

Étude sur le débit des détendeurs de plongée

Frédéric JULIEN, Cédric DAROLLES, David RIVAS

Le but de ce travail est de fournir des données objectives et exploitables sur les détendeurs, en vue d'une exploitation ultérieure sur des aspects comme la détermination de la valeur intrinsèque d'un détendeur, la comparaison de détendeurs entre eux, les réglages, l'étude de leur fonctionnement, etc...

Par souci de simplicité, toutes les mesures se feront sous une pression de une atmosphère. Elles permettront de mettre en évidence des différences entre les détendeurs, mais ne pourront pas refléter très exactement le comportement des détendeurs en utilisation réelle. Le principe d'évaluation, qui est le sujet de ce travail, restera cependant valable et pourra s'appliquer dans tous les cas.

Mesures de débit:

Au niveau du premier étage:

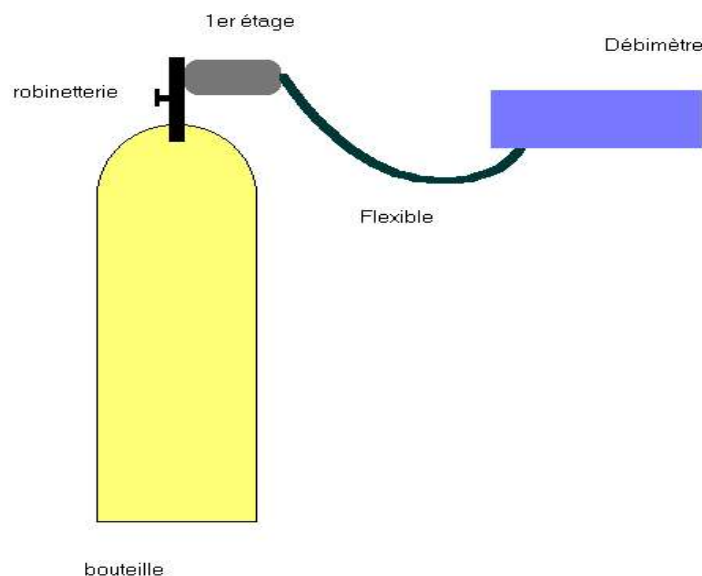
⇒ difficiles à réaliser compte tenu des valeurs importantes de débit au niveau du premier étage. On exprimera les valeurs mesurées en litre par minute (l/min).

Conditions de mesures:

Pour pouvoir comparer les mesures, il nous faut fixer des conditions de référence. Ainsi, tout ce qui peut modifier la valeur d'une mesure de débit pour un même détendeur doit être précisé. Pour toute valeur de mesure de débit d'un 1^{er} étage, on précisera donc:

- la pression à l'intérieur de la bouteille (ou HP alimentant le détendeur).
- la section (et longueur) du tuyau MP sur lequel on effectuera la mesure de débit.
- la moyenne pression (ou charge) imposée au tuyau de sortie du premier étage (tuyau MP) à l'endroit où est effectuée la mesure.
- on négligera l'influence que peut avoir le modèle de la robinetterie utilisée sur la quantité d'air maximum délivrée au premier étage. En revanche il faudra être très vigilant sur le fait que cette robinetterie soit complètement ouverte.
- Mieux vaudra se munir d'un filtre (1^{er} étage) neuf pour l'étude.

Schéma:



Au niveau du 2^{ème} étage:

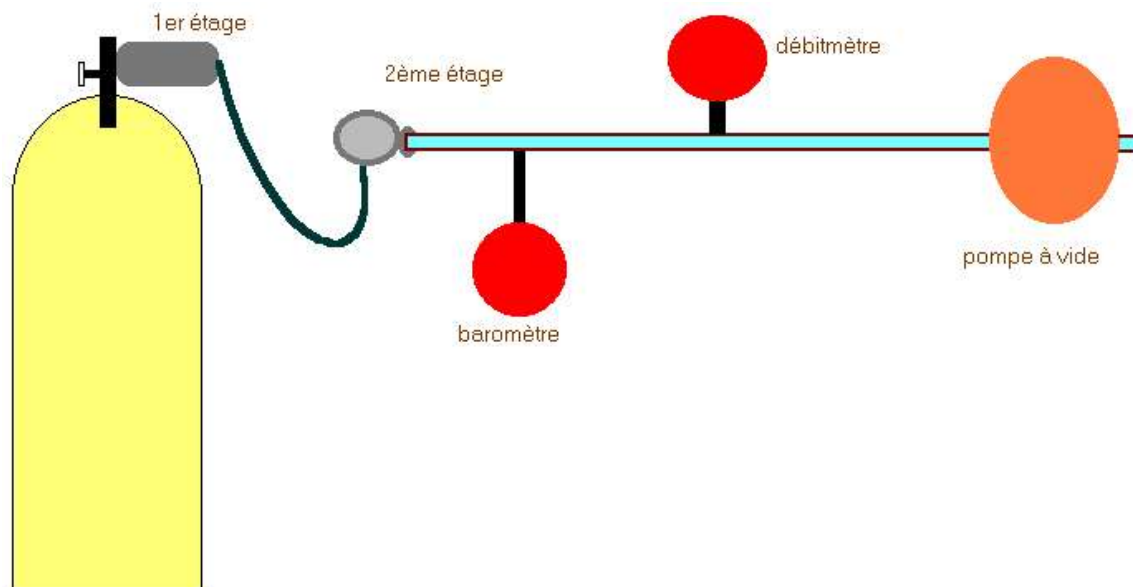
⇒ plus faciles à mettre en œuvre que pour le 1^{er} étage, elles demandent cependant l'ajout d'un nouvel élément: une pompe à vide. On exprimera les valeurs mesurées en litres par minutes (l/min).

Conditions de mesures:

Pour toute valeur de mesure de débit d'un 2^{ème} étage on précisera:

- la moyenne pression (avec et sans débit), au niveau du flexible MP (entre les deux étages du détendeur).
- la valeur de la dépression imposée (pour provoquer le débit d'air) au niveau de l'embout du premier étage.
- Les réglages effectués sur le deuxième étage pendant la mesure, doivent correspondre aux réglages standards (conditions d'utilisation réelles en plongée). On n'essiera donc pas d'atteindre à tout prix le meilleur débit, mais de mesurer un débit standard. Pour les 2^{ème} étages possédant un réglage de l'effet venturi (ou effet de trompe), on orientera le volet sur le maximum d'efficacité (écoulement laminaire du flux d'air).

Schéma:



Mesures de sensibilité: (2^{ème} étage):

La sensibilité d'un 2^{ème} étage peut aussi être appelée résistance, confort ou aisance respiratoire. Dans tous les cas, cette notion qualifie la facilité à respirer dans un détendeur. Elle s'exprime avec au minimum deux valeurs:

- la dépression à appliquer au deuxième étage pour qu'il délivre de l'air.
- la pression qu'il faut exercer dans le détendeur pour expirer l'air vicié.

En réalité, cette notion de sensibilité n'a d'intérêt que si on la relie à la notion d'effort respiratoire à fournir pour pouvoir respirer dans un détendeur (gêne et confort). Par suite, on exprime généralement la sensibilité d'un détendeur par rapport à la force qu'il faut pour soulever une colonne d'eau. De là, il est très facile d'avoir une information sur le travail respiratoire (en Joules) et par suite sur la dépense d'énergie à fournir pour pouvoir respirer (la notion d'effort ou de travail est plus claire lorsqu'elle est exprimée en Joules, de plus on pourra ainsi la recouper avec des données physiologiques).

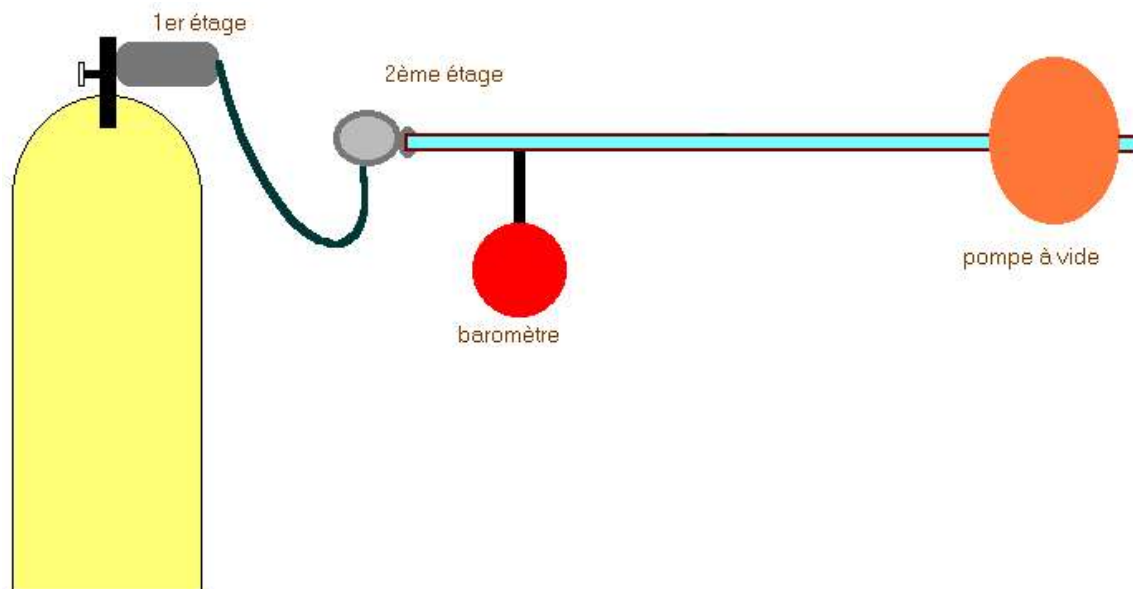
Ainsi, les anglo-saxons expriment la sensibilité d'un 2^{ème} étage en pouces (inch) de hauteur de colonne d'eau.

Les français utilisent plutôt les centimètres de hauteur de colonne d'eau (on peut aussi l'exprimer en bars).

Dans un premier temps nous nous contenterons d'une valeur pour l'expiration et une pour l'inspiration (valeurs maximum), et ce pour des raisons de facilité de mise en œuvre.

En fait, il faudrait calculer toutes les valeurs au cours du temps sur un cycle respiratoire complet (sur les deux phases (expiration et inspiration)), puis intégrer les deux courbes ainsi obtenues (pour ça il faut un signal électrique couplé à un ordinateur, trop difficile à mettre à réaliser pour nous, pour l'instant). Avec la valeur des aires résultant de l'intégration des courbes, on peut avoir directement une idée très précise du travail respiratoire.

Schéma:



Éléments de physiologie respiratoire:

Après avoir vu l'aspect mécanique, il faut aborder les problèmes physiologiques qui en définitive imposent à un détendeur certaines performances.

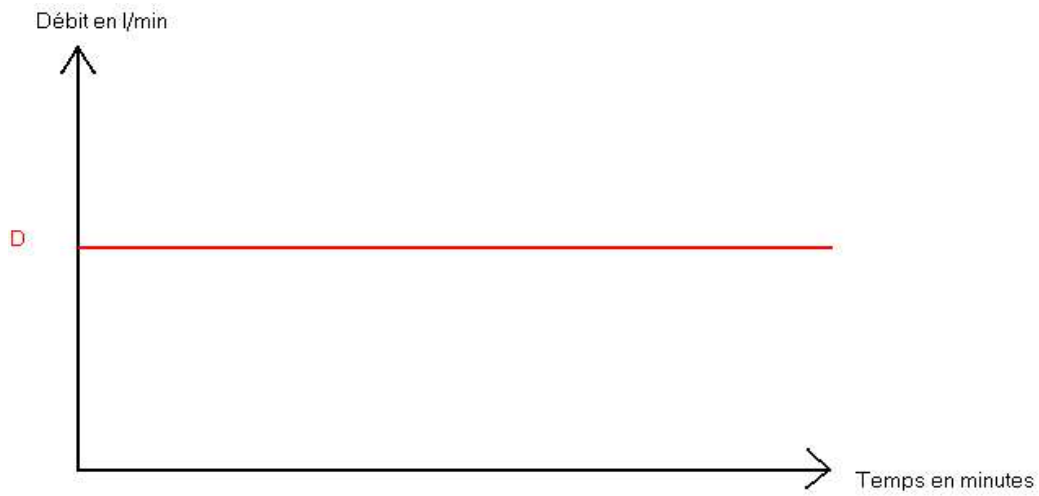
Les valeurs de débit données par les fabricants (ex: 8500 l/min pour le MK20(1^{er} étage) et 1400 l/min pour le R380(2^{ème} étage)) peuvent paraître disproportionnées par rapport à notre consommation d'air sur une minute.

Il faut avoir à l'esprit que ces valeurs correspondent (dans la plupart des cas) à des valeurs calculées en profondeur et ramenées à un équivalent surface (PV=cte), d'où l'importance des nombres. Il faut également, et surtout, avoir à l'esprit que ces données représentent une valeur constante de débit sur une minute. Or sur pour la consommation d'air, notre respiration n'est pas constante mais alternative.

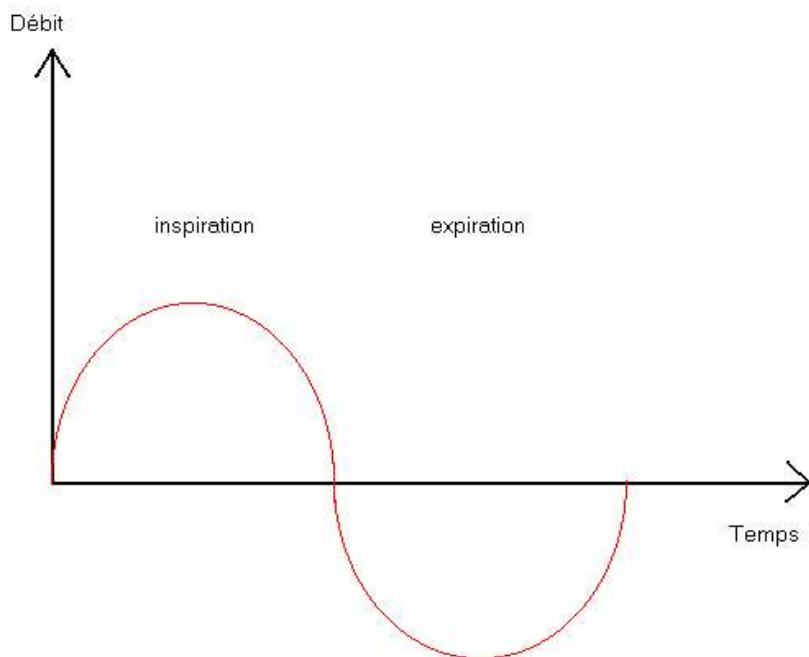
Examinons le problème étape par étape, pour analyser nos besoins réels en air pendant une plongée.

1) Différence modale de débit.

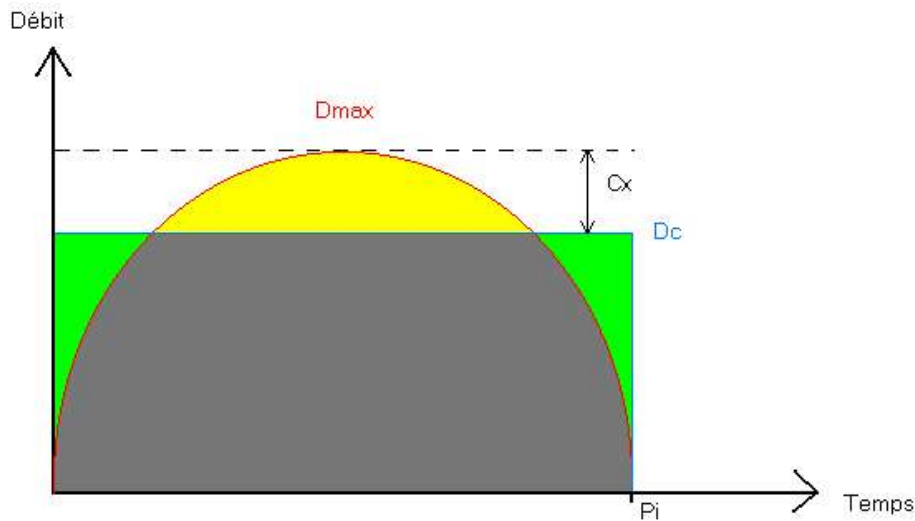
Les valeurs données pour qualifier le débit d'un détendeur sont des valeurs de débit constant sur une minute.



Physiologiquement on peut différencier deux phases dans le cycle respiratoire: inspiration et expiration. La courbe décrivant le débit d'air au cours du cycle respiratoire est une sinusoïde.



Pour comparer un débit constant et un débit sinusoïdal, examinons les courbes de ces deux débits sur la première demi-période de la sinusoïde (phase inspiratoire).
Le schéma ci-dessous montre les courbes de débit au cours du temps, selon deux modes (constant et sinusoïdal), le volume d'air résultant de ces débits étant identique.



Les aires comprises entre les courbes et la droite des abscisses représentent le volume d'air inspiré. Les débits moyens sur une période de temps (ici π) sont égaux (l'unité de temps n'a pas d'importance à ce stade).

Soit D_{max} le débit au sommet de la sinusoïde et D_c la valeur de débit constant ($D_c =$ débit moyen sur une minute).

Par suite, $D_{max} > D_c$, or pour ne pas ressentir de gêne pendant l'inspiration, il faut que D_c soit au moins égal à D_{max} .

De façon pratique il nous faudra donc connaître notre consommation moyenne d'air (D_c) puis multiplier ce débit par un coefficient permettant de déterminer quel débit d'air minimum notre détendeur doit pouvoir nous fournir pour ne pas nous gêner (D_{max}).

Calcul du coefficient cherché:

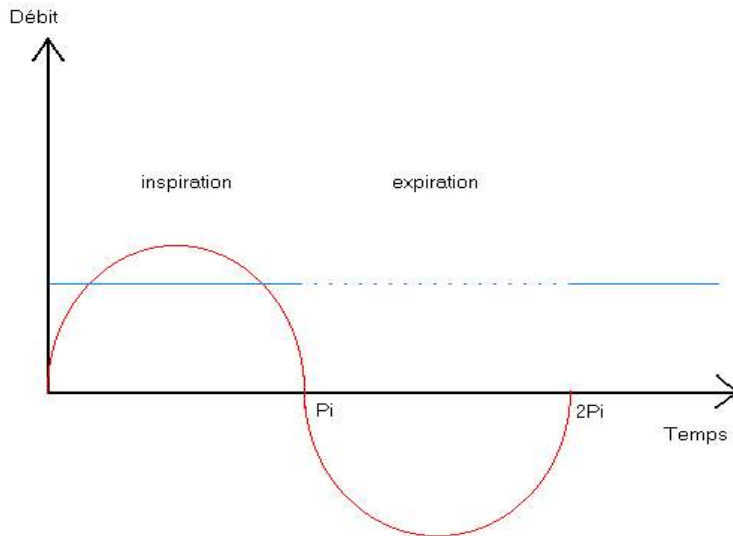
Si on pose la quantité d'air consommée sur une période de temps est la même quelque soit le mode de débit (sinusoïdal ou constant), les aires délimitées par chacune des deux courbes sont égales. Par suite, l'intégration de ces deux courbes sur la période de temps choisie conduit à deux nombres égaux:

$$\begin{aligned} & \text{l'aire jaune} + \text{l'aire grise} = \text{l'aire verte} + \text{l'aire grise} \\ \text{soit} & \int_0^{\pi} D_{max} \sin t \, dt = \int_0^{\pi} D_c \, dt \\ \text{soit} & \int_0^{\pi} D_{max} \sin t \, dt = \text{aire du rectangle délimité par la courbe bleue} \\ \text{soit} & -D_{max} [\sin \pi - \sin 0] = \pi * D_c \\ & \quad \quad \quad \{ \text{de } 0 \text{ à } \pi \} \\ \text{soit} & -D_{max} [-1 - 1] = \pi * D_c \\ \text{soit} & 2 * D_{max} = \pi * D_c \\ \text{soit} & D_{max} = (\pi/2) * D_c \end{aligned}$$

Au cours de cette première étape nous avons donc démontré que parce que nous avons un mode respiratoire sinusoïdal, un détendeur doit pouvoir fournir **un débit instantané au moins égal à $\pi/2$ fois le débit moyen.**

2) Différence de régime de débit.

Si on ne raisonne plus sur un espace de temps de π (demi-période = phase inspiratoire), mais sur un cycle complet de respiration (inspiration + expiration) soit un intervalle de temps de $2*\pi$, il apparaît que le détendeur ne nous fournisse de l'air que pendant la moitié du cycle respiratoire complet (en expiration le détendeur ne nous fournit pas d'air).



Par suite, sur une durée de temps donnée, le détendeur ne fournit de l'air que pendant la moitié du temps. Puisque la consommation moyenne d'air reste la même (sur une minute par exemple), durant les périodes où il fonctionne, le détendeur doit fournir deux fois plus d'air que ne l'indique le débit moyen.

L'expression calculé à l'étape précédente ($D_{max} = (\pi/2)*D_c$) devient donc:

$$D_{max} = \pi * D_c$$

Par suite, un détendeur doit pouvoir fournir **un débit instantané au moins égal à π fois le débit moyen.**

3) Limite du modèle.

Le cycle respiratoire du plongeur moyen est en fait le plus souvent triphasique: inspiration + apnée + expiration, par suite, le temps de fonctionnement du détendeur sur une minute est plus court, et par conséquent D_{max} réel est supérieur au D_{max} théorique précédemment défini.

La sinusoïde parfaite que nous employons pour décrire le cycle respiratoire est en réalité un peu déformée, et le D_{max} réel est donc en fait un peu supérieur à notre D_{max} théorique.

Si on considère qu'une respiration ample est généralement plus longue qu'une respiration normale, on peut considérer que sur une minute (20 respirations profondes ou 10 respirations amples), la variation d'amplitude de débit (variation de D_{max}) est compensée par la variation d'amplitude de temps. Ainsi, on peut considérer que ce modèle fonctionne relativement bien quelles que soient la fréquence et l'intensité respiratoire.

Le modèle que nous venons de définir ne s'applique que pour mettre en correspondance le débit d'un détendeur et le "débit respiratoire" d'un plongeur. Une extrapolation de ce résultat à des problèmes physiologique ou métabolique serait erronée, car les paramètres utilisés ne seraient pas alors adéquats.