
NORME INTERNATIONALE



2975 / VII

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

**Mesure de débit d'eau dans les conduites fermées —
Méthodes par traceurs —
Partie VII : Méthode du temps de transit, utilisant des
traceurs radioactifs**

ITeH STANDARD PREVIEW

*Measurement of water flow in closed conduits — Tracer methods —
Part VII : Transit time method using radioactive tracers*

(standards.iteh.ai)

Première édition — 1977.12.01

ISO 2975-7:1977

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d6b6a4aa-ad9d-4804-978c-9685e97c8bdf/iso-2975-7-1977>

CDU 532.574.87 : 621.039.85

Réf. n° : ISO 2975/VII-1977 (F)

Descripteurs : mesurage de débit, écoulement en conduite, écoulement d'eau, méthode par traceurs, isotope radioactif, mesurage du temps, position.

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 2975/VII 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 septembre 1976.

Les comités membres des pays suivants l'ont approuvée : [ISO 2975-7:1977](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d6b6a4aa-ad9d-4804-978c-9685e97c9bdf/iso-2975-7-1977)

Allemagne	France	Roumanie
Belgique	Inde	Royaume-Uni
Corée, Rép. de	Mexique	Turquie
Égypte, Rép. arabe d'	Pays-Bas	U.R.S.S.
Finlande	Portugal	Yougoslavie

Les comités membres des pays suivants l'ont désapprouvée pour des raisons techniques :

Japon
U.S.A.

Mesure de débit d'eau dans les conduites fermées — Méthodes par traceurs — Partie VII : Méthode du temps de transit, utilisant des traceurs radioactifs

0 INTRODUCTION

La présente Norme internationale est la septième d'une série de normes traitant de la mesure de débit de l'eau dans les conduites fermées utilisant les méthodes par traceurs.

La série complète des normes 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 d'intégration (injection instantanée), utilisant des traceurs non radioactifs.*
- Partie V : *Méthode d'intégration (injection instantanée), utilisant des traceurs radioactifs.*
- Partie VI : *Méthode du temps de transit, utilisant des traceurs non radioactifs.*
- Partie VII : *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, utilisant des traceurs radioactifs, pour la mesure de débit d'eau dans les conduites fermées.

2 PRINCIPE

La mesure du débit par la méthode du temps de transit (précédemment appelée «méthode d'Allen») est fondée sur la mesure du temps de transit de particules fluides «marquées» entre deux sections droites de la conduite, éloignées d'une distance connue. Le marquage des particules est réalisé par injection d'un traceur dans l'écoulement, en amont des deux sections de mesure (c'est-à-dire positions des détecteurs) et on détermine le 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 3), le débit q_v est donné par :

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

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 mesure soit fermé à la diffusion, c'est-à-dire que le rapport entre la vitesse locale et le coefficient de dispersion longitudinale est le même aux deux extrémités du tronçon de mesure.

En pratique, cette condition est satisfaite dans le cas d'une conduite de 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 5.6) sur des courbes enregistrées de répartition correspondant aux courbes concentration/temps, ou leurs intégrales, obtenues en chaque section de détection. Le signal issu des détecteurs doit être proportionnel à la concentration du traceur; il n'est toutefois pas nécessaire de connaître la valeur exacte du coefficient de proportionnalité et, par conséquent, la valeur absolue de la concentration.

3 CONDITIONS REQUISES

3.1 Traceur

Le traceur doit remplir les conditions générales définies au chapitre 5 de la partie I, qui donne une liste de traceurs généralement utilisés avec leurs avantages et leurs inconvénients.

3.2 Mélange du traceur

Le traceur doit être suffisamment mélangé à l'écoulement au niveau du 1^{er} détecteur pour que les fonctions concentration/temps enregistrées au niveau des deux détecteurs soient bien représentatives de l'écoulement moyen (voir 4.1). 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 4. Aux faibles nombres de Reynolds, $Re \leq 5\,000$, le mélange n'est pas effectif et aucune mesure ne peut être faite.

3.3 Mode opératoire

Le mode opératoire pour la préparation et l'injection de la solution de traceur (solution qui en pratique doit être injectée aussi rapidement que possible pour minimiser la durée de la fonction concentration/temps) est traitée en 5.2 et 5.3. Le volume intérieur de la section de mesure doit être déterminé avec une précision suffisante (voir 5.7). D'autres conditions relatives aux essais et au calcul du temps de transit à partir des données disponibles sont précisées au chapitre 5.

4 CHOIX DU TRONÇON DE MESURE

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

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

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

Lorsqu'on mesure la concentration en traceur C_2 en un seul point dans chaque section droite de mesure, 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 %), C_2 étant la concentration du traceur dans la conduite — voir chapitre 6 de la partie I. Cette distance peut se calculer théoriquement suivant les indications de 6.2.1 de la partie I. La figure 3 de celle-ci représente la variation mesurée de la longueur de bon mélange en fonction des variations de $\int_0^\infty C_2 dt$ dans la section pour diverses conditions d'injection. Des moyens pour réduire la longueur de bon mélange sont décrits en 6.3 de la partie I.

Il n'existe cependant pas suffisamment de résultats expérimentaux disponibles pour relier 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 mesures de concentration en des points isolés des sections de mesure.

Si la mesure de la concentration au niveau de chaque détecteur représente la concentration moyenne dans la section (par exemple mesures simultanées 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 strict 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 au centre d'une conduite et détecté par trois compteurs à scintillation disposés en anneau à chaque section de mesure, le débit a été mesuré avec

précision lorsque la distance séparant le point d'injection du premier détecteur était égale à seulement douze diamètres de conduite.

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 accessoires de tuyauterie et sections, on entend par exemple des robinets, des régulateurs de débit, des collecteurs, etc.

4.2 Longueur de conduite entre les détecteurs

La longueur de conduite nécessaire entre les sections 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 (p) du temps de transit au temps moyen de passage du nuage de traceur à chaque point de détection (c'est-à-dire le temps correspondant au passage de 99,7 % du traceur) et les différentes valeurs de la longueur de conduite (N) entre le point d'injection et le premier détecteur sont liés entre eux par l'expression suivante :

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

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 sur un appareil mono-voie les courbes concentration/temps, 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 ($p > 1$).

Si l'on utilise un enregistreur multi-voies, 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 $p \geq 0,5$.

4.3 Tronçon de mesure

Pour obtenir une précision maximale sur la mesure du débit, le tronçon de conduite entre les deux détecteurs doit consister en une conduite rectiligne de section uniforme et ne comporter aucun accessoire de tuyauterie ni sections dans lesquels des zones d'eau morte sont susceptibles d'affecter la courbe concentration/temps enregistrée au niveau du deuxième détecteur. Par accessoires de tuyauterie et sections, on entend des robinets, des régulateurs de débit, des variations brusques de la section, des dériviatives à extrémités fermées ou des coudes accentués.

La précision globale sur la mesure du débit dépend de la précision avec laquelle le volume du tronçon de mesure a été déterminé.

4.4 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 en amont du premier détecteur n'affectent pas 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 d'un facteur constant.

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

5 MODE OPÉRATOIRE

5.1 Mise en œuvre des produits radioactifs

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

5.2 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 mesure de la concentration du traceur au niveau des détecteurs (c'est-à-dire méthode de la «moyenne» ou prélèvement unique – voir 4.1, 4^e alinéa).

Lorsque la longueur de la conduite disponible entre le point d'injection et le premier détecteur est inférieure à la longueur du bon mélange, il est recommandé de procéder comme il est indiqué en 6.3 de la partie I.

Un procédé approprié consiste, en particulier, à utiliser l'injection à contre-courant d'un jet central ou tout autre dispositif respectant la symétrie de la conduite. L'injection peut également s'effectuer en amont d'une pompe ou d'un dispositif générateur de turbulence. Si l'on utilise plusieurs points d'injection, le système doit être conçu pour permettre une injection simultanée en tous les points.

5.3 Préparation de la solution injectée

La concentration du traceur dans la solution injectée doit être uniforme. L'homogénéité peut être réalisée à l'aide d'un agitateur mécanique ou d'une pompe en circuit fermé.

La concentration requise dépend du volume de fluide à injecter pour chaque mesure du débit-volume, du degré de dispersion longitudinale du traceur au niveau des détecteurs et de la sensibilité de ces derniers. Une évaluation de la concentration maximale C_m du traceur observée dans une conduite rectiligne de diamètre D , à N diamètres de conduite

en aval du point d'injection rapide lorsqu'il n'y a pas d'obstacle dans la conduite et que l'injection est symétrique, peut être faite à l'aide de l'expression suivante :

$$C_m \approx \frac{3A}{4D^3N^{1/2}}$$

où A est la quantité injectée de traceur.

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 mesure, 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 mesure de débit à partir de la valeur connue de la sensibilité des détecteurs de mesure. La quantité de traceur injectée doit être telle que sa concentration au point de détection soit dans la gamme de linéarité du détecteur.

5.4 Injection de la solution concentrée

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

- par l'intermédiaire de dispositifs d'injection placés à chaque point d'injection par exemple des soupapes s'ouvrant et se fermant rapidement et simultanément;
- en assurant l'évacuation de la solution injectée dans la conduite par écoulement d'une certaine quantité d'eau exempte de traceur;

Le traceur peut être injecté dans la conduite sous une pression d'air ou d'un liquide par des méthodes correspondant à l'une ou l'autre des méthodes ci-dessus. S'il est injecté à la paroi, il est important de s'assurer qu'il est injecté avec une quantité de mouvement suffisante pour assurer une bonne pénétration dans l'écoulement;

- en brisant à l'aide d'un dispositif adéquat une ampoule contenant le traceur à introduire dans la conduite.

5.5 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 mesure.

Le rendement du détecteur est fonction, entre autres choses, de la distance de la particule émettrice au détecteur. Dans le cas où le détecteur n'est pas sensible de façon significative au traceur en tous points de la section droite, il convient de porter une attention particulière à la qualité du mélange dans la première section de mesure.

On aura toujours intérêt à adopter des détecteurs identiques dans les deux sections de mesure et à les disposer selon la même configuration géométrique.

La différence des temps de réponse de l'ensemble de détection dans les deux sections doit être négligeable vis-à-vis du temps de transit.

On prendra soin de mesurer le bruit de fond de l'ensemble de détection en l'absence de traceur afin de pouvoir le déduire du signal brut. Autant que possible, on devra protéger les détecteurs pour diminuer le bruit de fond.

Si l'on a des doutes sur la qualité du mélange et sur les détecteurs, on disposera plusieurs détecteurs dans une même section et on comparera les résultats obtenus couple par couple.

5.6 Nombre d'injections

Le nombre d'injections successives requises pour chaque mesure 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 de 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 mesures associées de temps de transit pour chaque débit de manière à avoir une analyse objective des incertitudes de mesure (voir chapitre 7).

5.7 Calcul du temps de transit

Le temps de transit du traceur entre les détecteurs peut être déterminé par des constructions graphiques adéquates sur les courbes concentration/temps ou 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 abscisses des points caractéristiques suivants, enregistrées sur les courbes relevées par les détecteurs (voir figure 2) :

a) Centres de gravité

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

b) Point définissant la médiane (c'est-à-dire demi-surface)

Dans le cas d'une conduite rectiligne, l'abscisse de la médiane est également un point caractéristique correct.

c) Points à hauteur partielle

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

d) Autres points

Le choix d'autres points, tels que la concentration maximale, 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 éventuellement être apportées pour tenir compte des différences de temps de transfert entre la section de mesure et la cellule pour chaque emplacement des détecteurs.

5.8 Mesure du volume du tronçon de mesurage

Le volume interne du tronçon de mesurage doit être déterminé par des mesures directes de la capacité du tronçon ou par des mesurages du diamètre moyen et de la longueur de la conduite 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 pratique de choisir avant montage la portion de conduite à utiliser comme tronçon de mesurage; il est important que ce volume utile 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.

6 CHOIX DU TRACEUR

6.1 Caractéristiques

Les principes généraux de choix des traceurs sont exposés au chapitre 5 de la partie I. Dans le cas présent, on prendra de plus en considération les critères suivants :

6.1.1 Type et énergie des rayonnements émis

On préfère en général des émetteurs γ aux émetteurs β car la mesure 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 radio-éléments à rayonnement β sont plus faciles à manipuler.

6.1.2 Activité massique maximale disponible

6.1.3 Prix

Le coût du traceur dépend, entre autres, du type et des caractéristiques du rayonnement émis, du débit à mesurer, de la sensibilité de l'ensemble de détection que l'on utilisera et de la précision souhaitée.

6.1.4 Concentration maximale admissible dans les eaux de boisson

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.

6.1.5 Période

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 stoc-

kage et de mesure du radio-élément afin de minimiser les questions de contamination et les problèmes de sécurité posés par l'utilisation d'un traceur radioactif.

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

6.2 Liste des traceurs recommandés

Parmi les traceurs les plus utilisés, on peut citer :

Isotope	Type de rayonnement				Concentration maximale admissible ¹⁾ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$
	Bêta		Gamma		
	Énergie MeV	Abondance %	Énergie MeV	Abondance %	
Brome-82 Période : 36,0 h	0,44	(100)	0,55	(75)	3×10^{-3}
			0,62	(42)	
			0,70	(28)	
			0,78	(83)	
			0,83	(25)	
			1,04	(29)	
			1,32	(28)	
Sodium-24 Période : 15,0 h	1,39	(100)	1,37	(100)	2×10^{-3}
			2,75	(100)	
Iode-131 Période : 8,04 jours	0,25	(3)	0,80	(2)	2×10^{-5}
	0,33	(9)	0,28	(5)	
	0,61	(87)	0,36	(80)	
	0,81	(1)	0,64	(9)	
			0,72	(3)	

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

Isotopes obtenus à partir de vaches à radio-éléments (générateurs)

Isotope	Période		Énergie Rayonnement γ keV
césium-baryum $^{137}\text{Cs}, ^{137}\text{Ba}$	^{137}Cs 30 ans	^{137}Ba 156 s	662
étain-indium $^{113}\text{Sn}, ^{113}\text{In}$	^{113}Sn 119 jours	^{113}In 104 min	390
tellure-iode $^{132}\text{Te}, ^{132}\text{I}$	^{132}Te 78 h	^{132}I 2,26 h	78

7 ÉVALUATION DES INCERTITUDES SUR LA MESURE DE DÉBIT

On se reportera, pour la détermination des erreurs, au chapitre 7 de la partie I.

D'une manière générale, la liste des causes d'erreurs est étroitement liée aux différentes étapes du mode opératoire décrites au chapitre 5.

7.1 La détermination du volume utile est réalisée avec une incertitude liée à la régularité de la conduite entre les sections de mesures, à la précision et au pas des mesures géométriques réalisées. 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 doit être compatible avec la précision demandée pour la mesure du débit.

7.2 La non-constance dans les deux sections de mesure du terme $\int_0^\infty C_2 dt$, caractéristique de la qualité du mélange, introduit une erreur systématique qui n'est pas calculable actuellement, mais dont l'importance est certainement très inférieure aux écarts maximaux affectant le terme $\int_0^\infty C_2 dt$ dans les deux sections de mesures, notamment lorsqu'on utilise une mesure 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.

7.3 Le dispositif de détection définit à chaque instant dans les sections de mesures une valeur approchée de la concentration moyenne en traceur. La valeur du temps de transit, calculée à partir des courbes de variation de cette grandeur en fonction du temps aux deux sections de mesures 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).

7.4 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 maximum 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.

7.5 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).

7.6 L'utilisation des différentes méthodes de détermination des points caractéristiques des courbes concentration/temps décrits en 5.7 introduisent 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.

7.7 La mesure par la méthode du temps de transit n'étant pas instantanée 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.

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

7.9 Dans tous les cas, l'erreur aléatoire sur le temps de transit ainsi que celles sur la qualité du mélange et le dispositif de détection peuvent être estimées, a posteriori, par répétition des mesures du même débit avec le même dispositif et par comparaison avec l'estimation aléatoire faite par analyse des composants de l'erreur à attendre dans les conditions d'utilisation normale (voir 7.3.3 de la partie I).

8 EXEMPLE DE CALCUL DU DÉBIT

On utilise du sodium-24 (sous la forme $^{24}\text{NaHCO}_3$) pour mesurer un débit d'eau dans une conduite de 2 m de diamètre. Les détecteurs sont placés sur la conduite à 72 m et à 172 m du point d'injection. Le traceur est injecté simultanément à l'aide de quatre soupapes également espacées à la périphérie de la conduite.

8.1 Qualité du mélange au droit de la première section de mesurage

La première section de mesure est à $72/2 = 36$ diamètres de conduite en aval de la position d'injection. D'après 6.2 et la figure 3 de l'ISO 2975/1, la variation de $\int_0^\infty C_2 dt$ est d'environ 5 %. Cette quantité est suffisante pour une mesure de débit meilleure que 1 % lorsqu'on utilise des détecteurs sensibles sur une grande partie de la conduite.

8.2 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 :

$$\frac{100}{2} = 4,25 p \left(p + \sqrt{\frac{72}{2}} \right)$$

Ainsi $p = 1,56$.

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 10 mCi de sodium-24 à chaque injection, la concentration maximale, C_m , en microcuries par mètre cube, dans la seconde section de mesurage, est donnée par la formule

$$C_m = \frac{3 \times 10 \times 1\,000}{4 \times 2^3 \times \left(\frac{172}{2}\right)^{1/2}} \approx 100$$

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.

8.3 Volume de la section de mesurage

Le diamètre intérieur moyen de la section de mesurage déterminé à partir de 80 mesures en des points différents est de $2,025 \pm 0,002$ m (avec un intervalle de confiance de 95 %). La distance mesurée entre les sections de mesurage est de $100,2 \pm 0,1$ m.

Le volume V du tronçon est donné, en mètres cubes, par la formule

$$V = \frac{\pi \times (2,025)^2 \times 100,2}{4} = 322,7$$

avec une erreur-limite de :

$$\pm 100 \sqrt{\left(\frac{2 \times 0,002}{2,025}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{100,2}\right)^2}$$

$$\approx \pm 0,22 \%$$

8.4 Temps de transit

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 2b)] à une échelle des temps enregistrée simultanément et obtenue à partir d'un oscillateur à cristal présentant une erreur-limite de $\pm 0,01$ %.

8.5 Débit volumique

Le débit volumique, q_i , dans la conduite à chaque mesure du temps de transit est donné, en mètres cubes par seconde, par la formule

$$q_i = \frac{V}{t_i} = \frac{322,7}{t_i}$$

Le débit volumique moyen, q , pendant tout le temps de mesure des n injections est donné, en mètres cubes par seconde, par la formule

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n} q_i = \frac{V}{n} \sum_{i=0}^{i=n} \frac{1}{t_i}$$

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

$$t^* \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q)^2}{n(n-1)}}$$

où n est le nombre d'injections et t^* la variable de Student pour $n-1$ degrés de liberté.

Dans cet exemple, on pose que le volume moyen du débit est q m³/s avec une erreur aléatoire due aux fluctuations, etc., de $\pm 0,4$ % (avec un intervalle de confiance de 95 %). L'erreur-limite totale sur le débit peut être estimée en combinant les diverses erreurs ci-dessus, soit :

$$\sqrt{(0,22)^2 + (0,01)^2 + (0,4)^2} \approx 0,5 \%$$

Cet exemple illustre une mesure de débit effectuée dans des conditions favorables mais l'erreur-limite peut être nettement supérieure à cette valeur si d'autres sources d'erreurs, comme il est dit au chapitre 7, sont en cause. Une évaluation objective de la grandeur de ces erreurs peut être obtenue soit par comparaison avec des étalons primaires de mesure du débit, directement ou indirectement, soit par prise en considération des variations dans les conditions de mesure (tronçon de mesure, position des détecteurs, etc.).