



Le matériel de plongée

Marc LE GOFF

MF2 – n°2293

Moniteur Nitrox

Moniteur EH1

Plan du cours

- Généralités
 - Rappels de physique : force, pression
 - Étanchéité
- Le compresseur
- Le Gonflage
- La mesure : le manomètre
- Les détendeurs

Généralités

Généralités

Le compresseur

Le Gonflage

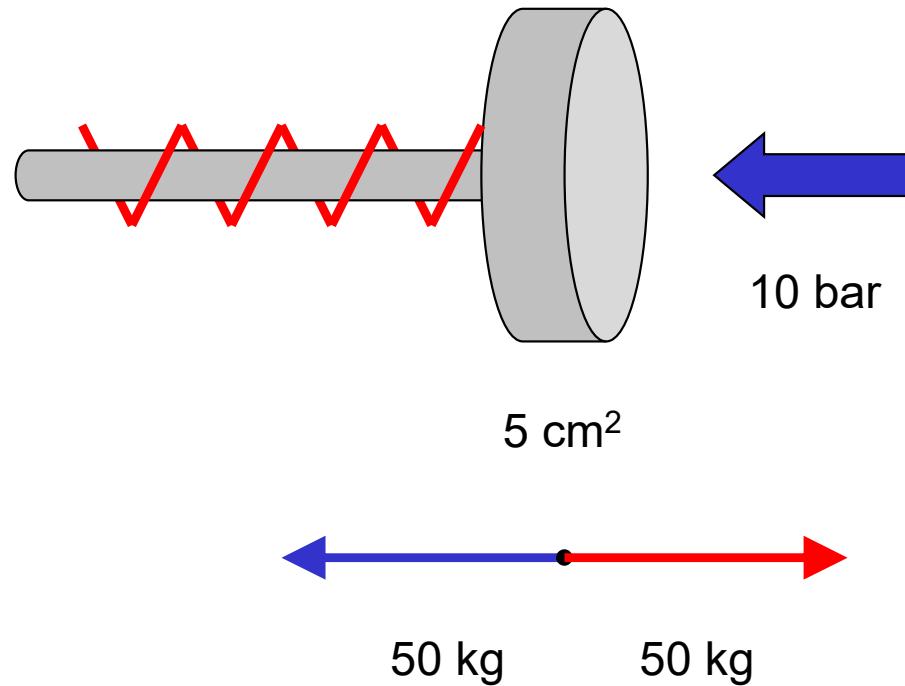
La mesure : le manomètre

Les détendeurs

Rappels de physique

$$P = F / S \Leftrightarrow F = P \times S$$

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 0,981 \text{ bar} \approx 1 \text{ bar}$$



Généralités

Le compresseur

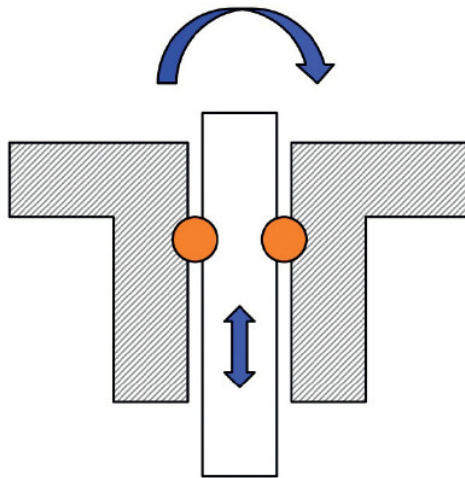
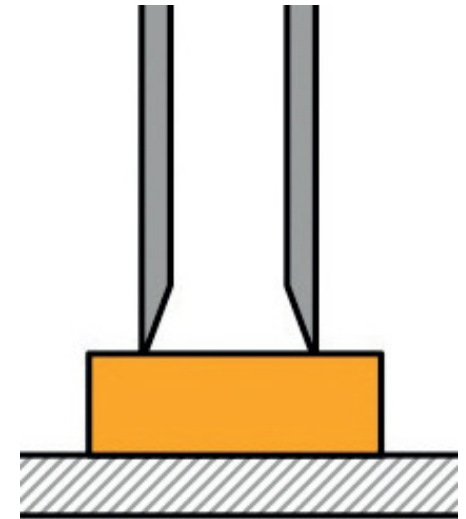
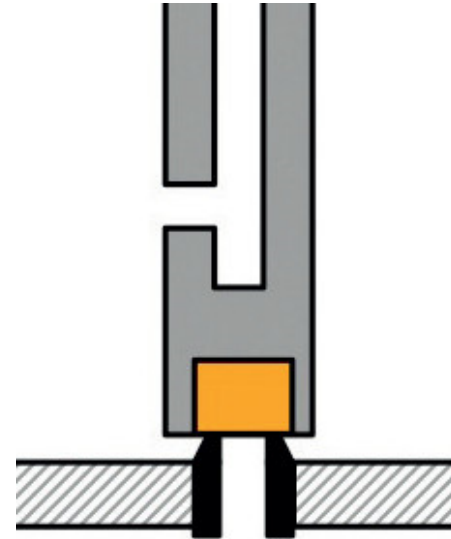
Le Gonflage

La mesure : le manomètre

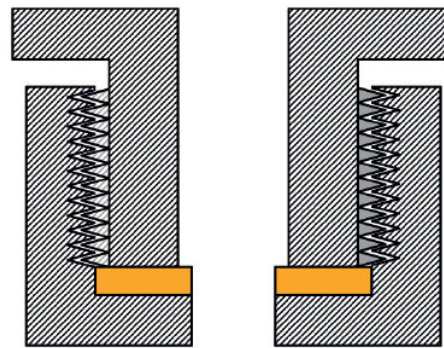
Les détendeurs

Étanchéité

- Siège (fixe) - clapet (mobile)
- Matériau dur / matériau tendre
- Joints :
 - Plats
 - Toriques
 - Lubrification



JOINT TORIQUE



JOINT PLAT

Généralités

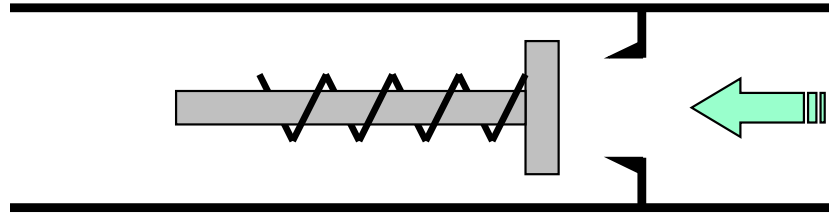
Le compresseur

Le Gonflage

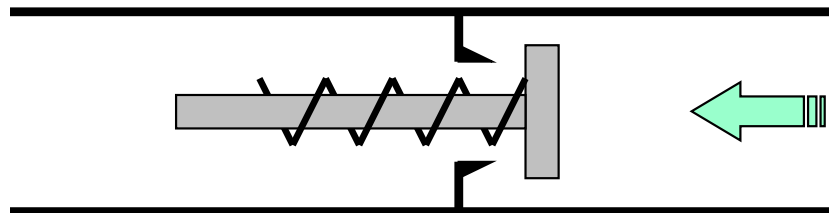
La mesure : le manomètre

Les détendeurs

Clapets amont / aval



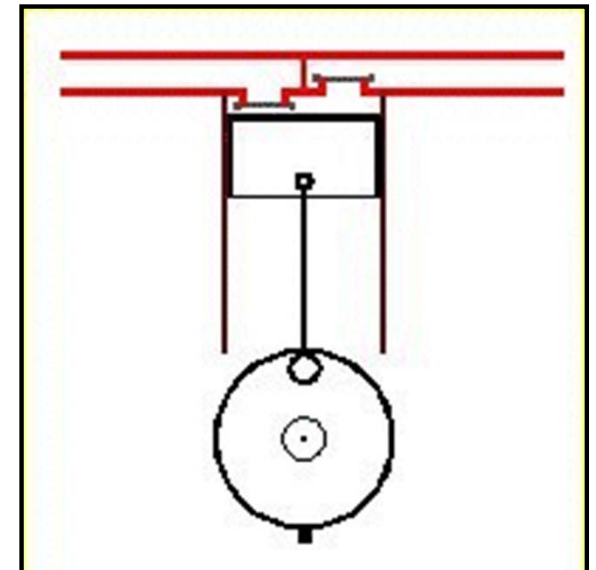
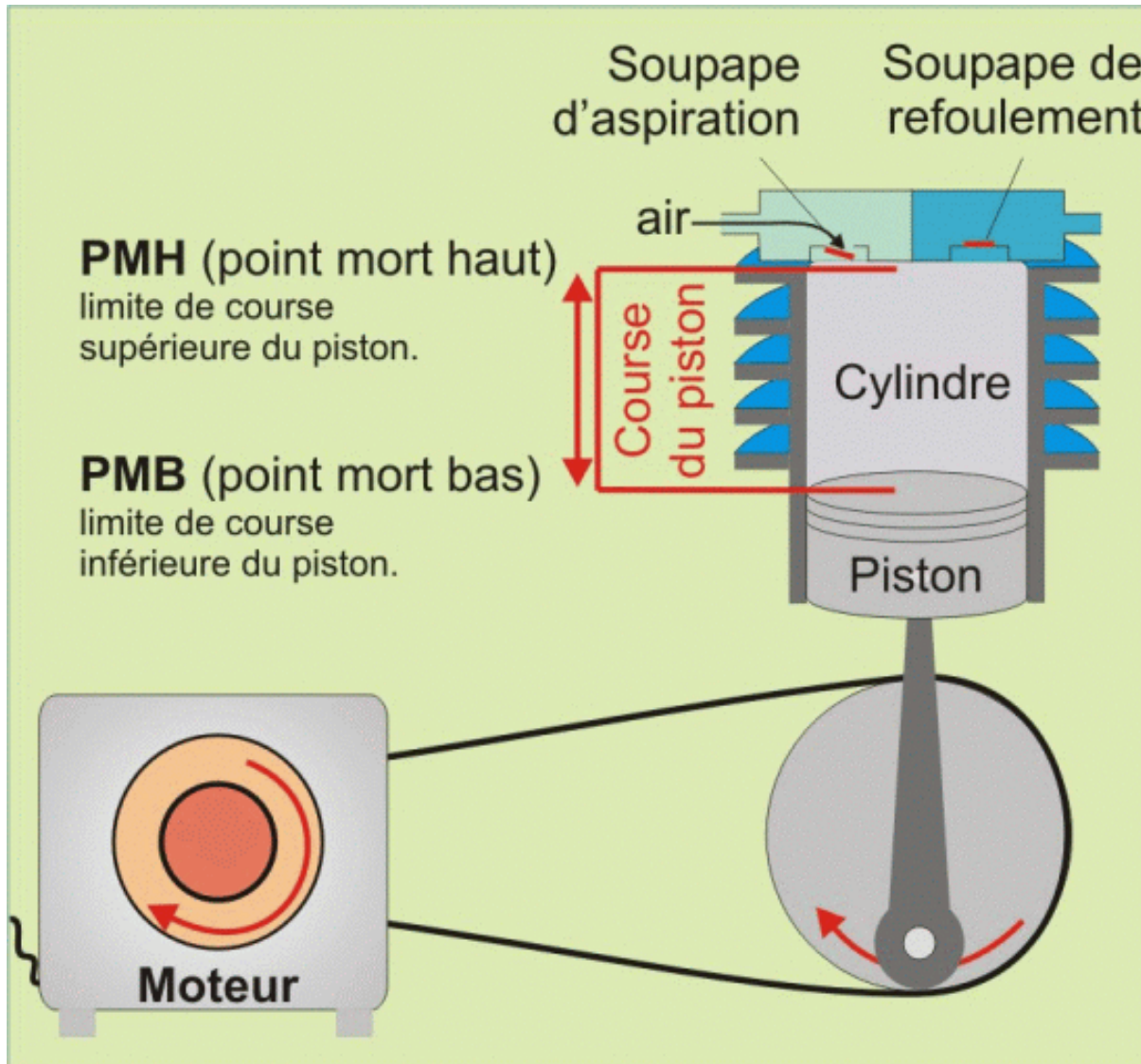
clapet aval : 2^{ème} étage, purge rapide gilet, soupape d'expiration



clapet amont : direct-system, inflateur

Le compresseur

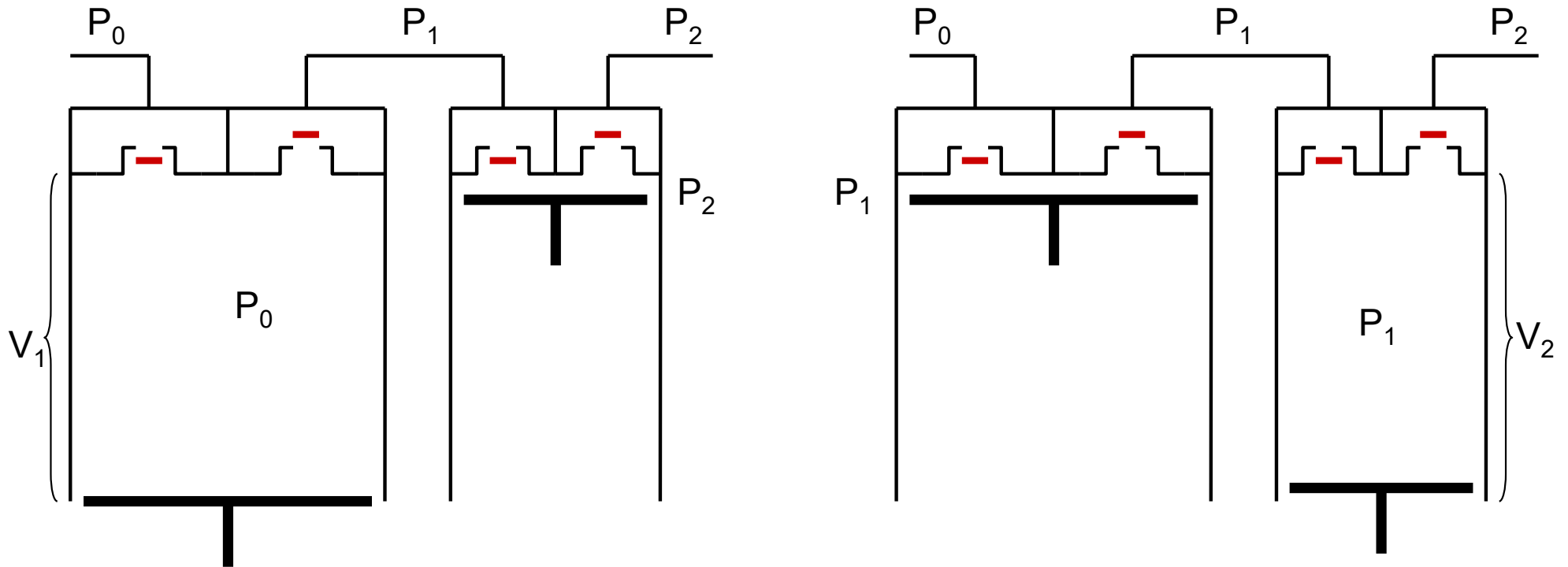
Cylindre de compresseur



Contraintes liées à la compression

- Compression \Rightarrow échauffement
 - Pour l'air, $P : 1b \nearrow 200b \Rightarrow T : 20^{\circ}\text{C} \nearrow 1100^{\circ}\text{C} !!!!$
- \Rightarrow Compression étagée + refroidissement inter-étages
- 4 étages de $K = 4 : 1b \nearrow 256b, T \nearrow \text{env. } 150^{\circ}\text{C}$
- \Rightarrow Huile : caractéristiques alimentaires, T° de craquage élevée
- Refroidissement inter-étages \Rightarrow condensation
- \Rightarrow Purge des condensats après chaque réfrigérant
- \Rightarrow Air sec !!!

La compression

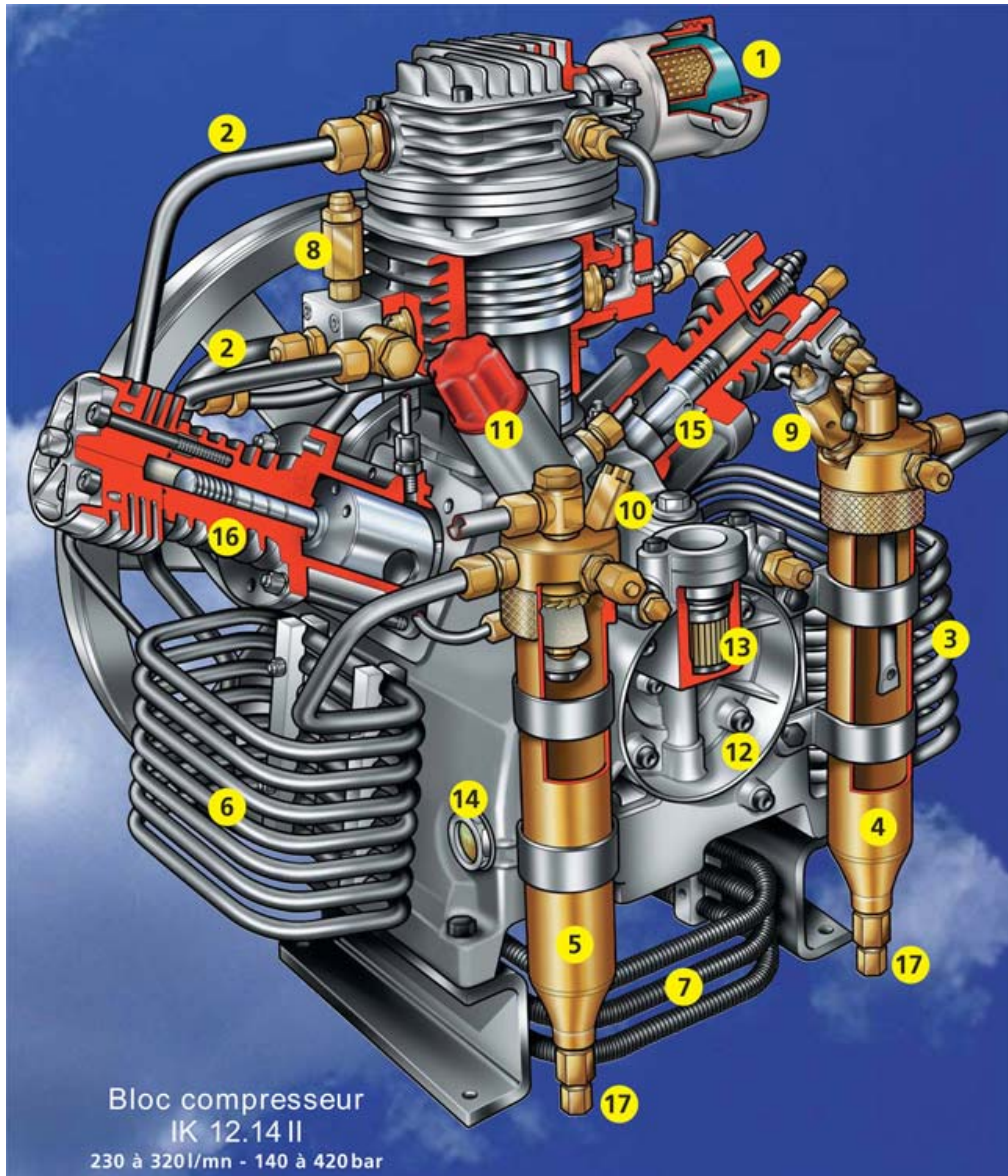


$$P_0 \times V_1 + P_2 \times 0 = P_1 \times 0 + P_1 \times V_2$$

$$P_0 \times V_1 = P_1 \times V_2$$

$$P_1 / P_0 = V_1 / V_2 = \text{taux de compression}$$

Schéma général du compresseur

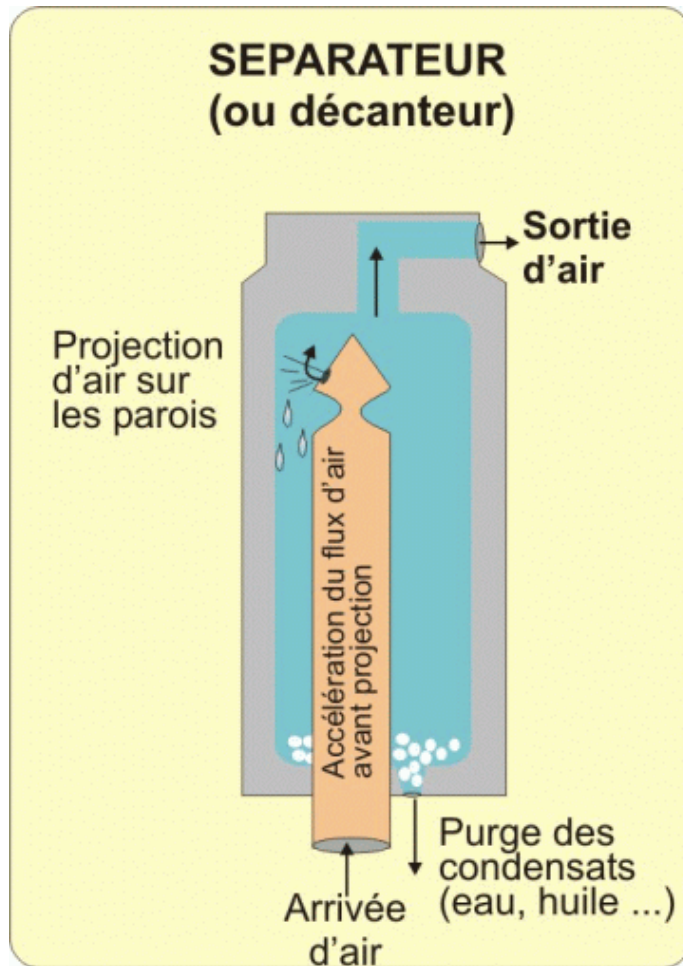


- 1 filtre d'aspiration
- 2 refroidisseur intermédiaire 1.-2. étage
- 3 refroidisseur intermédiaire 2.-3. étage
- 4 séparateur intermédiaire 2. étage
- 5 séparateur intermédiaire 3. étage
- 6 refroidisseur intermédiaire 3.-4. étage
- 7 refroidisseur final
- 8 soupape de sûreté 1. étage
- 9 soupape de sûreté 2. étage
- 10 soupape de sûreté 3. étage
- 11 conduite de remplissage d'huile
- 12 pompe à huile
- 13 filtre à huile
- 14 regard d'huile
- 15 culasse avec piston 3. étage
- 16 culasse 4. étage avec piston libre
- 17 sortie des condensats

Pourquoi éliminer l'eau ?

- Dégâts mécaniques sur les pistons
- Corrosion : tuyauteries, bouteilles
- Pertes de charges
- Givrage : la détente dans le clapet du 1^{er} étage peut atteindre -130°C

Principe d'un décanteur



- Purges manuelles
- Purges automatiques
 - Programmées
 - À détection de seuil
- Récupération des condensats (huileux)

Autres éléments

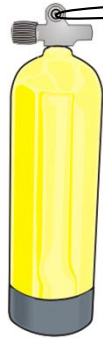
- Soupape de sécurité : clapet aval + ressort taré
- Réfrigérants :
 - Ventilateur \Rightarrow circulation d'air sur des tubes à ailettes
 - Radiateur à circulation d'eau
- Cartouche filtrante :
 - Adsorption : fixation superficielle d'un fluide dans un solide poreux et perméable (\nearrow surface de fixation)
 - Tamis moléculaire (silicate d'alumine) : humidité résiduelle
 - Charbon actif : molécules légères (odeurs, goût)
 - L'huile résiduelle inhibe l'adsorption (saturation)

Le gonflage

Compressibilité : Boyle - Mariotte

- $P \times V = C^{te}$
- Valide si $P < 250 \text{ bar}$ et $T < 220^\circ\text{C}$

$P_1 \times V_1$



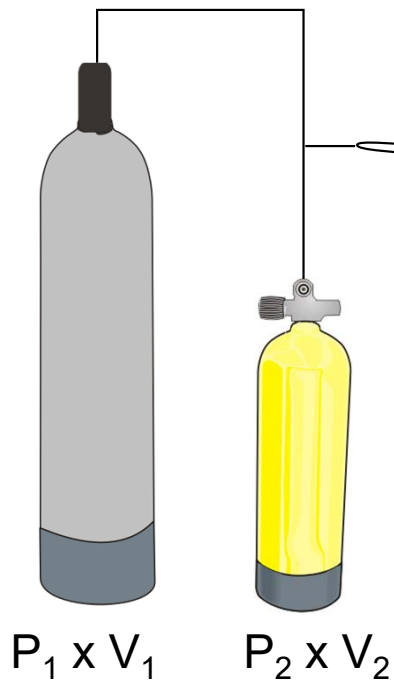
$$P_0 \times V_0 = P_1 \times V_1$$

$$\text{Pour } P_0 = 1 \text{ bar, } V_0 = P_1 \times V_1$$

(P_1 en bars)

- À température constante, $P \times V$ représente une quantité (masse, nombre de molécules) de gaz

Compressibilité : Boyle - Mariotte (suite)



Volume à $P_0 = 1 \text{ bar}$: $P_1 \times V_1 + P_2 \times V_2$

Pour $V = V_1 + V_2$: $P \times V = P_1 \times V_1 + P_2 \times V_2$

$P = (P_1 \times V_1 + P_2 \times V_2) / (V_1 + V_2)$

Application tampons

- Vous devez gonfler 5 blocs de 12L à 230b. 4 de ces blocs sont à 50b et le 5^{ème} à 75b.
- Vous disposez de deux séries indépendantes de 4 tampons de 50L à 250b et d'une rampe de gonflage à 5 sorties permettant de gonfler les 5 blocs en même temps.
- P° résultante dans les tampons ?

Corrigé :

- 1^{er} tampon (équilibre) :

$$(4 \times 50L \times 250b) + (4 \times 12L \times 50b) + (12L \times 75b) = P \times [(4 \times 50L) + (5 \times 12L)]$$

$$P = 205b$$

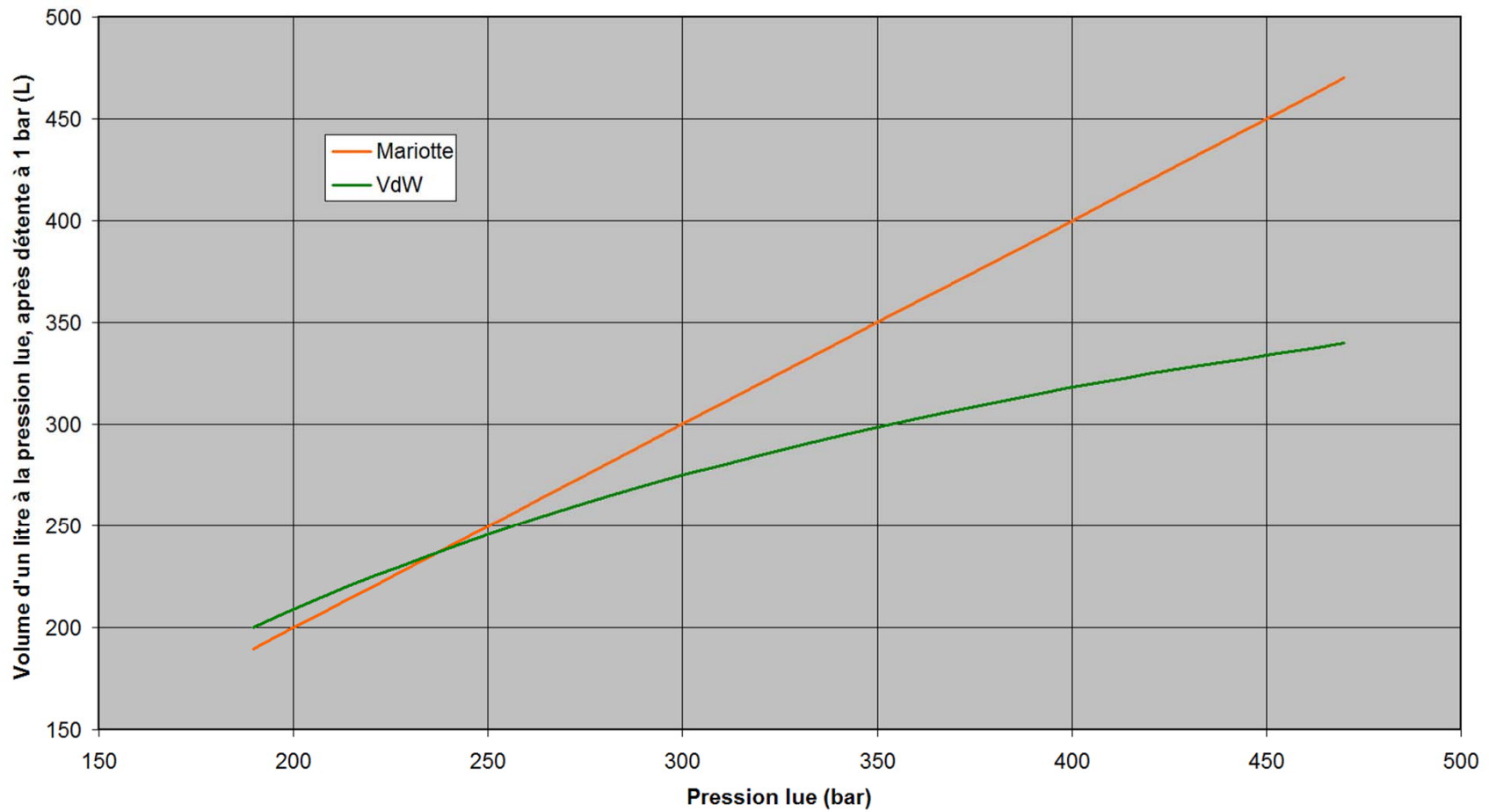
- 2^{ème} tampon (transvasement) :

$$(4 \times 50L \times 250b) - (5 \times 12L \times 25b) = P \times (4 \times 50L)$$

$$P = 242,5b$$

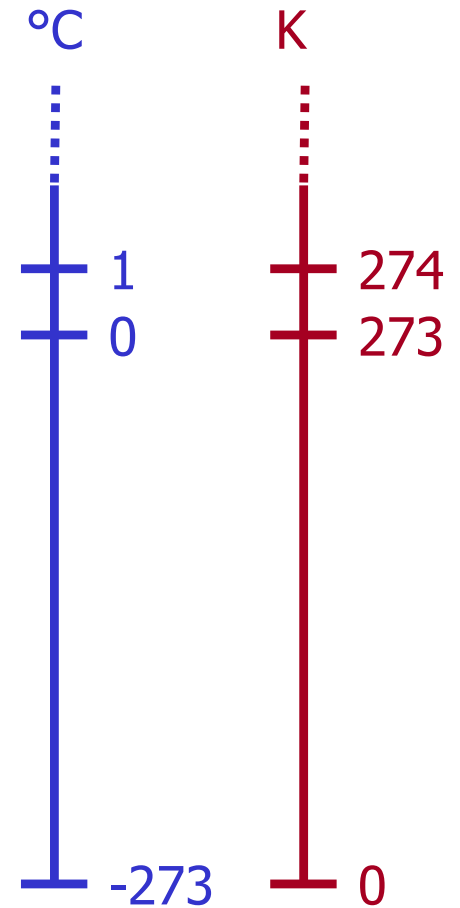
Pression utile : les gaz réels

Comportement réel de l'air comprimé



Compressibilité : Charles

- Influence de la température absolue
- La température absolue est exprimée en Kelvin (K)
- $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$ (on arrondit à 273)
- A volume constant, P / T est constant
- $P_1 / T_1 = P_2 / T_2$
- Applications : variation de température des blocs gonflés



Application Charles

Généralités

Le compresseur

Le Gonflage

La mesure : le manomètre

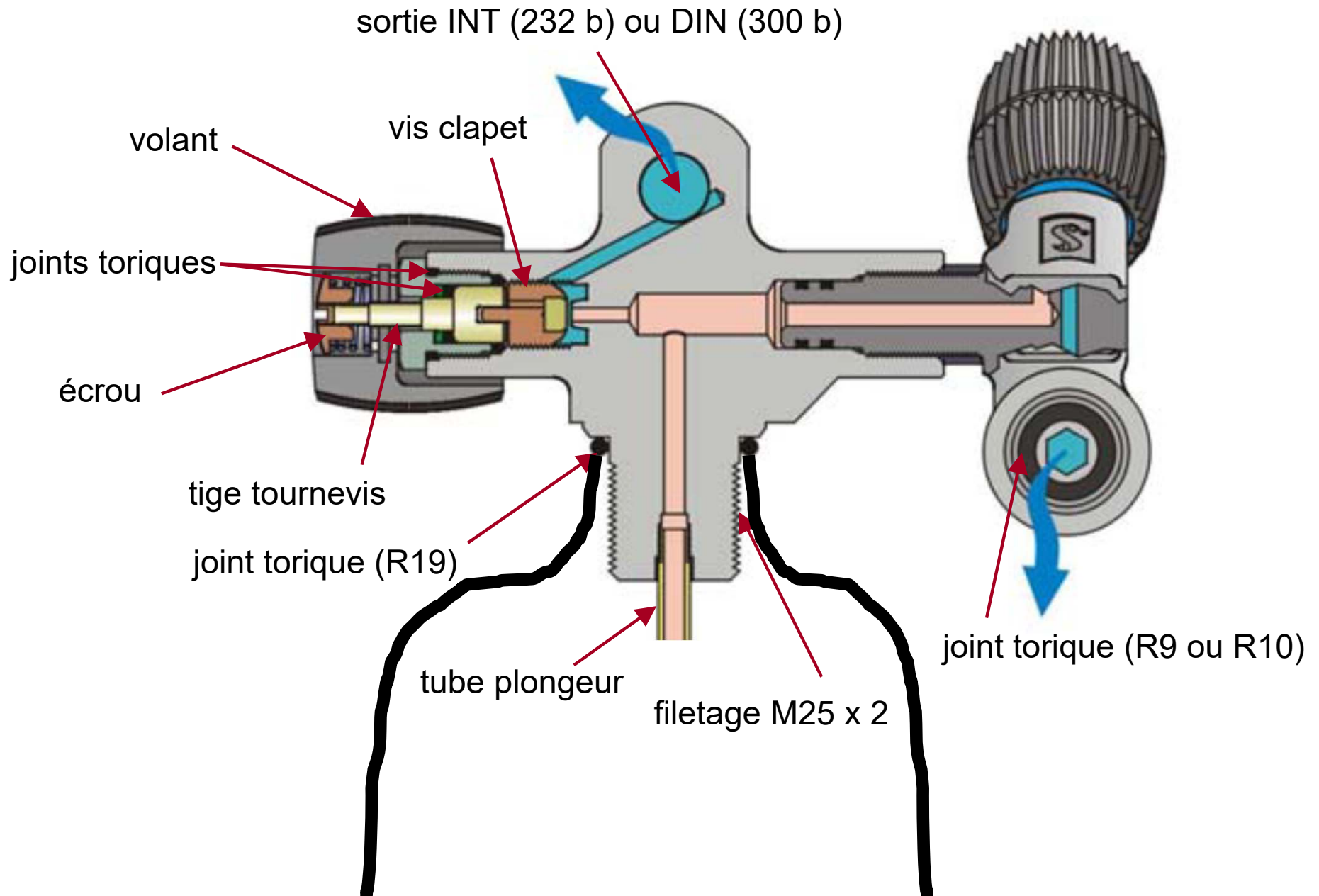
Les détendeurs

- 1 bloc sort du gonflage à 200b et 37°C
- Quelle pression indiquera le manomètre dans de l'eau à 12°C ?

Corrigé

- $P = 200b \times (12 + 273)^{\circ}C / (37 + 273)^{\circ}C = 184b$

Robinetterie de conservation



La mesure

Généralités

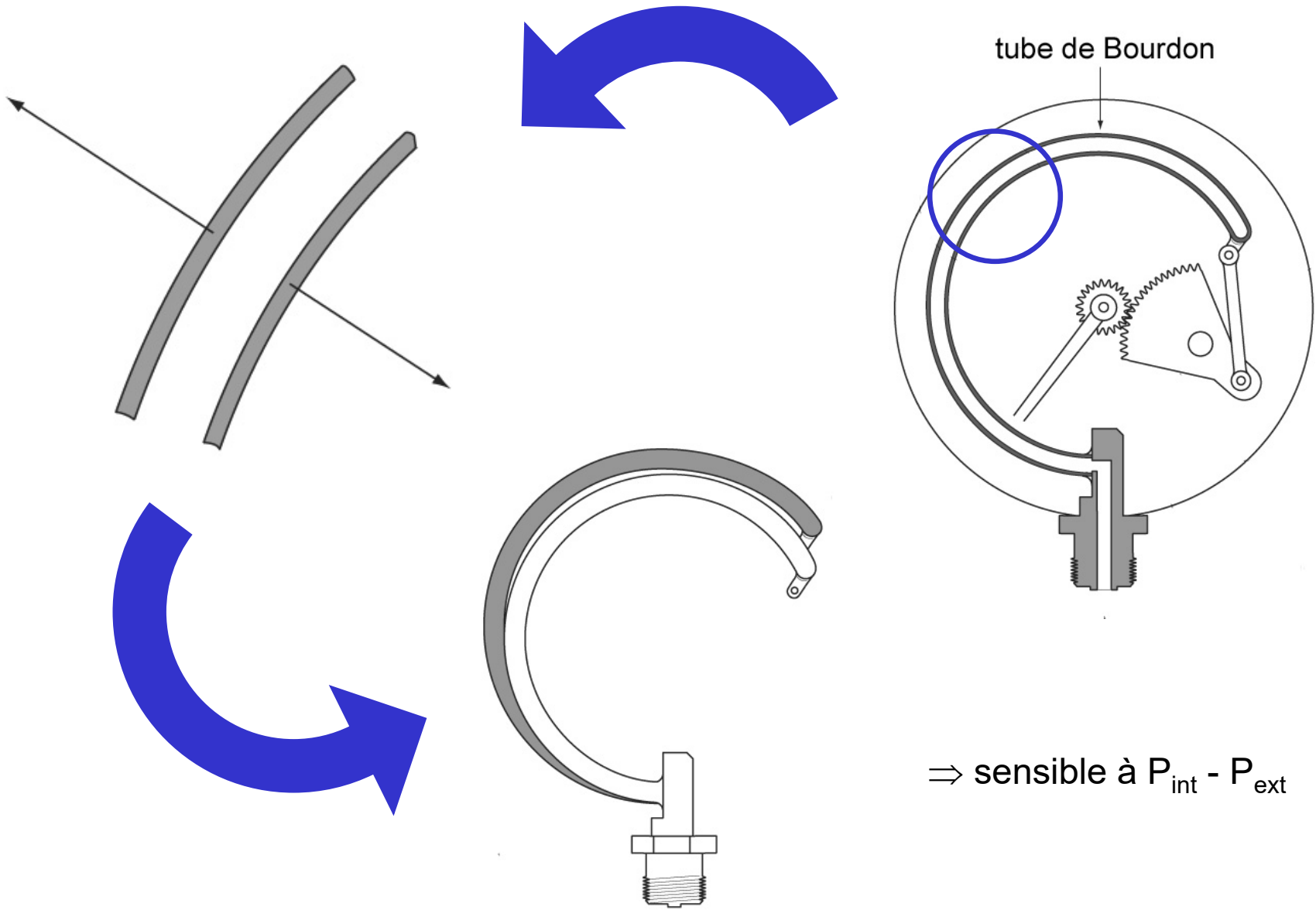
Le compresseur

Le Gonflage

La mesure : le manomètre

Les détendeurs

Le manomètre



Généralités

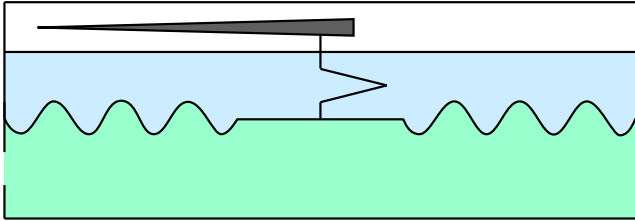
Le compresseur

Le Gonflage

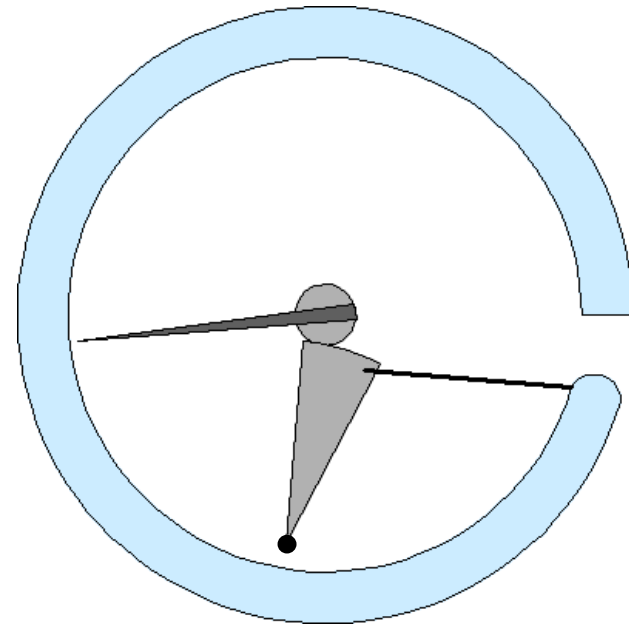
La mesure : le manomètre

Les détendeurs

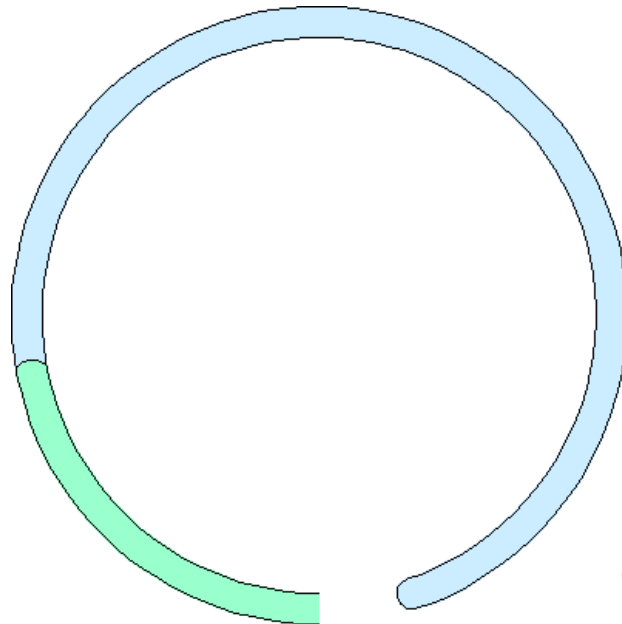
Les profondimètres



membrane

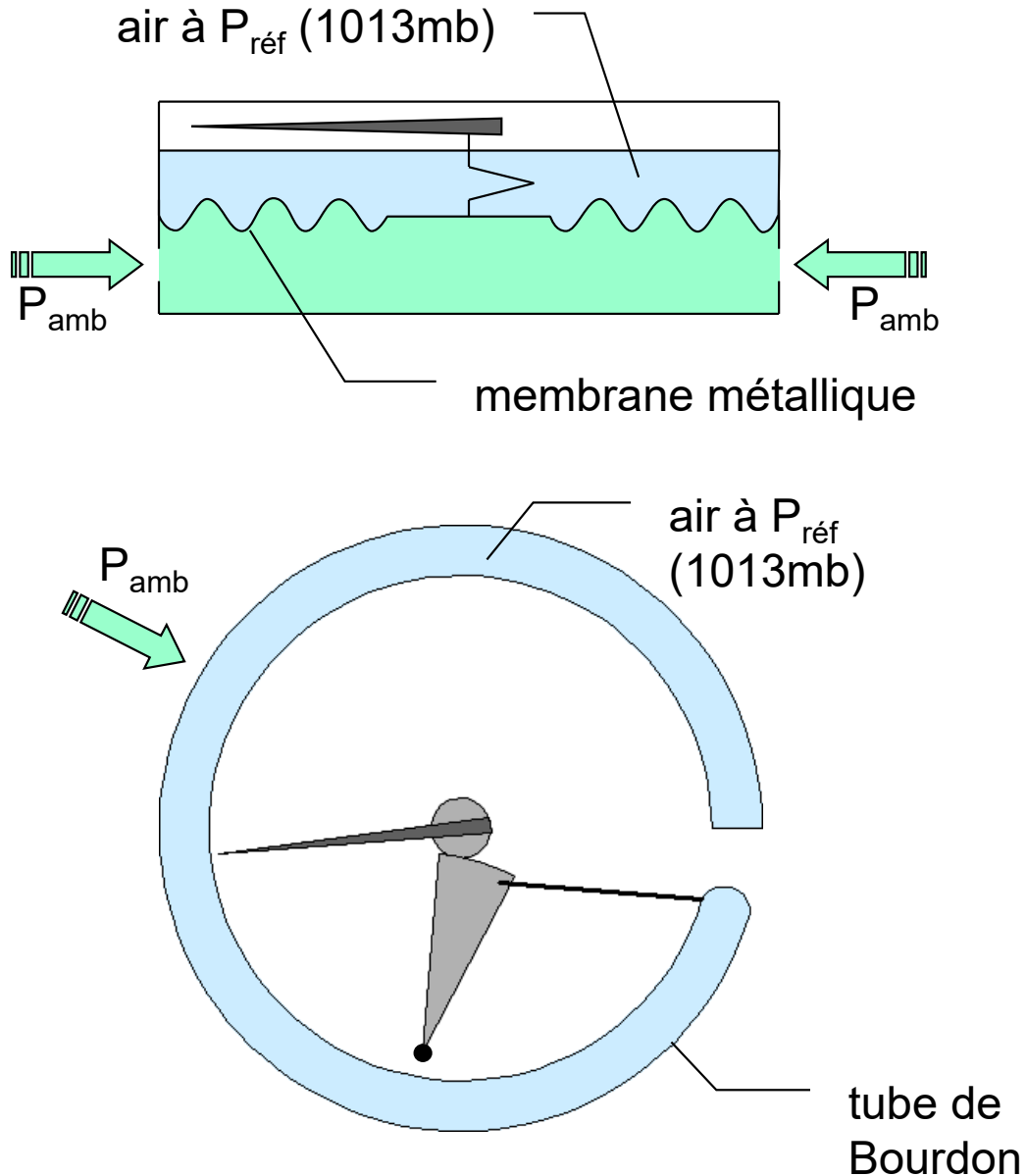


tube de Bourdon



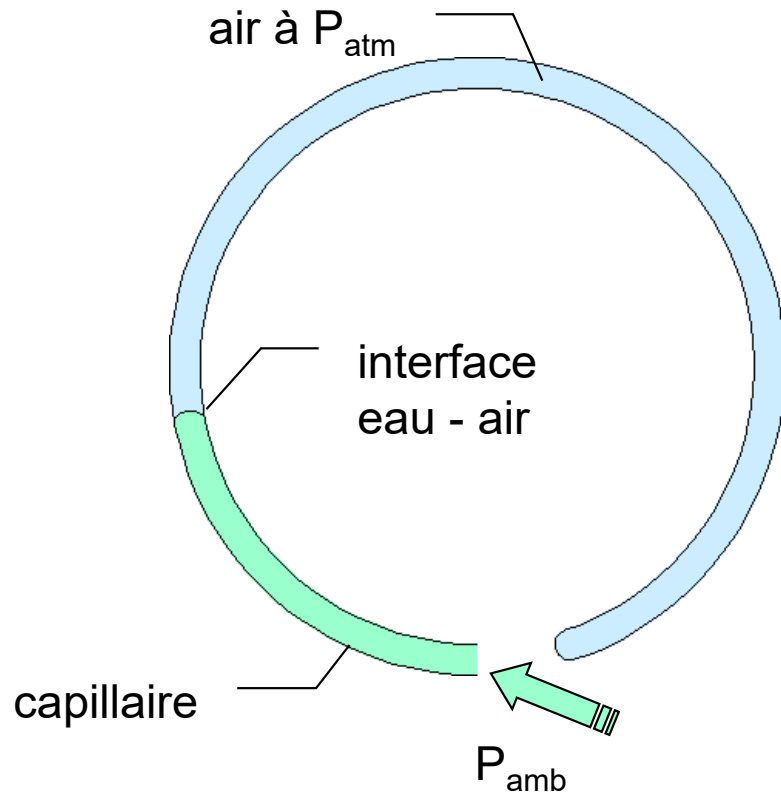
capillaire

Les profondimètres à pression de référence



- Capsule ou tube scellé
 - Air à la pression de référence (1013mb)
 - Déformation selon la différence de pression ext. – int.
- ⇒ Mesure $P_{\text{amb}} - P_{\text{réf}}$
- ⇒ Affiche $(P_{\text{amb}} - P_{\text{réf}}) \times 10$

Les profondimètres de type Mariotte



- Bulle d'air à P_{atm} en surface
- En profondeur la bulle d'air est comprimée
- L'eau entre dans le tube
- Volume de la bulle :

$$V_{tube} \times P_{amb} / P_{atm}$$

⇒ Mesure P_{amb} / P_{atm}

⇒ Affiche $((P_{amb} / P_{atm}) - 1) \times 10$

Indications des profondimètres en altitude

Profondimètre à pression relative

$P_{\text{réf}}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
P_{atm}	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7
Prof réelle	0m	3m	10m	0m	3m	10m
P_{amb}	1,0	1,3	2,0	0,7	1,0	1,7
$P_{\text{amb}} - P_{\text{réf}}$	0,0	0,3	1,0	-0,3	0,0	0,7
Prof affichée	0m	3m	10m	-3m	0m	7m

⇒ retard

Profondimètre type Mariotte

P_{atm}	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7
Prof réelle	0m	7m	14m	0m	7m	14m
P_{amb}	1,0	1,7	2,4	0,7	1,4	2,1
$P_{\text{amb}} / P_{\text{atm}}$	1,0	1,7	2,4	1,0	2,0	3,0
Prof affichée	0m	7m	14m	0m	10m	20m

⇒ indique la profondeur fictive

Les détendeurs

Notion de perte de charge



Pas de débit : $P_1 = P_2$ *fonctionnement statique*



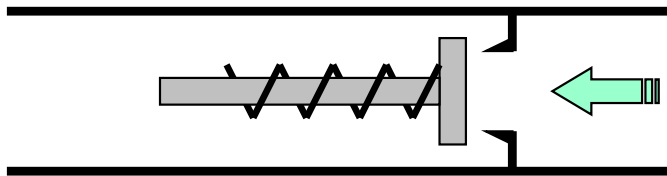
Débit de P_1 vers P_2 : $P_1 > P_2$ *fonctionnement dynamique*

- Le débit s'établit de la pression la plus élevée vers la pression la plus faible
- Tout débit engendre une chute de pression due aux frottements des molécules entre elles et contre la paroi
- La chute de pression est d'autant plus importante que le circuit oppose une résistance au débit → taille des tuyaux, encrassement,...

Notion de perte de charge (suite)

Les détendeurs

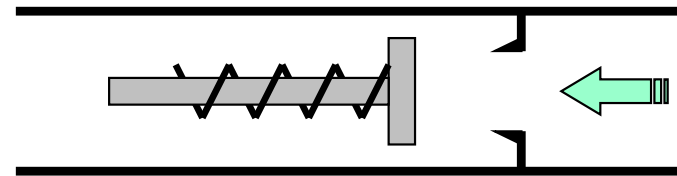
- $\Delta P \nearrow$ avec Q et R
- Pour augmenter le débit, il faut :
 - Augmenter la pression amont
 - Ou diminuer la pression aval
 - Ou diminuer la résistance
- C'est quoi un détendeur ?
 - Une résistance ajustable en fonction du débit demandé pour une ΔP donnée (+/- fixe) !



PA

MP = PA + 10b

petit débit → résistance élevée



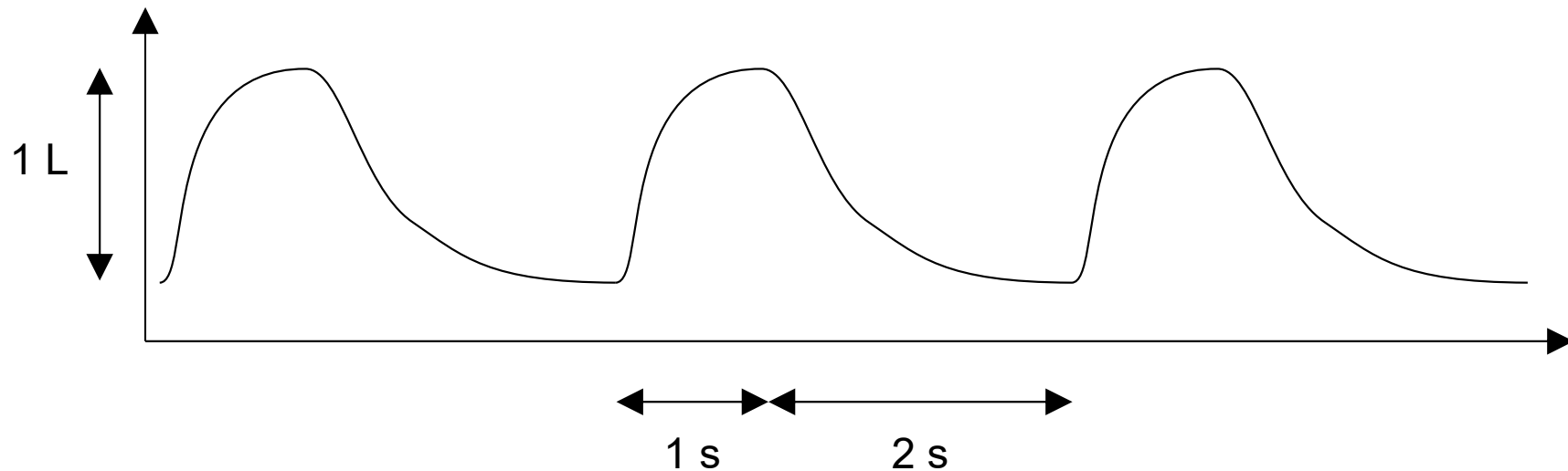
PA

MP = PA + 10b

gros débit → résistance faible

Les fonctions d'un détendeur

- **Fonction statique** : donner de l'air à la pression ambiante → Pression
- **Fonction dynamique** : donner de l'air à la demande → Débit
- 20 L/min = débit moyen
 - mais inspiration sur 1/3 et expiration sur 2/3
 - Débit instantané = 60 L/min (en surface, au calme !!!)



Quelques exemples de débit (Scubapro)

HP = 206 bar

- MK2 (piston simple) : 2600 L/min
- MK16 (membrane compensée) : 5000 L/min
- MK18 (membrane compensée) : 5000 L/min
- MK25 (piston compensé) : 10000 L/min

Généralités

Le compresseur

Le Gonflage

La mesure : le manomètre

Les détendeurs

Caractéristiques d'un détendeur

- Débit maximum disponible
 - Section du clapet
 - Course du clapet
- Sensibilité (seuil inspiratoire)
- Travail ventilatoire
- \searrow MP à l'inspiration
- Réactivité (matériau)
- Stabilité

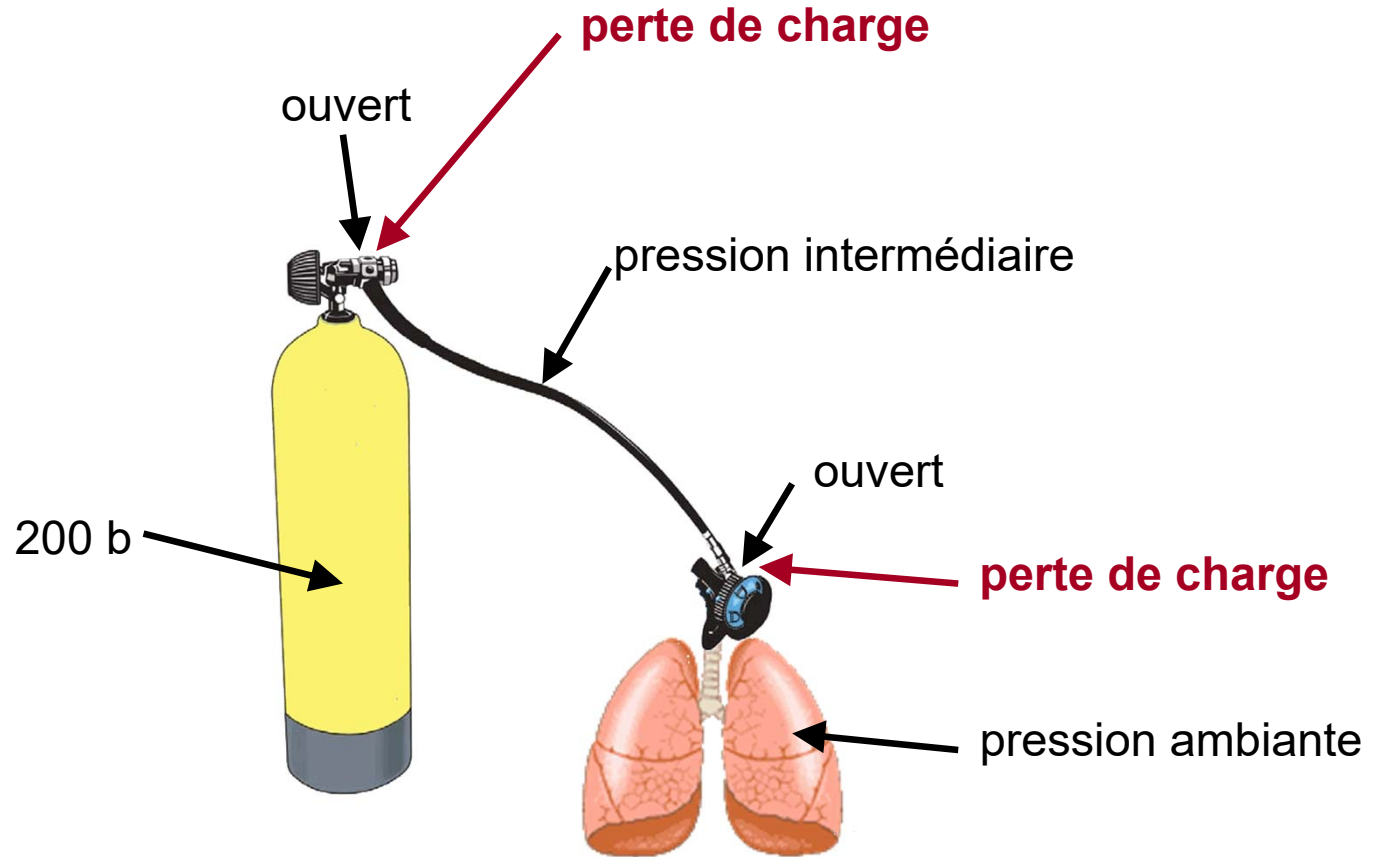
Principes de base

- Position au repos des clapets des 1^{er} et 2^{ème} étages ?

1 ^{er} étage	2 ^{ème} étage	
F	F	Débit continu retardé
F	O	Débit continu retardé
O	F	Équilibre
O	O	Débit continu immédiat

- Et quand on inspire ?

Inspiration



Généralités

Le compresseur

Le Gonflage

La mesure : le manomètre

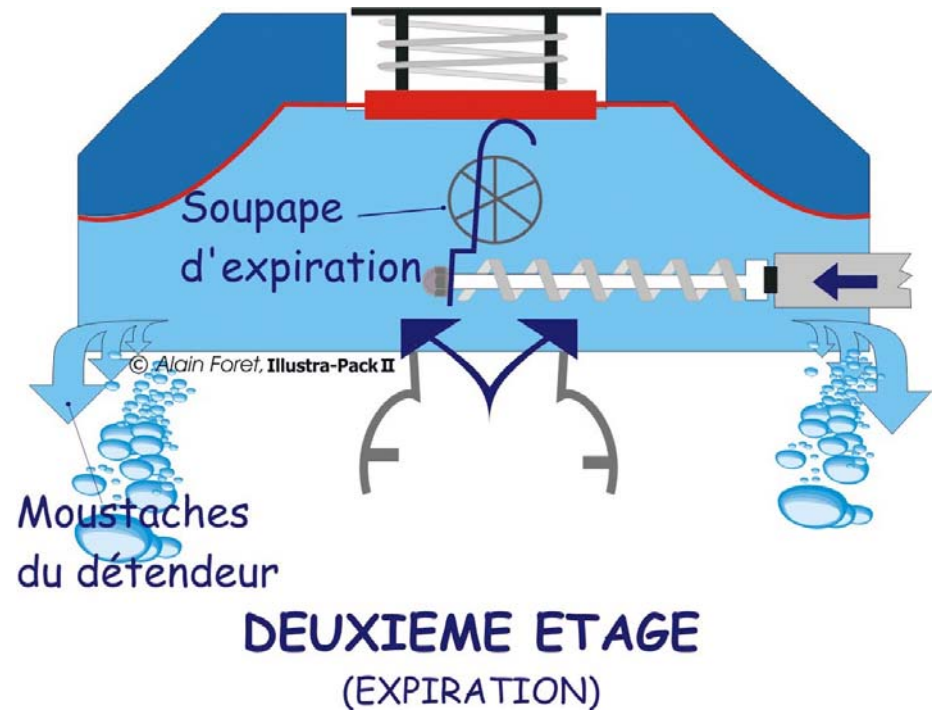
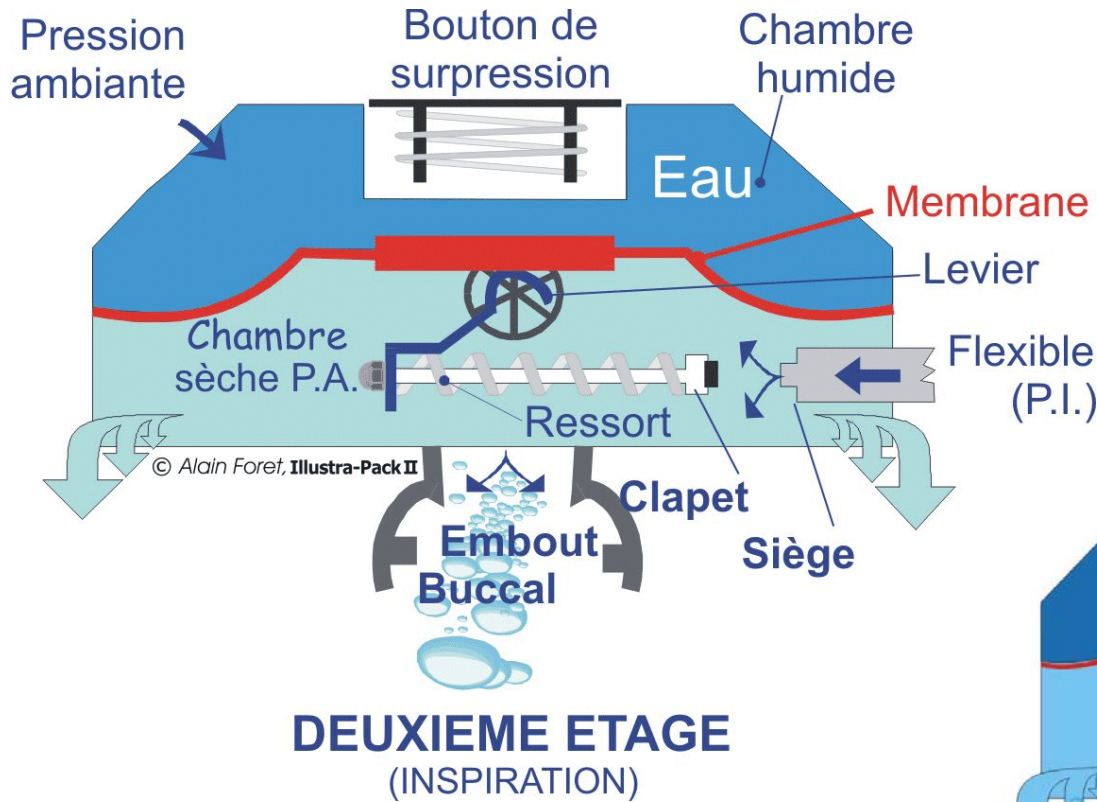
Les détendeurs

2^{ème} étage



2^{ème} étage

Les détendeurs



Généralités

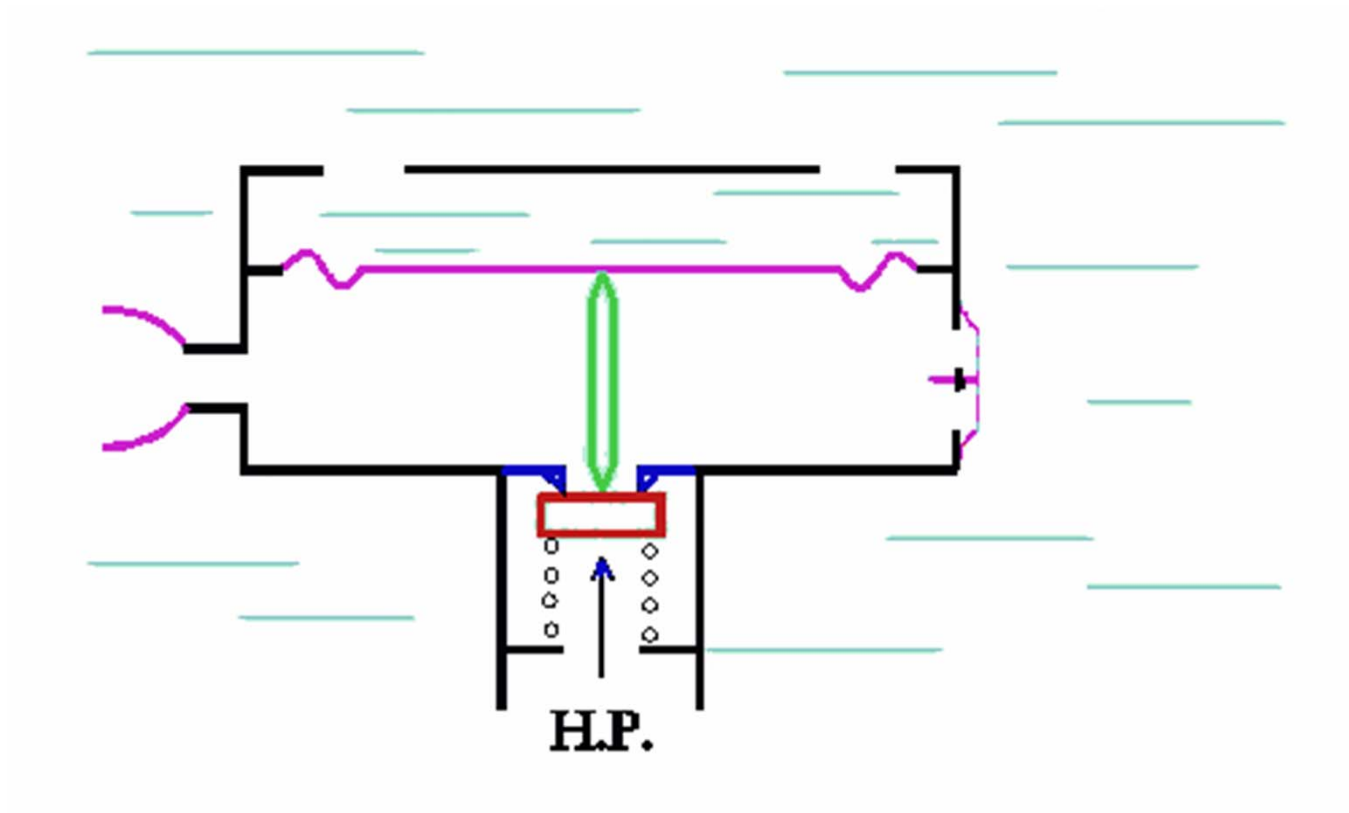
Le compresseur

Le Gonflage

La mesure : le manomètre

Les détendeurs

2^{ème} étage : animation



1^{er} étage



Généralités

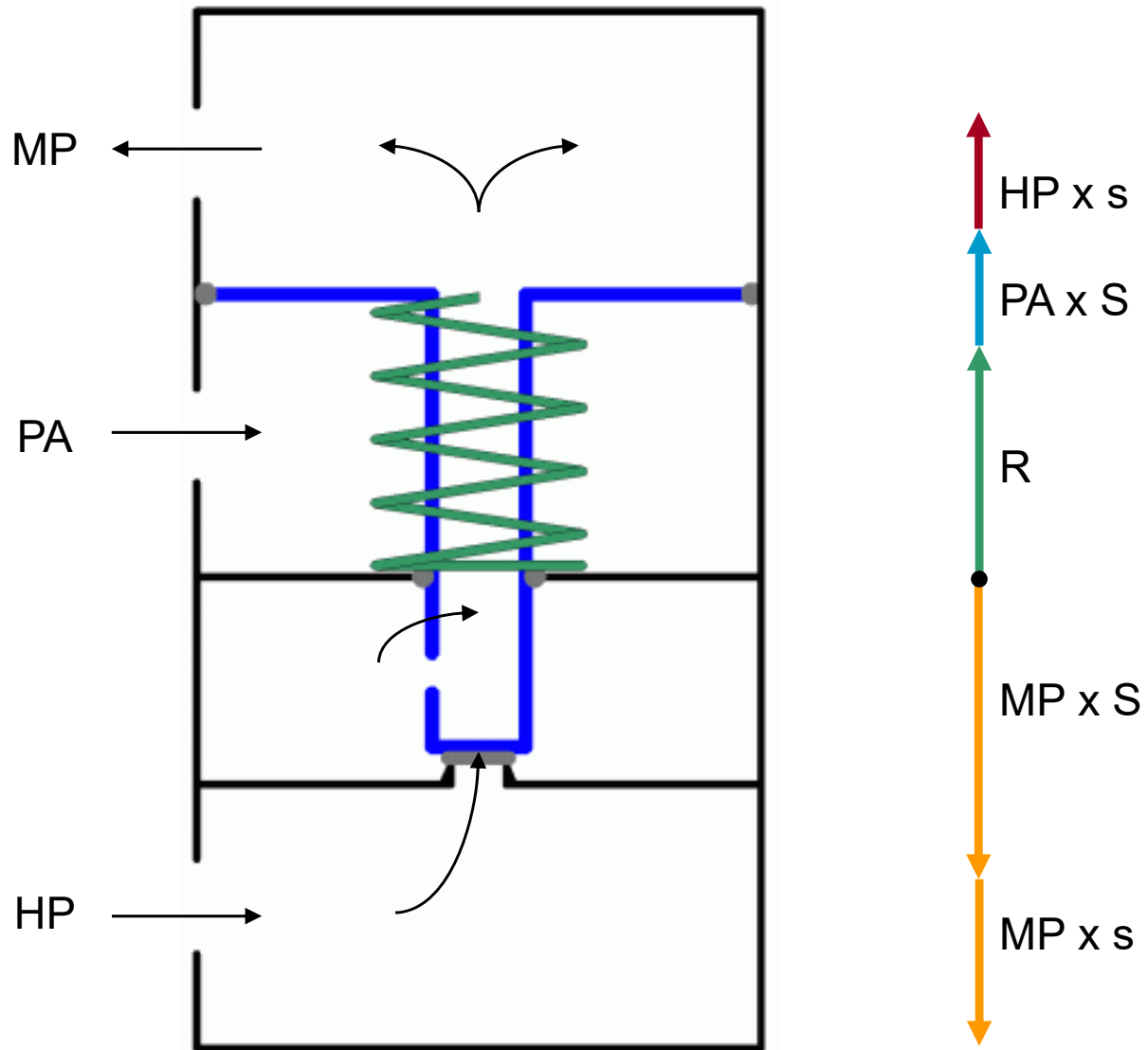
Le compresseur

Le Gonflage

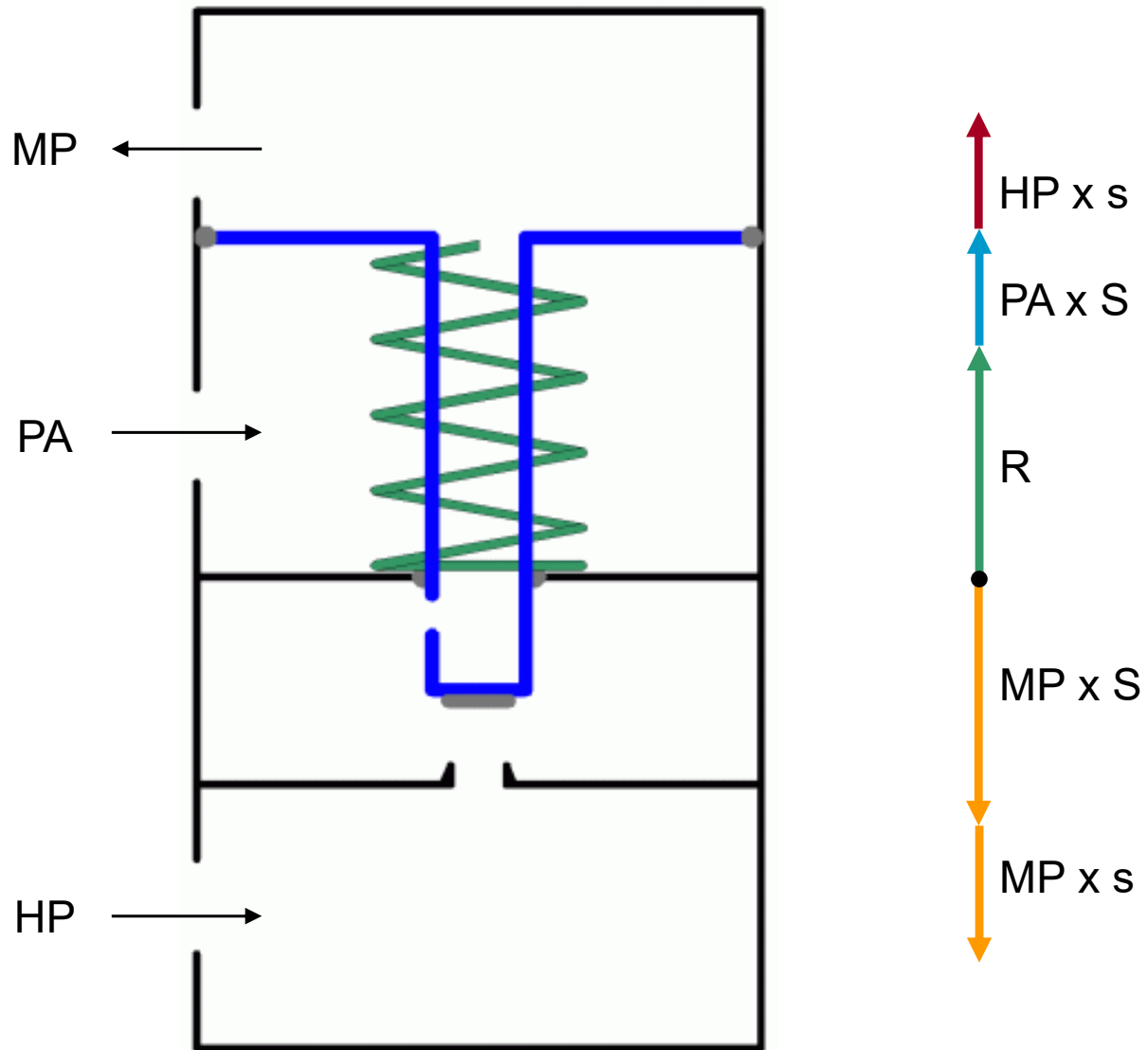
La mesure : le manomètre

Les détendeurs

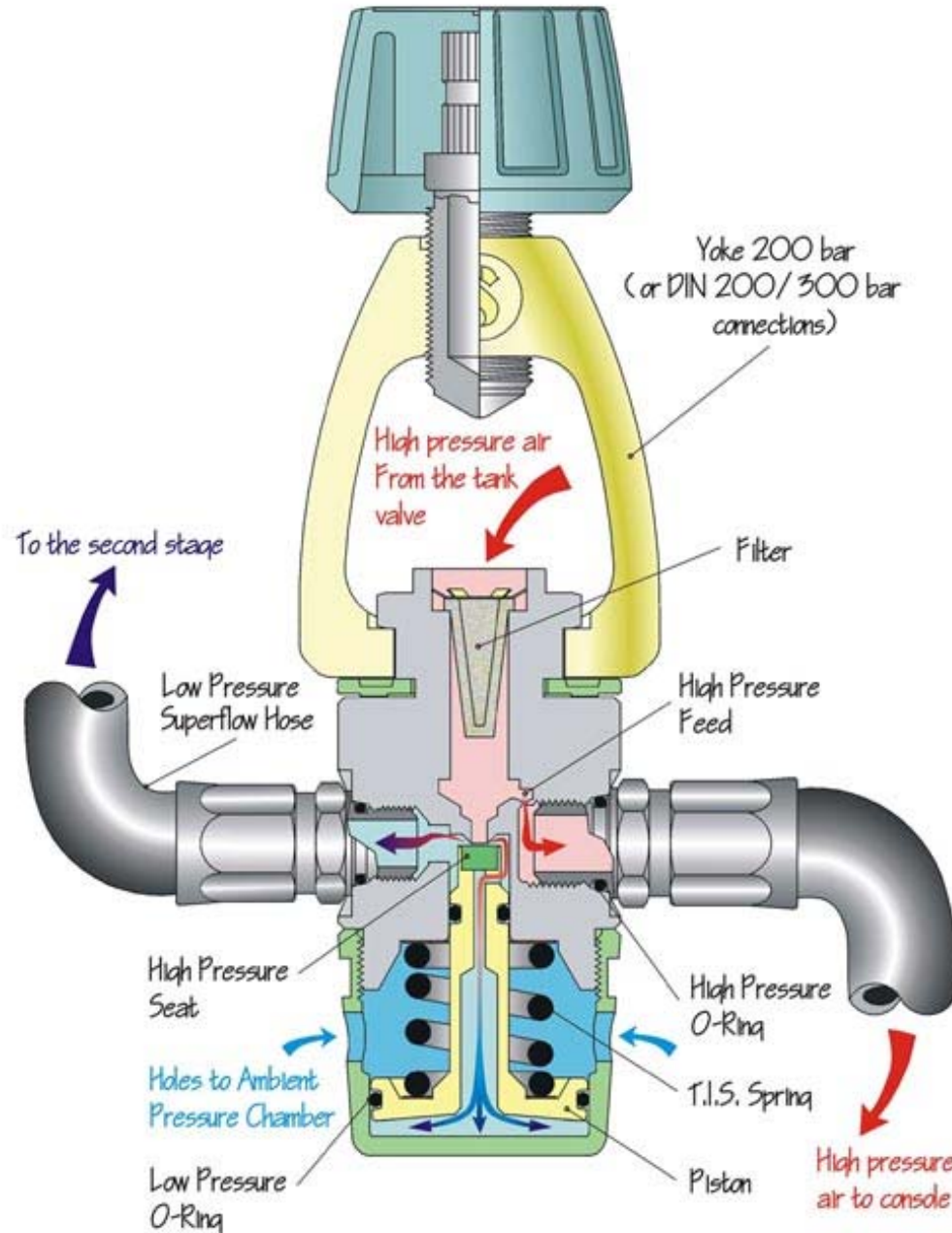
Détendeur à piston simple



Détendeur à piston simple : inspiration



Exemple du détendeur Scubapro MK2



La compensation

- Effet de la HP sur la MP (piston / membrane) ?
- 2 voies pour réduire l'effet de la HP :
 - Réduire s (surface du clapet)
 - Compenser
- Compensation = neutralisation de la HP dans le bilan des forces
⇒ HP radiale
- Permet d'augmenter s donc le débit maxi disponible !

Généralités

Le compresseur

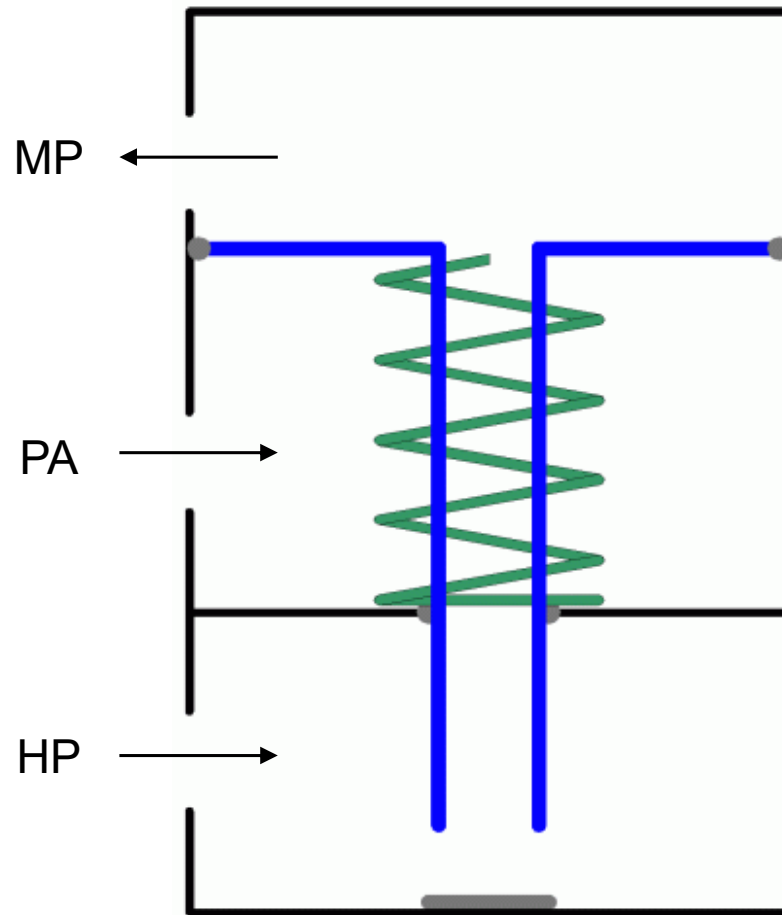
Le Gonflage

La mesure : le manomètre

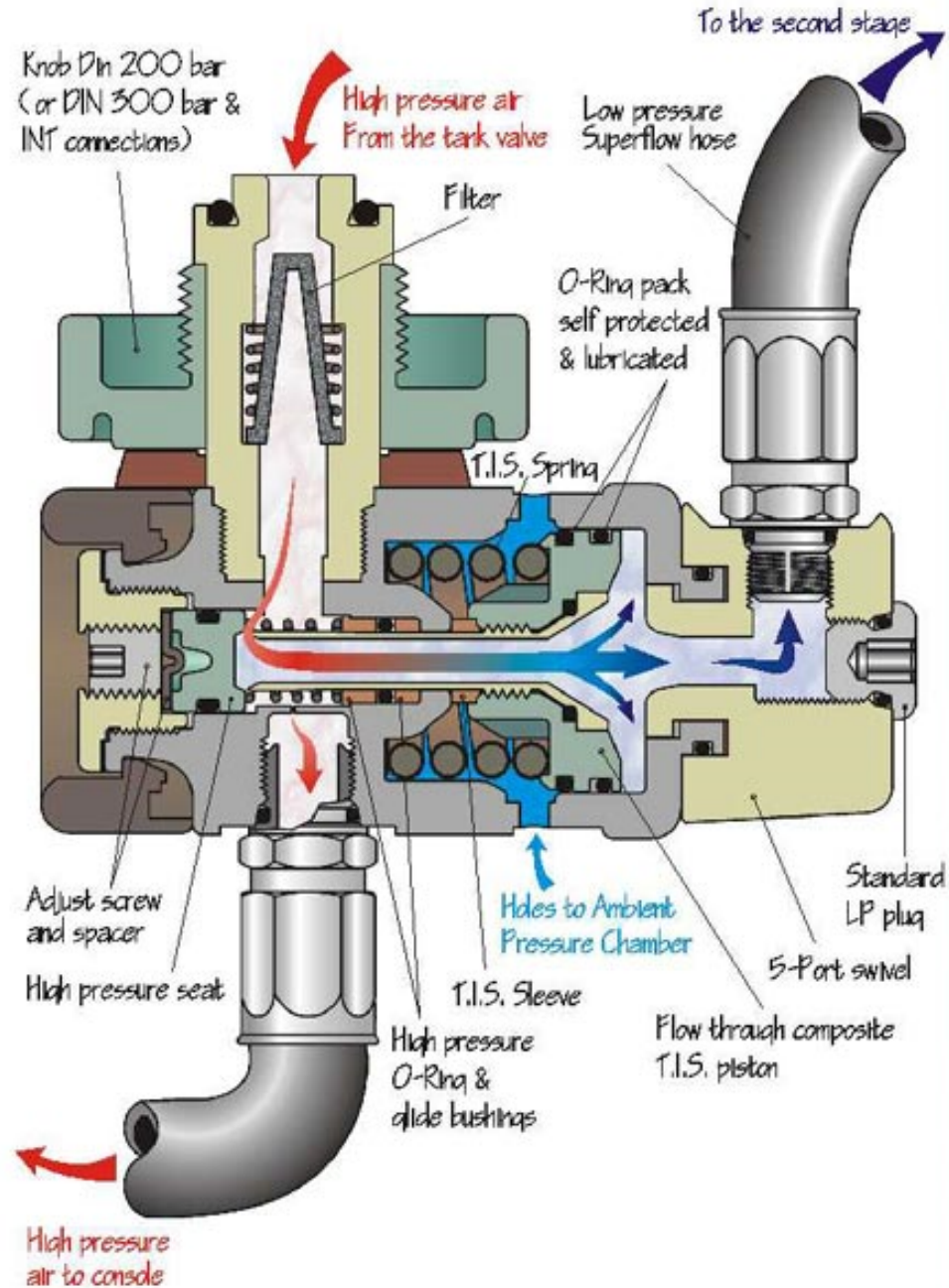
Les détendeurs



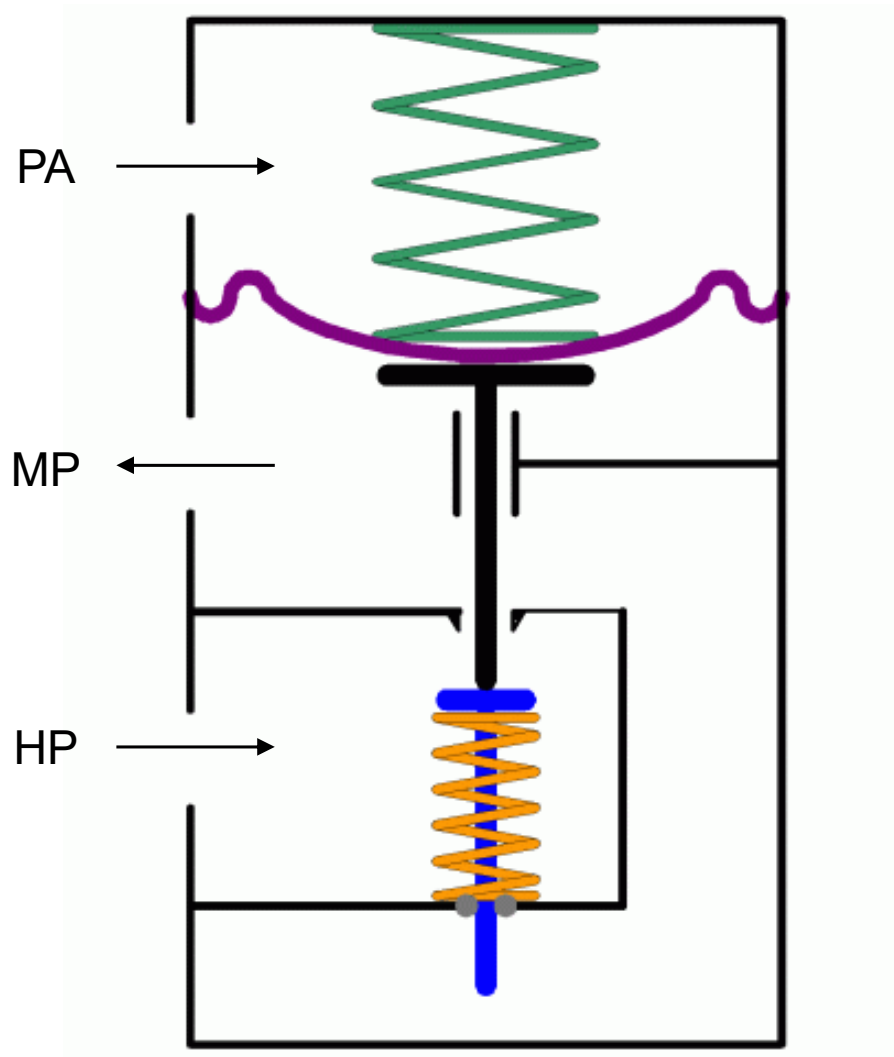
Détendeur à piston compensé



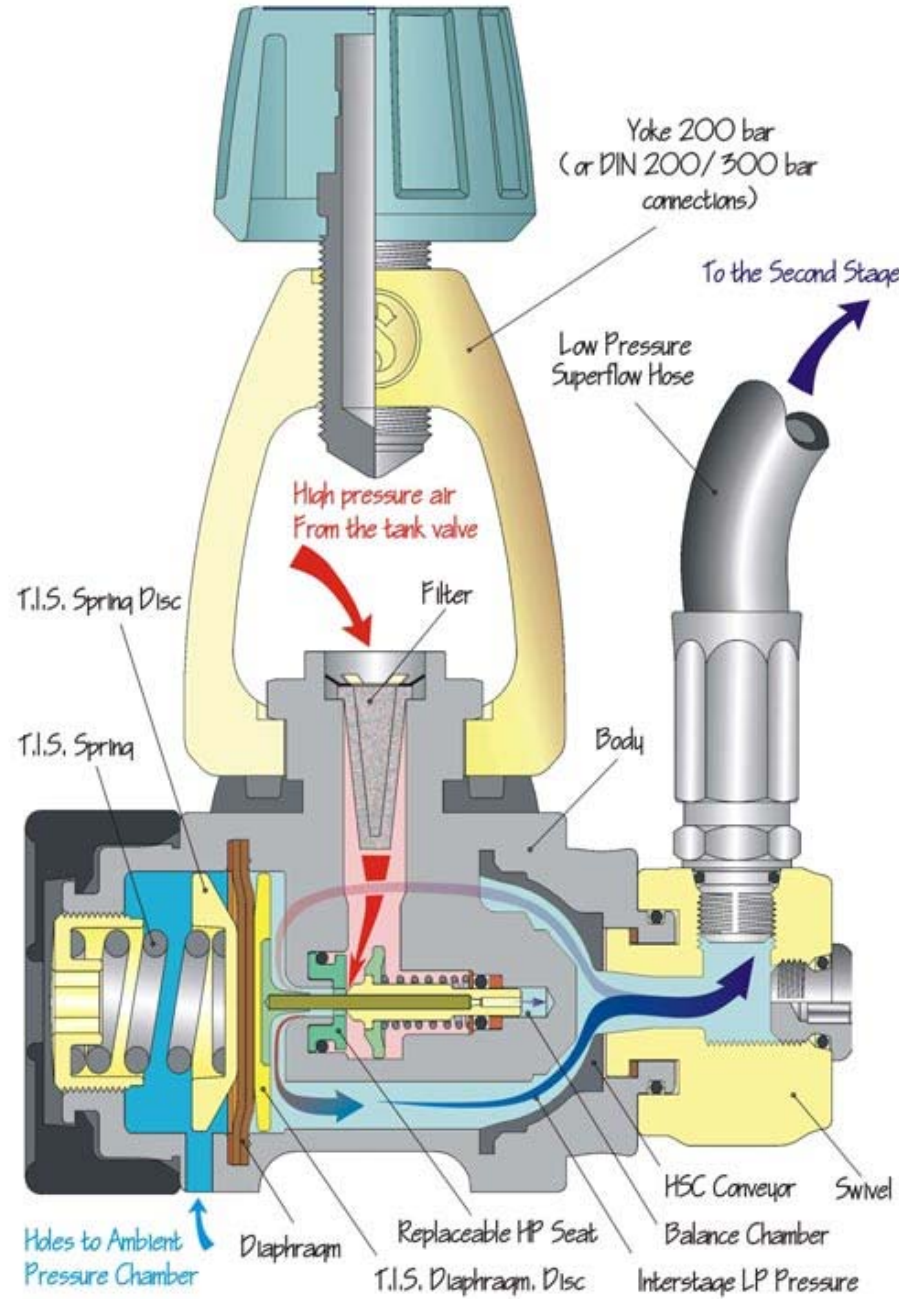
Exemple du détendeur Scubapro MK25



Détendeur à membrane compensée



Exemple du détendeur Scubapro MK18



Évolution de la MP avec la profondeur

- Équilibre des forces (détendeur compensé)

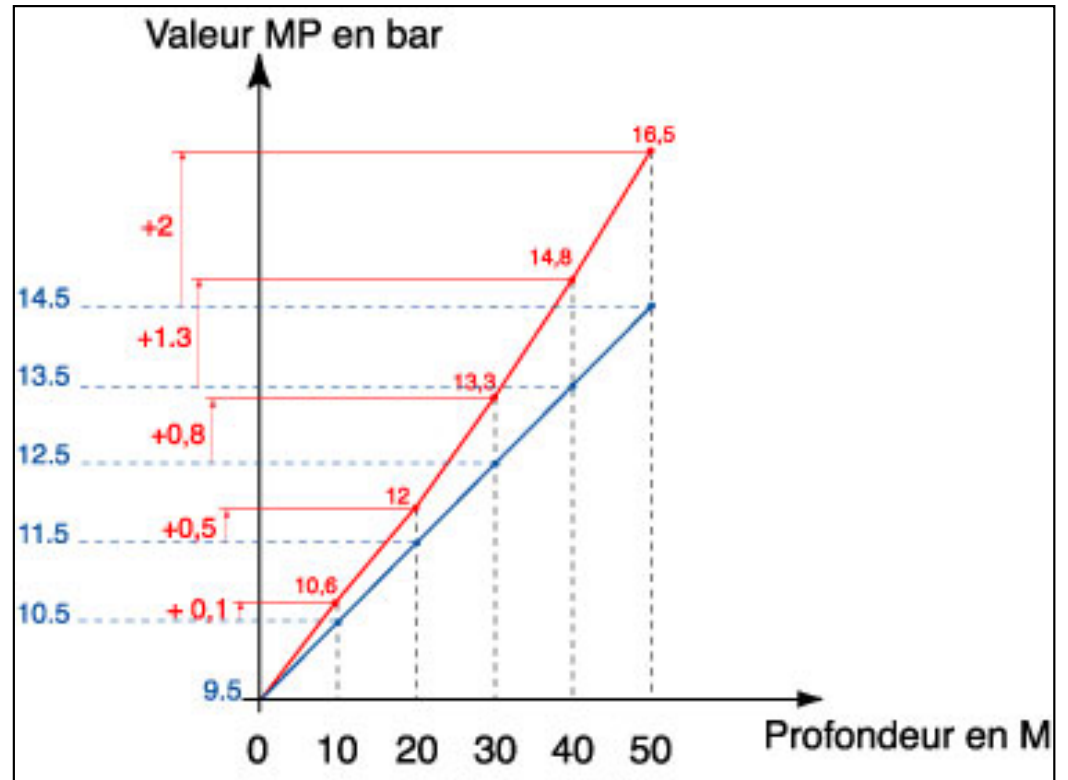
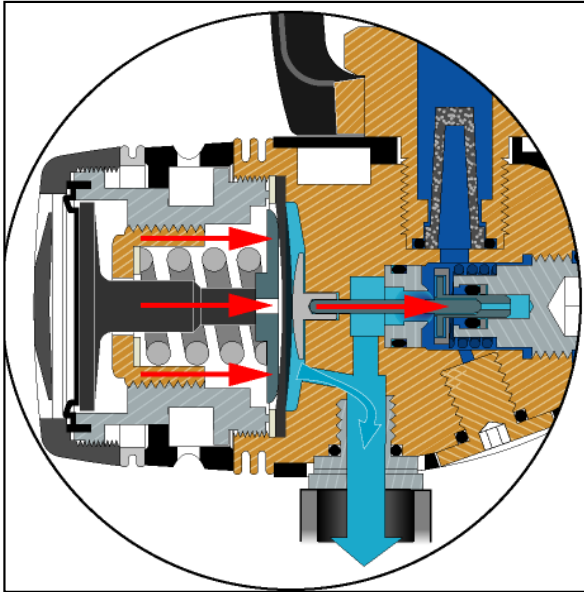


- $$MP \times S = PA \times S + R \Rightarrow MP = PA + R/S$$

$$\Rightarrow MP = PA + Cte \text{ (fabrication, réglage)}$$

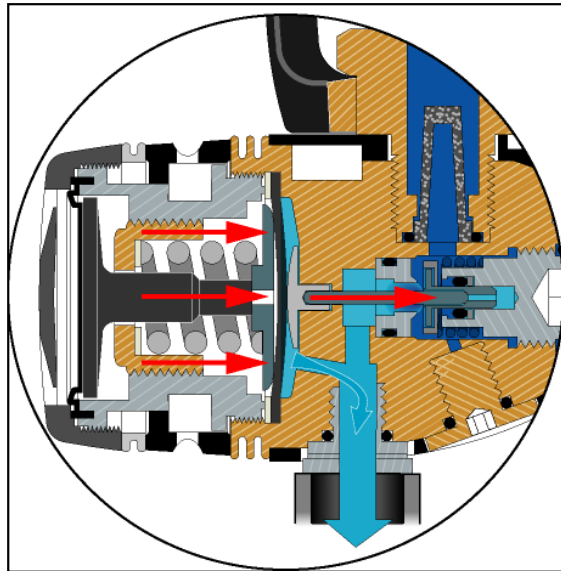
	0m	10m	20m	30m	40m
PA	1b	2b	3b	4b	5b
MP	10b	11b	12b	13b	14b

La surcompensation Aqualung (Legend)



- La moyenne pression augmente plus vite que la pression hydrostatique
- En bleu : un détendeur normal
- En rouge : Le Legend

La surcompensation Aqualung (Legend)



- Le piston de la chambre sèche transmet, à profondeur équivalente, une force supérieure qui fait augmenter la MP
- La MP augmente plus vite que la pression ambiante : système ADC (Asymmetric Dry Chamber)
- Profondeur \nearrow \rightarrow densité \nearrow \rightarrow MP – PA \nearrow \rightarrow effort inspiratoire stable

Généralités

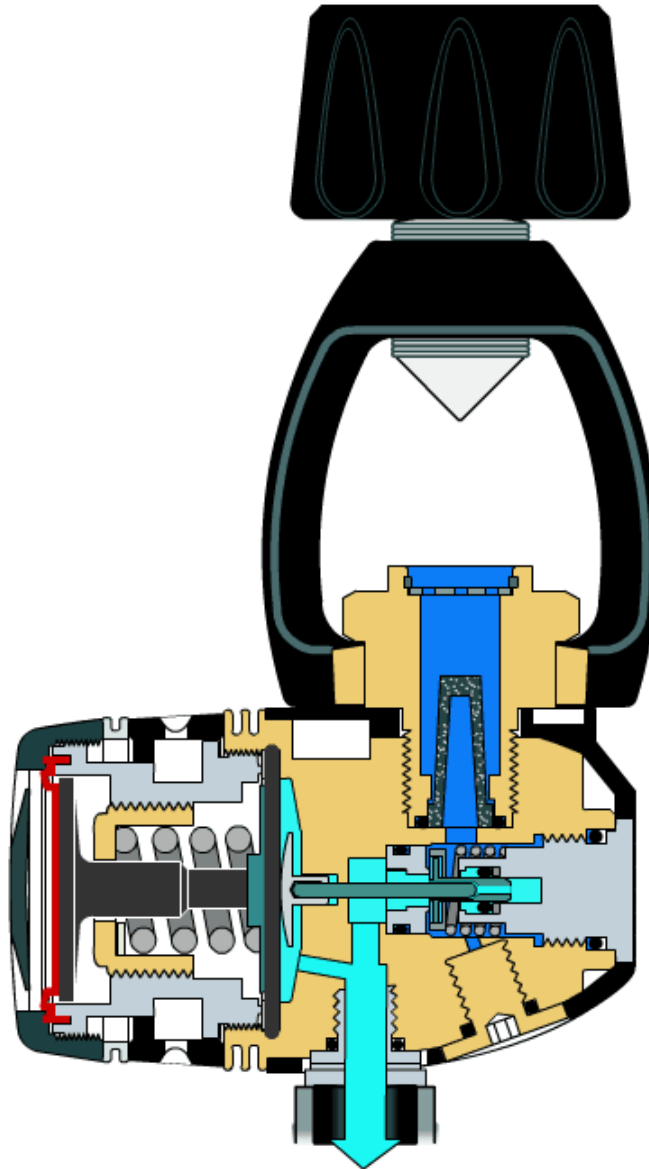
Le compresseur

Le Gonflage

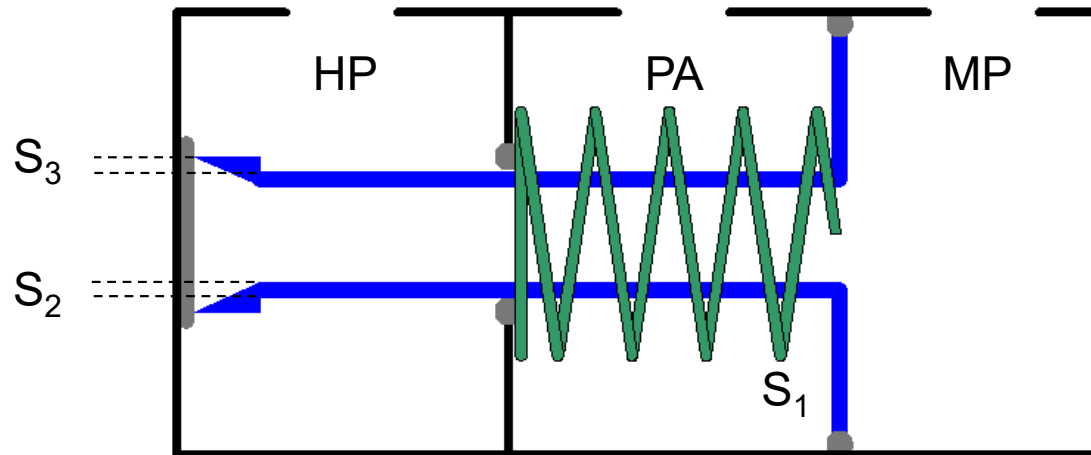
La mesure : le manomètre

Les détendeurs

1er étage surcompensé Legend : animation



La surcompensation Scubapro (MK25)



- $HP \times S_3 + MP \times (S_1 + S_2) = R + PA \times S_1 + MP \times (S_2 + S_3)$
- $k = S_1 / S_3$
- $MP = PA \times k / (k - 1) + K - HP / (k - 1)$
- Pour $k = 200 \rightarrow MP = PA \times 1,005 + K - HP \times 0,005 \rightarrow 1 \text{ b pour } 200 \text{ b}$
- $\nearrow MP$ en fin de plongée ($HP \searrow$)
- En pratique, la queue de piston est évasée !

Généralités

Le compresseur

Le Gonflage

La mesure : le manomètre

Les détendeurs

La compensation au 2^{ème} étage

- Augmente la sensibilité (clapet équilibré)
- Limite l'usure siège-clapet (clapet équilibré)
- Indispensable sur un 1^{er} étage surcompensé (MP ↗)

Généralités

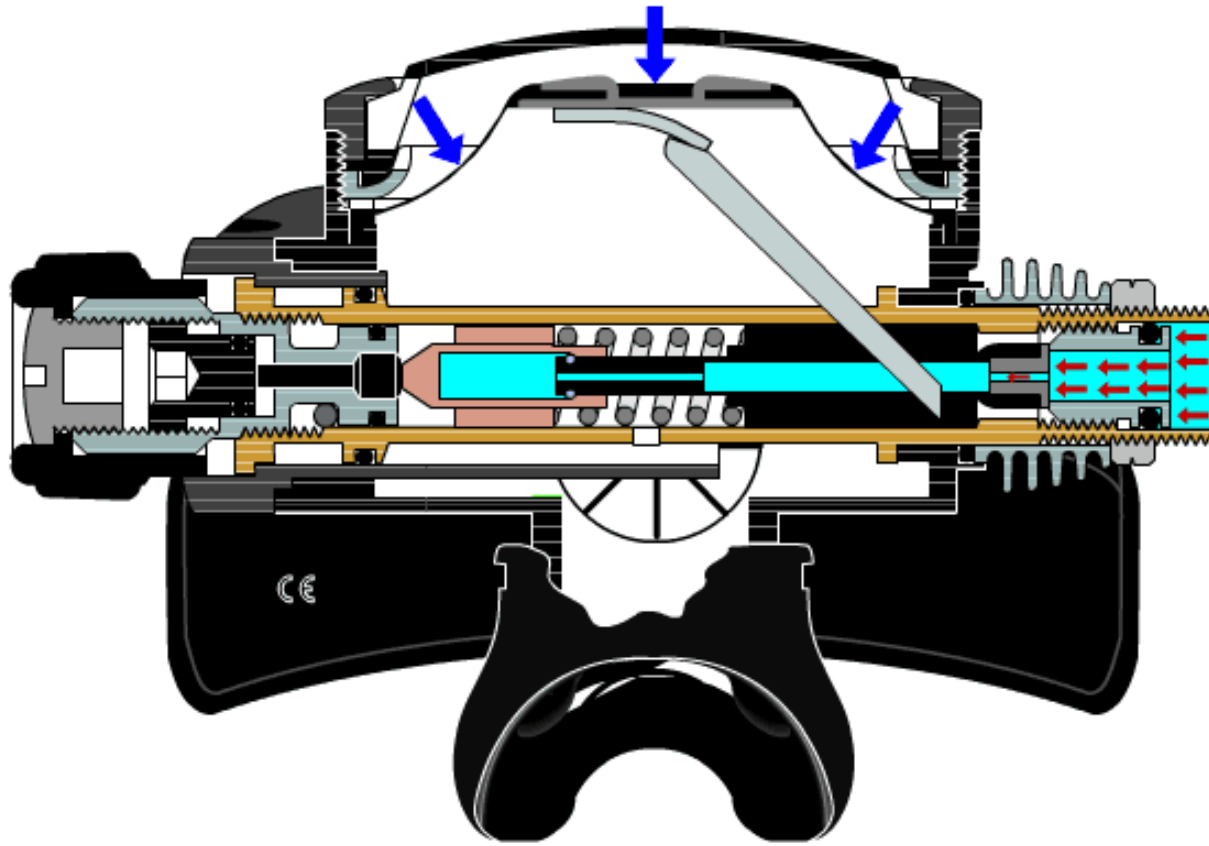
Le compresseur

Le Gonflage

La mesure : le manomètre

Les détendeurs

2^{ème} étage : animation



Généralités

Le compresseur

Le Gonflage

La mesure : le manomètre

Les détendeurs

Incidents courants

- Débit continu immédiat
- Débit continu différé
- Interruption brutale du débit
- Débit insuffisant
- Fuites d'air au 1^{er} étage
- Eau dans le 2^{ème} étage
- Givrage : rapport de détente, débit
 - Favoriser l'échange MP – milieu : ailettes, position de la chambre MP
 - Chambre PA remplie de glycol

La normalisation des détendeurs

Objet normé : 1^{er} étage, tuyau MP, 2^{ème} étage

Conditions

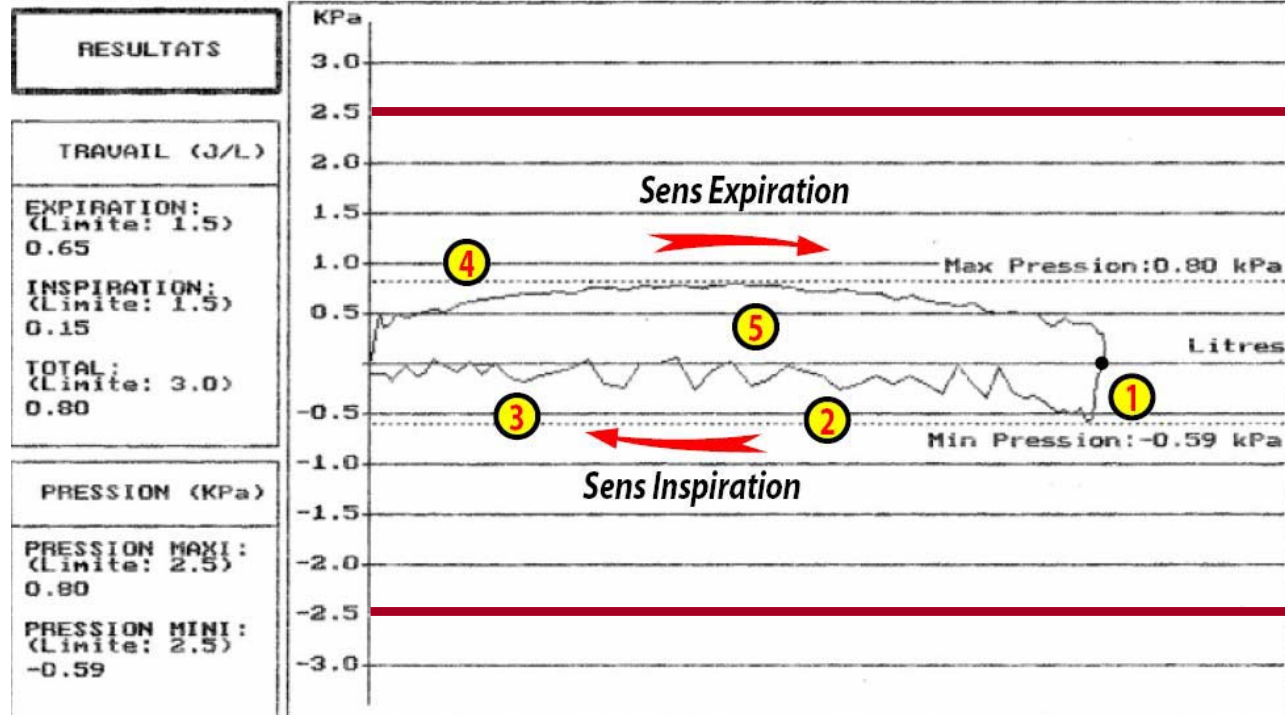
- 50 bar HP
- 50 m
- 25 cycles/min
- 2,5 L/cycle
- 10°C (4°C pour la mention eau froide)

Résultats

- Travail ventilatoire < 3,0 J/L
- Travail inspiratoire < 0,3 J/L
- Pression expi / inspi : +/- 25 mbar
- Pression inspiratoire positive : + 5 mbar maximum (effet venturi)


Test de normalisation

FICHER	: U90302	TEMPERATURE	: 14.1 / 13.4
DATE	: Mar 16 Mars 2004	ALIMENTATION	: 190 B
DETEDEUR	: U200 proto 2	RYTHME	: 25 c/mn
N° de serie	: 2em etage	VOLUME/MINUTE	: 62.5 l/mn
PROFONDEUR	: 50 METRES	VOLUME COURANT	: 2.5 litre
OBSERVATIONS	: VENTURI+ SENS +		



1. Point de décollage
2. Courbe d'inspiration
3. Effet venturi
4. Courbe d'expiration
5. Travail ventilatoire

L'oxygène

- À l'ouverture du robinet : compression adiabatique dans la chambre HP
- → forte augmentation de T°
- Carburant + comburant + énergie → 
- Comburant : oxygène
- Énergie : compression adiabatique → ouvrir doucement !
- Carburant :
 - Graisse : Triolub, Christo-lube
 - Joints : viton, nitrile
 - Poussières : filtration, éviter la contamination

Critères de choix

- Piston ou membrane ?
- Compensé ou non ?
- Surcompensé ?
- DIN ou étrier ?



Références

- Plongée plaisir niveau 4 – A. Foret, P. Torres – Gap (2002)
- <http://hlbmatos.free.fr/> – site perso H. Le Bris (IN)
- Effervescence – Ph. Martinod – Historic'one (1998)