
**Analyse des gaz — Préparation des
mélanges de gaz pour étalonnage à
l'aide de méthodes volumétriques
dynamiques —**

Partie 6:

Orifices de débit critiques

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

*Gas analysis — Preparation of calibration gas mixtures using
dynamic methods —*

Part 6: Critical flow orifices

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7b26e676-d105-47a1-be00-3c9dd28c98f2/iso-6145-6-2017>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 6145-6:2017

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7b26e676-d105-47a1-be00-3c9dd28c98f2/iso-6145-6-2017>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2017, Publié en Suisse

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Ch. de Blandonnet 8 • CP 401
CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland
Tel. +41 22 749 01 11
Fax +41 22 749 09 47
copyright@iso.org
www.iso.org

Sommaire

Page

| | |
|--|-----------|
| Avant-propos..... | iv |
| 1 Domaine d'application | 1 |
| 2 Références normatives | 1 |
| 3 Termes et définitions | 2 |
| 4 Symboles | 4 |
| 5 Principe | 5 |
| 6 Calcul du débit massique et du débit volumique | 6 |
| 6.1 Généralités..... | 6 |
| 6.2 Calcul dans des conditions idéales..... | 7 |
| 6.2.1 Calcul du débit massique..... | 7 |
| 6.2.2 Calcul du débit volumique..... | 8 |
| 6.3 Calcul du débit massique en réalisant l'étalonnage du débit avec de l'azote pur..... | 8 |
| 6.4 Calcul de l'incertitude du débit..... | 9 |
| 6.4.1 Généralités..... | 9 |
| 6.4.2 Sources d'incertitude..... | 9 |
| 6.4.3 Estimation de l'incertitude..... | 10 |
| 7 Calcul de la fraction molaire et de la fraction volumique et évaluation de l'incertitude associée | 10 |
| 7.1 Généralités..... | 10 |
| 7.2 Calcul de la fraction molaire et de l'incertitude associée..... | 10 |
| 7.2.1 Cas des gaz purs dont la pureté $\geq 99,99\%$ | 10 |
| 7.2.2 Cas de pré-mélanges..... | 13 |
| 7.3 Remarques concernant l'incertitude associée à la fraction molaire..... | 15 |
| 8 Application à la préparation des mélanges de gaz | 15 |
| 8.1 Exemple de système de mélange..... | 15 |
| 8.2 Conditions de fonctionnement..... | 16 |
| 9 Étalonnage et vérification | 17 |
| 9.1 Généralités..... | 17 |
| 9.2 Étalonnage du système de mélange en débit..... | 17 |
| 9.3 Étalonnage du système de mélange avec des mélanges de gaz pour un gaz et une concentration spécifiques..... | 17 |
| 9.4 Vérification du système de mélange..... | 17 |
| Annexe A (informative) Exemple de calcul du coefficient isentropique, de la viscosité et du coefficient critique | 19 |
| Annexe B (informative) Calcul du débit massique et du débit volumique dans des conditions réelles | 21 |
| Annexe C (informative) Exemple de calcul de débit pour des orifices critiques à col toroïdal dans des conditions idéales et réelles | 23 |
| Annexe D (informative) Calcul du débit massique en réalisant l'étalonnage du débit avec de l'azote pur: exemples | 25 |
| Bibliographie | 27 |

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

(standards.iteh.ai)

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC) voir le lien suivant: www.iso.org/iso/fr/foreword.html.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 158, *Analyse des gaz*.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition (ISO 6145-6:2003) qui a fait l'objet d'une révision technique.

Une liste de toutes les parties de la série ISO 6145, se trouve sur le site de l'ISO.

Analyse des gaz — Préparation des mélanges de gaz pour étalonnage à l'aide de méthodes volumétriques dynamiques —

Partie 6: Orifices de débit critiques

1 Domaine d'application

Le présent document décrit une méthode de préparation dynamique de mélanges de gaz d'étalonnage, contenant au moins deux gaz (l'un d'eux étant généralement un gaz de complément), à partir de gaz purs ou de pré-mélanges de gaz à l'aide de systèmes à orifices critiques.

La méthode s'applique principalement à la préparation de mélanges de gaz non réactifs qui ne réagissent avec aucun des matériaux formant le circuit de gaz à l'intérieur du système à orifices critiques ou d'un équipement auxiliaire. Elle a le mérite de permettre la préparation de mélanges à plusieurs constituants aussi facilement que des mélanges à deux constituants si un nombre approprié d'orifices critiques est utilisé.

En choisissant des combinaisons appropriées d'orifices critiques et en utilisant des gaz purs, il est possible d'atteindre un rapport de dilution de 1×10^4 .

Bien qu'elle soit plus particulièrement applicable à la préparation de mélanges de gaz à la pression atmosphérique, cette méthode offre également la possibilité de préparer des mélanges de gaz d'étalonnage à des pressions supérieures à la pression atmosphérique. La pression amont devra être au moins deux fois plus élevée que la pression aval.

La gamme de débits couverte par le présent document s'étend de 1 ml/min à 10 l/min.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 6143, *Analyse des gaz — Méthodes comparatives pour la détermination et la vérification de la composition des mélanges de gaz pour étalonnage*

ISO 7504, *Analyse des gaz — Vocabulaire*

ISO 9300, *Mesure de débit de gaz au moyen de Venturi-tuyères en régime critique*

ISO 12963, *Analyse des gaz — Méthodes de comparaison pour la détermination de la composition des mélanges de gaz basées sur un ou deux points d'étalonnage*

ISO 16664, *Analyse des gaz — Manutention des gaz et des mélanges de gaz pour étalonnage — Lignes directrices*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 9300, l'ISO 7504 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1 orifice critique
orifice dont la configuration géométrique et les conditions d'utilisation sont telles que le débit au niveau du col est *critique* (3.12)

3.2 prise de pression à la paroi
orifice percé dans la paroi d'une tuyauterie de sorte que le bord de l'orifice soit arasé à la paroi intérieure de la tuyauterie

Note 1 à l'article: Cette prise de pression est réalisée de telle manière que la pression dans l'orifice soit égale à la pression statique en ce point de la tuyauterie du circuit.

3.3 pression statique
pression réelle d'un flux de gaz, qui peut être mesurée en reliant un manomètre à une prise de pression à la paroi

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

Note 1 à l'article: Le présent document utilise uniquement des valeurs de pression absolue.

3.4 pression d'arrêt
pression qui serait observée dans un gaz si le flux de gaz en circulation était ralenti par un procédé isentropique jusqu'à une vitesse nulle

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7b26e676-d105-47a1-be00-3c9dd28c98f2/iso-6145-6-2017>

Note 1 à l'article: Le présent document utilise uniquement des valeurs de pression absolue.

3.5 température d'arrêt
température qui serait observée dans un gaz si le flux de gaz en circulation était ralenti par un procédé isentropique jusqu'à une vitesse nulle

Note 1 à l'article: Le présent document utilise uniquement des valeurs de température absolue.

3.6 débit massique
 q_m
masse de gaz traversant l'orifice par unité de temps

3.7 débit molaire
 q_n
quantité de matière de gaz traversant l'orifice par unité de temps

3.8 débit volumique
 q_V
volume de gaz traversant l'orifice par unité de temps

3.9**nombre de Reynolds au col***Re*

paramètre sans dimension calculé à partir du débit et de la viscosité dynamique du gaz dans des conditions d'arrêt à l'entrée de l'orifice critique

Note 1 à l'article: La dimension caractéristique est prise égale au diamètre au col dans les conditions d'arrêt. Le nombre de Reynolds au col est donné par la formule:

$$Re = \frac{4(q_m)}{\pi \eta_0 d_N}$$

3.10**coefficient isentropique***γ*

rapport entre la variation relative de la pression et la variation relative de la masse volumique correspondante, dans une transformation adiabatique réversible (isentropique) élémentaire

Note 1 à l'article: Dans le cas d'un gaz réel, les forces qui s'exercent entre les molécules et le volume occupé par les molécules ont un effet significatif sur le comportement du gaz. Dans le cas d'un gaz parfait, les forces intermoléculaires et le volume des molécules peuvent être considérés comme négligeables.

3.11**coefficient de décharge***c*

rapport sans dimension du débit réel au débit idéal d'un gaz non visqueux qui serait obtenu en écoulement monodimensionnel isentropique dans les mêmes conditions d'arrêt à l'amont

Note 1 à l'article: Ce coefficient corrige les effets de viscosité et de courbure dans l'écoulement. Pour chaque type d'orifice critique et les conditions d'installation spécifiés dans le présent document, ce coefficient est fonction uniquement du nombre de Reynolds au col.

3.12**débit critique**

débit maximal à travers un orifice donné dans des conditions données en amont

Note 1 à l'article: Au débit critique, la vitesse au col est égale à la valeur locale de la vitesse du son (vitesse acoustique), vitesse à laquelle se propagent de petites perturbations de pression.

3.13**fonction critique***C**

fonction sans dimension qui caractérise les propriétés thermodynamiques d'un écoulement monodimensionnel isentropique entre l'entrée et le col d'un orifice

Note 1 à l'article: Elle est fonction de la nature du gaz, de la *pression d'arrêt* (3.4) et de la *température d'arrêt* (3.5).

3.14**coefficient critique d'un gaz réel***C_R*

variante de la fonction critique, plus pratique d'emploi pour les mélanges de gaz

Note 1 à l'article: Ce coefficient peut se déduire de la fonction critique par la formule:

$$C_R = C^* \sqrt{z_0}$$

3.15 rapport de pression critique

r^*
rapport de la pression statique au col de l'orifice critique à la pression d'arrêt, pour lequel le débit massique de gaz à travers l'orifice critique est maximal

Note 1 à l'article: Ce rapport est calculé conformément à la formule donnée à l'Article 5.

$$r^* = \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)_{crit} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

3.16 facteur de compressibilité

Z_0
facteur de correction exprimant numériquement le fait que le comportement d'un gaz réel, dans des conditions de pression et de température d'arrêt, s'écarte de la loi des gaz parfaits

Note 1 à l'article: Il est défini par la formule suivante:

$$Z_0 = \frac{p_0 M}{\rho_0 R T_0}$$

Note 2 à l'article: où R est la constante universelle des gaz, égale à 8,314 4621 J/(mol·K).

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

4 Symboles

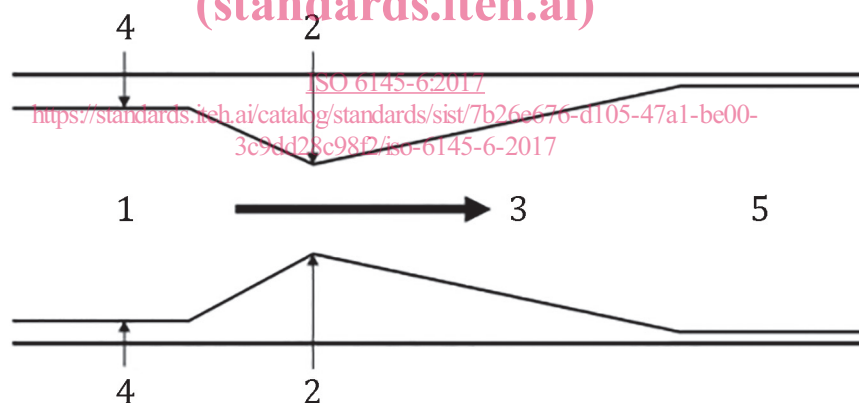
| Symbole | Définition | Unité SI |
|-----------|---|-------------------|
| A | aire au col de l'orifice critique | m ² |
| a, b | coefficients de l'équation du coefficient de décharge | — |
| C | coefficient de décharge calculé pour l'orifice critique | — |
| C^*_i | fonction critique du gaz dans des conditions idéales dépendant de p et T | — |
| C_i | coefficient de sensibilité | — |
| C_R | coefficient critique du gaz dans des conditions réelles dépendant de p et T | — |
| C_p | capacité thermique molaire du gaz à pression constante | J/(mol·K) |
| C_V | capacité thermique molaire du gaz à volume constant | J/(mol·K) |
| d_N | diamètre au col de l'orifice critique | m |
| d_t | diamètre de la conduite en amont de l'orifice critique | m |
| M | masse molaire du gaz | kg/mol |
| n | coefficient n de l'équation du coefficient de décharge de l'orifice critique | — |
| p_{in} | pression statique absolue mesurée en amont de l'orifice critique | Pa |
| p_n | pression absolue dans des conditions normales (101,325 kPa) | Pa |
| p_{out} | pression statique absolue mesurée en aval de l'orifice critique | |
| p_0 | pression d'arrêt absolue dépendant de p_{in} , T_{in} et q_m | |
| q_m | débit massique | kg/s |
| q_n | débit molaire | mol/s |
| q_V | débit volumique | m ³ /s |
| r^* | rapport de pression critique | — |
| R | constante universelle des gaz | J/(mol·K) |
| Re | nombre de Reynolds au col des orifices critiques | — |

| Symbole | Définition | Unité SI |
|-------------|---|-------------------|
| T_{in} | température mesurée en amont de l'orifice critique | K |
| T_n | température aux conditions normales (273,15 K) | K |
| T_0 | température d'arrêt absolue dépendant de p_{in} , T_{in} et q_m | K |
| v_g | vitesse du gaz à travers les orifices critiques | m/s |
| v_s | vitesse du son au niveau du col | m/s |
| z_n | facteur de compressibilité dans des conditions normales (T_n , p_n) | — |
| Z_0 | facteur de compressibilité à p_0 , T_0 | — |
| γ | coefficient isentropique dépendant de p et T | — |
| η_0 | viscosité dynamique calculée pour le gaz à p_0 et T_0 | Pa·s |
| ρ_{in} | masse volumique du gaz en amont de l'orifice critique | kg/m ³ |
| ρ_n | masse volumique du gaz au niveau du col des orifices critiques | kg/m ³ |
| ρ_0 | masse volumique du gaz dans des conditions d'arrêt | kg/m ³ |

5 Principe

Le débit volumique de gaz augmente lorsqu'il passe à travers un orifice critique avec une pression amont p_{in} croissante. Lorsque le rapport de la pression de gaz aval p_{out} et de la pression de gaz amont p_{in} de l'orifice atteint la valeur critique, le débit volumique du gaz devient indépendant de p_{out} et est proportionnel à p_{in} .

Un exemple d'orifice critique est illustré à la Figure 1.



Légende

- 1 entrée
- 2 diamètre au col de l'orifice critique (d_N)
- 3 sens de l'écoulement
- 4 diamètre de la conduite en amont de l'orifice critique (d_t)
- 5 sortie

NOTE 1 La température T_{in} et la pression p_{in} sont mesurées au point 4 et la pression p_{out} au point 5.

NOTE 2 La température T_0 et la pression p_0 sont calculées au point 2 (voir 5.2).

Figure 1 — Exemple d'orifice critique

Pour un gaz donné à température constante, le rapport de pression critique, (r^*), est:

$$r^* = \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)_{crit} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{1}$$

Différentes méthodes de calcul du coefficient isentropique γ sont décrites en [A.1](#).

Pour les gaz monoatomiques, diatomiques et triatomiques, ce rapport de pression critique est d'environ 0,5, mais il dépend des conditions de pression et de température comme indiqué dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1 — Influence de la pression et du type de gaz sur le rapport de pression critique

| Gaz | Température T_{in} °C | Pression p_{in} bar | Pression p_{out} bar | Coefficient isentropique $\gamma = C_p/C_v$ | Rapport de pression critique r^* |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|
| Argon | 20,0 | 2,1 | 1,0 | 1,669 7 | 0,49 |
| | 20,0 | 10,3 | 5,0 | 1,681 7 | 0,49 |
| | 20,0 | 20,7 | 10 | 1,696 9 | 0,49 |
| Azote | 20,0 | 1,9 | 1,0 | 1,401 4 | 0,53 |
| | 20,0 | 9,5 | 5,0 | 1,408 6 | 0,53 |
| | 20,0 | 19,0 | 10 | 1,417 7 | 0,53 |
| Dioxyde de carbone | 20,0 | 1,8 | 1,0 | 1,296 7 | 0,55 |
| | 20,0 | 9,2 | 5,0 | 1,322 2 | 0,54 |
| | 20,0 | 18,7 | 10 | 1,358 9 | 0,54 |

NOTE Les valeurs de γ ont été calculées pour $p = p_{out}$ sur la base des données de la base de données NIST REFPROP V 9.0.

Pour préparer des mélanges de gaz d'étalonnage, le mélangeur de gaz mélange le gaz de complément s'écoulant à un débit connu d'un ou plusieurs orifices critiques et le gaz à diluer s'écoulant d'un ou plusieurs orifices critiques. Le mélange obtenu est généralement homogénéisé dans une chambre de mélange.

Cette méthode n'est pas absolue car il convient d'étalonner chaque système à orifices critiques pour chaque gaz utilisé afin d'obtenir une exactitude optimale avec une incertitude minimale (étalonnage du débit traçable ou comparaison analytique). Ceci est dû au fait que la formule du débit volumique d'un gaz intègre sa masse molaire. Lorsqu'un gaz différent est utilisé pour l'étalonnage, un facteur de correction doit être appliqué et une tolérance ne doit être admise que pour l'incertitude associée.

Les températures de tous les orifices critiques doivent être identiques afin d'éviter tout effet sur les débits.

Pour obtenir un débit inférieur à 10 l/min, il convient que le diamètre au col soit inférieur à 0,2 mm.

6 Calcul du débit massique et du débit volumique

6.1 Généralités

Les débits massiques et les débits volumiques dans les orifices critiques sont directement proportionnels à la pression d'arrêt en amont des orifices critiques et inversement proportionnels à la racine carrée de la température d'arrêt absolue.

Les débits à travers un orifice critique fonctionnant en régime sonique (sous le rapport de pression critique) peuvent être calculés dans des conditions idéales et dans des conditions réelles à l'aide de

l'ISO 9300. Le débit dans des conditions réelles est donné dans l'[Annexe B](#) et des exemples de calcul des débits dans des conditions idéales et dans des conditions réelles sont donnés dans l'[Annexe C](#).

Pour calculer le débit massique dans des conditions réelles, des paramètres supplémentaires doivent être pris en compte (viscosité, rugosité de surface, courbure dans l'écoulement, conditions d'installation). En raison de la complexité du calcul du débit dans des conditions réelles, le présent document présente uniquement le calcul du débit dans des conditions idéales.

Les calculs utilisant les conditions idéales et les conditions réelles peuvent conduire à des débits différents. Cela peut avoir une incidence sur l'exactitude des mélanges de gaz générés. En étalonnant le dispositif avec chaque gaz utilisé, cet effet deviendra négligeable.

La conversion d'un débit massique en débit volumique est présentée en [6.2.2](#).

6.2 Calcul dans des conditions idéales

6.2.1 Calcul du débit massique

Le débit massique d'un gaz à travers un orifice critique dans des conditions idéales est donné par la [Formule \(2\)](#):

$$q_m = \frac{AC^*_i p_0}{\sqrt{\frac{T_0 R}{M}}} \quad (2)$$

où

q_m est le débit massique;

A est l'aire au col de l'orifice critique;

C^*_i est la fonction critique du gaz, calculée comme suit:

$$C^*_i = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (3)$$

R est la constante universelle des gaz ;

M est la masse molaire du gaz.

NOTE 1 L'aire au col de l'orifice critique dépend du coefficient de dilatation thermique de l'orifice critique. Il est donc conseillé d'utiliser l'orifice critique dans la gamme de températures indiquée par le fabricant.

NOTE 2 En dessous du millimètre, il devient particulièrement difficile d'obtenir une mesure dimensionnelle du diamètre au col. De ce fait, il est difficile d'obtenir une valeur exacte de l'aire au col.

γ est le coefficient isentropique qui peut être calculé en utilisant différentes méthodes décrites dans l'[Annexe A](#);

p_0 est la pression d'arrêt absolue; dans ces conditions:

$$p_0 = p_{in} \quad (4)$$

T_0 est la température d'arrêt absolue; dans ces conditions:

$$T_0 = T_{in} \quad (5)$$

6.2.2 Calcul du débit volumique

Le débit volumique est obtenu en divisant le débit massique par la masse volumique $\rho_n = \frac{p_n \times M}{R \times T_n}$:

$$q_V = \frac{q_m}{\rho_n} = A \times C_{*i} \times \frac{p_0 \times T_n}{p_n} \times \sqrt{\frac{R}{M \times T_0}} \tag{6}$$

6.3 Calcul du débit massique en réalisant l'étalonnage du débit avec de l'azote pur

Dans la pratique, l'étalonnage du débit du dispositif est généralement effectué avec de l'azote pur. Pour utiliser les dispositifs avec un autre gaz G, il est nécessaire de calculer un rapport K entre l'autre gaz G et l'azote N₂. Ces calculs sont exacts si la température de tous les orifices critiques est homogène. Dans ce cas, l'étalonnage peut être effectué à n'importe quelle température. Pour simplifier, la formule suivante est utilisée dans des conditions idéales:

$$K = \frac{(q_m)_G}{(q_m)_{N_2}} \tag{7}$$

où

$(q_m)_G$ est le débit massique de gaz G;

$(q_m)_{N_2}$ est le débit massique d'azote.

iTech STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

$$(q_m)_{N_2} = \frac{A \times C_{*iN_2} \times p_{in}(N_2)}{\sqrt{\frac{T_{in}(N_2) \times R}{M_{N_2}}}} \tag{8}$$

$$(q_m)_G = \frac{A \times C_{*iG} \times p_{in}(G)}{\sqrt{\frac{T_{in}(G) \times R}{M_G}}} \tag{9}$$

En supposant que T_0 et p_0 sont les mêmes pour les deux gaz et que A et R sont constants, la [Formule \(7\)](#) devient:

$$K = \frac{C_{*iG} \times \sqrt{M_G}}{C_{*iN_2} \times \sqrt{M_{N_2}}} \tag{10}$$

Le calcul de C_{*G} et C_{*N_2} est effectué à l'aide des formules suivantes:

$$C_{*G} = \sqrt{\gamma_G \times \left(\frac{2}{\gamma_G + 1} \right)^{\frac{\gamma_G + 1}{\gamma_G - 1}}} \tag{11}$$