendeurs modernes ont

un débit maximum supérieur à celui que peut assurer la soupape d'expiration. Le plongeur doit donc limiter le débit quand il donne de l'air..

13. La norme part du principe que qui peut le plus peut le moins. Or un plongeur ne devrait jamais se trouver à 50 mètres avec 50 bars d'alimentation mais sait-on jamais ! Nous rappelons que la norme de l'US Navy impose un essai à 60 mètres avec 100 bars, ce qui est plus réaliste.

14. Pour juger de la qualité d'un détendeur, des essais pratiques en plongée sont effectués par des plongeurs qualifiés.

15. La norme mélange n'envisage pas l'utilisation du Trimix. Or, le Trimix est beaucoup plus léger que l'air. Un détendeur alimenté en Trimix se comporte à 100 mètres mieux que s'il était alimenté avec de l'air à 60 mètres. D'autre part, plus vous plongez profond, plus vous devez augmenter le pourcentage d'Hélium. L'amélioration due à l'augmentation du pourcentage d'Hélium est supérieure à la dégradation due à la profondeur.

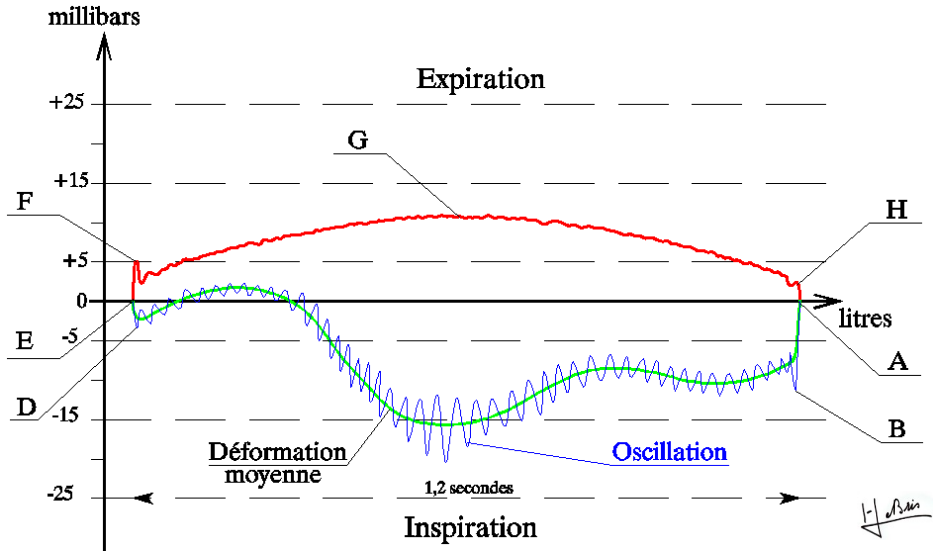


Figure 60 – Déformation de la courbe respiratoire

Interprétation des courbes

Dans certains cas, il est possible de déterminer les défauts d'un détendeur à partir de sa courbe de réponse. Nous avons vu en figure 59 que la courbe d'inspiration d'un bon détendeur passait au-dessus du zéro vers son milieu.

Si on constate qu'elle à tendance à s'aplatir voir à se déformer vers le bas cela signifie souvent que le premier étage plafonne et ne peut fournir le débit demandé. Les oscillations de la courbe peuvent provenir de la grande sensibilité de la machine à respirer mais aussi de frottements importants des

pièces en mouvement. (Voir la figure 60) Ces défauts peuvent provenir d'un manque de lubrifiant ou d'un encrassement du mécanisme mais peuvent aussi être d'origine. On trouve fréquemment de telles courbe sur les détendeurs bas de gamme ou anciens.

XIV-6 Conservation des performances

La machine à respirer donne les performances d'un détendeur au moment de sa conception. Le fabricant peut vérifier, par prélèvement, que celles-ci sont conservées lors de la production de série. Cependant, ces performances peuvent évoluer durant la durée de vie du détendeur.

Ceci implique une surveillance sérieuse ainsi qu'un entretien adapté à l'utilisation et parfois aux circonstances. C'est ce que nous verrons, plus en détail, au chapitre suivant.

- Un bon détendeur doit fournir à son utilisateur, en toutes circonstances, pendant sa durée de vie, tout l'air qui lui est demandé, pour un travail inspiratoire aussi faible que possible.
- Il doit aussi se refermer à coup sûr, ne pas fuir ou passer spontanément en débit continu. Un détendeur peut très bien fuser, embout vers le haut mais il ne devrait pas le faire, embout horizontal ou vers le bas.
- Si le phénomène est amorcé, il doit être possible de l'arrêter aisément sur une expiration ou en interposant un doigt à la sortie de l'embout.
- Face au courant ou lors d'une nage rapide, il ne doit pas fuser.
- Il ne doit pas non plus fuser même faiblement, tête en bas.
- Il doit aussi être étanche à toute entrée d'eau quelle que soit la position du plongeur.
- Comme dans tout mécanisme, un rodage se produit qui diminue les frottements secs et donc réduit l'énergie nécessaire. En contre partie, le détendeur peut s'encrasser, les joints durcir ou se détériorer.
- La lubrification des joints ou des mécanismes a tendance à disparaître.
- Des dépôts de calcaire, de sel ou d'impuretés, des oxydations ont tendance à se produire. Ils colmatent le filtre ou gênent le mécanisme. Il en résulte une augmentation du travail respiratoire nécessaire.
- Il est utile de procéder à des entretiens réguliers. Ceux-ci, même sans les tester à la machine à respirer, garantiront la conservation des performances.

XIV-7 Le travail respiratoire

Ce travail s'estime en joules par litre d'air respiré. Il est fonction de la surface délimitée par la courbe. Il peut être bien inférieur aux 3 joules/litre exigés par la norme. On trouve ainsi des détendeurs dont le travail total nécessaire est inférieur à 0,5 Joules/litre. (Annoncé par Sherwood sur son détendeur SR[1])

Ce travail est celui nécessaire pour vaincre les frottements, les phénomènes dynamiques, l'inertie des pièces mécaniques, ainsi que celles des masses d'air et d'eau mises en mouvement à chaque inspiration et expiration.

Remarque sur le travail respiratoire

Si nous divisons les courbes relevées en fines tranches verticales, la hauteur de chacune d'entre-elle représente la pression atteinte, tandis que la largeur représente le volume en m^3 généré par le déplacement du piston. L'équation aux dimensions nous montre alors que le produit Pression x Volume est égal au travail en joules :

$$P \times V = (F/m^2)(m^3) = F \times m$$

(Force x Longueur = Travail)

XIV-7-1 Influence de la haute pression

Lorsque la pression dans la bouteille diminue, les performances varient. Même avec une excellente compensation, en deçà d'une certaine valeur de la HP, le détendeur plafonne, n'assurant plus le débit nécessaire. Cette perte de performance peut être corrigée, dans une certaine mesure, par la surcompensation HP. (Voir le chapitre VII)

XIV-7-2 Influence de la profondeur

En profondeur, la modification de la masse spécifique de l'air provoque des modifications du fonctionnement, en particulier dans les seconds étages. Les systèmes de compensation ne permettent de corriger que partiellement ce défaut. Par contre, la surcompensation par la pression ambiante y remédie remarquablement bien. (Voir aussi le chapitre VII)

XIV-7-3 Influence de la position des membranes

En fonction de la position du plongeur verticale, horizontale ou costale, les performances changent.

Si pour le second étage, on prend comme référence le centre de l'embout et celui des membranes expiratoires et inspiratoires, on constate que la pression de l'eau diffère selon la position du détendeur. Les distances données ici ne le sont qu'à

titre indicatif. Elles dépendent de la réalisation du détendeur. Dans la figure 61 ci-dessous, la surface de la courbe extérieure représente le travail d'un détendeur vertical, celle de la surface intérieure hachurée celui d'un détendeur horizontal.

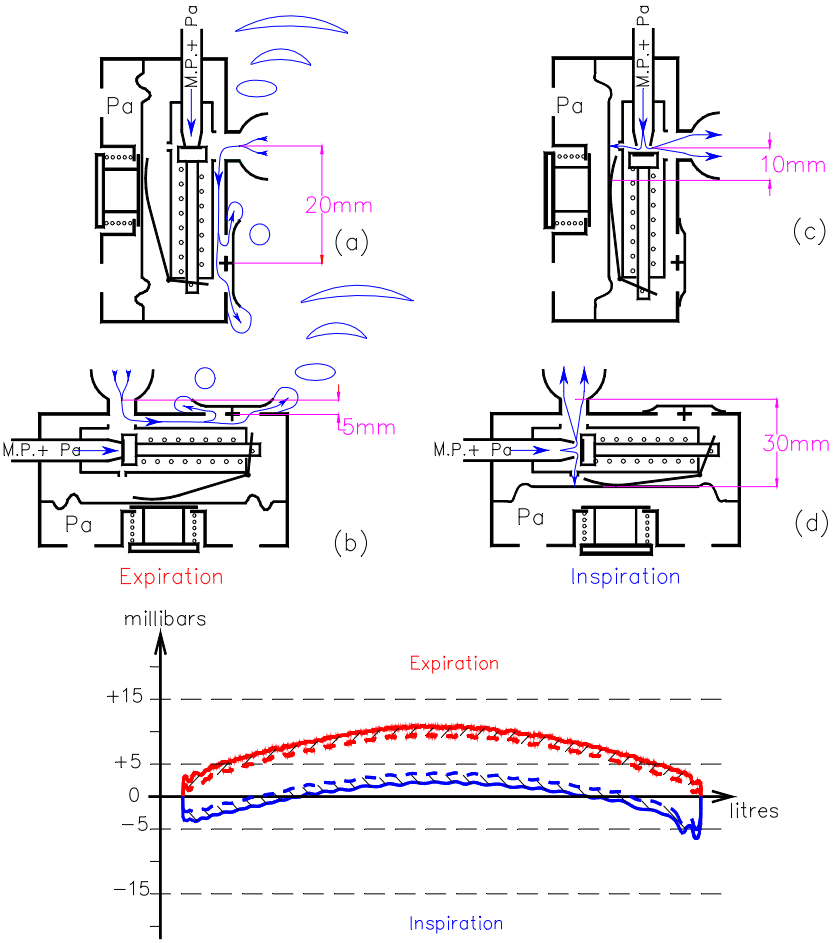


Figure 61 - Courbes respiratoires, fonction de la position

Examinons ce qui se passe à l'expiration. Sur les dessins a et b des détendeurs, on constate qu'entre les 2 positions à 90° la différence de profondeur est de 25 millimètres ce qui se traduit par un effort à l'expiration du détendeur horizontal de 2,5 millibars plus faible que s'il était vertical. Non seulement cela diminue le travail expiratoire mais en plus cela facilite les entrées d'eau car la pression de la membrane expiratoire sur son siège est plus faible.

Examinons ce qui se passe à l'inspiration. Sur les dessins c et d, on constate qu'entre les deux positions il y a une différence de 20 millimètres ce qui en position horizontale va réduire le travail inspiratoire. Ceci peut même aller jusqu'à provoquer le débit continu du détendeur.

En résumé, le travail respiratoire se trouve réduit, dans le rapport des surfaces des courbes, lorsque le détendeur se trouve en position horizontale. De plus, il y a risque d'entrée d'eau et de passage en débit continu. Ceci explique qu'un plongeur qui descend tête en bas, a plus facilement tendance à absorber de l'eau.

Nous rappelons que la norme EN250 prévoit le test des détendeurs en position verticale ce qui est plus dur tant à l'expiration qu'à l'inspiration.

On notera que les détendeurs dont la membrane d'inspiration est sur le coté ne subissent ces variations que lorsque le plongeur évolue en position costale. Par contre lorsque la membrane d'expiration est concentrique, le fabricant est obligé de la durcir pour éviter les entrées d'eau. (Voir le Xstream de Poséidon)

L'anatomie et même la physiologie de chaque plongeur font qu'ils ne perçoivent pas tous les performances de la même façon. Pour le calcul du travail respiratoire, la résolution de la machine ANSTI est de 0,1J/l mais certains plongeurs ne perçoivent de différence qu'au-delà de 0,5J/l.

Les anciens se souviennent des différences que l'on obtenait avec un détendeur Mistral suivant que l'on se tenait debout, sur le dos ou sur le ventre.

Photo 28 - La machine à respirer "ANSTI"

(Photo "Aqualung") (Voir en XIV – 4)

CHAPITRE XV

LES TESTS DE VOS MAGAZINES

Les magazines spécialisés réalisent régulièrement des tests de matériel de plongée. Il nous a semblé utile de les commenter car ils servent souvent aux plongeurs pour déterminer leurs choix. Ils sont surtout utiles par les comparaisons effectuées.

L'objectivité de ces tests comparatifs ne saurait être mise en doute. Ils sont organisés par des spécialistes compétents et effectués avec la participation de plongeurs de différents niveaux. Le rôle des organisateurs consiste à faire la part des choses entre les performances mesurables et incontestables et la partie subjective qui dépend beaucoup de l'expérience et de la personnalité des testeurs.

Il existe plusieurs façon de présenter ces résultats c'est ce que nous vous proposons d'examiner.

Les éléments testés :

La fiche de test

Travail inspiratoire

Travail expiratoire

Les réglages

Le type de connexion Étrier ou DIN

Les flexibles

Le poids

Ergonomie

Sorties HP et MP

Confort en fonction de la profondeur

L'étanchéité

Le déflecteur de bulles

Rapport qualité / prix

Analyse de la validité des notes attribuées

La notation moyenne

Moyenne des notes donnée par les différents testeurs pour chaque élément.

L'écart type

L'écart-type sert à mesurer la dispersion, ou l'étalement, d'un ensemble de valeurs autour de leur moyenne. Plus l'**écart-type** est faible, plus la population est homogène.13 oct. 2016

Définition - Écart-type | Insee

https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1913

****

CHAPITRE XVI

MAINTENANCE DES DÉTENDEURS

Le mécanisme des détendeurs craint les vibrations et les chocs car ils entraînent des déréglages ou des fuites. Les pièces en mouvement sont soumises à usure ce qui provoque les mêmes défauts.

Les élastomères qui constituent les tuyaux, les membranes, les embouts, les joints, se dégradent sous l'effet des rayons ultraviolets, de la chaleur et des hydrocarbures.

La pénétration d'eau dans le mécanisme peut y laisser des particules, du calcaire et du sel ce qui est particulièrement nocif, surtout dans les détendeurs compensés.

Le brassage de l'eau lors des mouvements du mécanisme a tendance à éliminer les lubrifiants.

XVI-1 La fiabilité

Ce mot, pas toujours bien compris, est explicité par sa définition où chaque mot doit être analysé.

La fiabilité est la probabilité qu'un objet accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant un temps donné. Cette définition, comme on peut le voir, laisse peu de place à l'interprétation.

Dit d'une autre façon, la fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données pour une période de temps donnée. (Wikipedia)

On a coutume de dire, par exemple, "Il y a une chance sur 100 que tel objet tombe en panne".

- Le chiffre ainsi donné exprime une probabilité. Cela signifie que sur un grand nombre de détendeur, beaucoup plus grand que 100, il y aura en moyenne 1 sur 100 qui tombera en panne.

- L'objet peut être constitué d'un ensemble ou d'une pièce simple. Ici, il s'agit d'un détendeur associé à un bloc bouteille et sa robinetterie.

- La fonction pour laquelle il a été conçu est de fournir de l'air, uniquement de l'air, à la pression ambiante, en quantité suffisante, quand on lui en demande et uniquement quand on lui en demande.

- Les conditions sont celles de la plongée c'est-à-dire principalement, la profondeur, la température, l'agressivité du milieu ainsi que le respect des opérations de maintenance préventives et correctives.

- Le temps donné est celui de la durée d'une plongée qui peut se répéter un certain nombre de fois pendant plusieurs années.

L'encadré ci-dessous est inspiré par le livre de J.C. Ripoll "La physique de la plongée" page 132 à 134. Librairie des plongeurs Editions - 1989

Considérons deux plongeurs qui effectuent une plongée de 20 minutes par 20 m de fond. En cas de panne d'air, ils se doivent assistance mutuelle et il leur faut au moins 2 minutes pour regagner la surface. (À 10 m/min)

La panne sera jugée critique, si elle ne permet pas aux 2 plongeurs de remonter en surface en sécurité, c'est-à-dire d'avoir suffisamment d'air pour y arriver, même en respirant à deux sur un seul scaphandre.

Si la probabilité de panne, pour un seul plongeur, est de 1%, la probabilité de panne de deux plongeurs est approximativement la somme des probabilités soit 2%. Par contre, la probabilité pour que les pannes aient lieu en même temps en est le produit : 1/100 x 1/100 = 1/10000.

Admettons qu'ils n'aient pas de chance et que les deux équipements tombent effectivement en panne pendant cette plongée. Pour qu'ils ne puissent remonter, en s'assistant l'un ou l'autre, il faut que la panne de l'un d'entre eux survienne moins de 2 minutes avant ou moins de 2 minutes après l'autre, puisque c'est le temps qu'il leur faut pour remonter. Ceci n'a donc, au plus, que 4 possibilités d'arriver pendant les 20 minutes de cette plongée.

Comme la probabilité que cette situation se produise est de 1/10000, que la probabilité pendant une de ces plongées est de 4/20, la probabilité totale pour qu'elle soit critique est de 4/20 x 1/10000 = 4/200000, soit une possibilité sur 50000, pour des plongées du même type.

Si un plongeur est seul, la probabilité de panne est de 1/100. Elle est forcément critique, à moins de doubler tout son équipement, comme le font les spéléologues. Ceci montre tout l'intérêt de plonger au moins à deux.

Bien entendu, les plongeurs peuvent s'entraîner à remonter en apnée mais cela comporte d'autres risques et ne peut donc être considéré comme une remontée en sécurité.

XVI-2 Maintenance préventive

C'est l'ensemble des mesures qui permettent de prévenir les pannes et de conserver les performances initiales. Elles consistent :

- Avant de monter le détendeur sur le bloc, à purger la robinetterie pour éviter que l'eau ou les impuretés qui pourraient s'y trouver ne se retrouvent dans le détendeur.
- Avant de s'immerger, à vérifier le montage du détendeur sur le bloc et son fonctionnement.
- Après la plongée, à le rincer abondamment à l'eau douce puis sécher l'intérieur en montant le détendeur sur un bloc et en actionnant la purge pendant quelques secondes. On doit aussi sécher les chambres humides des deux étages.
- En dehors des plongées, à le maintenir à l'abri du soleil, des sources de chaleur importante, de l'humidité, des chocs et des vibrations.
- Après chaque saison, à ouvrir le boîtier du 2^{e} étage pour vérifier de visu l'état du mécanisme, des membranes d'expiration et d'inspiration.
- Tous les trois ans ou toutes les 150 plongées au plus, le détendeur doit être complètement démonté, les pièces nettoyées, l'état des sièges et des clapets vérifiés, le filtre d'entrée et les joints changés, le mécanisme réglé.

Les détendeurs ne sont pas compliqués. Ils exigent cependant pour leur entretien un certain sens de la mécanique, la connaissance du matériel, la documentation appropriée, l'outillage, des moyens de contrôle et surtout de l'expérience. "*Un kilo de connaissance ne vaut pas un gramme d'expérience* ". (*Pierre Vögel*)

Le délai de démontage tous les 3 ans peut sembler long mais il ne faut pas perdre de vue que les démontages/remontages participent à la détérioration. Un détendeur bien entretenu et vérifié ne nécessite pas forcément de démontage complet tous les ans, comme le préconisent certains fabricants. Le 2^{e} étage du détendeur "Atomic T2" dont le clapet compensé n'est pas marqué par le siège permet à cette société de n'en recommander le contrôle que tous les 3 ans.

Les anglos saxons, plus pragmatiques que les Français, insistent sur la nécessité d'inspecter périodiquement un deuxième étage par une ouverture facile du boîtier. (Le deuxième étage est le plus exposé)

XVI-3 Maintenance curative

C'est l'ensemble des opérations qui permettent de diagnostiquer les pannes, d'y remédier et de remettre le matériel dans l'état et avec les mêmes performances

que celles prévues à l'origine. Lorsque ce n'est plus possible, il doit être déclassé.

Il est difficile de décrire les nombreuses pannes qui peuvent survenir et encore plus la procédure de démontage et de remontage des nombreux détendeurs que l'on peut rencontrer.

Nous nous contenterons donc de donner les principaux diagnostics en fonction de leurs symptômes et les recommandations principales pour le démontage, le remontage et le réglage, indépendamment de celles données par le constructeur qui doivent être considérées comme prioritaires.

Toute intervention nécessite un contrôle complet et doit commencer par un examen visuel détaillé. Cet examen consiste à rechercher les traces de choc, de déformation, de détérioration des tuyaux, de colmatage du filtre d'entrée etc. (Cochez les pannes sur la fiche de contrôle, sans démontage, en annexe de ce chapitre) Elle est aussi disponible sur le site <http://hlbmatos.free.fr>)

Si tout semble normal, le détendeur est monté sur une bouteille où l'on vérifie qu'il n'y a pas de fuite ou qu'il ne passe pas en débit continu. Ceci peut aussi se faire en immergeant l'ensemble dans une piscine ou une cuve quelconque remplie d'eau.

Ensuite, en respirant sur l'embout, on vérifie d'abord l'étanchéité, bouteille fermée puis la sensibilité à l'inspiration et à l'expiration, bouteille ouverte. Ce point est relativement subjectif, seule l'expérience permet, dans certains cas, de détecter une anomalie. Ce contrôle complet permet de vérifier le symptôme annoncé par l'utilisateur et d'en découvrir la raison.

XVI-3-1 Symptômes et diagnostics de pannes

(Détendeurs à deux étages)

Symptôme n° 1 : Détendeur dur à l'inspiration

Diagnostics possibles :

1. Réserve non tirée; (Quand elle existe)
2. Robinet de conservation mal ouvert ;
3. Bouteille insuffisamment gonflée ;
4. Filtre d'entrée encrassé ;
5. Premier étage encrassé ;
6. Premier étage déréglé ; (Moyenne pression faible)
7. Boîtier déformé ; (Boîtier métallique en particulier)
8. Second étage déréglé ;

9. Second étage encrassé ;
10. Compensation exagérée de l'effet Venturi. (Vérifier la position des déflecteurs éventuels à l'intérieur du 2e étage)

Symptôme n° 2 : Détendeur dur à l'expiration.

Diagnostic possible :

Membrane d'expiration collée : Ceci provient généralement d'un début de décomposition dû à la chaleur ou aux hydrocarbures. Une simple immersion dans l'eau suffit en général à la décoller.

Il est toutefois préférable de la changer aussitôt que possible en prenant bien soin de nettoyer, sans endommager la portée, tous résidus de l'ancienne membrane. Ceci se produisait surtout avec les membranes en néoprène.

Symptôme n° 3 : Entrée d'eau à l'inspiration

Diagnostics possibles :

1. Boîtier déformé ou desserré

2. Membrane d'inspiration détériorée.

3. Membrane d'expiration endommagée. (Voir remarques du § III-5)

4. Corps étranger ou en cas de givrage, glace sous la membrane d'expiration.

5. Lorsque le plongeur a la tête vers le bas, sous l'action du courant ou lors d'une nage rapide, certains détendeurs peuvent présenter des instabilités ou des entrées d'eau en raison des variations de pression sur les membranes. Ce sont des défauts de conception pour lesquels il n'y a pas grand-chose à faire sinon changer de modèle de détendeur.

6. Présence d'eau dans la bouteille : Dans ce cas, il est souhaitable de vérifier la bouteille et le détendeur, en particulier le filtre d'entrée qui doit rester propre.

Symptôme n° 4 : Fuite d'air à la fixation sur la bouteille

Diagnostics possibles :

1. Joint torique détérioré. (Sous l'effet de mises sous pression successives le joint se découpe en s'extrudant dans les interstices entre le détendeur et la robinetterie)

2. Joint torique de mauvaise dimension ou de mauvaise dureté.

3. Portée de joint du détendeur détériorée. Attention il existe 2 standards de raccords par étrier, voisins mais peu compatibles. (Voir § III-11-2)

Symptôme n° 5 : Fuite d'air au premier étage

Diagnostic possible :

Il peut s'agir d'un des joints de sortie de tuyau, de bouchon ou de la tourelle quand il y en a une. Nettoyer l'emplacement et changer le joint.

Symptôme n° 6 : Fuite d'air par l'une des chambres humides

Diagnostic possible :

Membrane correspondante ou joint de piston du 1er étage détérioré.

Symptôme n° 7 : Fuite à l'entrée du second étage.

Diagnostic possible :

Joint torique de raccordement du flexible détérioré.

Changer le joint après avoir nettoyé son logement.

Symptôme n° 8 : Fuite d'air ou hernie le long d'un tuyau.

Diagnostic possible :

La fuite peut avoir son origine en un point quelconque du tuyau ; l'air migrant le long de la gaine extérieure peut sortir en un point quelconque. Le tuyau doit être remplacé.

Symptôme n° 9 : Fuite d'air importante apparaissant par l'embout.

Dans tous les cas, le débit continu devrait s'arrêter lorsqu'on met un doigt sur l'embout ou qu'on souffle en sens inverse, sinon il y a panne.

Diagnostics possibles pour le 1er étage :

1. Givrage ; (La glace s'accumule sur la membrane ou la buse du piston)

2. Blocage du premier étage par encrassage, par un corps étranger dans la chambre humide ou par grippage dû à la migration du lubrifiant ;

3. Déréglage ; (Moyenne pression trop élevée)

4. Détérioration du siège ou du clapet ; (Si la haute pression est trop élevée la pastille souple du clapet risque de s'extruder. (Certains anciens détendeurs supportent moins de 200 bars)

Diagnostics possibles pour le 2e étage :

1. Givrage. (Glace autour des leviers)

2. Blocage par encrassage ou par un corps étranger. (chambre humide, chambre sèche ou chambre de compensation)

3. Boîtier déformé. (Boîtier métallique)

4. Déréglage.

5. Blocage du système de commande du bouton de purge, soit par un corps étranger soit par déformation.

6. Détérioration importante du siège ou du clapet.

7. Verrou de stockage resté enclenché. (Voir paragraphe XIII-1-1 et figure 57)

Symptôme n° 10 : Petite fuite apparaissant par l'embout quelques instants après l'ouverture de la bouteille.

Diagnostic possible :

Légère détérioration (marquage) du siège ou du clapet du premier étage. (La moyenne pression monte lentement jusqu'à provoquer une fuite au deuxième étage)

En aucun cas on ne doit réduire cette fuite en réduisant la valeur de la moyenne pression.

On détectera cette panne, plus facilement, en utilisant un manomètre monté sur l'embout du "direct system". (Voir figure 63)

Symptôme n° 11 : Fuite à la sortie du tuyau du "Direct System".

Diagnostic possible :

1. Grain de sable sous le clapet. Il a pu être introduit lors de la connexion.

Il est important d'éliminer ce sable car celui-ci risque, de plus, de provoquer une panne du système inflateur.

2. Valve Schrader (ou autre) détériorée.

La changer. (Nécessite un outil spécial, disponible chez les vendeurs d'accessoires automobiles)

Symptôme n° 12 : Fuite au raccord tournant du manomètre.

Diagnostic possible :

Usure ou encrassement des joints. Cette panne est fréquente.

Changer le raccord complet et ne monter le nouveau qu'après avoir bien nettoyé les deux côtés. (Sortie du tuyau et entrée du manomètre) N'hésitez pas à graisser abondamment avec la graisse appropriée..

Symptôme n° 13 : Stabilisation longue de la MP.

Diagnostic possible :

Temps de stabilisation de la MP trop long. Par exemple 10 secondes pour franchir les derniers 5% de la valeur finale.

Le siège ou/et le clapet sont dégradés et nécessite une vérification ou un échange.

XVI-3-2 Démontages, nettoyage, remontage

Si l'on veut éviter des catastrophes, il faut éviter de procéder à l'aveuglette. Il vaut mieux réfléchir sérieusement avant de se lancer dans une opération hasardeuse.

Les fabricants fournissent parfois des éclatés ou des procédures indiquant l'ordre de démontage, de remontage et de réglage, ainsi que l'outillage nécessaire.

Dans tous les cas, il est bon de noter, au fur et à mesure, ce que l'on fait pour revenir en arrière ou pour les opérations futures. (*Voir exemples d'éclatés en annexe, photos 30 et 31*)

Pour faire face à toutes les situations, il est souhaitable de posséder un outillage universel. Néanmoins, il faut essayer de n'utiliser que l'outillage prévu par le constructeur et se rappeler que : les pinces, tournevis et même les clés à molettes laissent des marques sur le matériel. Il ne faut donc les utiliser qu'avec précaution lorsqu'on ne peut faire autrement.

Au fur et à mesure du démontage, disposer les pièces dans des boîtes séparées, prévues à cet effet pour éviter de les endommager, de les mélanger ou de les égarer. Un plateau de self-service, à plusieurs cases, peut être très utile.

Ne pas démonter un détendeur sans se soucier de l'endroit où les pièces peuvent tomber, se détériorer ou se perdre. Noter aussi le sens de montage des pièces, éventuellement les marquer au marqueur indélébile.

Aujourd'hui, il est possible de prendre une série de photos numériques qui permettra de retrouver l'ordre et le sens de remontage, à toute fin utile.

Lors de démontage, l'usage de produit dégrippant peut être nécessaire. Dans ce cas, il faut laisser à ce produit le temps de faire son effet et surtout bien nettoyer les pièces une fois l'opération terminée.

L'usage de produit de nettoyage, en particulier pour le détartrage, n'est pas contre-indiqué. Cependant, certains d'entre eux peuvent être agressifs surtout pour les pièces non métalliques et les peintures. Toujours commencer par un dégraissage à la lessive avant d'utiliser ces produits et bien les rincer après. La lessive St Marc est un bon dégraissant

L'immersion pendant quelques minutes dans une solution de 10 à 20% d'acide orthophosphorique est possible. Le vinaigre blanc chaud est une solution économique mais qui peut endommager le traitement des pièces. (En cas de doute consultez le constructeur)

L'usage d'un bac à ultrasons est utile, bien qu'une brosse à dents soit efficace et beaucoup moins chère.

Les joints d'étanchéité nécessitent des soins particuliers. Pour les sortir de leur emplacement, il faut utiliser une aiguille émoussée de façon à ne pas rayer leur logement ou endommager le joint lui-même, s'il est récupérable. Pour le remettre en place, on peut utiliser un outillage approprié. (Un cône roulé de papier ou de plastique fait bien l'affaire)

Le logement, ainsi que le joint, seront soigneusement nettoyés avec des chiffons secs non pelucheux. Le papier type "Essuie tout" est aussi très efficace. Si des traces quelconques persistent sur le joint, s'il présente des éraflures, des déformations permanentes ou s'il a perdu de sa souplesse, il vaut mieux le changer.

Lorsqu'on procède à un échange, il y a lieu de se reporter aux recommandations ou aux références du constructeur, aussi bien pour les dimensions, la dureté, la nature du matériau que pour les caractéristiques du lubrifiant utilisé.

Comme pour le joint de robinetterie, la partie du joint qui entre dans les interstices entre les pièces est découpée par les angles vifs de ceux-ci. Un examen à la loupe permet de déceler de simples rayures qui peuvent être à l'origine de micro fuites. Au remontage, lubrifier soigneusement mais sans excès. Un film gras suffit. Attention aux bombes contenant de l'huile, le gaz propulseur peut endommager les joints.

Ne pas remplacer la visserie d'un détendeur par une visserie d'un métal différent. Changer les écrous freins, à frein nylon, après chaque démontage.

XVI-3-3 Réglages

(Voir figure 62)

Des réglages peuvent être nécessaires après toute opération de maintenance, de telle sorte que le détendeur retrouve ses performances initiales.

Premier étage

Cet étage possède souvent un réglage de la moyenne pression. Il consiste, à l'aide d'une pièce filetée, à comprimer plus ou moins le ressort qui appuie sur la membrane ou le piston ou bien encore à modifier la position du siège.

La procédure consiste à utiliser un manomètre muni d'un about connecté au tuyau du "Direct System". Il suffit alors d'actionner le réglage et la purge par touches successives pour obtenir la valeur indiquée par le constructeur. Laisser à la pression le temps de se stabiliser. Cela peut prendre plusieurs secondes ; au-delà, le clapet est à changer. On notera que le manomètre est du type relatif et qu'il mesure la MP et non pas la (Pa + MP).

Dans la figure 63a, on voit qu'en dévissant le siège on provoque l'augmentation de la moyenne pression. Pendant le réglage, il est préférable de fermer la bouteille et de purger le détendeur pour éviter de marquer le siège en le faisant tourner. (On procédera alors par touches successives)

Si le réglage est en dessous de la valeur prévue, le débit du deuxième étage risque d'être insuffisant. S'il est au-dessus, il risque d'être instable. Il est aussi indispensable de s'assurer de la HP pour laquelle il doit être réglé. Certains 1 er étages n'ont pas de réglage mais utilisent des ressorts tarés. Il existe des appareils simples qui permettent de vérifier ces ressorts. Il est alors possible, soit de les remplacer, soit de leur ajouter une cale d'épaisseur pour obtenir la valeur de MP prévue.

Deuxième étage

Le seul réglage généralement accessible, est celui des différents jeux entre la membrane et le clapet.

Pour le second étage, le réglage se fait en ajustant la longueur de la tige de commande du clapet à l'aide d'un écrou et contre-écrou de blocage (voir figure 63b) ou par torsion du levier de membrane. Les deux réglages peuvent parfois être nécessaires.

Il arrive que le jeu soit difficile à ajuster car il se modifie lors de la fermeture du boîtier et de la mise sous pression. On peut alors procéder par touches successives ou utiliser des cales références prévues par le fabricant.

Il ne faut pas confondre le réglage du jeu dans le mécanisme avec celui du seuil inspiratoire ou celui de l'effet Venturi. Dans le premier cas on agit sur la force du ressort de fermeture du clapet (*Voir figure 24*) dans le deuxième on agit, en général, sur la position d'un volet.

Il existe des montages qui permettent de régler un second étage, sous pression, en vissant ou dévissant le siège.

Un cas particulier est celui du détendeur à siège flottant qui ne peut être réglé que lorsque la moyenne pression est établie.

"Une mauvaise méthode", consiste à effectuer le réglage global d'un détendeur à deux étages, sans manomètre, en se basant sur la fuite du deuxième étage. En effet, si celui ci a déjà une fuite, on risque en voulant la supprimer de réduire excessivement la moyenne pression et donc de limiter le débit.

Si par contre, il est réglé trop dur on risque de mettre trop de MP. Le détendeur devient instable.

D'une façon générale les réglages sont destinés à compenser les imperfections de la mécanique. Ils influencent les performances des détendeurs. Ce qui signifie qu'ils ne doivent pas être confiés à n'importe qui.

Les réglages accessibles sous l'eau sont très subjectifs. L'utilisateur risque, sinon d'effectuer un réglage dangereux, en tout cas d'être assez loin du réglage optimal souhaité.

XVI-3-4 Inspection et tests simplifiés

Nous donnons en annexe une "Fiche d'inspection et de tests", sans démontage. (À recopier) Elle doit être utilisée à titre préventif, à chaque fois que nécessaire mais au moins une fois par an. Ceci permet d'éviter des démontages inutiles, surtout quand l'appareil n'est pas utilisé de façon intensive.

Cette fiche est divisée en deux parties. L'une consiste en une inspection visuelle, l'autre en un contrôle du fonctionnement et particulièrement de la mesure du seuil d'ouverture. Cette mesure consiste à connecter le détendeur sur une bouteille et à immerger doucement le 2e étage dans l'eau, embout tourné vers le haut. La profondeur à laquelle il commence à débiter donne une bonne idée du seuil inspiratoire.

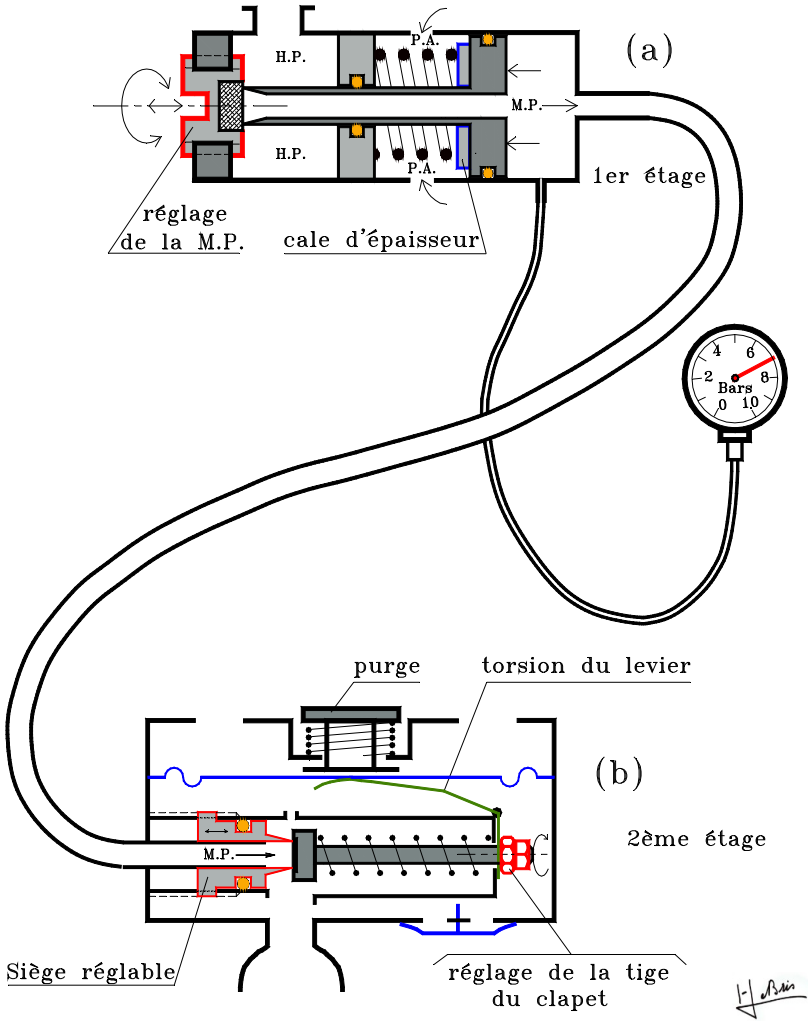


Figure 62 - Réglage d'un détendeur

Avant l'immersion le détendeur ne doit pas fuir. Il doit commencer à débiter avant que l'eau n'atteigne l'orifice de l'embout. S'il ne le fait pas, obturer celui-ci avec le pouce pour effectuer la mesure. Il doit s'arrêter de fuser dès que l'eau pénètre dans l'embout.

XVI-4 Les rechanges

En raison du nombre important de modèles de détendeurs, il est parfois difficile à un club ou à un plongeur de prévoir une liste optimisée de pièces de rechange.

En effet, il faut prendre en compte, le prix, la fréquence des pannes, la difficulté à se procurer les pièces et la compétence du personnel chargé de la maintenance.

A titre indicatif, au niveau d'un club, pour 20 détendeurs du même type, il est bon de disposer, au moins, d'un jeu complet de joints, de membranes, de clapets et de sièges.

D'une façon générale, de prévoir toutes pièces non métalliques ou comportant des parties non métalliques. (En dehors des corps de détendeurs eux-mêmes) En fonction de l'expérience acquise, on y ajoutera un lot plus important pour les pièces en cause.

Il est souhaitable de changer le filtre d'entrée au moins tous les deux ans. Toutefois, cela dépend de la cadence d'utilisation et de la qualité de l'air utilisé.

Lorsque le club possède des détendeurs peu courants, il doit augmenter ces quantités en fonction des difficultés d'approvisionnement.

En cas de sortie club, il faut, par expérience, emporter le lot de rechange, les outils correspondants et au moins, 5 % + 1 de détendeurs complets en rechange.

Il est souhaitable qu'un plongeur soit autonome, surtout s'il voyage à l'étranger pendant un certain temps ou si son matériel est peu courant. Il a donc intérêt à posséder un jeu de pièces de rechanges et les outils correspondants à son propre détendeur.

Aujourd'hui, le matériel n'est plus souvent entretenu au sein des clubs. Cependant, si toutes les conditions de compétences sont réunies, cela peut être, même pour un particulier, une source d'économies sérieuses à condition qu'il s'équipe de l'outillage nécessaire et soit correctement formé.

XVI-5 L'outillage

Étant donné la variété de matériel existant, il est difficile de donner une liste exhaustive de l'outillage nécessaire. Pour chaque équipement, il existe un outillage spécifique que l'on peut se procurer auprès du constructeur bien que, de plus en plus, il le réserve à son réseau de dépanneurs agréés.

Pour l'outillage conventionnel, nous donnons plus loin une liste qui couvre 90 % des besoins pour les détendeurs et les bouteilles. Pour le reste, l'expérience aidera à déterminer ce qui est nécessaire.

Remarques :

Les détendeurs n'apprécient pas d'être serrés dans un étau. Il est possible de réaliser des pièces interfaces qui, d'un côté sont vissées dans l'une des sorties HP ou M.P. du premier étage, attention au pas du filetage, de l'autre elles sont tenues dans l'étau.

Ces pièces permettent de tenir le détendeur fermement sans serrer directement sur celui-ci. Elles feront partie de l'outillage.

Pour le montage ou démontage des accessoires, il est préférable de fixer le premier étage sur la robinetterie d'une bouteille. Cela permet en plus de déterminer la meilleure orientation pour les tuyaux.

XVI-5-1 Liste d'outillage

En plus des outils énumérés plus loin, on se munira d'un manomètre de contrôle de la moyenne pression de 0 à 16 bars. Ce manomètre doit être muni d'un about rapide pour connexion à l'embout du "Direct system". (Voir figure 51 et 52)

Les ingrédients suivants pourront être utilisés : graisse au Silicone, graisse spéciale oxygène, perchloréthylène, vinaigre blanc ou acide orthophosphorique à 10%, chiffons, papier essuie-tout, etc.

Attention : L'entretien du matériel fonctionnant sous forte concentration d'oxygène nécessite un outillage et des soins particuliers.

Liste d'outillage classique *(À titre indicatif)*

Jeux de clés plates de 5 à 24 mm ;

Clés à molette de 34 mm ;

Clé extra plate de 14 pour « Direct system » ;

Clé extra plate de 17 pour 2^{e} étage ;

Clé extra plate de 19 pour le montage des émetteurs d’ordinateurs ;

Il existe des clés assemblées en étoile qui comportent l'ensemble des clés nécessaires pour le montage des accessoires. Leur principal intérêt réside dans leur faible encombrement ;

Jeu de tournevis d'horloger ;

Jeux de 5 tournevis plats et cruciformes ;

Jeu de clés Allen de 2,5 à 10 mm ;

Pince universelle ;

Pince coupante ou ciseaux d'électricien;

Pince multiprise ;

Pince circlips intérieure droite ;

Pince circlips extérieure courbe

Maillet plastique de 250 grammes ;

Brucelles ;

Lampe stylo ;

Miroir orientable de diamètre 23 mm (dit de dentiste) ;

Couteau ;

Brosse à dent ;

Pinceau de nettoyage ;

Grosse aiguille à pointe émoussée ;

Loupe avec éclairage ;

Caisse à outils.

Dans l'atelier, il faut ajouter l'outillage spécifique pour le contrôle et l'entretien des bouteilles :

- Des supports pour poser et faire tourner les bouteilles

- Un système d'éclairage de l'intérieur des bouteilles ;

- une petite brosse métallique ;

- un jeu de brosses métalliques rotatives ou de furets ;

- une perceuse électrique à main de capacité de 10 mm au moins ;

- éventuellement une grenailleuse.

- Différents calibres pour contrôler les filetages des robinetteries et des cols de bouteilles :

T.F.D. 25 x 2.00 6H :	Tampon Fileté Droit
T.L.D. Ø 22.835/ Ø 23.23 QUAL 6 :	Tampon Lisse Droit
B.L.N.E.P. Ø 24.682 (± 0.008) :	Bague Lisse N'entre Pas
B.F.N.E.P. 25 X 2.00 6g :	Bague Filetée N'entre Pas

XVI-5-2 La caisse d'outillage

Au niveau d'un club, il est souhaitable de posséder une caisse à outils facilement transportable. Elle sera appréciée lors des sorties ou des cours sur le matériel. Elle doit pouvoir être fermée à clef et être confiée à un responsable unique.

Les outils devront être marqués et notés sur une liste. La fonction des outils spécifiques devra y être précisée.

La caisse contiendra, outre les outils, un lot de pièces de rechange faisant l'objet d'une liste séparée. Ces pièces devront être conditionnées de façon à ne pas se détériorer au contact des outils.

Les ingrédients devront être conditionnés dans des emballages incassables et sans fuite.

Le modèle de caisse le mieux adapté, semble être celui de mécanicien à plusieurs étages qui se déploie à l'ouverture et qui comporte de nombreuses cases facilement accessibles.

Une caisse en plastique est préférable. Elle regroupera souvent l'outillage des détendeurs et celui des bouteilles. Elle devra être suffisamment importante et maintenue propre.

XVI-6 L'atelier

Bien qu'un certain nombre d'opérations d'entretien puissent se faire sur le coin d'une table, il est souvent préférable de les réaliser dans une pièce réservée à cet effet. (Obligatoire pour le "Matériel oxygène" et suivre la procédure adaptée)

L'atelier permet de travailler dans de bonnes conditions de confort et de propreté. Il permet d'avoir sous la main un certain nombre d'outils, d'ingrédients et de pièces de rechange qui ne sont pas facilement transportables.

Il comprend au minimum :

- un bon éclairage naturel et/ou électrique,
- une table solide, recouverte d'une matière dure et unie,
- un étau à mors parallèles, en acier, d'une dimension d'au moins 125mm équipé de mordaches en plomb ou en zinc,
- des espaces de rangements, fermant à clé, pour l'outillage et les pièces de rechange.

XVI-7 Les règles d'hygiène

Lorsqu'un parc de détendeur est partagé entre plusieurs utilisateurs, cas des clubs ou des structures commerciales, il est recommandé de prendre des mesures élémentaires d'hygiène. Ces mesures simples sont parfois contraignantes dans les clubs qui s'entraînent en piscine car elles doivent être mises en œuvre en dehors du temps d'entraînement et nécessitent plusieurs dizaines de minutes de travail.

Après ou avant utilisation, le 2e étage peut être plongé dans une solution désinfectante pendant un temps recommandé pour le produit choisi. Il doit ensuite être rincé abondamment. L'eau de javel ne suffit pas à éliminer tous les germes à risque. Il existe un certain nombre de produits. Chacun a une efficacité particulière et nécessite une procédure différente. Ces produits se trouvent chez tous les revendeurs de matériel.

Les embouts personnels interchangeables ne répondent pas complètement aux mesures d'hygiène souhaitables. Comme nous l'avons déjà dit, ils ne prennent pas en compte les pollutions probables des chambres sèches des seconds étages.

- La société Apeks a mis sur le marché un embout bactéricide traité avec un additif ion, non toxique. Cet additif détruit le Staphylocoque doré, protège contre le Colibacille ainsi que 23 autres bactéries et 4 types de champignons moisissures, levures et algues. La durée de la protection atteint 10 ans. Il convient pour les stockages défectueux. Son prix serait de 10€ (Divers april 2010)

- Enfin, la commission médicale de la **FFESSM** a choisi un produit qui répond aux normes AFNOR en vigueur.

L'Ecosterix H_20 se présente en une bouteille spray prêt à l'emploi de 75 ml avec un étiquetage référent à la désinfection des embouts buccaux des appareils respiratoires de plongée, avec pour mode d'application une pulvérisation sur l'extérieur de l'embout et deux pulvérisations à l'intérieur de l'embout, et un temps de contact et d'évaporation de 15 minutes, sans besoin de rinçage secondaire.

Une utilisation plus simple que notre ancien produit au bord de la piscine ou sur le pont d'un bateau. La capacité d'utilisation d'un spray correspond à la désinfection de 70 à 100 embouts.

Voir la boutique en ligne fédérale pour ce nouveau produit et bonnes plongées…

On notera qu'il peut concerner d'autres appareils pouvant être en relation avec ce sujet et aussi le risque qu'il y a à respirer l'air qui se trouve dans un gilet de stabilisation. C'est en effet un véritable bouillon de culture. « Un cas mortel a été signalé en Angleterre ».

Photo 29 - MK25 / A700 de Scubapro

CHAPITRE XVII

ANNEXES

XVII-1 FICHE D'INSPECTION D'UN DÉTENDEUR

NOM, Prénom de l'inspecteur	Fabricant : Modèle :	N° du détendeur : Date :

INSPECTION VISUELLE (*Voir figure 64)*

	Localisation	Entourez les défauts constatés
1	Premier étage	N° fabricant absent ou illisible, boîtier rayé ou déformé, chambre humide encrassée - Filtre manquant ou encrassé - Portée du joint rayée ou déformée - Bouchon de protection manquant ou abîmé.
2	Tuyaux MP – HP - DS	Craquelures au pliage, décollement du revêtement, tresse visible Manchon manquant, détérioré, masquant un défaut du sertissage Embout du "Direct System" déformé, encrassé.
3	Manomètre HP	Protection boîtier endommagée. Boîtier ou hublot abîmé Aiguille décalée du zéro.
4	Deuxième étage	N° fabricant absent ou illisible - Boîtier rayé ou déformé - Embout buccal déchiré - Dent manquante - Collier abîmé ou manquant - Déflecteur (moustaches manquantes ou abîmées)

INSPECTION DU FONCTIONNEMENT

Montez le détendeur avec un gilet sur un bloc à 2 sorties.

	Localisation ou fonction	Entourez les défauts constatés
5	Embout "Direct System" (*Inspection dans l'air*)	Connexion ou déconnexion impossible, difficile - Douille bloquée - Pas ou peu de débit. *(Dépend parfois de l'about du gilet)*
6	Etanchéité globale (*Inspection dans l'air*)	Non étanche à l'inspiration par l'embout. (B*outeille fermée, détendeur purgé*)
7	Différents boutons (*Inspection dans l'air*)	La purge du 2e étage tend à rester bloquée. Les réglages du seuil ou du Venturi sont durs ou bloqués.
8	Précision du manomètre (*Inspection dans l'air*)	Erreur supérieure à ± 10 bars à environ 50 bars de HP. Erreur supérieure à ± 20 bars à environ 200 bars de HP. (*Avec un manomètre référence sur la 2e sortie de la robinetterie*)
9	Débit (*Inspection dans l'air*)	Incontrôlable à l'ouverture de la bouteille – S'amorce sur choc - Insuffisant, purge enfoncée. (*Subjectif*)
10	Réglages au minimum (*Inspection dans l'eau*)	Ne débite pas avant la submersion de l'embout - Ne s'arrête pas dès la submersion. (*Immersion lente*, e*mbout vers le haut*)
11	Réglages au maximum (*Inspection dans l'eau*)	Ne débite pas avant la submersion de l'embout, ne s'arrête pas dès la submersion. (*Immersion lente, embout vers le haut*)
12	Fuites diverses (*Inspection dans l'eau*)	Au 1er, au 2e étage – A l'embout du "Direct System" connecté ou déconnecté - Au joint tournant ou au boîtier du manomètre. Le long ou au raccordement des tuyaux MP, HP ou "Direct System".
13	Temps de stabilisation lu au manomètre MP.	Après une purge, la MP met plus de 10 secondes pour entrer à moins de 5% de sa valeur finale. (Le siège et/ou le clapet sont détériorés)
14	Autres défauts constatés	

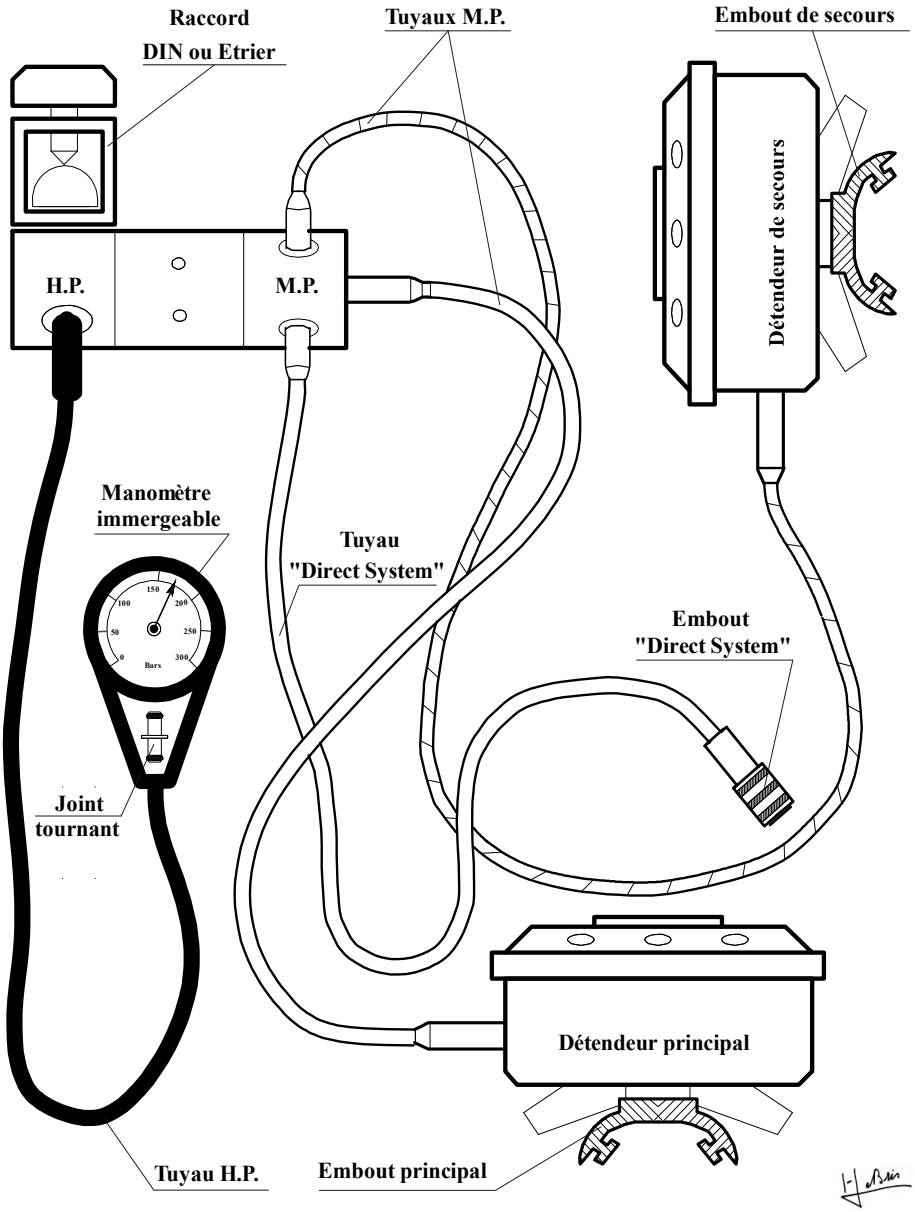
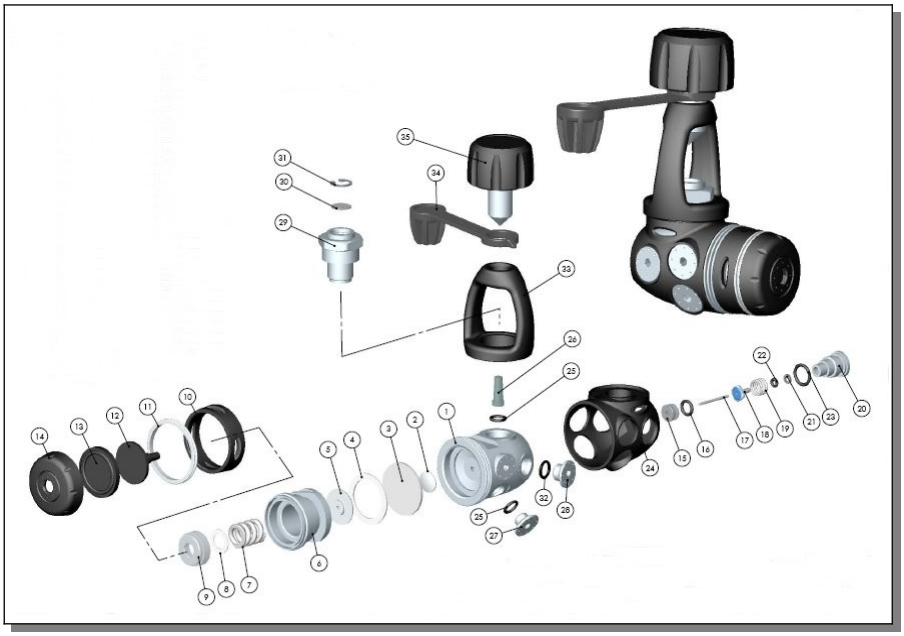


Figure 63 - Localisation des défauts

Cochez sur la liste les pannes détectées et notez ici vos remarques éventuelles :

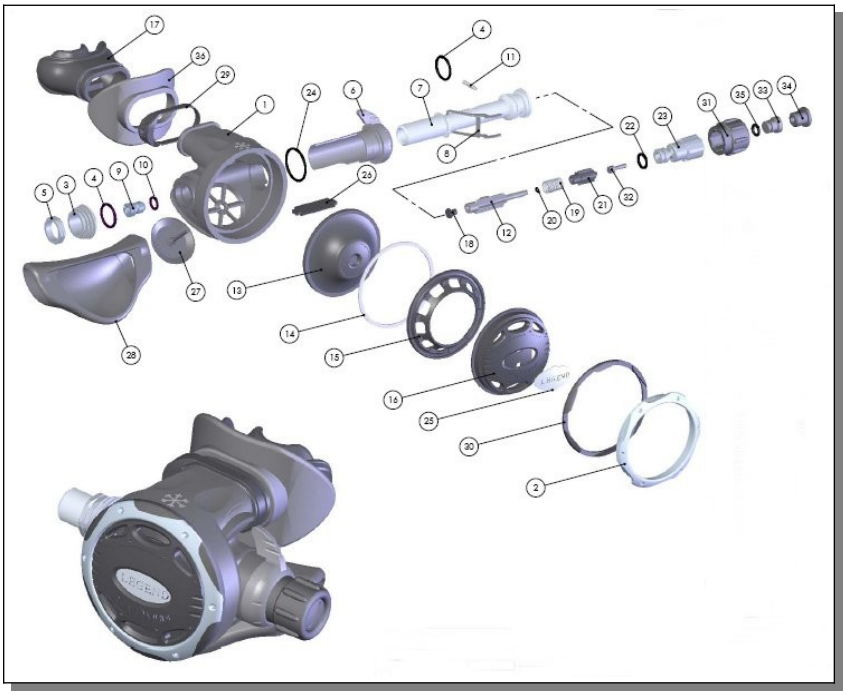
XVII-2 LES ÉCLATÉS (Sont très utiles pour la maintenance des détendeurs)



N°	Désignation	N°	Désignation	N°	Désignation	N°	Désignation
1	Corps	10	Entretoise	19	Ressort	28	Bouchon HP
2	Poussoir	11	Bague à ailette	20	Bouchon	29	Siège
3	Membrane	12	Piston	21	Bague anti-extrusion	30	Pré filtre
4	Rondelle	13	Membrane	22	Joint torique	31	Circlips
5	Embase ressort	14	Bouchon chromé noir	23	Joint torique	32	Pré filtre
6	Chambre sèche	15	Siège	24	Protecteur	33	Etrier chromé noir
7	Ressort	16	Joint torique	25	Joint torique	34	Bouchon d'étrier
8	Rondelle	17	Aiguille	26	Filtre	35	Vis d'étrier
9	Vis de réglage	18	Clapet HP	27	Bouchon MP		Filtre Rondelle Embase ressort

Photo 30 - Éclaté d'un 1er étage

(Legend d'Aqualung)



N°	Désignation	N°	Désignation	N°	Désignation	N°	Désignation
1	Boîtier	10	Joint torique	19	Ressort	28	Déflecteur d'expiration
2	Bague ext. argent	11	Goupille d'arrêt	20	Joint torique	29	Collier d'embout
3	Echangeur thermique	12	Porte clapet compensé	21	Chambre d'équilibrage	30	Bague pare choc
4	Joint torique	13	Membrane	22	Joint torique	31	Volant de réglage
5	Ecrou	14	Rondelle de membrane	23	Vis de réglage	32	Axe
6	Levier Venturi	15	Verrou de membrane	24	Joint torique	33	Vis
7	Insert	16	Poussoir Legend	25	Plaque Legend	34	Bouchon
8	Levier	17	Embout Comfobite	26	Déflecteur d'inspiration	35	Joint torique
9	Siège réglable	18	Clapet	27	Soupape d'expiration	36	Couvre lèvre

Photo 31 - Éclaté d'un 2e étage

(Legend d'Aqualung)

XVII-3 LE LANGAGE DES FABRICANTS

Dans un but commercial, les fabricants ne cessent, dans un langage ésotérique, de créer de nouveaux termes pour désigner leurs innovations. (Lesquelles n'en sont pas toujours) De plus, pour mystifier encore plus le client, ils les choisissent d'origine anglaise. (Ça se vend mieux) Cela n'a pour effet que de créer une certaine confusion. Certains services commerciaux en usent et en abusent. Il nous a donc semblé utile de les démystifier. Malgré tout, quelques points d'interrogations subsistent toujours. Nous avons classé ces sigles ou acronymes par fabricant et par ordre alphabétique.

AERIS

DVT : "Dry Valve Technology". C'est le système qui permet d'obturer l'entrée HP du premier étage lorsque le détendeur est déconnecté de la bouteille.

APEKS

CRC : "Cracking Resistance Control". C'est le bouton de réglage du seuil d'ouverture. (voir en VI-1-2)

IVS : "Integrated Venturi System". C'est le réglage de l'assistance par effet Venturi. (voir chapitre IX)

XTX Status : Système de surveillance électronique d'un premier étage. (Voir chapitre XIII-1-12)

FCD : "Freeflow Control Device" Système de contrôle du débit continu. (Voir en XIII-1-13)

DCE : "Diver Changeable Exhaust system" Kit d'échange des moustaches d'expiration**.** (Voir XIII-1-17)

AQUALUNG

ACD : "Auto Closure Device". Système de fermeture automatique de l'entrée du premier étage. Evite aux pollutions extérieures de pénétrer dans le détendeur quand il est déconnecté. (voir en III-12-3)

ADC : "Assymetric Dry Chamber". C'est, au premier étage, le montage à deux membranes différentes qui permet de réaliser la surcompensation en fonction de la profondeur. (voir en VII-2)

Effet "Turbo" : C'est en fait l'effet Venturi utilisé dans le premier étage pour obtenir des sorties à haut débit. (voir en IX-2-1)

Dual Cam : C'est un système qui permet de régler simultanément l'effet Venturi et le seuil d'ouverture. (voir en XIII-1-15)

Side 'X : Système d'évacuation latérale des bulles avec réchauffage de l'arrivée de l'air MP. (voir en XIII-1-16)

MSB : "Master Breathing System" C'est un système qui avec un seul bouton permet de régler les performances du deuxième étage en ajustant la direction du flux d'air et la manière dont il tournoie ainsi que la résistance à l'inspiration. Il agit à la fois sur l'effet Venturi en début de course et sur le seuil d'inspiration en fin de course.

Common Rail : Que l'on peut traduire par "Rampe commune" Cela consiste à alimenter les différentes sorties MP à partir d'une chambre commune de telle façon que toutes les sorties aient les mêmes performances en débit.

ATOMIC

AFC : "Automatic Flow Control" Dispositif de contrôle automatique de l'effet Venturi en fonction de la profondeur. (Voir en IX-2-2, figure 41)

BEUCHAT

SAS : "Safe Air System" Il s'agit de 2 robinets inclus dans le même corps totalement indépendants puisqu'il y a 2 tuyaux plongeurs et 2 sorties.

MARES

jAX : Embout que l'on peut individualiser en le trempant dans l'eau bouillante puis en le formant en y laissant l'empreinte de ses mâchoires. (Voir en III-8)

SCS : "Spherical Core System" Il s'agit d'un clapet hémisphérique dont nous avons déjà parlé dans les composants. (Voir en III-1-2)

DFC : "Dynamic Flow Control". Il s'agit aussi de l'effet Venturi appliqué au premier étage. (Voir en IX-2-1)

DPD : Commande des positions Dive PréDive qui limite la course du levier du 2e étage pour éviter le débit continu.

VAD : "Vortex Assisted Design" Il s'agit au deuxième étage de l'assistance par effet Vortex. (Voir en IX-4)

NBS : "Natural Breathing System" (Système à respiration naturelle) Il consiste à introduire une pièce en spirale dans le petit tuyau de dérivation du 2e étage du système "Vortex". Il permet de régulariser le débit en évitant les à-coups.

CWD : "Cold Water Diving" (Kit de plongée en eau froide) Il en existe deux modèles, l'un à bain d'huile, l'autre à chambre sèche. (Voir X-5-2)

MESH-GRID : Grille perforée de petits trous, placée devant la membrane du 2e étage, pour éviter le débit continu face au courant ou lors de nage rapide.

NTT : "Nano Thermo Conductive Technologie" Matériau non métallique des boîtiers qui facilite le réchauffement. (Second étage du Prestige 32NTT)

OCEANIC

DVT : "Dry Valve Technology" Système de fermeture de l'entrée du premier étage par clapet aval. Il ne s'ouvre que sous l'effet de la pression à l'ouverture de la bouteille. Il entraîne une légère perte de performance du détendeur. Il évite aux pollutions extérieures de pénétrer dans le détendeur.

POSEIDON

TDA : "Thermo Dynamic Antifreeze". Système de protection contre le givrage. Il est basé sur le renouvellement de l'eau grâce aux mouvements du piston dans la chambre humide du détendeur Xstream. (Voir figure 31)

SCUBAPRO

VIVA : "Venturi Initiated Vacuum Assist". Système d'assistance à effet Venturi, au 2e étage. Souvent réglable en immersion.

PASS : "Piston-Assisted Seat System". Système d'assistance du piston dans un 1er étage. (Voir en IX-3)

TIS : "Thermal Insulation System". Système d'isolation thermique.

AF : "Anti Freeze". Ailettes de réchauffage du 1er étage. (Voir en X-5-3)

HFP : "High Flow Port". Sortie haut débit d'un premier étage. (Voir XII-1-2)

SHERWOOD

DAB : "Dry Air Bled" Dispositif qui permet de maintenir de l'air dans la chambre à pression ambiante où se trouve le ressort d'un premier étage à piston. (Voir en X-5-2 et figure 48a)

DIVERS

AVC : "Automatic Venturi Control" Ajustage automatique de l'effet Venturi.

DBS : C'est toujours l'effet Venturi utilisé, d'une façon ou d'une autre, dans le premier étage pour obtenir des sorties à haut débit. (Voir en IX-2-1)

CWD : "Anti Freeze" Protection contre le froid. (Voir en X-5)

Super Flow : Sortie de premier étage ou tuyau à haut débit. (Voir en XII-1-2)

VAE : "Vacuum Assist Effect" Autre nom de l'effet Venturi en anglais.

DVD system : Système Dive/Prédive ou réglage pendant/avant la plongée.

XVII-4 LE LANGAGE DES PLONGEURS

Les fabricants ont leur langage comme nous venons de le voir mais les plongeurs aussi, des débutants aux moniteurs.

Il n'est pas concevable que l'on puisse enseigner et évaluer les connaissances des plongeurs quand on ne parle pas le même langage.

Les exemples sont multiples et ont plusieurs origines. Il existe parfois 2 noms différents pour désigner la même chose. Certains sont passés dans le langage courant et il est difficile de revenir en arrière. Nous les signalons par un double astérisque.

Le langage évolue. Néanmoins, les moniteurs devraient signaler ces anomalies pour éviter toute confusion.

Exemple 1 : La sur-compensation. Dans ce cas, le nom a été récupéré par la concurrence. Sur-compensation par la pression ambiante (Aqualung) et par la Haute Pression (Scubapro). Ce n'est pas la même chose !

Exemple 2 : Le "Détendeur compensé à membrane" qui devient "Détendeur à membrane compensée" alors que ce n'est pas la membrane mais le clapet, à la rigueur l'étage ou le détendeur qui est compensé. (Quand les Anglo-Saxon utilisent les termes "Balanced-Diaphragm" cela ne signifie pas que la membrane est compensée)

Exemple 3 : Détendeur à piston où le piston désigne la pièce mobile alors qu'elle assure 2 fonctions distinctes. Le piston proprement dit qui remplace une membrane et le clapet qui commande le passage de l'air. On ne devrait pas dire que le piston s'ouvre pour laisser passer l'air.

Exemple 4 : Le clapet et le siège parfois inversé alors que d'après le Larousse, le clapet est la partie mobile, le siège la partie fixe d'un ensemble qui s'appelle une valve. (Les anglo-saxons ont une autre définition)

Exemple 5 : On utilise 2 termes pour un clapet : "équilibré" ou "compensé" il vaut mieux n'utiliser que "compensé" parce que c'est celui utilisé par les fabricants et commerçants et qu'il est passé dans le langage courant.**

Exemple 6 : Le tuyau MP désigne le tuyau entre le 1er et le 2e étage. Tous les plongeurs devraient savoir qu'il contient la moyenne pression plus la pression ambiante (MP+Pa). Cela est passé dans le langage courant. **

Exemple 7 : La Moyenne pression elle-même (MP) désigne le plus souvent celle qui s'ajoute à la Pression ambiante dans un premier étage. On a alors la Pression intermédiaire (Pi) dans le tuyau souple qui relie les 2 étages. (Pi = MP + Pa) "La Pression intermédiaire" est utilisée dans le Manuel de Formation Technique de la FFESSM.

Mais (MP) peut aussi désigner cette Pi (*C'est le cas chez Aqualung*). Personne n'a tort ni raison mais cela gêne la compréhension puis l'évaluation des stagiaires candidats aux examens.

La (MP) pourrait aussi bien s'appeler "Marge de Pression" car c'est elle qui permet au 2e étage de fonctionner correctement.

Exemple 8 : Le détendeur de secours sur un 2e étage est appelé "Octopus" alors que ce mot devrait désigner l'ensemble ainsi équipé. Il est passé dans le langage courant.**

Exemple 9 : Nous parlons souvent de souplesse d'un détendeur sans que cela soit bien défini. Il s'agit probablement du travail respiratoire qui comprend ce lui de l'inspiration et celui bien distinct de l'expiration.

Exemple 10 : La buse mobile désigne un clapet compensé constitué par un "Petit tuyau cylindrique de faible longueur" (Larousse). Cela a été oublié et on désigne couramment par "Clapet compensé" l'ensemble piston plus buse mobile.**

Exemple 11 : (En attente, signalez nous les anomalies de ce genre que vous découvrez)

Photo 32 - MK17AF / X650 de Scubapro

- Premier étage à membrane, compensé par chambre de compensation et surcompensé par la Haute Pression. On voit nettement, à gauche sur cette photo, les ailettes de l'échangeur thermique du premier étage.
- Le deuxième étage est à clapet aval compensé par piston.

****

XVII- LISTES DES FIGURES

FIGURE 1 - FORCES ET PRESSIONS 17

FIGURE 2 - PRINCIPE DU LEVIER 18

FIGURE 3 - LE DÉTENDEUR DE BASE 20

FIGURE 4 - ÉLÉMENTS POUR LE CALCUL DU SEUIL D'OUVERTURE.....21

FIGURE 5 - EFFET VENTURI 25

FIGURE 6 - DIFFÉRENTS TYPES DE CLAPETS 28

FIGURE 7 - PRESSION ENTRE SIÈGE ET CLAPET 30

FIGURE 8 - REPRÉSENTATION DES RESSORTS 32

FIGURE 9 - MEMBRANE D'INSPIRATION 33

FIGURE 10 - POINTEAUX ET LEVIERS 35

FIGURE 11 - SYSTÈMES D'EXPIRATION 36

FIGURE 12 - JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ 38

FIGURE 13 - RACCORD À ÉTRIER ET RACCORD DIN 42

FIGURE 14 - RACCORDS "AQUALUNG" AVEC FERMETURE AUTOMATIQUE 44

FIGURE 15 - LE MISTRAL DE LA SPIROTECHNIQUE 47

FIGURE 16 - LE MÉCANISME DE L'ANCIEN "MISTRAL" 48

FIGURE 17 - LE DÉTENDEUR "ROYAL MISTRAL" 50

FIGURE 18 - DÉTENDEUR À DEUX ÉTAGES 51

FIGURE 19 - DIFFÉRENTS TYPES DE PREMIER ÉTAGE ……..53

FIGURE 20 - ÉLÉMENTS POUR LE CALCUL D'UN PREMIER ÉTAGE ……..54

FIGURE 21 - LE DEUXIÈME ÉTAGE ……58

FIGURE 22 - ÉLÉMENTS POUR LE CALCUL D'UN DEUXIÈME ÉTAGE ……60

FIGURE 23 - DIFFÉRENTS DEUXIÈMES ÉTAGES ……..61

FIGURE 24 - RÉGLAGE MANUEL ……65

FIGURE 25 - COMPENSATION PAR CLAPET OU PAR PISTON ……...68

FIGURE 26 - DEUXIÈME ÉTAGE SCUBAPRO ……..69

FIGURE 27 - PREMIER ÉTAGE À CHAMBRE DE COMPENSATION ……...70

FIGURE 28 - DEUXIÈME ÉTAGE À CHAMBRE DE COMPENSATION ……71

FIGURE 29 - SIÈGE MOBILE À CLAPET AVAL ……72

FIGURE 30 - SIÈGE MOBILE À CLAPET AMONT ……73

FIGURE 31 - LE "XSTREAM"RÉALISATION PRATIQUE ……...75

FIGURE 32 - LE SIÈGE MOBILE AU DEUXIÈME ÉTAGE ……76

FIGURE 33 - COMPENSATION PAR BUSE MOBILE ……...78

FIGURE 34 - SURCOMPENSATION PAR LA HP ……...85

FIGURE 35 - SURCOMPENSATION À MEMBRANES PAR PRESSION AMBIANTE .86

FIGURE 36 - SURCOMPENSATION À PISTONS PAR LA PRESSION AMBIANTE ...89

FIGURE 37 - CLAPETS PILOTÉS ……92

FIGURE 38 - DÉTENDEUR "ALIZÉ"……. 93

FIGURE 39 - CLAPETS SOUPLES PILOTÉS ……95

FIGURE 40 - EFFET VENTURI AU 1ER ÉTAGE ……97

FIGURE 41 - EFFET VENTURI AU 2E ÉTAGE ……98

FIGURE 42 - EFFET BUSE MOBILE AU 1ER ÉTAGE ……100

FIGURE 43 - EFFET VORTEX AU 2E ÉTAGE ……101

FIGURE 44 - COURBE DÉTENTE / REFROIDISSEMENT ……104

FIGURE 45 - LE FROID AU PREMIER ÉTAGE ……106

FIGURE 46 - LE FROID AU DEUXIÈME ÉTAGE ……108

FIGURE 47 - PROTECTION DU PREMIER ÉTAGE PAR DE L'HUILE ……109

FIGURE 48 - PROTECTION DU PREMIER ÉTAGE PAR CHAMBRES SÈCHES …..110

FIGURE 49 - PROTECTION DU DEUXIÈME ÉTAGE ……111

FIGURE 50 - LE COUP DE FEU ……116

FIGURE 51 - LES ACCESSOIRES DANS LE SYSTÈME OCTOPUS ……123

FIGURE 52 - ACCESSOIRES DIVERS ……126

FIGURE 53 - CONNECTEUR À VALVE SCHRADER ……127

FIGURE 54 - CONNECTEUR À GROS DÉBIT ……128

FIGURE 55 - COMBINÉ DÉTENDEUR INFLATEUR INSPIRATION–EXPIRATION ..130

FIGURE 56 - COMBINÉ DÉTENDEUR INFLATEUR GONFLAGES BOUÉE……...131

FIGURE 57 - ASTUCES OU GADGETS ? ……137

FIGURE 58 - COURBES RESPIRATOIRES THÉORIQUES ……148

FIGURE 59 - COURBES RESPIRATOIRES PRATIQUES ……..149

FIGURE 60 – DÉFORMATION DE LA COURBE RESPIRATOIRE…….……...152

FIGURE 61 - COURBES RESPIRATOIRES, FONCTION DE LA POSITION ……..155

FIGURE 62 - RÉGLAGE D'UN DÉTENDEUR ……...169

FIGURE 63 - LOCALISATION DES DÉFAUTS ……178

****

XVII-5 LISTE DES PHOTOGRAPHIES

PHOTO 1 - SCAPHANDRE ROUQUAYROL ET DENAYROUZE 1859…….. 2

PHOTO 2 - LE SCANUBA, (1990) PRÉPARATION D'UNE PLONGÉE ……..12

PHOTO 3 - LE "MK25 / X600" DE SCUBAPRO ……..27

PHOTO 4 - MÉCANISME DE L'ANCIEN MISTRAL…….….51

PHOTO 5 - LE NOUVEAU MISTRAL ……65

PHOTO 6 – UN DOUBLE PREMIER ÉTAGE…… 81

PHOTO 7 - LE "LEGEND" D'AQUALUNG ……..……84

PHOTO 8 – LE MICRONIC.....90

PHOTO 9 - DÉTENDEUR LAMA (1985) ……98

PHOTO 10 - DEUXIÈME ÉTAGE DU DÉTENDEUR T2 DE ATOMIC……..101

PHOTO 11 - LE DÉTENDEUR "ABYSS" DE MARES ……104

PHOTO 12 - LE "GLACIA" DE AQUALUNG……..116

PHOTO 13 - LE CASQUE BULLE LAMA (ANNÉES 80) ……117

PHOTO 14 – FILTRE COMPLÉMENTAIRE……..……..119

PHOTO 15 - COUP DE FEU DANS UNE ROBINETTERIE ……122

PHOTO 16 - SORTIES HAUTES ET MOYENNES PRESSION ……..121

PHOTO 17 - DÉTENDEUR DE SECOURS "EGRESS" DE APEKS ……..124

PHOTO 18 - AIR 2 DE SCUBAPRO (VERSION 4) ……...128

PHOTO 19 - AIR SOURCE DE AQUALUNG (VERSION 2008) ……..132

PHOTO 20 - LE MASQUE FACIAL SCUBAPRO ……..133

PHOTO 21 - LE SECOND ÉTAGE DU MARES "PRESTIGE" ……134

PHOTO 22 SURVEILLANCE ÉLECTRONIQUE APEKS……..……139

PHOTO 23 - LE PREMIER ÉTAGE DU XTX50 DE APEKS ……140

PHOTO 24 - LE KRONOS D'AQUALUNG ……..142

PHOTO 25 – MINIMANOMÉTRE……..……..142

PHOTO 26 – RECYCLEUR BUDY INSPIRATION……144

PHOTO 27 – RECYCLEUR TRITON……144

PHOTO 28 - LA MACHINE À RESPIRER "ANSTI" ……..156

PHOTO 29 - MK25 / A700 DE SCUBAPRO ……...175

PHOTO 30 – ÉCLATE PREMIER ÉTAGE……179

PHOTO 31 - ÉCLATE DEUXIÈME ÉTAGE……180

PHOTO 32 - MK17AF / X650 DE SCUBAPRO ……..184

****

La version 2018 de ce livre a été mise en ligne le 23/10/2017

Elle présente tout son intérêt en étant vue sur grand écran.

(Dernière mise à jour le 30/05/2021)

Avertissements

- Les informations et indications données dans cet ouvrage n'ont rien d'exhaustives. Elles ne sont données qu'à titre indicatif et ne sauraient engager la responsabilité de l'auteur. Celui-ci ne pourra être tenu pour responsable de toute erreur, omission ou lacune qui aurait pu s'y glisser ainsi que des conséquences, quelles qu'elles soient qui résulteraient de leur utilisation.

- Le code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation, traduction ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement écrit de l'auteur ou des ses ayants droit est illicite et constitue une contrefaçon, aux termes des articles L.335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

Cliquez sur « Livre d'or » si vous voulez y laisser vos impressions.

Cliquez sur « Remarques et corrections » pour éventuellement nous faire part de celles-ci.

Nous vous en remercions d'avance.

Henri LE BRIS

Remarque : À cet ouvrage, un chapitre aurait besoin d'être développé. Tout matériel étant susceptible de tomber en panne et dans n'importe quelle circonstance, nous devons répondre aux question "**Que faire si**".

C'est à dire, ce vous devez faire pour vous ou pour tout autre plongeur lorsqu'une panne survient dans des circonstances qui peuvent vous mettre l'un ou l'autre en difficulté.

XiTi

****