

Contrôle de l'étanchéité

par **Jacques TALLON**

Chef de Produit Contrôle d'Étanchéité, Division Vide et Mécanique, Alcatel-CIT

1. Écoulement des fluides dans les fissures. Études théoriques	R 2 055 - 3
1.1 Nature des fuites.....	— 3
1.2 Caractérisation d'une fuite.....	— 3
1.2.1 Fuite de liquide	— 3
1.2.2 Fuite de gaz ou de vapeur	— 4
1.2.3 Détermination des caractéristiques d'une fuite	— 6
1.3 Prestation d'étanchéité.....	— 7
2. Procédés et appareils utilisés	— 8
2.1 Contrôle par voie humide	— 8
2.2 Localisation à l'ammoniac	— 8
2.3 Test par décharge électrique.....	— 8
2.4 Détecteur à halogènes et à conductivité thermique.....	— 9
2.5 Détecteurs à manomètres à action différentielle	— 9
2.6 Détecteur à capture d'électrons.....	— 10
2.7 Détecteur à spectrométrie de masse	— 10
2.8 Détection aux traceurs radioactifs.....	— 12
2.9 Détection par mesure de variation de pression	— 12
3. Techniques de contrôle de l'étanchéité	— 13
3.1 Localisation des défauts.....	— 13
3.1.1 Méthode de localisation au jet	— 13
3.1.2 Méthode de localisation au renifleur	— 14
3.1.3 Méthode de localisation à la ventouse	— 14
3.2 Procédés de contrôle.....	— 14
3.2.1 Contrôle par évolution de pression.....	— 14
3.2.2 Contrôle par test global.....	— 15
3.2.3 Contrôle par accumulation	— 15
3.2.4 Contrôle par ressuage	— 15
3.3 Contrôles de fabrication.....	— 15
4. Conclusion	— 16
Pour en savoir plus.....	Doc. R 2 055

Le présent article est la refonte de l'article écrit initialement par **René-Paul HENRY** et **Pierre CRAMPON**. L'auteur a repris de larges extraits de l'article précédent et notamment l'étude théorique (§ 1) pratiquement sans changement.

L'étanchéité est la qualité que présente une enceinte fermée de ne permettre à aucun fluide de franchir ses parois. L'obtention et le maintien d'une telle propriété sont, dans la réalité, des opérations susceptibles d'une certaine gradation, l'herméticité d'une enceinte devant être considérée, même d'un point de vue théorique, comme illusoire. En effet, une structure parfaitement homogène peut être franchie par les gaz sous l'effet de phénomènes de sorption et de désorption aux interfaces du solide et de phénomènes de mise en solution et de diffusion en son sein. Ce processus complexe, appelé **perméation**, varie dans de très grandes proportions avec la nature des éléments en présence. C'est

ainsi que la perméation des gaz à travers les métaux n'est habituellement pas de nature à nuire à l'étanchéité, alors que celle des gaz à travers les élastomères peut conduire à des ambiguïtés lors de la recherche des fuites.

Nous ne nous préoccupons, dans ce qui suit, que des **fuites**, c'est-à-dire du transfert des fluides, qui ne relève pas du phénomène de diffusion ni de perméation.

Le lecteur se reportera également à la rubrique **Technique du vide** dans le traité Génie mécanique.

Symboles, notations et unités utilisés

Symboles	Grandeurs	Équations aux dimensions	Unités ou valeurs		
			Système International a	Système CGS ou hors système b	Équivalence n a = nb
C_s	correction sonique	sans			
d	diamètre	L	m	cm	10^2
F_γ	force superficielle	MLT^{-2}	N	dyne	10^5
G	quantité énergétique de gaz	ML^2T^{-2}	$Pa \cdot m^3$	cm^3 TPN	10, 13
Kn	$= \frac{d}{\ell_m}$ nombre de Knudsen	sans			
ℓ_m	libre parcours moyen	L	m	cm	10^2
$\frac{\ell_m}{L}$	ℓ_m relatif à pression moyenne	L	m	cm	10^2
L	longueur, épaisseur	L	m	cm	10^2
m	masse	M	kg	g	10^3
M	masse molaire	MN^{-1}	$kg \cdot mol^{-1}$	$g \cdot mol^{-1}$	10^3
p	pression	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	Torr	$7,500\ 6 \times 10^{-3}$
\bar{p}	pression moyenne	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	Torr	$7,500\ 6 \times 10^{-3}$
p_L	pression de vapeur saturante	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	Torr	$7,500\ 6 \times 10^{-3}$
p_s	pression sonique	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	Torr	$7,500\ 6 \times 10^{-3}$
p_γ	contre-pression superficielle	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa	Torr	$7,500\ 6 \times 10^{-3}$
q_G	flux de gaz	ML^2T^{-3}	$Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$	$Torr \cdot dm^3 \cdot s^{-1}$	7,500 6
q_m	débit-masse	MT^{-1}	$kg \cdot s^{-1}$	$g \cdot s^{-1}$	10^3
q_V	débit-volume	L^3T^{-1}	$m^3 \cdot s^{-1}$	$dm^3 \cdot s^{-1}$	10^3
r	rayon	L	m	cm	10^2
R	constante molaire des gaz	$ML^2T^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$	8,314 6 $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$	$8,314\ 6 \times 10^7$ $erg \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$	
Re	$= \frac{udp}{\eta}$ nombre de Reynolds	sans			
S	aire d'une section	L^2	m^2	cm^2	10^4
T	température thermodynamique	Θ	K	K	1
TPN	température et pression normales		20 °C et 0,101 3 MPa		
u	vitesse moyenne de déplacement	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$	$cm \cdot s^{-1}$	10^2
u_s	vitesse sonique	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$	$cm \cdot s^{-1}$	10^2
v_a	$= \sqrt{\frac{8}{\pi \rho_u}}$ vitesse moyenne arithmétique	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$	$cm \cdot s^{-1}$	10^2
V	volume	L^3	m^3	cm^3	10^6
γ	tension superficielle	MT^{-2}	$N \cdot m^{-1}$	$dyne \cdot cm^{-1}$	10^3
η	viscosité dynamique d'un gaz	$ML^{-1}T^{-1}$	$Pa \cdot s$	Po	10
η_ℓ	viscosité dynamique d'un liquide	$ML^{-1}T^{-1}$	$Pa \cdot s$	Po	10
v	nombre de moles	N	mol	mol	1
ρ	masse volumique d'un gaz	ML^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$	$g \cdot cm^{-3}$	10^{-3}
ρ_ℓ	masse volumique d'un liquide	ML^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$	$g \cdot cm^{-3}$	10^{-3}
ρ_u	$= M/RT$ masse volumique unitaire d'un gaz	$L^{-2}T^2$	$kg \cdot m^{-3} \cdot Pa^{-1}$	$g \cdot dm^{-3} \cdot Torr^{-1}$	$0,133\ 32 \times 10^{-3}$
τ	constante de temps	T	s	s	1

1. Écoulement des fluides dans les fissures. Études théoriques

La caractéristique principale d'une fuite est d'être un élément capricieux dont la géométrie et la permanence même sont soumises à des aléas qui dépendent de la réalisation des éléments ouverts, de leur assemblage et des conditions de traitement. En effet, une fuite obturée par inadvertance, lors d'une manutention, peut le rester au cours d'un traitement de surface ultérieur et se déboucher plus ou moins spontanément lorsque l'appareil est mis en service.

1.1 Nature des fuites

La forme et les dimensions d'une fuite sont liées à son origine. Très contournée dans le cas d'un défaut de structure (faille, tapure, fissure), elle est le plus souvent directe et traverse franchement la paroi dans le cas des jonctions définitives (reprises de soudures). On peut néanmoins se trouver dans le premier cas, s'il s'agit de brasures à mouillage imparfait ou de soudures par étincelage. Elle peut alors comporter une longueur nettement supérieure à l'épaisseur de la paroi et déboucher à une certaine distance du droit de son entrée. Les fuites aux jonctions démontables franchissent directement celles-ci et sont souvent motivées par des rayures ou des défauts de serrage. Elles peuvent alors présenter une section aplatie.

Il semble, par conséquent, aléatoire d'assigner aux fuites une géométrie représentative. C'est néanmoins une exigence de leur caractérisation, on leur supposera donc la forme d'un cylindre régulier, reliant directement les faces de la paroi qu'il traverse.

1.2 Caractérisation d'une fuite

Le transfert d'un fluide à travers un défaut étant régi par la nature de ce fluide, nous distinguerons le cas des liquides de celui des gaz ou des vapeurs.

1.2.1 Fuite de liquide

Le transfert d'un liquide à travers une fuite se définit par le débit-masse q_m de celui-ci. Il est constant le long de son trajet et égal au produit de la vitesse moyenne u du liquide par sa masse volumique ρ_ℓ et par l'aire S de la section de diamètre d qu'il traverse, soit selon notre hypothèse :

$$q_m = uS\rho_\ell = \frac{\pi}{4}ud^2\rho_\ell \tag{1}$$

Les conditions d'écoulement d'un liquide sont sous la dépendance du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{ud\rho_\ell}{\eta_\ell} \tag{2}$$

avec η_ℓ viscosité dynamique du liquide, dans le cas d'une canalisation cylindrique.

L'écoulement est habituellement turbulent si Re est supérieur à 2 200, laminaire si Re est inférieur à 1 200. Entre ces deux valeurs, la configuration de la canalisation détermine la nature de l'écoulement.

En appliquant la condition $Re \leq 1200$ à l'ensemble des relations (1) et (2), il vient :

$$q_m \leq 942,5 d \eta_\ell \tag{3}$$

Les débits-masse de liquide à travers les fuites satisfaisant généralement cette condition, nous bornerons notre étude à celle de l'écoulement laminaire, dont rend compte la loi de Poiseuille. Selon celle-ci, le débit-masse d'un liquide à travers une canalisation de diamètre d et de longueur L vaut :

$$q_m = \frac{\pi d^4 \rho_\ell}{128 L \eta_\ell} (p_{am} - p_{av}) \tag{4}$$

p_{am} et p_{av} étant les pressions à l'amont et à l'aval de cette canalisation.

La tension superficielle γ qu'exerce le liquide sur les bords d'entrée et de sortie de la fuite ralentit son écoulement par la manifestation d'une force superficielle :

$$F_\gamma = \gamma \pi d \tag{5}$$

à laquelle on peut faire correspondre une contre-pression :

$$p_\gamma = \frac{F_\gamma}{S} = \frac{4\gamma}{d} \tag{6}$$

Ce phénomène influe beaucoup sur les conditions d'écoulement du liquide.

■ Si la différence des pressions $p_1 - p_2$ du liquide, de part et d'autre de la paroi, est supérieure à $2p_\gamma$, le débit-masse vaut :

$$q_m = \frac{\pi d^4 \rho_\ell}{128 L \eta_\ell} \left(p_1 - p_2 - \frac{8\gamma}{d} \right) \tag{7}$$

Exemple : dans le cas de l'eau à 20 °C, on a les données suivantes :

$$\eta_\ell = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\rho_\ell = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

et $\gamma = 7,05 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

Un défaut de 2 μm de diamètre équivalent, dans une paroi de 5 mm d'épaisseur, sera responsable d'une fuite de débit-masse :

$$q_m = 7,84 \times 10^{-12} (p_1 - p_2 - 2,82) \text{ en kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

les pressions étant exprimées en bars.

La contre-pression superficielle vaut ici 0,282 MPa, le débit-masse critique [relation (3)] vaut :

$$q_{mc} = 942,5 d \eta_\ell = 1,885 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

■ Si, à l'opposé, la pression du liquide en amont de la fuite est inférieure à p_γ , celui-ci ne peut y pénétrer. Dans la mesure où la pression en aval est inférieure à celle p_L de la vapeur saturante du liquide à la température considérée (cas courant d'installations sous vide), celui-ci s'évapore à travers la fuite sous un débit-masse défini à partir de la loi de Langmuir, tel que :

$$q_m = \frac{d^3}{3L} \rho_L \sqrt{\frac{\pi \rho_u}{2}} \tag{8}$$

ρ_u étant la masse volumique unitaire de la vapeur.

Celle-ci (masse volumique mesurée sous la pression unité) est, dans le cas d'un gaz supposé parfait, donnée par la relation :

$$\rho_u = \frac{M}{RT} \tag{9}$$

avec M masse molaire du liquide,
 R constante molaire des gaz,
 T température thermodynamique.

Dans l'exemple précédent (eau à 20 °C), pour lequel :

$$M = 18,016 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$T = 293,15 \text{ K}$$

et $\rho_L = 2\,350 \text{ Pa}$

on a :

$$\rho_u = 7,391 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

et $q_m = 4,27 \times 10^{-15} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Au cas où une fuite se trouve bouchée, par suite de certains tests d'immersion par exemple, il est nécessaire de procéder à son évacuation. Un simple chauffage de la pièce est pratiquement inopérant [1] et il faut soumettre une des faces de la paroi à une pression nettement inférieure à celle de la vapeur saturante du liquide. Dans ces conditions, le temps de débouchage t est sensiblement donné par la relation :

$$t = \frac{3L^2}{4d} \cdot \frac{\rho_\ell}{\rho_L} \sqrt{\frac{2\pi}{\rho_u}} \quad (10)$$

Dans l'exemple précédent, le temps de débouchage est de 3 670 s (1 h environ). Il ne serait plus que de 90 s (1 min et demie) à 100 °C.

1.2.2 Fuite de gaz ou de vapeur

Le débit-masse des gaz étant d'une caractérisation difficile, on recourt à une quantité spécifique qui est le **flux**. Celui-ci, q_G , se définit comme la dérivée par rapport au temps de la quantité énergétique $G = pV$ d'un gaz en mouvement. Dans le cas d'un gaz parfait, la **loi de Gay-Lussac** nous conduit à la relation :

$$q_G = \frac{d(pV)}{dt} = RT \frac{dv}{dt} \quad (11)$$

v étant le nombre de moles en évolution, qui est égal au rapport de la masse m du gaz à sa masse molaire M , d'où :

$$q_G = \frac{RT}{M} \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{q_m}{\rho_u} \quad (12)$$

Le flux est donc égal au rapport du débit-masse q_m par la masse volumique unitaire, ρ_u .

Dans la mesure où le mouvement du gaz s'opère à l'intérieur d'une enceinte de volume constant, on a :

$$q_G = V \left(\frac{dp}{dt} \right)_V$$

Le flux se définit alors comme le produit de ce volume V par la vitesse d'évolution de la pression.

Dans le cas inverse où le gaz traverse une section sous une certaine pression p supposée constante, on a :

$$q_G = p \left(\frac{dV}{dt} \right)_p = p q_V$$

q_V étant le débit-volume du gaz à travers la section.

Dans le cas d'un régime établi, pour lequel q_m est constant, le flux est aussi constant si le système est isotherme et, en toute section droite, il est égal au produit de la pression moyenne dans celle-ci par le débit-volume qui la traverse.

Unités

Il résulte de sa définition que le flux est homogène à une puissance. L'unité légale est donc le watt, auquel on préfère substituer son équivalent, le $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ plus représentatif. L'unité encore couramment employée est le $\text{cm}^3 \text{ TPN} \cdot \text{s}^{-1}$, qui vaut 0,101 3 fois la précédente.

En technique du vide, le torr (1 Torr = 133 Pa) est d'un emploi courant pour la mesure des pressions, il sert à la définition d'une unité hybride, le Torr · dm³ · s⁻¹, qui vaut 0,133 fois l'unité légale. L'utilisation d'un sous-multiple, le mTorr ou micromètre de mercure, a conduit à la définition d'une unité 1 000 fois plus petite que la précédente et dénommée lusec ($\ell \cdot \mu/\text{sec}$). Son emploi est de moins en moins fréquent en matière de détection des fuites.

Calcul du flux

De la même façon que dans le cas des liquides, l'écoulement des gaz est sous la dépendance du nombre de Reynolds, lequel se fera, pour les mêmes valeurs que précédemment, soit en régime turbulent, soit en régime laminaire. Comme dans le cas des liquides, l'écoulement laminaire est pratiquement seul en jeu et s'établit pour des valeurs :

$$q_{mL} = q_{GL} \rho_u = 942,5 \eta d$$

soit $q_{GL} = 942,5 \frac{\eta d}{\rho_u} \quad (13)$

● La loi de Poiseuille [relation (4)] s'applique aussi au cas des gaz et des vapeurs, en observant toutefois que la masse volumique ρ du gaz varie uniformément le long de la canalisation et qu'il convient d'en adopter la valeur moyenne :

$$\bar{\rho} = \rho_u \bar{p} = \rho_u \left(\frac{p_{am} + p_{av}}{2} \right)$$

en sorte que, d'après (4) :

$$q_{mL} = q_{GL} \rho_u = \frac{\pi d^4 \rho_u}{128 L \eta} \left(\frac{p_{am}^2 - p_{av}^2}{2} \right)$$

et $q_{GL} = \frac{\pi d^4}{128 L \eta} \left(\frac{p_{am}^2 - p_{av}^2}{2} \right) \quad (14)$

Le domaine d'application de cette loi est toutefois limité à l'**état visqueux du gaz**, pour lequel le libre parcours moyen ℓ_m des molécules qui le constituent est petit devant la dimension transversale représentative de la canalisation. Le rapport de ces deux grandeurs est le **nombre de Knudsen** Kn , qui dans le cas d'une **canalisation** de diamètre d vaut :

$$Kn = \frac{d}{\ell_m}$$

La loi de Poiseuille n'est intégralement utilisable que pour des valeurs de Kn supérieures à 200.

● À l'inverse, pour des valeurs du libre parcours moyen telles que $Kn = 1$, le gaz, à l'état raréfié, connaît un **écoulement dit moléculaire** dont la valeur du flux qu'il engendre est définie par la **loi de Knudsen**. Cette loi, appliquée au cas d'une canalisation de diamètre d et de longueur L , s'écrit :

$$q_{GM} = \frac{d^3}{3L} \sqrt{\frac{\pi}{2\rho_u}} (p_{am} - p_{av}) \quad (15)$$

● Entre ces deux valeurs (1 et 200) du nombre de Knudsen, s'établit un **régime transitoire** d'écoulement dépendant des deux précédents et dont la relation qui rend compte du flux engendré, ou **loi générale de Knudsen**, contient chacune des relations (14) et (15), soit :

$$q_G = q_{GL} + Z q_{GM} \quad (16)$$

Z étant un facteur correctif défini expérimentalement par Knudsen et qui vaut :

$$Z = \frac{1 + \frac{d \cdot \bar{p}}{\eta} \sqrt{\rho_u}}{1 + 1,235 \frac{d \cdot \bar{p}}{\eta} \sqrt{\rho_u}} \quad (17)$$

Z varie ainsi entre 1 et 0,81 au fur et à mesure que croît le produit $d \cdot \bar{p}$.

Les relations (14) et (15) peuvent être considérées comme des approximations, généralement suffisantes, au-delà ou en deçà des valeurs de Kn indiquées précédemment. La relation (16) est toutefois applicable à tout écoulement non turbulent et n'a pas de spécificité réduite au domaine compris entre les valeurs 200 et 1.

La relation (16) peut se mettre sous une forme différente, en fonction du nombre de Knudsen moyen :

$$\overline{Kn} = \frac{d}{\ell_m}$$

ℓ_m étant le libre parcours relatif à la pression moyenne \bar{p} :

$$\bar{p} = \frac{p_{am} + p_{av}}{2}$$

soit :

$$q_G = \frac{d^3}{3L} \sqrt{\frac{\pi}{2\rho_u}} \left[0,07378 \overline{Kn} + \frac{1 + 1,256 \overline{Kn}}{1 + 1,551 \overline{Kn}} \right] (p_{am} - p_{av}) \quad (18)$$

ou

$$q_G = J q_{GM}$$

Le facteur J, que représente l'expression entre crochets de la relation (18), est habituellement donné par des tables [6] en fonction de :

$$\frac{\overline{Kn}}{2} = \frac{r}{\ell_m}$$

ou du produit $d \cdot \bar{p}$. On en trouvera les valeurs, en fonction de ces deux quantités, dans le diagramme de la figure 1. Il est applicable à tous les gaz, à quelque température que ce soit, en fonction de $\overline{Kn}/2$, dont la valeur se calcule, à partir de $d \cdot \bar{p}$ et des caractéristiques du gaz, par la relation :

$$\frac{\overline{Kn}}{2} = 0,39815 \frac{\sqrt{p_u}}{\eta} d \cdot \bar{p} \quad (19)$$

Exemple : dans le cas de l'air sec à 20 °C, les caractéristiques :

$$\rho_u = 1,1911 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

et

$$\eta = 1,818 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

sont telles que l'on a sensiblement $\overline{Kn}/2 = 100 d \cdot \bar{p}$ [cm · Torr] (1 cm · Torr = 1,333 m · Pa). On peut ainsi porter, pour l'air, ces deux valeurs parallèlement en abscisses logarithmiques (figure 1).

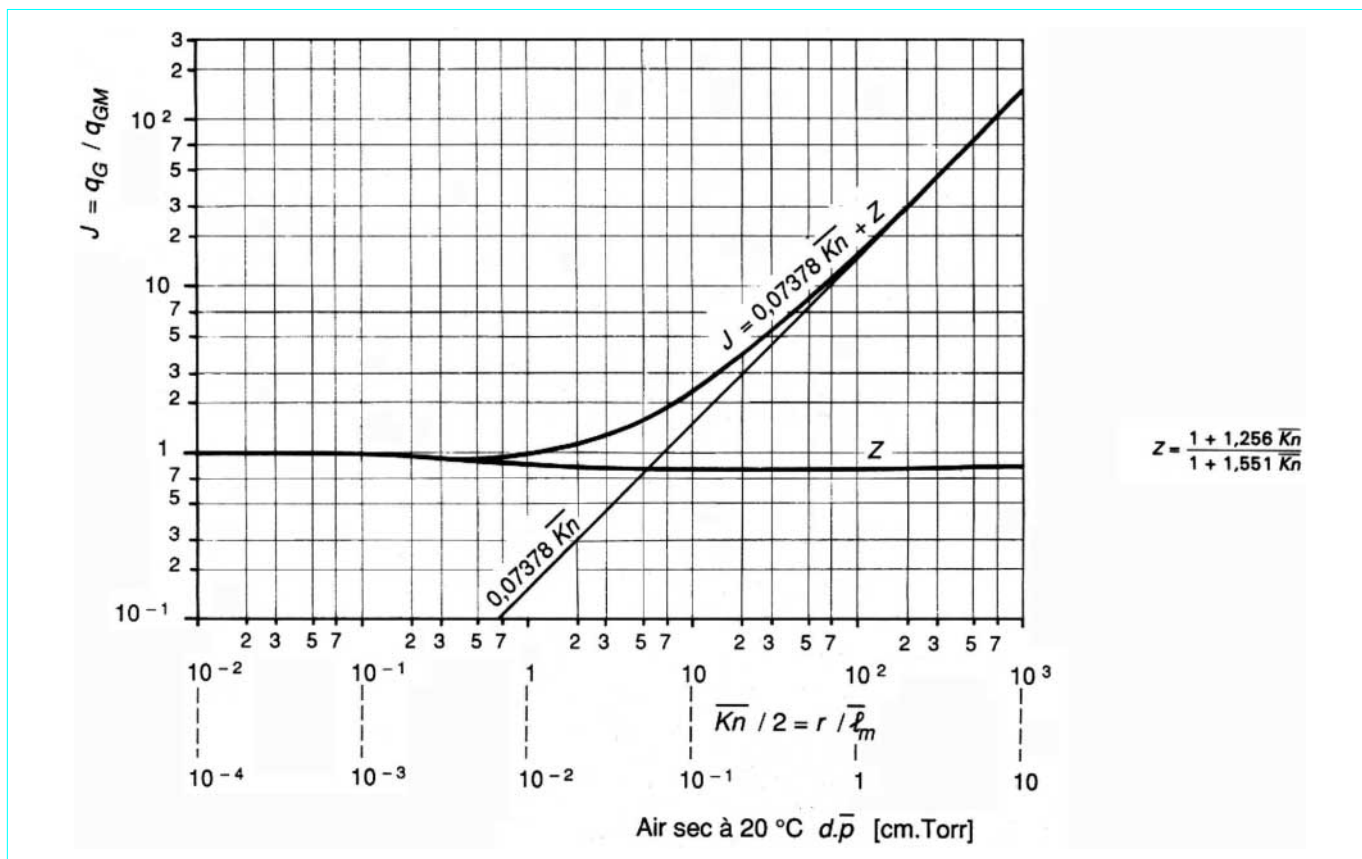


Figure 1 – Rapport $J = q_G/q_{GM}$ en fonction du demi-nombre de Knudsen, du produit $d \cdot \bar{p}$ pour l'air sec à 20 °C

● Le flux de gaz ou de vapeur qui s'écoule à travers une fuite a une limite supérieure définie par le fait qu'il ne peut avoir une vitesse supérieure à celle u_s du son dans ce gaz ou cette vapeur. Le **flux maximal** q_G susceptible de traverser une section de diamètre d est, dans ces conditions, tel que :

$$q_G = p_s q_V = p_s \frac{\pi}{4} d^2 u_s$$

dans laquelle p_s représente la pression sonique, valeur minimale de la pression qui peut exister dans cette section sous l'effet du flux q_G . Or, la vitesse du son étant sensiblement les trois quarts de la vitesse moyenne arithmétique v_a des molécules, soit :

$$u_s = 3 \sqrt{\frac{1}{2\pi\rho_u}}$$

il vient :

$$p_s = 1,0638 \frac{q_G}{d^2} \sqrt{\rho_u} \quad (20)$$

C'est la pression minimale que connaîtra la fuite à son aval, de sorte que l'on doit remplacer, dans les relations (14), (15) ou (18), p_{av} par cette valeur dans la mesure où elle se trouverait être plus faible que p_s . Dans une telle éventualité, cette substitution dans la relation (18) conduit à :

$$q_G = \frac{d^3}{3L} \sqrt{\frac{\pi}{2\rho_u}} J p_1 \frac{1}{1 + 0,4444 \frac{dJ}{L}} = J q_{GM} p_1 C_s \quad (21)$$

p_1 étant la pression qui s'exerce en amont.

La *correction sonique* $C_s = \frac{1}{1 + 0,4444 \frac{dJ}{L}}$ est un facteur mino-

rant qui tend vers 1 au fur et à mesure que décroît d/L .

La relation (21) est indéterminée, puisque la valeur de la pression moyenne dans la fuite, nécessaire pour la détermination de J n'est pas connue. On lui assigne initialement la valeur $p_1/2$, à partir de laquelle on calcule une valeur approximative de q_G . Celle-ci conduit à une valeur de p_s susceptible d'être portée dans la relation (18). Des approximations successives peuvent, si nécessaire, être conduites à partir des relations (20) et (21) en donnant à J la valeur qui correspond à :

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_s}{2}$$

1.2.3 Détermination des caractéristiques d'une fuite

D'une façon générale, une fuite est localisée à l'aide d'un **gaz test**. Le flux de ce gaz à travers elle peut être ensuite défini par certaines méthodes ou à l'aide d'un appareil ad hoc. Le degré des équations (18) ou (21) ne permettant pas une résolution analytique, on recourt à un abaque à points alignés, analogue à celui de la figure 2, établi pour l'air sec et l'hélium à 20 °C.

Exemples numériques (figure 2)

a) Définition du diamètre équivalent d d'une fuite responsable d'un flux q_G d'hélium de $6,35 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, à travers une paroi de 5 mm d'épaisseur, sous une pression p_1 de 10^5 Pa , la pression en aval p_2 étant supposée négligeable.

— On divise la valeur du flux par la différence en pascals des pressions à laquelle est soumise la fuite, soit :

$$\frac{q_G}{p_1 - p_2} = \frac{6,35 \times 10^{-8}}{10^5} = 6,35 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

— On marque sur l'abaque les points $L = 5 \text{ mm}$ et :

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2} = 0,05 \text{ MPa}$$

— On cherche par tâtonnements une valeur de d (ici $2 \mu\text{m}$) pour laquelle le produit de la valeur $\frac{q_G}{p_1 - p_2}$ (He), relevée à l'intersection de la droite « $2 \mu\text{m}-5 \text{ mm}$ », par celle de J (He), relevée à l'intersection de la droite « $2 \mu\text{m}-0,05 \text{ MPa}$ », conduise à la valeur de :

$$6,35 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

On trouve, dans l'exemple cité :

$$5,2 \times 10^{-13} \times 1,22 = 6,34 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

avec $d = 2 \mu\text{m}$.

b) Détermination du flux d'air sec qui, sous une pression p_1 de 10^5 Pa , pénètre à travers la fuite décrite précédemment dans une enceinte où la pression p_2 est maintenue à une valeur négligeable.

— On joint le point représentatif de $L = 5 \text{ mm}$ à celui de $d = 2 \mu\text{m}$ par une droite dont l'intersection avec l'axe :

$$\frac{q_G}{p_1 - p_2} (\text{air})$$

conduit à la valeur de $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

— On joint le point représentatif de $\bar{p} = 0,05 \text{ MPa}$ à celui de $d = 2 \mu\text{m}$ par une autre droite dont l'intersection avec l'axe J (air) conduit à la valeur de 1,91.

Le flux d'air admis à travers la fuite est de :

$$2 \times 10^{-13} \times 1,91 \times 10^5 = 3,82 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

■ **Calcul de la pression sonique** : on vérifie que, dans les cas **a)** et **b)**, la pression sonique est faible devant p_1 au moyen de la relation (20) :

$$p_s = 1,064 \frac{q_G}{d^2} \sqrt{\rho_u}$$

avec

$$\rho_u = \frac{M}{RT} \quad [\text{relation (9)}]$$

En effet, pour le cas **a)** :

$$p_u = \frac{4,003 \times 10^{-3}}{8,3146 \times 293} = 1,642 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

et
$$p_s = 1,064 \frac{6,35 \times 10^{-8}}{(2 \times 10^{-6})^2} \sqrt{1,642 \times 10^{-6}} = 21,62 \text{ Pa}$$

Pour le cas **b)** :

$$p_u = \frac{29,032 \times 10^{-3}}{8,3146 \times 293} = 1,191 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

et
$$p_s = 1,064 \frac{3,82 \times 10^{-8}}{(2 \times 10^{-6})^2} \sqrt{1,191 \times 10^{-5}} = 35,05 \text{ Pa}$$

Si cette valeur est supérieure à p_2 , on fait $p_2 = p_s$ dans le calcul de

$\frac{q_G}{p_1 - p_2}$ et de $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$ et l'on reprend les déterminations sur ces nouvelles bases.

Le diamètre représentatif de la fuite ayant été défini comme précédemment, on calcule le débit-masse de liquide susceptible de traverser la fuite, ou le flux de gaz ou de vapeur.

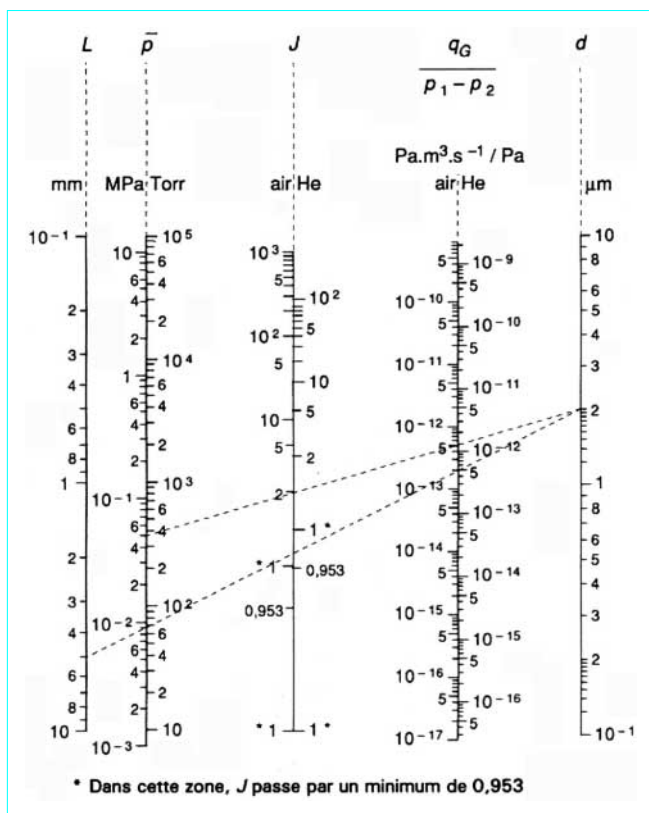


Figure 2 – Abaque pour la caractérisation des fuites en hélium ou en air sec à 20 °C (figure 1)

■ Le débit-masse de liquide susceptible de traverser la fuite est calculé par application de la relation (7).

L'exemple cité pour l'eau (§ 1.2.1) montre que son débit-masse serait, sous une pression de 1 MPa en amont :

$$q_m = 7,84 \times 10^{-12} (10 - 2,82) = 5,63 \times 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Une durée de 205 jours est nécessaire pour en collecter un gramme.

Si la pression du liquide est inférieure à la contre-pression superficielle, le débit-masse de vapeur qui se propage à travers la fuite est défini par application de la relation (8).

L'exemple précédent conduit, pour une pression $p_1 = 0,141 \text{ MPa}$, à un débit-masse de $4,27 \times 10^{-15} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ de vapeur d'eau, et la même quantité que précédemment, perdue en amont, le sera en un peu plus de 74 siècles.

■ Le flux de gaz ou de vapeur est calculé par application des relations (14), (15), (18) ou (21) suivant les conditions de pression.

Exemple : le cas de l'air sec à 20 °C est aussi traité graphiquement. Le flux calculé dans l'exemple numérique, pour la même fuite que précédemment, correspond à un débit-masse de gaz :

$$q_m = q_G \rho_u = 3,82 \times 10^{-8} \times 1,191 \times 10^{-5} = 4,55 \times 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Il serait responsable d'une vitesse de remontée de pression, dans un volume $V = 1 \text{ dm}^3$, de :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{q_G}{V} = 3,82 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

dans lequel une pression de 1 Torr (133 Pa) serait atteinte après 40 jours.

La pression maintenue à l'aval de la fuite par un dispositif qui y engendre un débit-volume $q_V = 1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ serait :

$$p = \frac{q_G}{q_V} = 3,82 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

Nota : la pression au débouché de la fuite, égale à la pression sonique, serait de 35,05 Pa.

1.3 Prestation d'étanchéité

Un défaut d'étanchéité dans les parois d'une enceinte se manifeste de deux façons, selon que celle-ci est fermée, après une mise en condition, ou reliée en permanence à un système destiné à en maintenir la pression interne à un certain niveau. Dans le premier cas, la pression y subira une évolution qui peut être impropre à la conservation des matériaux ou au fonctionnement des appareils qu'elle contient (tubes électroniques, transistors, produits fissiles) ; dans le second cas, le système peut devenir insuffisant pour atteindre le niveau voulu de pression (par exemple dans les installations sous vide entretenu).

Les conditions ainsi prescrites conduisent à la définition, dans les appareils en dépression, d'un flux extérieur de gaz maximal admissible :

$$q_{GF} = V \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} \quad \text{dans le premier cas, } q_{GF} = q_V p_{max} \text{ dans le second}$$

Les conclusions seraient symétriques dans le cas d'un appareil en surpression.

La vérification de l'étanchéité ne pouvant être faite qu'une fois l'installation montée, à titre de contrôle global, un contrôle fragmentaire des éléments constitutifs s'avère nécessaire, jusqu'au niveau des pièces détachées. Il convient donc d'affecter chacune d'elles d'une *prestation individuelle*. Il serait irrationnel de définir cette prestation en fonction du volume que la pièce occupera dans l'installation. En effet, les fuites se situent généralement au niveau des lignes de discontinuité de l'enceinte (soudures, jonctions démontables). Or, sous un volume réduit, un robinet en contient relativement bien plus qu'un réservoir. On définira donc, au préalable, la longueur approximative L des lignes de discontinuité de l'appareil monté, puis une fuite linéique maximale admissible q_{GF}/L applicable à tous les éléments. La *prestation individuelle* de ceux-ci sera égale au produit de cette fuite linéique par la longueur des lignes de discontinuité qu'ils comportent.

Le cas des pièces moulées est un peu différent, car elles sont susceptibles de présenter des porosités réparties sur une certaine surface.

Il est prudent de vérifier l'étanchéité des pièces séparées avant de procéder à leur assemblage.

2. Procédés et appareils utilisés

Les procédés utilisés pour déceler les fuites sur des installations contenant un fluide sous pression se sont très vite révélés d'une médiocre sensibilité dans leur application aux techniques du vide. Des appareils spécifiques ont dû être créés, susceptibles de mettre en évidence un flux d'hélium, sous 0,1 MPa, de $10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à travers une fuite dans des conditions, il est vrai, exceptionnelles.

L'abaque de la figure 2 nous montre, par extrapolation de l'axe des diamètres d , que le diamètre représentatif de la fuite serait de $0,04 \mu\text{m}$ dans une paroi de 2 mm d'épaisseur. Un flux d'air de $4 \times 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ serait admis à travers elle sous une pression de 0,1 MPa. Il faudrait 105 siècles pour que la pression s'accroisse de 1 Torr dans un volume de 1 dm³.

À l'inverse, ces procédés et appareils sont utilisés dans des installations sous pression, telles que certaines installations nucléaires pour lesquelles des normes sévères sont établies. Ils ont en commun leur principe fondamental, lequel consiste à mettre en évidence, d'un côté d'une paroi, un fluide test appliqué de l'autre côté. Ils présentent toutefois une grande diversité et des sensibilités variées. Nous passons en revue ceux qui sont d'un emploi relativement courant. Ils sont par ailleurs très différents des procédés de contrôle de la qualité des produits semi-finis (radiographie, gammagraphie, champ magnétique), inaptes à déceler de façon certaine l'existence éventuelle d'une fuite. Par contre, les procédés de détection des fuites ne peuvent renseigner sur la continuité d'une paroi, des criques éventuelles pouvant ne comporter aucune liaison avec l'extérieur.

2.1 Contrôle par voie humide

■ Emploi d'un liquide test

Une première méthode consiste à remplir la pièce d'une solution alcoolique de rouge de méthyle ou de rouge organol et à déceler leur apparition dans une couche de blanc d'Espagne dont est enduit l'extérieur. Elle est plus employée que la méthode consistant à remplir la pièce de pétrole et à exciter la fluorescence de celui-ci à la sortie de la fuite, à l'aide d'une lampe à ultraviolets.

Ces deux méthodes présentent le grave inconvénient d'obstruer cette fuite par un liquide difficile à extraire et de compromettre en conséquence une reprise éventuelle. Elles doivent être proscrites absolument du contrôle de pièces destinées à des installations de vide ou à des centrales nucléaires.

■ Test par immersion (à la bulle)

Ce procédé, d'un emploi fréquent, consiste à mettre la pièce sous une certaine pression d'air et à l'immerger dans de l'eau, la pressurisation devant précéder l'immersion pour éviter que certaines fuites ne se remplissent d'eau. De même que dans les cas précédents (§ 2.1), la fuite minimale décelable est indépendante du volume de l'appareil, la présence d'un défaut se manifestant par la formation de bulles d'air. L'addition à l'eau d'un produit tensio-actif (Teepol, alcool laurique sulfoné) réduit la tension superficielle et évite la formation de bulles à la surface de la pièce.

Une pression de 1 MPa d'air, appliquée sur une face d'une paroi de 1 cm d'épaisseur, permet de déceler une fuite de $2 \mu\text{m}$ de diamètre équivalent par observation d'une bulle de 1 mm de diamètre par minute, condition extrême de détection. La fuite minimale décelable par ce procédé est d'environ $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La surpression minimale à appliquer pour vaincre la tension superficielle est, dans le cas de l'eau pure :

$$\Delta p_{\gamma} = \frac{0,282}{d} \text{ en MPa}$$

avec d en μm .

2.2 Localisation à l'ammoniac

Ce procédé est fondé sur la mise en évidence du gaz test, de l'ammoniac en l'occurrence, par une réaction chimique à la sortie de la fuite [3]. Le réactif utilisé est du bleu de bromophénol préparé en milieu acide, de couleur initialement jaune paille, laquelle vire au bleu au droit d'une fuite. La pièce est remplie de gaz ammoniac sous une pression d'environ 0,25 MPa, soit après mise sous vide grossier, soit par balayage si l'air de la pièce ne peut être évacué. Sa surface externe est ensuite couverte de réactif soit par pulvérisation d'une peinture, soit par enveloppement de bandes imprégnées. Les défauts les plus importants sont repérés et provisoirement colmatés pour éviter que la réaction se propage sur une partie importante du révélateur. Une attente de quelques heures permet ensuite de localiser avec précision une fuite minimale un peu inférieure à $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, déterminée sous 0,1 MPa par un défaut de $1,2 \mu\text{m}$ de diamètre dans une paroi de 1 cm d'épaisseur.

La localisation peut aussi se faire avec précision à l'aide d'un papier imprégné d'acide chlorhydrique, par la formation de fumées blanches de chlorure d'ammonium, mais d'une façon moins fine puisque l'on ne bénéficie pas de l'accumulation dans le temps. La sensibilité du procédé est toujours indépendante du volume de la pièce, et ce procédé constitue le moyen le mieux adapté au contrôle primaire de pièces chaudronnées.

2.3 Test par décharge électrique

■ **La bobine** : il s'agit du procédé le plus ancien de détection des fuites, applicable à des installations en verre, sous une pression comprise entre 10^3 et 5×10^{-1} Pa environ. Il consiste à déplacer une des électrodes d'une bobine de Ruhmkorff, ou d'une bobine haute fréquence à applications médicales, sur les parties suspectes. À proximité d'une fuite, le verre est traversé par un trait lumineux qui ne laisse aucune ambiguïté sur son existence.

■ **Au tube témoin** : l'utilisation d'un tube témoin (figure 3) se fonde sur une autre propriété de la décharge électrique et permet en outre de tester des installations métalliques. La colonne anodique D de la décharge présente en effet une coloration liée à la nature du gaz présent, pourpre à lie-de-vin dans le cas de l'air, blanc bleuâtre dans le cas des solvants organiques, du gaz carbonique et du butane. Le tube C peut être alimenté par une bobine de Ruhmkorff ou un transformateur à fuites magnétiques A. Le changement de couleur de la décharge, par aspersion d'un des fluides cités précédemment, permet de localiser une fuite dont la valeur minimale décelable est de $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Un contrôle global par accumulation, avec une sensibilité d'environ $5 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, peut être opéré en isolant l'installation de son système de pompage durant une demi-journée. La coloration bleuâtre donnée par les gaz désorbés vire en effet au pourpre dans l'éventualité d'une fuite.

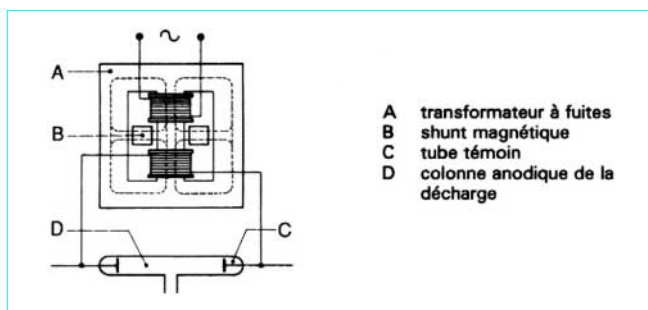


Figure 3 – Tube témoin

2.4 Détecteur à halogènes et à conductivité thermique

■ Détecteur à halogènes

Les métaux alcalins sont susceptibles d'émettre, à une certaine température, des ions en présence d'un halogène. Cette propriété est mise à profit dans un appareil constitué par un fil de platine commercial, dont le taux d'impuretés en alcalins est suffisant, porté à un potentiel positif par rapport à une cathode cylindrique dans laquelle il est centré. Celle-ci recueille les ions dont une certaine fraction est émise en permanence. Le courant produit est compensé dans un montage en pont. Un composé halogéné (trichloréthylène, tétrachlorure de carbone ou habituellement dichlorofluorométhane ou Fréon 12), admis à travers une fuite éventuelle, a pour effet d'accroître subitement ce courant et de provoquer le déséquilibre du pont.

L'appareil est utilisé de deux façons. La diode qui le constitue peut en effet être reliée à une installation dans laquelle une pression optimale d'environ 10^{-1} Pa est entretenue, un jet d'halogène étant promené sur les parties suspectes. De façon plus courante, la diode A est placée (figure 4) entre un tube C long et mince, dit **tube renifleur** et un ventilateur B qui permet d'aspirer l'air à travers la diode lorsque l'on déplace l'appareil à proximité d'une pièce sous pression de Fréon. Cet appareil fonctionne ainsi à la pression atmosphérique, le test s'effectuant par une méthode dite **de reniflage**. La fuite minimale décelable est, dans les meilleures conditions, d'environ 10^{-8} Pa · m³ · s⁻¹, dans les deux cas. La diode est en effet sujette à des fluctuations et sensible à la pollution par l'huile ou les vapeurs d'alcool. Cette performance n'est acquise qu'avec des appareils renifleurs modernes, munis d'un zéro automatique.

Le gaz Fréon détecté par ce type d'appareil peut être utilisé comme gaz traceur, c'est-à-dire que la pièce à tester est remplie de Fréon pour les besoins du test d'étanchéité, et ensuite vidée du gaz, ou bien le dispositif testé fonctionne à base de Fréon, comme des installations frigorifiques.

Dans ce dernier cas, la fuite est exprimée en grammes de Fréon par an, c'est-à-dire la perte en charge du système en Fréon. Pour un réfrigérateur domestique non rechargeable, la fuite admise est inférieure à 5 g/an, et chaque réfrigérateur est contrôlé dans les ateliers de fabrication.

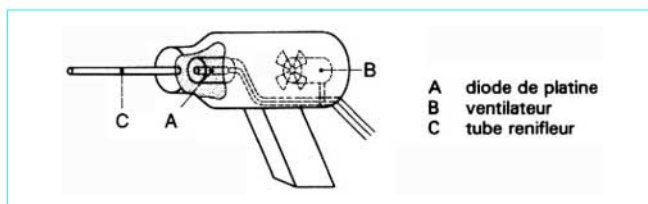


Figure 4 – Renifleur à halogènes

Il est important de noter que les détecteurs de fuites de Fréon (halogènes) sont avant tout des détecteurs de gaz, c'est-à-dire que, par la présence de gaz, ils interpréteront une fuite. Il est donc primordial que l'atmosphère aux abords de la pièce à contrôler soit « propre » (air propre = air non contaminé par le gaz traceur utilisé). Il est bien entendu difficile, voire impossible, de respecter cela parfaitement à la lettre, surtout dans des conditions d'ateliers de production où il faut charger les pièces en gaz à proximité du lieu de test.

La « propreté » de l'air aux abords du test est primordiale pour la précision, la fiabilité et la constance des résultats. Il faut essayer d'éloigner le plus possible les ensembles de charge de l'endroit du test, et travailler dans des enceintes légèrement pressurisées avec de l'air non contaminé.

Les appareils conçus pour ce type de contrôle sont munis d'un sélecteur zéro automatique-zéro manuel, le premier servant à corriger de légères contaminations de l'air à l'endroit du test, le second utilisé pour quantifier la contamination, faire des tests dans des endroits très propres et déceler (par *effet de loupe*) des fuites très fines ($0,01$ g/an = environ 10^{-8} atm · cm³ · s⁻¹ soit 10^{-9} Pa · m³ · s⁻¹).

■ Détecteur à conductivité thermique

La spécificité aux gaz des manomètres utilisés pour la mesure des pressions dans les installations de vide : manomètres de Pirani, de Penning, et à cathode chaude, est parfois mise à contribution pour localiser, sur ces installations, des fuites de moyenne importance (10^{-6} à 10^{-8} Pa · m³ · s⁻¹). Le premier d'entre eux met en relief la déperdition d'un fil chauffé, centré dans un tube, laquelle varie avec la conductivité thermique du gaz. Il a reçu une consécration industrielle sous la forme d'un **appareil renifleur** analogue au précédent.

La pièce est pressurisée en un gaz dont la conductivité thermique est nettement différente de celle de l'air. L'indication du détecteur est amenée automatiquement au zéro, en présence d'un courant d'air atmosphérique aspiré par le ventilateur. Le renifleur est promené le long des soudures et des joints. Le gaz test admis au niveau d'une fuite a pour effet de modifier le transfert d'énergie, la température du fil, donc sa résistance, et de déséquilibrer le pont. L'importance de ce déséquilibre permet d'apprécier la gravité du défaut, après étalonnage de l'appareil. On utilise à cet effet une fuite étalon, constituée par un réservoir rempli de gaz test sous pression et par une pastille poreuse en métal fritté à travers laquelle un flux bien défini de ce gaz est délivré. Les appareils actuels comportent une courbe d'étalonnage fournie par le constructeur.

La fuite minimale décelable en hélium est de $1,6 \times 10^{-8}$ Pa · m³ · s⁻¹ ; en Fréon, elle est de 15 g/an. Une concentration en volume de 98 ppm (parties par million) d'oxyde de carbone est décelable dans l'air.

2.5 Détecteurs à manomètres à action différentielle

Les performances auxquelles peut conduire l'emploi des manomètres à vide sont minorées par les fluctuations de pression que connaît l'installation. On peut s'affranchir de ces fluctuations en montant en opposition deux capteurs identiques, dont l'un est précédé d'un piège thermique ou à charbon actif ayant pour effet d'empêcher le gaz test de l'atteindre. Dans ces conditions, seul l'autre capteur sera sensible à la présence du gaz test, alors que les gaz permanents contenus dans l'installation agiront de la même façon sur chacun d'eux. Les fuites minimales décelables données par les expérimentateurs, de l'ordre de 10^{-10} Pa · m³ · s⁻¹ par exemple pour le couple manomètre à ionisation-gaz carbonique, ne sont en réalité obtenues que dans des conditions exceptionnelles.

2.6 Détecteur à capture d'électrons

Le principe de fonctionnement de cet appareil (figure 5) est très différent de celui des précédents. Il comporte essentiellement une source radioactive de faible énergie (source de 10 mCi soit $3,7 \times 10^8$ Bq de nickel 63). Son rayonnement β provoque l'ionisation des molécules d'un gaz vecteur : air, azote ou argon. Les électrons ainsi libérés sont attirés par une anode qui délivre un certain courant. En présence de gaz électrophiles, tels que le Fréon ou l'hexafluorure de soufre, utilisés comme traceurs, ces électrons sont partiellement absorbés et provoquent une baisse du courant d'anode. Les ions négatifs ainsi formés ont en effet une mobilité très inférieure à celle des électrons libres.

L'appareil est utilisé en renifleur en vue de contrôler l'étanchéité d'installations pressurisées en l'un de ces gaz.

La fuite minimale décelable est de $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans les meilleures conditions d'emploi, c'est-à-dire en présence d'un gaz vecteur (azote ou argon) contenant moins de 10^{-5} volumes d'oxygène. Celui-ci est en effet propre à former des ions négatifs et sa présence dans l'air, employé comme gaz vecteur, a pour effet de relever à $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ la fuite minimale décelable. L'appareil fournit des indications quantitatives après calibrage à l'aide d'une fuite étalon.

2.7 Détecteur à spectrométrie de masse

La réalisation d'analyseurs de gaz adaptés aux techniques du vide a trouvé une rapide application à la détection des fuites (article *Spectrométrie de masse* [P 2 615] dans le traité *Analyse et Caractérisation*). Le spectromètre de masse est en effet conçu pour signaler, dans une installation, la présence d'un gaz sur la masse duquel il est calé. Des spectromètres à secteurs magnétiques ont été conçus dès 1940.

Principe

Il importe que ces appareils, d'une complexité et d'un prix de revient nettement supérieurs aux précédents, soient des spectromètres rudimentaires si l'on veut rester dans des conditions d'acquisition et d'exploitation raisonnables. Ils doivent donc être utilisés conjointement avec un gaz traceur aisé à séparer de ceux présents dans les installations de vide. Or, le pouvoir de résolution ρ d'un spectromètre magnétique est donné par la relation :

$$\rho = \frac{r_2 - r_1}{r_2} = 1 - \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}$$

r_1 et r_2 étant les rayons de courbure, sous l'effet d'un champ magnétique, des trajectoires des ions de deux gaz de masses molaires M_1 et M_2 voisines.

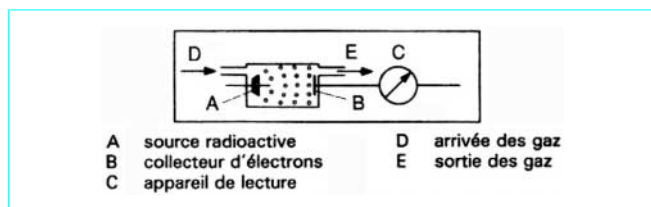


Figure 5 - Détecteur à capture d'électrons

Il en résulte que les masses légères sont les mieux séparées et que, par exemple, l'hélium l'est aisément de l'hydrogène ou du lithium qui sont ses voisins immédiats. C'est l'hélium que l'on utilise couramment, de préférence à l'hydrogène, dont les propriétés explosives font que l'on ne peut le manipuler facilement. L'hydrogène constitue en outre la majeure partie des gaz résiduels dans les installations d'ultra-vide. L'hélium en est au contraire pratiquement absent et n'existe que dans une proportion de 5×10^{-6} volume dans l'air. Sa faible masse molaire lui facilite, d'autre part, l'accès des petites fuites dans lesquelles prédomine l'écoulement moléculaire.

Spectromètre à hélium

Appelé couramment cellule d'analyse, il fonctionne de la manière suivante (figure 6).

Un filament chauffant Q émet dans le vide des électrons qui, soumis à la différence de potentiel d'une centaine de volts existant entre le filament et une chambre C, sont lancés vers la chambre et y pénètrent.

À l'intérieur de la chambre, les électrons rencontrent les molécules des différents gaz qu'ils transforment en ions, en leur arrachant, par choc, un électron. Le nombre d'ions produits est proportionnel à la pression.

Les ions formés (charges positives) sont à leur tour lancés (verticalement dans le plan de la figure) en direction de l'électrode A. À la sortie de A, nous avons donc un faisceau d'ions correspondant aux différents composants de l'air et éventuellement à l'hélium injecté à travers une fissure et envoyé sur l'analyseur.

Ce faisceau pénètre dans un champ magnétique perpendiculaire au plan de la figure. Sous son influence, les trajectoires des différents ions deviennent circulaires et se séparent en fonction de leurs masses respectives. Un système de diaphragmes B et D permet d'éliminer les ions plus lourds ou plus légers que l'hélium, de manière que seuls les ions hélium arrivent sur la cible. En libérant sur la cible leur charge positive, ils donnent alors naissance à un courant électrique que l'on mesure. Le courant électrique est proportionnel au nombre d'ions d'hélium, c'est-à-dire à la pression partielle d'hélium dans la chambre d'analyse, indépendamment de la pression totale d'air.

Détecteur élémentaire

Les déplacements de particules ne peuvent avoir lieu que dans un bon vide, de manière que les ions et les électrons ne soient pas gênés par des collisions avec des molécules de gaz.

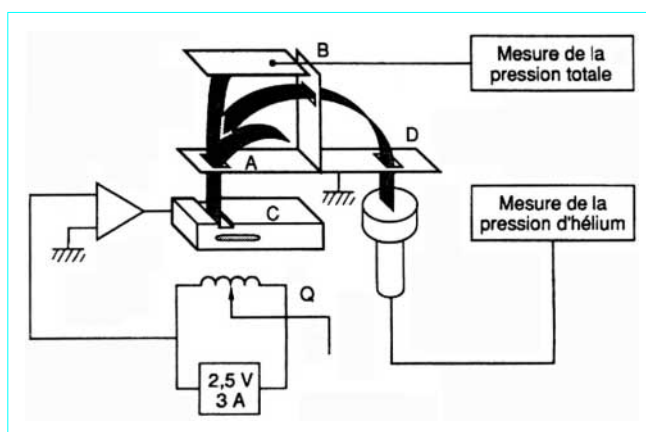


Figure 6 - Principe du spectromètre à hélium

Cela impose que la cellule d'analyse soit accompagnée d'un groupe, de pompage susceptible de maintenir une pression inférieure à environ 10^{-2} Pa au niveau de la cellule.

Un détecteur de fuites à hélium élémentaire comprend donc :

- une cellule d'analyse (spectromètre) ;
- un groupe de pompage pour vide secondaire (pression inférieure à 10^{-2} Pa) ;
- une vanne d'isolement et d'introduction d'échantillon gazeux.

Trois montages différents peuvent être utilisés pour réaliser un détecteur élémentaire (figure 7).

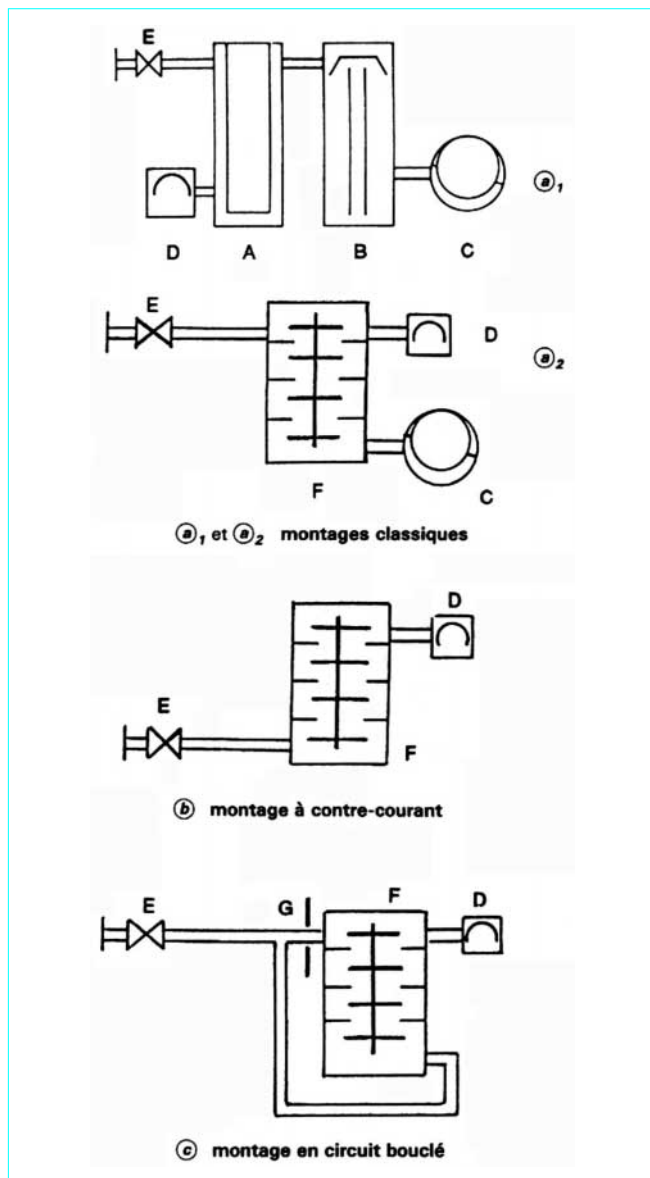


Figure 7 – Détecteur élémentaire à hélium

● Le **montage classique** ou **montage direct** (figure 7a1) comprend :

- un piège à azote liquide A ;
- une pompe secondaire (généralement pompe à diffusion) B ;
- une pompe à palettes d'entretien C ;
- une cellule d'analyse D ;
- une vanne d'isolement E.

Le montage a1 a été utilisé en premier lieu pendant des dizaines d'années. Le montage a2 est apparu vers 1980. Il n'utilise plus l'ensemble de pompage piège à azote liquide-pompe à diffusion mais une seule pompe secondaire (à diffusion ou turbomoléculaire) F.

● Le **montage à contre-courant** (figure 7b) comprend les mêmes composants que le montage a2, mais l'échantillon gazeux est introduit au refoulement de la pompe secondaire F (pompe à diffusion ou pompe turbomoléculaire). Cette pompe fonctionne alors comme un filtre grâce à un taux de compression fonction de la masse moléculaire des différents gaz. L'hélium peut remonter à contre-courant à travers la pompe secondaire, jusqu'à la cellule d'analyse, alors que les gaz plus lourds sont arrêtés totalement ou partiellement.

● Le **montage en circuit bouclé** (figure 7c) est dérivé du montage a2 en réunissant la sortie de la pompe secondaire F à son entrée grâce à une conductance G. La chute de pression à travers G est compensée par une augmentation de pression à travers la pompe secondaire grâce à son taux de compression.

Ces différents montages ont chacun des avantages et des inconvénients et sont choisis en fonction des utilisations envisagées.

Le montage permettant de travailler le plus rapidement et avec la meilleure sensibilité est le montage a1, mais il exige l'utilisation d'azote liquide.

Les montages b et c ne peuvent fonctionner d'une manière autonome.

■ Poste complet de contrôle d'étanchéité

Le détecteur élémentaire est généralement complété d'un groupe de pompage dit « de prévidage », destiné à faire le vide à l'intérieur de la pièce à contrôler et à créer ainsi la différence de pression nécessaire pour que l'hélium projeté à l'extérieur puisse pénétrer dans la pièce.

Le poste complet de contrôle d'étanchéité comporte trois sous-ensembles (figure 8) :

- un groupe de prévidage A ;
- un détecteur élémentaire B ;
- un dispositif E d'introduction de gaz dans B.

● Le **groupe de prévidage** comprend généralement une pompe à palettes P ou un ensemble pompe Roots-pompe à palettes, complété d'une vanne d'isolement G, d'une vanne d'entrée d'air D, d'un manomètre à vide M.

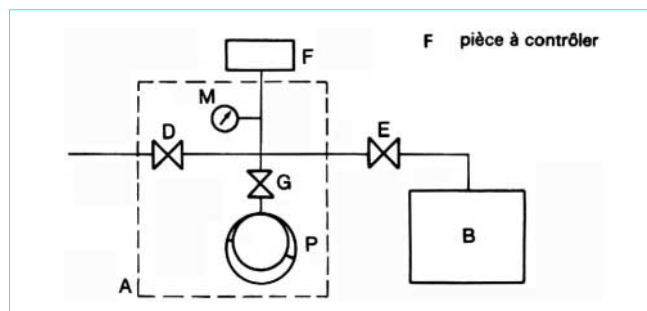


Figure 8 – Poste complet de contrôle d'étanchéité à hélium

- Le **détecteur élémentaire** a été décrit au paragraphe 2.7.

On utilise souvent, grâce à une commutation de vannes, la même pompe à palettes pour prévider la pièce à contrôler, puis pour entretenir le vide de la pompe secondaire.

- Le **dispositif d'introduction** de l'échantillon gazeux (encore appelé dispositif de prélèvement) est constitué d'une ou plusieurs vannes manuelles, électromagnétiques, électropneumatiques ou motorisées avec asservissement à la pression dans l'analyseur.

Sensibilité : elle est définie par la plus petite fuite en hélium mesurable ou son équivalent en air. La fuite minimale décelable (en hélium) sur une pièce à tester, dont le volume n'excède pas quelques décimètres cubes, est de $10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, valeur qui définit un défaut de $0,07 \mu\text{m}$ dans une tôle de 1 cm d'épaisseur. Dans le cas d'éléments ou d'ensembles dont le volume atteint 1 m³, la sensibilité est affectée, du fait de la difficulté à évacuer la pièce à tester à une pression suffisamment basse pour ne plus être gêné par le flux d'hélium contenu dans l'air et par les gaz et vapeurs relâchés par l'installation. Pour un volume de 50 m³ par exemple, il est difficile de déceler des fuites inférieures à $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La notion de sensibilité est associée à la notion de vitesse de pompage. Un détecteur de fuites à hélium doit avoir une sensibilité et une vitesse de pompage aussi grandes que possible.

■ **Détecteur-renifleur**

Lorsque la pièce à contrôler ne peut admettre un vide intérieur, soit pour des questions mécaniques, soit pour des problèmes de dégazage, on pressurise la pièce à quelques atmosphères en hélium ou en mélange azote-hélium et l'on recueille le gaz traceur qui s'échappe éventuellement d'une fissure (figure 9).

Pour recueillir ce gaz, on utilise une sonde dite **de reniflage** reliée à l'analyseur élémentaire par un tube souple.

Cette sonde peut se présenter sous trois formes différentes.

- **Sonde à débit réglable** : c'est une vanne à aiguille en forme de pistolet (figure 10) ; l'ouverture en est ajustée de sorte que la pression dans l'analyseur soit maximale, tout en restant compatible avec un bon fonctionnement de la cellule d'analyse (elle doit rester inférieure à 10^{-2} Pa).

- **Sonde à débit fixe**

- **Sonde à débit fixe pour contrôle à longue distance** : lorsque la distance entre la pièce à contrôler et le détecteur est supérieure à quelques mètres, il n'est plus possible d'utiliser les renifleurs classiques. Le temps du transfert du traceur dans le tube souple reliant la sonde de reniflage au détecteur peut être de plusieurs dizaines de secondes pour une distance de 10 m (cela vient du fait que la propagation du traceur en régime moléculaire entraîne un déplacement lent du traceur dans le tube souple). On utilise alors un modèle spécial de renifleur, dans lequel la propagation du mélange air-hélium se fait en régime visqueux au moyen d'un pompage spécial auxiliaire P (figure 11). Le flux gazeux circule devant une pastille poreuse C, qui laisse passer une partie de l'hélium aspiré par le renifleur. La pompe auxiliaire P peut être une pompe à membrane ; il est également possible d'utiliser le premier étage de pompage de la pompe à palettes du détecteur élémentaire A.

La sensibilité du détecteur renifleur est limitée par la présence d'hélium dans l'air et par le fait que la sonde de reniflage ne capte généralement qu'une partie du flux d'hélium qui s'échappe. En pratique, il n'est pas possible de déceler des fuites d'hélium inférieures à $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.8 Détection aux traceurs radioactifs

On utilise quelquefois comme gaz traceur un gaz radioactif (krypton 85) et l'on détecte le traceur s'échappant d'une fuite éventuelle au moyen d'un compteur à scintillation. La fuite minimale décelable est de $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Le krypton 85 est utilisé pour le contrôle de pièces entièrement scellées (transistors) par la méthode de ressuage. Mais il lui est souvent préféré le traceur hélium associé à un détecteur à hélium

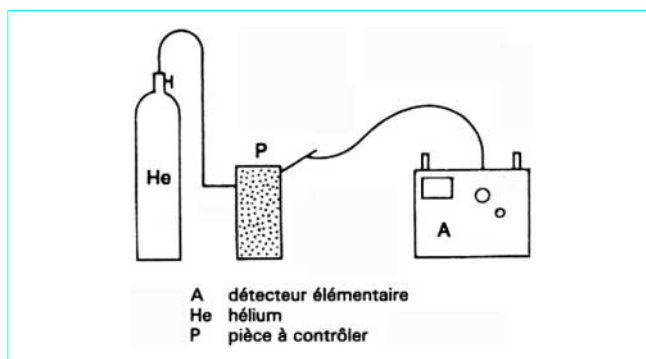


Figure 9 - Principe du reniflage

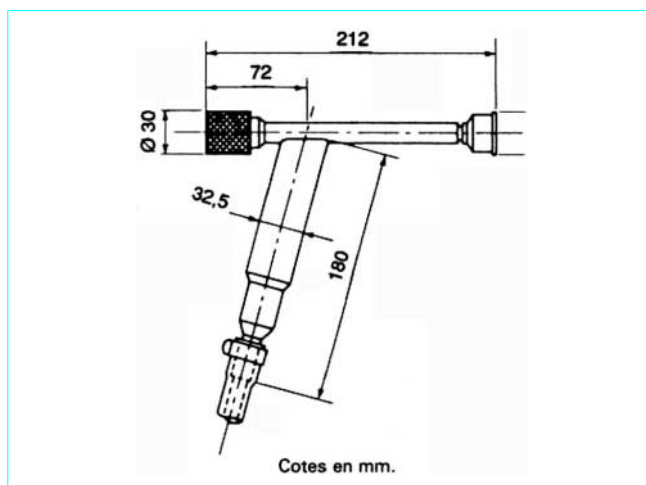


Figure 10 - Sonde à débit réglable

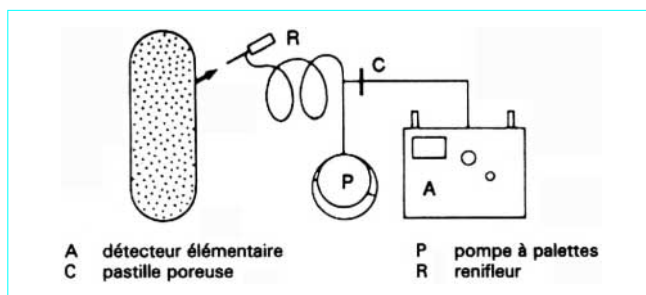


Figure 11 - Contrôle à longue distance

type spectromètre (§ 2.7), à la fois pour des raisons de sécurité des personnes et pour éviter que le rayonnement radioactif détériore certains composants électroniques.

2.9 Détection par mesure de variation de pression

■ **Mesure de pression directe**

Cette méthode (figure 12) consiste à mettre et à stabiliser deux pièces à une pression de test donnée : une pièce à tester et une pièce de référence ou deux pièces à tester.

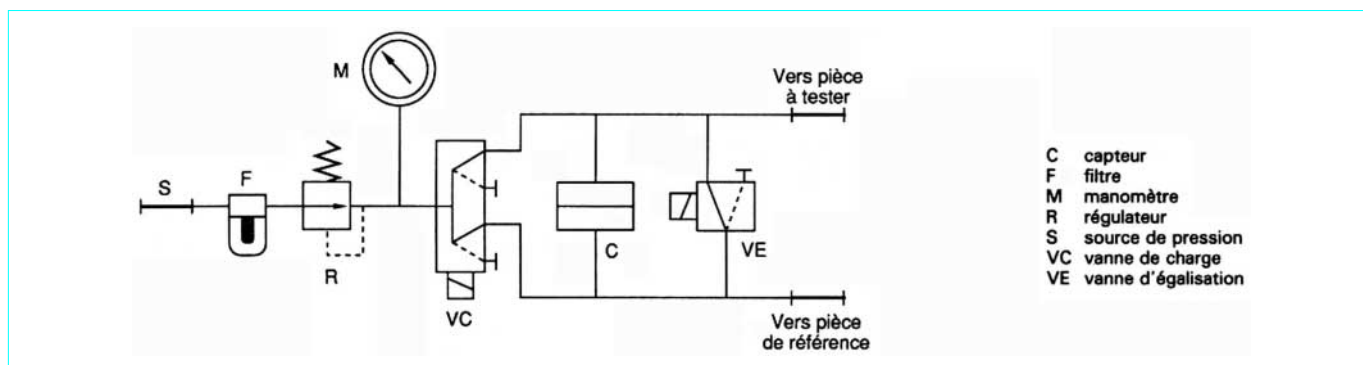


Figure 12 – Détection de fuite par mesure de variation de pression

Une fois les deux pièces remplies (ou vidées), l'appareil les isole pneumatiquement et place entre elles un capteur de très basse pression différentielle.

Si l'une des pièces présente une fuite, sa pression va chuter et l'on enregistrera la chute de pression aux bornes du capteur.

La relation entre le débit de fuite et la chute de pression prend en compte le volume de la pièce et s'énonce :

$$\text{débit de fuite} = \frac{\text{volume de la pièce} \times \text{chute de pression}}{\text{temps de test}}$$

La fuite minimale décelable est de $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$.

■ Précautions à prendre

Dans la méthode de mesure de variation de pression, certaines précautions sont à prendre. En effet, pour mesurer de très faibles variations de pression, il ne faut pas de variations parasites dues à d'autres phénomènes.

Quatre points sont à surveiller :

- les conditions de test ;
- le bouchonnage instable (liaison entre la pièce à contrôler et l'appareil de mesure) ;
- la température de la pièce à contrôler au moment du test ;
- l'environnement des tests.

a) Conditions de test : en ce qui concerne la mesure de pression directe, comme il s'agit d'une mesure comparative entre une pression de référence et la pression du composant à tester, il est important que ces deux pressions se stabilisent l'une et l'autre dans les mêmes conditions. Pour cela, il est fortement conseillé d'utiliser une pièce équivalente réputée étanche.

Une autre méthode est possible : elle consiste à contrôler deux pièces inconnues en les comparant l'une à l'autre. Cela comporte un risque, car il est possible que deux pièces fuient d'une même valeur en même temps.

b) Bouchonnage de la pièce : lors d'une mise en pression d'une pièce, les joints de bouchonnage subissent des efforts. Il faut veiller à ce que les joints, malgré les efforts, ne bougent pas, car ils créeraient une variation de volume, donc une variation de pression parasite.

c) Température de la pièce à contrôler : lors d'une mise en pression d'un objet testé, on injecte de l'air à température t_1 dans un objet à température t_2 , lequel est dans un environnement à température t_3 . Il est important de savoir qu'un écart trop grand entre ces trois températures créera des variations de volume parasites au moment du test, et donc rendra moins fiable la mesure.

d) Environnement des tests : vibration du banc de contrôle, température extérieure, etc.

3. Techniques de contrôle de l'étanchéité

L'extension des méthodes de détection des fuites et leur application à des installations vastes et complexes, comme les centrales nucléaires, a mis en relief le double aspect que revêtent ces techniques : contrôle de l'étanchéité, localisation des défauts.

On fait généralement subir aux pièces finies un contrôle global par lequel elles peuvent être réputées satisfaire à leur spécification. Dans le cas contraire, on procède à une recherche de l'emplacement des fuites en vue de les colmater. Cette recherche peut s'avérer délicate. Nous commencerons par la description des méthodes de localisation. Leur nombre en est réduit, mais elles requièrent des opérateurs patients et méthode.

3.1 Localisation des défauts

Ces méthodes sont au nombre de trois, suivant que le gaz test est appliqué à l'extérieur de la pièce, pressurisé à l'intérieur de celle-ci ou qu'il s'agit de grandes enceintes dans lesquelles la pression ne peut s'éloigner sensiblement de celle de l'atmosphère. Les méthodes de localisation par voie humide, à l'ammoniac ou à la bobine, dont la description a été faite au paragraphe 2, ne relèvent pas de celles qui sont exposées ci-après.

3.1.1 Méthode de localisation au jet

La cellule détectrice doit être reliée à la pièce qui est mise ensuite sous un vide approprié : vide moyen (10^{-1} à 10^2 Pa) pour le tube témoin ou le détecteur à halogènes, vide poussé ($< 10^{-2} \text{ Pa}$) pour le détecteur à hélium. Le gaz traceur est contenu sous pression dans une bouteille équipée d'un détendeur. Une buse fine à débit éventuellement réglable est reliée au détendeur par un tuyau souple et permet de localiser les fuites avec précision. Le courant de gaz est promené en feston sur les parties à contrôler, à la vitesse approximative de 1 cm/s , en commençant par le haut si le gaz traceur est plus léger que l'air, par le bas s'il est plus lourd. La présence d'une fuite étant signalée, on réduit le débit jusqu'à n'observer que quelques bulles par seconde quand on plonge la buse dans un verre d'eau. La fuite est ensuite provisoirement obturée avec un ruban adhésif, de façon à poursuivre les investigations.

La précision avec laquelle une fuite peut être localisée dépend essentiellement du temps mis par le gaz traceur à manifester son apparition dans le détecteur. La pression de ce gaz dans la pièce croît exponentiellement avec le temps.

Le temps de réponse de l'appareil est le temps au bout duquel le signal du détecteur atteint 63 % de sa valeur finale.

Ce temps de réponse est :

$$\tau = \frac{V}{q_V}$$

avec V volume de la pièce à tester,
 q_V débit-volume du dispositif de pompage.

Exemple : si $V = 1 \text{ m}^3$ et $q_V = 100 \text{ dm}^3/\text{s}$, on a $\tau = 10 \text{ s}$, ce qui est admissible.

Par contre, un temps supérieur à plusieurs minutes rendrait hasardeuse la localisation, et allongerait le temps de l'opération. La vitesse de passage de la buse le long de la zone contrôlée doit en effet être d'autant plus faible que la constante de temps est plus grande.

■ **Choix du montage (grands volumes)** : le contrôle d'étanchéité par la méthode du détecteur à hélium d'un volume supérieur au mètre cube conduit quelquefois à l'utilisation de deux ou trois pompes en série pour l'opération de prévidage, par exemple une pompe Roots (ou une pompe à diffusion) et une pompe à palettes.

Dans ces conditions, faut-il brancher l'analyseur à hélium en A ou en B (figure 13) ?

La réponse est la suivante.

Pour un analyseur type **a1** ou **a2** (§ 2.7), la pression interne dans l'analyseur devant être inférieure à 10^{-2} Pa :

- si $P_A > 10^{-2} \text{ Pa}$, brancher le détecteur de préférence en A ;
- si $P_A < 10^{-2} \text{ Pa}$, brancher le détecteur en B.

Pour un analyseur type **b** ou **c**, brancher le détecteur en B.

Ces conditions conduiront à la meilleure performance de sensibilité.

Le temps de réponse sera toujours fonction du rapport V/q_V .

Si le dégazage du volume à pomper peut être absorbé par le détecteur ($10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), on pourra prévoir une vanne V en amont de la pompe à palettes et brancher le détecteur en B. En fermant cette vanne, tout le flux gazeux passera dans le détecteur, ce qui permettra d'exploiter toute la sensibilité de l'appareil et de bénéficier d'un temps de réponse court grâce à la grande vitesse de pompage du Roots. Cette possibilité ne se rencontre qu'exceptionnellement.

3.1.2 Méthode de localisation au renifleur

Cette méthode est fréquemment utilisée avec les détecteurs à halogènes, à conductivité thermique ou à capture d'électrons ; elle est d'emploi courant avec les détecteurs à hélium. La pièce étant livrée pressurisée (circuit frigorifique) ou mise en légère surpression de gaz test (entre 0,05 et 0,1 MPa), le renifleur est déplacé sur les parties à contrôler, du haut vers le bas si le gaz test est plus dense que l'air, du bas vers le haut dans le cas contraire. Les fuites repérées sont provisoirement obturées par un ruban adhésif.

Un soin particulier est exigé de l'opérateur, car une réponse franche n'est obtenue qu'au droit de la fuite. Le détecteur à halogènes est d'autre part susceptible de réponses ambiguës, du fait de la présence de ceux-ci dans l'environnement (solvants chlorés, fumées de tabac).

L'utilisation d'un renifleur associé à un détecteur à hélium type spectromètre a été décrite au § 2.7.

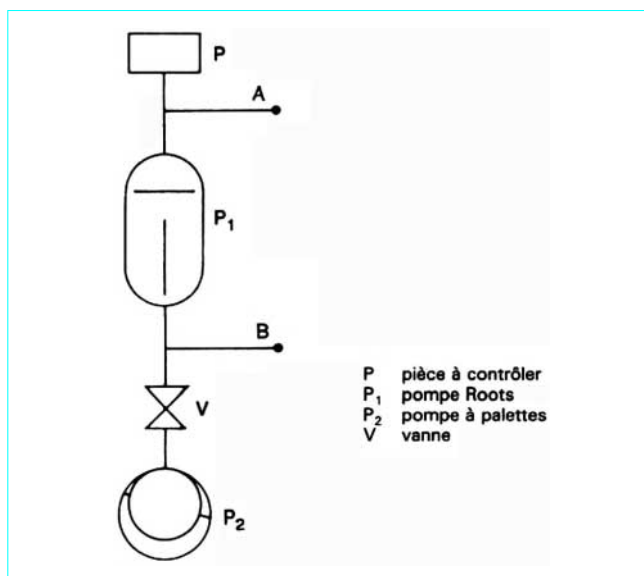


Figure 13 – Contrôle d'étanchéité d'un volume supérieur au mètre cube

3.1.3 Méthode de localisation à la ventouse

Cette méthode est la seule utilisable pour le test de cordons de soudure pratiqués sur de grandes pièces (cuves de réacteurs nucléaires). Le détecteur utilisé est habituellement un spectromètre à hélium relié par un tuyau souple à une ventouse en élastomère, laquelle épouse la forme du cordon sur une longueur de 0,5 à 1 m. Cet accessoire est mis sous vide à l'aide d'une pompe primaire bi-tagée de faible capacité. L'hélium est appliqué au jet de l'autre côté de la paroi, au droit de la ventouse.

3.2 Procédés de contrôle

Ils ont pour but de vérifier qu'une pièce ou un ensemble présente une étanchéité qui satisfasse aux prestations qui leur sont attribuées. Une valeur globale de l'ensemble des fuites doit pouvoir être donnée, la méthode ou l'appareil utilisé devant être à même d'en fournir des indications quantitatives, sans que l'on cherche à les localiser.

3.2.1 Contrôle par évolution de pression

Les considérations données au début du paragraphe 1.2.2 montrent que, dans le cas d'une enceinte isolée de l'atmosphère et mise sous une pression différente de la pression atmosphérique, le produit de son volume par la vitesse d'évolution de cette pression conduit à la valeur du flux de gaz que cette enceinte échange avec l'extérieur. C'est en particulier le cas des installations de vide isolées de leur système de pompage. Le phénomène de dégazage qui s'y développe en permanence a également pour effet de faire évoluer positivement la pression. La valeur asymptotique d'une dizaine de torrs, vers laquelle tendrait la pression des gaz désorbés, est toutefois très inférieure à la valeur de la pression atmosphérique à laquelle conduirait, à la longue, l'air introduit par une fuite éventuelle. L'observation doit donc être poursuivie jusqu'à des pressions relativement élevées, nettement supérieures à cette valeur asymptotique, c'est-à-dire durant un temps dépendant de la fuite et qui peut

être assez long (plusieurs heures pour un volume de 100 L et une fuite de l'ordre de $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La sensibilité de la méthode, d'environ $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, peut être améliorée d'un facteur 100 si l'on fait précéder le manomètre utilisé d'un piège à azote liquide, dont l'effet est de condenser la majeure partie des gaz désorbés.

Le contrôle global de très grandes enceintes (cuves de réacteurs nucléaires) s'opère par évolution de pression, après qu'elles aient été mises en légère surpression. Dans ce cas, les fluctuations de température perturbent les mesures, et des précautions particulières doivent être prises pour les compenser, telles que l'emploi d'un manomètre différentiel à membrane.

3.2.2 Contrôle par test global

D'une façon symétrique à la localisation des fuites, ce contrôle peut être effectué en mettant l'élément sous vide ou sous pression de gaz test.

■ **Test global sous vide** : c'est, dans le cas de pièces susceptibles d'être mises au moins sous vide moyen, le mode de contrôle le plus général, le détecteur utilisé étant couramment un spectromètre à hélium relié à un groupe de prévidage. Les pièces sont placées dans un sac en plastique souple, dans lequel l'hélium est admis à la pression atmosphérique, après que l'on ait grossièrement évacué l'air de l'enveloppe.

Dans le cas très général où des jonctions à élastomère sont impliquées dans le contrôle, celui-ci ne devra pas excéder une dizaine de minutes sous peine d'être gêné par la perméation du gaz test à travers ces joints. La sensibilité des montages est celle obtenue dans le cas de la localisation au jet.

■ **Test global par reniflage** : ce test est couramment pratiqué pour le contrôle d'appareils remplis de Fréon ou d'hexafluorure de soufre (figure 14). C'est une technique également utilisée avec un spectromètre à hélium pour le contrôle de pièces qui ne peuvent être mises sous vide. Celles-ci sont, comme dans le cas précédent, enveloppées d'un sac à l'intérieur duquel est relié le tube du renifleur. L'hélium est admis dans la pièce par balayage ou en surpression. Un brassage est assuré à l'intérieur comme à l'extérieur de celle-ci.

La sensibilité du montage est définie par celle du renifleur utilisé et, dans le cas du spectromètre, par la proportion et la pression d'hélium dans la pièce.

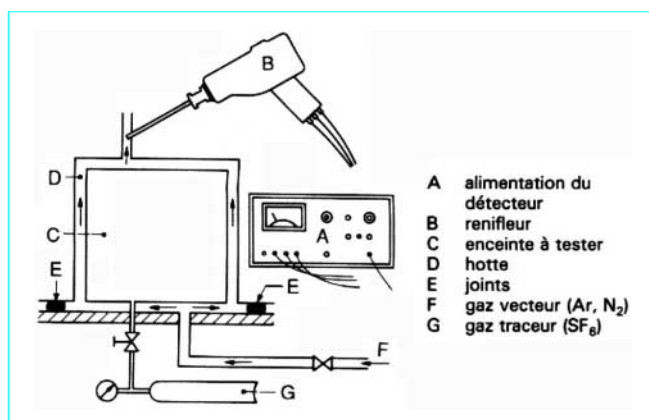


Figure 14 - Contrôle global par reniflage sur détecteur à capture d'électrons

3.2.3 Contrôle par accumulation

La sensibilité d'un contrôle global sous vide peut être améliorée, comme indiqué au paragraphe 2.3 pour le test au tube témoin, en isolant la pièce du groupe de pompage et en laissant le gaz test appliqué à l'extérieur de celle-ci. Cette méthode n'est guère pratiquée qu'avec le spectromètre à hélium. Le dégazage de la pièce doit donc être aussi limité que possible.

Dans l'éventualité d'une fuite, l'hélium s'accumule à l'intérieur de la pièce et l'on peut suivre l'évolution du signal en isolant la cellule détectrice du dispositif de pompage. Dans cette optique, certains spectromètres sont équipés d'un robinet dit d'accumulation placé entre la pompe secondaire et le piège à azote liquide qui la surmonte (figure 7a1).

Cette méthode n'est applicable qu'à des pièces petites ou de moyenne importance. Le montage est étalonné *a posteriori*, à l'aide d'une fuite calibrée.

3.2.4 Contrôle par ressuage

Ce contrôle s'adresse à des séries de petites pièces, définitivement scellées, mais aptes à supporter une pression importante aussi bien interne qu'externe du gaz test adsorbé. Les pièces qui comportent de grosses fuites sont éliminées durant cette période par un contrôle rapide au renifleur. Le reste des pièces est placé dans une cloche à vide reliée au détecteur, lequel décèle un **ressuage** du gaz test à travers des fuites moins importantes. Celles-ci ne sont en effet mises en évidence qu'entre deux limites, l'une supérieure pour laquelle le gaz test est ressorti totalement de la fuite pendant la période d'aération, l'autre inférieure, fonction des conditions d'immersion, du volume de la pièce et de la sensibilité du détecteur. D'une façon courante, pour des pièces de 2 cm^3 de volume, ces valeurs sont de $5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et de $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Un lot de pièces est placé à l'intérieur d'une cloche, dans laquelle une pression de 1 à 3 MPa de gaz test peut être établie durant un temps qui peut varier de quelques minutes à 24 h. Le gaz test pénètre à travers les fuites éventuelles. À l'issue de cette période d'immersion, les pièces sont exposées à l'air, de façon à libérer au maximum leur paroi externe du gaz test adsorbé. Les pièces qui comportent de grosses fuites sont éliminées durant cette période par un contrôle rapide au renifleur. Le reste des pièces est placé dans une cloche à vide reliée au détecteur, lequel décèle un **ressuage** du gaz test à travers des fuites moins importantes. Celles-ci ne sont en effet mises en évidence qu'entre deux limites, l'une supérieure pour laquelle le gaz test est ressorti totalement de la fuite pendant la période d'aération, l'autre inférieure, fonction des conditions d'immersion, du volume de la pièce et de la sensibilité du détecteur. D'une façon courante, pour des pièces de 2 cm^3 de volume, ces valeurs sont de $5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et de $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3 Contrôles de fabrication

Il serait fort imprudent de repousser le contrôle d'étanchéité d'un appareil à la fin de son montage, ce pour trois raisons :

- la localisation d'un éventuel défaut serait bien plus délicate, voire impossible ;
- cette localisation conduit à procéder au démontage de l'élément défectueux en vue de sa mise en état ;
- il peut arriver que, dans le cas d'un assemblage définitif, on ne puisse accéder à la partie défectueuse.

Des contrôles d'étanchéité doivent donc être opérés **en cours de fabrication**, et des gammes doivent être établies pour les faciliter. C'est ainsi que, dans le cas particulier des robinets, il est prudent de prévoir le contrôle de l'étanchéité du corps avant montage de l'obturateur et de sa commande.

Il s'ensuit que les contrôles s'effectueront sur :

- les produits semi-finis ;
- les pièces détachées ouvrées ;
- les éléments après soudage ;
- les sous-ensembles et ensembles montés.

On peut, dans les deux premiers cas, se limiter à des contrôles par prélèvement, une fois leur technologie bien au point. Dans les trois premiers cas, tout traitement de surface doit être suivi d'un contrôle d'étanchéité, même si un tel contrôle a été effectué auparavant. Des contrôles intermédiaires peuvent être nécessaires au cours de la réalisation d'un appareil. C'est ainsi que les soudures d'un faisceau tubulaire d'échangeur sur les plaques doivent être contrôlées avant d'y rapporter les calottes, car une intervention ultérieure sur ces plaques serait impossible à moins de procéder à un décalottage de l'échangeur. Tout revêtement de surface doit, dans la même optique, être précédé et suivi d'un contrôle d'étanchéité.

■ Choix du type de contrôle en contrôle fabrication

Ce choix est primordial pour plusieurs raisons.

- **Objectif qualité** : une pièce fabriquée doit répondre à un certain cahier des charges dicté par le rôle et les différentes fonctions de la pièce.

- **Objectif coût** : l'objectif qualité est un impératif pour les sociétés dans la situation de concurrence actuelle, mais il n'est tenu que par un contrôle rigoureux. Le contrôle intervient en fabrication comme une partie intégrante et coûteuse, aussi les matériels doivent-ils être de plus en plus performants, rapides et peu coûteux.

Le choix du type de contrôle doit obéir à ces deux critères. Du contrôle autant que de la fabrication dépend la viabilité d'un produit.

- **Intégration et homogénéité du contrôle en fabrication** : les appareils de contrôle doivent parfaitement s'intégrer, au même titre que les autres machines, dans une chaîne de fabrication ; pour cela, il faut qu'ils soient automatisables.

4. Conclusion

Les techniques du contrôle de l'étanchéité sont donc contraignantes, et la tentation de les réduire à une expression aussi simple que possible peut sembler légitime. Il est primordial de s'en garder et de ne pas raccourcir les gammes de contrôle sans garanties préalables. Les conséquences auxquelles peut conduire la moindre légèreté peuvent être parfois disproportionnées. C'est ainsi qu'une fuite non décelée dans un échangeur de température peut déterminer l'arrêt d'un réacteur nucléaire pour une longue période.

Contrôle de l'étanchéité

par **Jacques TALLON**

Chef de Produit Contrôle d'Étanchéité, Division Vide et Mécanique, Alcatel-CIT

Bibliographie

Ouvrages recommandés

JEAN (R.). – *Traité pratique de technique du vide*. Collection ANRT. *Détection des fuites*, chap. XIII, p. 311-42 (1958).

MAURICE (L.). – *Pratique du contrôle de l'étanchéité à l'hélium*. Société française du vide (1968).

TALLON (J.). – *Choisir et utiliser un détecteur de fuites à hélium*. DVM Alcatel.

Références citées

[1] JEAN (R.). – *Détection des fuites bouchées par un liquide*. Le Vide (F), n° 76, p. 188-92 (1958).

[2] BOYRON (G.) et HENRY (R.P.). – *La détection des fuites sur les installations industrielles*. Le Vide (F), n° 101, p. 479-83, sept.-oct. 1962.

[3] MONGODIN (G.) et coll. – *Organisation et méthodes mises en œuvre pour l'étanchéité de l'usine de séparation isotopique de Pierrelatte*. Le Vide (F), n° 108, p. 528-79, nov.-déc. 1963.

[4] BERRY (P.F.), CAMERON (J.F.) et WANTAGE (E.J.). – *The use of ⁸⁵Kr for the measurement of leaks in hermetically sealed components* (L'emploi de ⁸⁵Kr pour la mesure des fuites

dans les composants hermétiquement clos). Proceedings of the Conference on Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry Copenhagen, vol. 1, p. 466-75, bibl. CNRS, 6 au 17 sept. 1960.

[5] COURTOIS (G.) et GASNIER (M.). – *Les détections de fuites au moyen de radioéléments*. Microtechnic Nucléaire (CH), XVII, n° 1 et 2.

[6] HENRY (R.P.). – *Cours de Science et Technique du Vide*. Tome 2, p. 46, Société française du vide (1971).

Normalisation

France

Association française de normalisation AFNOR

Essais non destructifs. Contrôle d'étanchéité

NF A 09-490 12-88 Pratiques recommandées pour la spécification et le contrôle d'étanchéité aux gaz.

NF A 09-491 8-89 Contrôle par accumulation ou reniflage de gaz.

NF A 09-492 8-89 Méthode sous vide avec gaz traceur.

Contrôle d'étanchéité à l'aide d'ammoniac

NF A 09-106 5-79 Localisation des fuites par pressurisation d'ensemble.

NF A 09-107 5-79 Localisation des fuites. Méthode à la ventouse.

NF A 09-108 5-79 Contrôle d'étanchéité. Pratiques recommandées pour contrôle à la boîte à dépression.

NF A 09-109 5-79 Contrôles d'étanchéité à l'aide d'hélium. Pratiques recommandées pour le contrôle par ressuage sous vide.

NF A 09-110 10-80 Contrôles d'étanchéité. Pratiques recommandées pour la recherche de fuites à l'aide de gaz sous pression.

NF A 09-120 6-84 Principes généraux de l'examen par ressuage.

Ressuage

A 09-122 7-85 Vérification des caractéristiques des produits de ressuage.

A 09-123 7-85 Sensibilité et mise en œuvre des produits.

Constructeurs. Fournisseurs

Décharge électrique

Balzars SA.

Détecteurs à halogènes

Balzars SA.

Edwards High Vacuum.

Leybold Heraeus Sogev.

Systèmes Analytiques.

Détecteurs à conductivité thermique

Systèmes Analytiques.

Détection de fuites par variation de pression

Systèmes Analytiques.

Détecteurs à capture d'électrons

Systèmes Analytiques.

Spectromètres de masse à hélium

Alcatel-CIT.

Leybold Heraeus Sogev.

Balzars SA.

Varian.

Edwards High Vacuum.

Veeco.

Domaine d'emploi des différents détecteurs	
atm. cm ³ .s ⁻¹	Plus de 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹ 10 ⁻¹⁰
Décharge électrique	10 ⁻³ à 10 ⁻¹⁰
Détection d'halogènes	10 ⁻³ à 10 ⁻⁷
Conductivité thermique	10 ⁻³ à 10 ⁻⁵
Variation de pression	10 ⁻³ à 10 ⁻¹⁰
Capture d'électrons	10 ⁻³ à 10 ⁻⁸
Spectromètre de masse à hélium	10 ⁻³ à 10 ⁻¹⁰

1 atm · cm³ · s⁻¹ = 0,1 Pa · m³ · s⁻¹.