
NORME INTERNATIONALE 4053 / IV

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION • МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ • ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION

Mesurage de débits de gaz dans les conduites — Méthodes par traceurs — Partie IV : Méthode fondée sur le mesurage du temps de transit, utilisant des traceurs radioactifs

iTeh STANDARD PREVIEW

*Measurement of gas flow in conduits — Tracer methods —
Part IV : Transit time method using radioactive tracers*

Standards.iteh.ai)

[ISO 4053-4:1978](#)

Première édition — 1978-09-01 [Standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c3836e05-fcb9-4bd7-a5f6-d434128b3786/iso-4053-4-1978](#)

CDU 532.575.87 : 621.039.85

Réf. n° : ISO 4053/IV-1978 (F)

Descripteurs : mesurage de débit, écoulement en conduite fermée, écoulement de gaz, méthode par traceurs, test statistique, calcul d'erreur.

Prix basé sur 9 pages

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 confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique correspondant. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO, participent également aux travaux.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO.

La Norme internationale ISO 4053/IV a été élaborée par le comité technique ISO/TC 30, *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées*, et a été soumise aux comités membres en juillet 1977.

Les comités membres des pays suivants l'ont approuvée :

Afrique du Sud, Rép. d'	Espagne	Pays-Bas
Allemagne	Finlande	Pologne
Australie	France	Royaume-Uni
Belgique	Inde	Tchécoslovaquie
Chili	Irlande	U.R.S.S.
Corée, Rép. de	Italie	U.S.A.
Égypte, Rép. arabe d'	Mexique	Yougoslavie

Le comité membre du pays suivant l'a désapprouvée pour des raisons techniques :

Japon

Mesurage de débits de gaz dans les conduites — Méthodes par traceurs —

Partie IV : Méthode fondée sur le mesurage du temps de transit, utilisant des traceurs radioactifs

0 INTRODUCTION

La présente Norme internationale est la quatrième d'une série de normes relatives au mesurage de débits de gaz dans les conduites à l'aide de méthodes par traceurs.

La série complète des Normes internationales est la suivante :

- *Partie I : Généralités.*
- *Partie II : Méthode d'injection à débit constant, utilisant des traceurs non radioactifs.*
- *Partie III : Méthode d'injection à débit constant, utilisant des traceurs radioactifs.*
- *Partie IV : Méthode du temps de transit, utilisant des traceurs radioactifs.*

1 OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

La présente Norme internationale spécifie la méthode du temps de transit (antérieurement appelée «méthode d'Allen») utilisant des traceurs radioactifs, pour le mesurage de débits de gaz dans les conduites.

2 RÉFÉRENCE

ISO 4053/1, *Mesurage de débits de gaz dans les conduites — Méthodes par traceurs — Partie I : Généralités.*

3 PRINCIPE

Mesurage du temps de transit de particules «marquées», entre deux sections droites d'une conduite éloignées d'une distance connue. Marquage des particules par injection d'un traceur dans l'écoulement, en amont des deux sections de mesurage (c'est-à-dire les positions des détecteurs) et détermination du temps de transit en faisant la différence des temps moyens d'arrivée du traceur au niveau de chacune des positions de détection.

Dans certaines conditions (voir chapitre 4), le débit-volume q_v (voir nomenclature dans l'ISO 4053/1) dans le tronçon de mesurage est donné par la formule

$$q_v = \frac{V}{\bar{t}}$$

où

V est le volume de la conduite entre les deux sections de détection;

\bar{t} est le temps de transit des particules marquées.

D'une manière générale, la condition théorique de validité de la formule est que le tronçon de mesurage soit fermé à la diffusion, c'est-à-dire que le rapport entre la vitesse et le coefficient de dispersion longitudinale soit le même aux deux extrémités de la section de mesurage.

En pratique, cette condition est satisfaite dans le cas d'une conduite à section constante.

On obtient la valeur \bar{t} en mesurant la différence des abscisses des points caractéristiques (en théorie le centre de gravité, mais en pratique on peut trouver d'autres points caractéristiques, voir 6.7) sur des courbes enregistrées de répartition correspondant aux courbes concentration/temps ou à leurs intégrales, obtenues en chaque position de détection. Le signal enregistré par les détecteurs doit être proportionnel à la concentration du traceur, mais il n'est pas nécessaire de connaître la valeur exacte du coefficient de proportionnalité et, par conséquent, la valeur de la concentration.

Le débit-masse est calculé après détermination simultanée du débit-volume et de la masse volumique du gaz.

4 CONDITIONS REQUISES

4.1 Traceur

Le traceur doit remplir les conditions générales définies au chapitre 5 de l'ISO 4053/1. Une liste de traceurs généralement utilisés, avec leurs avantages et leurs inconvénients, y est également donnée.

4.2 Mélange du traceur

Le traceur doit être suffisamment mélangé à l'écoulement au niveau du premier détecteur pour que les fonctions concentration/temps enregistrées au niveau des deux détecteurs soient bien représentatives de l'écoulement moyen (voir 5.1). Le choix des positions de l'injection et des détecteurs dépend de la vitesse du fluide, de la dispersion du traceur et de la configuration de la conduite. Les conditions de ce choix sont traitées au chapitre 5. Aux faibles nombres de Reynolds, $Re \leq 5\,000$, le mélange n'est pas effectif et aucun mesurage valable ne peut être fait.

4.3 Mode opératoire

Le mode opératoire pour la préparation et l'injection du gaz traceur (qui doit, en pratique, se faire aussi rapidement que possible pour réduire la dispersion longitudinale du traceur) est traité en 6.3 et 6.4. Le volume intérieur de la section de mesurage doit être déterminé avec une précision suffisante (voir 6.7). D'autres conditions relatives aux essais et au calcul du temps de transit à partir des données disponibles sont précisées au chapitre 6.

5 CHOIX DU TRONÇON DE MESURAGE

Dans la méthode du temps de transit, le tronçon de mesurage comporte deux parties :

- la longueur de conduite comprise entre le point d'injection et la position du premier détecteur;
- la longueur de conduite comprise entre les deux détecteurs.

5.1 Longueur de conduite entre le point d'injection et le premier détecteur

En théorie, lorsque la concentration, C_2 , du traceur dans la conduite n'est mesurée qu'en un seul point dans chaque section droite de mesurage, la longueur de conduite comprise entre le point d'injection et le premier détecteur doit être égale ou supérieure à la longueur de bon mélange.

La longueur de bon mélange se définit comme la distance la plus courte à partir de laquelle la variation maximale de $\int_0^{\infty} C_2 dt$ dans la section est inférieure à une valeur déterminée à l'avance (par exemple 0,5 %). (Voir chapitre 6 de l'ISO 4053/1.)

Il n'existe cependant pas suffisamment de résultats expérimentaux disponibles pour rapporter les variations de $\int_0^{\infty} C_2 dt$ au niveau du premier détecteur à la précision globale du temps de transit déterminée par des mesurages de concentration en des points isolés des sections de mesurage.

Si la mesure de la concentration au niveau de chaque détecteur représente la concentration moyenne dans la section (par exemple, mesurages simultanés en plusieurs points ou par un détecteur sensible au traceur sur toute la section), le degré de bon mélange requis au niveau du premier détecteur n'est pas aussi grand que celui qui correspond exactement à la longueur de bon mélange. Dans ce cas, l'écartement nécessaire entre le point d'injection et le premier détecteur peut être considérablement moindre que la longueur de bon mélange. Par exemple, en utilisant un émetteur γ injecté en plein centre d'une conduite et détecté par trois détecteurs à scintillation disposés en anneau à chaque section de mesurage, lorsque la distance séparant le point d'injection du premier détecteur est égale à seulement douze diamètres de conduite, aucune erreur supplémentaire notable, par rapport à une configuration comportant de plus grandes longueurs, n'a pu être décelée dans les conditions de l'expérience.

Il est préférable que la longueur de conduite comprise entre le point d'injection et le premier détecteur ne contienne aucun accessoire de tuyauterie ni aucune section susceptible d'augmenter de façon notable la dispersion longitudinale du traceur aux points de détection. Par accessoire de tuyauterie et sections, on entend, par exemple, des robinets, des régulateurs de débit, des distributeurs.

5.2 Longueur de conduite entre les détecteurs

La longueur de conduite nécessaire entre les positions de détection dépend de la vitesse axiale du fluide, de la répartition dans l'espace du traceur au niveau des détecteurs et de la précision requise sur la mesure du temps de transit.

La longueur droite de conduite, L , entre les détecteurs, les différents rapports, ρ , du temps de transit au temps moyen de passage de l'«impulsion» du traceur entre les deux points de détection (c'est-à-dire le temps correspondant au passage de 99,7 % du traceur) et les différentes longueurs de conduite, N , entre le point d'injection et le premier détecteur sont liés entre eux par l'expression

$$L = 4,25 \rho (p + \sqrt{N})$$

où L et N sont exprimés en nombre de diamètres de conduite.

Cette relation est représentée graphiquement à la figure 1.

Si l'on enregistre les courbes concentration/temps sur un appareil monovoie, il est nécessaire que la longueur de conduite comprise entre les deux détecteurs soit supérieure à la dispersion spatiale moyenne du traceur au niveau des positions de détection, de manière à ne pas avoir de recouvrement des courbes enregistrées. Cette condition est remplie quand $\rho > 1$.

Si l'on utilise un enregistreur multivoie, cette longueur peut être réduite, mais pour mesurer avec précision le temps de transit, il est nécessaire que la longueur de conduite comprise entre les deux détecteurs ne soit pas inférieure à la moitié de la dispersion moyenne spatiale du traceur. À titre indicatif, il est recommandé d'utiliser en pratique $\rho \geq 0,5$.

5.3 Tronçon de mesurage

Pour obtenir une précision maximale sur la mesure du débit, le tronçon de conduite situé entre les deux détecteurs doit être rectiligne et de section uniforme et ne comporter aucun accessoire de tuyauterie ni sections dans lesquelles des espaces morts pourraient affecter la courbe concentration/temps mesurée au niveau du second détecteur. Par accessoires de tuyauteries et sections, on entend, par exemple, des robinets, des régulateurs de débit, des variations brusques de la section, des dériviations à extrémités fermées ou des coudes accentués.

En outre, la précision globale sur la mesure du débit dépend de la précision avec laquelle le volume interne du tronçon de mesurage a été déterminé.

5.4 Pertes et apports

Les apports de fluide de même nature que le fluide de la conduite en amont du premier détecteur n'affectent pas les résultats, dans la mesure où le fluide se trouve mélangé à l'écoulement principal lorsqu'il atteint le premier détecteur.

Les pertes de fluide avant le premier détecteur n'affectent par le résultat, mais, si le traceur n'est pas complètement mélangé au point où la perte se produit, l'amplitude de la courbe concentration/temps peut en être affectée au niveau des détecteurs et sa valeur peut être modifiée par un facteur constant.

Les pertes ou apports de fluide dans la longueur de conduite comprise entre les détecteurs provoquent des erreurs considérables sur la mesure du débit. Il est, par conséquent, primordial que la conduite ne comporte aucune tubulure de dérivation entre les deux détecteurs et que l'on n'y observe aucune fuite.

6 MODE OPÉRATOIRE

6.1 Manipulation des isotopes radioactifs

La manipulation des radio-isotopes (stockage, transport, mise en œuvre) doit s'effectuer conformément à la législation en vigueur.

6.2 Emplacement des points d'injection

Le nombre et la position des points d'injection situés dans la section d'injection dépendent, principalement, de la longueur de conduite comprise entre le point d'injection et le premier détecteur et de la méthode de mesurage de la concentration du traceur au niveau des détecteurs (c'est-à-dire méthode de la «moyenne» ou prélèvement unique).

Lorsque la longueur de la conduite disponible entre le point d'injection et le premier détecteur est inférieure à la longueur théorique de bon mélange, il est recommandé de procéder comme il est indiqué au chapitre 6 de l'ISO 4053/I. Il conviendra de choisir les procédés qui permettent l'injection pratiquement instantanée de l'ensemble du traceur. En particulier, un procédé approprié consiste à utiliser l'injection à contre-courant d'un jet central, ou tout autre système respectant la symétrie de la conduite; l'injection peut encore s'effectuer en amont d'un ventilateur ou d'un dispositif générateur de turbulence. Si l'on utilise plusieurs points d'injection, l'ensemble devra être conçu de façon à permettre une injection simultanée en tous points.

6.3 Préparation du gaz injecté

La concentration du traceur dans le gaz injecté doit être uniforme. L'homogénéité est en général réalisée par diffusion moléculaire.

La concentration requise dépend du volume de gaz à injecter pour chaque mesurage du débit-volume à mesurer, du degré de dispersion longitudinale du traceur au niveau des détecteurs et de la sensibilité de ces derniers. Dans le cas d'une injection symétrique rapide du traceur, l'évaluation de sa concentration maximale, C_m , exprimée en curies par

mètre cube, dans une conduite rectiligne de diamètre D , sans obstacle, à N diamètres de conduite en aval du point d'injection peut être faite à l'aide de la formule

$$C_m \approx \frac{3A}{4D^3\sqrt{N}}$$

où A est la quantité de traceur injectée, en curies.

Il est intéressant de noter que cette concentration maximale ne dépend pas du débit dans la conduite.

Lorsqu'un dispositif, augmentant artificiellement la turbulence, est intercalé entre le point d'injection et la première section de mesurage, la valeur de la concentration maximale peut être supérieure à celle indiquée par la formule ci-dessus.

Cette expression peut aussi servir à évaluer la quantité de traceur à injecter pour chaque mesurage de débit, à partir de la valeur connue de la sensibilité des détecteurs de mesurage. La quantité de traceur injectée doit être telle que sa concentration au point de détection soit dans la gamme de linéarité du détecteur.

6.4 Injection du gaz traceur

Pour réduire au maximum la dispersion de la répartition mesurée concentration/temps, le traceur doit être injecté aussi rapidement que possible sans qu'il subsiste de résidus d'injection dans les tubes d'injection, qui s'écoulent ensuite dans la conduite. Cette injection peut se réaliser de l'une des manières suivantes :

a) par l'intermédiaire de robinets d'injection placés à l'extrémité de chaque point d'injection (par exemple, des soupapes chargées par des ressorts) qui s'ouvrent simultanément, se ferment rapidement et sont étanches;

b) en assurant l'évacuation du gaz injecté dans la conduite par injection d'une certaine quantité de gaz exempt de traceur;

NOTE — Le traceur peut être injecté dans la conduite sous une pression additionnelle de gaz, par des méthodes compatibles avec l'une ou l'autre des exigences ci-dessus.

c) en brisant, à l'aide d'un dispositif approprié, une ampoule contenant le traceur à injecter dans la conduite.

6.5 Détection du traceur

Les concentrations du traceur peuvent être déterminées par des détecteurs situés à l'intérieur ou, de préférence, à l'extérieur de la conduite, ou par des cellules de détection échantillonnant dans les sections de mesurage.

La différence des temps de réponse des détecteurs dans les deux sections doit être négligeable vis-à-vis du temps de transit. On aura toujours intérêt à adopter des détecteurs identiques dans les deux sections de mesurage.

Si l'on a des doutes sur la qualité du mélange et sur les détecteurs, on disposera plusieurs détecteurs sur la périphérie de la conduite dans une même section et on comparera les résultats obtenus pour des détecteurs placés dans les mêmes configurations géométriques.

Un temps de réponse rapide de l'installation de détection peut être obtenu si l'on utilise, par exemple, un compteur d'impulsions à intégration pour mesurer l'intégrale de la courbe concentration/temps en chaque section de mesurage.

6.6 Nombre d'injections

Le nombre d'injections successives requises pour chaque mesurage de débit dépend de la constance du débit mesuré, de l'erreur aléatoire sur la détermination du temps de transit et de la limite globale d'incertitude admise sur la mesure du débit.

Étant donné la quasi-impossibilité d'avoir en pratique un débit absolument constant, il est recommandé de faire au moins cinq injections successives de traceur et des mesurages associés de temps de transit pour chaque débit, de manière à avoir une analyse objective des incertitudes de mesurage (voir chapitre 8).

6.7 Calcul du temps de transit

Le temps de transit du traceur entre les détecteurs peut être déterminé par des constructions graphiques adéquates ou par calcul numérique sur les courbes concentration/temps, ou sur leurs intégrales, enregistrées simultanément avec des signaux précis de synchronisation émis par un dispositif approprié. Le temps de transit peut être déterminé par différence des temps correspondant aux points caractéristiques relevés sur les courbes enregistrées à l'aide des détecteurs (voir figure 2) et énumérés ci-après.

6.7.1 Centres de gravité [voir figure 2 a)]

Le centre de gravité est le point caractéristique théorique correct dans tous les cas.

6.7.2 Positions médianes (c'est-à-dire demi-surface) [voir figure 2 b)]

Dans le cas d'une conduite rectiligne, tout point définissant la médiane est également un point caractéristique correct.

6.7.3 Positions à hauteur partielle [voir figure 2 c)]

Les points caractéristiques visés ici sont définis en coupant chaque pic par une droite parallèle à l'axe des temps, à un niveau compris entre 1/3 et 2/3 de la concentration maximale. Le point «milieu» entre ceux où cette ligne coupe la courbe de réponse du détecteur est alors le point caractéristique de cette impulsion. La demi-hauteur et 0,6 fois la concentration maximale sont deux niveaux couramment utilisés.

6.7.4 Autres points

Le choix d'autres points, tels que la concentration maximale [voir figure 2 d)], doit être réservé aux cas où une détermination rapide approximative est nécessaire.

On peut également déterminer le temps de transit par déclenchement d'un système automatique de comptage du temps au moment du passage du traceur au niveau de chaque détecteur. La précision de cette méthode dépend du

mode de fonctionnement du système de comptage et de la précision des corrections nécessitées par les différences des courbes concentration/temps au niveau de chaque détecteur.

Lorsque le temps de transit est déterminé sur les courbes concentration/temps enregistrées par des cellules de détection du débit, des corrections doivent y être apportées pour tenir compte des différences des temps de passage entre la section de mesurage et les cellules.

6.8 Mesurage du volume du tronçon de mesurage

Le volume interne du tronçon de mesurage doit être déterminé par des mesurages directs de la capacité du tronçon, ou par des mesurages du diamètre moyen de la conduite et de la longueur de conduite comprise entre les détecteurs.

Les plans de construction ne doivent pas être utilisés pour la détermination du volume. Si l'on recherche la précision maximale, il est nécessaire de choisir avant montage la portion de conduite à utiliser comme tronçon de mesurage et d'en déterminer le volume. Il est important que ce volume ne soit pas modifié lors du montage.

Il y a lieu de noter que l'incertitude relative sur la détermination du volume a autant d'importance que l'incertitude relative sur la détermination du temps de transit, pour l'évaluation de l'incertitude globale sur le débit-volume.

6.9 Mesurage de la masse volumique du gaz

Si l'on connaît la composition du gaz et ses écarts par rapport au comportement des gaz parfaits, on peut déterminer la masse volumique à partir de mesurages de la pression et de la température du gaz dans le tronçon de mesurage.

On peut également mesurer la masse volumique à l'aide d'une cellule appropriée introduite directement dans l'écoulement de gaz, ou dans un écoulement d'échantillon de gaz présentant les mêmes caractéristiques de pression et de température que le gaz du tronçon de mesurage. Des corrections peuvent être requises pour tenir compte des petites différences entre les conditions dans la section de mesurage et dans le capteur de masse volumique.

On notera que l'incertitude relative sur la détermination de la masse volumique du gaz est d'importance comparable à celle sur le mesurage du volume du tronçon de mesurage et du temps de transit.

7 CHOIX DU TRACEUR

7.1 Caractéristiques

Les principes généraux de choix des traceurs sont exposés au chapitre 5 de l'ISO 4053/1. Dans le cas présent, on prendra également les points suivants en considération :

7.1.1 Type et énergie des rayonnements émis.

On préférera, en général, des émetteurs γ aux émetteurs β , car le mesurage de ce type de rayonnement peut s'effectuer

à travers les parois de la conduite et l'auto-absorption est moindre. On considérera, par contre, que les isotopes à rayonnement β sont plus faciles à manipuler.

7.1.2 Activité massique maximale disponible utile.

7.1.3 Prix.

7.1.4 Concentration maximale admissible dans l'air.

C'est un élément important dans le choix du traceur. On préférera, à cet effet, le traceur donnant le rapport le plus élevé entre la concentration maximale admissible et la concentration compatible avec la précision recherchée.

7.1.5 Période.

La méthode des temps de transit autorise l'utilisation de traceurs de période beaucoup plus courte que les méthodes de dilution.

Il est recommandé de choisir un traceur de période la plus courte possible, compatible avec les conditions précédentes ainsi qu'avec les conditions d'approvisionnement, de stockage et de mesurage de l'isotope, afin de minimiser les questions de contamination et les problèmes de sécurité posés par l'utilisation d'un traceur radioactif.

7.2 Exemples de traceurs radioactifs utilisés

Une liste de traceurs radioactifs est donnée en 5.1.2 de l'ISO 4053/I. Le tableau ci-après donne quelques isotopes parmi ceux les plus utilisés.

8 ÉVALUATION DES INCERTITUDES DE MESURAGE DE DÉBIT

On se reportera, pour la détermination des erreurs, au chapitre 7 de l'ISO 4053/I.

D'une manière générale, la liste des causes d'erreur est étroitement liée aux différentes étapes du mode opératoire décrites au chapitre 6.

8.1 La détermination du volume utile est réalisée avec une incertitude liée à l'irrégularité de la conduite entre les sections de mesurage, à la précision et au pas des mesurages géométriques. Le choix d'une valeur conduit à commettre une erreur systématique sur toutes les valeurs de débits calculées à partir d'elle, qui peut s'accompagner d'une erreur aléatoire si des paramètres non contrôlés, tels que température et pression, modifient le volume mesuré. Le nombre de mesures du diamètre de la conduite devra être compatible avec la précision demandée pour la mesure du débit.

ISO 4053-4:1978
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c3836e05-fcb9-4bd7-a5f6-d4143436>
 TABLEAU 36 Isotopes les plus utilisés

Isotope	Type de rayonnement				Concentration maximale admissible ¹⁾ Ci/m ³ *
	Beta		Gamma		
	Énergie MeV	Abondance %	Énergie MeV	Abondance %	
Argon 41 (période de 110 min)	1,20 2,48	99,1 0,9	1,29	99,1	2 × 10 ⁻⁷
Brome 82 (période de 36,0 h) Exemples : C ₂ H ₅ ⁸² Br ou CH ₃ ⁸² Br	0,44	100	0,55 0,62 0,70 0,78 0,83 1,04 1,32 1,48	75 42 28 83 25 29 28 17	1 × 10 ⁻⁷
Krypton 85 (période de 10,6 années)	0,15 0,67	0,4 99,6	0,51	0,4	1 × 10 ⁻⁶
Soufre 35 (période de 87 jours) Exemple : ³⁵ S F ₆	0,167	100	—	—	3 × 10 ⁻⁸
Xénon 133 (période de 5,27 jours)	0,34	100	0,081	35	1 × 10 ⁻⁶

1) Chiffres donnés à titre d'exemple. Il est indispensable de se référer aux législations nationales en vigueur.

* 1 Ci/m³ = 3,7 × 10¹⁰ Bq/m³ (becquerel par mètre cube)

8.2 Un mélange incomplet du traceur dans les deux sections de mesure peut introduire une erreur systématique dont la valeur ne peut pas être calculée actuellement. Cette erreur est certainement très inférieure à celle obtenue avec la méthode d'injection à débit constant pour une même quantité de mélange, en particulier lorsqu'on effectue un mesurage de la concentration en plusieurs points de la section ou quand les détecteurs sont sensibles de façon significative à tout le traceur présent dans la section droite.

8.3 Le dispositif de détection définit à chaque instant dans les sections de mesure une valeur approchée de la concentration moyenne en traceurs. La valeur du temps de transit, calculée à partir des courbes de variation de cette grandeur en fonction du temps aux deux sections de mesure est, de ce fait, entachée d'une erreur systématique qui peut être minimisée par amélioration du dispositif de détection (nombre et répartition des points de détection dans la section).

8.4 Le seuil de sensibilité de l'équipement de détection peut affecter la précision sur la mesure du temps de transit, en particulier lorsque la sensibilité des deux détecteurs est inégale, ou qu'il n'y a pas assez de traceur injecté dans la conduite, et lorsqu'existent des volumes morts dans le tronçon de mesure (c'est-à-dire lorsque le rapport du signal maximal au seuil du détecteur est insuffisant). Cette erreur peut être rendue négligeable avec un système de détection correctement conçu, en utilisant une quantité suffisante de traceur et en disposant d'un tronçon de mesure exempt de tout volume mort.

8.5 L'erreur sur le temps est liée directement à la précision du dispositif délivrant les signaux permettant d'établir l'échelle des temps de l'enregistrement. L'erreur systématique de l'incertitude due à l'avance ou au retard de l'horloge est rendue aussi faible que l'on veut par le choix de l'appareil, tandis que l'erreur aléatoire due à l'incertitude de lecture peut être réduite par allongement du temps moyen de transit (distance entre les détecteurs).

8.6 L'utilisation des différentes méthodes de détermination des points caractéristiques des courbes concentration/temps, décrites en 6.7, introduit une incertitude supplémentaire dans la détermination du temps de transit moyen. L'erreur systématique peut être diminuée lorsqu'on utilise la même méthode aux deux sections et lorsque la dispersion du traceur est courte devant le temps de transit. L'erreur aléatoire de cette source est fonction de la méthode d'analyse et de la variation du temps de transit provoquée par l'instabilité du débit et la turbulence.

8.7 Les erreurs sur la mesure de la masse volumique du gaz augmentent l'erreur sur la mesure du débit massique (voir exemple au chapitre 9).

8.8 Le mesurage par les temps de transit n'étant pas instantané et ne s'appliquant qu'à un écoulement permanent en moyenne, les fluctuations de débits autour de la valeur moyenne sont une cause d'erreur aléatoire.

8.9 L'utilisation de la méthode des temps de transit conduit à diverses erreurs difficiles à évaluer avant le mesurage. Par conséquent, on ne peut pas donner la précision sur le débit avant le mesurage. On peut indiquer, cependant, que lorsque les conditions sont favorables, une précision de 1 % peut être atteinte ou dépassée.

8.10 Dans tous les cas, l'erreur aléatoire sur le temps de transit, qui comprend des erreurs sur la qualité du mélange et le dispositif de détection, peut être estimée, *a posteriori*, par répétition des mesurages du même débit avec le même dispositif et comparaison à l'estimation aléatoire, par analyse des composants de l'erreur à attendre dans les conditions d'utilisation normale (voir 7.3.3 de l'ISO 4053/I).

9 EXEMPLE DE CALCUL DU DÉBIT

On utilise le brome 82 (sous la forme $C_2H_5^{82}Br$) pour mesurer un débit d'azote dans une canalisation de diamètre 20 cm. Le premier détecteur est placé à 10 m de la position d'injection et le second est placé à 10 m en aval du premier. Le traceur est injecté à l'aide d'un dispositif placé au centre de la conduite.

9.1 Qualité du mélange au droit de la première section de mesure

La première section de mesure est à $10/0,2 = 50$ diamètres en aval de la position d'injection. D'après 6.2 et la figure 3 de l'ISO 4053/I, la variation de $\int_0^\infty C_2 dt$ est d'environ 12 %. Cette quantité est suffisante pour un mesurage de débit meilleur que 1 % en utilisant un émetteur γ .

9.2 Séparation des courbes et dispersion du traceur

Le rapport, p , du temps de transit au temps moyen de passage du traceur devant chaque section de détection est :

$$\frac{10}{0,2} = 4,25 p \left(p + \sqrt{\frac{10}{0,2}} \right)$$

d'où l'on tire $p = 1,39$.

Comme p est plus grand que 1, tout le traceur aura quitté la première section de mesure avant d'atteindre la seconde (avec des détecteurs alignés), de sorte qu'on pourra utiliser un enregistreur monovoie pour enregistrer le passage du traceur.

En utilisant 100 μCi de brome 82 à chaque injection, la concentration maximale dans la seconde section de mesure sera :

$$C_m \approx \frac{3 \times 100}{4 \times 0,2^3 \sqrt{20/0,2}} \approx 940 \mu Ci/m^3$$

On peut utiliser cette valeur calculée pour vérifier si la sensibilité de l'appareil de mesure est compatible avec la précision recherchée pour la mesure du débit.

9.3 Volume de la section de mesure

Le diamètre intérieur moyen de la section de mesure, déterminé à partir de vingt mesurages en des points différents, est de $0,202 \pm 0,0005$ m (avec un intervalle de confiance de 95 %). La distance mesurée entre les sections de mesure est de $10,01 \pm 0,001$ m.

Le volume du tronçon est donc

$$V = \frac{\pi \times 0,202^2 \times 10,01}{4} = 0,3208 \text{ m}^3$$

avec une erreur limite de

$$\pm 100 \sqrt{\left(2 \times \frac{0,0005}{0,202}\right)^2 + \left(\frac{0,001}{10,01}\right)^2}$$

$$\approx \pm 0,5 \%$$

9.4 Temps de transit

Une autre source importante d'erreur lors du mesurage du temps de transit réside dans la détermination des points caractéristiques. La valeur de cette erreur est comprise dans l'erreur due à la variation des temps de transit mesurés pour un débit-masse donné (voir 9.6).

Le temps de transit, t_i , correspondant à un débit donné, s'obtient en comparant les distances entre les médianes des courbes concentration/temps [voir figure 2 b)] à une échelle des temps enregistrés simultanément, obtenue à partir d'un oscillateur à cristal présentant une erreur limite de $\pm 0,01$ %.

9.5 Masse volumique du gaz

La masse volumique du gaz, ρ , est mesurée avec un densimètre étalonné avec une précision de $\pm 0,2$ % (à un niveau de confiance de 95 %). La masse volumique moyenne de l'azote est de $19,3 \text{ kg/m}^3 \pm 0,2$ %.

9.6 Débit massique dans la canalisation

Le débit massique, m_i , en kilogrammes par seconde, d'azote

dans la canalisation à chaque injection est donné par la formule

$$m_i = \frac{V\rho}{t_i} = \frac{0,3208 \times 19,3}{t_i}$$

Le débit massique moyen, \bar{m} , pendant tout le temps de mesure des n injections est

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n} m_i = \frac{V\rho}{n} \sum_{i=0}^{i=n} \frac{1}{t_i}$$

et l'erreur aléatoire due aux variations du débit, à la détermination des points caractéristiques sur les enregistrements et aux erreurs aléatoires sur la mesure du temps est donnée par la formule

$$t^* \sqrt{\frac{\sum (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)}}$$

où

n est le nombre d'injections;

t^* est la variable de Student pour $n-1$ degrés de liberté.

Dans cet exemple, le débit massique moyen est de $24,3 \text{ kg/s}$, avec une erreur aléatoire due aux causes ci-dessus de $\pm 0,4$ % (à un niveau de confiance de 95 %). L'erreur-limite totale sur le débit massique moyen peut être estimée en combinant les diverses erreurs ci-dessus, soit :

$$\sqrt{0,5^2 + 0,01^2 + 0,2^2 + 0,4^2}$$

$$\approx 0,67 \%$$

Cet exemple illustre un mesurage de débit effectué dans des conditions favorables, mais l'erreur-limite sur la mesure du débit peut être nettement supérieure à cette valeur si d'autres sources d'erreurs, comme il est dit au chapitre 8, sont en cause. Une évaluation objective de la grandeur de ces erreurs peut être obtenue soit par comparaison avec des étalons primaires de mesure de débit, directement ou indirectement, soit par prise en considération des variations dans les conditions de mesure (tronçon de mesure, position des détecteurs, etc.).