

2003

Mémento sur l'utilisation des pompes et des débitmètres

Yves Cloutier
IRSST

Louis Lazure
IRSST

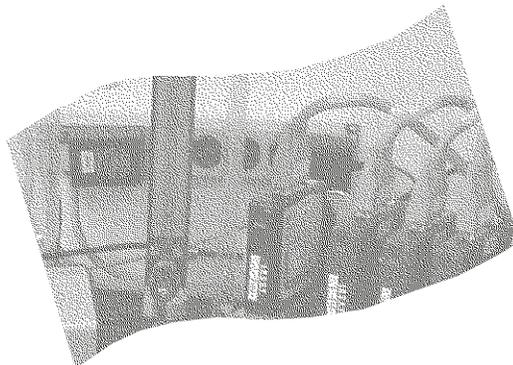
Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Cloutier, Y. et Lazure, L. (2003). *Mémento sur l'utilisation des pompes et des débitmètres* (Rapport n° R-352). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

Mémento sur l'utilisation des pompes et des débitmètres



ÉTUDES ET RECHERCHES

Yves Cloutier
Louis Lazure

R-352

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-817-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
décembre 2003.

Mémento sur l'utilisation des pompes et des débitmètres

Yves Cloutier et Louis Lazure
Hygiène du travail, IRSST

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

Table des matières

Avant-propos	1
Introduction	2
Conformité aux normes	3
Liste des abréviations et des symboles.....	3
Masse volumique d'un gaz.....	4
Débit massique et débit volumique	4
Notion de volumes équivalents	5
Notion de débits équivalents	5
Paramètres environnementaux importants	6
Variation de la température en fonction de l'élévation (altitude ou profondeur)	6
Variation de la pression avec l'élévation (altitude ou profondeur).....	7
Variation de la masse volumique en fonction de l'élévation (altitude ou profondeur)	8
Conditions normales et standard	9
Débitmètres et leurs équations de correction	9
Débitmètre à fil chaud.....	10
Débitmètre à film de savon ou burette	10
Débitmètre à orifice	11
Rotamètres	12
Facteurs de correction pour le rotamètre.....	14
Pompes et leurs équations	16
Pompes	16
Pompe à débit volumique constant	17
Pompe à débit massique constant	18
Pompe mixte	18
Étalonnage et ajustement du débit des pompes.....	20
Évaluation des erreurs critiques	22
Conclusion	24
Bibliographie.....	24
Annexe A – Description des approches dose et concentration	26
Annexe B – Calcul des erreurs.....	36

Annexe C - Cas particulier (Milieu à 35°C).....	38
Annexe D - Cas particulier (Milieu à 0°C)	40
Annexe E - Cas particuliers (mines)	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ajustement du débit à 1,7L/min et débitmètre étalonné à TPN	38
Tableau 2 : Ajustement du débit à 1,7 L/min et débitmètre étalonné dans des conditions standards	38
Tableau 3 : Ajustement à 1,64 L/min avec un débitmètre étalonné à TPN	39
Tableau 4 : Ajustement à 1,64 L/min avec un débitmètre étalonné dans des conditions standards	39
Tableau 5 : Ajustement du débit à 1,7L/min et débitmètre étalonné à TPN	40
Tableau 6 : Ajustement du débit à 1,7 L/min et débitmètre étalonné dans des conditions standards	40
Tableau 7 : Ajustement à 1,86 L/min avec un débitmètre étalonné à TPN	41
Tableau 8 : Ajustement à 1,86 L/min avec un débitmètre étalonné dans des conditions standards	41
Tableau 9 : Ajustement du débit à 1,7L/min et débitmètre étalonné à TPN	43
Tableau 10 : Ajustement du débit à 1,7 L/min et débitmètre étalonné dans des conditions standards	44
Tableau 11 : Ajustement à 2,1 L/min avec un débitmètre étalonné à TPN	44
Tableau 12 : Ajustement à 2,1 L/min avec un débitmètre étalonné dans des conditions standards	45
Tableau 13 : Ajustement du débit à 1,7L/min et débitmètre étalonné à TPN	46
Tableau 14 : Ajustement du débit à 1,7 L/min et débitmètre étalonné dans des conditions standards	46
Tableau 15 : Étalonnage par simulation de la pression en surface et ajustement à 1,64 L/min	47
Tableau 16 : Étalonnage par simulation de pression et ajustement à 1,7 L/min	47

Avant-propos

Le présent document se veut un recueil où sont résumées et regroupées différentes informations essentielles à la détermination et à la mesure des débits d'où son nom de mémento. Il a pour but premier de documenter les pratiques et les méthodes de l'IRSST dans ce domaine. Il constitue à notre avis un outil de référence et de travail où sont expliqués, avec plus de détails, les origines et les pourquoi de certaines formules et recommandations du guide d'échantillonnage des contaminants de l'air.

Il contient une vaste quantité d'informations toutes reliées entre elles par une thématique commune de la mesure des débits. Il a pour but également, en expliquant aux utilisateurs l'effet de conditions ambiantes sur certains équipements, de leur permettre une meilleure compréhension et utilisation de ces derniers. Différentes annexes décrivent plus spécifiquement à titre d'exemples, comment des conditions environnementales extrêmes rencontrées dans certains milieux, comme celui des mines et des buanderies, peuvent affecter les débits mesurés et aspirés par ces équipements.

Ce document, dont le rôle est de documenter et d'agir en tant que mémoire, doit faire l'objet d'une mise à jour constante de façon à ce qu'il reflète et explique le plus possible les pratiques et les connaissances utilisées par l'IRSST dans le domaine de la mesure des débits.

Introduction

Un des buts d'une démarche en hygiène industrielle est de déterminer les concentrations de contaminants présents dans un milieu. Une fois déterminées, l'intervenant peut ensuite comparer ces concentrations aux normes existantes par exemple celles prévues au RSST (Règlement sur la Santé et la Sécurité en milieu de Travail). Ces normes représentent des valeurs seuils à être respectées en tout temps.

Pour évaluer les concentrations présentes dans un milieu, il est d'usage de prélever sur des filtres ou des tubes les produits présents dans l'air à l'aide d'un système d'aspiration tel qu'une pompe. Les concentrations des contaminants sont ensuite calculées à partir des masses analysées sur les échantillons et des volumes d'échantillonnage. Les volumes échantillonnés sont calculés à partir des durées et des débits mesurés lors du prélèvement. La détermination des volumes échantillonnés est donc essentielle aux calculs exacts des concentrations ambiantes d'un contaminant dans l'environnement de travail. Elle implique, la conversion et la mesure de volumes ou des débits, mesurés par divers instruments dans certaines conditions d'étalonnage, en volume ou débits équivalents dans d'autres conditions. Ce document regroupe et documente l'essentiel des connaissances de l'IRSST dans ce domaine.

Lorsqu'un hygiéniste désire connaître les débits ou volume réels échantillonnés lors d'un prélèvement, il doit en considérant les principes de fonctionnement des instruments qu'il utilise, prévoir la façon dont les conditions ambiantes et d'étalonnage affecteront ses mesures. Il doit aussi déterminer la façon dont ces résultats devront être transformés pour qu'ils soient conformes à la législation en vigueur. Il pourra retrouver les informations nécessaires à son travail dans le guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail. Toutefois les informations de ce guide représentent une synthèse de notions plus complexes que ce document veut expliquer et documenter.

Dans quelques cas, on peut utiliser des équations pour décrire le comportement des instruments utilisés lors des prélèvements et connaître la façon dont les conditions ambiantes affecteront ces derniers. Il est ainsi possible de calculer les débits ou volumes réels ou équivalents à partir des débits affichés par ces instruments. Ce document démontre et explique certaines de ces équations qui nous sont connues.

Il présente, définit et clarifie en premier toute une série d'informations, de termes et d'expressions propres au domaine de la mesure des débits et de la conformité aux normes utilisés dans le document. Par la suite on retrouve, distribuées respectivement dans trois sections distinctes, des informations théoriques sur le comportement et sur les effets des conditions ambiantes sur les débitmètres, les pompes et finalement les étalonnages. L'étalonnage consistant en l'utilisation d'un débitmètre pour l'ajustement du débit d'une pompe. Finalement, une mise en application de cette théorie est effectuée, dans une perspective de l'évaluation des erreurs et selon différents protocoles, pour des étalonnages et échantillonnages effectués dans un milieu à 0°C, à 35°C et dans une mine à 2134m (7000pi) de profondeur.

Conformité aux normes

Nous devons mettre en garde le lecteur contre l'utilisation trop rapide d'équations. Par exemple, selon ce que représentent les valeurs d'exposition ou normes i.e. des doses ou des concentrations permises, les équations à utiliser lors du calcul des concentrations en ce qui a trait aux normes différeront. Ainsi, si on considère qu'une norme représente une concentration devant limiter la quantité de produit ou dose, pouvant être inspirée par un individu moyen sur une période de 8 heures, est une valeur invariable selon les conditions ambiantes alors les volumes réels déterminés lors de l'échantillonnage devront être ceux utilisés lors du calcul des concentrations. Par contre, si on considère qu'une norme représente une concentration limite de contaminant pouvant être présente dans un environnement, les volumes utilisés lors du calcul des concentrations seront ceux rapportés dans les conditions de référence des normes. On réfère dans le présent document à la première approche comme celle des doses permises, parce qu'elle limite la quantité de produit pouvant être inhalée par un individu sur une certaine période de temps à une quantité fixe et invariable en fonction des conditions ambiantes. La deuxième dite de concentration permise ne limite pas la quantité de produit pouvant être inhalée par un individu. Elle permet l'exposition d'individus à des quantités de produit variables selon les conditions ambiantes. Une discussion de ces deux approches fait l'objet de l'annexe A du présent document.

La conformité aux normes dans la législation du Québec est vérifiée en utilisant les volumes rapportés dans les conditions normales de température et de pression (1). Cette approche est celle dite des concentrations permises. Les organismes américains de NIOSH et de OSHA utilisent une approche différente où leurs valeurs d'exposition, « TLVs (Threshold Limit Value) » et PELs (Personal Exposure Limits), correspondent à des doses permises (2) (3). Les TLVs et PELs américains correspondent à ce que nous appelons des valeurs d'exposition admissibles (VEA) tandis que leurs TWAs (Time Weight Averages) sont l'équivalent de nos valeurs d'exposition moyenne pondérées (VEMP).

Liste des abréviations et des symboles

Les abréviations et symboles utilisés dans les sections suivantes sont les suivants :

C_p : chaleur spécifique à pression constante
debm : indiqué par le débitmètre
éch : conditions d'échantillonnages dites aussi actuelles ou réelles
éta : conditions d'étalonnage
M : masse moléculaire / molaire
n : nombre de molécules / moles
n : utilisé en indice indique les conditions normales
P : pression
P_{debm} : pression d'étalonnage du débitmètre
P_n : pression normale
Q : débit
Q_m : débit massique
Q_v : débit volumique

R : constante des gaz parfaits
 T : température absolue
 T_n : température normale
 T_{debm} : température d'étalonnage du débitmètre
 τ : taux de transfert de chaleur
 ΔT : variation de température
 Δt : durée
 ρ : masse volumique

Masse volumique d'un gaz

La masse volumique représente la masse par unité de volume propre à une substance. Dans le cas d'un gaz, la masse volumique peut être exprimée à l'aide de la relation suivante :

$$\rho = n M/V$$

On peut modifier cette relation à l'aide de la relation des gaz parfaits :

$$\rho = (PV/RT) M/V \quad \text{car} \quad n = PV/RT$$

$$\rho = PM/RT \quad (3)$$

Débit massique et débit volumique

Le débit massique (Q_m) comme l'indique ses unités représente une quantité de matière circulant par unité de temps par exemple g/sec. Le débit volumique (Q_v) de son côté correspond à un volume de matière circulant par unité de temps (cm³/sec). Les deux sont reliés par la masse volumique (ρ) du milieu:

$$Q_m = \rho Q_v$$

D'après cette relation, un débit volumique constant n'implique pas nécessairement un débit massique constant et inversement. La masse volumique, qui varie avec la température et la pression, peut faire varier le débit massique d'une pompe à débit volumique constant comme cela se produit si on l'utilise à différentes altitudes. Inversement si une pompe maintient un débit massique constant et qu'on l'utilise à différentes altitudes le débit volumique variera.

Ces considérations d'ordre technique sont importantes. Par exemple, l'efficacité et le diamètre de coupure d'un cyclone de 10 mm dépendent du débit volumique à travers celui-ci et non de son débit massique. Certaines des premières pompes à débit constant avaient des senseurs intégrés utilisant le débit massique pour maintenir leur débit constant. L'utilisation de ces pompes à des altitudes différentes de celles à laquelle elles étaient étalonnées, pouvait donc entraîner des variations importantes du débit volumique (13). L'utilisation de telles pompes avec un cyclone pouvait compromettre un échantillonnage en affectant la performance du cyclone.

Notion de volumes équivalents

Les équations utilisées pour calculer des volumes équivalents sont basées sur un principe simple qui consiste à déterminer le volume qu'occuperait le même nombre de molécules dans des conditions différentes de température et de pression. Celui-ci est établi à partir de la relation des gaz parfaits : $PV = nRT$. Il est important lorsqu'on parle d'équivalents entre différentes conditions de s'assurer que le nombre de molécules soit constant.

Ainsi le volume équivalent ($V_{éch}$) à un volume V_n mesuré dans les conditions normales (P_n, T_n) peut être calculé pour des conditions d'échantillonnage ($P_{éch}, T_{éch}$) de la façon suivante :

$$\begin{aligned} P_{éch} V_{éch} &= n R T_{éch} & P_n V_n &= n R T_n \\ P_{éch} V_{éch} / T_{éch} &= n R & P_n V_n / T_n &= n R \end{aligned}$$

Ce qui implique :

$$(P_{éch} / T_{éch}) V_{éch} = P_n V_n / T_n$$

Notion de débits équivalents

Si on veut connaître la concentration présente dans un milieu au moment d'un échantillonnage, il nous faut déterminer le plus précisément possible le volume prélevé dans ces conditions. Or, les pompes sont souvent utilisées dans des conditions de température et de pression différentes de celles dans lesquelles elles ont été étalonnées. De plus, le débit que l'on connaît d'une pompe est le débit mesuré, lors d'un échantillonnage, à l'aide d'un débitmètre étalonné dans des conditions différentes. Il faut donc pouvoir établir le débit réel à partir du débit affiché par un débitmètre et être familier avec la notion de débits équivalents.

Le débit équivalent (Q_n) dans des conditions normales à un certain débit ($Q_{éch}$) peut être calculé en modifiant la relation précédente pour les volumes équivalents de la façon suivante :

$$\begin{aligned} P_{éch} V_{éch} / T_{éch} &= P_n V_n / T_n \\ P_{éch} Q_{éch}(\Delta t) / T_{éch} &= P_n Q_n(\Delta t) / T_n \\ P_n Q_n / T_n &= P_{éch} Q_{éch} / T_{éch} \end{aligned}$$

Une pompe à débit volumique constant qu'on aurait étalonné dans des conditions normales échantillonnerait en haute altitude un même débit volumique. Si on mesurait alors le débit d'une telle pompe avec un débitmètre à fil chaud étalonné dans des conditions normales, ce dernier indiquerait un débit différent de celui que la pompe échantillonnait dans des conditions normales. Ceci est attribuable à la technique de mesure qui est affectée par le débit massique au niveau du fil chaud. À haute altitude, la densité de l'air plus faible fait en sorte que le nombre de moles déplacées par la pompe sera plus faible. Ceci occasionnera ainsi un taux de transfert de chaleur

plus faible au niveau du fil chaud de l'appareil qui sera interprété comme un débit inférieur. Si on considère que le taux de transfert de chaleur est le même, on peut écrire la relation suivante :

$$\begin{aligned} \tau_{\text{TPN}} &= \tau_{\text{éch}} \\ n_n M C_p \Delta T &= n_{\text{éch}} M C_p \Delta T \\ P_n Q_n / T_n &= P_{\text{éch}} Q_{\text{éch}} / T_{\text{éch}} \text{ car } n_n = n_{\text{éch}} \end{aligned}$$

où M : Masse moléculaire
 τ : Taux de transfert de chaleur
 C_p : Chaleur spécifique à pression constante
 T : Variation de température

Un débitmètre massique affiche donc directement le débit équivalent au débit circulant dans son élément de mesure. Le débitmètre affiché est le débit équivalent dans les conditions d'étalonnage du débitmètre.

Paramètres environnementaux importants

Variation de la température en fonction de l'élévation (altitude ou profondeur)

La température de l'air varie en fonction de l'élévation à laquelle on se trouve. Cette variation de température dépend de plusieurs facteurs tel que l'ensoleillement, la topographie, l'humidité etc. Une partie de cette variation s'explique par le phénomène de compression adiabatique, i.e. sans échange de chaleur, que subit l'air sous le poids de la colonne d'air sus-jacente. L'air devient ainsi plus chaud à basse altitude et avec la profondeur (5) à cause de sa pression plus élevée.

L'organisme international «OACI» définit l'air standard comme étant à 15°C au niveau de la mer. Cet air subit une diminution de température de 6,5°C pour chaque km d'élévation jusqu'à la troposphère à 11 000 m, où la température atteint -56,5°C. La température au-dessus de la stratosphère est supposée être constante jusqu'à une altitude de 20 km (4).

On peut exprimer la variation de la température en fonction de l'élévation à l'aide de la formule générale suivante :

$$T_h = T_a - \beta h$$

où T_h : température
 T_a : température au niveau de la mer (15°C)
 β : taux de variation de la température (°C/km)
 h : élévation en km p/r au niveau de la mer

Le symbole h représente l'élévation i.e. l'altitude ou la profondeur p/r au niveau de la mer. Lorsqu'il est positif, il représente l'altitude et lorsqu'il est négatif la profondeur (6). Le facteur β lorsque nous sommes au-dessus du sol et dans l'air est de 6,5°C/km. Ce facteur de 6,5 °C/km est associé à de l'air saturé d'humidité tandis qu'un facteur de 10°C /km devrait être utilisé pour de l'air sec (16).

Pour de l'air sec, **lorsque** nous parlons de profondeur, ce facteur β est de $9,75^\circ\text{C}/\text{km}$. Si l'air est humide, la relation se complique et le facteur β dépendra aussi du taux d'humidité, toutefois l'expression générale de la température restera la même. Dans ce cas, le coefficient β , qui est le facteur de variation de la température correspondant à 1 km d'élévation, peut être calculé à partir de la relation suivante (6) :

$$\beta = 9,804 (1 + W) / (1,006 + 1,84 W)$$

où β : taux de variation de la température pour 1 km d'élévation
 W : taux d'humidité en Kg d'eau/kg d'air

Variation de la pression avec l'élévation (altitude ou profondeur)

Pour une atmosphère isothermale où on néglige l'élévation de la température sous l'effet de la compression adiabatique, la pression peut être calculée à partir de l'altitude à l'aide de la relation suivante (7) :

$$P_h = P_a e^{-gMh/RT}$$

où P_h : pression au niveau h (kPa)
 P_a : pression au niveau de la mer (101,3 kPa)
 M : masse moléculaire
 e : constante néperienne
 h : élévation (km) (positive si altitude et négative si profondeur)
 R : constante universelle des gaz
 T : température absolue ($^\circ\text{K}$)
 g : constante gravitationnelle ($9,8 \text{ m}/\text{sec}^2$)

On peut exprimer cette relation en fonction de la densité. L'expression devient alors (4) :

$$P_h = P_a e^{-gh\rho_a/P_a}$$

où P_h : pression au niveau h (kPa)
 P_a : pression au niveau de la mer (kPa)
 e : constante néperienne
 h : élévation (km)
 ρ_a : densité de l'air au niveau de la mer ($1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$)
 g : constante gravitationnelle ($9,8 \text{ m}/\text{sec}^2$)

Ces équations peuvent se compliquer lorsqu'on considère les variations de température en fonction de l'altitude ou de la profondeur sous l'effet de la compression adiabatique subi par l'air des couches inférieures sous le poids des couches supérieures. Par exemple, l'expression de la pression en fonction de l'élévation deviendra (4):

$$P_h = P_a (1 - \beta h / T_a)^{gM/R\beta}$$

où P_h : pression à l'élévation h (kPa)

P_a :	pression au niveau de la mer (101,3 kPa)
β :	taux de variation de la température en fonction de l'altitude (6,5°K/km)
T_a :	température au niveau de la mer (°K)
g :	constante gravitationnelle (9,8 m/sec ²)
M :	masse moléculaire de l'air (0,02896 kg/mole)
R :	constante des gaz (8,314 J/mole °K)
h :	élévation p/r au niveau de la mer (km)

La même expression peut être utilisée pour le calcul de la pression en fonction de la profondeur. Toutefois le facteur β ne sera pas le même comme mentionné dans la section précédente. Comme pour toutes les expressions précédentes, l'élévation (h) doit être négative si on désire exprimer la profondeur.

Variation de la masse volumique en fonction de l'élévation (altitude ou profondeur)

L'expression de la densité pour un gaz nous permet d'écrire :

$$\rho_h = P_h M / RT_h$$

$$\rho_a = P_a M / RT_a$$

Ce qui implique que :

$$\rho_h / \rho_a = (P_h / P_a)(T_a / T_h)$$

En substituant P_h par $P_a (1 - \beta h / T_a)^{gM/R\beta}$ et T_h par $T_a - \beta h$ dans cette dernière équation, on obtient

$$\rho_h / \rho_a = (P_a (1 - \beta h / T_a)^{gM/R\beta} / P_a)(T_a / T_a - \beta h)$$

$$\rho_h / \rho_a = (1 - \beta h / T_a)^{gM/R\beta} (1 / 1 - \beta h / T_a)$$

$$\rho_h / \rho_a = (1 - \beta h / T_a)^{gM/R\beta - 1}$$

$$\rho_h = \rho_a (1 - \beta h / T_a)^{gM/R\beta - 1}$$

où	ρ_h :	densité au niveau h (kg/m ³)
	β :	taux de variation de la température en fonction de l'altitude (6,5°K/km)
	h :	élévation p/r au niveau de la mer
	T_a :	température au niveau de la mer (°K)
	g :	constante gravitationnelle (9,8 m/sec ²)
	M :	masse moléculaire de l'air (0,02896 kg/mole)
	R :	constante des gaz (8,314 j/mole °K)
	ρ_a :	densité de l'air au niveau de la mer (1,225 kg/m ³)

La relation précédente est également démontrée à la page 29 de la référence (4).

Le phénomène de compression adiabatique sert à définir l'air neutre, stable et instable. Nous expliquons brièvement ces définitions parce qu'elles servent à expliquer la forme des panaches de fumée. L'air est dit neutre lorsque la température de l'air ambiant est très près du gradient adiabatique sec. Ainsi, une parcelle d'air qui serait déplacée dans un tel système vers le haut ou vers le bas, aura la même température que le milieu ambiant et donc la même densité. Elle n'aura donc pas tendance à être accélérée ou décélérée. Par contre, une parcelle d'air qui serait déplacée dans un milieu où les températures ambiantes décroissent plus rapidement que le gradient adiabatique, aura une densité supérieure à l'air ambiant lorsqu'elle sera déplacée vers le haut et une densité inférieure lorsqu'elle sera déplacée vers le bas. Dans un tel système, une force cherchant à accélérer cette parcelle d'air sera toujours présente. On dira alors que l'air est instable. À l'opposé, si la décroissance des températures du milieu ambiant est inférieure à celle du gradient adiabatique, la densité de la particule d'air qui serait déplacée vers le haut sera inférieure à celle du milieu ambiant et supérieure lorsqu'elle sera déplacée vers le bas. Une force cherchant à ramener la parcelle vers son niveau initial sera ainsi présente. Dans ces conditions on dira que l'air est stable.

Conditions normales et standard

Les conditions standard sont définies comme étant 0°C (273°K) et 760 mm de Hg. Lorsque nous parlons de conditions normales, nous parlons de 25°C (298°K) et 760 mm de Hg. Dans l'ensemble la pression normale semble faire l'objet d'une certaine unanimité toutefois la température normale ne fait pas l'objet d'un consensus. On retrouve pour cette valeur 25°C (298°K), 20°C (293°K) tandis que l'air « standard » de l'OACI est à 15°C au niveau de la mer.

Il nous faut donc être prudent lorsque les termes T_n et P_n apparaissent dans une équation et lorsque nous les simplifions. On doit s'assurer que ces variables représentent bien les mêmes valeurs et que, par exemple, les conditions normales d'étalonnage d'un débitmètre soient les mêmes que les conditions normales de température et de pression soient 25°C et 760 mm de Hg pour lesquelles nous calculons les volumes équivalents.

Débitmètres et leurs équations de correction

Un débitmètre est étalonné ou gradué dans des conditions précises de température et de pression. Pour connaître le débit réel circulant dans un débitmètre qu'on utilise dans des conditions différentes de ses conditions d'étalonnage, il est nécessaire de connaître :

- la température et la pression lors de la mesure
- les conditions d'étalonnage du débitmètre
- le principe de fonctionnement du débitmètre

Les sections suivantes décrivent sommairement les principes et les équations à utiliser propres aux débitmètres les plus utilisés en hygiène industrielle. **On pourra y vérifier que le débit affiché par un débitmètre étalonné à TPN ne correspond au débit normalisé dans ces mêmes conditions que lorsque les conditions d'échantillonnage ou d'utilisation sont les mêmes que celles utilisées pour l'étalonnage du débitmètre.**

Débitmètre à fil chaud

Un débitmètre à fil chaud utilise le phénomène de transfert de chaleur entre un corps chaud et un gaz pour quantifier un débit. Lorsqu'un gaz circule au dessus d'une surface chaude, un transfert de chaleur s'opère entre la surface chaude et le gaz. Le taux de transfert de chaleur (τ) dépendra de la masse de produit circulant et des propriétés thermiques du gaz et des surfaces. Il peut être exprimé de la façon suivante (17) :

$$\tau = Q_m C_p (\Delta T)$$

où Q_m : Débit massique
 τ : Taux de transfert de chaleur
 C_p : Chaleur spécifique à pression constante
 ΔT : Variation de température

Ce taux de transfert de chaleur sera proportionnel au débit massique si la chaleur spécifique du gaz et ΔT demeure constant.

Les débitmètres à fil chaud sont conçus de façon à afficher une même réponse pour un même débit massique et ce même si les conditions de température et de pression sont différentes. Pour un gaz donné, l'équation précédente se résumera à celle de la conservation du débit massique pour un même taux de transfert de chaleur et une même chaleur spécifique :

$$\begin{aligned} Q_{m1} &= Q_{m2} \\ n_1 M/t &= n_2 M/t \\ (P_1 V_1 / RT_1) / t &= (P_2 V_2 / RT_2) / t \\ P_1 Q_1 / T_1 &= P_2 Q_2 / T_2 \end{aligned}$$

Cette dernière équation résume le comportement de ces appareils. Si un débitmètre est étalonné dans des conditions P_{debm} et T_{debm} , il affichera des débits (Q_{debm}) équivalents dans ces conditions. Le débit réel obtenu pour des conditions ambiantes T et P peut être calculé avec la relation suivante :

$$Q = (P_{\text{debm}}/P)(T/T_{\text{debm}}) Q_{\text{debm}}$$

où Q : débit dans les conditions T et P
 Q_{debm} : débit équivalent affiché par le débitmètre

Si on désire un débit $Q_{\text{éta}}$ dans certaines conditions d'étalonnage, on doit calculer le débit Q_{debm} équivalent à ce débit dans les conditions de température et de pression d'étalonnage du débitmètre à l'aide de la relation des débits équivalents et ajuster la pompe à ce débit :

$$Q_{\text{éta}} = (P_{\text{debm}}/P_{\text{éta}})(T_{\text{éta}}/T_{\text{debm}}) Q_{\text{debm}}$$

Débitmètre à film de savon ou burette

Un débitmètre à film de savon ou une burette permet de mesurer directement le volume ou le débit. Sa lecture ne nécessite en général aucune correction. Sa précision est de l'ordre de 1% pour

des débits variant de 1ml/min et 1 L/min (17). Toutefois, dans des conditions où l'air est très sec (< 50%) et pour de très faibles débits d'air, le volume d'air circulant au-dessus de la solution dans cet instrument peut être humidifiée (8). Il faut dans ce cas effectuer une correction pour le volume d'eau qui s'est ajouté au volume original lors de la mesure. Ceci est effectué en assumant que le gaz se saturera de vapeur d'eau, et en soustrayant la pression de saturation de vapeur d'eau de la pression ambiante comme le montre la relation suivante :

$$Q_{\text{éta}} = ((P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}) / P_{\text{éta}}) Q_{\text{debm}}$$

On peut trouver facilement ces tables de saturation dans plusieurs documents et volumes de référence (17).

Débitmètre à orifice

On peut utiliser un orifice pour connaître un débit en mesurant la différence de pression à ses bornes. L'équation générale d'un orifice a la forme suivante (9) :

$$Q_v = K (\Delta P / \rho_g)^{0,5}$$

où Q_v : débit volumique
 K : constante de l'orifice venturi
 ΔP : différence de pression à l'orifice
 ρ_g : densité du milieu gazeux

Cette équation démontre la sensibilité de ce genre de débitmètre à la masse volumique de l'air. Tout capteur créant une perte de charge importante affectera la masse volumique de façon significative et par conséquent le débit volumique à travers l'orifice. Un débitmètre à orifice est utilisé avec une courbe d'étalonnage effectuée en général dans l'air et dans certaines conditions de température et de pression. Pour connaître le débit réel dans ces conditions, on utilise cette courbe et la différence de pression aux bornes de l'orifice qui s'exprime ainsi :

$$Q_{\text{debm}} = K (\Delta P / \rho_{\text{debm}})^{0,5}$$

où Q_{debm} : débit lu sur la courbe
 K : constante de l'orifice venturi
 ΔP : différence de pression à l'orifice
 ρ_{debm} : densité de l'air dans les conditions d'étalonnage de l'orifice

Si on utilise un débitmètre à orifice dans des conditions différentes ($P_{\text{éta}}$, $Q_{\text{éta}}$, $T_{\text{éta}}$) des conditions où l'orifice a été étalonné (P_{debm} , Q_{debm} , T_{debm}), on doit utiliser un artifice de calcul pour connaître le débit à partir de la courbe. Si un orifice dans des conditions d'étalonnage mesure une différence de pression ΔP , l'équation générale d'un orifice nous permet d'écrire l'équation suivante :

$$Q_{\text{éta}} = K (\Delta P / \rho_{\text{éta}})^{0,5}$$

où $Q_{\text{éta}}$: débit volumique à l'étalonnage

K : constante de l'orifice venturi
ΔP : différence de pression à l'orifice
ρ_{éta} : densité du milieu gazeux

Si on divise cette dernière équation par la précédente, on obtiendra, pour un même ΔP et en simplifiant les constantes K, la relation suivante :

$$Q_{\text{éta}} = Q_{\text{debm}} \left(\rho_{\text{debm}} / \rho_{\text{éta}} \right)^{0,5}$$

où : **Q** : débit volumique
Q_{debm} : débit lu sur le graphique d'étalonnage de l'orifice à partir de ΔP
ρ_{debm} : masse volumique dans les conditions d'étalonnage de l'orifice
ρ_{éta} : masse volumique au site d'étalonnage

On peut donc lire le débit Q_{debm} sur la courbe d'étalonnage de l'orifice à l'aide de la différence de pression et multiplier ce débit par la racine carrée du rapport des densités pour connaître le débit réel. Le rapport des densités peut être calculé directement à partir des températures et des pressions normale et d'étalonnage.

$$\rho_{\text{debm}} / \rho_{\text{éta}} = P_{\text{debm}} T_{\text{éta}} / P_{\text{éta}} T_{\text{debm}}$$

Si on remplace la densité et Q_{debm} par leur équation respective dans la dernière expression, on obtient :

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{éta}} &= (P_{\text{debm}} T_{\text{éta}} / P_{\text{éta}} T_{\text{debm}})^{0,5} K (\Delta P / \rho_{\text{debm}})^{0,5} \\
 Q_{\text{éta}} &= K \{ \Delta P (P_{\text{debm}} T_{\text{éta}} / P_{\text{éta}} T_{\text{debm}}) / \rho_{\text{debm}} \}^{0,5}
 \end{aligned}$$

$$Q_{\text{éta}} = K (\Delta P_1 / \rho_{\text{debm}})^{0,5} \text{ où } \Delta P_1 = \Delta P (\rho_{\text{debm}} / \rho_{\text{éta}})$$

On peut donc également utiliser la courbe d'étalonnage pour connaître le débit dans nos conditions d'étalonnage en multipliant la différence de pression lue à l'orifice par le rapport des densités et en lisant le débit correspondant à ce débit sur la courbe.

En résumé, il existe deux façons équivalentes de déterminer le débit, dans des conditions autres que celles de l'étalonnage de l'orifice, à partir de la courbe d'étalonnage. Il faut soit multiplier la différence de pression par le facteur $\rho_{\text{debm}} / \rho_{\text{éta}}$ et ensuite lire le débit correspondant sur la courbe ou multiplier le débit trouvé directement à l'aide de la différence de pression et de la courbe par la racine carrée du rapport des masse volumiques.

Rotamètres

Les rotamètres sont de loin les appareils de mesure du débit les plus utilisés. Lorsqu'on assume un cadre d'utilisation normale de température comme pour les cas d'hygiène industrielle, la pression est le paramètre le plus significatif affectant un rotamètre. Les corrections sur la lecture d'un rotamètre sont basées sur les variations de la masse volumique du gaz ou de l'air avec lequel

il est utilisé et occasionnées par les variations significatives de température de pression et d'humidité.

Un rotamètre est en fait un orifice de section annulaire variable dans lequel on a placé une masse ou capsule qui peut se déplacer jusqu'à un point d'équilibre où son poids est équilibré par la poussée du fluide y circulant. Dans le cas d'un orifice traditionnel, l'aire de l'orifice est constante et la perte de charge à ses bornes varie en fonction du débit. Pour un rotamètre, l'inverse se produit, l'aire de l'orifice change en fonction du débit et la perte de pression aux bornes du rotamètre demeure constante (9). La perte de charge occasionnée par un rotamètre est très faible et demeure constante. D'après notre expérience, elle peut être de 1 ou 2 psi.

En pratique, on désire surtout déterminer le débit qui correspond à une position sur l'échelle du rotamètre lorsque celui-ci a été gradué à une altitude et qu'il est utilisé à une autre. Pour atteindre ce but, on peut se servir de l'équation suivante qui décrit le comportement d'un rotamètre (10):

$$Q_v = C_r A_0 (2g V_f (\rho_f - \rho_g) / \rho_g A_f)^{0,5}$$

- où Q_v : débit volumique
 C_r : coefficient de décharge (fonction du nombre de Reynolds et de la viscosité)
 A_0 : aire de l'anneau entre la paroi et la capsule à la position de la capsule
 g : constante gravitationnelle
 V_f : volume de la capsule
 ρ_g : densité du milieu gazeux
 ρ_f : densité de la capsule
 A_f : aire de la capsule

D'après cette équation, le débit d'un rotamètre est proportionnel à la racine carrée de l'inverse de la densité du milieu gazeux. On peut transformer cette relation pour obtenir :

$$Q_v = C (D_t^2 - D_f^2) / D_f \{ \pi g / 2 \}^{0,5} (V_f (\rho_f - \rho_g) / \rho_g)^{0,5}$$

- où Q_v : débit volumique
 C_r : coefficient de décharge
 g : constante gravitationnelle
 D_t : diamètre du tube
 D_f : diamètre de la capsule
 V_f : volume de la capsule
 ρ_g : masse volumique du milieu gazeux
 ρ_f : masse volumique de la capsule

Dans cette équation du débit volumique les termes C , g , D_f , V_f , ρ_f et π sont constants pour un rotamètre donné. On peut donc simplifier l'équation du débit volumique de la façon suivante en incluant ces termes dans une nouvelle constante comme l'on fait Knowlton et Caplan (11) :

$$Q = K (D_t^2 - D_f^2) ((\rho_f - \rho_g) / \rho_g)^{0,5}$$

Comme la masse volumique du fluide est beaucoup plus petite que la densité de la capsule, on peut simplifier davantage cette relation.

$$Q = K_1 (Dt^2 - Df^2)(1/\rho_g)^{0,5}$$

Le terme $(Dt^2 - Df^2)$ dépend de la position de la capsule dans le rotamètre et donc directement de l'échelle de lecture du rotamètre. On peut substituer ce terme par un terme R correspondant à l'échelle de lecture pour obtenir l'équation :

$$Q = K_1 R (1/\rho_g)^{0,5}$$

ou inversement

$$R = K_2 Q (\rho_g)^{0,5}$$

Ces relations démontrent que la position de la capsule dans le rotamètre dépend directement de la racine carrée de la masse volumique du fluide ou du gaz circulant à l'intérieur. Cette relation est à la base des corrections à effectuer lorsqu'on utilise un rotamètre à une altitude différente de celle à laquelle il a été étalonné. Que le fluide ou le gaz soit différent, ou que ce soit le même fluide ou le même gaz mais avec une masse volumique différente la position de la capsule dépendra de cette masse volumique. On peut traiter un gaz à une altitude différente comme étant un gaz différent ayant une masse volumique différente.

Facteurs de correction pour le rotamètre

Supposons un rotamètre dont l'échelle sur le tube fut tracée dans certaines conditions de température et de pression (P_{debm}, T_{debm}). Le débit indiqué par ce rotamètre (Q_{debm}) dans ces conditions sera par conséquent exact et correspondra à celui lu sur l'échelle. Ce débit obéira à la relation suivante :

$$Q_{debm} = K_1 R_{debm} (1/\rho_{debm})^{0,5}$$

Si on utilise le même rotamètre dans des conditions différentes ($P_{éta}, T_{éta}$). Le débit $Q_{éta}$ obéira à la relation suivante :

$$Q_{éta} = K_1 R_a (1/\rho_{éta})^{0,5}$$

La position R_a correspond à la position R_{debm} indiquée ou gravée sur le rotamètre : $R_a = R_{debm}$

$$Q_{éta}(\rho_{éta})^{0,5} = K_1 R_a = K_1 R_{debm} = Q_{debm}(\rho_{debm})^{0,5}$$

$$Q_{éta} = Q_{debm}(\rho_{debm}/\rho_{éta})^{0,5}$$

Cette équation montre que lorsque la masse volumique ambiante est plus faible que la masse volumique à laquelle le rotamètre fut étalonné : le débit actuel ou ambiant sera plus élevé que celui indiqué par l'échelle gravée sur le rotamètre. Le débit indiqué sur le rotamètre ne

correspond au débit réel que lorsqu'il est utilisé dans les conditions de son étalonnage qui en général sont les conditions normales ou standard de température et de pression. On peut transformer la dernière équation en y remplaçant les masses volumiques par leur expression équivalente. On obtient alors :

$$Q_{\text{éta}} = Q_{\text{debm}} \left(\frac{MP_{\text{debm}}/RT_{\text{debm}}}{MP_{\text{éta}}/RT_{\text{éta}}} \right)^{0,5} \text{ car } \rho_{\text{debm}} = MP_{\text{debm}}/RT_{\text{debm}} \text{ et } \rho_{\text{éta}} = MP_{\text{éta}}/RT_{\text{éta}}$$

Pour obtenir finalement :

$$Q_{\text{éta}} = Q_{\text{debm}} (P_{\text{debm}} T_{\text{éta}} / P_{\text{éta}} T_{\text{debm}})^{0,5}$$

où $Q_{\text{éta}}$: débit à l'étalonnage
 $P_{\text{éta}}$: pression d'étalonnage ou ambiante
 $T_{\text{éta}}$: température d'étalonnage ou ambiante
 Q_{debm} : débit indiqué sur le rotamètre
 P_{debm} : pression d'étalonnage du rotamètre
 T_{debm} : température d'étalonnage du rotamètre
 M : masse moléculaire

La relation du débit équivalent nous permet de calculer le débit équivalent à ce débit dans les conditions normales de température et de pression :

$$Q_n = Q_{\text{éta}} (P_{\text{éta}}/P_n)(T_n/T_{\text{éta}})$$

Si on remplace $Q_{\text{éta}}$ dans cette dernière équation par l'équation de $Q_{\text{éta}}$ propre au rotamètre, on obtient la relation suivante qui permet d'évaluer directement le débit dans des conditions normales ou standard à partir du débit indiqué sur l'échelle du rotamètre (5) :

$$Q_n = (P_{\text{éta}}/P_n)(T_n/T_{\text{éta}}) Q_{\text{debm}} (P_{\text{debm}} T_{\text{éta}} / P_{\text{éta}} T_{\text{debm}})^{0,5}$$

où Q_{debm} : débit tel que mesuré par un débitmètre de référence
 $P_{\text{éta}}$: pression absolue ambiante
 $T_{\text{éta}}$: température absolue ambiante
 P_{debm} : pression d'étalonnage du rotamètre
 T_{debm} : température d'étalonnage du rotamètre
 Q_n : débit équivalent dans les conditions normales
 P_n : pression normale d'étalonnage du rotamètre
 T_n : température normale d'étalonnage du rotamètre

Si les conditions d'étalonnage du rotamètre ($P_{\text{debm}}, T_{\text{debm}}$) correspondent aux conditions normales (P_n, T_n), l'équation se simplifie de la façon suivante :

$$Q_n = Q_{\text{debm}} \{ (P_{\text{éta}}/P_n)(T_n/T_{\text{éta}}) \}^{0,5}$$

où Q_{debm} : débit tel que mesuré par un débitmètre de référence
 $P_{\text{éta}}$: pression absolue ambiante
 $T_{\text{éta}}$: température absolue ambiante
 Q_n : débit équivalent dans les conditions normales

P_n : pression normale d'étalonnage du rotamètre
 T_n : température normale d'étalonnage du rotamètre

Cette équation ne peut être utilisée que si les conditions normales d'étalonnage du rotamètre sont les mêmes que les conditions normales dans lesquelles on veut connaître le débit normalisé (Q_n). Lorsque les conditions normales sont différentes des conditions d'étalonnage du rotamètre, il faut employer les équations individuelles.

Par exemple, si on utilise un rotamètre étalonné dans des conditions normales (760 mm de Hg et 25°C) pour mesurer un débit d'échantillonnage à une pression de 625 mm de Hg mais à une même température, la différence entre le débit réel d'échantillonnage et le débit normalisé ou lu sur le débitmètre serait de :

$$Q_{\text{éch}} = Q_{\text{debm}} (P_{\text{debm}} T_{\text{éch}} / P_{\text{éch}} T_{\text{debm}})^{0,5}$$

$$Q_{\text{éch}} = Q_{\text{debm}} \{ (P_{\text{debm}} / P_{\text{éch}}) \}^{0,5}$$

$$Q_{\text{éch}} = Q_{\text{debm}} \{ (760 / 625) \}^{0,5}$$

$$Q_{\text{éch}} = Q_{\text{debm}} \{ 1,103 \}$$

où $Q_{\text{éch}}$: débit réel d'échantillonnage
 Q_{debm} : débit lu sur le rotamètre et étalonné aux conditions normales

Le débit d'échantillonnage est donc plus élevé que le débit indiqué. Ceci s'explique par le fait qu'un débit d'air plus élevé d'air de masse volumique plus faible est nécessaire pour maintenir à un même point de l'échelle la capsule d'un rotamètre qui a été étalonnée avec de l'air plus dense.

Par contre, le débit équivalent rapporté aux conditions normales serait :

$$Q_n = Q_{\text{debm}} \{ (P_{\text{éch}} / P_n) (T_n / T_{\text{éch}}) \}^{0,5}$$

$$Q_n = Q_{\text{debm}} \{ (P_{\text{éch}} / P_n) \}^{0,5}$$

$$Q_n = Q_{\text{debm}} \{ (625 / 760) \}^{0,5}$$

$$Q_n = Q_{\text{debm}} \{ 0,907 \}$$

Pompes et leurs équations

Pompes

Comme mentionné précédemment, une détermination précise du volume échantillonné est essentielle au calcul de la concentration ambiante d'un contaminant dans l'environnement ou dans un milieu de travail. Le choix de la pompe d'échantillonnage constitue donc une étape importante d'un échantillonnage. Il existe une multitude de pompes disponibles commercialement qui peuvent essentiellement être classifiées en trois catégories :

haut-débit (1 à 4 L/min)
bas-débit (1 à 200 mL/min)
multi-débit (5 mL/min à 4 L/min)

Le débit d'une pompe peut être affecté par une multitude de facteurs par exemple une perte de charge importante créée par le colmatage d'un filtre placé en amont ou la charge de sa pile. Une des plus grandes qualités d'une pompe est sa capacité à maintenir un débit constant sous l'effet d'un changement de conditions. C'est à ce niveau que se sont concentrés, au cours des dernières décennies, les efforts des différents manufacturiers visant à améliorer leurs pompes. Les pompes qui existent présentement et qui sont destinées à l'échantillonnage personnel sont dites à débit constant. Avant le développement de ces pompes, il était d'usage courant en hygiène industrielle d'ajuster périodiquement le débit des pompes à haut débit durant les échantillonnages à l'aide du rotamètre fixé sur les pompes. Cette pratique pouvait conduire à des erreurs importantes (12).

Les pompes personnelles, i.e. pouvant être portées par un travailleur, sont munies de système de compensation qui visent à maintenir leur débit constant lors des échantillonnages. Ces systèmes de compensation sont plus ou moins performants et utilisent différentes techniques. Parmi ces techniques, on peut retrouver des fils chauds, des orifices, des systèmes de maintien de la vitesse de rotation du moteur etc. Les différences observées entre le comportement respectif de ces différentes pompes sont attribuables à la technique utilisée pour maintenir leur débit constant. Une pompe utilisant un fil chauffant sera dite à débit massique constant, celle utilisant un système de contrôle de la vitesse sera à débit volumique constant tandis que celle utilisant un orifice sera dite mixte. Il est possible de déterminer théoriquement le comportement de ces pompes. Toutefois les pompes les plus courantes maintenant sont dites aussi mixtes. Elles n'utilisent pas un orifice pour maintenir leur débit constant mais un circuit électronique qui tend à maintenir fixe le courant d'alimentation du moteur de la pompe. Les équations théoriques décrivant le comportement de ces pompes en fonction de la température et de la pression ambiante ne sont pas disponibles. Il est donc impossible de prévoir l'effet des conditions ambiantes sur ces pompes. Pour tous ces cas, où il est impossible de décrire théoriquement le comportement des pompes, l'étalonnage de la pompe doit être effectué sur le site d'échantillonnage.

Pompe à débit volumique constant

Lorsqu'une pompe est dite à débit volumique constant, le volume par unité de temps échantillonné par cette pompe demeure constant. Lorsque la pompe est utilisée à des altitudes ou des températures différentes, son débit volumique restera constant même si la densité de l'air qu'elle échantillonne varie. Si on désire ajuster un débit de 2L/min sur une pompe à débit volumique constant, il suffit d'ajuster le débit de cette pompe au débit désiré à l'aide d'un instrument adéquat.

$$Q_{\text{éta}} = Q_{\text{éch}}$$

Par exemple si on utilise un débitmètre à film de savon telle qu'une burette graduée, le débit de la pompe peut être ajusté directement puisque ce type de débitmètre mesure directement les volumes. Le débit à différentes altitudes restera le même puisque la pompe est à débit volumique constant.

Par contre, si on utilise un débitmètre à fil chaud étalonné dans les conditions normales et, qu'on désire obtenir un débit d'échantillonnage ($Q_{éch}$) dans certaines conditions ambiantes, il faut être prudent et d'abord calculer pour les conditions d'étalonnage, le débit (Q_{debm}) équivalent au débit $Q_{éch}$ et faire correspondre ce débit avec celui qu'affichera le débitmètre à fil chaud lors de l'étalonnage de la pompe.

$$Q_{debm} = (P_{éta} / T_{éta}) (T_n / P_n) Q_{éch}$$

Si l'étalonnage est effectué dans des conditions d'échantillonnage alors :

$$Q_{debm} = (P_{éch} / T_{éch}) (T_n / P_n) Q_{éch}$$

Pompe à débit massique constant

Lorsqu'une pompe est à débit massique constant, la masse de produit par unité de temps qui traverse la pompe demeure constante.

$$\begin{aligned} Q_{m\ éch} &= Q_{m\ éta} \\ \rho_{éch} Q_{éch} &= \rho_{éta} Q_{éta} \\ \rho_{éch} V_{éch} t &= \rho_{éta} V_{éta} t \\ \rho_{éch} V_{éch} &= \rho_{éta} V_{éta} \end{aligned}$$

$$V_{éch} = \rho_{éta} V_{éta} / \rho_{éch}$$

Si on substitue la densité par son équivalent dans cette dernière équation, on obtiendra :

$$\begin{aligned} V_{éch} &= \rho_{éta} V_{éta} / \rho_{éch} \\ V_{éch} &= (P_{éta} M / RT_{éta}) V_{éta} / (P_{éch} M / RT_{éch}) \\ P_{éch} V_{éch} / T_{éch} &= P_{éta} V_{éta} / T_{éta} \end{aligned}$$

Donc

$$P_{éch} Q_{éch} / T_{éch} = P_{éta} Q_{éta} / T_{éta}$$

Ces équations sont propres à la conservation du débit massique et aux pompes dites à débit massique constant. Cette relation est similaire à celle des débits équivalents.

Pompe mixte

Les orifices sont utilisés quelquefois avec des pompes pour maintenir leur débit constant. Ces orifices peuvent être des plaques trouées ou des orifices critiques.

Orifice

On peut utiliser un orifice quelconque et utiliser la différence de pression à ses bornes pour maintenir un débit constant. Théoriquement, l'équation générale d'un orifice donné a la forme suivante (9) :

$$Q_v = K (\Delta P / \rho_g)^{0,5}$$

- où Q_v : débit volumique
 K : constante de l'orifice venturi
 ΔP : différence de pression à l'orifice
 ρ_g : densité du milieu gazeux

Si la différence de pression (ΔP) à travers l'orifice est maintenue constante, on obtient la relation suivante :

$$Q_v (\rho_g)^{0,5} = \text{cte}$$

Cette équation peut être réécrite de la façon suivante (13) :

$$V_{\text{éch}} = V_{\text{éta}} (\rho_{\text{éta}} / \rho_{\text{éch}})^{0,5}$$

- où : $V_{\text{éta}}$: débit volumique dans les conditions d'étalonnage
 $V_{\text{éch}}$: débit volumique dans les conditions d'échantillonnage
 $\rho_{\text{éta}}$: densité du fluide dans les conditions d'étalonnage
 $\rho_{\text{éch}}$: densité du fluide dans les conditions d'échantillonnage

Il est à remarquer que cette équation diffère de celle exprimant la conservation du débit massique. Une pompe utilisant un orifice pour contrôler le débit n'est ni à débit massique constant ni à débit volumique constant. Cette équation est propre aux orifices mais pourrait servir à expliquer également le comportement d'un rotamètre qui est en fait un orifice de section annulaire variable.

Orifice critique

Lorsqu'un orifice critique est utilisé pour maintenir un débit constant, il ne fournit qu'une régularisation partielle du débit massique. Pour opérer en régime critique et maintenir un débit constant, la pression en aval de l'orifice doit être moins de 0,53 fois celle en amont et l'aire de la section de l'orifice par rapport à celle du tube en amont doit être 25 fois plus petite. Le débit massique critique à travers un orifice critique est décrit mathématiquement (9)(14) par :

$$Q_{m \text{ crit}} = 0,398 C A P_{\text{up}} / (T_{\text{up}})^{1/2}$$

- où $Q_{m \text{ crit}}$: débit massique (g/sec)
 C : coefficient de décharge de l'orifice (sans unité)
 A : aire de l'orifice à la restriction ou au rétrécissement (throat) (cm²)
 P_{up} : pression absolue à l'amont de l'orifice (g / cm²)
 T_{up} : température absolue en amont de l'orifice (°K)

$$Q_v = Q_{m \text{ crit}} / \rho_{\text{up}}$$

$$Q_v = \{0,398 C A P_{\text{up}} / (T_{\text{up}})^{1/2}\} / \rho_{\text{up}}$$

$$Q_v = 0,398 C A R (T_{\text{up}})^{1/2} / M \text{ car } \rho_{\text{up}} = P_{\text{up}} M / R T_{\text{up}}$$

Le débit volumique et le débit massique d'un orifice demeureront constants à condition que son coefficient de décharge, que la température et que la pression en amont demeurent constantes. Par contre, si la température en amont et le coefficient de décharge demeurent constant et que la pression en amont varie, le débit volumique sera conservé mais le débit massique à travers l'orifice variera. Par exemple, si un orifice critique est placé entre un filtre et une pompe, le débit massique à travers le filtre diminuera lorsque la perte de charge à travers ce dernier augmentera par colmatage et parce que l'augmentation de la perte de charge à travers le filtre occasionnera une diminution de la pression en amont de l'orifice soit P_{up} . Certains orifices critiques, fabriqués à partir de seringue hypodermique ou de pipette ont des coefficients de décharge qui varient en fonction de la pression en amont (P_{up}) : ce qui réduit leur capacité à maintenir leur débit massique et leur débit volumique constant (14).

Étalonnage et ajustement du débit des pompes

Un étalonnage peut être effectué en laboratoire ou dans un milieu dont les conditions d'étalonnage sont différentes de celles dans lesquelles la pompe sera utilisée. De plus, il sera souvent effectué avec un débitmètre étalonné dans des conditions différentes de celles du milieu ambiant. Le débit réel aspiré par une pompe lorsqu'elle est utilisée lors de l'échantillonnage peut donc être très différent de celui de l'étalonnage. L'étalonnage doit tenir compte de ces facteurs et être effectué de façon à obtenir le débit désiré dans les conditions d'échantillonnage.

Conditions d'étalonnage :

- $Q_{éta}$: débit tel que mesuré par un débitmètre de référence
- $P_{éta}$: pression absolue à l'étalonnage
- $T_{éta}$: température absolue à l'étalonnage
- $n_{éta}$: nombre de molécules dans le volume de mesure à l'étalonnage

Conditions d'échantillonnage:

- $Q_{éch}$: débit désiré dans les conditions d'échantillonnage
- $P_{éch}$: pression absolue dans les conditions d'échantillonnage
- $T_{éch}$: température absolue dans les conditions d'échantillonnage
- $n_{éch}$: nombre de molécules dans le volume de mesure à l'échantillonnage

Inversement, on mesure souvent sur les sites d'échantillonnage des débits avec un débitmètre, étalonné dans des conditions différentes de celles du milieu ambiant. Il faut donc pouvoir à partir des débits lus par les débitmètres pouvoir déterminer les débits réels d'échantillonnage.

Une des premières étapes du processus d'étalonnage consiste à s'interroger sur la nature des corrections à appliquer qui dépendent de la nature de la pompe et des instruments de mesure utilisés. Par exemple, si une pompe est à débit volumique constant, il est clair que son débit ne changera pas et ne nécessitera pas de correction. Toutefois si ce débit est mesuré à l'aide d'un débitmètre massique, une correction devra être appliquée à la lecture de ce dernier, afin de connaître le débit réel dans les conditions d'échantillonnage.

Les éléments rencontrés dans un train d'échantillonnage ou d'étalonnage sont généralement les suivants : pompe, débitmètre et élément de collection. Ils sont en général placés en ligne et peuvent donc s'affecter mutuellement. L'ordre le plus courant est avec le débitmètre situé entre la pompe et l'élément de collection. L'erreur liée à l'utilisation de ces différents éléments dans différentes conditions sera discutée dans les sections suivantes principalement dans le but d'évaluer leur incidence sur le calcul de la concentration.

L'étalonnage d'une pompe consiste à déterminer la valeur que doit afficher un débitmètre dans les conditions d'étalonnage, pour qu'une fois déplacée sur le site d'échantillonnage, cette pompe aspire le débit désiré. Elle comprend les deux étapes suivantes :

- la détermination du débit d'étalonnage $Q_{\text{éta}}$ à partir du débit d'échantillonnage $Q_{\text{éch}}$. Le débit $Q_{\text{éta}}$ dépend du genre de pompe.
- le calcul du débit que doit afficher le débitmètre Q_{debm} lorsque la pompe aspirera $Q_{\text{éta}}$ dans les conditions d'étalonnage.

Un intervenant doit être conscient que lors de l'ajustement de la pompe, celle-ci est ajustée à un débit ($Q_{\text{éta}}$) qui correspond au débit Q_{debm} affiché par un débitmètre. Par la suite, lorsque la pompe est déplacée vers le site d'échantillonnage, il nous faut connaître à partir du mécanisme interne la façon dont le débit de la pompe sera affecté. Lorsque ce mécanisme est inconnu, il faut faire l'étalonnage dans les conditions d'échantillonnage de façon à ce que ces débits soient égaux ($Q_{\text{éta}} = Q_{\text{éch}}$).

Le tableau suivant donne en fonction du débitmètre et de la pompe les diverses équations susceptibles d'être utilisées lors d'un échantillonnage ou d'un étalonnage. La colonne de $Q_{\text{éta}}$ permet de calculer, à partir du débit désiré ($Q_{\text{éch}}$), le débit auquel il faut ajuster la pompe dans les conditions d'étalonnage. C'est à ce débit qu'il faut ajuster la pompe pour que celle-ci une fois transportée sur les lieux de l'échantillonnage aspire le débit désiré $Q_{\text{éch}}$. La colonne Q_{debm} permet de calculer la valeur que devra afficher le débitmètre utilisé dans les conditions d'étalonnage pour que le débit de la pompe corresponde au débit $Q_{\text{éta}}$. La cinquième colonne combine ces deux équations et permet de calculer directement le débit Q_{debm} que doit afficher un débitmètre dans les conditions d'étalonnage pour que la pompe aspire un débit $Q_{\text{éch}}$ sur les lieux d'échantillonnage. La sixième colonne permet de calculer directement le débit équivalent au débit d'échantillonnage dans les conditions normales i.e. Q_n à partir du débit Q_{debm} affiché par le débitmètre lors de l'étalonnage.

Les formules dans la colonne de Q_n ne sont utilisables que si l'étalonnage du débitmètre a été effectué dans des conditions normales. Si les conditions d'étalonnage sont différentes, l'utilisateur doit nécessairement calculer le débit $Q_{\text{éch}}$ et ensuite calculer son équivalent dans les conditions normales.

Pour une version plus grande du tableau, veuillez cliquer [ici](#)

Pompe	Q _{éta}	Débitmètre	Q _{débm}	Équation combiné (Q _{débm})	Q _{éta} (Si conditions d'étalonnage du débitmètre correspondent à TPN)
Massique	Q _{éch} $\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{éta}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{éta}}}$	Fil chaud	Q _{éta} $\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}$	Q _{éch} $\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{débm}}}$	Q _{débm}
		À orifice	Q _{éta} $\sqrt{\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{éch} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{débm} $\sqrt{\frac{T_{\text{n}} P_{\text{éta}}}{P_{\text{n}} T_{\text{éta}}}}$
		Rotamètre	Q _{éta} $\sqrt{\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{éch} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{débm} $\sqrt{\frac{T_{\text{n}} P_{\text{éta}}}{P_{\text{n}} T_{\text{éta}}}}$
		À film de savon	$\frac{P_{\text{éta}}}{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}} Q_{\text{éta}}$	$\frac{T_{\text{éta}}}{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}} \frac{P_{\text{éch}}}{T_{\text{éch}}} Q_{\text{éch}}$	$\frac{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}}{T_{\text{éta}}} \frac{T_{\text{n}}}{P_{\text{n}}} Q_{\text{débm}}$
Volumique	Q _{éch}	Fil chaud	Q _{éta} $\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}$	Q _{éch} $\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{débm}}}$	Q _{débm} $\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{éta}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{éta}}}$
		À orifice	Q _{éta} $\sqrt{\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{éch} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{débm} $\frac{P_{\text{éch}}}{T_{\text{éch}}} \sqrt{\frac{T_{\text{n}} T_{\text{éta}}}{P_{\text{n}} P_{\text{éta}}}}$
		Rotamètre	Q _{éta} $\sqrt{\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{éch} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{débm} $\frac{P_{\text{éch}}}{T_{\text{éch}}} \sqrt{\frac{T_{\text{n}} T_{\text{éta}}}{P_{\text{n}} P_{\text{éta}}}}$
		À film de savon	$\frac{P_{\text{éta}}}{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}} Q_{\text{éta}}$	$\frac{P_{\text{éta}}}{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}} Q_{\text{éch}}$	$\frac{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}}{P_{\text{éta}}} \frac{P_{\text{éch}}}{T_{\text{éch}}} \frac{T_{\text{n}}}{P_{\text{n}}} Q_{\text{débm}}$
Mixte	Q _{éch} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{éta}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{éta}}}}$	Fil chaud	Q _{éta} $\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}$	Q _{éch} $\frac{T_{\text{débm}}}{P_{\text{débm}}} \sqrt{\frac{P_{\text{éch}} P_{\text{éta}}}{T_{\text{éch}} T_{\text{éta}}}}$	Q _{débm} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{éta}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{éta}}}}$
		À orifice	Q _{éta} $\sqrt{\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{éch} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{débm} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{n}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{n}}}}$
		Rotamètre	Q _{éta} $\sqrt{\frac{P_{\text{éta}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éta}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{éch} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{débm}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{débm}}}}$	Q _{débm} $\sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{n}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{n}}}}$
		À film de savon	$\frac{P_{\text{éta}}}{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}} Q_{\text{éta}}$	$\frac{P_{\text{éta}}}{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}} \sqrt{\frac{P_{\text{éch}} T_{\text{éta}}}{T_{\text{éch}} P_{\text{éta}}}} Q_{\text{éch}}$	$\frac{P_{\text{éta}} - P_{\text{vap}}}{P_{\text{éta}}} \frac{T_{\text{n}}}{P_{\text{n}}} \sqrt{\frac{P_{\text{éch}} P_{\text{éta}}}{T_{\text{éch}} T_{\text{éta}}}} Q_{\text{débm}}$

Q_{éta} : Débit d'étalonnage
 Q_{éch} : Débit d'échantillonnage
 Q_n : Débit équivalent à TPN de Q_{éch}
 Q_{débm} : Débit affiché par le débitmètre

T_{éta} : Température à l'étalonnage
 T_{éch} : Température à l'échantillonnage
 T_n : Température à TPN
 T_{débm} : Température d'étalonnage du déb

P_{éta} : Pression à l'étalonnage
 P_{éch} : Pression à l'échantillonnage
 P_n : Pression à TPN
 P_{débm} : Pression d'étalonnage du débitmètre

Évaluation des erreurs critiques

La mesure des débits devrait toujours être effectuée sur le site lors de l'échantillonnage afin de minimiser les erreurs et ce, surtout lorsqu'on ne connaît pas le mode de fonctionnement de la pompe. Cette dernière mesure est quelquefois négligée, et ce pour différentes raisons, par les intervenants en milieu de travail. De plus, lors de l'utilisation de certains instruments calibrés dans des conditions différentes de celles de l'échantillonnage, les corrections des réponses affichées par ces équipements et relatives aux températures et aux pressions sont souvent également négligées. L'incidence de ces différentes pratiques sur le calcul des concentrations a été évaluée en pourcentage pour trois conditions extrêmes qui sont présentées dans les annexes. Dans l'annexe B, les formules permettant d'évaluer en pourcentage les erreurs produites sur les concentrations sont démontrées et ce pour le cas où les VEMPs sont considérés comme des concentrations permmissibles ou comme des doses. L'évaluation des erreurs sur les concentrations à l'aide de ces formules est ensuite effectuée pour trois cas particuliers : celui d'un milieu surchauffé à 35°C, un autre milieu à 0°C et pour le cas particulier d'une mine à 2134 m de profondeur. Les tableaux de résultats et les calculs relatifs à ces cas particuliers sont insérés dans les annexes C, D et E.

Les erreurs ont été évaluées pour le cas d'un intervenant qui utilise des pompes et des débitmètres lors d'un échantillonnage et qui ne connaît pas les modes de fonctionnement de ces équipements

et les équations de corrections à appliquer. Il désire obtenir lors de ses échantillonnages un débit de 1,7 L/min. Lors de l'étalonnage, il ajuste le débit de ses pompes à l'aide d'un débitmètre qu'il relie en série avec la pompe. Les étalonnages sont effectués dans des conditions normales. Les erreurs ont été évalués pour des débitmètres étalonnés dans des conditions standards et d'autres dans des conditions normales selon les deux méthodologies :

- l'intervenant ajuste le débit de la pompe jusqu'à ce que le débitmètre affiche 1,7 L/min,
- l'intervenant ajuste le débit de la pompe jusqu'à ce que le débitmètre affiche le débit équivalent à 1,7 L/min qu'il a calculé pour ses conditions d'étalonnage à l'aide de l'équation des débits équivalents

De plus, dans le cas de la mine, les erreurs ont été évalués pour deux situations supplémentaires i.e. pour le cas d'un étalonnage dans la mine et pour le cas d'un étalonnage en surface à l'aide d'un système simulant les conditions de pression de la mine.

En résumé, pour les étalonnages en surface effectués avec des débitmètres étalonnés dans les conditions standard, les erreurs reliées à la méthodologie 1 et décrite plus haut sont respectivement comprises entre 0 et 13 %, -8 et 9 %, 0 et -18,6 % pour un milieu à 35°C, 0°C et dans la mine à 2134 m de profondeur. Toujours en surface, l'application de la deuxième méthodologie, avec le débitmètre étalonné dans des conditions standard, conduirait à des erreurs variant respectivement entre -3 et 9 %, 0 et 20 %, 0 et 34 % pour ces mêmes milieux. Pour les étalonnages en surface effectués avec des débitmètres étalonnés dans les conditions normales, les erreurs reliées à la méthodologie 1 et décrite plus haut sont respectivement comprises entre 0 et 3,4 %, 0 et -8,4 %, 0 et -18,6 % pour le milieu à 35°C, 0°C et dans la mine. Toujours en surface, l'application de la deuxième méthodologie, avec le débitmètre étalonné dans des conditions normales, conduirait à des erreurs variant respectivement entre 0 et -3,2 %, 0 et 9,2 %, 0 et 22,8 % pour ces mêmes milieux.

Les étalonnages dans la mine effectués selon les deux méthodologies précédentes ont donné des erreurs variant entre 0 et -18,6 % pour le débitmètre étalonné à TPN et entre 0 et -11 % pour le débitmètre étalonné dans des conditions standard. L'étalonnage par simulation des conditions de la mine en surface a donné des erreurs variant entre 0 et -3,5 % lorsqu'ajusté au débit équivalent de 1,64 L/min et entre 0 et 3,6 % pour un ajustement à 1,7 L/min. Cette dernière méthode pourrait être considérée comme une alternative raisonnable à l'étalonnage dans les mines.

Un utilisateur qui effectue ses étalonnages sans se soucier du débitmètre ou du mode de compensation de la pompe et en dehors des sites d'échantillonnage peut obtenir des débits d'échantillonnage réels très différents des débits désirés. Ces débits varieront en fonction du genre de la pompe et des débitmètres utilisés. S'il utilise un cyclone ou des impacteurs, l'efficacité de sélection de ces appareils sera modifiée et ses résultats seront erronés. Sa méthodologie fera en sorte qu'il pourra surestimer la concentration parce que les débits réels d'échantillonnage auront peut être été plus élevés que ce qu'ils auraient dû être. On peut évaluer en partie les erreurs sur les calculs de concentration de la façon montrée dans les annexes, toutefois les autres, provenant du fait que les cyclones ou impacteurs soient opérés à des débits différents de leur débit nominal, ne le sont pas.

Les étalonnages en dehors des sites d'échantillonnage induisent donc des erreurs qui peuvent devenir importantes lorsqu'on ignore les principes de fonctionnement des appareils. L'importance de ces erreurs est déterminée par les écarts entre les conditions d'échantillonnage, les conditions d'étalonnage de la pompe et celles du débitmètre et bien entendu le mode de fonctionnement de la pompe.

Conclusion

Ce mémento qui regroupe l'essentiel de l'information, en ce qui a trait à l'ajustement et la mesure des débits à l'IRSST, devra faire l'objet dans le futur de mises à jour périodiques et ce, afin d'y actualiser ou d'y ajouter toutes nouvelles informations pertinentes à ce domaine. Son but qui était d'informer, de regrouper de documenter impose ce cadre dynamique d'évolution.

La constitution de cette banque d'informations et de ce mémoire de nos pratiques dans ce domaine, permet à toute personne de s'informer rapidement, de comprendre les origines des équations et les pourquoi des procédures et recommandations de l'IRSST dans le domaine de la métrologie et des ajustements des débits. Il permet, par exemple, de comprendre que l'étalonnage d'une pompe doit être effectué sur le site d'échantillonnage, d'évaluer l'importance des erreurs induites lorsque des corrections sont négligées par les utilisateurs et surtout à travers sa bibliographie de documenter l'origine de l'information qu'il contient.

Bibliographie

1. Guide technique de l'IRSST, Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail, IRSST septembre 1994.
2. Leidel, N A, Busch, K A et Lynch, J R, Occupational Exposure Sampling Strategy Manual, NIOSH, Cincinnati, Ohio, 1977.
3. Occupational Safety and Health Administration, OSHA Technical Manual (section II : chapitre 1 (calculations), pp 32-33.
4. Hutcheon, N.B., Handergord, G.O.P., Building Science for a Cold Climate, Construction Technology Centre Atlantic Inc., Fredericton, Canada, pp 24-30, 1989.
5. Bossard, F.C., Lefever, J.J., Lefever, J.B., Stout, K.S., A Manual of Mine Ventilation Design Practices, Floyd C. Bossard and Associates, Inc. Butte, Usa, pp 26-31, 1983.
6. 1999 ASHRAE Handbook, Heating, Ventilating, and Air Conditioning Applications, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, USA, p 26.1, 1999.
7. Bossard, F.C., Lefevre, J.J., Lefever, J.B., Stout, K.S., A Manual of Mine Ventilation Design Practices, Floyd C. Bossard and Associates, Inc. Butte, Usa, pp 12-11, 1983.
8. DiNardi, R.S., The Occupational Environment - its Evaluation and Control, AIHA Press, 1997.
9. Hinds, W.C., Aerosol Technology (Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particulates), John Wiley and Sons inc, New York, 1982.
10. Treafis, H.N., T.F. Tomb and H.F. Carden : « Effects of Altitude on Personal Respirable Dust Sampler Calibration », A.I.H.A. Journal, 37 :133-138, 1976.
11. Knowlton, J., Caplan, P.E., Rotameter Corrections for Gas Density, A.I.H.A. Journal, 46 (11) : B10-B16, 1985.

12. Weiss, S.A., Beaulieu, H.J., Buchan, R.M., Air Volume Measurement Error in Pumps with Rotameters and High Range « Constant Flow » Pumps., *AIHA Journal*, 43(10) : 754-758, 1982.
13. Treaftis, H.N., Tomb, T.F., Gero, A.J., Effect of Altitude on the Volumetric Flow Rate of Constant Flow Pumps, *Appl. Ind. Hyg*, 1(1), 54-58, April, 1986.
14. Walter, R.B., A Constant Flow Air Sampler Using Vacuum Regulation, *AIHA Journal*, 43(5) :376-379, 1982.
15. Stephenson, Dale J., Lillquist, Dean R., The Effects of Temperature and Pressure on Airborne Exposure Concentrations when Performing Compliance Evaluations Using ACGIH VEMPs and OSHA PELs, *Applied Occ. and Environmental Hygiene Journal*, Vol 16 (4) : 482-486, 2001.
16. Michel Bisson, Introduction à la pollution atmosphérique, Les publications du Québec, ISBN 2-551-08762-7, p37, 1986.
17. Wight, G.D., Fundamentals of air sampling, Lewis publishers, USA, 1994 , p 52-53.

Annexe A – Description des approches dose et concentration

1) Respect des normes VEMPs ou PELs

Lors de l'évaluation d'un milieu, les intervenants doivent évaluer la concentration de contaminants présents et vérifier que ces concentrations respectent les limites d'exposition. Le calcul de ces concentrations et la vérification du respect de ces normes dépendront de la nature même attribuée à ces valeurs. Ces valeurs représentent des concentrations permissibles au Québec tandis qu'elles représentent des doses permissibles pour les organismes américains OSHA et NIOSH.

L'approche de dose a été discutée dans un article de Dale.J. Stephenson et de Dean R. Lillquist de la revue «Applied Occupational Environmental Hygiene Journal » volume16(4); 482-486, de l'an 2001 (1).

Dans le présent document, on présente l'approche de doses permissibles de OSHA et de NIOSH ainsi que celle des concentrations permissibles de l'IRSST sur les calculs de concentrations dans des conditions autres que celles normales.

2a) OSHA et NIOSH

Des directives claires apparaissent pour vérifier le respect de ces normes aux pages 32 et 33 du manuel technique de OSHA (2). L'appendice G du cahier «Occupational Exposure Sampling Strategy Manual » de NIOSH (3), mentionne quelques directives, qui ne sont pas aussi claires que celles de OSHA, malgré qu'elles semblent basées sur la même philosophie. Ces directives du moins celles de OSHA confirment l'approche de «Stephenson et Lillquist » dans leur article comme le mentionne également une lettre aux éditeurs de la revue «Applied » où cet article fut publié. Ces directives mentionnent :

- 1) que pour les particules la concentration doit être calculée à partir du volume actuel sur le site et que cette concentration doit être comparée directement à la valeur du cahier des normes.
- 2) la relation suivante doit être utilisée pour calculer la valeur en ppm et la valeur obtenue à partir de cette équation doit être comparée directement à la valeur PEL, sans ajustement pour la température et la pression au site d'échantillonnage.

$$\text{ppm(TPN)} = \text{mg/m}^3(24,45)/\text{Mwt}$$

où 24,45 : volume moléculaire à TPN

TPN : température et pression normale (25°C, 760 mm Hg)

Mwt : poids moléculaire

S'il est nécessaire de connaître la concentration actuelle au site d'échantillonnage en ppm, cette concentration peut être calculée directement à partir de la concentration ppm (TPN) calculée précédemment à l'aide de la relation suivante :

$$\text{ppm (PT)} : \text{ppm (TPN)}(760/P)*(T/298)$$

où P : pression au site d'échantillonnage (mm de Hg)
T : température au site d'échantillonnage (°K)

Les deux équations précédentes peuvent être combinées pour donner la relation suivante qui apparaît dans le cahier de NIOSH.

$$\text{ppm(PT)} : (\text{mg/m}^3)(24,45/\text{Mwt})(760/\text{P})(\text{T}/298)$$

2b) IRSST

L'IRSST lors du calcul de la concentration, rapporte toujours le volume échantillonné dans les conditions normales de température et de pression et procède par la suite à la comparaison avec la norme. Cette procédure est décrite dans le guide technique de l'IRSST. Cette façon de faire est nettement différente de celles de OSHA et de NIOSH qui ne corrigent pas le volume échantillonné. Comme démontré plus loin, l'approche de NIOSH et de OSHA est basée sur l'idée de dose permissible tandis que celle de l'IRSST est basée sur l'idée de concentration permissible. L'approche de l'IRSST donne des concentrations plus élevées lorsque rapportés à TPN si les échantillonnages se font en haute altitude tandis qu'elle donne des concentrations moins élevées pour les cas d'échantillonnage en profondeur comme dans les mines. Cette approche a pour effet d'exposer des travailleurs à des concentrations de produit plus élevées lorsque le travail est effectué en profondeur et, inversement à des concentrations plus faibles de produits pour les travaux effectués en altitude. L'approche est donc plus sévère pour les hautes altitudes et moins sévère pour les profondeurs. Au Québec, on doit se soucier du cas des profondeurs à cause de la topographie même de la province.

3) Exemple illustrant les approches

L'exemple suivant est le deuxième exemple de l'article de Stephenson et Lillquist. Un échantillonnage personnel a été effectué sur des travailleurs utilisant de l'alcool isoamylique (Poids moléculaire : 88,15 g/gmole) pendant une opération de décapage à Salt Lake City, Utah (pression ambiante : 670 torr, température ambiante : 33°C. Le débit d'échantillonnage était de 0,02 L/min durant 8 heures. La pesée du filtre a donné 3,5 mg.

3a) IRSST

D'après l'IRSST le volume échantillonné de 10L (0,020 L/min x 60min/h x 8h) aurait été rapporté dans les conditions NTP de la façon suivante comme indiquée dans le guide :

$$\begin{aligned} P_n V_n / T_n &= P_e V_e / T_e \\ 760 \text{ torr} \times V_n / 298 \text{ }^\circ\text{K} &= 670 \text{ Torr} \times 10 \text{ L} / 306 \text{ }^\circ\text{K} \\ V_n &= 0,8585 * 10 \text{ L} \\ V_n &= 8,585 \text{ L} \end{aligned}$$

Ce qui aurait donné lors du calcul une concentration de 407,7 mg/m³ {3,5 mg / (8,585 L x 1 m³/1000 L)} : une concentration qui dépasse la norme de 360 mg/m³. D'après l'IRSST, la norme n'est pas respectée. Le tableau suivant résume le problème selon l'IRSST. On peut y observer l'invariabilité de la concentration en ppm selon les conditions.

	Site d'échantillonnage Concentration	TWA ACGIH Concentration	VEMP-TWA Concentration
Conditions # 2 (670 torr, 306°K)	113 ppm 350 mg/m ³		
Conditions # 1 (760 torr, 298°K)	112,9 ppm 407,7 mg/m ³	100 ppm 360 mg/m ³	

3b) NIOSH et OSHA

D'après NIOSH ET OSHA, le volume échantillonné de 10L (0,020 L/min x 60min/h x 8h) aurait été utilisé directement pour le calcul de la concentration sur le site et cette valeur comparée directement au VEMP. La concentration obtenue pour le site est donc de :

$$C \text{ (mg/m}^3\text{)} = M / V_{\text{éch}}$$

$$C = 3,5 \text{ mg} / (10\text{L} * 1\text{m}^3 / 1000\text{L})$$

$$C = 350 \text{ mg/m}^3$$

La concentration en ppm à TPN est calculée avec la relation suivante :

$$\text{ppm(TPN)} = \text{mg/m}^3(24,45)/\text{Mwt}$$

$$\text{ppm(TPN)} = 350 \text{ mg/m}^3(24,45)/88,15$$

$$\text{ppm(TPN)} = 97 \text{ ppm}$$

La concentration actuelle au site d'échantillonnage en ppm est calculée directement à partir de la concentration ppm(TPN) précédente à l'aide de la relation suivante :

$$\text{ppm(PT)} : \text{ppm (TPN)}(760/P)*(T/298)$$

$$\text{ppm(PT)} : 97 \text{ ppm} (760/670)*(306/298)$$

$$\text{ppm(PT)} : 113 \text{ ppm}$$

On aurait pu calculer directement la concentration sur le site à l'aide de la relation suivante qui apparaît dans le cahier de NIOSH et qui représente la combinaison des deux précédentes :

$$\text{ppm(PT)} = (\text{mg/m}^3)(24,45/\text{Mwt})(760/P)(T/298)$$

$$\text{ppm(PT)} = (350 \text{ mg/m}^3)(24,45/88,15)(760/670)(306/298)$$

$$\text{ppm (PT)} = 113 \text{ ppm}$$

Le tableau suivant résume les calculs selon OSHA et NIOSH. On peut y observer la variabilité des concentrations en ppm selon les conditions.

	Site d'échantillonnage Concentration	TWA ACGIH concentration	VEMP-TWA concentration
Conditions # 2 (670 torr, 306°K)	113 ppm 350 mg/m ³		
Conditions # 1 (760 torr, 298°K)	97 ppm 350 mg/m ³	100 ppm 360 mg/m ³	

Les deux approches conduisent à des conclusions différentes : pour l'IRSST, il y a violation de la valeur limite tandis que pour OSHA et NIOSH les valeurs limites sont respectées.

4) Dose permissible ou concentration permissible ?

4a) Concentration permissible :

On peut compléter le tableau qui illustre l'approche IRSST en y ajoutant la concentration dans les conditions #2 qui serait équivalente à la concentration permissible une fois le volume rapporté dans les conditions normales. Le tableau suivant résumerait donc les concentrations selon l'approche de l'IRSST.

	Site d'échantillonnage Concentration	TWA ACGIH Concentration	VEMP-TWA Concentration
Conditions # 2 (670 torr, 306°K)	113 ppm 350 mg/m ³		100ppm 310mg/m ³
Conditions # 1 (760 torr, 298°K)	112,9 ppm 407,7 mg/m ³	100 ppm 360 mg/m ³	

On peut remarquer dans ce tableau, que lorsqu'on rapporte les volumes dans les conditions normales pour prendre une décision en ce qui a trait à la violation ou le respect d'une norme, cela entraîne l'invariabilité des concentrations exprimées en ppm et la variabilité des concentrations exprimées en mg/m³. La variabilité des concentrations exprimées en mg/m³ constitue la différence principale entre l'approche de l'IRSST et celles de OSHA et de NIOSH. Si à l'aide de ce tableau, on désire évaluer la dose maximale que peut inspirer un travailleur sans qu'il y ait violation des normes, on utilisera la concentration exprimée en mg/m³ et on la multipliera par le volume inspiré soit en théorie 10 m³. La dose permise en haute altitude sera ainsi inférieure à celle à TPN. Lorsqu'on rapporte le volume dans les conditions normales afin de calculer la concentration et savoir si une norme est respectée, on supporte intrinsèquement l'idée d'une dose variable.

L'IRSST en rapportant le volume échantillonné dans les conditions normales effectue en réalité l'approche précédente qui sous-entend la variabilité de la dose. La variabilité de cette dose se

constate par l'invariabilité de la concentration exprimée en ppm et la variabilité de la concentration exprimée en mg/m³.

4b) Dose permissible :

L'approche de Stephenson et Lillquist (OSHA et NIOSH) qui suppose l'invariabilité de la dose conduit à une analyse différente des conditions # 2 qui est résumée dans le tableau suivant :

	Site d'échantillonnage	TWA ACGIH	VEMP-TWA
	Concentration	Concentration	
Conditions # 2	113 ppm	116 ppm	
	350 mg/m ³	360 mg/m ³	
Conditions # 1	97 ppm	100 ppm	
	350 mg/m ³	360 mg/m ³	

Uniquement une partie de ce tableau apparaît dans l'article de Stephenson et Lillquist. Les concentrations dans les conditions # 2 y ont été ajoutées afin de montrer que l'invariabilité de la dose qu'un travailleur peut inspirer, et qu'ils suggèrent, impose la variabilité des concentrations en ppm qui est mentionnée par OSHA. Les implications sur les VEMP ppm ne sont pas discutées dans son article.

Ainsi pour un produit dont la dose acceptable ou permise est de 3600 mg, la concentration permise dans toutes conditions sera de 360 mg/m³ parce qu'un travailleur moyen inspire 10 m³ en 8 heures. L'idée de OSHA et NIOSH est basée sur le fait que si une dose est dangereuse dans 10 m³ elle sera dangereuse dans le même volume à toutes les altitudes. Cette concentration acceptable ou permise invariable donnera des concentrations en ppm variable selon les conditions d'échantillonnage.

Une personne ayant un rythme respiratoire plus élevé, inspirera cette dose beaucoup plus rapidement qu'une personne avec un rythme respiratoire plus bas (basse altitude) parce que ses poumons prélèvent des volumes fixes et à peu près similaires entre individus pour chaque pulsation respiratoire.

5) Discussion de l'article de Stephenson et Lillquist

Stephenson et Lillquist dans leur article expliquent la démarche de OSHA et de NIOSH selon laquelle le respect ou non des normes doit être décidé en effectuant des calculs basés sur l'invariabilité de la dose plutôt que de la concentration. Tous ces calculs sont basés sur une dose calculée à partir d'un volume inspiré de 10 m³, qui représente le volume inspiré par une personne moyenne effectuant un effort moyen durant 8 heures (1). Une personne effectuant un travail moyen inspire environ 20,8 L/min. Le volume sur 8 heures sera de 20,8 L/min * 60 min * 8 i.e. 9984 L ou 10 m³. Les commentaires qui suivent commentent l'article de Stephenson et Lillquist (1).

Définissons le concept de dose acceptable à laquelle on peut exposer un travailleur.

$$\text{Dose acceptable} = \text{VEMP ou PEL (mg/m}^3\text{)} * 10 \text{ m}^3$$

Et la dose d'exposition mesurée

$$\text{Dose mesurée} = \text{TWA (mg/m}^3\text{)} * 10 \text{ m}^3$$

Un VEMP (mg/m³) peut être transformé en VEMP (ppm) dans les conditions normales de température et de pression à l'aide de la relation suivante :

$$\text{PPM} = (\text{mg/m}^3) \times (24,45) / \text{poids moléculaire (1)}$$

Exemple # 2 de l'article de Stephenson et Lillquist :

Des échantillonnages furent effectués sur des travailleurs travaillant avec de l'alcool isoamylique (MW = 88,15 g/gmole) à Salt Lake City en Utah ($P_{\text{act}} = 670$ torr, $T_{\text{act}} = 33^\circ\text{C}$ ou 306°K). Le débit d'échantillonnage était de 0,0208 L/min dans les conditions de l'échantillonnage et la durée de la prise de l'échantillon était de 8 heures. Les analyses ont détecté 3,5 mg de produit dans l'échantillon. Le VEMP de ce produit est de 100 ppm. L'exposition TWA du travailleur est donc de 350 mg/m³.

Calcul du VEMP en mg/m³

$$\text{VEMP (mg/m}^3\text{)} = 100 \text{ ppm} * 88,15 / 24,45 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{VEMP (mg/m}^3\text{)} = 360 \text{ mg/m}^3$$

Ainsi la dose acceptable pour ce produit est de 3600 mg i.e. $360 \text{ mg/m}^3 * 10 \text{ m}^3$

Cette dose doit être la même peu importe les conditions dans lesquelles se trouve un travailleur. Comme le calcul du VEMP est basé sur un volume de 10 m³, le VEMP, dans n'importe quelle condition sera donc de 360 mg/m³ i.e. $3600 \text{ mg} / 10 \text{ m}^3$.

Il est vrai qu'une concentration exprimée en ppm demeurera la même en changeant les conditions ambiantes de température et de pression parce qu'elle représente un quotient de volume sur un volume qui seront corrigées par un même facteur qui se simplifiera à la division.

Si dans les conditions #2 (670 torr et 306°K) de l'exemple précédent, on convertit le VEMP mg/m³ en ppm on obtient :

$$\text{VEMP (ppm)} = 360 \text{ mg} * 28,48 / 88,15 = 116 \text{ ppm}$$

Le facteur de 28,48 provient du volume molaire qui a été corrigé pour les conditions # 2. On sait que dans les conditions normales (760 torr et 298° K) une mole occupe 24,45 L, dans les conditions # 2 celle-ci occupera 28,48 soit $24,45 (760/670)*(306/298)$ i.e. $24,45 * 1,165 = 28,48$.

En résumé :

Conditions #2
(670 torr, 306°K)

Dose acceptable : 3600 mg	
VEMP (mg/m ³) :	360
⇔ 116 ppm	
VEMP (ppm) :	100
⇔ 309.5 mg/m ³	

Conditions #1
(760 torr, 298°K)

Dose acceptable : 3600 mg
VEMP (mg/m ³) : 360
VEMP (ppm) : 100

Théoriquement il est dit que le VEMP dans les conditions #2 est de 100 ppm. Comment s'expliquent alors les inconsistances qui prévalent dans les conditions #2 entre les VEMPs en ppm et en mg/m³ lorsqu'on effectue les conversions ?

Cette différence s'explique par le fait qu'aucun ajustement n'est fait à un VEMP ou à un PEL qui sont exprimés en ppm parce que l'on considère ces dernières valeurs comme des **concentrations** permises et non des doses permises. Dans un contexte de concentrations permises cette idée est parfaitement justifiable mais cela suppose la variabilité de la dose acceptable.

Par contre, si on modifie cette optique et que l'on considère les VEMPs ou PELs comme des doses acceptables qui peuvent être inspirées par un homme moyen effectuant un travail moyen durant 8 heures i.e. inspirant 10 m³ la problématique change.

D'après cette hypothèse, la dose acceptable en mg devrait être la même pour toutes conditions et ne nécessiterait donc pas de correction. La concentration massique du VEMP serait donc toujours la même puisque qu'elle est calculée à partir du quotient de la dose acceptable et du volume de 10 m³ inspirée par le travailleur moyen. Or si on convertit ce VEMP(mg/m³) en VEMP (ppm) on s'aperçoit que ce dernier devrait être multiplié par le rapport des températures et des pressions. Le VEMP ppm serait celui qui devrait être corrigé tandis que le VEMP massique devrait rester le même avec l'approche d'une dose invariable.

Par exemple, si comme précédemment la dose acceptable de produit est de 3600 mg dans 10 m³, on peut calculer le VEMP ppm pour les conditions #2 en calculant le volume de produit présent dans le 10 m³.

$$V_{\text{produit}} = 3600 \text{ mg} * ((24,45 * 1,165) \text{L} / 88,15 \text{ g}) * (1 \text{m}^3 / 1000 \text{L}) * (1 \text{g} / 1000 \text{ mg})$$

$$V_{\text{produit}} = 1000 * 1,165 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

Ce volume de produit se trouve dans 10 m³, quelle quantité de produit se trouvera dans 1 million de m³ ?

$$\text{VEMP ppm} = 100 * 1,165$$

Ainsi le VEMP en ppm dans les conditions # 2 (VEMP₍₂₎) peut être calculé à partir du VEMP en ppm existant dans des conditions # 1 (VEMP₍₁₎) de la façon suivante qui illustre les calculs de l'exemple précédent. Le volume de produit correspondant à la dose acceptable peut être calculé à partir du volume molaire et du produit dans les nouvelles conditions de la façon suivante :

$$\text{Dose}_{\text{acceptable}} : \text{VEMP}_1 \times 10 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{produit}} = \text{Dose}_{\text{acceptable}} \times (V_{\text{molaire}} / \text{P.M.})$$

Le volume molaire (L) dans les conditions # 2 peut être calculé à partir de la relation des gaz parfaits pour donner la relation suivante :

$$V_{\text{molaire}} = 24,45 (P_n / P_2) (T_2 / T_n)$$

$$V_{\text{molaire}} = 24,45 F_c \quad \text{où } F_c = (P_n / P_2) (T_2 / T_n)$$

Le volume du produit (m³) dans les conditions # 2 peut donc être calculé à l'aide de la nouvelle relation qui combine les relations précédentes :

$$V_{\text{produit}} = \text{Dose}_{\text{acceptable}} \times (24,45 F_c / \text{P.M.})$$

$$V_{\text{produit}} = \text{VEMP}_1 \times 10 \text{ m}^3 \times (24,45 F_c / \text{P.M.}) \times 10^{-6}$$

Où $F_c = (P_n / P_2) (T_2 / T_n)$
 V_{produit} est exprimé en m³
 VEMP est exprimé en mg/m³
 F_c est sans unité
 P.M. est exprimé en g

Ce volume doit être dispersé dans le volume respiré par un homme moyen durant 8 heures soit 10 m³. La concentration en ppm de ce produit et équivalente au VEMP peut être calculée maintenant :

$$\begin{array}{ccc} V_{\text{produit}} & \leftrightarrow & V_{\text{dose}} \\ \text{VEMP}_1 \times 10 \text{ m}^3 \times (24,45 F_c / \text{P.M.}) \times 10^{-6} & \leftrightarrow & 10 \text{ m}^3 \\ \text{VEMP}_2 \text{ ppm} & \leftrightarrow & 10^6 \text{ m}^3 \end{array}$$

$$\text{VEMP}_2 \text{ ppm} = \text{VEMP}_{\text{mg/m}^3} \times (24,45 \times F_c / \text{P.M.})$$

$$\text{VEMP}_2 \text{ ppm} = (\text{VEMP}_{\text{mg/m}^3} \times 24,45 / \text{P.M.}) \times F_c$$

$$\text{VEMP}_2 \text{ ppm} = \text{VEMP}_1 \text{ ppm} \times F_c$$

$$\text{VEMP}_2 = \text{VEMP}_1 \times (P_1/P_2) \times (T_2/T_1) \quad \text{où les VEMP's sont en ppm}$$

Cette équation apparaît dans les directives de OSHA et de NIOSH. Ce nouveau VEMP est le VEMP dans les conditions normales de température et de pression multiplié par un facteur (F_c) qui correspond au rapport des densités de l'air pour ces deux milieux ou si on préfère au rapport des températures et des pressions établi à partir de la loi des gaz. Il est important de comprendre qu'un VEMP massique constant implique un VEMP ppm variable suivant les conditions de température et de pression lorsqu'on considère la dose invariable comme hypothèse de travail.

Dans l'exemple 2 de l'article de Stephenson et Lillquist, le tableau III devrait se présenter d'après moi de la façon suivante et ce afin que toutes les données soient consistantes et puissent se rattacher à l'idée de dose qui doit être invariable selon toutes les conditions.

	Site d'échantillonnage Concentration	TWA ACGIH Concentration	VEMP-TWA Concentration
Conditions # 2 (670 mm, 306°K)	113 ppm 350 mg/m ³	116 ppm 360 mg/m ³	
Conditions # 1 (760 mm, 298°K)	97 ppm 350 mg/m ³	100 ppm 360 mg/m ³	

En résumé, les VEMPs exprimés en mg/m³ ne doivent jamais être corrigés par contre ceux en ppm le devraient suivant les conditions afin de respecter l'hypothèse d'invariabilité de la dose. Il faut donc comparer directement la concentration recueillie en mg/m³ à celle du VEMP par contre si on travaille en ppm on peut :

- calculer le TWA en ppm dans les conditions du site et le comparer au VEMP en ppm corrigé pour les conditions du site à l'aide du rapport des températures et des pressions;
- convertir la concentration recueillie en mg/m³ ou en ppm en concentration ppm dans les conditions NTP à l'aide de la relation (1) et comparer directement cette dernière au VEMP en ppm pour les conditions NTP.

Exemple :

Le travailleur de l'exemple précédent dans les conditions du site # 2 inspirera donc une dose de 3500 mg en 8 heures. Dans les conditions normales de température et de pression, ce travailleur devrait inspirer la même dose i.e. une concentration de 350 mg/m³ qui serait équivalente à une concentration de 97 ppm dans ces conditions.

$$\begin{aligned} \text{TWA ppm} &= \text{TWA mg/m}^3 \times 24,45 / 88,15 \\ \text{TWA ppm} &= 350 \text{ mg/m}^3 \times 24,45 / 88,15 \\ \text{TWA ppm} &= 97 \text{ ppm} \end{aligned}$$

D'après l'IRSST le volume échantillonné de 10L (0,02 L/min x 60min/h x 8h) aurait été rapporté dans les conditions NTP de la façon suivante comme indiquée dans le guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail (4) :

$$\begin{aligned} P_n V_n / T_n &= P_\epsilon V_\epsilon / T_\epsilon \\ 760 \text{ torr} \times V_n / 298 \text{ }^\circ\text{K} &= 670 \text{ Torr} \times 10 \text{ L} / 306 \text{ }^\circ\text{K} \end{aligned}$$

$$V_n = 0,8585 * 10 \text{ L}$$
$$V_n = 8,585 \text{ L}$$

Ce qui aurait donné une concentration de $407,7 \text{ mg/m}^3$ $\{3,5 \text{ mg} / (8,585 \text{ L} \times 1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ L})\}$: une concentration qui dépasse la norme de 360 mg/m^3 alors qu'il est évident que la norme dans les conditions du site était respectée.

Conclusion

L'hygiéniste industriel ou toute personne attirée voulant vérifier la conformité à une norme doit trouver, dans la réglementation qu'il désire appliquer, ce qui représentent les normes i.e. des doses ou des concentrations. Ces deux approches qui semblent identiques, ne le sont pas et permettent des expositions différentes des travailleurs en fonction de l'élévation et de la température. L'approche de dose peut être difficile à concevoir pour certains puisqu'elle semble défier un concept voulant que les concentrations en ppm ne changent pas en fonction de l'élévation ou de la température. Cette approche ne viole pas ce principe mais montre que pour exposer un travailleur, inspirant un volume de 10 m^3 en 8 heures, à une même dose dans différentes conditions les concentrations permises doivent être ajustées en fonction du volume molaire dans les conditions du site.

Bibliographie:

1. Stephenson, Dale J., Lillquist, Dean R., The Effects of Temperature and Pressure on Airborne Exposure Concentrations when Performing Compliance Evaluations using ACGIH VEMPs and OSHA PELs, Applied Occ. and Environmental Hygiene Journal, Vol 16 (4): 482-486, 2001.
2. Occupational Safety and Health Administration, OSHA Technical Manual (section II: chapitre 1 (Calculations), pp32-33.
3. Leidel, N.A., Busch, K.A., et Lynch, J. R., Occupational Exposure Sampling Strategy Manual, NIOSH, Cincinnati, Ohio, 1977.
4. Guide technique de l'IRSST, Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail, IRSST septembre 1994.

Annexe B – Calcul des erreurs

Développement d'une relation permettant de calculer les erreurs commises lors du calcul des concentrations pour différentes approches

Définitions :

$Q_{\text{éch désiré}}$: Débit d'échantillonnage désiré sur le site d'échantillonnage

$Q_n \text{ désiré}$: Valeur normalisé à TPN du débit désiré sur le site d'échantillonnage

$Q_{\text{éch}}$: Débit réel lors de l'échantillonnage

Δt : durée de l'échantillonnage

ΔM récoltée : masse recueillie sur le filtre

$C_{\text{réelle}}$: Concentration dans l'air lors de l'échantillonnage

$C_{\text{mesurée}}$: Concentration calculée avec la masse récoltée selon la réglementation et la valeurs de débit que l'utilisateur croît avoir obtenu sur le site d'échantillonnage.

C_{tlv} : Concentration exacte qui aurait due être calculée selon la masse récoltée et selon ce que représente le VEMP : dose ou concentration

Évaluation de l'erreur selon l'approche des concentrations permmissibles

$$C_{\text{mesurée}} : \Delta M_{\text{récoltée}} / Q_n \text{ désiré} \cdot \Delta t$$

$$C_{\text{mesurée}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{réel éch}} \cdot \Delta t / Q_n \text{ désiré} \cdot \Delta t \quad \text{car} \quad \Delta M_{\text{récoltée}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{réel éch}} \cdot \Delta t$$

$$C_{\text{mesurée}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{réel éch}} / Q_n \text{ désiré}$$

$$C_{\text{tlv}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{éch désiré}} \cdot \Delta t / Q_n \text{ désiré} \cdot \Delta t$$

$$C_{\text{tlv}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{éch désiré}} / Q_n \text{ désiré}$$

$$\Delta C / C_{\text{tlv}} (\%) : 100\% \cdot (C_{\text{mesurée}} - C_{\text{tlv}}) / C_{\text{tlv}}$$

$$\Delta C / C_{\text{tlv}} (\%) : 100\% \cdot ((C_{\text{mesurée}} / C_{\text{tlv}}) - 1)$$

$$\Delta C / C_{\text{tlv}} (\%) : 100\% \cdot (((C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{réel éch}} / Q_n \text{ désiré}) / (C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{éch désiré}} / Q_n \text{ désiré})) - 1)$$

$$\Delta C / C_{\text{tlv}} (\%) : 100\% \cdot ((Q_{\text{réel éch}} / Q_{\text{éch désiré}}) - 1)$$

Évaluation de l'erreur selon l'approche des doses permmissibles

$$C_{\text{mesurée}} : \Delta M_{\text{récoltée}} / Q_{\text{éch désiré}} \cdot \Delta t$$

$$C_{\text{mesurée}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{réel éch}} \cdot \Delta t / Q_{\text{éch désiré}} \cdot \Delta t \quad \text{car} \quad \Delta M_{\text{récoltée}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{réel éch}} \cdot \Delta t$$

$$C_{\text{mesurée}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{réel éch}} / Q_{\text{éch désiré}}$$

$$C_{\text{tlv}} : C_{\text{réelle}} \cdot Q_{\text{éch désiré}} \cdot \Delta t / Q_{\text{éch désiré}} \cdot \Delta t$$

$$C_{\text{tlv}} : C_{\text{réelle}}$$

$$\Delta C / C_{\text{tlv}} (\%) : 100\% \cdot (C_{\text{mesurée}} - C_{\text{tlv}}) / C_{\text{tlv}}$$

$$\Delta C / C_{\text{réelle}} (\%) : 100\% \cdot (C_{\text{mesurée}} - C_{\text{réelle}}) / C_{\text{réelle}}$$

$$\Delta C / C_{\text{réelle}} (\%) : 100\% \cdot ((C_{\text{mesurée}} / C_{\text{réelle}}) - 1)$$

$$\Delta C / C_{\text{réelle}} (\%) : 100\% \cdot ((Q_{\text{réel éch}} / Q_{\text{éch désiré}}) - 1)$$

Que ce soit selon une approche de concentrations permmissibles ou selon une approche de doses permmissibles, les erreurs commises seront les mêmes lors des calculs comme le montrent les relations précédentes.

Annexe C - Cas particulier (Milieu à 35°C)

L'ajustement dans des conditions normales des pompes à 1,7 L/min à l'aide d'un débitmètre lui aussi étalonné dans des conditions normales générera les erreurs données au tableau 1. Ces erreurs pourraient atteindre presque 4 %.

Étalonnage dans des conditions normales				
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	100* $\Delta C/C_{réelle}$
Massique	Fil chaud	1,76	1,70	3,4
	À orifice	1,76	1,70	3,4
	Rotamètre	1,76	1,70	3,4
	À film de savon	1,76	1,70	3,4
Volumique	Fil chaud	1,70	1,70	0,0
	À orifice	1,70	1,70	0,0
	Rotamètre	1,70	1,70	0,0
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Mixte	Fil chaud	1,73	1,70	1,7
	À orifice	1,73	1,70	1,7
	Rotamètre	1,73	1,70	1,7
	À film de savon	1,73	1,70	1,7

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 1 : Ajustement du débit à 1,7L/min et débitmètre étalonné à TPN

Le tableau 2 donne les erreurs lors du calcul des concentrations qui seraient produites pour un débitmètre affichant ses réponses dans les conditions standard. Dans ce cas les erreurs pourraient atteindre 13%.

Étalonnage dans des conditions normales				
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	100* $\Delta C/C_{réelle}$
Massique	Fil chaud	1,92	1,70	12,8
	À orifice	1,84	1,70	8,0
	Rotamètre	1,84	1,70	8,0
	À film de savon	1,76	1,70	3,4
Volumique	Fil chaud	1,86	1,70	9,2
	À orifice	1,78	1,70	4,5
	Rotamètre	1,78	1,70	4,5
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Mixte	Fil chaud	1,89	1,70	11,0
	À orifice	1,81	1,70	6,2
	Rotamètre	1,81	1,70	6,2
	À film de savon	1,73	1,70	1,7

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 2 : Ajustement du débit à 1,7 L/min et débitmètre étalonné dans des conditions standards

Le tableau 3 donne les erreurs sur les concentrations qui seraient produites lorsqu'un débitmètre étalonné dans les conditions normales serait ajusté au débit équivalent de 1,7 L/min dans les conditions normales i.e. 1,64 L/min tandis que le tableau 4 donne ces erreurs mais pour un débitmètre étalonné dans les conditions standards.

Étalonnage dans des conditions normales				
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	100* $\Delta C/C_{réelle}$
Massique	Fil chaud	1,70	1,70	0,0
	À orifice	1,70	1,70	0,0
	Rotamètre	1,70	1,70	0,0
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Volumique	Fil chaud	1,64	1,70	-3,2
	À orifice	1,64	1,70	-3,2
	Rotamètre	1,64	1,70	-3,2
	À film de savon	1,64	1,70	-3,2
Mixte	Fil chaud	1,67	1,70	-1,6
	À orifice	1,67	1,70	-1,6
	Rotamètre	1,67	1,70	-1,6
	À film de savon	1,67	1,70	-1,6

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\% ((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\% ((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 3 : Ajustement à 1,64 L/min avec un débitmètre étalonné à TPN

Pour le cas présent, les erreurs produites varient pour les différentes situations entre 0 et 13 %. L'utilisation du débit équivalent plutôt que de la valeur désirée du débit, n'affecte pas l'ordre de grandeur des erreurs commises mais transforme les sur-estimations en sous-estimations. Les erreurs ont été réduites lorsque le débitmètre utilisé affichait des débits dans les mêmes conditions que celles de l'étalonnage.

Étalonnage dans des conditions normales				
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	100* $\Delta C/C_{réelle}$
Massique	Fil chaud	1,86	1,70	9,2
	À orifice	1,78	1,70	4,5
	Rotamètre	1,78	1,70	4,5
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Volumique	Fil chaud	1,80	1,70	5,6
	À orifice	1,72	1,70	1,1
	Rotamètre	1,72	1,70	1,1
	À film de savon	1,64	1,70	-3,2
Mixte	Fil chaud	1,83	1,70	7,4
	À orifice	1,75	1,70	2,8
	Rotamètre	1,75	1,70	2,8
	À film de savon	1,67	1,70	-1,6

Tableau 4 : Ajustement à 1,64 L/min avec un débitmètre étalonné dans des conditions standards

Annexe D - Cas particulier (Milieu à 0°C)

L'ajustement dans des conditions normales des pompes à 1,7 L/min à l'aide d'un débitmètre lui aussi étalonné dans des conditions normales générera les erreurs données au tableau 5 et pourront atteindre presque 9 %.

Étalonnage dans des conditions normales				
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	100*ΔC/C _{réelle}
Massique	Fil chaud	1,56	1,70	-8,4
	À orifice	1,56	1,70	-8,4
	Rotamètre	1,56	1,70	-8,4
	À film de savon	1,56	1,70	-8,4
Volumique	Fil chaud	1,70	1,70	0,0
	À orifice	1,70	1,70	0,0
	Rotamètre	1,70	1,70	0,0
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Mixte	Fil chaud	1,63	1,70	-4,3
	À orifice	1,63	1,70	-4,3
	Rotamètre	1,63	1,70	-4,3
	À film de savon	1,63	1,70	-4,3

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 5 : Ajustement du débit à 1,7L/min et débitmètre étalonné à TPN

Le tableau 6 donne les erreurs lors du calcul des concentrations qui seraient produites pour un débitmètre affichant ses réponses dans les conditions standards. Les erreurs atteignent presque 10 %.

Étalonnage dans des conditions normales				
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	100*ΔC/C _{réelle}
Massique	Fil chaud	1,70	1,70	0,0
	À orifice	1,63	1,70	-4,3
	Rotamètre	1,63	1,70	-4,3
	À film de savon	1,56	1,70	-8,4
Volumique	Fil chaud	1,86	1,70	9,2
	À orifice	1,78	1,70	4,5
	Rotamètre	1,78	1,70	4,5
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Mixte	Fil chaud	1,78	1,70	4,5
	À orifice	1,70	1,70	0,0
	Rotamètre	1,70	1,70	0,0
	À film de savon	1,63	1,70	-4,3

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 6 : Ajustement du débit à 1,7 L/min et débitmètre étalonné dans des conditions standards

Le tableau 7 donne les erreurs sur les concentrations qui seraient produites lorsqu'un débitmètre étalonné dans les conditions normales serait ajusté au débit équivalent de 1,7 L/min dans les

conditions normales i.e. 1,86 L/min tandis que le tableau 8 donne ces erreurs mais pour un débitmètre étalonné dans les conditions standards.

Étalonnage dans des conditions normales				
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	100* $\Delta C/C_{réelle}$
Massique	Fil chaud	1,70	1,70	0,0
	À orifice	1,70	1,70	0,0
	Rotamètre	1,70	1,70	0,0
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Volumique	Fil chaud	1,86	1,70	9,2
	À orifice	1,86	1,70	9,2
	Rotamètre	1,86	1,70	9,2
	À film de savon	1,86	1,70	9,2
Mixte	Fil chaud	1,78	1,70	4,5
	À orifice	1,78	1,70	4,5
	Rotamètre	1,78	1,70	4,5
	À film de savon	1,78	1,70	4,5

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 7 : Ajustement à 1,86 L/min avec un débitmètre étalonné à TPN

Étalonnage dans des conditions normales				
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	100* $\Delta C/C_{réelle}$
Massique	Fil chaud	1,86	1,70	9,2
	À orifice	1,78	1,70	4,5
	Rotamètre	1,78	1,70	4,5
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Volumique	Fil chaud	2,03	1,70	19,2
	À orifice	1,94	1,70	14,0
	Rotamètre	1,94	1,70	14,0
	À film de savon	1,86	1,70	9,2
Mixte	Fil chaud	1,94	1,70	14,0
	À orifice	1,86	1,70	9,2
	Rotamètre	1,86	1,70	9,2
	À film de savon	1,78	1,70	4,5

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 8 : Ajustement à 1,86 L/min avec un débitmètre étalonné dans des conditions standards

Pour le cas présent, les erreurs produites varient pour les différentes situations entre 0 et 20%. L'utilisation du débit équivalent plutôt que de la valeur désirée du débit, n'affecte pas l'ordre de grandeur des erreurs commises mais fait tendre les résultats vers les surévaluations. Lorsque des corrections sont effectuées, les erreurs peuvent devenir importantes et atteindre près de 20%. Les erreurs ont été réduites lorsque le débitmètre utilisé affichait des débits dans les mêmes conditions que celles de l'étalonnage.

Annexe E - Cas particuliers (mines)

Lorsque les pompes ne peuvent être étalonnées dans les conditions d'utilisation comme dans certaines mines et lorsqu'on ne connaît pas le mode de compensation de la pompe, un utilisateur n'a d'autres ressources que d'évaluer l'erreur commise sur les volumes d'échantillonnage nécessaires aux calculs des concentrations. Afin d'estimer de façon globale, l'ordre de grandeur de ces erreurs, nous calculerons pour le cas extrême d'une mine située à une profondeur d'environ 2134 m (environ 7000 pi), les erreurs produites par l'utilisation de certaines pompes et débitmètres. Ces erreurs seront évaluées pour les mêmes méthodologies mentionnées dans les cas précédents pour des étalonnages en surface et aussi dans la mine. En plus sera discutée, la possibilité d'utiliser une enceinte d'étalonnage pour effectuer l'ajustement des pompes en surface. Les erreurs seront donc évaluées pour des débitmètres étalonnés dans des conditions standards et d'autres dans des conditions normales pour les situations suivantes :

- l'utilisateur effectue l'étalonnage en surface sans considérations sur le mode de compensation de la pompe ou le genre de débitmètre qu'il utilise et ajuste le débit de la pompe jusqu'à ce que le débitmètre affiche 1,7 L/min avec un débitmètre étalonné à TPN et l'autre dans les conditions standards,
- l'utilisateur effectue l'étalonnage en surface sans considérations sur le mode de compensation de la pompe ou le genre de débitmètre qu'il utilise et ajuste le débit de la pompe jusqu'à ce que le débitmètre affiche le débit équivalent à 1,7 L/min qu'il a calculé pour les conditions d'étalonnage à l'aide de l'équation des débits équivalents pour un débitmètre étalonné à TPN et pour un autre étalonné dans les conditions standards,
- l'utilisateur effectue l'étalonnage dans la mine et sans considérations sur le mode de compensation de la pompe ou le genre de débitmètre qu'il utilise et ajuste le débit de la pompe jusqu'à ce que le débitmètre affiche 1,7 L/min avec un débitmètre étalonné à TPN et l'autre dans les conditions standards,
- l'utilisateur effectue l'étalonnage dans la mine sans considérations sur le mode de compensation de la pompe ou le genre de débitmètre qu'il utilise et ajuste le débit de la pompe jusqu'à ce que le débitmètre affiche le débit équivalent à 1,7 L/min qu'il a calculé pour les conditions d'étalonnage à l'aide de l'équation des débits équivalents,
- l'utilisateur effectue l'étalonnage en surface sans considérations sur le mode de compensation de la pompe ou le genre de débitmètre qu'il utilise à l'aide d'une enceinte simulant la pression dans une mine en ajustant dans un cas le débit de la pompe jusqu'à ce que le débitmètre affiche 1,7 L/min et dans l'autre cas jusqu'à ce que le débitmètre affiche le débit équivalent à 1,7 dans les conditions de l'enceinte.

Supposons qu'on désire utiliser des cyclones pour échantillonner des poussières respirables dans une mine à 2134 m (environ 7000 pi) de profondeur. Le débit à l'échantillonnage devra être de 1,7 L/min pour répondre à la définition de poussières respirables. Afin de faciliter les calculs, on suppose que l'air dans la mine est sec ($W=0, P_{\text{vap}} = 0$ mm) et que les conditions normales d'étalonnage des débitmètres sont normales i.e. 760 mm de Hg et 298 °K.

Température à 7000 pi (2,1341 km) de profondeur :

$$T = T_a - \beta h$$

$$T = 15^\circ\text{C} - 9,75^\circ\text{C/km} (- 2,1341 \text{ km})$$

$$T = 35,8^\circ\text{C} \text{ ou } 308,8^\circ\text{K}$$

Pression dans la mine

$$P = P_a (1 - \beta h / T_a)^{gM/R\beta}$$

$$P = 101,3 \text{ kPa} (1 - 9,75^\circ\text{K/km} * -2,1341 \text{ km} / 288^\circ\text{K})^{9,8 \text{ m/sec}^2 * 0,02896 \text{ kg/mole} / (8,314 \text{ J/mole}^\circ\text{K} * 9,75^\circ\text{K/km})}$$

$$P = 129 \text{ kPa} \text{ ou } 967,2 \text{ mm de Hg}$$

Étalonnage en surface :

Les paramètres suivants sont propres à l'étalonnage en surface :

$Q_{\text{éch}} \text{ (L/min)}$	$= 1,7$	$T_{\text{éta}} \text{ (}^\circ\text{K)}$	$= 298$	$T_n \text{ (}^\circ\text{K)}$	$= 298$
$T_{\text{éch}} \text{ (}^\circ\text{K)}$	$= 308,8$	$P_{\text{éta}} \text{ (mm de Hg)}$	$= 760$	$P_n \text{ (mm de Hg)}$	$= 760$
$P_{\text{éch}} \text{ (mm de Hg)}$	$= 967,2$	$P_{\text{vap}} \text{ (mm de Hg)}$	$= 0$		

L'ajustement dans des conditions normales des pompes à 1,7 L/min à l'aide d'un débitmètre lui aussi étalonné dans des conditions normales générera les erreurs données au tableau 9 et pourront atteindre presque 19 %.

Pompe	Débitmètre	Étalonnage en surface	Débitmètre à 1,7 aff:TPN	
		Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	$100 * \Delta C / C_{\text{réelle}}$
Massique	Fil chaud	1,38	1,70	-18,6
	À orifice	1,38	1,70	-18,6
	Rotamètre	1,38	1,70	-18,6
	À film de savon	1,38	1,70	-18,6
Volumique	Fil chaud	1,70	1,70	0,0
	À orifice	1,70	1,70	0,0
	Rotamètre	1,70	1,70	0,0
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Mixte	Fil chaud	1,53	1,70	-9,8
	À orifice	1,53	1,70	-9,8
	Rotamètre	1,53	1,70	-9,8
	À film de savon	1,53	1,70	-9,8

$$100\% * \Delta C / C_{\text{réelle}} = 100\% ((C_{\text{mesurée}} - C_{\text{réelle}}) / C_{\text{réelle}}) = 100\% ((Q_{\text{éch}} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 9 : Ajustement du débit à 1,7L/min et débitmètre étalonné à TPN

Le tableau 10 donne les erreurs lors du calcul des concentrations qui seraient produites pour un débitmètre affichant ses réponses dans les conditions standards. Les erreurs atteignent encore environ 19 %.

Pompe	Débitmètre	Étalonnage en surface	Débitmètre à 1,7 aff:standard	100*ΔC/C _{réelle}
		Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	
Massique	Fil chaud	1,51	1,70	-11,1
	À orifice	1,45	1,70	-14,9
	Rotamètre	1,45	1,70	-14,9
	À film de savon	1,38	1,70	-18,6
Volumique	Fil chaud	1,86	1,70	9,2
	À orifice	1,78	1,70	4,5
	Rotamètre	1,78	1,70	4,5
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Mixte	Fil chaud	1,67	1,70	-1,5
	À orifice	1,60	1,70	-5,7
	Rotamètre	1,60	1,70	-5,7
	À film de savon	1,53	1,70	-9,8

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 10 : Ajustement du débit à 1,7 L/min et débitmètre étalonné dans des conditions standards

Le tableau 11 donne les erreurs sur les concentrations qui seraient produites lorsqu'un débitmètre étalonné dans les conditions normales serait ajusté au débit équivalent de 1,7 L/min dans les conditions normales i.e. 2,1 L/min tandis que le tableau 12 donne ces erreurs mais pour un débitmètre étalonné dans les conditions standards .

Pompe	Débitmètre	Étalonnage en surface	Débitmètre à 2,1 aff:tpn	100*ΔC/C _{réelle}
		Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	
Massique	Fil chaud	1,70	1,70	0,0
	À orifice	1,70	1,70	0,0
	Rotamètre	1,70	1,70	0,0
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Volumique	Fil chaud	2,09	1,70	22,8
	À orifice	2,09	1,70	22,8
	Rotamètre	2,09	1,70	22,8
	À film de savon	2,09	1,70	22,8
Mixte	Fil chaud	1,88	1,70	10,8
	À orifice	1,88	1,70	10,8
	Rotamètre	1,88	1,70	10,8
	À film de savon	1,88	1,70	10,8

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 11 : Ajustement à 2,1 L/min avec un débitmètre étalonné à TPN

Pompe	Débitmètre	Étalonnage en surface	Débitmètre à 2,1 aff:standard	$100 * \Delta C / C_{réelle}$
		Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	
Massique	Fil chaud	1,86	1,70	9,2
	À orifice	1,78	1,70	4,5
	Rotamètre	1,78	1,70	4,5
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Volumique	Fil chaud	2,28	1,70	34,1
	À orifice	2,18	1,70	28,3
	Rotamètre	2,18	1,70	28,3
	À film de savon	2,09	1,70	22,8
Mixte	Fil chaud	2,06	1,70	21,0
	À orifice	1,97	1,70	15,8
	Rotamètre	1,97	1,70	15,8
	À film de savon	1,88	1,70	10,8

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle}) / C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 12 : Ajustement à 2,1 L/min avec un débitmètre étalonné dans des conditions standards

Pour le cas présent, les erreurs produites varient pour les différentes situations entre 0 et 35 %. L'utilisation du débit équivalent plutôt que de la valeur désirée du débit, fait passer les résultats de sous-évaluations à surévaluations. Lorsque des corrections sont effectuées, les erreurs peuvent devenir importantes et atteindre près de 34 %. Les erreurs ont été réduites lorsque le débitmètre utilisé affichait des débits dans les mêmes conditions que celles de l'étalonnage.

Étalonnage dans la mine :

Les paramètres suivants sont propres à l'étalonnage dans la mine :

$$\begin{array}{llll}
 Q_{éch} \text{ (L/min)} & = 1,7 & T_{éta} \text{ (°K)} & = 308,8 & T_n \text{ (°K)} & = 298 \\
 T_{éch} \text{ (°K)} & = 308,8 & P_{éta} \text{ (mm de Hg)} & = 967,2 & P_n \text{ (mm de Hg)} & = 760 \\
 P_{éch} \text{ (mm de Hg)} & = 967,2 & P_{vap} \text{ (mm de Hg)} & = 0 & &
 \end{array}$$

L'ajustement dans des conditions normales des pompes à 1,7 L/min à l'aide de débitmètres lui aussi étalonné dans des conditions normales générera les erreurs données au tableau 13 et pourront atteindre environ 19 %.

Pompe	Débitmètre	Étalonnage dans la mine		100* $\Delta C/C_{réelle}$
		Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	
Massique	Fil chaud	1,38	1,70	-18,6
	À orifice	1,53	1,70	-9,8
	Rotamètre	1,53	1,70	-9,8
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Volumique	Fil chaud	1,38	1,70	-18,6
	À orifice	1,53	1,70	-9,8
	Rotamètre	1,53	1,70	-9,8
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Mixte	Fil chaud	1,38	1,70	-18,6
	À orifice	1,53	1,70	-9,8
	Rotamètre	1,53	1,70	-9,8
	À film de savon	1,70	1,70	0,0

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle})/C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 13 : Ajustement du débit à 1,7L/min et débitmètre étalonné à TPN

Pompe	Débitmètre	Étalonnage dans la mine		100* $\Delta C/C_{réelle}$
		Débit réel d'échantillonnage (L/min)	Débit d'échantillonnage désiré (L/min)	
Massique	Fil chaud	1,51	1,70	-11,1
	À orifice	1,60	1,70	-5,7
	Rotamètre	1,60	1,70	-5,7
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Volumique	Fil chaud	1,51	1,70	-11,1
	À orifice	1,60	1,70	-5,7
	Rotamètre	1,60	1,70	-5,7
	À film de savon	1,70	1,70	0,0
Mixte	Fil chaud	1,51	1,70	-11,1
	À orifice	1,60	1,70	-5,7
	Rotamètre	1,60	1,70	-5,7
	À film de savon	1,70	1,70	0,0

$$100\% * \Delta C / C_{réelle} = 100\%((C_{mesurée} - C_{réelle})/C_{réelle}) = 100\%((Q_{éch} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 14 : Ajustement du débit à 1,7 L/min et débitmètre étalonné dans des conditions standards

Un ajustement du débit dans la mine au débit équivalent dans les conditions d'étalonnage équivaut au cas précédent puisque le débit équivalent dans les conditions d'étalonnage du débit d'échantillonnage désiré de 1,7 L/min est 1,7 L/min. Les tableaux des erreurs seraient donc les mêmes.

Lors des étalonnages dans la mine, les erreurs produites varient pour les différentes situations entre 0 et 19 %.

Lorsque le mécanisme de compensation des pompes est inconnu, l'intervenant devrait obligatoirement étalonner ses pompes dans les conditions d'échantillonnage surtout si les pompes sont utilisées avec des instruments qui doivent être opérés à des débits précis et tenir compte de l'affichage des débitmètres. Sans tenir compte des débitmètres, si les pompes possédant les mécanismes de compensation discutés auparavant sont étalonnées en surface, l'erreur maximale

produite et reliée au débit peut atteindre +35 %, tandis qu'elle atteint -19 % lors d'un étalonnage dans la mine. Il faut rappeler que certaines pompes de modèles courants ont des mécanismes de compensation différents de ceux-ci.

S'il est impossible de procéder à un étalonnage dans la mine, nous recommandons d'étalonner les pompes en simulant les conditions de la mine en surface à l'aide d'un système approprié. Un tel système devrait être capable de reproduire les conditions de température et de pression à l'aide d'un système de valves contrôlant une entrée et une sortie d'air dans une enceinte fermée. Toutefois, un tel système qui ne simulerait que la pression et où on considérerait les équations propres aux débitmètres, induirait lors de l'échantillonnage les erreurs indiquées au tableau 9 lorsque le débit d'étalonnage serait ajusté à 1,64 soit le débit équivalent de 1,7 L/min dans les conditions d'étalonnage du système. Ces erreurs pourraient être acceptables mais entraîneraient une sous-évaluation des concentrations.

Étalonnage en surface avec simulation de pression et ajustement de $Q_{\text{éta}}$ à 1,64 L/min					
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage	Débit d'échantillonnage théorique	Q_n	$100 * \Delta C / C_{\text{réelle}}$
Massique	Fil chaud	1,70	1,7	2,1	0,0
	À orifice	1,70	1,7	2,1	0,0
	Rotamètre	1,70	1,7	2,1	0,0
	À film de savon	1,70	1,7	2,1	0,0
Volumique	Fil chaud	1,64	1,7	2,1	-3,5
	À orifice	1,64	1,7	2,1	-3,5
	Rotamètre	1,64	1,7	2,1	-3,5
	À film de savon	1,64	1,7	2,1	-3,5
Mixte	Fil chaud	1,67	1,7	2,1	-1,8
	À orifice	1,67	1,7	2,1	-1,8
	Rotamètre	1,67	1,7	2,1	-1,8
	À film de savon	1,67	1,7	2,1	-1,8

$$100\% * \Delta C / C_{\text{réelle}} = 100\% ((C_{\text{mesurée}} - C_{\text{réelle}}) / C_{\text{réelle}}) = 100\% ((Q_{\text{éch}} / Q_n \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 15 : Étalonage par simulation de la pression en surface et ajustement à 1,64 L/min

Par contre, en ajustant le débit d'étalonnage à une valeur légèrement supérieure soit 1,7 L/min, les concentrations seraient surévaluées et les erreurs produites seraient du même ordre de grandeur. Le tableau 16 résume les erreurs qui seraient ainsi produites.

Étalonnage en surface avec simulation de pression et ajustement de $Q_{\text{éta}}$ à 1,7 L/min					
Pompe	Débitmètre	Débit réel d'échantillonnage	Débit d'échantillonnage théorique	Q_n	$100 * \Delta C / C_{\text{réelle}}$
Massique	Fil chaud	1,8	1,7	2,1	3,6
	À orifice	1,8	1,7	2,1	3,6
	Rotamètre	1,8	1,7	2,1	3,6
	À film de savon	1,8	1,7	2,1	3,6
Volumique	Fil chaud	1,7	1,7	2,1	0,0
	À orifice	1,7	1,7	2,1	0,0
	Rotamètre	1,7	1,7	2,1	0,0
	À film de savon	1,7	1,7	2,1	0,0
Mixte	Fil chaud	1,7	1,7	2,1	1,8
	À orifice	1,7	1,7	2,1	1,8
	Rotamètre	1,7	1,7	2,1	1,8
	À film de savon	1,7	1,7	2,1	1,8

$$\Delta C = 100\% ((Q_{\text{éch}} / Q_{\text{éch}} \text{ désiré}) - 1)$$

Tableau 16 : Étalonage par simulation de pression et ajustement à 1,7 L/min

Pompe	$Q_{\acute{e}ta}$	Débitmètre	$Q_{d\acute{e}bm}$	Équation combiné ($Q_{d\acute{e}bm}$)	Q_n (Si conditions d'étalonnage du débitmètre correspondent à TPN)
Massique	$Q_{\acute{e}ch} \frac{P_{\acute{e}ch} T_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ch} P_{\acute{e}ta}}$	Fil chaud	$Q_{\acute{e}ta} \frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}$	$Q_{\acute{e}ch} \frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}$	$Q_{d\acute{e}bm}$
		À orifice	$Q_{\acute{e}ta} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{\acute{e}ch} \frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \sqrt{\frac{T_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{d\acute{e}bm} \sqrt{\frac{T_n P_{\acute{e}ta}}{P_n T_{\acute{e}ta}}}$
		Rotamètre	$Q_{\acute{e}ta} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{\acute{e}ch} \frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \sqrt{\frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}} \frac{T_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta}}}$	$Q_{d\acute{e}bm} \sqrt{\frac{T_n P_{\acute{e}ta}}{P_n T_{\acute{e}ta}}}$
		À film de savon	$\frac{P_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}} Q_{\acute{e}ta}$	$\frac{T_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}} \frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} Q_{\acute{e}ch}$	$\frac{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_n}{P_n} Q_{d\acute{e}bm}$
Volumique	$Q_{\acute{e}ch}$	Fil chaud	$Q_{\acute{e}ta} \frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}$	$Q_{\acute{e}ch} \frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}$	$Q_{d\acute{e}bm} \frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta}}$
		À orifice	$Q_{\acute{e}ta} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{\acute{e}ch} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{d\acute{e}bm} \frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \sqrt{\frac{T_n T_{\acute{e}ta}}{P_n P_{\acute{e}ta}}}$
		Rotamètre	$Q_{\acute{e}ta} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{\acute{e}ch} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{d\acute{e}bm} \frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \sqrt{\frac{T_n T_{\acute{e}ta}}{P_n P_{\acute{e}ta}}}$
		À film de savon	$\frac{P_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}} Q_{\acute{e}ta}$	$\frac{P_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}} Q_{\acute{e}ch}$	$\frac{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}}{P_{\acute{e}ta}} \frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_n}{P_n} Q_{d\acute{e}bm}$
Mixte	$Q_{\acute{e}ch} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ch} T_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ch} P_{\acute{e}ta}}}$	Fil chaud	$Q_{\acute{e}ta} \frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}$	$Q_{\acute{e}ch} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ch} P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ch} T_{\acute{e}ta}}}$	$Q_{d\acute{e}bm} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta}}}$
		À orifice	$Q_{\acute{e}ta} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{\acute{e}ch} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{d\acute{e}bm} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_n}{P_n}}$
		Rotamètre	$Q_{\acute{e}ta} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta}}{T_{\acute{e}ta}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{\acute{e}ch} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_{d\acute{e}bm}}{P_{d\acute{e}bm}}}$	$Q_{d\acute{e}bm} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_n}{P_n}}$
		À film de savon	$\frac{P_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}} Q_{\acute{e}ta}$	$\frac{P_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ch}} \frac{T_{\acute{e}ta}}{P_{\acute{e}ta}}} Q_{\acute{e}ch}$	$\frac{P_{\acute{e}ta} - P_{vap}}{P_{\acute{e}ta}} \frac{T_n}{P_n} \sqrt{\frac{P_{\acute{e}ta} P_{\acute{e}ch}}{T_{\acute{e}ta} T_{\acute{e}ch}}} Q_{d\acute{e}bm}$

$Q_{\acute{e}ta}$: Débit d'étalonnage

$Q_{\acute{e}ch}$: Débit d'échantillonnage

Q_n : Débit équivalent à TPN de $Q_{\acute{e}ch}$

$Q_{d\acute{e}bm}$: Débit affiché par le débitmètre

$T_{\acute{e}ta}$: Température à l'étalonnage

$T_{\acute{e}ch}$: Température à l'échantillonnage

T_n : Température à TPN

$T_{d\acute{e}bm}$: Température d'étalonnage du déb

$P_{\acute{e}ta}$: Pression à l'étalonnage

$P_{\acute{e}ch}$: Pression à l'échantillonnage

P_n : Pression à TPN

$P_{d\acute{e}bm}$: Pression d'étalonnage du débitmètre