



Le gonflage des bouteilles



2 séances consacrées à **l'utilisation des appareils sous pression**, pour :

- Connaître le fonctionnement général de nos équipements,
- Pouvoir répondre aux questions des plongeurs, des dirigeants de club,
- Respecter la législation et les consignes des fabricants.

Séance 1 (27/03/13, aujourd'hui) : Le gonflage des blocs

**Séance 2 (03/04/13) : Les bouteilles de plongée et appareils de mesure
Les détendeurs**

Séance 1 (27/03/13, aujourd'hui) : Le gonflage des blocs

Partie A :

1. Un compresseur, pourquoi, combien, comment ?
2. Principe de fonctionnement
 - 2.1 Schéma
3. Comment les clapets s'ouvrent et se ferment ?
 - 3.1 Les clapets à l'admission
 - 3.2 Les clapets au refoulement
4. Comment les 4 pistons montent et descendent ?
 - 4.1 La lubrification
 - 4.2 L'étanchéité.
5. Contrôlons l'air comprimé.
 - 5.1 Comment comprimer de l'air sain ?
 - 5.2 Comment comprimer de l'air à température ambiante ?
 - 5.3 Comment prévenir la surpression ?
 - 5.4 Schéma général.
6. Le Trajet d'une molécule d'air
7. Caractéristiques
8. Réglementation
 - 8.1 Consignes de chargement.
9. Durée de chargement des bouteilles.

Séance 1 (27/03/13, aujourd'hui) : Le gonflage des blocs

Partie B :

1. Des bouteilles tampons, pourquoi faire ?
2. Mise en équipression
 - 2.1 Schéma
3. Chargement des bouteilles avec des tampons
4. Echauffement des bouteilles

Annexes :

1. Exercices divers

1. Un compresseur, pourquoi, combien, comment ?

Le compresseur de plongée a pour mission de comprimer l'air ambiant afin de le stocker en la plus grande quantité possible dans un espace aussi réduit que possible.

Les limites de fonctionnement sont définies par la technologie employée.

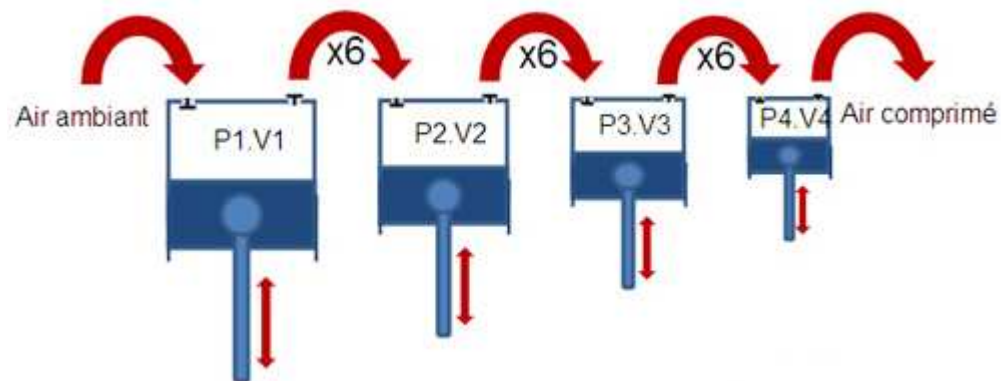
On trouve en général des valeurs de compression de :

- 200 ou 230 bars pour un chargement direct des bouteilles de plongée (sans bouteilles tampons)
- 300 bars pour les installations avec bouteille(s) tampon(s) destinée(s) au gonflage des blocs à 230 bars
- 400 bars pour les installations avec bouteille(s) tampon(s) destinée(s) au gonflage des blocs à 230 ou 300 bars

Le fonctionnement des compresseurs s'appuie sur la loi de Mariotte, ainsi un compresseur 300 bars a pour mission de faire rentrer 300 litres d'air dans un volume de 1 litre.

En raison de l'énergie nécessaire, cette opération ne peut pas être réalisée en une seule et unique étape.

Selon la pression finale souhaitée, le type de matériel utilisé (moteur), et le type d'énergie utilisée (thermique ou électrique 230 / 380 volts) l'opération de compression sera réalisée en 3 ou 4 étapes successives :



2. Principe de fonctionnement.

1. Admission
2. Compression
3. Refoulement

Le piston descend

Le clapet d'admission s'ouvre

Le clapet de refoulement se ferme

L'air pénètre dans le cylindre

Le clapet d'admission se ferme

Le clapet de refoulement reste fermé

Le piston remonte

L'air est comprimé dans le cylindre

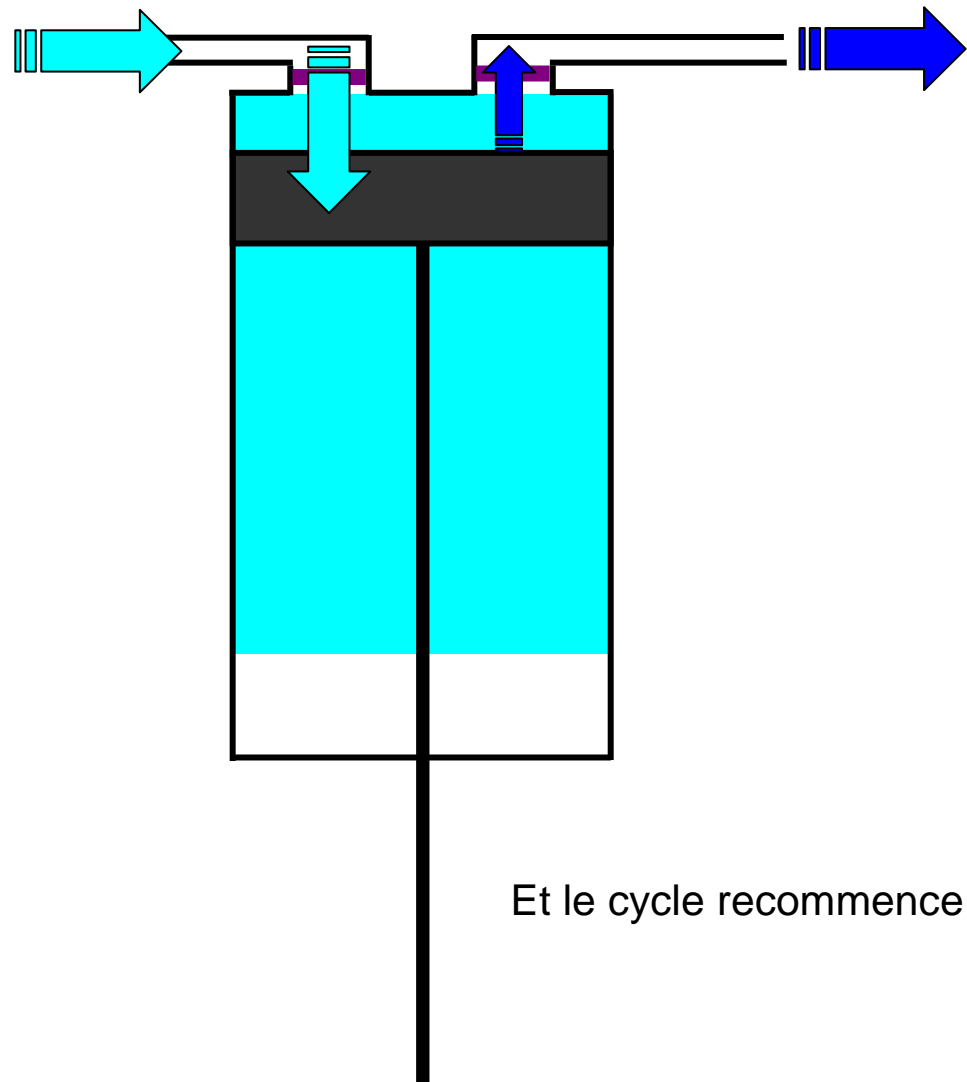
Le piston reste en haut

Le clapet d'admission reste fermé

Le clapet de refoulement s'ouvre

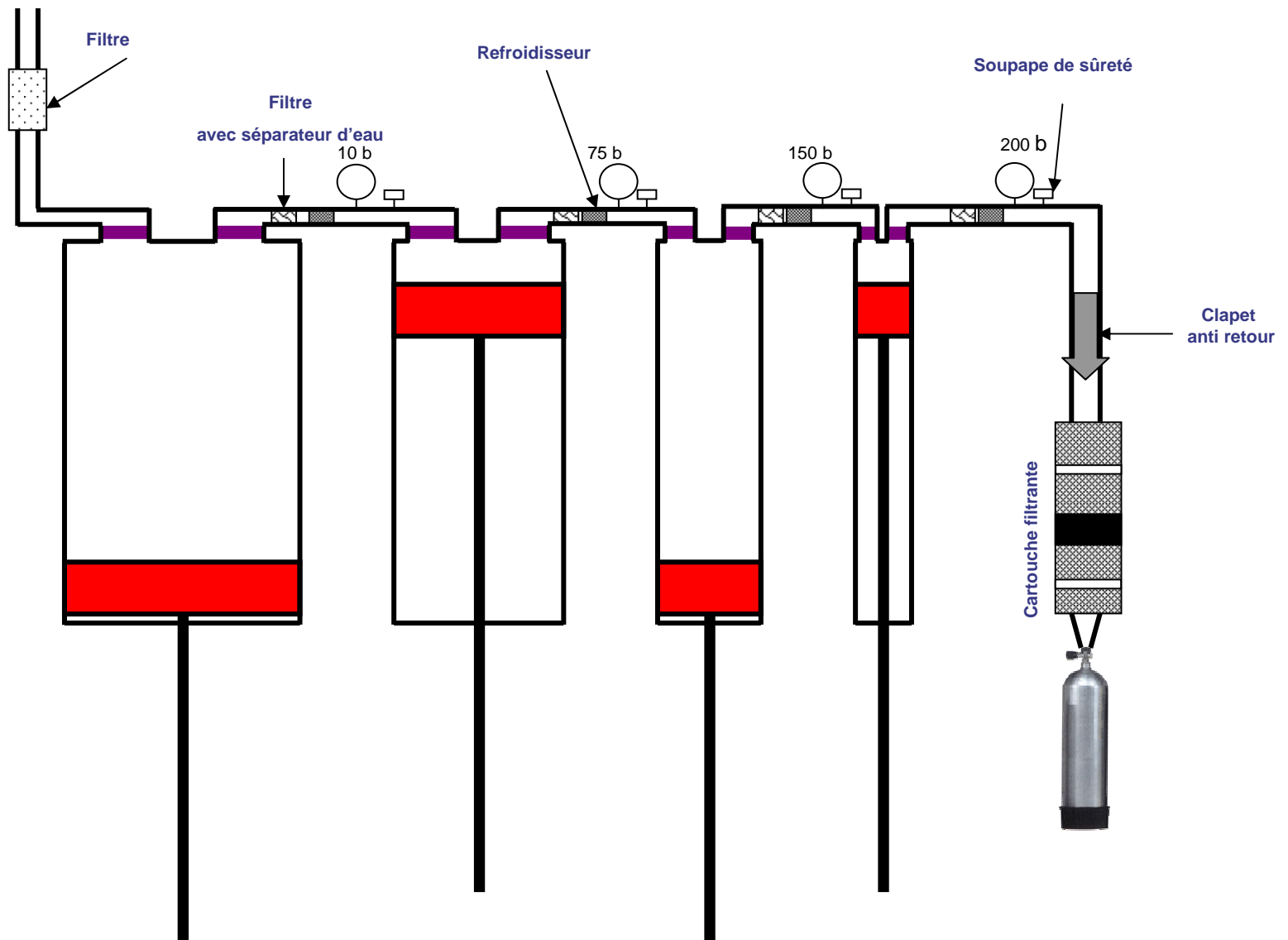
L'air comprimé s'échappe du cylindre

Cycle de compression en 3 phases :



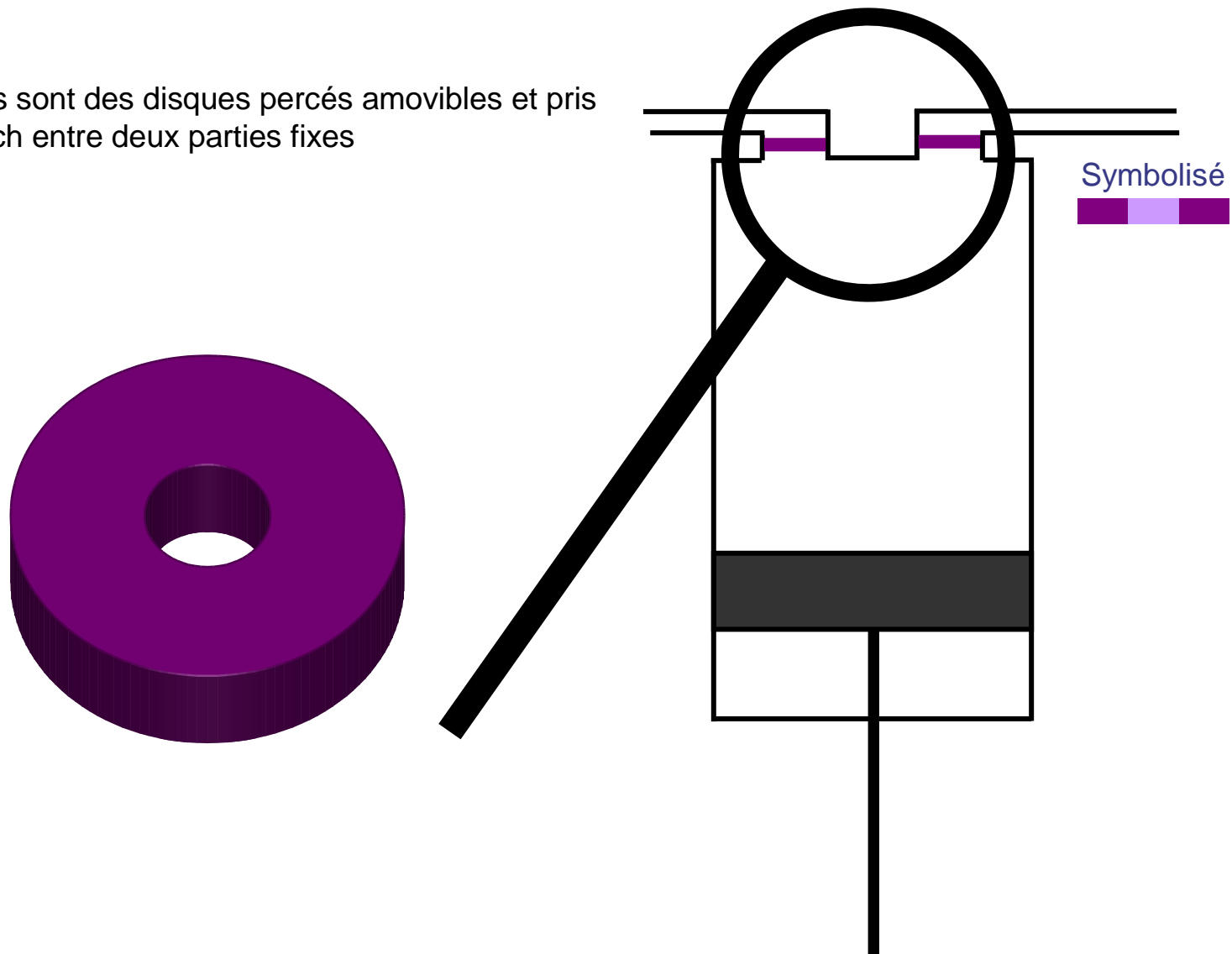
2.1 Schéma.

La compression se fait en 4 étages (ici) :



3. Comment les clapets s'ouvrent-ils et se ferment-ils au bon moment ?

Les clapets sont des disques percés amovibles et pris en sandwich entre deux parties fixes

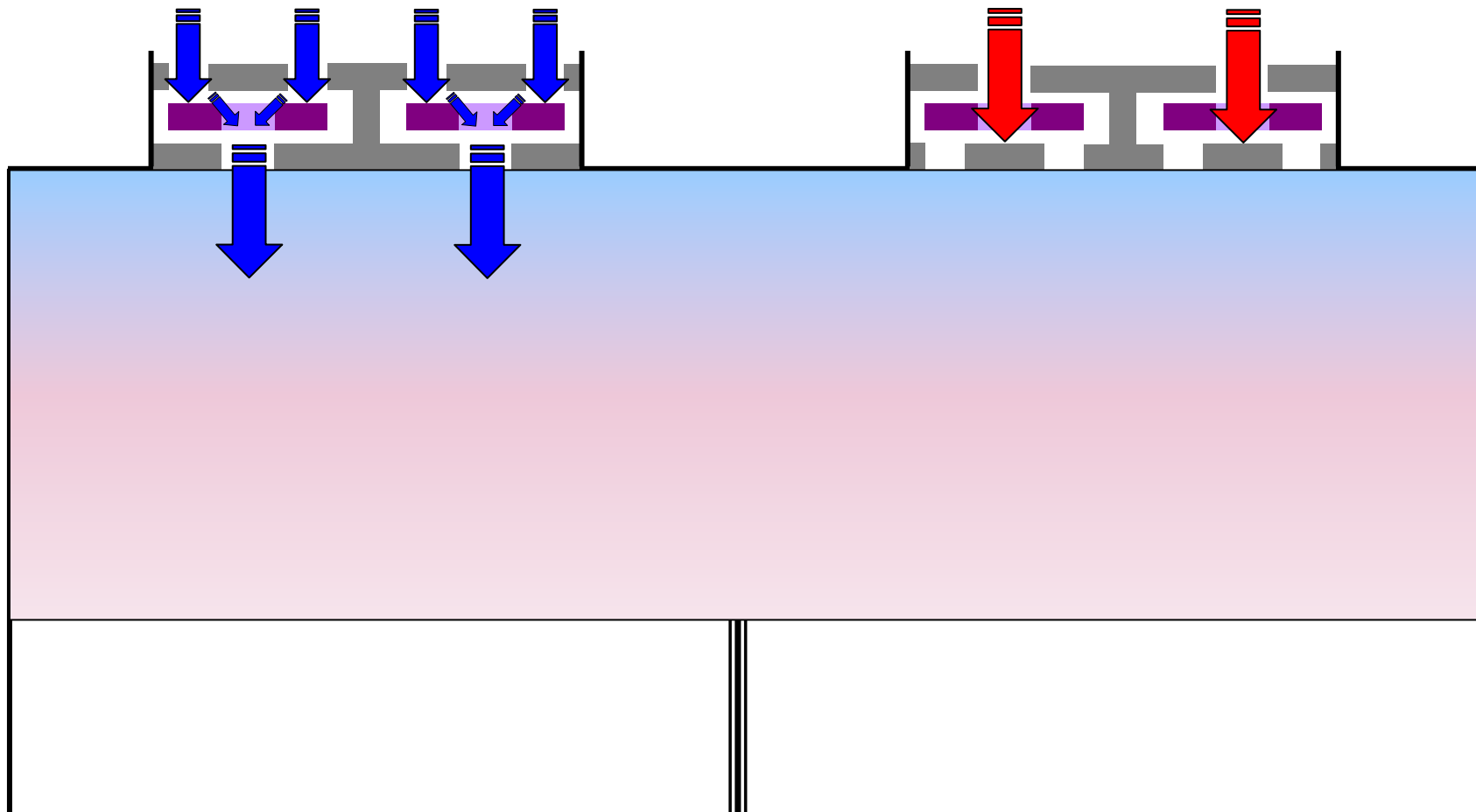


3.1 Les clapets d'admission.

Clapets à l'admission d'air dans le cylindre :

Quand le piston descend, une dépression se crée dans le cylindre

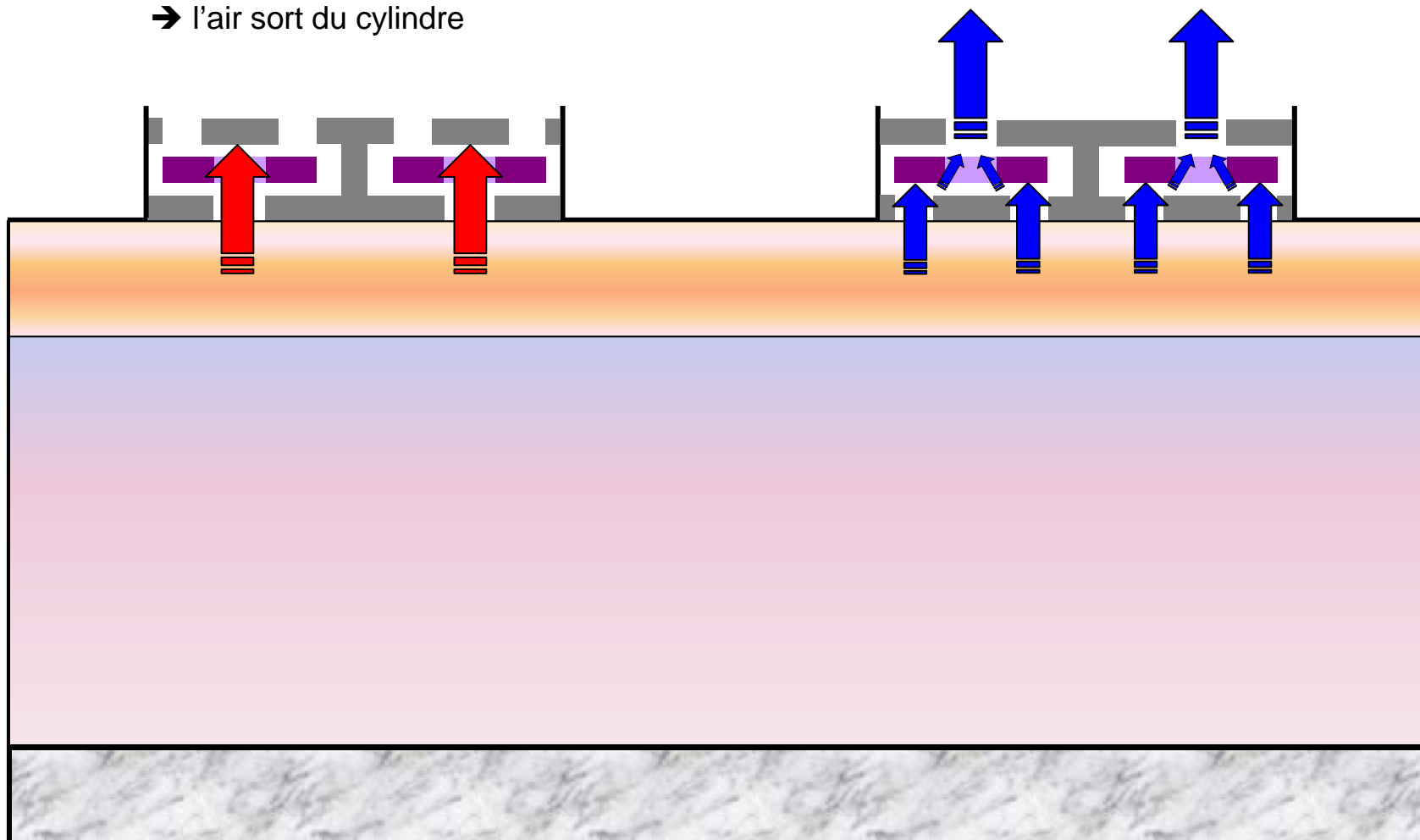
- les clapets descendent
- l'air entre dans le cylindre



3.1 Les clapets au refoulement.

Quand le piston monte, une surpression se crée dans le cylindre

- les clapets montent
- l'air sort du cylindre



4. Comment les 4 pistons montent et descendent ?

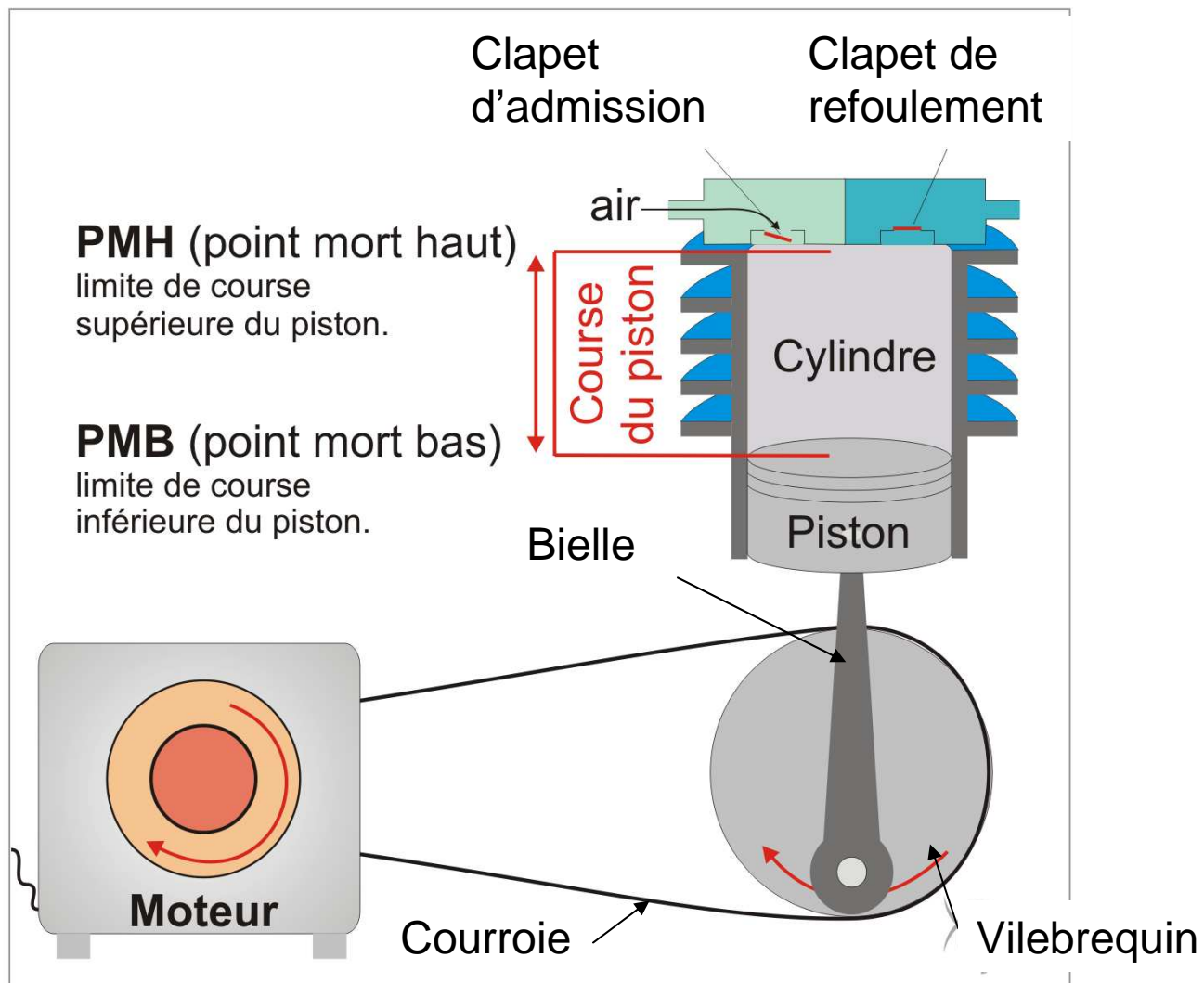
Le moteur (électrique ou thermique) entraîne en rotation le **vilebrequin** (manivelle), via une **courroie**.

Le **vilebrequin** oblige la **bielle** à pivoter et remonter.

La **bielle** pousse puis tire le **piston**.

Le piston translate alors de son PMH à son PMB.

(voir video_compresseur)



4.1 La lubrification.

La lubrification garanti le coulisement correct des pistons dans les cylindres, la rotation correcte des bielles et du vilebrequin.

Les huiles utilisées :

- Huile minérale ou synthétique
- Alimentaire

Indice de viscosité (*) comprise entre 20 et 100.

(*) Capacité d'un fluide à s'écouler :

Eau : 0,001 Miel : 100 Bitume : 100 000 000 Sang : 0,004 Huile : 20 à 3600

La lubrification peut se faire par :

Barbotage (le vilebrequin trempe dans l'huile et emmène à chaque rotation un peu d'huile vers le haut du système)

Une pompe à huile (qui force alors un brouillard d'huile dans le système).

La température de l'huile doit être surveillée (risque de libération de gaz ou auto-inflammation, voir manuel d'utilisation).

4.2 L'étanchéité.

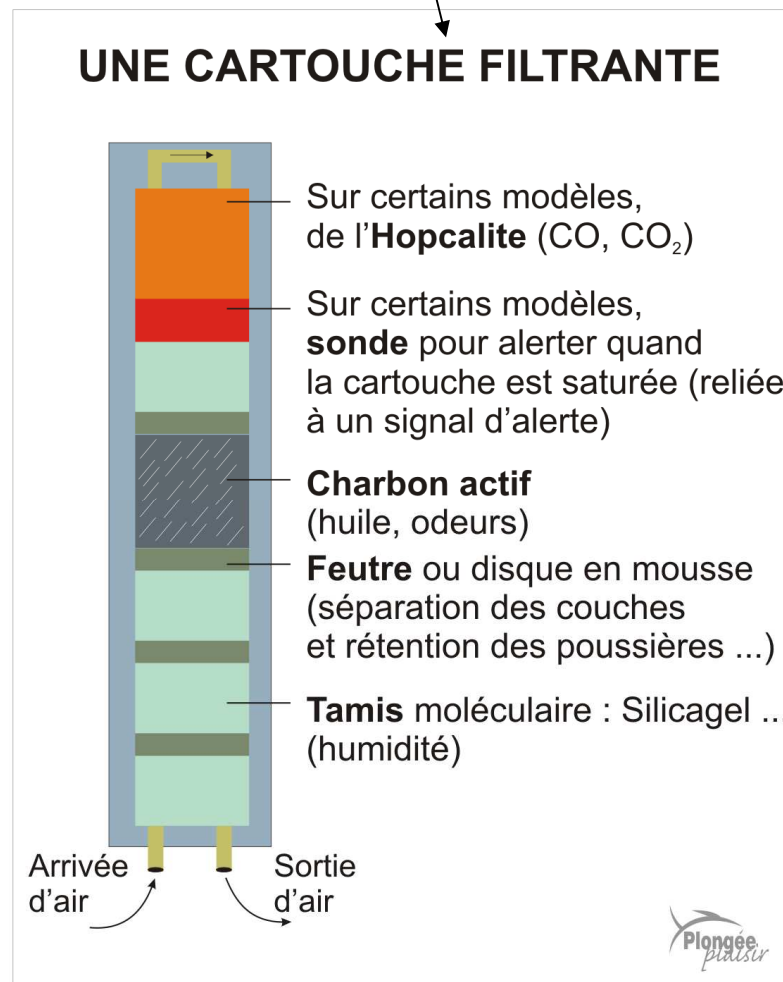
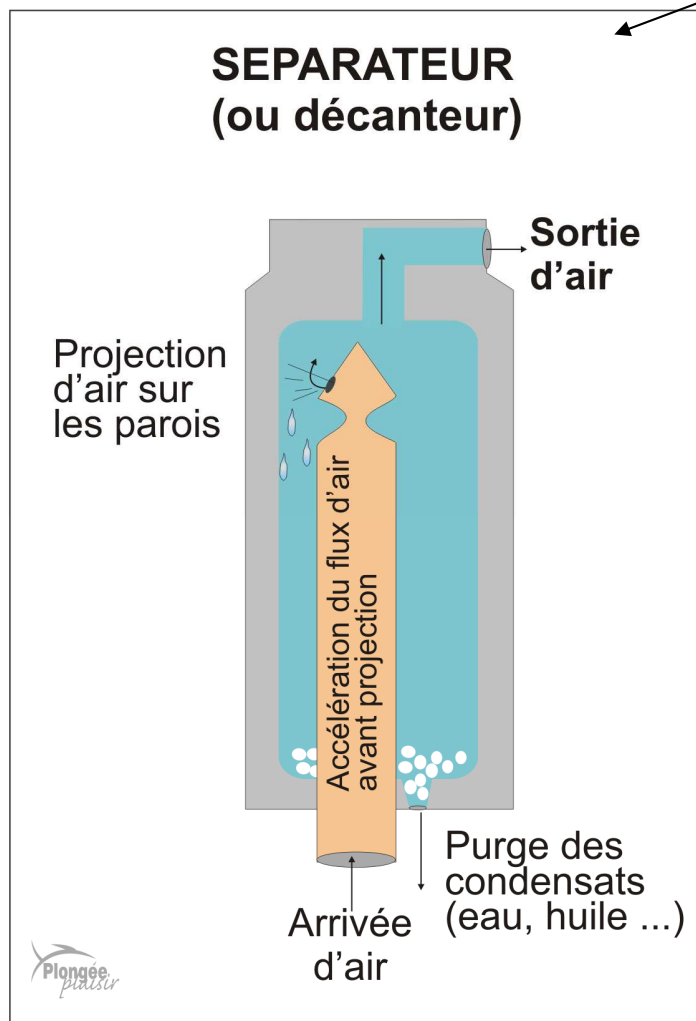
De l'huile est nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble vilebrequin – bielle – piston, MAIS,

L'huile ne doit pas se mélanger à l'air qui transite au-dessus du piston !

Donc, l'étanchéité est prévue par des joints spéciaux (segments) disposés autour du piston.

5.1 Comment comprimer de l'air sain ?

A l'entrée d'air (admission générale) du compresseur, entre chaque étage, et en sortie, un filtre est positionné. Il est nettoyé ou changé régulièrement.



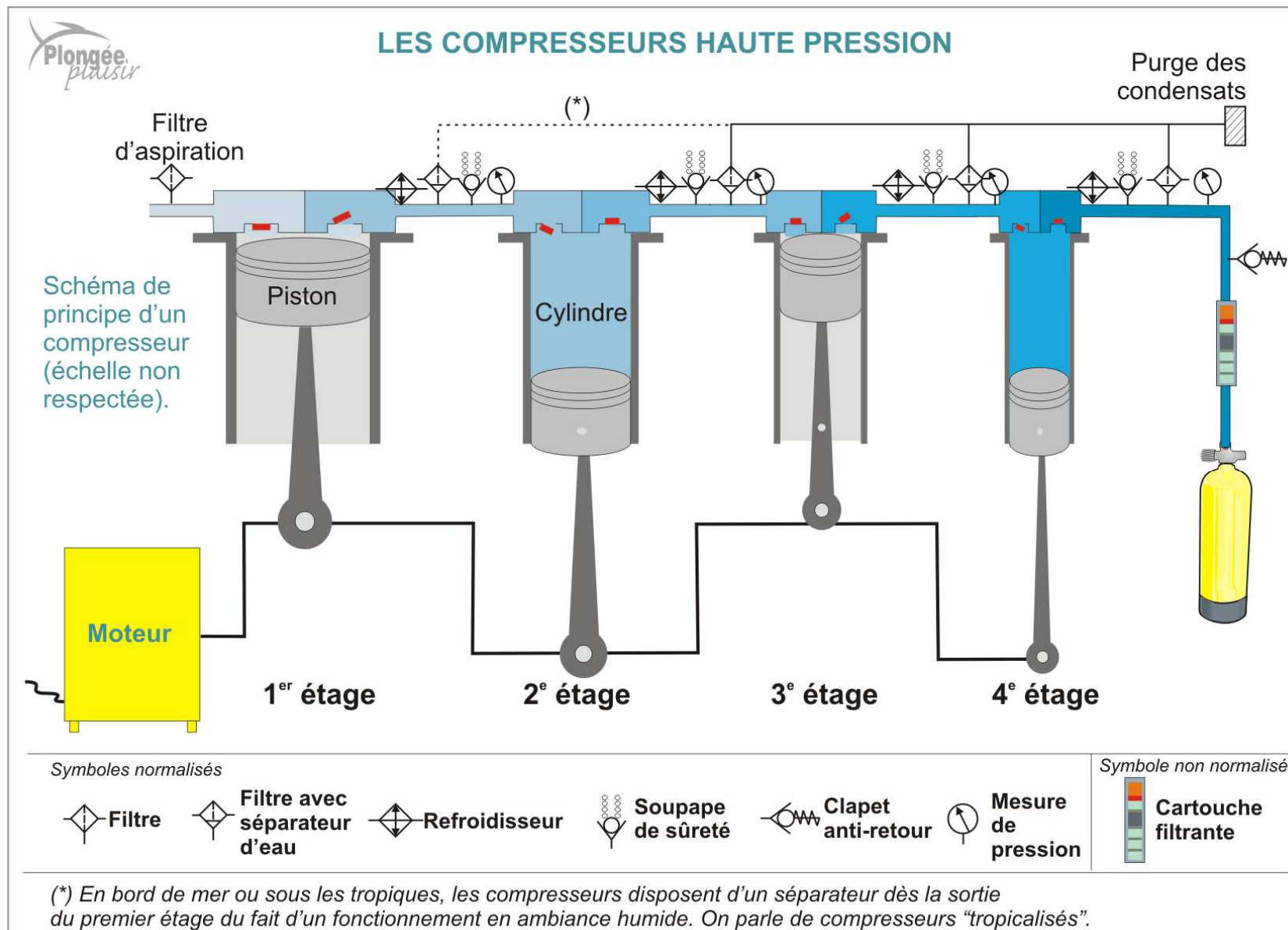
5.2 Comment comprimer de l'air à température ambiante ?

Comprimer de l'air entraîne son échauffement. Entre chaque étage, un refroidisseur est positionné. L'air n'est pas directement admis dans l'étage suivant, mais circule d'abord dans un serpentin afin de retrouver une température proche de la température ambiante.

5.3 Comment prévenir la surpression ?

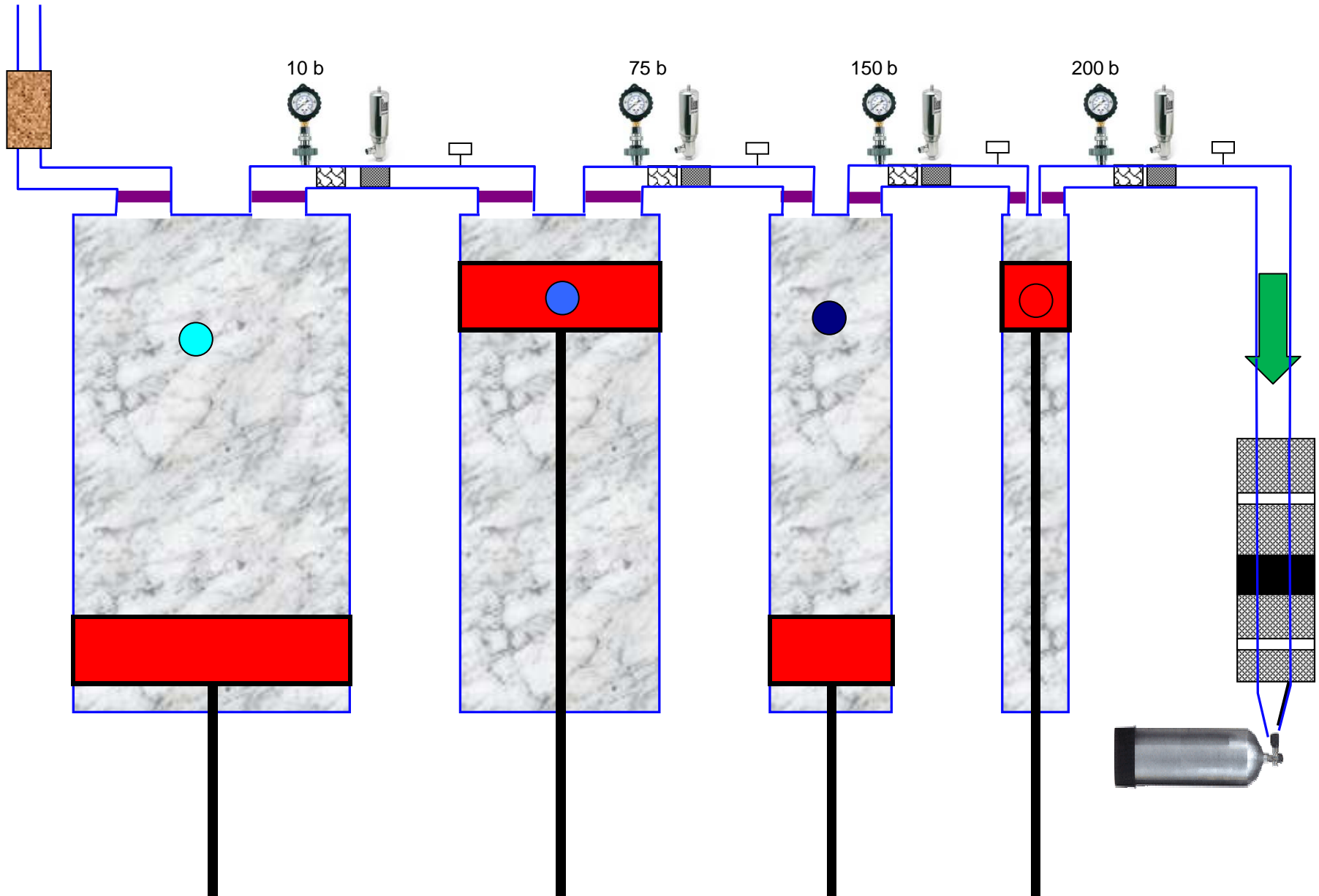
En cas de bouchage d'une canalisation, il y a risque de surpression (Nan, pas pulmonaire, c'est un autre cours !). Entre chaque étage, une soupape de sûreté est positionnée. L'air s'échappe avant de détériorer le compresseur.

5.4 Schéma général.





6. Trajet d'une molécule d'air.



7. Caractéristiques d'un compresseur.

Type :

- Disposition des cylindres (en ligne, en étoile, en V)
- Système de refroidissement (à air, à eau, air/eau)
- Piston pour l'air ou membrane pour l'oxygène

Débit : en m^3 / h (mètre cube par heure).

Pression de service : 300, 450 bars ou plus.

Nombre d'étages.

Qualité de l'air (norme NF EN 12021).

8. Réglementation.

Un compresseur est assimilable à une machine dangereuse.

Contrôlé par la DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement)

Le clapet anti-retour détermine la limite de responsabilité du fabricant.

Avant le clapet anti-retour, le fabricant est responsable de l'entretien et des réparations.

Après le clapet anti-retour, l'utilisateur est responsable.

(ex : le filtre à charbon actif est après le clapet anti-retour).

Documents obligatoires :

- Manuel du compresseur,
- Cahier d'entretien (arrêté du 13/12/1999),
- Cahier d'intervention,
- Cahier de gonflage.

Affichage obligatoire :

- Liste des personnes habilitées à gonfler,
- Consignes d'utilisation du compresseur,
- Consignes de chargement (arrêté du 15/03/2000),
- Consignes particulières.

« Le personnel chargé de la conduite d'équipement sous pression doit être formé et compétant pour surveiller et prendre toute initiative nécessaire à leur exploitation sans danger »

8.1 Consignes de chargement (remplissage) des bouteilles.

1. Avant la mise en route, vérifier le niveau d'huile du compresseur.
2. Avant le raccordement au dispositif de chargement, vérifier :
 - le bon état extérieur de la bouteille
 - la date d'épreuve (date de réépreuve + marquages européens)
 - le contrôle annuel éventuel par TIV
 - la pression de chargement
 - le bon fonctionnement de la soupape de sûreté du dispositif de chargement
3. Purger la robinetterie de la bouteille
4. Raccorder la bouteille à la rampe de pression de service correspondante

Pendant le chargement,

1. Purger fréquemment les décanteurs et filtres
2. Surveiller le manomètre de chargement
3. Ne jamais dépasser la pression de service

LE PREPOSE AU CHARGEMENT DOIT REFUSER LES BOUTEILLES QUI NE REPONDENT PAS AUX EXIGENCES DE VERIFICATION

9. Durée de chargement des bouteilles.

Le temps de gonflage dépend du débit du compresseur et du volume à gonfler.

Prenons **20 bouteilles** de **15 litres** gonflés à **50 bars**. Il faut les recharger à **230 bars**.

Le compresseur a un débit 16 m³/h. Calculons le temps qu'il faut pour les gonfler ?



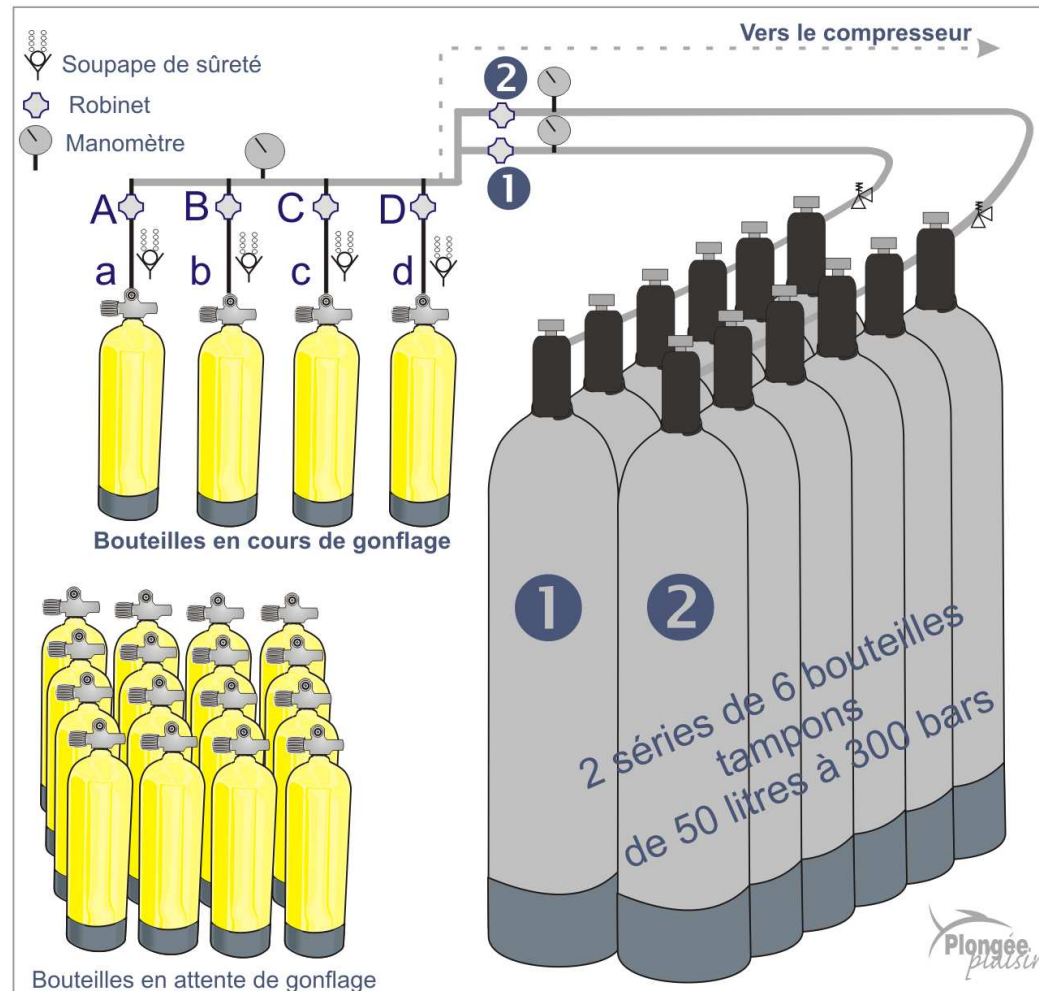
pression à ajouter

Quantité d'air à comprimer : $20 \times 15 \times (230 - 50) = 54\,000$ litres

Débit = 16 m³/h soit 16 000 litre/h ($1\text{m}^3 = 1\,000$ litres)

$$\text{Durée nécessaire} = \frac{\text{Quantité d'air à comprimer}}{\text{Débit du compresseur}} = \frac{54\,000}{16\,000} = 3,38 \text{ h soit } 3 \text{ h } 23$$

Pour gagner du temps, il est possible d'utiliser des bouteilles tampons



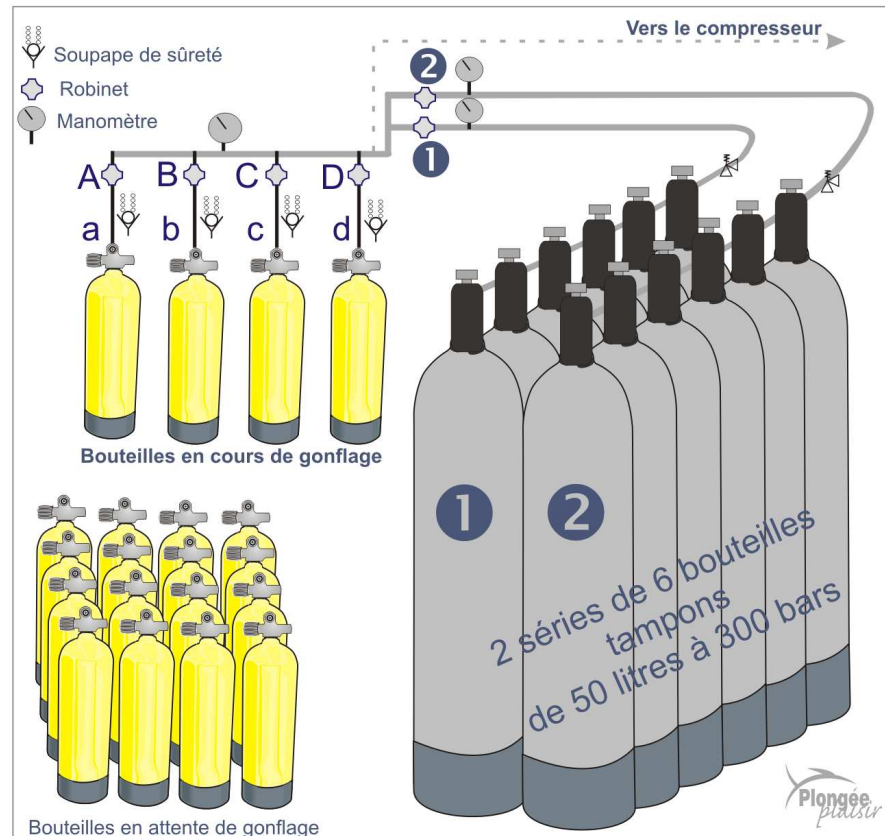
1. Les bouteilles tampons, pourquoi faire ?

Bouteilles de 30 ou 50 litres couplées à un compresseur et gonflées à 300 ou 350 bars.

- Stock d'air comprimé disponible,
- Diminue la durée de chargement (de gonflage).

Pour gonfler des bouteilles à l'aide de tampons :

1. Vérifier les bouteilles à gonfler
 2. Purger les robinetteries
 3. Fermer les robinets
 4. Mise en communication des bouteilles
 5. Ouverture d'un tampon
- (toujours commencer par le tampon le moins rempli)**
1. Fermer les robinets



2. Mise en équipression des bouteilles.

Equipression: Mise en communication des bouteilles = mise en équilibre des pressions.

1^{ère} phase: Mettons une bouteille de 12 litres chargée à 30 bars en équipression avec une de 15 litres chargée à 70 bars.

Quelle est la pression finale une fois l'équilibre atteint ?

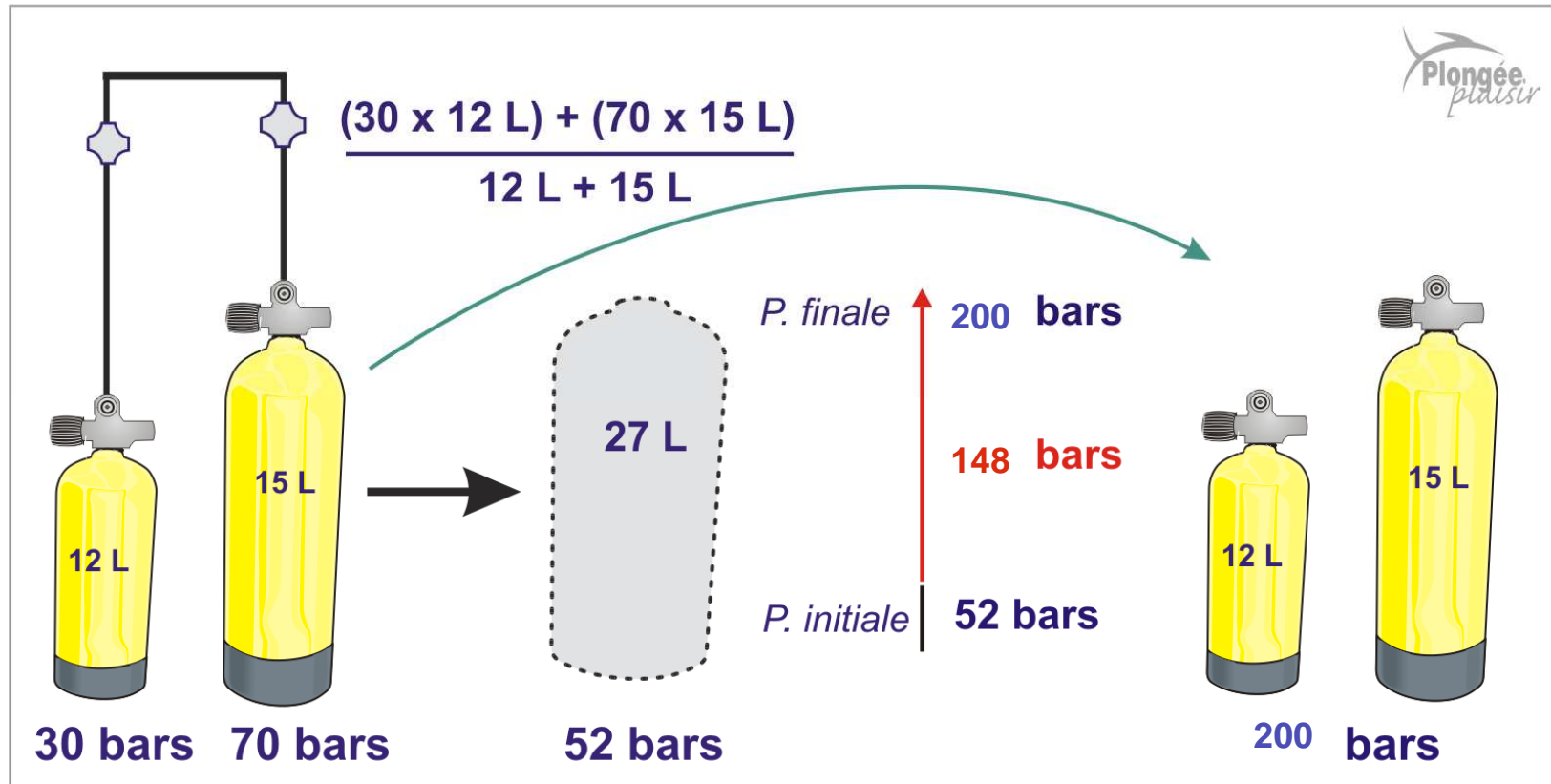
Calcul de la quantité d'air total

$$(12 \times 30) + (15 \times 70) = 360 + 1050 = 1410 \text{ L}$$

Ce volume d'air se répartira dans les deux bouteilles, soit un volume de (12+15) 27 litres.

La pression finale est de $\frac{\text{Volume d'air}}{\text{Volume des blocs}} = \frac{1410}{27} = 52 \text{ bars}$

2. Mise en équipression des bouteilles



3. Chargement des bouteilles avec des tampons.

2ème phase : Ouverture d'1 tampon

- Y-a-t-il suffisamment d'air ?
- *Quelle sera la pression finale dans les tampons ?*

Quel volume d'air faut-il introduire dans les bouteilles, pour les porter à 200 bars ?

Point de départ : les bouteilles correspondent à une de 27 litres chargée à 52 bars.

Point d'arrivée : une bouteille de 27 litres chargée à 200 bars.

Calcul du volume d'air nécessaire :

$$200 - 52 = 148 \text{ bars} \quad \text{donc} \quad 148 \times 27 = 3996 \text{ L}$$

Quel volume d'air avons nous dans les tampons ?

3 tampons de 50 litres chargés à 350 bars.

Seule la pression au dessus de 200 bars est utile pour gonfler.

Calcul du volume d'air disponible dans les tampons :

$$(\text{Pression finale} - \text{Pression initiale}) \times \text{volume} = (350 - 200) \times (3 \times 50) = 22\,500 \text{ L}$$

Il y a largement assez d'air

2ème phase : Ouverture d'1 tampon

- *Y-a-t-il suffisamment d'air ?*
- Quelle sera la pression finale dans les tampons ?

Quelle sera la pression dans les tampons à l'issu du gonflage ?

Calcul de la pression finale dans les tampons :

Le volume d'air total dans les tampons :

$$(3 \times 50) \times 350 = 52\,500 \text{ L}$$

22 500 litres ont été utilisés. Il faut donc les enlever du stock total.

$$52\,500 - 22\,500 = 30\,000 \text{ L}$$

Il reste donc 30 000 litres dans 150 litres (3 tampons de 50 litres).

La pression finale est de $\frac{30\,000}{150} = 200 \text{ bars}$

En ouvrant les tampons les moins remplis, on profite de leurs stocks disponibles pour commencer à gonfler les bouteilles.

Si on équilibrait avec les tampons les plus remplis, il ne sera pas possible de continuer de gonfler avec les moins remplis. Au pire, si la pression dans les bouteilles était supérieure aux tampons, on gonflerait les tampons avec les bouteilles à remplir !

Dans certains cas, la quantité d'air des tampons n'est pas suffisante. Il faut donc continuer le gonflage avec le compresseur.

Fermer les tampons pour éviter de les gonfler en même temps que les bouteilles.

Il est plus judicieux de gonfler les tampons seuls pendant les heures creuses.

4. Echauffement des bouteilles.

$$\frac{P \times V}{T} = \text{constante}$$

L'air (et la bouteille) s'échauffe pendant la phase de gonflage.

A volume constant (cas du gonflage des bouteilles de plongée), la pression et la température du gaz augmentent proportionnellement.

Ainsi la pression mesurée en fin de gonflage (à chaud) ne sera plus la même lorsque la température de la bouteille sera revenue à la température ambiante.

Un calcul simple permet de déterminer la pression restante dans le bloc après refroidissement.

Le nombre magique :

273

Calcul de la pression restante = $\frac{\text{Pression de gonflage} \times \text{Température à froid}}{\text{Température à chaud}}$

Attention :
La température doit être exprimée en Kelvin (0°C = 273 K)

Prenons l'exemple d'une bouteille gonflée à 200 bars et dont la température a atteint 50°C puis a été stocké à 20°C

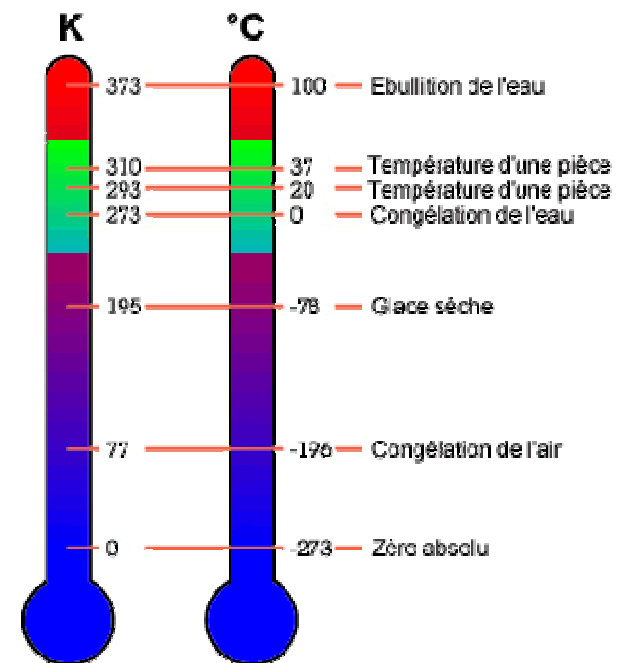
Température convertie en degré Kelvin:

$$50^{\circ}\text{C} = 50 + 273 = 323^{\circ}\text{K}$$

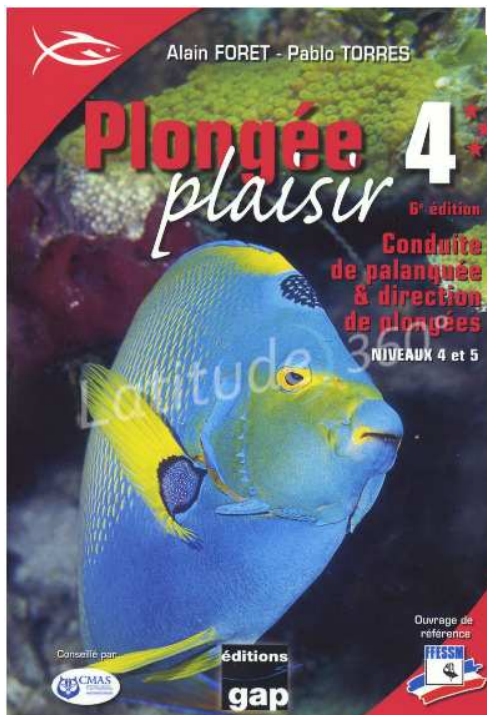
$$20^{\circ}\text{C} = 20 + 273 = 293^{\circ}\text{K}$$

Calcul de la pression restante après refroidissement

$$\frac{200 \times 293}{323} = 181 \text{ bars}$$



Pour aller plus loin.



Plongée et système respiratoire
par Alain Foret et Pablo Torres
Plongée plaisir 4 – page 251 (6^{ème} édition)



Vos questions ?

merci.

- Vous avez à gonfler 10 blocs de 15 litres ou il reste 60 bar dans chaque .
Vous disposez d'un compresseur de 27 m³/h de débit.
Combien de temps allez vous mettre pour gonfler tous les bocs à 230 bar.

- $10 \times 15 \times 60 = 9000$ litres
- $10 \times 15 \times 230 = 34500$ litres
- Je dois donc mettre $34500 - 9000 = 25500$ litres dans mes blocs.
- Mon compresseur 27 m³/h soit 27000 litres heure
- Donc $25500 \times 60' / 27000 = 56.66$ minutes

- Vous disposez d'une rampe de 3 tampons de 50 litres chacun, gonflés à 250 bars et vous désirez remplir (en même temps) 4 blocs de 15 litres dans lesquels il reste 40 bars
- 1) Quelle sera la pression dans les blocs si on utilise les 3 tampons simultanément ?
- 2) Quelle sera la pression dans les blocs si on utilise les 3 tampons successivement ?
(On néglige le volume des tuyauteries).
- 3) Conclusion

- **Correction**

- 1) $(3 \times 50 \times 250 + 4 \times 15 \times 40) / (3 \times 50 + 4 \times 15) = 190 \text{ b}$
- 2) 1 er tampon : $(1 \times 50 \times 250 + 4 \times 15 \times 40) / (1 \times 50 + 4 \times 15) = 135,5 \text{ b}$
- 2 ème tampon : $(1 \times 50 \times 250 + 4 \times 15 \times 135,5) / (1 \times 50 + 4 \times 15) = 187,5 \text{ b}$
- 3 ème tampon: $(1 \times 50 \times 250 + 4 \times 15 \times 187,5) / (1 \times 50 + 4 \times 15) = 215,9 \text{ b}$
- 3) Conclusion: Il vaut mieux utiliser la seconde méthode qui permet d'obtenir la plus haute pression dans les blocs.

- Un bloc sort du gonflage à 200 bar et 47°.
Quelle sera sa pression lu au manomètre lorsqu'il sera dans une eau à 17°.

- $P1 / T1 = P2 / T2$

$$\begin{array}{ccc} P1 = \frac{200}{T1 = 47+273} & \rightarrow & P2 = \frac{?}{T2 = 17+273} \end{array}$$

soit $P2 = P1 \times T2 / T1$

$$200 \times 290 / 320 = 181,25 \text{ bar}$$

Nous avons deux blocs :

- un de 12L à 30bars
- un de 15L à 50 bars

Nous désirons les gonfler à 200 bars à partir d'une station comprenant deux tampons de 50l :

- le n°1 a 220 bars
- le n°2 a 270 bars

- Méthode

Sans ouvrir les tampons nous allons équilibrer les blocs 12L et 15 par transvasement entre eux :

$$(12 \times 30) + (15 \times 50) / (12 + 15) = 1110 / 27 = 41 \text{ bars dans les deux blocs}$$

En laissant les deux blocs équilibrés ouverts nous allons transvaser depuis le tampon n°1 le moins gonflé soit celui de 220bars

$$(12 \times 41) + (15 \times 41) + (50 \times 220) / (12 + 15 + 50) = 12107 / 77 = 157 \text{ bars dans les blocs et le tampon n°1}$$

En fermant le tampon n°1 de 157 bars, nous allons compléter à 200bars avec le tampon n°2 de 270 bars, nous voyons de suite que la pression sera trop grande si nous la contrôlons pas dans le transvasement

$$(12 \times 157) + (15 \times 157) + (50 \times 270) / (12 + 15 + 50) = 17739 / 77 = 230 \text{ bars}$$

Ce qui est trop nous cesserons le gonflage à 200 bars comme prévu en contrôlant la pression admise à l'aide du robinet du panneau de commande

Nous devons rajouter seulement : $200 - 157 = 43$ bars dans nos blocs

Soit un volume de : $(12 \times 43) + (15 \times 43) = 1161$ L et à retirer du tampon n°2

Sa pression sera de : $(50 \times 270) - 1161 / 50 = 246$ bars

Des plongeurs envisagent une plongée sur un site nécessitant une bonne autonomie. Pour cela la veille de leur escapade, ils procèdent au gonflage leurs blocs de 15 litres. La pression de fin de gonflage est de 230 bars et la température de leurs blocs est alors de 35 °C

1) Quelle sera la pression de leur bloc le lendemain matin sachant que la température ambiante est de 17°C?

$$35^{\circ} C = 35 + 273 = 308^{\circ} \text{ kelvin et } 17^{\circ} C = 17 + 273 = 290^{\circ} \text{ Kelvin}$$
$$P/T = \text{Cste soit } P = 290k \times 230b / 308 = 216,6 \text{ bars}$$

2) Après avoir regonflé leurs blocs à 230 bars, qui sont restés à la température ambiante de 17°C, ils partent plonger dans une eau à 5°C. Quelle sera leur autonomie à 32 mètres avec une réserve fixée à 50 bars et avec une consommation de 21 litres/minute mesurée à la pression atmosphérique?

$$17^{\circ} C = 17^{\circ} C + 273 = 290^{\circ} \text{ Kelvin et } 5^{\circ} C = 5^{\circ} C + 273 = 278^{\circ} \text{ kelvin}$$
$$\text{Pression des blocs à } 5^{\circ} C = 278k \times 230b / 290k = 220,5b$$
$$\text{Autonomie} = (220,5b - 50b) \times 15 / (21.l \text{ mn} \times 4,2b) = 29 \text{ minutes}$$