

Comprendre le débit massique constant (CMF)

Raymaekers Paul
Version 14/10/2010 V0.2
Graphiques: Curt Bowen
Traduction : Thibault Rauby



Résumé : Ce texte explique les principes de débit massique constant, comment il peut être obtenu, pourquoi nous l'utilisons dans la conception des recycleurs.

Avertissement : Ce texte est une explication simplifiée du principe du CMF, pour le rendre compréhensible, en lien avec son utilisation dans les recycleurs. L'auteur de cet article n'assume aucune responsabilité en cas d'utilisation de l'information de cet article pour la construction ou la modification de recycleurs.

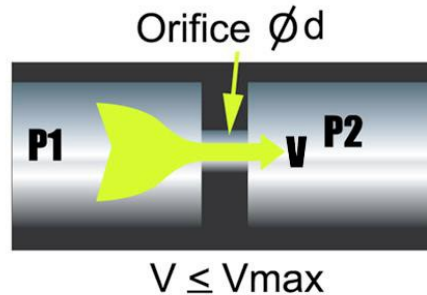
Mots clés : CMF, orifice, buse, flux sonique, flux massique

Sommaire

1. Volume constant.....	2
2. Volume Massique Constant.....	3
3. Le détendeur de plongée "classique".....	4
4. le "détendeur à pression absolue".....	6
- Anglicismes et Acronymes -.....	8

1. Volume constant

Lorsque nous examinons le principe du débit massique constant (CMF), une loi physique nous intéresse tout particulièrement : quand un gaz est poussé à travers un petit trou, aussi appelé orifice ou buse, la vitesse de ce gaz est limitée. Elle ne pourra jamais être supérieure à une vitesse donnée : la vitesse du son (V_{max}). Cette vitesse maximale du gaz est dite sonique (1).



Ainsi, lorsque les conditions pour atteindre la vitesse maximale ou sonique sont atteintes, peu importe ce que l'on fait : augmenter la pression à l'entrée de l'orifice, réduire, voir même faire le vide du côté sortie de l'orifice, la vitesse de déplacement du gaz n'augmentera plus, mais restera constante à V_{max} .

Cela signifie aussi que puisque la vitesse du gaz est limitée et le diamètre de l'orifice fixe, alors le débit de gaz (L/min) au travers de cet orifice est limité. Ainsi une fois la vitesse sonique atteinte, le débit ne peut plus augmenter : nous avons un « débit volumique constant » (car débit = vitesse du gaz x surface de l'ouverture de l'orifice).

$$\text{Débit Volumique} = \frac{r d^2}{4} * V = \text{surface de l'orifice} * \text{vitesse du gaz}$$

Mais quand atteignons-nous la vitesse maximale, ou sonique ?

On peut appliquer une règle simple : la vitesse sonique est atteinte quand la pression en amont $P1$ est au moins deux fois celle en aval $P2$ soit :

$$P1 \geq 2 * P2 \quad (2)$$

Exemples :

$P1 = 10 \text{ bar}$; $P2 = 1 \text{ bar}$ alors $P1$ est bien supérieur à 2 fois $P2$ soit 2 bar : la vitesse est sonique

$P1 = 10 \text{ bar}$; $P2 = 7 \text{ bar}$ alors $P1$ est inférieur à deux fois $P2$ soit 14 bar : la vitesse n'est pas sonique

Cela veut dire que pour un diamètre d'orifice donné, tant que $P1 \geq 2xP2$, alors le débit volumique est constant.

2. Volume Massique Constant

Maintenant attention : j'ai écrit le "débit volumique" est constant au travers d'un orifice une fois la vitesse sonique atteinte. Notons que le "débit volumique" n'est pas la même chose que la quantité de gaz, le nombre de molécules de ce gaz ou le nombre de gramme de ce gaz. Or lorsque l'on plonge avec un recycleur, ce qui nous intéresse, ce n'est pas quel volume d'O₂ (L/minute) passe par l'orifice, mais combien de molécules d'oxygène (ou combien de gramme/min) entrent dans notre boucle.

Quand on connaît le volume maximal de gaz qui peut passer par un orifice et que l'on veut connaître la MASSE, ou le nombre de grammes par minute, il faut ajouter un autre facteur : la DENSITÉ du gaz (gr/litre) : ρ .

Ainsi, quand on multiplie le débit volumique (L/min) par la densité (gr/L) on obtient des **gr/min** et donc nous avons :

Bien que la vitesse et donc le débit (L/min) soit toujours limités au volume maximal à la vitesse sonique, si l'on veut obtenir davantage de molécules (plus de gr/min) passant par l'orifice... il suffit d'augmenter la densité du gaz. Plus le gaz est dense plus il y a de molécules/litre. Donc avec un même débit volumique, mais avec un gaz plus 'dense', le nombre de molécules/min ou gr/min (= débit MASSIQUE) va augmenter.

(Toujours en pensant recycleur, mais nous y reviendrons plus tard, lorsque nous parlons d'un débit d'oxygène de 0,8 litre/min, nous entendons en fait 0,8 litre/minute mesuré à 1 bar, à la surface, ce qui nous donne environ 1,14 gramme/minute, puisque la densité de l'oxygène à 1 bar est d'environ 1,43 gramme/litre).

Maintenant, comment pouvons-nous augmenter la densité du gaz?
Simplement en le comprimant ou en augmentant la pression du gaz :

$$\begin{aligned} \text{Débit massique} &= \text{débit volumique} * \text{densité} \\ &= \text{surface orifice} * V * e \end{aligned}$$

$$P1 \uparrow \rightarrow \text{densité} \uparrow (e \uparrow)$$

$$\text{quand} \left\{ \begin{array}{l} V = V_{\text{max}} \\ \text{orifice} = \text{fixe} \end{array} \right\}$$

$$\text{alors} \{ \text{débit massique} \uparrow \text{ quand } e \uparrow \}$$

$$\text{alors} \{ \text{débit massique} \uparrow \text{ quand } P1 \uparrow \}$$

La densité du gaz peut être augmentée en comprimant le gaz (= en augmentant P1). Donc, lorsque P1 augmente, la densité du gaz (ρ) augmente et le débit massique (densité x débit volumique) va augmenter.

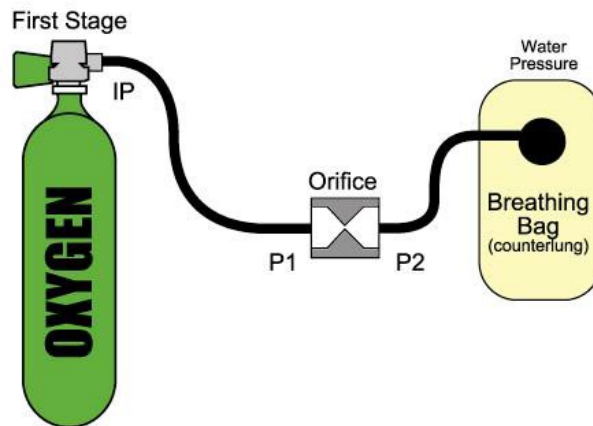
Exemple:

Lorsque nous sommes dans les conditions d'écoulement sonique (V_{max}), donc à un Débit Volumique Constant, mais que nous doublons la pression à l'entrée de l'orifice, de sorte que nous doublons la densité du gaz, nous allons doubler le débit massique à travers l'orifice.

... OK assez de théorie, passons à des exemples concrets.

3. Le détendeur de plongée "classique"

Pour le test nous prendrons un premier étage de détendeur normal et le connecterons à une bouteille d'oxygène.



La pression à la sortie du premier étage, la moyenne pression (MP), est fixée à 10 bar de pression absolue. Sur cette sortie nous fixons un orifice d'un diamètre fixe et la sortie de l'orifice débite dans le sac respiratoire de notre recycleur.

Les détendeurs de plongée sous-marine "normaux" sont faits de façon à sentir la pression ambiante de l'eau et d'y ajuster la MP. De ce fait la différence entre la MP et la pression ambiante de l'eau reste constante : ceci est nécessaire pour que le second étage normalement fixé à ce premier étage fonctionne correctement durant la plongée.

Cela signifie qu'un détendeur normal augmentera toujours la MP selon la pression ambiante de l'eau qu'il ressent.

Exemple :

À la surface (1 bar absolu) la MP de notre détendeur est de 10 bar absolus, de sorte que la différence de pression soit de 9 bar.

Lorsque nous allons plonger, la pression hydrostatique va augmenter d'1 bar tous les 10 mètres, donc la MP du détendeur augmentera également de 1 bar tous les 10 mètres de profondeur. Ainsi, avec une MP à la surface à 10 bar absolus (9+1), lors d'une plongée à 20 mètres de profondeur la MP va augmenter de 2 bar soit 12 bar absolus (9+1+2). À 50 m jusqu'à 15 bar absolus (9+1+5) ... et ainsi de suite.

Maintenant revenons à notre ensemble détendeur/orifice/sac respiratoire :

Supposons que nous choisissons le diamètre de l'orifice de façon à ce qu'à la surface, avec une MP, ou P1, réglée à 10 bar, nous ayons un débit de 1 L/min (mesuré à la surface ! Soit +/- 1,43 gramme/min).

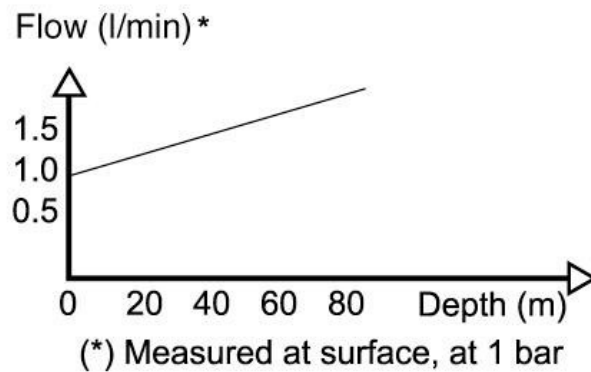
P1 est de 10 bar, la pression de sortie (P2) est de 1 bar (à la surface), puisque P1 est plus de deux fois P2, nous avons une vitesse sonique, donc nous atteignons le débit volumique maximum.

Maintenant, allons plonger avec nos recycleurs et allons à 20 mètres de profondeur. La pression absolue dans l'eau a atteint 3 bar, alors P2 a augmenté de 2 bar, de 1 à 3, de sorte que le détendeur a également ajusté (augmenté) la MP de 2 bar. Et donc maintenant P1 = 12 bar.

Nous avons encore un débit maximum (puisque P1 est encore supérieur à deux fois P2 : $12 > 2 \times 3$), de sorte que le débit volumique n'a pas changé.

Mais ce qui s'est passé : comme P1 a augmenté de 10 à 12 bar, le gaz (oxygène) à l'entrée a été comprimé de 20% (de 10 à 12 bar), et devient ainsi 20% plus dense, de sorte que notre volume MASSIQUE (débit volumique multiplié par la densité du gaz) a augmenté de 20% ! Donc maintenant +/- 1,72 gramme/min débitent au travers de notre orifice ! Si nous pouvions maintenant mesurer le débit à la surface, nous pourrions mesurer 1,2 L/min !

Maintenant, allons plonger à 50m : $P_1 = 15$ bar, $P_2 = 6$ bar. Nous avons toujours un débit maximal, sonique ($15 > 2 \times 6$), mais la densité a augmenté de 50% ainsi que le flux massique. Nous avons donc maintenant +/- 2,14 gramme/L (l'équivalent d'un flux de 1,5 L/min en surface).



On remarque que plus on va profond, en utilisant notre système avec un détendeur normal relié à notre bouteille d'O₂, plus le débit massique d'O₂ (ainsi que le débit volumique mesuré à 1bar) augmente : nous n'avons pas un flux massique d'oxygène constant.
Est-ce ce que l'on veut ?...

4. le "détendeur à pression absolue"

Allons jeter un coup d'œil à un système différent : nous modifions notre détendeur standard, de sorte qu'il ne ressente plus la pression de l'eau et donc qu'il n'augmente pas la MP lorsque nous descendons sous l'eau. (cela peut être fait par l'ajout d'un bouchon spécial sur le détendeur, de sorte que la pression de l'eau ne soit plus en contact avec la membrane de la chambre sèche du premier étage)

A la surface la MP est fixée à 10 bar absolus et en utilisant le même orifice, à la surface, nous avons le même flux volumique de 1 L/min. (+/- 1,43 gr/min).

De nouveau, nous plongeons à 20m. La pression absolue dans l'eau est maintenant de 3 bar. Comme le détendeur ne sent pas la pression de l'eau et donc n'ajuste pas la MP, ou P1, celle-ci reste toujours de 10 bar absolus.

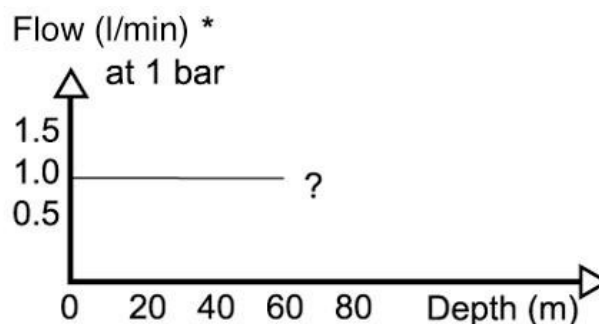
Avons-nous encore du débit maximum ? Oui, puisque P1 est encore plus de deux fois P2 ($10 > 2 \times 3$): alors le débit volumique n'a pas changé.

Qu'est-il arrivé à l'écoulement massique ? Puisque P1 n'a pas changé lors de la descente de la surface à 20m, la densité de l'écoulement du gaz à travers l'orifice n'a pas changé et donc le débit massique à travers l'orifice n'a pas changé : nous avons toujours nos 1,43 gr/min, (ou 1 L/min si mesuré à surface).

Nous avons un débit massique CONSTANT.

Nous poursuivons notre descente à 40m, la pression absolue dans l'eau est maintenant de 5 bar. P1 est toujours de 10 bar, puisque le détendeur est «aveugle». Nous avons toujours un débit maximum, puisque P1 est égal à deux fois P2 ($10 \geq 2 \times 5$).

La densité du gaz à l'entrée de l'orifice n'a pas changé (P1 toujours constante à 10 bar) et donc le



débit massique n'a pas changé, nous avons encore un débit massique constant.

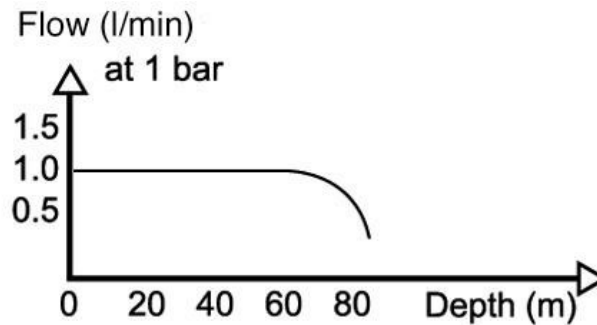
Et c'est ce que nous voulons quand nous avons l'oxygène qui débite dans un recycleur. On injecte une quantité d'oxygène dans le sac respiratoire, de sorte qu'elle compense seulement la consommation d'oxygène de notre corps lorsque nous sommes au repos, ou se déplaçant très lentement (la consommation métabolique basale).

Et puisque notre consommation métabolique ne change pas avec la profondeur, nous ne voulons pas que le débit massique d'oxygène dans le sac respiratoire ne change. Lors de la descente ou de la remontée, nous voulons qu'il reste constant.

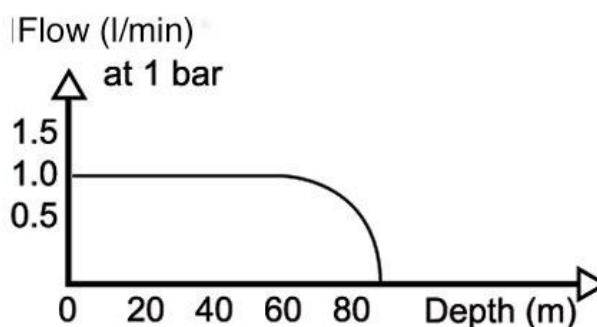
La quantité supplémentaire d'oxygène dont notre corps a besoin lorsque l'on fait plus d'effort peut alors être ajoutée manuellement dans un mCCR, ou par voie électronique dans un hCCR.

Si le débit massique d'oxygène augmentait quand on descend, il deviendrait rapidement supérieur à notre consommation métabolique. Et donc la PPO2 du gaz augmenterait, pour devenir hyperoxique. Alors nous aurions besoin de rincer tout le temps avec le diluant afin de maintenir un mélange respiratoire viable.

Maintenant, qu'arrive-t-il quand nous continuons à descendre avec notre détendeur à pression absolue : nous descendons à 60 mètres. La pression dans l'eau est de 7 bar, la MP est toujours de 10 bar. Maintenant P1 n'est plus deux fois supérieur à P2 ($10 < 2 \times 7$) : la condition pour avoir un écoulement sonique et donc un débit maximum, n'est plus remplie ! La vitesse du gaz à travers l'orifice est devenue inférieure au max, de sorte que le débit volumique a chuté. Et puisque la densité (déterminée par P1) n'a pas changé, notre flux massique a chuté ! Nous n'avons plus de Débit Massique Constant.



Et alors que nous allons de plus en plus profond, 70 m, 80 m... la pression de l'eau P2 va augmenter et se rapprocher de P1 (la MP), la vitesse du gaz continuant de chuter de même que le débit massique, jusqu'à atteindre 90 m. À ce moment la pression dans l'eau est égale à la moyenne pression (tous deux à 10 bar), il n'y a plus de différence de pression de part et d'autre de l'orifice, donc pas de flux de gaz à travers celui-ci, le débit massique est tombé à zéro.



Maintenant qu'est ce que cela veut dire quand on plonge avec un recycleur ayant un détendeur à pression absolue (afin d'utiliser un orifice qui nous délivre un débit massique constant d'oxygène sur la plage de profondeurs explorée). Cela signifie que la profondeur maximale d'opération du recycleur est limitée par la profondeur à laquelle la MP est égale à la pression dans l'eau. (Car à cette profondeur ou plus profond, il devient impossible d'ajouter de l'oxygène au système, que ce soit par l'orifice ou par les injections manuelles : la pression d'entrée de la MAV est également la MP).

Pour le **rEvo** dans les modes mCCR ou hCCR, nous avons limité la profondeur maximale de fonctionnement 20 m au dessus de la profondeur plancher où la MP est égale à la pression de l'eau. Comme le montre le graphique ci-dessus, à cette profondeur il y a toujours un écoulement massique raisonnable à travers l'orifice et suffisamment de pression différentielle au travers de la MAV pour injecter l'oxygène d'appoint.

Dans la configuration normale du **rEvo**, la MP est fixée à +/- 11 bar absolus (10 bar de surpression) et le débit à la surface est de +/- 0,8 L/min. A une profondeur de 100 m, la pression d'eau est égale à la MP. La profondeur maximale d'utilisation recommandée pour le **rEvo** en mode mCCR ou hCCR est de 80 m.

Baisser la MP, afin de diminuer le débit massique pour l'ajuster à un métabolisme bas, diminuera en même temps la profondeur maximale d'utilisation du recycleur. Chaque bar de diminution de la MP fait remonter la profondeur maximale d'utilisation de 10 m.

Dans le cas où nous ne voulons plus avoir de limitation de profondeur, le premier étage doit être un détendeur normal, compensé à la pression ambiante. Mais dans ce cas un orifice fixe ne peut plus être utilisé. S'il y a un orifice dans le système et que nous voulons utiliser un détendeur normal afin d'aller plus profond, l'orifice doit être obstrué.

Ce n'est pas pratique pour la plongée en mCCR, mais possible pour la version hybride du **rEvo** : en supprimant le bouchon du premier étage afin d'en faire un détendeur "normal" ET en obstruant l'orifice avec un bouchon. Le **rEvo** hCCR est alors transformé en un «pur» eCCR.

Dans ce cas, la profondeur maximale d'utilisation recommandée est de 100m.

(1) notons qu'il s'agit d'une approximation

(2) le facteur 2 est également une approximation : cela dépend du type de gaz et peut varier de 1,7 à 2,0

- Anglicismes et Acronymes -

CMF	Constant Mass Flow	Débit massique constant
CCR	Closed Circuit Rebreather	Recycleur à circuit fermé
mCCR	manual CCR	Injection d'O2 par orifice + manuelle
eCCR	electronic CCR	Injection d'O2 électronique
hCCR	hybride CCR	Injection d'O2 par orifice et électronique
MAV	Manual Addition Valve	Injecteur manuel
SCR	Semi-Closed Rebreather	Recycleur semi-fermé