

d é t e c t i o n

Le contrôle d'étanchéité



Bernard Seemann

EYROLLES

Le contrôle d'étanchéité

A. CAUSSARIEU & TH. GAUMART. – **Guide pratique de la rénovation des façades**, 2005
Pierre, brique, béton

B. COUETTE. – **Guide pratique de la loi MOP**, 2005

P. GÉRARD. – **Pratique du droit de l'urbanisme**, 2007, 5^e édition

J.-P. GOUSSET, R. PRALAT, J.-C. CAPDEBIELLE. – **Le Métré**, 2004, 2^e tirage

P. GRELIER WYCKOFF. – **Pratique du droit de la construction**, 2007, 5^e édition
Marchés publics et marchés privés

P. GRELIER WYCKOFF. – **Le mémento des marchés publics de travaux**, 2007, 3^e édition
Intervenants, passation et exécution (Le code des marchés publics 2006)

P. GRELIER WYCKOFF. – **Le mémento des marchés privés de travaux**, 2006, 2^e édition
Intervenants, passation et exécution

J.-C. PHILIP, F. BOUYAHBAR, J.-P. MUZEAU. – **Guide pratique de la démolition des bâtiments**, 2006

Le contrôle d'étanchéité

Bernard SEEMANN

EYROLLES

A horizontal line with a small circle in the center, positioned below the publisher's name.

ÉDITIONS EYROLLES
61, Bld Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com



Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée notamment dans les établissements d'enseignement, provoquant une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du Droit de Copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2008, ISBN 978-2-212-12374-6

TABLE DES MATIÈRES

1	Le fait de contrôler	1
1.1	Historique	1
1.2	Les contrôles destructifs versus non destructifs	3
1.3	Caractères contrôlés.....	3
1.4	Grandeur et mesure.....	3
1.5	Rapport signal sur bruit	4
1.6	Qualité du contrôle et de la mesure	4
1.7	Efficacité.....	5
1.7.1	Risque du client	5
1.7.2	Risque du fournisseur	5
1.7.3	Échantillonnage ou contrôle à 100 %	6
2	Contrôler l'étanchéité.....	7
2.1	Définition.....	7
2.2	Définition d'une fuite	8
2.2.1	Fuite de fluide gazeux.....	8
2.2.2	Fuite de fluide liquide.....	9
2.2.3	Principe de contrôle – mesure.....	11
2.2.4	Méthode locale	12
2.2.5	Méthode globale locale	13
2.3	Sensibilité	14
2.4	Laboratoire et industrie.....	16
2.5	Précision	16
2.6	Coûts.....	16
2.7	Unités.....	17
3	Évaluation des taux de fuite par le calcul	19
3.1	Caractérisation d'une fuite.....	19
3.2	Modélisation d'une fuite.....	19
3.3	Les paramètres de définition	20
3.4	Cas des pertes de fréon	21
3.5	Conversion pour un test à pression atmosphérique.....	23
3.6	Conversion de flux de référence pour un test sous vide	27
3.6.1	Première étape : calcul du flux laminaire sous vide	28

3.6.2 2 ^e étape : calcul du flux moléculaire	29
3.6.3 3 ^e étape : calcul du débit total	31
3.7 Cas des fuites liquides	32
3.7.1 Équation générale de Poiseuille (liquides)	32
3.7.2 Calcul du diamètre équivalent avec les tensions de surface	33
3.7.3 Détermination du diamètre équivalent critique	33
3.7.4 Détermination du flux gazeux correspondant	34
3.8 Chute de pression sur une longue durée	35
4 Les méthodes air dans air	39
4.1 Variation de pression	39
4.1.1 Mesure de la variation de pression (ou de vide)	39
4.1.2 Cycle de test	42
4.1.3 Mesure relative	43
4.1.4 Mesure différentielle	45
4.1.4.1 Réglage des paramètres d'un cycle de test	46
4.1.4.2 Mesure différentielle avec référence	49
4.1.4.3 Mesure différentielle sans référence	52
4.1.4.4 Mesure différentielle avec « 0 » central	52
4.1.4.5 Mesure indirecte	53
4.1.4.6 Composants scellés	54
4.1.4.7 Calibrage – Étalonnage	56
4.2 Débitmétrie	57
4.2.1 Le débitmètre thermique	57
4.2.2 Principe du capteur	57
4.2.3 Principe de détection	59
4.2.4 Correction de la lecture	60
4.2.5 Le détecteur de fuite débitmètre massique	60
5 Les méthodes par gaz traceur	63
5.1 Gaz traceur hydrogène	64
5.1.1 La détection de fuite par gaz traceur hydrogène	64
5.1.2 Le gaz hydrogène	65
5.1.2.1 Utilisation d'un mélange	65
5.1.2.2 Limite inflammabilité	66
5.1.3 Le capteur, les sondes, le calibrage	66
5.1.3.1 Système de prélèvement	68
5.1.3.2 Calibrage	68
5.1.4 La méthode de test	69
5.1.4.1 Reniflage pour localisation de fuite	70
5.1.4.2 Contrôle de réseau hydraulique	70

5.1.4.3 Reniflage par accumulation : test intégral	72
5.2 Gaz traceur hélium.....	76
5.2.1 Les spectromètres	76
5.2.2 Détection par spectromètre de masse hélium	77
5.2.2.1 Pourquoi les détecteurs s'appellent-ils spectromètres de masse ?.....	77
5.2.2.2 Les différents éléments qui composent un détecteur d'hélium	78
5.2.2.3 Cellule d'analyse : principe	79
5.2.2.4 Principe de mesure à contre-courant.....	82
5.2.2.5 Principe de mesure directe : mode fine fuite	84
5.2.2.6 Principe de mesure directe : mode grosse fuite	85
5.2.3 Test sous vide.....	86
5.2.3.1 Dans une enceinte	86
5.2.3.2 Test par aspersion	89
5.2.4 Test en reniflage.....	91
5.2.4.1 Principe de base	91
5.2.4.2 Conception de la sonde : quel débit ?	93
5.2.4.3 Plus petit signal détectable.....	95
5.2.4.4 Vitesse de déplacement de la sonde.....	96
5.2.4.5 Temps de réponse	96
5.2.4.6 Mesure de concentration	97
5.2.4.7 Procédure de calibrage en reniflage.....	97
5.2.4.8 Fonction auto zéro	98
5.2.4.9 Test local.....	99
5.2.4.10 Test global.....	100
5.2.5 Récupération de l'hélium.....	101
5.2.5.1 Calcul de la consommation d'hélium	103
5.2.5.2 Calcul du taux de récupération d'hélium	103
5.3 Autres gaz traceurs	105
5.3.1 Détecteur à conductivité thermique	105
5.3.2 Détection multigaz quadrupôle	107
5.3.3 La lampe haloïde.....	107
5.3.4 Contrôle d'étanchéité des circuits sous vide.....	107
6 Autres méthodes	109
6.1 La voie humide	109
6.2 Bac à eau.....	109
6.2.1 Mise en œuvre.....	109
6.2.2 Fiabilité	110

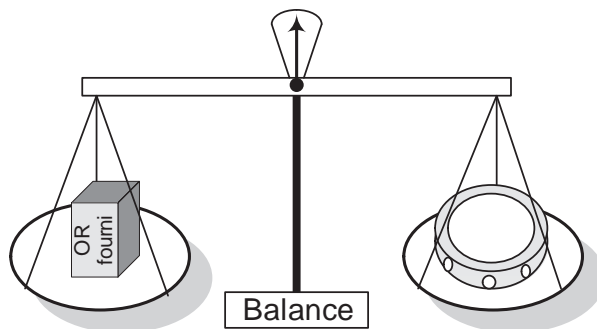
6.2.3	Quantification	111
6.3	Colorant	112
6.4	Technique de détection acoustique : ultrasons	113
6.5	Décharges électriques	117
6.6	Détection des radio-isotopes.....	117
6.7	L'interface pièce testée - système de contrôle.....	119
7	Le vide.....	123
7.1	Notions de vide	123
7.1.1	Qu'est-ce que la pression atmosphérique ?.....	123
7.1.2	Composition de l'atmosphère	125
7.1.3	La pression partielle	126
7.2	Les niveaux de vide	126
7.3	Génération de vide : le pompage	127
7.3.1	Pompes à palettes	128
7.3.2	Pompes roots	130
7.3.3	Pompes turbo moléculaires	132
7.3.4	Pompes moléculaires	133
7.3.5	Pompes turbo moléculaires hybrides	134
7.3.6	Groupe de pompage pour la détection de fuite	135
7.3.7	Dimensionnement du groupe de pompage pour un test sous vide.....	135
7.3.8	D'où vient le bruit de fond ?	138
7.4	Pompage parallèle.....	139
7.5	Temps de réponse.....	140
7.5.1	Temps d'apparition de la fuite	140
7.5.2	Temps de réponse du détecteur	141
7.5.3	Disparition du signal	142
7.6	Mesure de la vitesse de pompage hélium d'un groupe de pompage.....	143
A1	Masses molaires des fluides frigorigènes	145
A2	Tensions de surface	147
A3	Convention des unités	149
A4	Résumé des formules en unités SI	151

Le mot rôle provient du mot rouleau sur lequel on écrivait des listes et registres d'actes. Le mot contrôle vient de *contrerole*, registre qu'on tenait en double (*contreroller* 1310).

1.1 Historique

Depuis longtemps, les clients ne font qu'une confiance limitée à leurs fournisseurs. Une anecdote intéressante à propos d'Archimède est sans aucun doute l'histoire de la couronne d'or. Le roi Hiéron II (306-215 av. J.-C.) de Syracuse décida d'offrir aux dieux une couronne d'or afin de les remercier de son ascension au trône (250 av. J.-C.). Il pesa donc une certaine quantité d'or et l'offrit à un orfèvre afin qu'il puisse réaliser ce joyau. Quelque temps plus tard, le roi reçut une magnifique couronne de même masse que la quantité d'or qu'il avait remise à l'artisan. Doutant de la qualité de la couronne, le roi Hiéron II demanda au jeune Archimède, alors âgé de 22 ans, de vérifier si l'artisan avait été honnête, sans toutefois briser le bijou.

Figure 1 : La quantité d'or donnée à l'orfèvre se retrouve-t-elle dans la couronne ?



Il immergea donc une quantité d'or égale à celle donnée par le roi, dans un certain volume d'eau et calcula la quantité d'eau qui déborda. Il fit la même chose avec une masse égale d'argent pour ensuite finir avec la

couronne que l'artisan avait donnée au roi Hiéron II. La quantité d'eau déplacée par la couronne se situait entre celle de l'or et de l'argent. Il prouva donc l'escroquerie de l'orfèvre, car celui-ci avait construit la couronne avec de l'argent et une petite quantité d'or.

Déjà bien avant cela, le roi Hammourabi, roi de Babylone, rédigea un code juridique. Ce code concernait la construction des maisons et la responsabilité du maçon était engagée de manière très forte ; qu'on en juge :

Article 229 : « Si un maçon a construit une maison pour quelqu'un, mais s'il n'a pas renforcé son ouvrage et si la maison qu'il a construite s'est effondrée et s'il a fait mourir le propriétaire de la maison, ce maçon sera tué. »

Article 230 : « Si c'est un enfant du propriétaire de la maison qu'il a fait mourir, on tuera un enfant de ce maçon. »

En 384 av. J.-C., on énonçait « Les Catégories » qui sont une œuvre attribuée à Aristote que l'on place en tête de l'*Organon*. Aristote commence par poser quelques distinctions fondamentales : substance, qualité, relation, lieu, temps, position, état, action et affection.

En 1664, Colbert déclare : « Si nos fabriques imposent à force de soin la qualité de nos produits, les étrangers trouveront avantage à se fournir en France et alors l'argent affluera dans le royaume. »

En 1788, Jean-Baptiste de Gribeauval fournit à l'armée le moyen de garantir l'interchangeabilité des pièces d'artillerie au travers d'une première normalisation constituée de table de construction.

En 1870 : apparition de la tolérance double mini/maxi.

1900 : production en série et taylorisme.

1901 : création du LNE.

1924 – 1931 : contrôle statistique de la qualité Shewhart.

1945 : très forte demande de produits manufacturés après la Seconde Guerre mondiale. La qualité l'emporte donc sur la quantité.

1970 : chocs pétroliers + percées spectaculaires des entreprises japonaises, la fin des Trente Glorieuses marque la deuxième naissance de la qualité et de son contrôle.

1.2 Les contrôles destructifs versus non destructifs

Les contrôles sont regroupés dans deux grandes familles selon qu'ils modifient l'intégrité de l'objet du test, le rendant ainsi impropre à la vente ; ou selon qu'ils sont neutres. Dans le premier cas, on les appelle tests destructifs et il ne peut s'agir que de prélèvements d'échantillons dans la production.

Les tests neutres, ou non destructifs, peuvent être appliqués à l'intégralité de la production. Dans tous les cas, le taux de pièces testées varie de quelques pourcents à 100 %. Le contrôle d'étanchéité est, sauf exception rare, un contrôle non destructif.

Attention à ne pas confondre avec un test d'épreuve, qui consiste à mesurer la résistance mécanique de l'objet en lui appliquant une pression d'essai (cas des réservoirs sous pression). Le non-succès de cette épreuve conduisant généralement à la destruction de la pièce.

1.3 Caractères contrôlés

Deux justifications sont à l'origine de ces contrôles : les qualités commerciales et les qualités techniques. Dans les deux cas, c'est l'intégrité de l'enveloppe qui sera vérifiée, ou sa capacité à ne pas laisser sortir (ou très peu) ce qu'elle renferme, ou ne rien laisser entrer qui soit gênant.

Le cas des étanchéités grossières, pour lesquelles le taux de fuite s'apparente clairement à une mesure de débit, ne sera pas traité dans cet ouvrage. Ceci concerne particulièrement les régimes de débit turbulents.

Le contrôle d'étanchéité consiste à mesurer le flux entrant ou sortant de la pièce, ou son impact sur la grandeur mesurée (cas de la variation de pression par exemple).

1.4 Grandeur et mesure

Le taux de fuite peut être mesuré avec une certaine précision et une certaine répétabilité. Mais on peut aussi faire une mesure comparative à un étalon. Si le taux de fuite est inférieur à l'étalon, la pièce est acceptée.

Dans le cas contraire, elle sera refusée. Cette manière de procéder est la plus économique et, en théorie, aussi fiable puisque le but d'un moyen de contrôle est de trier la production en fonction d'un seuil de refus.

La tendance dans l'industrie est pourtant d'opter pour des moyens de mesure donnant exactement le taux de fuite de chaque pièce contrôlée. Il faut intégrer alors la gestion des calibrages et étalonnages de la chaîne de mesure.

1.5 Rapport signal sur bruit

En détection de fuite, le rapport signal sur bruit est le rapport entre la valeur du signal quand il n'y a pas de fuite détectable, et la valeur du signal à laquelle on prendra la décision de rejeter une pièce. Plus ce rapport est élevé, plus le test sera fiable, c'est-à-dire plus le risque du fournisseur sera faible (risque de rejeter une pièce à tort).

La valeur de ce rapport généralement retenue est d'au moins 10 à la conception. En condition de production, on mesure plutôt des rapports de l'ordre de 3 à 5.

Cette caractéristique concerne surtout le test par gaz traceur quand la mesure est faite sur un signal non stabilisé pour des raisons de temps de cycle dans les applications industrielles.

1.6 Qualité du contrôle et de la mesure

L'interaction entre la pièce et l'appareil est mesurée par le système de mesure en fonction de la procédure de contrôle, ce qui conduit à :

- accepter ou rejeter la pièce ;
- modifier les réglages car aucune décision n'est possible ;
- si nécessaire, une modification de la procédure ou de la spécification ;
- l'étalonnage est matérialisé par une courbe faisant correspondre la mesure m à chaque valeur n de la grandeur à mesurer ;
- l'appareil de mesure doit se situer dans une chaîne de mesure.



Pour un contrôle réussi, il est nécessaire de surveiller les réglages pendant toute la durée du contrôle.

L'étalonnage d'un appareil de mesure consiste à comparer sur toute l'échelle de mesure le résultat affiché à la valeur de l'étalon. On obtient donc une courbe d'étalonnage, souvent fournie sous forme de tableau. Dans la détection de fuite, l'attention doit surtout porter sur les valeurs proches du seuil de refus. C'est pourquoi on se contente quelquefois de seulement un ou deux points de comparaison.

1.7 Efficacité

Tout système de contrôle, aussi fiable soit-il, peut se tromper quand il s'agit de décider de manière binaire si le résultat est bon ou mauvais. Cette possibilité statistique s'appelle le risque (sous-entendu de ne pas prendre la bonne décision) et l'on peut l'analyser selon l'impact qu'il peut avoir sur l'entité entreprise.

1.7.1 Risque du client

Il s'agit de la probabilité qu'une pièce mauvaise, qui n'aurait pas été écartée par le contrôle, se retrouve chez le client et soit détectée mauvaise par lui. En termes d'image comme en termes de coût, c'est le cas le plus critique qu'il faut éviter à tout prix. Les critères de contrôle, ainsi que la conception du système et l'organisation des flux doivent intégrer la gestion de ce risque pour le minimiser autant que possible.

Par exemple : une pièce mauvaise ne doit pas pouvoir être échangée avec une pièce bonne (marquage, contrôle de l'évacuation de la pièce vers les rebuts, etc.).

Les tolérances de mesures doivent être placées du côté fournisseur, en modifiant le seuil de refus au besoin.

1.7.2 Risque du fournisseur

Il s'agit de la probabilité de refuser à tort une pièce bonne. Cela induit un coût car cette pièce a été fabriquée pour rien, néanmoins, le client n'en saura rien, et aucune valeur ajoutée inutile ne sera donnée ultérieurement à cette pièce. Ajoutons que dans la plupart des cas, cette pièce peut être

testée à nouveau si le contrôle est non destructif, et la probabilité de se tromper deux fois de suite de la même manière est encore plus faible.

1.7.3 Échantillonnage ou contrôle à 100 %

Comme tout contrôle de qualité effectué à une étape intermédiaire ou lorsqu'on a fini de fabriquer le produit, le choix peut être fait de contrôler tous les produits, ou de se limiter à contrôler un prélèvement représentatif de la production. Dans ce dernier cas, il faut calculer la taille de l'échantillon d'après les méthodes de calcul statistiques classiques.

Étymologie : étancher : arrêter l'écoulement (milieu du XII^e siècle). Il faudra attendre 1876 pour voir apparaître le mot étanchéité pour la première fois dans une gazette juridique. L'étanchéité est donc une préoccupation plutôt récente.

2.1 Définition

L'étanchéité telle que nous la traitons dans cet ouvrage se définit comme la capacité qu'a une enveloppe à garder son contenu intact. Cela signifie qu'elle est apte à empêcher tout passage de fluide au travers de ses parois, qu'il soit entrant ou sortant. Dans la pratique, l'étanchéité absolue est utopique et cette aptitude devra se situer à un niveau nécessaire et suffisant pour garantir les critères de qualités recherchés.

Dans les transferts de fluides, il existe également des phénomènes plus complexes que le simple écoulement qu'on résumera sous les termes : perméation et diffusion. Ces phénomènes ne remettent pas en cause l'étanchéité d'une paroi, dans la très grande majorité des cas. Nous ne les traiterons pas, mais ils seront cités quand ils peuvent interférer avec un contrôle et perturber la mesure, typiquement dans le test hélium sous vide.

Le niveau d'étanchéité s'exprime par le seuil de refus ou de rejet. C'est la limite à partir de laquelle on déclarera une pièce bonne ou mauvaise. Un seuil fixé trop bas conduit à faire de la surqualité. À l'inverse un seuil trop tolérant fait prendre le risque de décevoir le client ou l'utilisateur final par une qualité insuffisante.

Dans tous les cas, exprimer un seuil de refus comme cela : zéro fuite ! n'est pas réaliste et il faut se plier au difficile exercice qu'est l'estimation de la taille de fuite maximale acceptable. Il faut accepter l'idée qu'un produit vendable peut fuir, mais pas trop. Tout est dans la mesure.

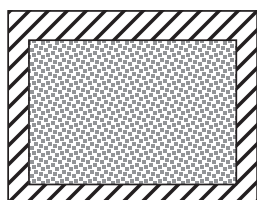
2.2 Définition d'une fuite

La détection de fuite permet surtout de détecter les défauts traversant une paroi. Une fuite peut être détectée si on met en évidence un flux (gazeux ou liquide) qui passe au travers de la paroi soumise à une pression différentielle.

On peut dans certains cas détecter les défauts non débouchants, à condition que le volume interne du défaut soit suffisamment important pour constituer un réservoir alimentant cette pression différentielle nécessaire à la création d'un débit. On fera appel aux techniques de ressuage.

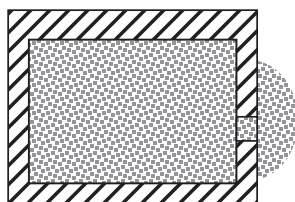
Figure 1 : Une fuite due à un défaut dans la matière.

Prenons une enveloppe contenant un fluide (gaz ou liquide) à une pression supérieure à la pression atmosphérique



Pas de fuite

Aucune molécule ne sort de l'enveloppe



Fuite

Des molécules sortent de l'enveloppe : présence d'un flux

Le flux dépend de la pression différentielle $P_{\text{int}} - P_{\text{ext}}$, la viscosité du fluide, la taille du défaut...

Quand P_{ext} est la pression atmosphérique, on dit que le test a lieu « à la pression atmosphérique ». Cela ne présume en rien de la valeur de P_{int} qui peut être supérieure ou inférieure, mais pas égale, à la pression atmosphérique ; ceci afin de créer la pression différentielle nécessaire à la création d'un débit au travers du défaut traversant.

2.2.1 Fuite de fluide gazeux

Les gaz étant compressibles, l'expression d'un flux devra prendre en compte le produit Pression \times Volume testé pour exprimer la quantité de fluide qui passe par unité de temps.

$$\text{Flux}_{\text{Gaz}} = \frac{\text{Volume}}{\text{Temps}} \times \text{Pression}$$

\nearrow m³, l, cm³...
 \rightarrow Pa, bar, mbar...
 \searrow s, min, h, jours, an...

Dans la détection de fuite hélium, on trouve des détecteurs indiquant le résultat de leur mesure en mbar.l/s. Ce n'est pas l'unité légale qui est le Pa.m³/s mais c'est l'unité très souvent en usage sur le terrain.

En cas de fuite, il y a un impact sur la pression interne ou sur le volume externe (ou les deux). On peut donc détecter les fuites par leurs effets : variation de la pression, variation de la pression partielle, variation du volume externe (bulles...) ; ou par la mesure de la fuite elle-même : gaz traceur, débitmétrie.

2.2.2 Fuite de fluide liquide

$$\text{Flux}_{\text{Liquide}} = \frac{\text{Volume}}{\text{Temps}}$$

\rightarrow m³, l, cm³...
 \rightarrow s, min, h, jours, an...

ou

$$\text{Flux}_{\text{Liquide}} = \frac{\text{Masse}}{\text{Temps}}$$

\rightarrow kg, g, mg...
 \rightarrow s, min, h, jours, an...

La variation de volume du fluide liée à la pression est négligeable dans le cas des liquides. Le flux peut alors être exprimé au choix en masse ou en volume par unité de temps. Le lien entre ces deux expressions est la masse volumique du fluide, c'est-à-dire sa masse par unité de volume (kg/m³).

La valeur du débit correspond bien à la quantité de molécules par unité de temps.

Que se passe-t-il si on change de nature de fluide, du gaz vers le liquide ou inversement ?

Une pièce fuyarde à l'air peut-elle être « étanche » avec du liquide ? Nous pouvons répondre sans hésiter : oui, c'est possible.

En effet, on observe à la surface des liquides une tension de surface. Ce phénomène peut boucher la fuite et empêcher tout débit au travers du défaut. Il ne faut toutefois s'en préoccuper que dans le cas des microfuites (\varnothing équivalent de quelques microns pour l'eau) ou pour des liquides à très forte tension de surface, comme certaines huiles à basse température. En résumé, en deçà d'une certaine taille, même en présence d'un défaut débouchant, aucun débit de liquide ne pourra s'établir. On parlera alors de diamètre critique.

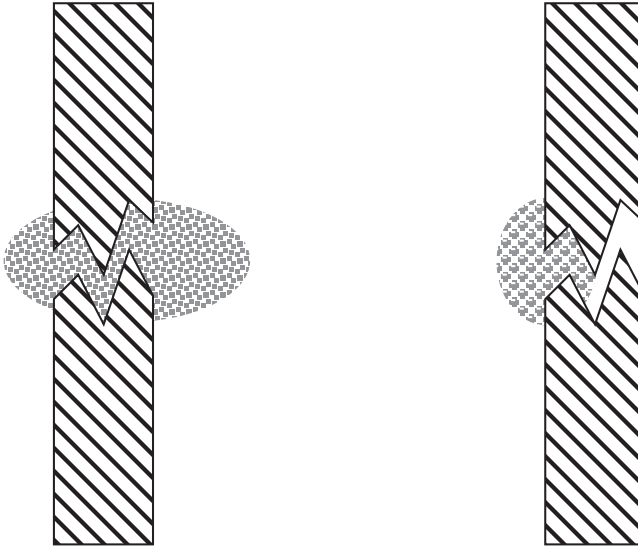
Dans la problématique d'une pièce conçue pour contenir du liquide et testée avec un gaz, le seuil de rejet correspondant doit être défini, c'est-à-dire la fuite maximum admissible. Il peut être obtenu soit par le calcul, soit par expérimentation. Le calcul pour les faibles pertes de liquide conduit souvent à un seuil de rejet sévère, posant la question de la surqualité et du coût d'un test à haute sensibilité qui ne serait justifié que par le calcul.

L'expérimentation est une manière efficace de positionner son seuil de refus. Isoler une pièce fuyarde à la limite de la qualité acceptable. Mesurer son taux de fuite par une méthode adaptée nous permet alors de fixer une limite plus basse pour sécuriser l'expérience.

On peut prendre en seconde approche le rapport entre la viscosité de l'eau et celle de l'air. Ce rapport varie de 30 à 80 selon qu'il s'agisse d'eau pure ou d'un mélange éthanol-glycol. C'est pourquoi la valeur de 50 est souvent utilisée sur le terrain pour estimer grossièrement le seuil de rejet en air correspondant à une fuite de liquide.

Exemple : radiateur de refroidissement moteur, carter de boîte de vitesses, direction assistée, réservoir de lave-glace.

Une fuite de liquide peut donc être détectée par une mise en évidence d'un débit de gaz au travers de la paroi pendant le test.

Figure 2 : Changement de média liquide / gazeux

Un défaut peut permettre un débit gazeux mais faire barrage à du liquide.
La nature du média conditionne l'étanchéité.

L'existence d'un flux dépend de : la pression différentielle $P_{\text{int}} - P_{\text{ext}}$ appliquée de chaque côté de la paroi considérée, la viscosité du liquide, la tension de surface, la taille du défaut, la température (à laquelle est liée la viscosité).

Nous avons vu que le liquide peut boucher la fuite grâce aux tensions de surface qui s'appliquent à son contact avec l'atmosphère. Elles dépendent du fluide considéré et peuvent s'exprimer comme une contre-pression (pression s'opposant à l'écoulement du liquide au travers de la fuite).

2.2.3 Principe de contrôle – mesure

Comme nous venons de le voir, dans tous les cas c'est l'existence d'une pression différentielle (interne – externe) qui permettra de générer un débit détectable.

On trouve sur le marché un grand nombre de principes différents pour contrôler l'étanchéité d'une pièce. Tous ne sont pas équivalents et il est parfois difficile de faire son choix. Il faut « ranger » ces techniques dans

des tiroirs selon des critères utiles, comme la taille des fuites décelables, la localisation possible des défauts, le coût, etc., pour pouvoir les comparer.

- Critères de classement généraux :
 - sensibilité : plus petite fuite détectable ;
 - type de test : local ou global ;
 - adapté à l'industrie ou au laboratoire ;
 - coût (investissement, maintenance).
- Critères de classement par principe de détection :
 - air dans air ;
 - air sous eau ;
 - gaz traceurs ;
 - spectrométrie ;
 - capteur électrochimique ;
 - autres.

2.2.4 Méthode locale

Une méthode dite locale permet d'identifier les fuites individuellement. On pourra notamment localiser la fuite, en vue d'une éventuelle réparation ou d'une expertise qualité.

Exemple

L'eau savonneuse appliquée sur les jonctions d'un réseau de gaz va permettre l'apparition d'une bulle à chaque endroit où il y a une fuite. Cette méthode est très pratique pour savoir où se trouvent les fuites, mais pour contrôler l'intégralité de l'enveloppe, il faudrait « mouiller » l'ensemble de l'objet du test. De même, si une des fuites est plus petite que les autres, l'opérateur peut la manquer.

Une méthode locale :

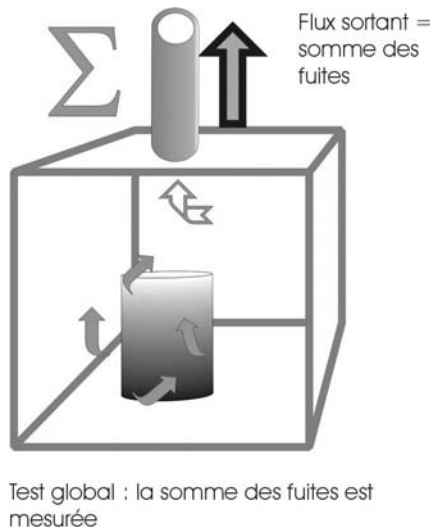
- mesure ou met en évidence individuellement une fuite ;
- permet de localiser la fuite ;
- permet de ne contrôler qu'une partie d'un ensemble dans le cas de grande taille.

Exemple

Lampe halloïde de frigoriste.

2.2.5 Méthode globale locale

Figure 3 : Une méthode globale collecte et mesure l'ensemble des fuites



Une méthode globale, quelquefois appelée intégrale, mesure en une seule fois la somme de toutes les fuites présentes sur l'objet du test. Dans le cas où l'on a plusieurs très petites fuites, la somme de celles-ci peut constituer une valeur détectable. Les méthodes globales sont donc généralement plus fines.

Exemple

Quand on fait un essai en pression d'un réseau d'eau ou de gaz dans un bâtiment neuf, on le met sous pression d'azote et l'on regarde si cette pression baisse. Si elle baisse, c'est qu'il y a une ou plusieurs fuites. On ne sait pas où elles se trouvent sur le réseau. Par contre si la pression ne baisse pas, on peut ainsi être certain que l'intégralité du réseau testé est étanche.

La localisation des fuites sur le réseau devra être faite par eau savonneuse, reniflage hydrogène, etc.

Une méthode globale (contrôle de l'intégrité d'un ensemble) :

- mesure la somme de toutes les fuites présentes (valeur totale) ;
- ne permet pas de localiser une fuite ;
- est conseillée quand le critère d'étanchéité est global.

Figures 4 : Contrôle de l'étanchéité d'un réseau rénové dans un bâtiment

© B. Seeman

Quizz : une pièce est pressurisée à l'air et plongée dans l'eau. Un opérateur l'observe et déclare la pièce bonne ou mauvaise selon qu'il a vu des bulles ou non sortir de la pièce. Ce type de contrôle constitue-t-il une méthode locale ou globale ?

Réponse : locale car chaque fuite sera identifiée individuellement. Cela reste vrai même si l'ensemble de la pièce est contrôlé durant la même phase de test, comme c'est le cas ici.

2.3 Sensibilité

On appelle sensibilité d'un appareil ou d'une méthode de test la plus petite fuite décelable. Il faut distinguer deux valeurs :

- celle donnée par le catalogue du fabricant ou la notice technique : c'est la plus petite variation de signal qui a pu être observée dans des conditions idéales de laboratoire que l'on arrivera rarement à reproduire en industrie ou sur un chantier. Considérons-la seulement comme une valeur commerciale ou de référence.
- la valeur de fuite la plus petite rencontrée sur au moins une application réelle. C'est une valeur de terrain plus réaliste car elle a déjà été mise en pratique au moins une fois.

Il ne faut pas confondre la sensibilité avec la résolution qui correspond au pas de réglage des paramètres ou à l'affichage.

Elle est généralement définie par le composant qui transforme le signal analogique d'un capteur en signal numérique plus pratique pour le traitement informatique et pour l'affichage.

Exemple

Sur les appareils de détection de fuite par chute de pression, on peut régler et voir les valeurs avec un chiffre après la virgule.

Mais la sensibilité se situe à quelques pascals, et non pas à 0,1 Pa qui est la résolution. On peut afficher des valeurs qui vont de 0,1 en 0,1 mais cela ne conditionne pas la sensibilité de l'appareil.

Gamme de sensibilité des différentes techniques de détection

Ionique																	
Débitmétrie Air sous eau																	
Variation de pression relative																	
Variation de pression différentielle																	
Acoustique																	
Bulle de savon Variation de vide																	
Conductivité thermique																	
Colorant																	
Détection d'halogènes																	
Reniflage hélium																	
Reniflage hydrogène																	
Radio isotopes																	
Spectromètres de masse																	
Pa.m ³ /s	10	1	0,1	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³		

2.4 Laboratoire et industrie

Quand on choisit une technique, il convient toujours de s'assurer que celle-ci est bien adaptée à l'environnement dans lequel elle va servir. Il faut considérer le temps de test, la sécurité des opérateurs qui vont la mettre en œuvre, la rudesse de l'environnement, particulièrement en milieu industriel.

On peut retenir une technique pour valider les prototypes en laboratoire, et en choisir une autre lorsqu'on passe à la production de série ou sur chantier.

2.5 Précision

La précision est une arme à double tranchant en détection de fuite. Comme il est rappelé au début de cet ouvrage, il faut accepter l'idée que l'objet testé puisse fuir et néanmoins être conforme. L'important est que ce taux de fuite soit inférieur au seuil critique qu'on s'est fixé. On comprend alors aisément que c'est autour de cette limite qu'il est important d'être précis. C'est là que se situe le risque de se tromper dans un sens ou dans l'autre (risque client, risque du fournisseur). Quand une pièce est très bonne (très étanche) ou très mauvaise (très fuyarde), la précision de la mesure perd de son importance.

C'est pourquoi on calibre toujours les appareils de mesure à une valeur proche du seuil de refus choisi. Si ce seuil varie en cours de production en fonction du modèle ou de la référence testée, on peut être amené à recalibrer l'appareil de mesure au moment du changement de série.

2.6 Coûts

Le coût est une autre variable qui entre en ligne de compte pour le choix d'une méthode. De manière générale, plus l'appareillage mis en œuvre est simple, moins l'acquisition de la technique sera onéreuse. On trouvera par exemple dans les techniques chères celles qui utilisent le vide, comme la spectrométrie de masse hélium. Attention également aux coûts induits. Par exemple, dans le cas d'un test par bac à eau, le système en lui-même n'est pas très cher, mais il va monopoliser une importante surface au sol et, dans le cas d'un séchage des pièces, une consommation d'énergie et de temps de processus.

De plus, certaines techniques permettent une plus grande automatisation que d'autres. Le bac à eau que nous venons de citer reste très majoritairement un test manuel requérant un opérateur. Enfin, les coûts de maintenance sont généralement proportionnels aux coûts d'achat.

2.7 Unités

Les conditions de test et les seuils de refus doivent toujours être exprimés avec une unité pour signifier quelque chose. Au-delà de la rigueur scientifique, cela permet d'éviter des erreurs.

Exemple

10 MPa c'est une pression (de test, d'épreuve, etc.) ;

10 Pa/s c'est une variation de pression, indépendante de la pression de test.

En toute rigueur, il nous faut utiliser les unités du système SI. Mais dans la pratique, on retrouve pour chaque technique des unités que l'on pourrait qualifier de « traditionnelles ».

Exemple : les détecteurs de fuite hélium sont gradués en mbar.l/s.

Dans cet ouvrage, les valeurs SI seront également converties en unités d'usage pour vous faciliter l'usage de ce manuel sur le terrain.

Exemple

$1 \text{ Pa.m}^3/\text{s} \approx 10 \text{ mbar.l/s}$

Dans la pratique, on considère que $1 \text{ mbar.l/s} = 1 \text{ atm.cm}^3/\text{s}$, ce qui permet de faire mentalement les conversions pour les spectromètres de masse hélium qui sont encore gradués en mbar.l/s. Voir annexe A3, p. 149.

3.1 Caractérisation d'une fuite

Il y a différentes manières d'exprimer une fuite :

- une perte de masse (annuelle par exemple) ;
- un débit instantané ;
- une perte de pression dans un temps donné ;
- un pourcentage de perte sur une durée ;
- un diamètre de trou, avec une longueur (épaisseur de la paroi), etc.

Une fuite peut être complètement définie par le débit de fluide (gaz ou liquide) qui passe au travers d'une paroi si on connaît :

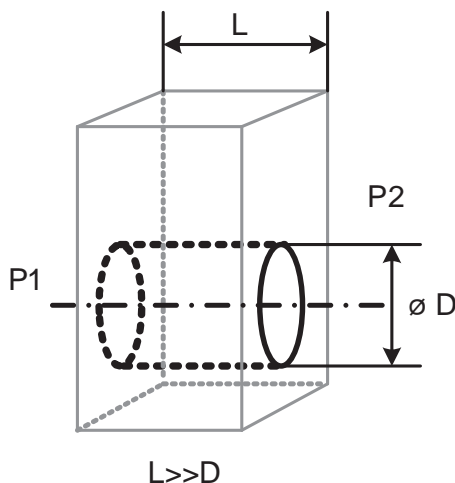
- la nature du fluide (gaz, liquide, viscosité, tension de surface, etc.) ;
- les pressions de chaque côté de la fuite ($P_{\text{int}} - P_{\text{ext}}$) ou pression différentielle ;
- la température du fluide (T).

Ce sont les conditions de Référence. La forme de la fuite (du défaut) ne peut pas être définie et sera donc quelconque dans la pratique. Par contre, pour pouvoir utiliser des modélisations mathématiques, nous figurons la géométrie du défaut en conséquence.

Pour pouvoir calculer le débit avec des conditions d'application différentes, nous allons considérer la fuite comme étant un tube capillaire de diamètre D et de longueur L . Cette assimilation à un tube appelé « capillaire équivalent » va nous permettre de calculer le débit passant au travers quelles que soient les conditions données.

3.2 Modélisation d'une fuite

Pour faciliter les calculs, on considère qu'une fuite s'apparente toujours à un trou cylindrique. Cette convention est acceptée dans l'industrie et dans le bâtiment.

Figure 1 : Modélisation d'une fuite par un capillaire équivalent

3.3 Les paramètres de définition

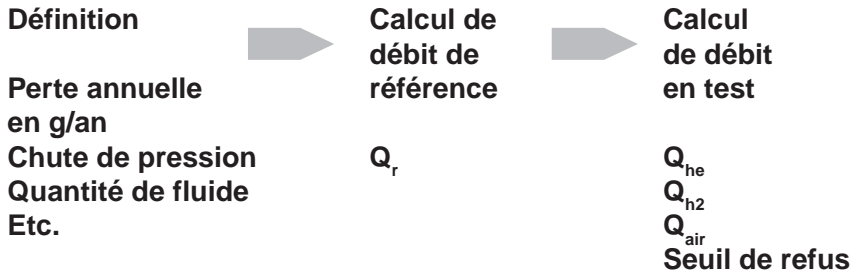
La pression de chaque côté de la fuite est une des conditions indispensables de définition. Donner une valeur de fuite sans référence de pression est un non-sens, pourtant cela se voit encore dans les cahiers des charges. La seconde condition est la nature du fluide qui nous fournira les indications de viscosité, d'état vapeur ou liquide, de masse volumique, de masse molaire, etc. La troisième condition est la température. En première approche, son influence peut être ignorée si l'on considère que le test sera effectué à la même température que celle de référence, généralement celle de l'ambiance proche de 20 °C.

Pour pouvoir choisir une méthode de test, il faut connaître le débit (taux de fuite) qui sera le seuil de rejet en test. Nous allons suivre le cheminement suivant :

- convertir le débit massique en débit volumique du fluide de référence si nécessaire ;
- convertir le débit volumique du fluide de référence en débit du fluide de test ;
- calculer le débit de fluide test équivalent sous les conditions de test.

Un débit de fuite gazeux est généralement exprimé à la pression atmosphérique (d'où les unités $\text{atm.cm}^3/\text{s}$ ou $/\text{min}$), c'est le débit qui sort du circuit, dans l'air qui nous entoure. C'est une convention que l'on

retrouve, par exemple, sur les certificats d'étalonnage des fuites calibrées. Quelle que soit la pression d'alimentation de la fuite, on la définit pour de l'air à une pression de une atmosphère.



Le cas des pertes maximales admissibles de fréon sur les circuits de climatisation offre un exemple intéressant de la méthode à suivre.

3.4 Cas des pertes de fréon

Un circuit de climatisation est un circuit fermé. Le fluide frigorigène circule grâce au compresseur qui agit comme une pompe. Le fluide comprimé s'échauffe et il est alors possible d'échanger de la chaleur avec l'air extérieur si on atteint un niveau de température suffisant.

Quand cet échange a lieu, le fluide se condense et passe de l'état gazeux à l'état liquide, nous sommes dans le condenseur. Le fluide liquide passe ensuite par un détendeur (ou un tube capillaire dans les systèmes les plus simples) qui réduit sa pression. Comme chaque fois qu'il y a une détente, la température baisse à un niveau qui nous permet de faire du froid. Ce liquide peut alors échanger avec le fluide à refroidir (air, eau, etc.) dans un échangeur de chaleur appelé évaporateur. En effet, c'est là que le liquide va s'évaporer et donc changer d'état, liquide → vapeur. À la sortie de cet échangeur, le fluide rejoint le compresseur et le cycle recommence.

Quand la quantité de fluide frigorigène n'est plus suffisante dans le circuit, il n'y a plus de changement d'état liquide-vapeur pendant le cycle. La perte du transfert de l'énergie latente de vaporisation rend alors le système de climatisation totalement inopérant et hors d'usage. Si le circuit est rechargeable, comme c'est le cas pour les automobiles, un appoint de fluide est nécessaire. Pour les systèmes non rechargeables (réfrigérateur par exemple), on peut le jeter.

L'étanchéité du circuit conditionne donc directement la durée de vie du système. D'autre part les fluides frigorigènes sont polluants et nocifs pour l'environnement. Les normes conduisent donc à restreindre les rejets de tels gaz dans l'atmosphère et favorisent les contrôles d'étanchéité sévères.

Les critères d'étanchéité de circuits frigorifiques sont exprimés en perte annuelle admissible de fluide, en gramme par an. Ce critère peut concerner des points précis du circuit ou son ensemble.

La première étape consiste à convertir cette perte admissible en un débit de gaz, car c'est en phase gazeuse que le débit sera le plus conséquent et que se déroule généralement le contrôle d'étanchéité.

► **Convertir une perte massique de gaz réfrigérant en débit de gaz**

Formule n° 1

$$Q_R = \frac{F}{M} \times \frac{22\,400}{365 \times 24 \times 3\,600} \times \frac{T}{273} \quad \text{sous } P_{\text{Ref}} \text{ en atm.cm}^3/\text{s}$$

ou

$$Q_R = \frac{F}{M} \times \frac{2\,240}{365 \times 24 \times 3\,600} \times \frac{T}{273} \quad \text{sous } P_{\text{Ref}} \text{ en Pa.cm}^3/\text{s}$$

Avec :

- F

perte annuelle massique du gaz réfrigérant en gramme
- M

masse moléculaire du gaz réfrigérant considéré en gramme
- 22 400

volume d'une mole de gaz en cm³ à 273 °C et 1 atmosphère
- 2 240

volume d'une mole de gaz en m³ à 273 °C et 1 Pa
- 365 × 24 × 3 600

nombre de secondes dans une année
- T

température de référence du réfrigérant en kelvin
- QR

valeur de la fuite Pa.m³/s

Masse moléculaire de quelques gaz

Gaz	H2	R134a	R410a	FX100®	R507a	R744 (CO ₂)
Masse molaire (g)	2	102	72,6	90,4	98,9	44

Pour une liste plus complète, voir le tableau en page 145 (annexe A1).

Une perte de 5 g/an de R134A à une température de 20 °C représente donc un flux volumique qui se calcule ainsi :

$$Q_R = \frac{5}{102} \times \frac{22\,400}{365 \times 24 \times 3\,600} \times \frac{293}{273}$$

$$Q_R = 3,74 \cdot 10^{-5} \text{ atm.cm}^3/\text{s de R134a}$$

$$Q_R = 3,74 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.cm}^3/\text{s de R134a}$$

La pression de référence peut correspondre à la pression de vapeur saturante à une température donnée pour un fluide donné. C'est le cas par exemple quand on considère qu'un appareil passe la majorité du temps arrêté. On peut aussi faire une moyenne pondérée des durées de fonctionnement et du temps passé à l'arrêt sur une année pour définir une valeur de pression de référence moyenne.

De même pour les viscosités des mélanges de plusieurs fluides frigorigènes, on calculera une viscosité moyenne du mélange par pondération des viscosités de chaque composant par son pourcentage dans le mélange.

3.5 Conversion pour un test à pression atmosphérique

Nous ne traitons ici que le cas où le test est réalisé avec un média gazeux, ce qui représente la très grande majorité des cas.

Ce qui nous intéresse maintenant, c'est de connaître le flux du gaz qui sera utilisé lors du contrôle d'étanchéité. Si le test a lieu avec la pression atmosphérique régnant autour de la pièce, seule l'équation de Poiseuille sera nécessaire. Nous verrons que nous pourrons utiliser une version simplifiée qui consiste à corriger le débit volumique de référence en tenant compte :

- de la variation de viscosité si le gaz de test est différent du gaz de référence ;
- du changement de la pression si la pression de test est différente de la pression de référence ;
- du taux de gaz traceur dans le mélange utilisé pendant le test si la méthode requiert un gaz à détecter qui est dilué dans un mélange.

Nous pouvons identifier dans la formule :

- un terme de correction lié au gaz : le rapport des viscosités ;
- un terme de correction lié à la pression de test ;
- un terme lié à la concentration en gaz traceur, utilisé seulement pour les tests utilisant un mélange de gaz.

Ce qui nous permet de calculer la valeur du débit de fuite équivalant à la fuite de référence, sous les conditions de test.

Nous traitons ici le cas de l'hélium qui est un des gaz les plus courants. Pour tout autre gaz, la méthode à suivre est la même. Il suffit de prendre pour le calcul les données physiques du gaz dont il est question (viscosité, masse molaire, etc.). Les tests à pression atmosphériques sont les tests air/air, les tests en reniflage, la débitmétrie massique.

Dans le cas d'un test en reniflage, le débit du gaz sortant sera considéré comme laminaire dans le champ d'application qui est le nôtre, c'est-à-dire pour des valeurs de fuites comprises dans une très large fourchette : depuis 10^{-6} jusqu'à $0,1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ pour l'air ; même si cela dépend des pressions de chaque côté et de la longueur de la fuite.

La formule du débit laminaire d'un gaz que nous utiliserons est :

$$Q = \frac{\pi \times D^4}{256 \times \eta \times L} \times (P_1^2 - P_2^2)$$

Formule n° 2

(Entre parenthèses, les unités utilisées sur le terrain)

D	diamètre du tube capillaire en m (cm)
L	longueur de la fuite en m (cm)
h	viscosité du gaz en Pa.s (bar.s)
P ₁	pression absolue d'un côté de la fuite en Pa (bar)
P ₂	pression absolue de l'autre côté de la fuite en Pa (bar)

On notera les termes de pression qui sont élevés au carré. La pression de test qui est un des deux termes P₁ ou P₂ aura donc une conséquence importante sur le débit résultant. En doublant la pression de test, on multiplie presque par quatre le débit. C'est donc un très bon levier pour augmenter la valeur du seuil de refus quand on frôle la limite de sensibilité d'une méthode.

La formule n° 2 peut être utilisée pour convertir directement le débit d'un réfrigérant Q_R en un débit d'hélium Q_{He} dans le cas d'un test à la pression atmosphérique.

$$Q_R = \frac{\pi \times D^4}{256 \times \eta_R \times L} \times (P_{Ref}^2 - P_{atm}^2)$$

$$Q_{TR} = \frac{\pi \times D^4}{256 \times \eta_{Test} \times L} \times (P_{Test}^2 - P_{atm}^2) \times \frac{P_{TR}}{P_{Test}}$$

En divisant Q_{TR} par Q_R :

$$\frac{Q_{TR}}{Q_R} = \frac{D^4 \times L \times 256 \times \eta_R}{D^4 \times L \times 256 \times \eta_{Test}} \times \frac{(P_{Test}^2 - P_{atm}^2)}{(P_{Ref}^2 - P_{atm}^2)} \times \frac{P_{TR}}{P_{Test}}$$

$$\text{Donc } Q_{TR} = Q_R \times \frac{\eta_R}{\eta_{Test}} \times \frac{(P_{Test}^2 - P_{atm}^2)}{(P_{Ref}^2 - P_{atm}^2)} \times \frac{P_{TR}}{P_{Test}}$$

Formule n° 3

Avec :

Q_R débit du gaz (réfrigérant dans l'exemple précédent)
 sous les conditions de référence

Q_{TR} débit de gaz traceur sous les conditions du test

η_R viscosité du gaz de référence (réfrigérant dans
 l'exemple) dans les conditions de référence (P_{Ref} , T_{Ref})

η_{Test} viscosité du mélange de test dans les conditions de test
 (P_{Test} , T_{Test})

P_{TR} pression partielle du gaz traceur dans le mélange de
 test

P_{test} pression absolue du mélange de test

P_{ref} pression absolue du gaz de référence (réfrigérant dans
 l'exemple) dans les conditions de référence

$\frac{\eta_R}{\eta_{Test}}$ = correction du débit en fonction des viscosités des gaz considérés

$\frac{(P_{Test}^2 - P_{atm}^2)}{(P_{Ref}^2 - P_{atm}^2)}$ = correction du débit en fonction des pressions internes et
externes

$\frac{P_{TR}}{P_{Test}}$ = correction du débit en fonction du taux de gaz traceur visible par le détecteur. Ce terme correspond à un pourcentage de traceur dans le mélange. Attention : en cas d'utilisation d'un mélange, la viscosité retenue doit être celle du mélange.

Viscosité de quelques gaz à 15 °C et 1 bar

Gaz	R 404A	R134A	ISOBUTANE C ₄ H ₁₀	AIR	N2	HE	H2
Viscosité × 10 ⁻⁵ Pa.s	1,24	1,21	0,73	1,75	1,69	1,93	0,88

Pour d'autres réfrigérants, voir le tableau en page 145 (annexe A1).

Le R134A est actuellement le fluide frigorigène le plus utilisé pour la climatisation automobile. Des fluides de remplacement sont en cours d'évaluation pour le futur. Le CO₂ pourrait être l'un d'eux. Il exige des pressions élevées pour se condenser, mais est moins polluant.

Exemple pratique

Une perte de 5 g/an de R134A à 15 °C à une pression de 3 bars relatifs dans un évaporateur. Les conditions de test sont : reniflage avec 10 bars relatifs à 15 °C et un mélange air/hélium de 30 % (concentration d'hélium dans la pièce au moment du test).

$Q_R = 3,74 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$ = débit de R134A précédemment calculé

$\eta_R = 1,21 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$

$\eta_{AIR} = 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$

$P_{TEST} = 11 \text{ bars absolus} = 11 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

$P_{He} = 0,3 \times 11 = 3,3 \text{ bar}$

$P_{REF} = 4 \text{ bars absolus} = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Viscosité moyenne du mélange de test :

$\eta_{Test} = (0,7 \times \eta_{AIR}) + (0,3 \times \eta_{He})$

$= [(0,7 \times 1,75) + (0,3 \times 1,93)] \times 1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$

$= 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$

En utilisant la formule n° 3, on obtient :

$$Q_{\text{He}} = 3,74 \cdot 10^{-6} \times \frac{1,21 \cdot 10^{-5}}{1,80 \cdot 10^{-5}} \times \frac{(11 \cdot 10^5)^2 - (10^5)}{(4^5)^2 - (10^5)} \times 03$$

$$Q_{\text{He}} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ d'hélium}$$

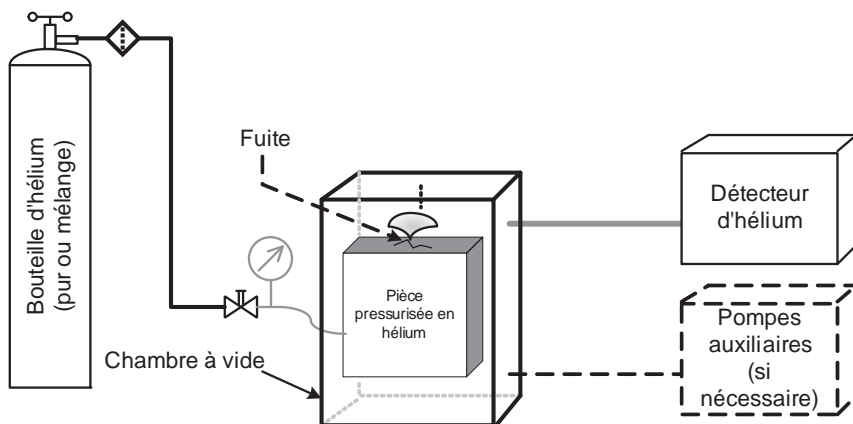
3.6 Conversion de flux de référence pour un test sous vide

Régimes d'écoulement : flux laminaire et moléculaire

Quand on fait le vide autour de la pièce à tester, le débit sortant par la fuite sera d'abord laminaire puis moléculaire, en passant par une phase de recouvrement dite d'écoulement « intermédiaire ».

Pour simplifier, le débit d'hélium dans un test sous vide est considéré comme l'addition du débit laminaire et du débit moléculaire. Cela étant acceptable dans la très grande majorité des applications industrielles courantes.

Figure 2 : Test hélium sous vide



3.6.1 Première étape : calcul du flux laminaire sous vide

Pour calculer le débit laminaire : la formule est identique à la formule n° 2, excepté pour la pression extérieure qui n'est plus la pression atmosphérique, mais le vide.

Dans la pratique (voir formule ci-dessous), on peut négliger la valeur de la pression correspondant au niveau de vide atteint dans la chambre de test ou le circuit concerné car elle est très petite comparée à l'atmosphère. Mais rien ne vous empêche de prendre comme valeur pour le calcul, la valeur exacte de cette pression régnant dans la chambre de test au moment de la mesure. Par exemple : 0,1 mbar = 10 Pa au lieu de 0.

Le flux équivalent en gaz traceur sous vide, dans des conditions de test définies, se calcule comme suit, en fonction du flux de référence :

$$Q_{TRL} = Q_R \times \frac{\eta_R}{\eta_{Test}} \times \frac{(P_{Test}^2 - P_{vide}^2)}{(P_{Ref}^2 - P_{atm}^2)} \times \frac{P_{TR}}{P_{Test}}$$

Formule n° 4

Avec :

Q_R	débit du gaz (réfrigérant dans l'exemple précédent) sous les conditions de référence
Q_{TRL}	débit laminaire de gaz traceur sous les conditions du test
η_R	viscosité du gaz de référence (réfrigérant dans l'exemple) dans les conditions de référence (P_{Ref}, T_{Ref})
η_{Test}	viscosité du mélange de test dans les conditions de test (P_{Test}, T_{Test})
P_{test}	pression absolue du mélange de test
P_{vide}	pression absolue régnant dans la chambre ou le circuit au moment de la mesure
P_{ref}	pression absolue du gaz de référence (réfrigérant dans l'exemple) dans les conditions de référence
P_{TR}	pression partielle du gaz traceur dans le mélange test

Exemple pratique

Une perte de 5 g/an de R134A à 15 °C à une pression de 3 bars relatifs dans un évaporateur. Les conditions de test sont : sous vide avec 25 bars relatifs à 15 °C et un gaz traceur de 100 % d'hélium.

$$Q_R = 3,74.10^{-6} \text{ Pa.m}^3/\text{s} = \text{débit de R134A précédemment calculé}$$

$$\eta_R = 1,21.10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$$\eta_{\text{He}} = 1,93.10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$$P_{\text{TEST}} = 26 \text{ bars absolus} = 26.10^5 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{He}} = 26 \text{ bars} = 26.10^5 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{REF}} = 4 \text{ bars absolus} = 4.10^5 \text{ Pa}$$

Viscosité moyenne du mélange de test :

$$\eta_{\text{Test}} = \eta_{\text{He}}$$

En utilisant la formule n° 1, on obtient :

$$Q_{\text{HeL}} = 3,74.10^{-6} \times \frac{1,21.10^{-5}}{1,93.10^{-5}} \times \frac{(26.10^5)^2 - (10)^2}{(4.10^5)^2 - (1^5)^2} \times 1$$

$$Q_{\text{HeL}} = 9,9.10^{-5} \text{ Pa.m}^3.\text{s}^{-1} \text{ d'hélium}$$

3.6.2 2^e étape : calcul du flux moléculaire

Pour calculer le débit moléculaire : il faut estimer le diamètre de la fuite équivalente avec une hypothèse sur la longueur. En général, la longueur de la fuite est estimée d'après l'épaisseur du métal, de la soudure, bref, du parcours supposé de la fuite. La formule pour estimer le diamètre vient de la formule générale de flux laminaire sous des conditions de référence :

Formule n° 2

$$Q_R = \frac{\pi \times D^4}{256 \times \eta_R \times L} \times (P_{\text{Ref}}^2 - P_{\text{atm}}^2)$$

De cette formule et avec les conditions de référence, on tire le calcul du diamètre équivalent de fuite :

Formule n° 5

$$D = \left[\frac{256 \times \eta_R \times L \times Q_R}{(P_{\text{REF}}^2 - P_{\text{atm}}^2)} \right]^{0,25}$$

Le débit moléculaire nous est donné par la formule de Knudsen :

$$\frac{1}{6} \sqrt{\frac{2 \times \Pi \times R \times T}{M}} \times \frac{D^3}{L} \times (P_{TR} \cdot P_{vide})$$

Formule n° 6

Avec :

Q_R	débit du gaz (réfrigérant dans l'exemple précédent) sous les conditions de référence
η_R	viscosité du gaz de référence (réfrigérant dans l'exemple) dans les conditions de référence (P_{Ref}, T_{Ref})
L, D	longueur et diamètre de la fuite
Q_{TRM}	débit moléculaire de gaz traceur sous les conditions de test
M	masse moléculaire du gaz en kg
R	constante des gaz parfaits = $8,314 \text{ J.kg}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
P_{test}	pression absolue du mélange de test
P_{test}	pression absolue du mélange de test
P_{vide}	pression absolue régnant dans la chambre ou le circuit au moment de la mesure
P_{ref}	pression absolue du gaz de référence (réfrigérant dans l'exemple) dans les conditions de référence
P_{TR}	pression partielle du gaz traceur dans le mélange test

Exemple pratique

Une perte de 5 g/an de R134A à 15 °C à une pression de 3 bars relatifs dans un évaporateur. Les conditions de test sont : test sous vide avec 25 bars relatifs à 15 °C et un gaz traceur hélium de 100 %.

Q_R	= $3,74.10^{-6} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$
η_R	= $1,21.10^{-5} \text{ Pa.s}$
η_{He}	= $1,93.10^{-5} \text{ Pa.s}$
P_{TR}	= 26 bars absolus = 26.10^5 Pa
P_{vide}	= 0,1 mbar = 10 Pa
P_{He}	= 26 bars absolus = 26.10^5 Pa
P_{REF}	= 4 bars absolus = 4.10^5 Pa
L	= 1 mm = 1.10^{-3} m
D	= à calculer

Calcul du diamètre équivalent avec la formule n° 5 :

$$D = \left[\frac{256 \times \eta_R \times L \times Q_R}{(P_{REF}^2 - P_{atm}^2)} \right]^{0,25}$$

$$D = \left[\frac{256 \times 1,21 \cdot 10^{-5} \times 10^{-3} \times 3,74 \cdot 10^{-6}}{\left((4 \cdot 10^5)^2 - (10^5)^2\right)} \right]^{0,25}$$

$$D = 2,23 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 2,2 \text{ } \mu\text{m}$$

Calcul du flux moléculaire en utilisant la formule n° 6

$$Q_{HEM} = \frac{1}{6} \times \sqrt{\frac{2 \times \pi \times R \times T}{M}} \times \frac{D^3}{L} \times (P_{TR} - P_{vide})$$

$$Q_{TRM} = \frac{1}{6} \times \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 8,314 \times 288}{4}} \times \frac{(2,23 \cdot 10^{-6})^3}{10^{-3}} \times (26 \cdot 10^5 - 10)$$

$$Q_{TRM} = 9,32 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$$

3.6.3 3^e étape : calcul du débit total

Calcul du débit total d'hélium dans les conditions de réalisation du test

Le débit total d'hélium dans les conditions de test sera l'addition du débit laminaire Q_{HeL} et du débit moléculaire Q_{HeM} précédemment calculés.

$$Q_{Hetotal} = Q_{HeL} + Q_{HeM}$$

$$Q_{Hetotal} = 9,9 \cdot 10^{-5} + 9,3 \cdot 10^{-6} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.m}^3 / \text{s}$$

Formule n° 7

C'est le débit d'hélium qui sortira de la pièce dans la chambre de test sous vide pour une fuite correspondant à une perte annuelle de fréon de 5 grammes dans les conditions de référence. Il s'agit donc du « seuil de refus » qui doit être réglé sur le détecteur.

Attention, dans un système industriel, d'autres paramètres peuvent intervenir comme le pompage en parallèle, par exemple. Si le détecteur est

connecté à la chambre de test en même temps qu'un groupe de pompage externe au détecteur, il ne détectera qu'une petite partie de la fuite que nous venons de calculer. Le seuil de refus réglé sur l'appareil de mesure devra en tenir compte.

On intègre aussi dans le réglage de ce seuil les tolérances de mesures en diminuant la valeur réglée en fonction des imprécisions relevées sur la chaîne de mesure. En effet, ce seuil marque la limite entre une pièce bonne et une pièce mauvaise.

Il est moins préjudiciable de refuser une pièce à tort que d'envoyer une pièce mauvaise chez son client.

3.7 Cas des fuites liquides

3.7.1 Équation générale de Poiseuille (liquides)

Dans le cas des liquides, nous utiliserons une formule différente. Attention à ne pas la confondre avec celle que nous utilisons pour les gaz car le résultat serait faux bien qu'elles se ressemblent !

$$Q_m = \frac{\pi D^4 \rho}{128 \eta L} (P_{am} - P_{av})$$

Formule n° 8

Avec :

Q_m	débit massique de fuite en kg/s
D	diamètre équivalent de la fuite correspondant au seuil de refus en m
P_{av}	pression avale (externe) absolue en Pa
P_{am}	pression amont (interne) absolue en Pa
L	longueur de la fuite en m
η	viscosité dynamique en Pa.s
ρ	masse volumique en kg.m ⁻³

La convention est de baptiser la pression la plus élevée, pression amont et la plus basse, pression avale. Ainsi le débit est toujours positif et la terminologie amont/aval tient compte du sens de l'écoulement. On peut en effet traiter de problématique de fuite entrant dans la pièce (cas du stockage sous enveloppe par exemple) comme l'inverse (perte du contenu). On a donc $P_{am} > P_{av}$.

3.7.2 Calcul du diamètre équivalent avec les tensions de surface

Nous avons vu au paragraphe 2.2.2 que les tensions de surface du liquide à l'embouchure du défaut créent une contre-pression qui s'oppose à l'écoulement. Pour les très petits diamètres de fuite (inférieurs à 10 µm environ), il convient de ne pas négliger ce phénomène.

La formule générale qui tient compte de cette contre-pression est la suivante :

$$Q_m = \frac{\pi D^4 \rho}{128 \eta L} \left(P_{am} - P_{av} - \frac{8\gamma}{D} \right)$$

Formule n° 9

Avec :

γ	tension de surface (= 7,05 10 ⁻² N.m pour l'eau à 20 °C, par exemple)
D	diamètre équivalent de fuite en mètres
η	viscosité dynamique en Pa.s
P_{av}	pression la plus basse en Pa abs.
P_{am}	pression la plus élevée en Pa abs.
L	longueur de la fuite en m
ρ	masse volumique en kg.m ⁻³

Par itération, on trouve un diamètre D (m).

Se reporter à l'annexe A2 p. 147 pour d'autres facteurs de tension de surface.

3.7.3 Détermination du diamètre équivalent critique

Nous avons vu que le débit massique de fuite peut être modélisé ainsi :

$$Q_m = \frac{\pi D^4 \rho}{128 \eta L} \left(P_{am} - P_{av} - \frac{8\gamma}{D} \right)$$

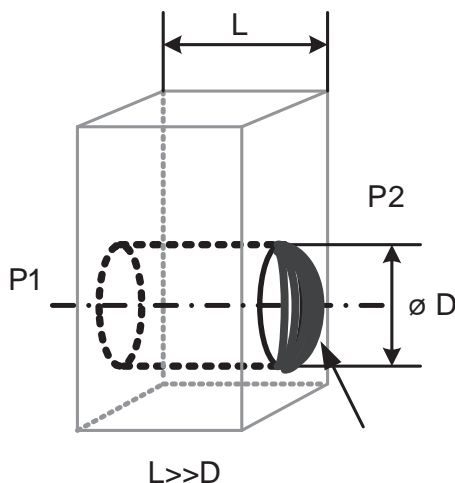
Si $\frac{8\gamma}{D} = P_{am} - P_{av}$ alors le débit Q_m est égal à zéro. Cela nous permet de calculer une valeur de « diamètre équivalent » en deçà de laquelle il n'y aura pas de fuite de liquide, car aucun écoulement. En effet, la contre-pression est égale à la pression.

La contre-pression s'exerce de chaque côté de la fuite car celle-ci est supposée remplie de liquide.

$$D = \frac{8 \times \gamma}{(P_{am} - P_{av})}$$

Formule n° 10

Figure 3 : Tension surface



3.7.4 Détermination du flux gazeux correspondant

Pour calculer le flux d'un gaz qui passerait par ce diamètre équivalent, pour une différence de pression interne – externe donnée on utilisera la formule de Poiseuille pour les gaz, c'est-à-dire la formule n° 2.

$$Q = \frac{\pi D^4}{256 \eta L} (P_{am}^2 - P_{av}^2)$$

Avec :

P_1	pression amont en test en Pa
P_2	pression aval en test en Pa
η_{test}	viscosité dynamique de l'air en Pa.s
L	longueur de la fuite en m
D	diamètre équivalent de fuite en m
Q	débit en Pa.m ³ /s

Il suffit d'appliquer la formule avec la valeur de diamètre critique précédemment calculée.

3.8 Chute de pression sur une longue durée

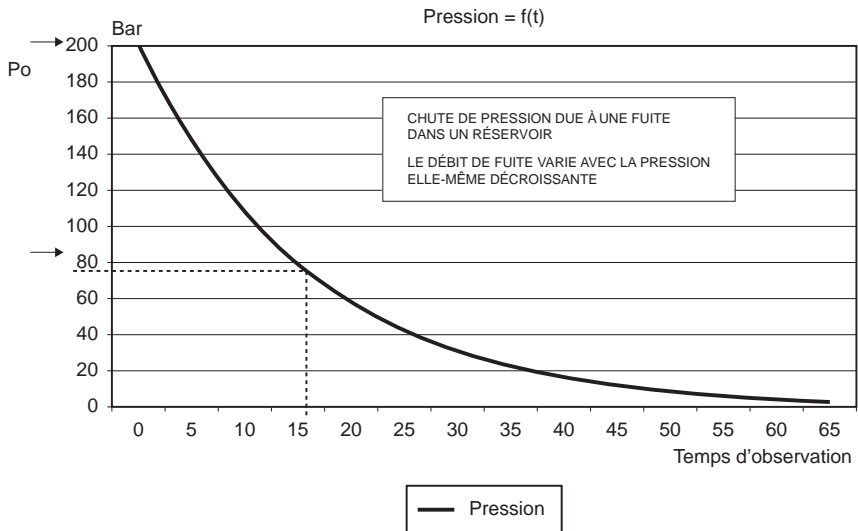
C'est le cas où l'on veut déterminer le taux de fuite initial admissible dans un réservoir (cartouche, par exemple) pour garantir une perte de pression donnée pendant un temps donné. La difficulté est que, en cas de fuite, la pression dans le réservoir va baisser, et le flux de fuite va donc aussi diminuer progressivement. Dans ce cas, le débit de fuite est variable avec le temps (décroissant). La démarche pour calculer un seuil de refus en fonction d'une perte de pression (par exemple en pourcentage sur un nombre d'année) est donc plus complexe.

Considérons que la pression extérieure au réservoir est la pression atmosphérique et que la pression intérieure est supérieure à la pression atmosphérique, ce qui est le cas le plus courant. Le débit de fuite est de faible valeur.

⇒ L'écoulement est donc visqueux.

En régime d'écoulement visqueux, le flux de fuite est proportionnel à $P_{am}^2 - P_{av}^2$.

Objectif : déterminer le taux de fuite à t_0 qui permet de garantir une pression minimale P définie au bout d'un temps t .



À l'instant $t + dt$, on a $P(t + dt) = P(t) - \frac{Q(t)}{V} dt$

$$\text{et} \quad \frac{Q(t)}{P^2(t) - P_{\text{atm}}^2} = \frac{Q(t_0)}{P^2(t_0) - P_{\text{atm}}^2} = \frac{Q_0}{P_0^2 - P_{\text{atm}}^2}$$

Avec :

$P(t)$ pression à l'intérieur du réservoir à un instant t :
la spécification

$P(t + dt)$ pression à l'intérieur du réservoir à l'instant

$Q(t)$ flux de fuite à l'instant t

V volume interne du réservoir

$P(t_0) = P_0$ pression à l'intérieur du réservoir à l'instant t_0 ,
condition initiale

$Q(t_0) = Q_0$ flux de fuite à l'instant t_0 , condition initiale

P_{atm} pression atmosphérique

$$\text{On en déduit} \quad \frac{P(t + dt) - P(t)}{dt} = -\frac{Q_0}{V} \frac{P^2(t) - P_{\text{atm}}^2}{P_0^2 - P_{\text{atm}}^2}$$

$$\text{et} \quad \frac{dP(t)}{dt} = -\frac{Q_0}{V} \frac{P^2(t) - P_{\text{atm}}^2}{P_0^2 - P_{\text{atm}}^2}$$

$$\text{ou encore} \quad \frac{dP(t)}{P^2(t) - P_{\text{atm}}^2} = -\frac{Q_0}{V(P_0^2 - P_{\text{atm}}^2)} dt, \text{ en croisant les produits.}$$

Au bout du temps t écoulé, la variation observée est la somme intégrale de la décroissance de pression.

$$\text{Rappel} \quad \int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \text{Ln} \left(\frac{x - a}{x + a} \right) + c^{\text{te}}$$

$$\left[\frac{1}{2P_{\text{atm}}} \text{Ln} \left(\frac{P - P_{\text{atm}}}{P + P_{\text{atm}}} \right) + c^{\text{te}} \right]_{P_0}^P = \left[-\frac{Q_0}{V(P_0^2 - P_{\text{atm}}^2)} t \right]_{t_0}^t$$

$$\frac{1}{2P_{\text{atm}}} \left(\text{Ln} \left(\frac{P - P_{\text{atm}}}{P + P_{\text{atm}}} \right) - \text{Ln} \left(\frac{P_0 - P_{\text{atm}}}{P_0 + P_{\text{atm}}} \right) \right) = -\frac{Q_0}{V(P_0^2 - P_{\text{atm}}^2)} (t - t_0)$$

$$\text{Ou} \quad \text{Ln} \left(\frac{(P - P_{\text{atm}})(P_0 + P_{\text{atm}})}{(P_0 - P_{\text{atm}})(P + P_{\text{atm}})} \right) = -\frac{2Q_0 P_{\text{atm}} (t - t_0)}{V(P_0^2 - P_{\text{atm}}^2)}$$

Donc
$$Q_0 = \frac{V(P_0^2 - P_{atm}^2)}{2P_{atm}(t - t_0)} \text{Ln} \left(\frac{(P_0 - P_{atm})(P + P_{atm})}{(P - P_{atm})(P_0 + P_{atm})} \right)$$

Formule n° 11

En fait, la pression variera dans le temps en fonction de cette loi :

Formule n° 12

$$\frac{P - P_{atm}}{P + P_{atm}} = \frac{P_0 - P_{atm}}{P_0 + P_{atm}} e^{-\frac{2Q_0 P_{atm}(t - t_0)}{V(P_0^2 - P_{atm}^2)}}$$

Exemple

Une cartouche est remplie à sa fabrication d'un gaz à une pression de 20 MPa (200 bars).

Si on doit pouvoir garantir qu'après 15 années de stockage, la pression dans cette cartouche de 50 cm³ ne sera pas inférieure à 75 bars (7,5 MPa), quel doit être le critère de rejet ?

P_{atm}	=	10^5 Pa (1 bar)
P_0	=	$2 \cdot 10^7$ Pa (200 bars)
P	=	$7,5 \cdot 10^6$ Pa (75 bars)
t_0	=	0
t	=	15 ans = $15 \times 365 \times 24 \times 3600 = 4,7304 \cdot 10^8$ sec
V	=	$5 \cdot 10^{-5}$ m ³ (50 cm ³)
Q_0	=	$3,5 \cdot 10^{-6}$ Pa.m ³ /s ($3,5 \cdot 10^{-5}$ mbar.l/s)

Le réservoir sera contrôlé à la sortie de sa fabrication avec un rejet des pièces ayant un taux de fuite supérieur ou égal à $3,5 \cdot 10^{-6}$ Pa.m³/s, afin de garantir une pression résiduelle intérieure d'au moins 7,5 MPa au bout de 15 ans. Ceci est vrai dans la mesure où aucune autre fuite ne viendrait augmenter le flux et accélérer ainsi la baisse de pression.

Chaque méthode utilisant comme média de test de l'air, qui, au-delà de la fuite se retrouvera dans l'air, est classée comme méthode air dans air.

4.1 Variation de pression

4.1.1 Mesure de la variation de pression (ou de vide)

Le fait de travailler en vide ou en pression change surtout le sens de la fuite. Dans le cas d'un test sous vide, l'air entrera dans la pièce. Tout ce qui suit sur la variation de pression s'applique donc aussi bien pour le vide dans la pièce que pour des pressions de test supérieures à la pression atmosphérique.

Le principe de base.

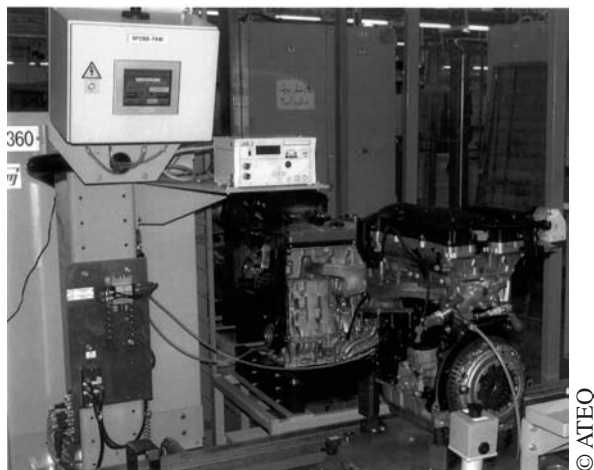
Une pression P est appliquée à la pièce à tester. Si la pièce n'est pas étanche, la pression va baisser (augmenter si test sous vide). Plus la fuite est grande, plus la pression va chuter rapidement. Cela fonctionne de manière identique si on tire la pièce au vide.

Si on se place dans des conditions où ni la température ni le volume ne varient, la relation entre le débit de fuite et la variation peut se résumer ainsi :

$$Q = \frac{\Delta P \times V}{\Delta t} \text{ à } T^\circ \text{ constante (Formule n° 13)}$$

Avec :

Q	valeur de la fuite
ΔP	variation de pression
V	volume
Δt	temps écoulé pour la mesure de t

Figure 1 : Contrôle d'étanchéité d'un moteur par variation de la pression

© ATEQ

Exemple

Comment calculer la fuite correspondant à une chute de pression de 300 Pa (3 millibar) en 60 secondes pour un volume de 0,01 m³ (10 litres) ?

$$Q = \frac{300 \times 0,01}{60} = 0,05 \text{ Pa m}^3/\text{s} \text{ (0,5 millibar.litre/seconde)}$$

Pour être plus complet, considérons la loi des gaz parfaits :

$$P \times V = n \times R \times T \text{ (Formule n° 14)}$$

On voit que d'autres facteurs peuvent venir perturber la mesure.

Quand on mesure la variation de pression sur une durée fixe, c'est-à-dire

le terme $\frac{\Delta P}{\Delta t}$, on récupère dans la mesure la totalité des influences sur ce terme :

$$\Delta P = \frac{\Delta n \times R \times \Delta T}{\Delta V} \text{ (Formule n° 15)}$$

La valeur de $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ est donc la résultante de plusieurs phénomènes :

- Δn = variation du nombre de molécules, autrement dit la perte massique subie par le système mesuré, c'est-à-dire l'impact d'une ou plusieurs fuites
- ΔV = variation du volume contrôlé
- ΔT = variation de la température : chaque degré d'écart engendre une variation de 1/273 de la pression c'est-à-dire $\approx 0,4 \%$

Dans le contrôle d'étanchéité, on aura donc toujours à cœur de créer des systèmes dans lesquels les variations de volume et de température sont rendues négligeables pendant le temps de mesure.

Pour passer d'une expression de variation de pression à un terme de débit plus représentatif des fuites, il faut intégrer le fait que la variation de pression se mesure pendant un temps fini.

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\Delta n \times R \times \Delta T}{\Delta V \times \Delta t}$$

D'où l'on extrait cette relation si pratique à utiliser sur le terrain :

Débit = $\frac{\Delta P \times V}{\Delta t}$ valable uniquement quand on considère que la température et le volume testé n'ont pas varié pendant la mesure. Cela repose sur un savoir-faire sans lequel ce type de contrôle perd beaucoup de sa précision.

Δt = temps écoulé entre le début et la fin de la mesure.

Quel est l'impact d'une variation de volume ?

Si le volume varie pendant la mesure (recul d'un outillage, compression d'un joint, etc.), le résultat en sera affecté. Une valeur de chute ou de remontée de pression apparaîtra alors à l'affichage, mais ne sera pas liée à une fuite.

On peut estimer l'impact d'une variation de volume donnée sur la mesure de la manière suivante :

Considérons que la température ne varie pas et qu'il n'y a pas de fuite. On peut alors énoncer que $PV = \text{constante}$; la pression variant de manière inversement proportionnelle au volume.

Indice 1 = données au début du temps de test

Indice 2 = données à la fin du temps de test

On peut dire : $P_1 V_1 = P_2 V_2$

On cherche P_2 , la pression finale $\Rightarrow P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$

Exemple

Volume testé = 130 cm³

Pression de test = 100 mbar

Variation de volume = 10 mm³

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{10\,000 \times 13\,000}{130\,010} = 9\,999,2 \text{ Pa}$$

Dans le cas d'une augmentation de volume de 1 mm³ pendant la mesure la pression chuterait de 0,8 Pa.

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{10\,000 \times 130\,000}{129\,990} = 10\,000,8 \text{ Pa}$$

Dans le cas d'une diminution du volume de 1 mm³ pendant la mesure la pression augmenterait de 0,8 Pa.

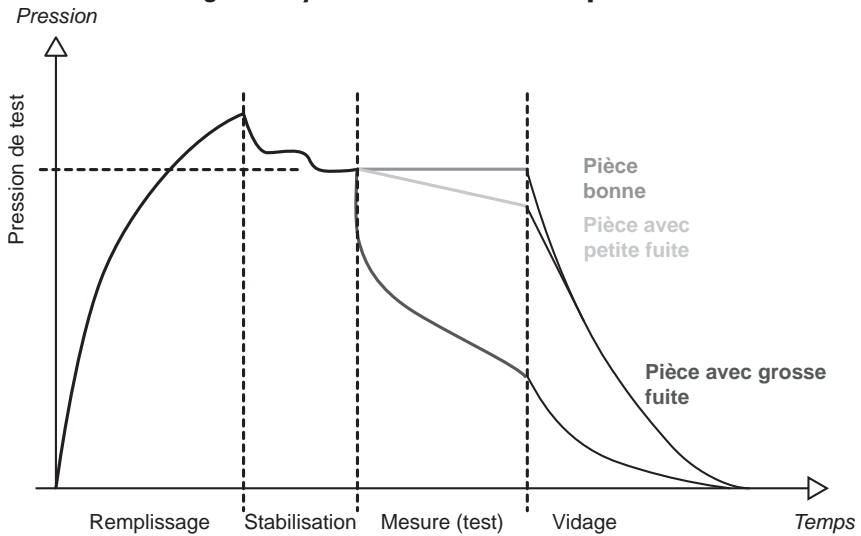
Quel est l'impact d'une variation de température ?

L'impact des variations de température est difficile à estimer car la température n'est pas forcément homogène au sein du volume testé. Un seul point chaud ou froid suffit pour qu'il y ait un échange thermique et donc une variation. Le calcul dans ces conditions ne nous apportera donc pas grand-chose. On s'assure dans la pratique de tester des ensembles stabilisés en température.

4.1.2 Cycle de test

Pour mesurer une variation de pression consécutive à une fuite, il y a toujours au moins quatre phases :

- remplissage : phase de mise en pression de la pièce à tester ;
- stabilisation : la pression ayant augmenté dans la pièce, l'air s'est échauffé. Un échange de chaleur s'ensuit avec la pièce. La température redescend et donc la pression aussi. Il faut attendre que cet échange soit terminé pour ne pas confondre la baisse de pression qu'il provoque avec une fuite ;
- la phase de test est le moment pendant lequel on mesure effectivement la variation de la pression. Les systèmes les plus simples mesurent la pression au début du temps de test puis à la fin et font ensuite la différence :
 $\Delta P = (P_{\text{Finale}} - P_{\text{Initiale}})$. Ce ΔP est comparé à la limite fixée (seuil de fuite admissible ou seuil de refus). Le résultat du test (pièce bonne/pièce mauvaise) est donné à la fin de cette phase ;
- vidage : la pièce est ramenée aux conditions de départ pour être déconnectée. Cela consiste dans la majorité des cas à dépressuriser la pièce pour la ramener à la pression atmosphérique. À la fin de cette phase, le test est terminé. Dans les applications à basse pression (< 1 bar), la pièce peut être déconnectée sans dépressurisation préalable.

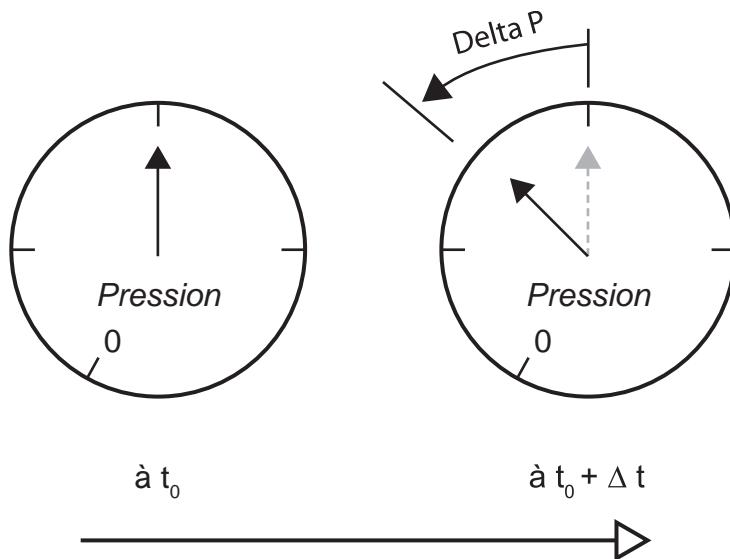
Figure 2 : Cycle de test en variation de pression

Ce qui caractérise le test en variation de pression :

- le résultat de la mesure est proportionnel au temps de test ;
- on mesure l'effet d'une fuite sur la pression, mais pas la fuite elle-même ;
- la mesure est directement affectée par les variations de température ;
- la mesure est directement affectée par les variations de volume (y penser lors de la conception des outillages de connexion) ;
- la sensibilité est proportionnelle au volume testé ;
plus le volume testé est petit, plus la sensibilité est grande ;
- cette technique n'est donc pas très sensible pour les grands volumes ;
- pour connaître la valeur de la fuite, il est nécessaire de convertir le résultat de la mesure ;
- cette technique est globale, c'est-à-dire que le résultat intègre la somme de toutes les fuites de la pièce.

4.1.3 Mesure relative

La mesure relative consiste simplement à comparer la pression totale dans la pièce au départ et à la fin du test.

Figure 3 : Mesure relative de variation de pression**Exemple**

à t_0 , on lit sur le manomètre $P_0 = 2$ bars

après un temps écoulé, on lit à t_1 , $P = 1,7$ bar

$\Rightarrow \Delta = 0,3 \text{ bar} = 300 \text{ mbar} = 30\,000 \text{ Pa}$

Quelle est la résolution de la lecture de la pression ? Considérons que c'est l'écart entre deux graduations :

$0,1 \text{ bar} = 100 \text{ mbar} = 10\,000 \text{ Pa}$

La précision dans cet exemple est limitée à cet ordre de grandeur d'une dizaine de milliers de pascals, ce qui suffit pour de nombreuses applications.

La mesure relative de variation de pression est adaptée pour la détection des fuites relativement « grosses ». Comme c'est une méthode simple et plutôt bon marché, on l'utilisera souvent sur les chantiers pour réceptionner des réseaux d'eau ou de gaz, pour effectuer des contrôles intermédiaires afin de ne pas donner de valeur ajoutée à un produit très fuyard, ou encore chaque fois que le niveau d'étanchéité requis n'exige pas plus.

4.1.4 Mesure différentielle

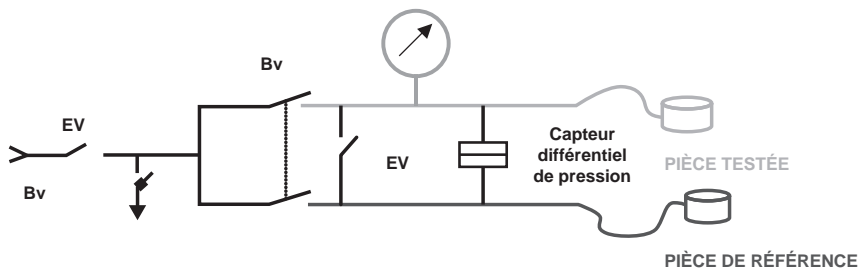
Pour obtenir une précision plus grande, il faut concentrer la mesure sur la variation de pression. Le contrôle de la pression dans la pièce ne servant qu'à valider le fait que la mesure a été effectuée dans les conditions requises. En effet une valeur de variation de pression nulle, ou inférieure au seuil de rejet (pièce bonne), ne peut être prise en considération qu'après avoir vérifié que la pression de test était effectivement présente au moment de la mesure. Les mesures de la pression de test dans la pièce et celle de sa variation vont être effectuées au travers de deux capteurs distincts.

Nous allons donc comparer la pièce testée à une pièce de référence comme on le fait avec une balance à plateaux (dite de Roberval).

Figure 4 : La balance à plateaux est un moyen de mesure différentiel

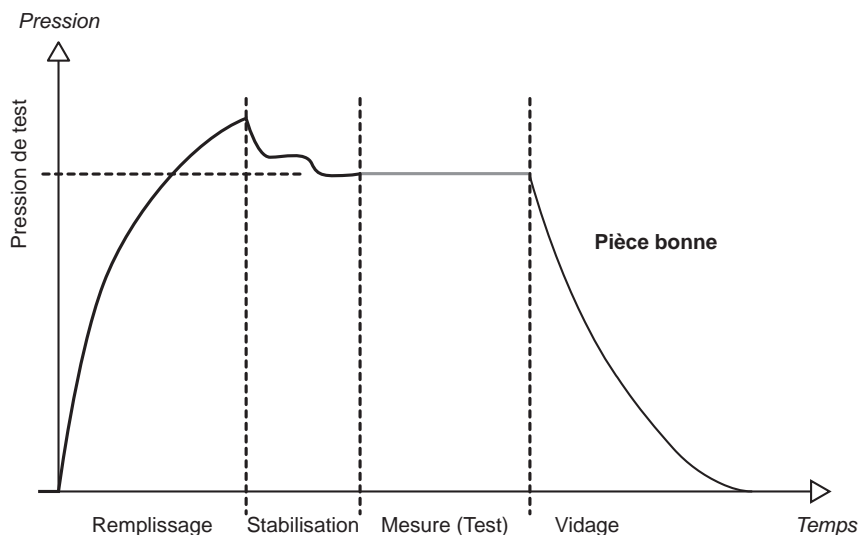


Figure 5 : Schéma pneumatique simplifié d'un détecteur de fuite différentiel



Rappel du cycle :

1. Remplissage avec de l'air sec
2. Stabilisation
3. Test
4. Remise à P_{atm} (vidage)

Figure 6 : Évolution de la pression au cours d'un test

Pourquoi préconise-t-on d'utiliser de l'air sec ?

C'est surtout pour éviter les phénomènes de condensation et de vaporisation qui pourraient endommager le capteur différentiel très sensible et diminuer la fiabilité de l'appareil dans le temps.

La méthode différentielle est plus précise et plus rapide que la méthode absolue, mais elle coûte un peu plus cher à mettre en œuvre.

4.1.4.1 Réglage des paramètres d'un cycle de test

Les paramètres doivent se régler dans l'ordre RSTV, remplissage, stabilisation, test, vidage. Si vous modifiez le temps de remplissage, il vous faudra régler à nouveau le temps de stabilisation.

► 4.1.4.1.1 Temps de remplissage ou de pressurisation

Ce temps doit être suffisamment long pour que la pression dans la pièce atteigne la pression de test et se maintienne sur le manomètre. Un remplissage trop court se caractérise par une chute de pression conséquente dès le début de la stabilisation. Un temps de remplissage trop long conduit à une perte de temps, mais ne nuit pas au test.

Figure 7 : Interface de paramétrage d'un détecteur de fuite air / air

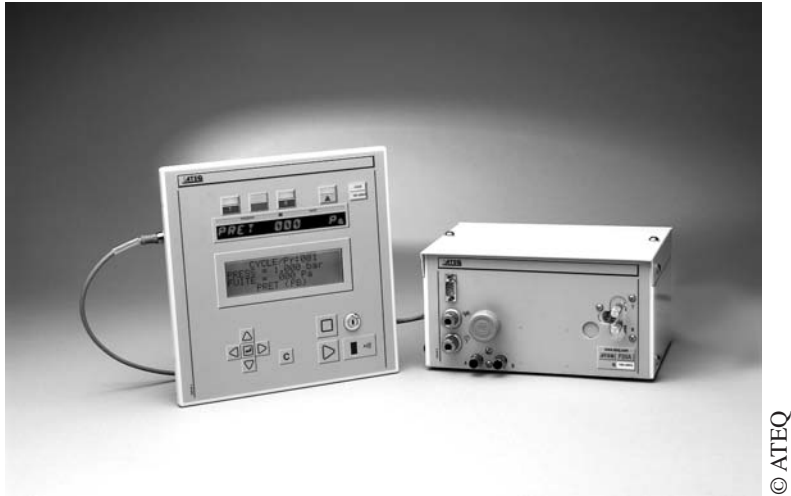
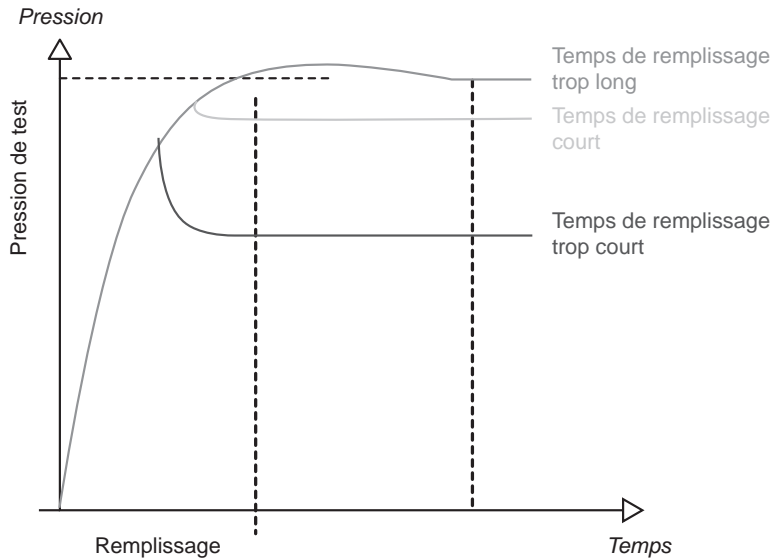


Figure 8 : Comportement de la pression en fonction du temps de remplissage



► 4.1.4.1.2 Temps de stabilisation

Le temps de stabilisation est propre à chaque type de pièce. Il se mesure comme cela :

- paramétrez un cycle de test avec des temps de remplissage, test et vidage suffisants pour que le cycle se déroule normalement ;

- réglez le temps de stabilisation exagérément long. Par exemple, si vous l'estimez à 30 secondes, mettez 1 minute ;
- lancez un cycle automatique sur une pièce étanche, le résultat doit être proche ou égal à zéro ;
- réduisez votre temps de stabilisation et lancez un cycle. Tant que le résultat n'est pas affecté, continuez à réduire ce temps et à lancer des cycles ;
- quand le résultat de la mesure commence à s'élever et à s'éloigner de zéro, c'est que vous avez atteint la limite d'instabilité ;
- augmentez alors votre temps de stabilisation pour revenir au paramètre précédent. Vérifiez la stabilité de la mesure. Vous venez de mesurer le temps de stabilisation le plus court possible pour votre application.

Attention

Un temps de remplissage long intègre une partie de temps de stabilisation, d'où l'importance de l'ordre de réglage.

► **4.1.4.1.3 Temps de test (mesure)**

C'est le temps pendant lequel la mesure de variation de pression va être effectuée. Le cas le plus courant est celui du calcul d'un différentiel :

$\Delta P = (P_{\text{Finale}} - P_{\text{Initiale}})$. Le résultat de la mesure est donc la différence entre la valeur du signal transmis par le capteur différentiel au début de la mesure, et la valeur de ce même signal à la fin du temps de test. Il s'agit du terme ΔP .

Dans le cas d'une mesure en « chute de pression instantanée », qui se présente sous la forme du $\Delta P/\Delta t$ comme unité de mesure, il faut prendre en compte le résultat en Pa/s qui a été calculé pour la fuite de référence. On utilise souvent sur le terrain la formule suivante :

Formule n° 16

$$\Delta P(\text{Pa/s}) = \frac{\text{Fuite}(\text{cm}^3/\text{min})}{6 \cdot 10^{-4} \times \text{Volume}_{\text{testé}}(\text{cm}^3)}$$

Elle permet de convertir directement une fuite en variation de pression (à T° constante).

Exemple

Volume testé 300 cm³

Fuite maximale admissible : 5 cm³/min

Temps de test : 4 secondes

$$\Delta P(\text{Pa/s}) = \frac{\text{Fuite (cm}^3/\text{min)}}{6 \cdot 10^{-4} \times \text{Volume}_{\text{testé}}(\text{cm}^3)} = \frac{5}{6 \cdot 10^{-4} \times 300} = 27,8 \text{ Pa/s}$$

La pression va varier de 27,8 Pa/s pour une fuite égale au seuil de rejet. Avec un temps de test de 4 secondes, nous allons devoir régler le seuil de rejet sur l'appareil à $4 \times 27,8 = 111 \text{ Pa}$

► 4.1.4.1.4 Temps de vidage

C'est le temps nécessaire et suffisant pour permettre la déconnexion de la pièce sans risque.

Dans les applications à basse pression (< 1 bar), la pièce peut être déconnectée sans dépressurisation préalable.

4.1.4.2 Mesure différentielle avec référence

Ces détecteurs à technologie différentielle sont équipés de deux ports de connexion : Test et Référence.

Comme nous venons de le voir, ces appareils sont symétriques par rapport au capteur différentiel qui est positionné centralement entre les deux circuits. On peut donc indifféremment effectuer le test en connectant la pièce côté test ou côté référence.

On peut faire l'analogie avec une balance à plateaux. La mesure peut s'effectuer sur n'importe lequel des deux plateaux.

Le résultat sera affecté d'un signe + ou – selon le côté où a été détectée la chute de pression. Il n'existe pas de norme pour ce signe. Les fabricants français considèrent qu'une fuite est positive du côté test, le résultat s'affiche alors sans signe (il est donc positif). Une fuite du côté référence sera affectée du signe moins (–). Les fabricants allemands, par exemple, pratiquent l'inverse. Il convient donc de demander, lors de l'acquisition d'un appareil, quel est le principe d'affichage du résultat utilisé. Sur certains équipements, on peut paramétrer le format d'affichage et choisir le signe qu'on veut.

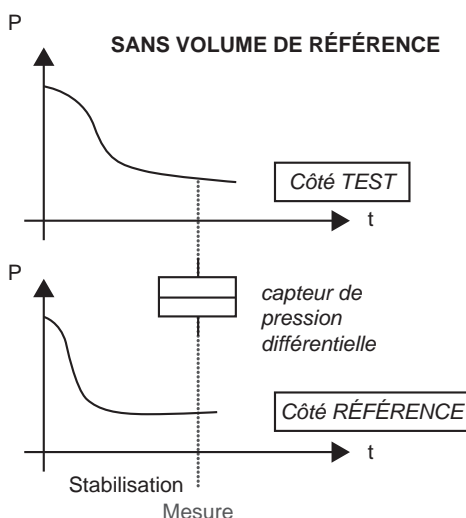
En revanche, la présence d'un port de référence présente aussi d'autres avantages : l'utilisation d'une pièce de référence peut être utile pour réduire le temps de stabilisation.

Rappel

Le capteur différentiel mesure la différence de pression entre le côté test et le côté référence. On constate que plus les deux circuits test et référence sont similaires, plus le temps de stabilisation pourra être court (comportements identiques) et nous permettra de faire la mesure plus rapidement.

Voyons la différence de stabilisation selon que l'on connecte un volume sur le port de référence ou non. Ces essais sont réalisés sur des pièces étanches.

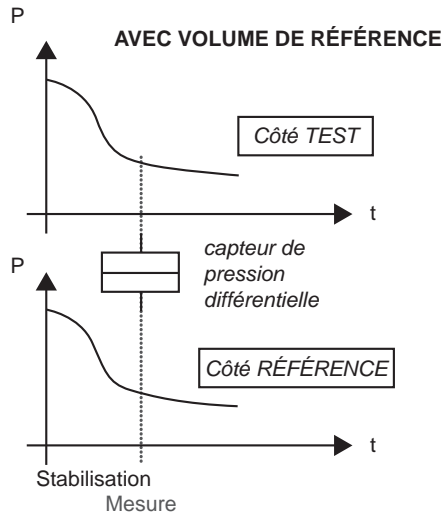
Figure 9 : Stabilisation sans volume de référence



Sur cette figure, on voit que la pression du côté test suit une pente importante alors que côté référence, la pression est stabilisée. En démarrant la mesure trop tôt, on verrait une différence qui pourrait être assimilée (à tort) à une fuite. Il faut donc attendre plus longtemps avant de pouvoir faire une mesure fiable.

Après avoir ajouté au montage une pièce côté référence, on voit que la pression du côté test suit toujours une pente importante, mais identique à celle du côté référence (voir figure 10). Comme on mesure la différence de pression entre les deux ports de connexion de l'appareil, le résultat est nul. La mesure peut être effectuée plus tôt sans commettre d'erreur. Le temps de cycle global est ainsi raccourci.

Figure 10 : Stabilisation avec volume de référence



Le temps de remplissage peut augmenter légèrement à cause du volume testé qui est supérieur, mais cela est négligeable comparé au gain réalisé sur le temps de cycle global.

Figure 11 : Vérification de l'étanchéité des circuits avant remplissage



4.1.4.3 Mesure différentielle sans référence

Peut-on travailler sans référence ?

On peut tout à fait utiliser les appareils différentiels en mettant un bouchon étanche sur le port de référence. Dans ce cas, on gardera en mémoire :

- le temps de cycle n'est pas forcément le plus court (stabilisation) ;
- le volume connecté côté référence doit être suffisamment important pour ne pas être affecté par une fuite, même infime, ou une variation de température ou de volume : minimum une longueur de tuyau, équivalente à celle connectée sur le port de test, par exemple. Ne pas perdre de vue qu'un faible volume est très sensible aux variations de température ou à une fuite même très petite ;
- afin de limiter le temps nécessaire pour le changement de modèle (série), il est courant d'utiliser une seule référence unique pour tous les modèles. Le temps de cycle ne sera pas le plus court, mais on réduit ainsi le temps de changement de série, et on réduit le risque de fuite sur la référence par manipulation pendant la connexion et la déconnexion de celle-ci ;
- malgré ces explications, le gain n'est pas systématique et il est toujours nécessaire de faire des essais avec et sans référence pour savoir quelle est la configuration optimale. Se reporter à la page 46 sur le réglage des paramètres.

4.1.4.4 Mesure différentielle avec « 0 central »

On parle de « 0 central » quand on teste deux pièces en même temps, une de chaque côté du capteur différentiel.

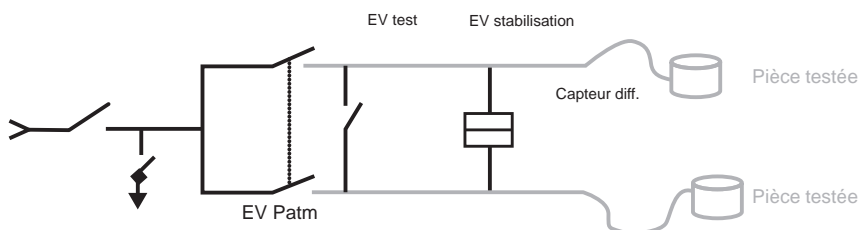
Ce principe peut être adopté dans les cas suivants :

- quand la probabilité d'avoir deux pièces mauvaises en même temps est extrêmement faible ;
- en test intermédiaire : une pièce fuyarde qui passerait serait détectée plus loin dans le processus de fabrication ;
- en isolant en fin de cycle une des deux pièces pour vérifier que les deux n'ont pas le même taux de fuite. En effet, la mesure indique la différence de taux de fuite entre les deux circuits. Si le test en zéro central est OK et que la mesure en isolant une pièce est OK, cela signifie que les deux pièces sont bonnes. Seul le temps de mesure est relancé, c'est donc très peu pénalisant pour le temps de cycle et cela permet de doubler la cadence.

Comment configurer un appareil en zéro central avec un système de vérification de l'une des deux pièces en fin de cycle ?

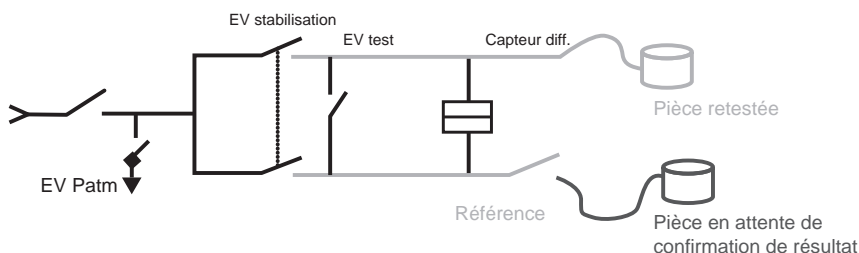
La première étape consiste à pressuriser et tester les deux pièces des côtés test et référence en même temps.

Figure 12 : Principe du test en zéro central



Si le résultat est bon, c'est-à-dire si la variation de pression mesurée par le capteur différentiel est inférieure au seuil de rejet, il faut s'assurer que les deux pièces n'aient pas un niveau de fuite équivalent. En effet dans ce cas, le capteur différentiel ne verrait que la différence, c'est-à-dire zéro !

Figure 13 : Principe du test en zéro central avec double test



En remesurant une des deux pièces, on s'assure que nous ne sommes pas en présence de deux pièces fuyardes simultanément. Si la pièce retestée est étanche, on peut en déduire que l'autre pièce l'est aussi. Seul le temps de mesure est relancé après fermeture de l'électrovanne côté référence, l'allongement du temps de cycle ne remet donc pas en cause le gain engendré par le fait de tester deux pièces à la fois.

4.1.4.5 Mesure indirecte

Dans certains cas, il est difficile de mesurer la variation de pression sur le circuit de pressurisation lui-même. On peut alors mesurer l'effet d'une fuite éventuelle sur l'environnement de la pièce (chambre, etc.).

Exemples :

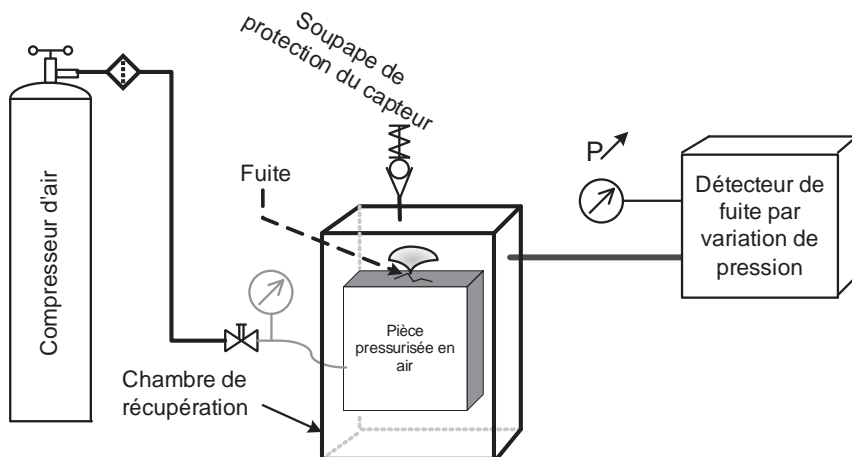
- très haute pression : on peut atteindre ainsi des pressions de test de l'ordre de 200 bars avec des appareils standards ;
- forme particulière de la pièce, grandes dimensions mais petite surface testée ;
- il est possible d'augmenter la sensibilité en réduisant le volume concerné par le changement de pression.

En récupération, la mesure peut être différentielle ou absolue.

En cas de fuite sur l'objet testé, la pression augmente sous la cloche ou dans la chambre de récupération. Cette variation de pression est mesurée par le capteur, relatif ou différentiel selon la sensibilité requise.

Dans cette configuration, le circuit de pressurisation et le circuit de mesure sont disjoints.

Figure 14 : Principe du mesure indirecte ou « en récupération »



Attention

Si la pression de test peut être dangereuse pour le capteur, il faut prévoir une soupape de décharge sur la cloche qui s'ouvrira en cas de montée excessive de la pression.

4.1.4.6 Composants scellés

Pour tester des pièces qui ont un volume interne non négligeable et qu'on ne peut pas connecter, on a une méthode :

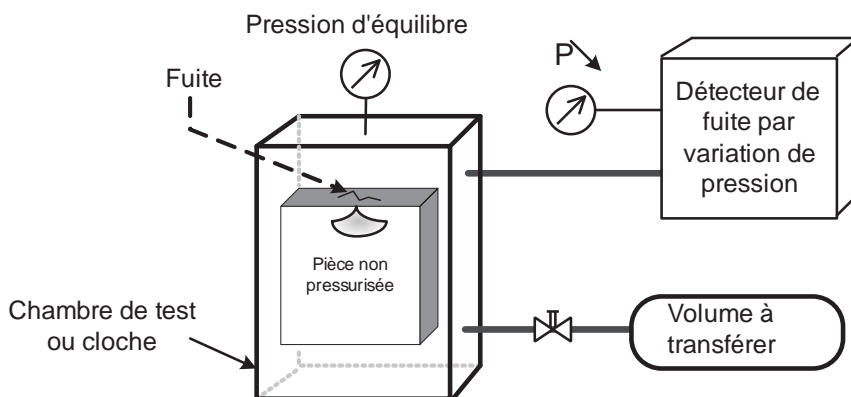
- la pièce est placée sous une cloche ;
- on applique dans la cloche une pression que l'on mesure ;
- si celle-ci baisse, cela signifie que l'air entre dans la pièce ;
- dans le cas d'un test sous vide, la pression augmente en cas de fuite.

Afin de détecter les très grosses fuites, comme l'absence de la vitre d'une montre par exemple, on transfère un volume de gaz sous pression ($P \times V$) sous la cloche. La pression d'arrivée dépend du volume mort sous la cloche selon cette relation :

$$P_{\text{finale}} \times V_{\text{finale}} = P_t V_t \text{ (volume à transférer)} + P_c V_c \text{ (volume mort de la cloche à pression atmosphérique)}$$

Cette relation est vraie après équilibrage thermique pour ne pas avoir d'influence de la température.

Figure 15 : Principe de mesure des composants scellés



Une très grosse fuite, ou l'absence de composant, peut ainsi être détectée avant de commencer la mesure de variation de pression.

Exemple d'application

Test de montre étanche. Si une montre arrive sans verre, le transfert du volume sous pression aboutira à une pression trop basse. La pièce sera rejetée pour grosse fuite.

Si elle est correctement assemblée et complète, les fines fuites pourront être détectées par un capteur différentiel mesurant la chute de pression éventuelle.

4.1.4.7 Calibrage – Étalonnage

Le détecteur de fuite par variation de pression est aussi un instrument de mesure et il faut vérifier périodiquement que les valeurs mesurées sont justes, spécialement celles qui se trouvent au voisinage du seuil de refus car c'est là que l'imprécision engendre un risque d'erreur.

Une fuite calibrée est le meilleur moyen d'effectuer cette vérification. Choisissez un débit le plus proche possible de votre seuil de refus, et effectuez une mesure sur une pièce étalon que vous savez étanche. La valeur indiquée par l'appareil doit toujours être la même. Si celle-ci se met à s'écarter de la valeur normale, l'appareil peut être envoyé en révision avant d'avoir trompé votre vigilance.

La fréquence de vérification de calibrage dépend essentiellement de la cadence de production. Dès qu'on s'aperçoit d'une dérive conséquente de la précision, on peut être amené à rappeler des produits testés depuis la dernière vérification. Le nombre de produits à rappeler et leur position dans la chaîne logistique sont les paramètres à prendre en compte. Par exemple, une vérification de calibrage à chaque début d'équipe assure huit heures de contrôle fiables. Si les pièces produites n'ont pas quitté l'usine au bout de huit heures, un nouveau contrôle en cas de défaillance reste possible.

La plupart des appareils permettent une utilisation simple grâce à un connecteur auto-obturant en façade. Il suffit alors de connecter la fuite calibrée sur ce port relié au circuit de mesure et de lancer un cycle sur une pièce étalon pour vérifier le résultat de mesure et la corriger si nécessaire. Cette séquence peut être automatisée dans certains cas.

Figure 16 : Appareil en cours de calibrage avec une fuite calibrée ajustable (calibrateur de fuite)



4.2 Débitmétrie

L'idée de départ est de mesurer directement le débit de fuite. Il existe de nombreuses manières de mesurer un débit. En détection de fuite, on ne retiendra que celles qui s'appliquent aux gaz et qui ont une précision suffisante pour mettre en évidence les fuites recherchées.

Pour ne citer que les techniques les plus courantes : turbine, Vortex, ultrasons (transit et non Doppler), à force de Coriolis, et enfin thermique. Les débitmètres utilisés en détection de fuite sont du type « thermique ». C'est donc celui dont nous parlerons dans cet ouvrage.

4.2.1 Le débitmètre thermique

Le principe de la débitmétrie massique utilisé en détection de fuite est le suivant : la pièce testée est pressurisée à une pression de test P_{test} . En l'absence de fuite, lorsque la pression s'établit, la mesure du débit se réduit jusqu'à devenir nulle. Si un débit persiste, c'est qu'il est généré par un ou plusieurs défauts d'enveloppe.

Il existe deux types d'appareils :

- n° 1 : le montage pneumatique est identique à celui d'un détecteur de fuite par variation de pression différentielle ;
- n° 2 : la partie référence est un réservoir qui n'est pas dépressurisé entre chaque cycle.

Dans la pratique, on s'affranchit de la stabilité du régulateur de pression en mettant, en relation avec la pièce testée, un réservoir tampon pressurisé à la même pression. Le capteur placé entre la pièce et le réservoir est ce débitmètre massique. Son appellation anglaise *mass flow* est également très répandue.

4.2.2 Principe du capteur

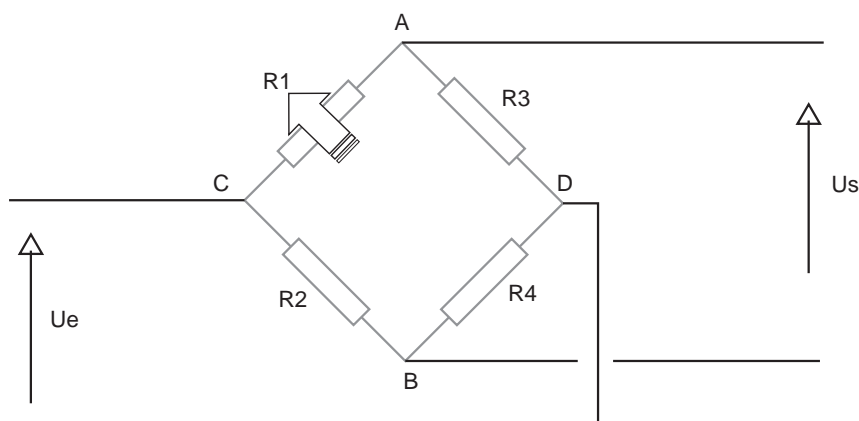
Il est constitué d'un pont de Wheatstone composé de 4 éléments sensibles à la température.

Lorsque la température d'un élément change, sa résistance change également et déséquilibre le pont. On peut en extraire une tension représentative de ce déséquilibre. Or, la température des éléments est le résultat de l'alimentation électrique du montage (U_e), stable, et de l'échange thermique, variable en fonction du débit.

R1 est une résistance sensible à son environnement : sa température dépend de ses échanges thermiques avec le gaz qui passe. Le pont devient alors un capteur qui donne une tension variable en sortie (U_S), fonction d'une donnée environnementale qui influe sur R1, le débit.

Un capteur de ce type est donc étalonné pour un gaz ou un mélange précis. En effet, si la nature du gaz change, l'échange thermique variera aussi. Il est question ici de ne mesurer que le débit, la nature du gaz ne doit donc pas changer.

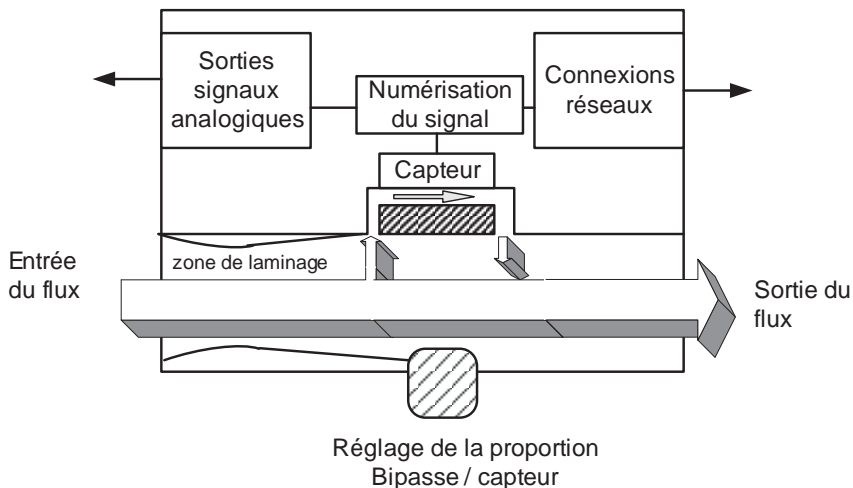
Figure 17 : Pont de Wheatstone



Le principe inverse d'un débit fixe avec nature du gaz variable sera utilisé dans un autre type de détecteur : le détecteur de fuite à conductivité thermique, voir paragraphe 5.3.1, p. 105.

Ces capteurs sont souples d'utilisation car la gamme de mesure peut être ajustée. En effet, seule une partie dérivée du flux est mesurée. En changeant la proportion du débit mesuré par rapport au débit qui passe tout droit, on change la gamme de mesure.

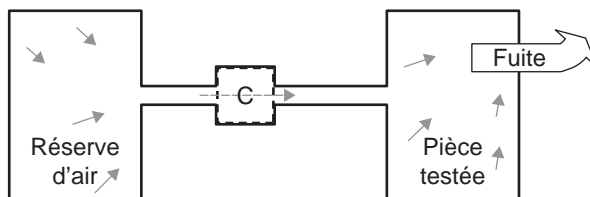
L'échange thermique avec la résistance R1 dépend du débit-masse qui passe, c'est comme cela qu'on mesure le débit massique. Les appareils affinent ensuite la correction en pression et température et fournissent ainsi un résultat de grande précision. Attention toutefois, si le capteur n'est pas intrinsèquement sensible aux variations de température et de pression, la pièce testée l'est toujours. Les conditions de test doivent donc être soignées comme pour un test en variation de pression.

Figure 18 : Mesure du débit en dérivation du flux principal

4.2.3 Principe de détection

C'est le principe des vases communicants. Une réserve d'air est mise sous pression en même temps que la pièce. La pression est donc la même dans tout le circuit. Ainsi, après la stabilisation thermique, seules les fuites engendrent un débit.

La mesure se fait par le passage du flux dans un capteur de débit massique « C » tel que nous venons de le voir.

Figures 19 : Principe de détection de fuite par débitmètre massique

Quand la pression de test est atteinte, l'alimentation en air est coupée. Le réservoir de référence est conçu pour être étanche. Une fuite sur la pièce testée créera un débit entre le réservoir et cette pièce. C'est ce débit qui est mesuré.

4.2.4 Correction de la lecture

Attention, la mesure ne prend en compte qu'une partie du débit. Chacun des deux volumes contribue à équilibrer les pressions de chaque côté, en alimentant le débit de fuite, mais on ne mesure que le flux venant du volume de référence. Pour obtenir la valeur exacte totale, il faut corriger la valeur lue en tenant compte des proportions des volumes mis en œuvre par rapport au volume total du circuit de mesure.

On utilise la formule suivante :

$$Q_r = Q_{\text{mes}} \times \frac{V_1 + V_2}{V_1} \text{ (Formule n° 17)}$$

Avec :

V1	volume du réservoir de référence
V2	volume testé (pièce + raccordement)
Q _r	débit réel
Q _{mes}	débit mesuré

Cette mesure se fait par le passage du flux dans le capteur de débit.

La mesure de débit constitue une alternative air/air aux tests par variation de pression. Elle se différencie notamment sur ces points :

- la mesure de flux est instantanée et ne nécessite pas de Δt précis ;
- la mesure représente le taux de fuite exprimé en unité de débit. La lecture par visualisation du résultat semble directe, mais nécessite néanmoins une correction ;
- il est possible de visualiser l'établissement ou la disparition d'un débit (comportement de la pièce par exemple) ce qui facilite l'analyse lors de la mise au point sur de nouvelles applications.

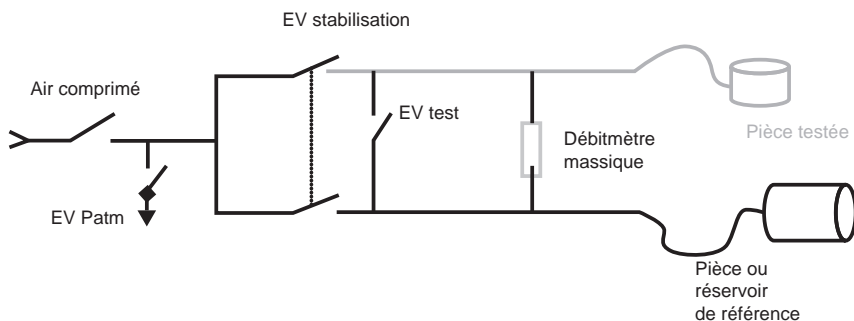
C'est une technique globale qui donne le taux de fuite total de l'enveloppe testée. Sur le terrain, c'est souvent l'anglicisme *mass flow* qui est utilisé pour nommer cette méthode de test.

4.2.5 Le détecteur de fuite débitmètre massique

Deux montages coexistent aujourd'hui sur le marché. Le premier reprend le même schéma pneumatique que celui du détecteur par variation différentielle de pression (technologie principalement américaine). Le capteur de pression différentielle est remplacé par un débit-

mètre et la pièce côté référence, éventuellement, par un réservoir étanche.

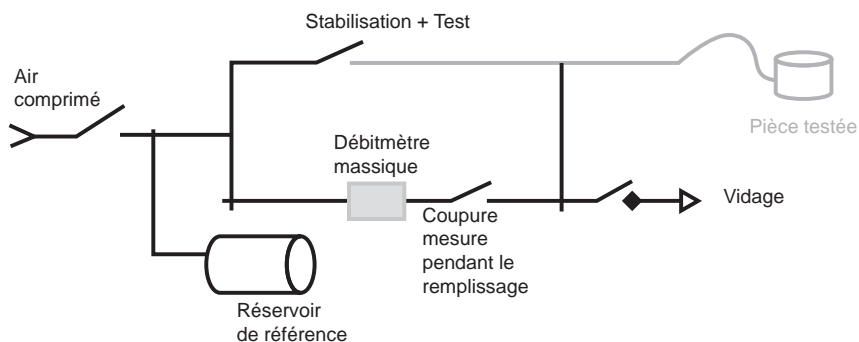
Figure 20 : Schéma pneumatique d'un détecteur *mass flow* à l'américaine



Dans ce cas, le réservoir, ou volume de référence, est vidé à chaque cycle.

En Europe, on privilégie un second montage avec réservoir de référence en amont de la mesure. Une fois rempli à la pression de test lors des premiers cycles, ce volume reste sous pression, ce qui constitue un gain de temps de cycle car seule la pièce à tester est pressurisée.

Figure 21 : Schéma pneumatique d'un détecteur *mass flow* à l'européenne



Dans les deux cas, en cas de fuite sur la pièce testée, le réservoir de référence alimente une partie du débit au travers du capteur qui indiquera alors une valeur de fuite, inférieure à la valeur réelle. Nous avons vu que cette valeur lue doit être corrigée pour connaître le taux de fuite total (voir p. 60). En effet, le volume constitué par la pièce testée contribue aussi à alimenter le débit de fuite, mais sans passer par le système de mesure.

Il est conseillé d'avoir un réservoir de référence plus grand que le volume testé pour obtenir une mesure de qualité avec un coefficient de correction compris entre 0,5 et 1.

Pour retenir l'influence du volume de référence par rapport au volume testé, deux règles simples peuvent nous aider :

- Si les deux volumes sont identiques, la mesure correspondra à la moitié du flux réel : il faudra multiplier le résultat par 2 pour avoir le taux de fuite réel.
- Pour obtenir une lecture directe de 100 % de la valeur de fuite, il faut que le volume de référence soit très grand comparé à celui testé. Mathématiquement, la valeur de ce volume tend vers l'infini.

Enchaînement des phases du cycle de test avec réservoir de référence (type n° 2) :

1. pressurisation de la pièce à tester : l'air comprimé est envoyé dans la pièce à tester sans passer par le débitmètre (bipasse) ;
2. fin de remplissage : l'arrivée d'air comprimé et le bipasse sont fermés. Le capteur est connecté en série entre le réservoir et la pièce testée ;
3. stabilisation : naissance d'un débit d'équilibrage non représentatif du niveau d'étanchéité de la pièce ;
4. mesure du débit : le débit mesuré par le débitmètre massique correspond au niveau de fuite de la pièce testée, au ratio des volumes près ;
5. cette valeur est comparée au seuil de rejet et permet de déclarer la pièce bonne ou mauvaise.

Généralement, les phases de stabilisation et de test peuvent être visualisées graphiquement sur l'écran de l'appareil, ce qui facilite un ajustage optimisé des paramètres.

Les fabricants annoncent des performances supérieures avec cette méthode comparée à la variation de pression. Il faut prendre ces arguments avec prudence et leur préférer un essai réel. Comme il s'agit dans les deux cas de méthodes « air dans air », la mise en œuvre de cet essai est généralement moins contraignante que pour des méthodes par gaz traceur.

Le principe utilisé par les méthodes appelées « par gaz traceur » est le suivant : la pièce à contrôler est pressurisée avec un gaz dont on pourra bien détecter la présence à l'extérieur de la pièce ou, à l'inverse, en aspergeant la pièce tout en effectuant une détection à l'intérieur. On choisit en principe comme traceur un gaz rare ou absent dans l'air ; sans quoi, il y aurait un bruit de fond élevé nuisant à la sensibilité de la mesure.

Ces contrôles peuvent être amenés à utiliser le vide quand le moyen de mesure l'exige, comme pour la spectrométrie de masse hélium, par exemple. On parlera de « pollution » en cas de grosse fuite de gaz traceur dans l'environnement de travail. Toute nouvelle mesure devient alors difficile, voire impossible. Ces méthodes sont « locales » ou « globales » selon leur mise en œuvre.

Quel gaz traceur choisir ? Trois raisons dominent pour guider le choix du gaz à détecter :

- La pièce est remplie avec le gaz prévu pour son utilisation finale. C'est le cas des réfrigérateurs remplis de fréon en fin de fabrication, ou des disjoncteurs remplis au SF₆, pour ne citer que deux exemples.
- La pièce ne contient rien à ce stade de fabrication. On choisira un gaz traceur connu et facile à utiliser comme l'hélium ou un mélange contenant de l'hydrogène. Il faut alors calculer la correspondance entre le gaz traceur et le fluide final prévu pour évaluer le seuil de rejet.
- Certains gaz sont interdits dans le « process » en question. Il faut alors choisir un gaz traceur dans la liste des gaz compatibles pour cette situation et facilement détectable.

Qu'est-ce que la sélectivité du capteur ?

Un capteur est dit sélectif quand il ne détecte qu'un seul gaz. Beaucoup de capteurs sont sensibles à des familles de gaz. La mesure peut donc être faussée par la présence volontaire ou non d'un autre gaz sur la zone de travail (vapeurs de solvants, fuites sur un système de stockage, etc.). Une bonne sélectivité réduit l'influence de l'environnement sur la qualité du test et elle est donc un gage de fiabilité.

5.1 Gaz traceur hydrogène

La détection d'hydrogène peut se faire de deux manières différentes :

- par spectrométrie de masse : il s'agit du même procédé et des mêmes appareils que pour détecter l'hélium (voir p. 77) ;
- par microcapteur : technologie des couches minces. C'est l'objet de ce chapitre.

Figure 1 : Détecteur d'hydrogène portable



© Adixen

5.1.1 La détection de fuite par gaz traceur hydrogène

C'est une méthode par gaz traceur développée au départ pour le contrôle des câbles de télécommunication enfouis dans le sol. En effet, certains câbles souterrains sont pressurisés avec de l'air provenant de sous-stations d'alimentation. En cas d'avarie souterraine (effondrement, etc.) le câble est endommagé et la difficulté réside dans la localisation de l'incident pour procéder à la réparation après excavation. Grâce à une injection dans le câble d'un mélange gazeux contenant de l'hydrogène, on va pouvoir localiser l'avarie depuis la surface du sol par la présence de ce gaz traceur qui arrive à remonter à la surface, et ainsi creuser au bon endroit.

Ces détecteurs sont donc plutôt « tout terrain », avec des sondes pouvant piquer le sol, suivre un câble aérien sur une roulette au bout d'une

perche, ou encore être introduites dans un conduit souterrain au bout d'une fibre de verre déroulée, le tout relié à un détecteur portatif fonctionnant sur batterie autonome.

Son adaptation au monde industriel n'a donc pas posé de problèmes majeurs, seules les fonctions de quantification de la fuite et de calibrage de l'appareil ont été ajoutées pour satisfaire aux nouvelles contraintes.

5.1.2 Le gaz hydrogène

L'hydrogène est le gaz le plus léger, mais ce n'est pas un gros avantage en soi pour le sujet qui nous concerne. Sa viscosité est faible et facilite le passage du gaz au travers des fuites. Comme on l'utilise le plus souvent très dilué pour des raisons de sécurité, la viscosité du mélange reste voisine de celle de l'air.

L'hydrogène n'est pas toxique et peut même être introduit dans des emballages alimentaires. Il respecte totalement l'environnement. Son utilisation ne souffre donc d'aucune restriction de ce côté-là. Sa rareté dans l'air (0,5 PPM) répond au cahier des charges pour l'utilisation d'un traceur. Le bruit de fond de toute mesure effectuée à pression atmosphérique sera très bas, permettant ainsi de trouver même les fuites très fines.

Mais son principal atout est son prix. L'hydrogène peut se produire, à la différence de l'hélium, par exemple, qui est extrait de gisements naturels de gaz et dont les sources ne sont pas sans limites. C'est un gaz traceur qui pourrait remplacer l'hélium si les capteurs utilisés pouvaient fonctionner sous vide, ce qui n'est pas encore le cas. Cette méthode reste donc pour le moment utilisée à la pression atmosphérique diminuant ainsi le nombre d'applications possibles en test global à des cadences industrielles.

5.1.2.1 Utilisation d'un mélange

La capacité qu'a l'hydrogène à s'enflammer rapidement nous oblige, dans la plupart des cas, à l'utiliser dilué. Il existe déjà dans le commerce des mélanges contenant de l'hydrogène, qui sont utilisés en soudage. La solution la plus économique consiste donc à utiliser ces mélanges courants à faibles coûts comparés à une recette qui serait fabriquée sur commande.

Les plus courants sont ceux à base d'azote contenant un taux d'hydrogène de 2 à 5 %. En dessous de 5,7 % d'hydrogène dans l'azote,

le mélange est réputé ininflammable si on se réfère aux fiches de sécurité et aux normes le concernant. La limite d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air se situe autour de 4 %. Un mélange inférieur à 5,7 % ne permet pas, en théorie, d'atteindre cette limite inférieure d'inflammabilité, même dans un cas de grosse fuite.

Mais les bouteilles contenant un mélange avec 5 % d'hydrogène dans de l'azote sont souvent estampillées d'une étiquette rouge « mélange inflammable », et équipées d'un raccord type « E » avec pas à gauche réservé aux gaz combustibles. Même si on sait que le contenu de la bouteille est ininflammable, cela laisse la porte ouverte à l'erreur humaine car le raccord avec pas à gauche permet de connecter des contenants de gaz inflammables et l'accident est alors possible. Les raccords de gaz ininflammables sont de type « C » en France.

5.1.2.2 Limite inflammabilité

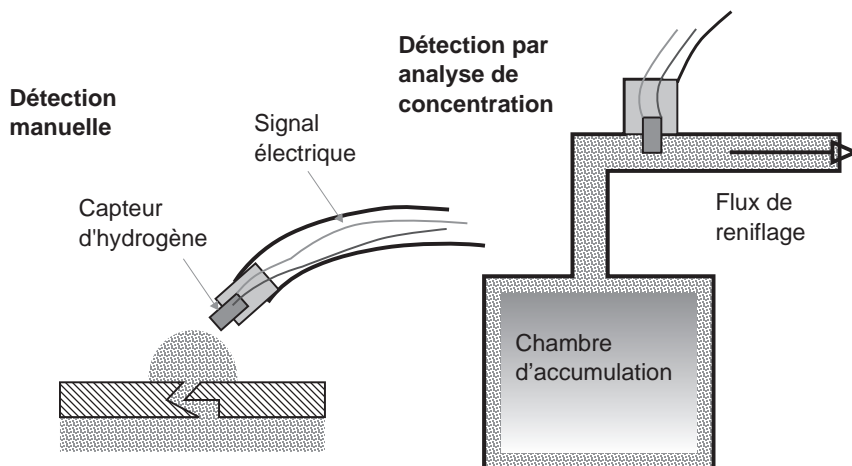
La limite inférieure d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air est de 4 %. Si la concentration s'élève au-dessus de ce seuil, le mélange peut s'enflammer.

5.1.3 Le capteur, les sondes, le calibrage

Le détecteur de fuite hydrogène est basé sur un capteur spécifique réagissant à la présence d'hydrogène.

Le capteur est issu des nanotechnologies. Il est de très petite taille ($< 1 \text{ mm}^2$) et il est chauffé à plus de 200 °C. Cela provoque une réaction entre les molécules d'hydrogène et le matériau qui compose la partie sensible. Cette réaction génère un micro courant immédiatement amplifié par les amplificateurs opérationnels intégrés. Tout ce petit monde est situé directement à l'endroit de la mesure (au bout de la sonde à main ou dans le flux analysé). Le signal ainsi constitué est transmis à l'appareil par un câble, ce qui rend négligeable le temps de réponse entre le capteur et le boîtier de traitement et d'affichage.

Le capteur n'est pas entièrement sélectif, mais les interactions avec d'autres gaz sont rares et minimales et ne présentent donc pas un grand danger pour la fiabilité de la mesure.

Figure 2 : Mesure par reniflage ou par accumulation

La grandeur mesurée est la concentration en hydrogène. La sensibilité de ce type de capteur est de l'ordre de la partie par million (PPM). Pour quantifier une fuite il sera donc nécessaire d'établir une conversion entre le débit de fuite et la concentration mesurée.

Attention, ces capteurs fonctionnent en mesure différentielle. Ils réagissent à une variation de concentration par rapport au bruit de fond pour lequel on effectue un auto-zéro permanent. Les détecteurs de fuite hydrogène ne permettent pas une mesure en continu comme les spectromètres de masse. La mesure s'effectue toujours sur un temps limité, de l'ordre de quelques secondes dans la plupart des cas. Ensuite il faut exposer à nouveau le capteur à l'air ambiant pour qu'il reprenne sa mesure de référence.

Le bruit de fond naturel, c'est-à-dire la concentration naturelle en hydrogène de l'air, étant de 0,5 PPM, une bonne détection se fera autour de 5 PPM. Cela nous donne un rapport signal sur bruit de 10, ce qui est généralement la valeur minimale retenue (voir p. 4).

Les modèles les plus élaborés, et donc les plus chers, peuvent être intégrés dans des systèmes automatiques car ils sont pourvus des interfaces nécessaires. Ils donnent une valeur de concentration en hydrogène qui peut être convertie en valeur de fuite *via* un processus de calibrage, le plus souvent effectué par comparaison à un étalon (fuite calibrée ou gaz étalon).

Les modèles plus économiques n'indiquent qu'une élévation de la concentration par rapport au bruit de fond naturel sur une échelle, sans

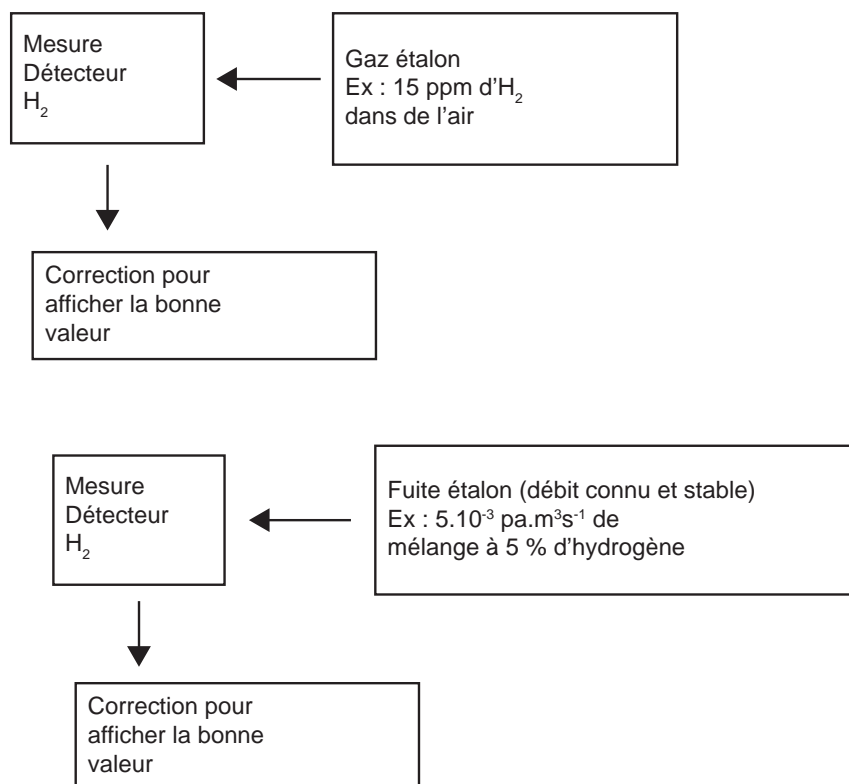
unité. Ils sont dédiés à la localisation, non à la mesure du taux de fuite. L'affichage se présente la plupart du temps sous la forme d'une rangée de diode qui s'allument au fur et à mesure de la montée du signal, donc de la concentration en hydrogène détectée. À l'endroit où la concentration est maximale se trouve la fuite.

5.1.3.1 Système de prélèvement

Le capteur est le même que celui présent dans une sonde à main, mais intégré pour un test en automatique (prélèvement après accumulation dans un volume). Il est installé dans un système qui permet de le mettre en présence d'un flux calibré, et donc de faire aussi une analyse précise.

5.1.3.2 Calibrage

Le calibrage d'un détecteur hydrogène peut se faire de deux manières différentes :



- Par gaz étalon : un mélange contenant une teneur en hydrogène certifiée est présentée à la sonde ou injectée dans le circuit de mesure. Par exemple, pour de l'air synthétique contenant 15 PPM (d'hydrogène), le détecteur doit indiquer 15 PPM. Si ce n'est pas le cas, un coefficient de correction (ou de calibration) sera appliqué pour que le résultat affiché corresponde à la valeur de l'étalon. Cela permet, entre autres, d'améliorer la fiabilité des mesures en reniflage. Attention, ces gaz étalons ont une durée de vie limitée, supérieure à 2 ans dans le cas du mélange air/hydrogène.
- Par comparaison à un étalon : une fuite calibrée, dont le débit est parfaitement connu, est présentée en face de la sonde. Un support est généralement utilisé pour rendre le positionnement de la sonde par rapport à la fuite calibrée parfaitement répétable et pour assurer une diffusion stable du débit de fuite. Le détecteur va mesurer une concentration en hydrogène qui est le résultat du débit. On utilisera alors un facteur de conversion pour afficher directement la valeur en débit (en $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ par exemple). Dans le cas d'un système automatique à analyse, le flux de fuite est injecté dans le flux analysé, c'est-à-dire dans le circuit où se trouve le capteur.

5.1.4 La méthode de test

La méthode hydrogène est surtout utilisée de manière locale soit pour situer les fuites, soit pour contrôler des zones bien définies (connexions, vannes sur un circuit, etc.). Avec une plus petite fuite détectable annoncée à partir de 5×10^{-7} mbar.l/s la méthode semble tout à fait comparable au test hélium en reniflage avec une sensibilité relativement bonne.

L'autre caractéristique appréciée de ce type de mélange est qu'il n'adhère pas aux surfaces comme l'hélium. En cas de grosse fuite, le signal disparaît rapidement pour deux raisons :

- non-adhérence du gaz sur les surfaces touchées ;
- pas d'aspiration du flux dans le détecteur.

D'autre part, le détecteur d'hydrogène est moins encombrant et plus léger qu'un détecteur d'hélium. Sa maintenance est réduite, seul le capteur a besoin d'être changé, mais sa durée de vie est généralement de plusieurs années car il est protégé par un filtre. Dans le cas des sondes à main sans flux d'aspiration, son encrassement est faible.

Dans les systèmes avec prélèvement, ce filtre reste accessible et peu coûteux, sa fréquence de remplacement dépend de la propreté du gaz aspiré, donc généralement de l'environnement de travail. Cette méthode peut également être utilisée en test global par accumulation dans une chambre qui reste à pression atmosphérique. Un temps d'attente étant toujours inévitable pour atteindre au moins les 5 PPM de concentration d'hydrogène, ce type de test est rarement retenu en industrie pour des raisons de cadences.

Le ressuage est aussi possible, mais il est peu pratiqué car le capteur ne supporte qu'une faible valeur de vide (proche de la pression atmosphérique), ce qui ne le rend pas très efficace. On note quelques applications sur le test de médicaments sous blister.

5.1.4.1 Reniflage pour localisation de fuite

Un opérateur déplace la sonde le long du parcours à inspecter. En cas de détection de concentration en hydrogène élevée, le détecteur donne un signal qui peut être visuel ou sonore (ou les deux).

La vitesse de déplacement doit être maîtrisée. Si elle est trop élevée, on peut manquer des fuites. Comme pour l'hélium en reniflage, la vitesse conseillée est de l'ordre du centimètre par seconde.

Figure 3 : Vitesse de déplacement d'une sonde à main



5.1.4.2 Contrôle de réseau hydraulique

Il s'agit de contrôle pour les piscines, les canalisations enterrées et les réseaux de chauffage dans le sol. Le circuit est pressurisé avec un mélange inerte H₂/N₂.

Comme l'hydrogène traverse le sol, en suivant le parcours des canalisations, on trouvera la fuite en détectant l'augmentation de la concentration en hydrogène à proximité du défaut d'étanchéité. On peut ainsi savoir à quel endroit creuser pour réparer une fuite sur un réseau enterré ou non.

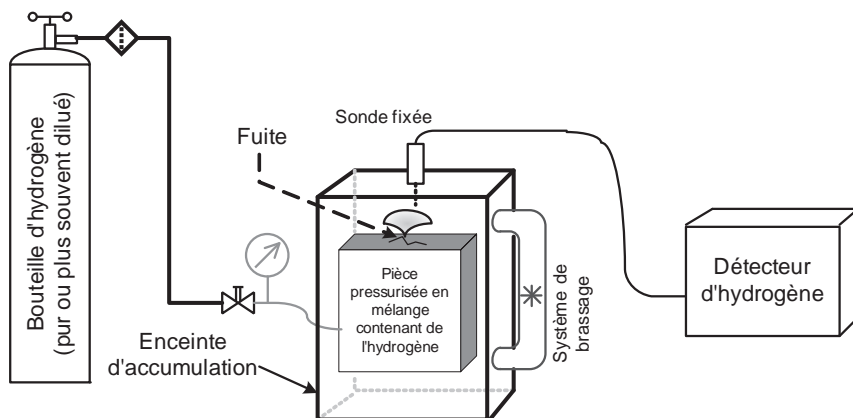
Figure 4 : Localisation de fuites sur réseaux enterrés



5.1.4.3 Reniflage par accumulation : test intégral

La pièce à tester est pressurisée en mélange traceur et couverte par un caisson qui constitue la chambre d'accumulation.

Figure 5 : Contrôle d'étanchéité par accumulation sous cloche



Pour calculer le temps nécessaire pour atteindre au moins 5 PPM (temps d'accumulation), on prend en compte le débit de référence converti pour le mélange utilisé et l'on tient compte du volume mort compris entre la pièce et la cloche (aussi appelée chambre).

Comme il n'y a pas de différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la cloche, celle-ci sera de fabrication simple et peu coûteuse ; un simple capot en somme. Pour assurer une mesure fiable de la fuite sur la pièce, il est conseillé de brasser l'air sous le capot pour homogénéiser le mélange air/hydrogène créé par les fuites éventuelles. Le brassage est une fonction à prendre très au sérieux si on veut que la mesure d'une même valeur de fuite soit répétable quelle que soit sa position sous la cloche. Il faut un débit important pour assurer un balayage de tout le pourtour de la pièce en cours de test, et tendre vers une homogénéisation de cette atmosphère.

En cas de fuite, la concentration d'hydrogène augmente. On peut donc connaître la valeur de fuite (Q) en mesurant la concentration d'hydrogène dans la chambre.

Voici une formule pratique qui donne la concentration en hydrogène en fonction du temps d'accumulation pour un volume et une fuite donnés :

$$P_{H_2}(t) = C_{\text{traceur}} \times \frac{\Phi_{\text{fuite}}}{\text{Vol}_{\text{chambre}}} \times t_{\text{acc}} \quad (\text{Formule n}^\circ 18)$$

Avec :

$P_{H_2}(t)$	pression partielle d'hydrogène au bout du temps t en Pa
Φ_{fuite}	débit d'hydrogène en $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (valeur totale de la fuite)
t	durée d'accumulation en secondes
$\text{Vol}_{\text{chambre}}$	volume d'accumulation, c'est-à-dire le volume mort entourant la pièce, en m^3
C_{traceur}	concentration en hydrogène du mélange en pourcentage (à 5 % = 0,05)

La valeur de 5 PPM qui sert de réglage de base correspond à une pression partielle d'hydrogène dans la cloche de 0,5 Pa.

Cette relation est également utilisée sur le terrain avec les unités suivantes :

- C en PPM
- Φ_{fuite} en $\text{atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$
- $\text{Vol}_{\text{chambre}}$ en cm^3
- t en secondes
- P_{H_2} devient $C(t)$, concentration en PPM (50 000 pour un mélange contenant 5 % d'hydrogène)

Temps pour obtenir 5 PPM d'hydrogène avec un mélange contenant 5 % d'H₂

Fuite	En $\text{Pa m}^3/\text{s}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Volumes	En m^3					
1 cm^3	10^{-6}	0 s	0 s	0,1 s	1 s	10 s
10 cm^3	10^{-5}	0 s	0,1 s	1 s	10 s	100 s
100 cm^3	10^{-4}	0,1 s	1 s	10 s	100 s	16 min
1 litre	10^{-3}	1 s	10 s	100 s	16 min	2,8 h
10 litres	10^{-2}	10 s	100 s	16 min	2,8 h	278 h

Exemple de calcul du temps d'accumulation nécessaire

Nous devons détecter une fuite de 72 cm^3/h de mélange hydrogène à 2,5 % dans de l'azote. L'espace entre la chambre et la pièce constitue un volume d'air de 3 litres. Combien de temps devons nous attendre après la pressurisation de la pièce avant de pouvoir faire une mesure fiable ?

Utilisons la formule :

$$P_{H_2}(t) = C_{\text{traceur}} \times \frac{\Phi_{\text{fuite}}}{\text{Vol}_{\text{chambre}}} \times t_{\text{acc}}$$

Avec :

$$C_{\text{traceur}} = 25\,000 \text{ ppm}$$

$$\Phi_{\text{fuite}} = 0,02 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\text{Volume chambre} = 3\,000 \text{ cm}^3$$

$$P_{H_2} = 5 \text{ ppm minimum}$$

$$t_{\text{acc}} = \frac{3\,000}{0,02 \times 25\,000} = 6 \text{ secondes}$$

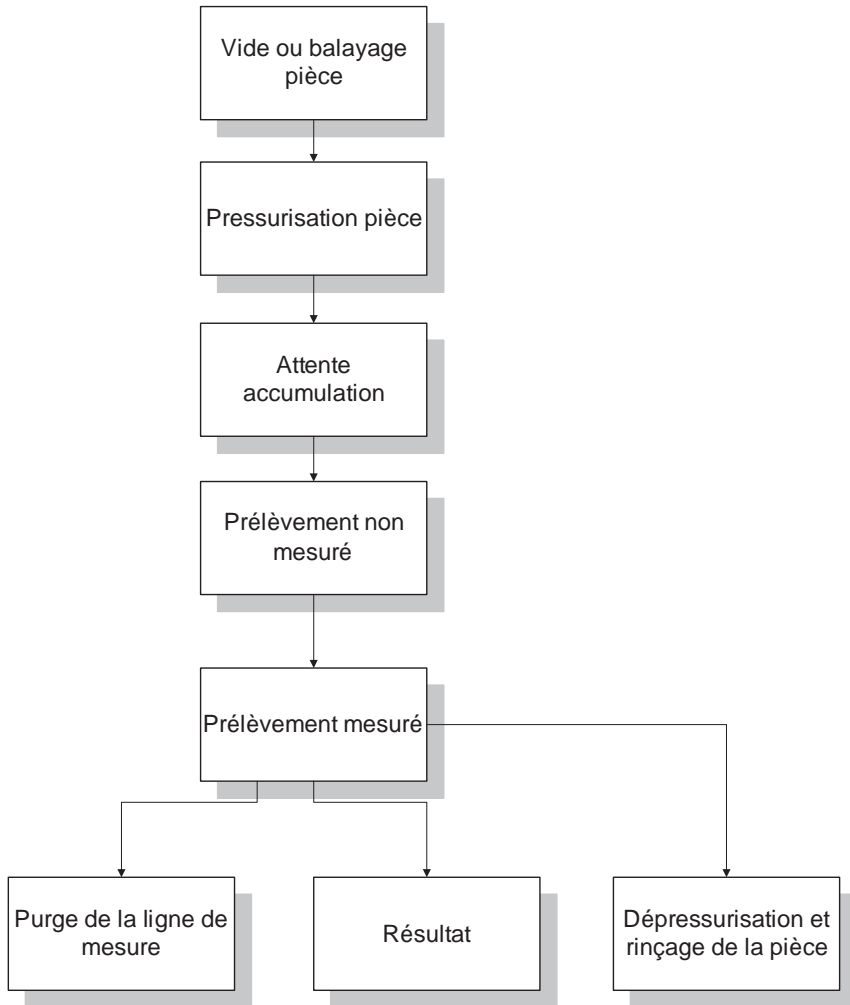
Il faudra attendre au moins 6 secondes après la pressurisation de la pièce pour commencer la mesure de concentration en hydrogène sous la cloche.

Il faudra ajouter à cela les temps de pressurisation, dépressurisation, reniflage sans mesure (purge), etc., pour avoir un temps de cycle complet.

Un cycle de mesure par accumulation sous cloche se déroule comme sur la figure 6.

Détail des opérations :

- balayage de la pièce en gaz traceur ou tirage au vide de la pièce : indispensable pour être sûr de bien remplir la pièce en gaz traceur dans tout son volume interne ;
- temps d'attente (accumulation) : c'est le temps que nous avons calculé précédemment pendant lequel la concentration en hydrogène augmente dans la chambre en cas de fuite ;
- prélèvement sans analyse : un flux est aspiré depuis la cloche vers la sonde, mais celui-ci n'est pas mesuré. En effet ce premier échantillon ne contient que ce qui était présent dans les tuyaux qui assurent la liaison et ne présente aucun intérêt ;
- prélèvement avec analyse : le flux est dévié et passe maintenant devant le capteur d'hydrogène. Si le signal dépasse le seuil de refus, c'est-à-dire si la concentration mesurée dans l'échantillon est supérieure au seuil calculé, la pièce est rejetée ;
- la mesure est terminée. Le capteur est ventilé avec de l'air amené pour qu'il soit prêt à faire une nouvelle mesure sans être influencé par celle qui vient d'être effectuée.

Figure 6 : Cycle de test par accumulation

La qualité du brassage étant très influente sur la répétabilité des mesures, il est parfois difficile de prévoir ce qui va se passer pour le test d'une forme géométrique nouvelle. Une méthode qui a donné des résultats satisfaisants consiste à faire le vide dans la chambre d'accumulation pour favoriser la diffusion du gaz traceur dans tout le volume quel que soit l'endroit où est située la fuite. Ce vide n'est pas forcément poussé et on peut se contenter d'une pression comprise entre 10 et 100 mbar, stable pendant le temps d'accumulation. L'analyse de concentration se fait au refoulement d'une pompe à vide dimensionnée pour l'échan-

tillonnage ($\approx 1 \text{ m}^3/\text{h}$, à piston ou membrane). Mais le fait d'avoir une chambre à vide et des pompes augmente le coût du système qui perd ainsi de son intérêt face à l'hélium sous vide et la spectrométrie de masse.

5.2 Gaz traceur hélium

5.2.1 Les spectromètres

On utilise des spectromètres de masse à déflexion magnétiques ou quadripôles ajustés sur la masse atomique du gaz traceur pour mettre en évidence la présence du gaz traceur hélium issu des fuites.

Le spectromètre de masse sépare tous les composants gazeux présents dans la zone d'analyse. Pour cela il utilise les masses différentes de chaque composant, d'où le terme spectromètre de masse. Une fois séparés, il suffit de mesurer le taux de chaque composant. Dans le cas du détecteur de fuite hélium, une seule masse est mesurée, celle de l'hélium (4). Il existe une option pour des appareils appelés « trois masses » : hydrogène, hélium3, hélium ; mais ces appareils sont rares dans la détection de fuites industrielles ; on les trouve plutôt dans les laboratoires de recherche fondamentale.

En effet, l'hydrogène peut être détecté par un capteur dédié plus simple (voir p. 64). Il existe également des spectromètres de masse ajustés sur d'autres gaz, comme l'argon par exemple, ou sur plusieurs gaz pour suivre notamment des processus de fabrication. Ils ne représentent qu'une part marginale des applications et ne seront pas détaillés dans cet ouvrage.

Les détecteurs de fuite hélium contiennent une cellule d'analyse sous vide. Ils nécessitent donc un niveau de vide dans l'enceinte de test compatible avec la capacité de pompage du détecteur et avec la pression maximale admissible par le détecteur. Ces deux caractéristiques sont données par le constructeur. Pour effectuer un test à pression atmosphérique, le détecteur est modifié pour pouvoir travailler en reniflage. Cette technique est locale ou globale selon sa mise en œuvre.

5.2.2 Détection par spectromètre de masse hélium

Figures 7 et 8 : Détecteurs de fuite hélium



À la différence des spectromètres utilisés dans les laboratoires à des fins d'analyse ou employés dans la surveillance de certains procédés de fabrication, les spectromètres utilisés dans la détection de fuite ne permettent pas une mesure de tous les constituants du mélange gazeux contrôlé. Ils sont dédiés à un seul gaz (nous avons vu la qualité de sélectivité) qui est le traceur qui mettra en évidence la communication au travers d'une paroi par sa présence. Ils ont une grande sensibilité, c'est-à-dire que ces appareils sont capables de détecter une présence infinitésimale du gaz recherché.

La très grande majorité des spectromètres utilisés en détection de fuite sont réglés pour l'hélium. On les appelle alors des « spectromètres hélium » (ou des détecteurs de fuite hélium). On trouve néanmoins des détecteurs capables de détecter d'autres gaz :

- détecteur 3 masses : He, He 3, H₂ ;
- multigaz, xenon, etc.

5.2.2.1 Pourquoi les détecteurs s'appellent-ils spectromètres de masse ?

Pour mesurer le gaz pour lequel un détecteur est conçu, il faut dans un premier temps séparer les constituants. Ensuite on peut plus facilement mesurer celui qui nous intéresse. Nous verrons plus loin que la cellule d'analyse utilise, pour effectuer ce tri, le fait que chaque gaz a une masse molaire différente.

Le plus répandu des gaz traceurs, l'hélium, a une masse molaire de 4. Cela signifie qu'un volume de 22,4 litres (une mole) à 0 °C et à la pression atmosphérique pèse 4 grammes.

Il existe d'autres manières de faire le tri des constituants, citons pour information la spectrométrie optique, temps de vol, spectrophotométrie infrarouge, et bien d'autres.

On peut trouver deux technologies sur le marché :

- à déflexion magnétique ;
- à quadropôle.

C'est le principe utilisé pour diriger les molécules de gaz vers le capteur qui change. Le choix de l'une ou de l'autre technologie est transparent pour l'utilisateur, et n'est donc pas un critère important à notre niveau.

5.2.2.2 Les différents éléments qui composent un détecteur d'hélium

La cellule d'analyse comprend :

- un aimant ;
- un ou deux filaments ;
- une cible ;
- un amplificateur de signal.

Ce sous-ensemble est connecté à une pompe à vide poussé :

- une pompe moléculaire ;
- ou une pompe turbomoléculaire.

Figure 9 : Pompe moléculaire



Cette pompe à vide poussé ne peut fonctionner seule, elle est associée à une pompe de prévidage (ou primaire) :

- une pompe à palettes (le plus courant) ;
- une pompe à membrane ;
- une pompe à vis ;
- une pompe sèche.

Figure 10 : Pompes à palettes



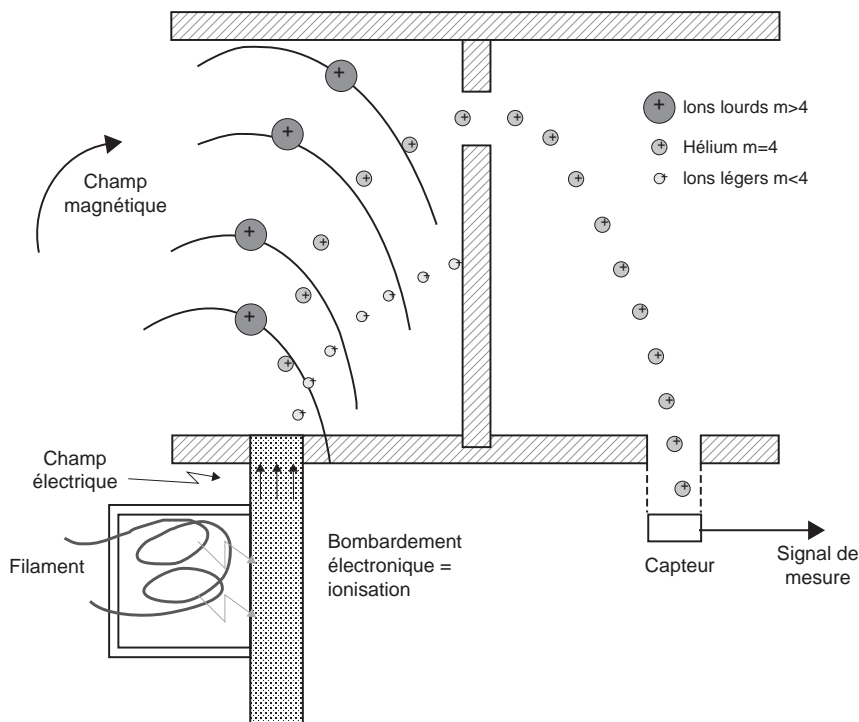
5.2.2.3 Cellule d'analyse : principe

La cellule d'analyse comporte plusieurs étapes que le mélange mesuré va traverser. En vérité, il ne s'agit pas d'un tunnel que les molécules traverseraient pour passer successivement chaque étape, mais plutôt d'un équilibrage des pressions partielles.

La cellule fonctionne sous un vide poussé, $< 10^{-2}$ Pa, c'est-à-dire que le nombre de molécules a été amoindri. Or, sous vide, les molécules de gaz se déplacent en permanence dans toutes les directions, mais avec des comportements majoritaires. De temps en temps elles s'entrechoquent. C'est la notion de libre parcours moyen. Le déplacement des molécules est donc un déplacement statistique. La présence d'un flux dans une direction signifie que la majorité des molécules se déplacent dans cette direction, mais pas toutes.

Les molécules qui généreront le signal que nous mesurons vont donc passer ces étapes dans l'ordre, d'autres feront des allers-retours entre les étapes intermédiaires et nous n'en tiendrons pas compte.

Pour plus d'information sur ces notions, nous vous invitons à lire des ouvrages traitant plus spécifiquement du vide, notamment des notions de libre parcours moyen.

Figure 11 : Principe de séparation des gaz par les masses

► a) Ionisation par bombardement électronique

Pour pouvoir détecter les gaz, et en particulier l'hélium qui est un gaz neutre, il va falloir ioniser l'ensemble, le charger en électricité en quelque sorte, pour récupérer un signal exploitable par le capteur.

C'est le rôle du filament qui est chauffé à blanc, comme celui inventé par Thomas Edison dans l'ampoule d'éclairage à incandescence. Le gaz présent dans la chambre d'ionisation subit alors un bombardement électronique. Ce bombardement a pour effet d'arracher des électrons (charge négative) aux molécules présentes sur sa trajectoire qui deviennent chargées positivement. La quantité d'ions produite est proportionnelle à la pression.

► b) Accélération

Dans la chambre suivante de la cellule, on applique un champ électrique dont le but est d'accélérer linéairement les molécules vers la zone de séparation puis de mesure. Ce champ est donc rectiligne et toutes les

molécules qui entrent dans ce champ électrique prennent une vitesse en direction de l'aimant qui se trouve juste après.

► c) Champ magnétique (aimant)

L'aimant permanent est choisi pour avoir un champ magnétique courbe, généralement à 180° . Le champ magnétique va transmettre à chaque molécule une force de déviation de trajectoire. Pour bien comprendre ce qui se passe, on peut faire l'analogie avec une voiture arrivant trop rapidement dans un virage : sa trajectoire dépend de sa vitesse et de sa masse. Une voiture légère aura plus de facilité à tourner qu'un poids lourd à vitesse égale dans la même courbe (force centrifuge).

Donc les molécules sont sur une ligne droite et arrivent à grande vitesse. Une courbe en U à 180° se présente (champ magnétique). Les molécules subissent une force de déviation qui les entraîne dans la courbe. Les molécules lourdes ont trop d'inertie et ne peuvent pas prendre le virage correctement. Elles entrent en collision avec le châssis de la cellule et rétablissent leur neutralité de tension en reprenant le ou les électrons qu'elles avaient perdus. Les molécules trop légères (essentiellement l'hydrogène) prennent un virage trop serré, percutent elles aussi le châssis et refont à leur tour le plein d'électrons.

La seule masse à suivre la trajectoire correcte est l'hélium. Cela va lui permettre de passer au travers de la fenêtre placée à la sortie de la courbe. En effet, le champ électrique et la géométrie de la cellule sont dimensionnés pour obtenir ce résultat.

► d) Cible (capteur)

La cible est l'endroit où arrivent les ions hélium qui, en reprenant leur électron, créent un signal électrique représentatif du taux d'hélium en présence.

► e) Amplification, utilisation des signaux

Nous sommes donc en mesure de récupérer deux signaux électriques exploitables après amplification :

- l'ensemble des ions hors hélium = signal de masse : ce signal nous permet de connaître la pression totale qui règne dans la cellule ;
- ions hélium : signal hélium = pression partielle d'hélium dans la cellule : c'est la mesure du détecteur.

À retenir

Un spectromètre hélium mesure la pression partielle d'hélium qui règne dans la cellule. C'est le plus sélectif des capteurs du marché car il n'y a pas d'interférence avec les autres gaz.

Nous allons voir maintenant pourquoi la composition chimique de ce qui règne dans cette cellule est à l'image de ce qui est présent à l'entrée du détecteur.

5.2.2.4 Principe de mesure à contre-courant

Nous avons vu que pour pouvoir être connecté au milieu à mesurer (chambre de test par exemple) il faut que le vide qui y règne soit compatible avec le circuit vide du détecteur. La pompe primaire du détecteur génère un flux depuis son orifice de connexion jusqu'à son refoulement à la pression atmosphérique.

En cas de fuite, le flux drainé sera alors composé d'air et de l'hélium de la fuite, le tout à la pression qui règne au point de mesure, c'est-à-dire sous vide. En fonction du débit de la fuite hélium, une pression partielle d'hélium s'établit.

Le flux d'hélium dans le circuit dépend de la vitesse de pompage hélium de la pompe S_{He} et de la pression partielle d'hélium PP_{He} . En effet, sous vide, les gaz ne sont pas tous pompés à la même vitesse. Ces caractéristiques conditionnent le flux d'hélium entrant dans la pompe. La vitesse de pompage hélium est considérée comme fixe car la pression partielle d'hélium est toujours très petite comparée à la pression totale du mélange.

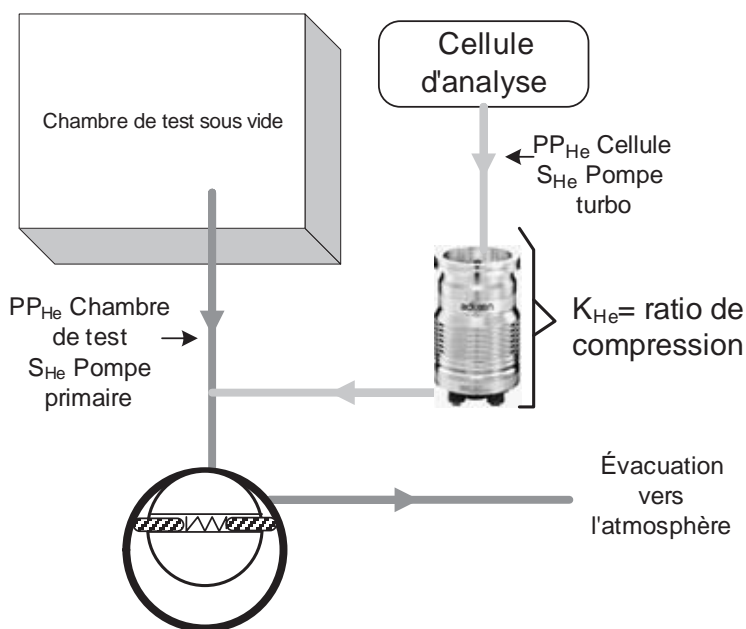
Pour mémoire : la pression partielle de l'hélium dans l'air à la pression atmosphérique (pression totale $\approx 1\,000$ mbar) est de 10^{-3} mbar (0,1 Pa). La seule variable est donc la pression partielle d'hélium qui est la conséquence du flux entrant de ce gaz, c'est-à-dire du débit de la fuite en hélium.

Une pompe est également définie par un taux de compression. C'est donc le cas de la pompe moléculaire qui maintient un vide poussé dans la cellule. Si de l'hélium passe devant le refoulement de cette pompe, une partie de celui-ci va remonter au travers de la pompe à contre-courant et apparaître à l'aspiration de la pompe, c'est-à-dire dans la cellule d'analyse. Ce n'est qu'une partie du gaz qui remonte et génère une pression partielle à l'autre bout de la pompe. La proportion des

pressions établies alors de chaque côté définit le ratio de compression de la pompe.

Cette faculté qu'a l'hélium de remonter le flux de pompage est utilisée dans le détecteur pour avoir deux niveaux de sensibilité différents : le mode grosse fuite et le mode petite fuite. Le chemin à contre-courant et le temps de réponse sont plus longs en mode grosse fuite. On ne voit qu'une fraction du signal hélium, mais le temps de pompage pour faire le vide sur le port de mesure est plus court.

Figure 12 : Principe d'un détecteur d'hélium élémentaire



La pression partielle d'hélium PP_{He} Chambre à la sortie de la pompe secondaire génère une pression PP_{He} Cellule à l'entrée égale à :

$$PP_{He} \text{ Cellule} = PP_{He} \text{ Chambre} / K_{He}$$

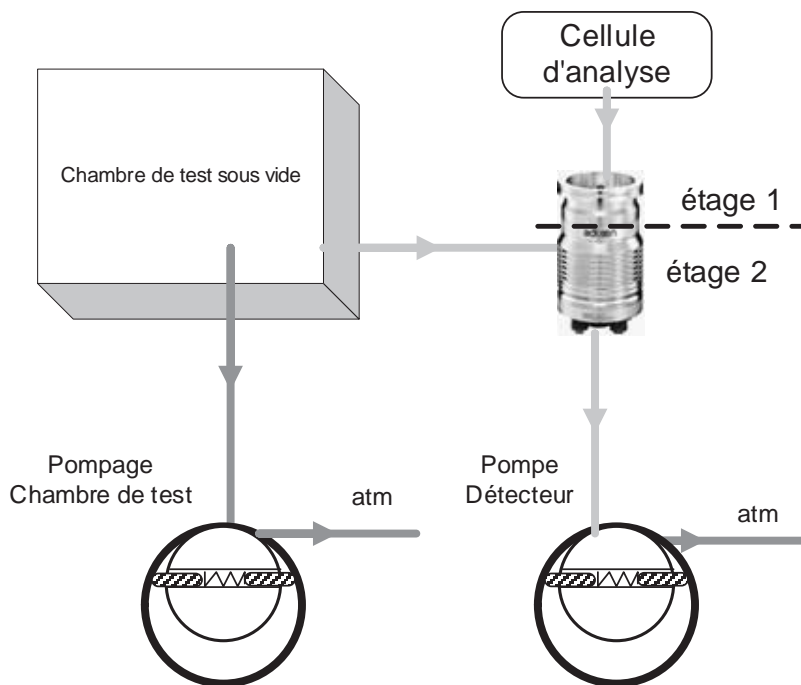
K_{He} est le taux de compression hélium de la pompe secondaire.

En fonction de la capacité de la pompe à pomper l'hélium et du flux d'hélium arrivant, une pression partielle va s'établir. La pression partielle correspond à une concentration en hélium du mélange mesuré. La vitesse de pompage hélium de la pompe du détecteur étant connue, en mesurant cette pression partielle d'hélium, on connaît le flux d'hélium entrant. C'est pourquoi les détecteurs d'hélium sont gradués en unité de

débit, et utilisent l'unité de terrain qui est le mbar.l/s. L'unité légale est le Pa.m³/s et peut être choisie pour l'affichage sur certains détecteurs.

5.2.2.5 Principe de mesure directe : mode fine fuite

Figure 13 : Détecteur en mode petite fuite

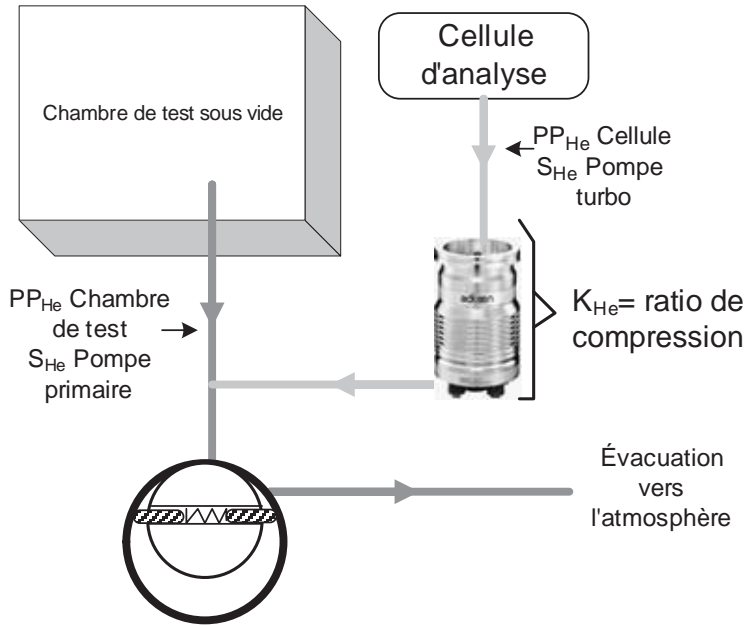


Nous avons vu sur le schéma du détecteur élémentaire que l'on peut mesurer la pression partielle d'hélium dans le flux entrant par contre-courant au travers de la pompe secondaire, au ratio de compression près.

En réduisant ou augmentant la longueur du parcours effectué à contre-courant, on peut rendre l'ensemble plus ou moins sensible et rapide. C'est cette particularité qui a été utilisée pour obtenir deux modes de fonctionnement avec deux niveaux de sensibilité différent : le mode grosse fuite et le mode petite (ou fine) fuite. On utilise le fait que les pompes secondaires sont constituées de deux étages en série. En venant se connecter entre ces deux étages, on se rapproche de la cellule d'analyse et on réduit le contre-courant nécessaire. Attention toutefois à respecter la pression admissible à cet endroit : un bon niveau de vide est requis ! La commutation d'un mode à l'autre se fait par ouverture et fermeture d'électrovannes pilotées.

5.2.2.6 Principe de mesure à contre-courant : mode grosse fuite

Figure 14 : Détecteur en mode grosse fuite



Le flux arrivant de la chambre passe au refoulement de la pompe secondaire. La pression partielle d'hélium va s'établir par contre-courant au travers des deux étages, ce qui donne un temps de réponse plus élevé.

Mais le niveau de vide requis dans la chambre est moins sévère en étant connecté ainsi.

C'est pourquoi quand on pompe dans la chambre de test, on commence par mesurer en mode grosse fuite quand on atteint un niveau de vide situé entre 20 et 10 mbar selon le type de détecteur, et on passe ensuite en mode petite fuite quand on atteint un vide situé entre 2 et 0,1 mbar selon le type de détecteur.

Les pressions auxquelles on peut ouvrir les vannes petites et grosses fuites sont indiquées par les fabricants. Beaucoup de détecteurs sont capables de gérer eux-mêmes ces deux modes de fonctionnement quand une jauge à vide est raccordée.

Une ouverture de vanne à une pression trop haute peut engendrer :

- une rupture du filament

- un arrêt ou rupture de la pompe secondaire. Ce type de pompe a une vitesse de rotation comprise entre 27 000 et 60 000 tour/minute. Il faut donc faire attention aux entrées d'air violentes et aux chocs.

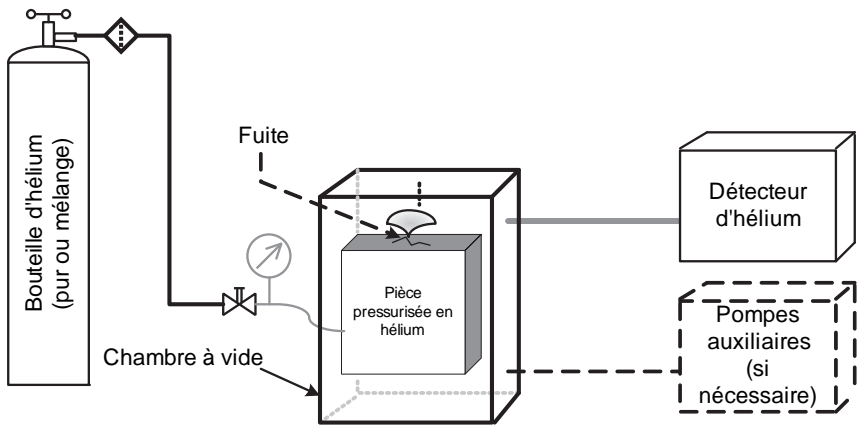
Comparaison des deux méthodes

MESURE À CONTRE-COURANT Mode grosse fuite	MESURE DIRECTE Mode petite fuite
Cycle de test court (tirage au vide moins poussé donc plus rapide ; pression de test plus élevée)	Cycle de test plus long
Sensibilité plus faible (adapté à la mesure de fuites plus importantes)	Sensibilité plus grande
Temps de réponse plus long	Temps de réponse plus court

5.2.3 Test sous vide

5.2.3.1 Dans une enceinte

Figure 15 : Détection de fuite hélium sous vide



La méthode consiste à pressuriser la pièce avec de l'hélium, ou un mélange qui en contient puisque c'est notre gaz traceur. Cette pièce se trouve dans une enceinte qui est tirée au vide.

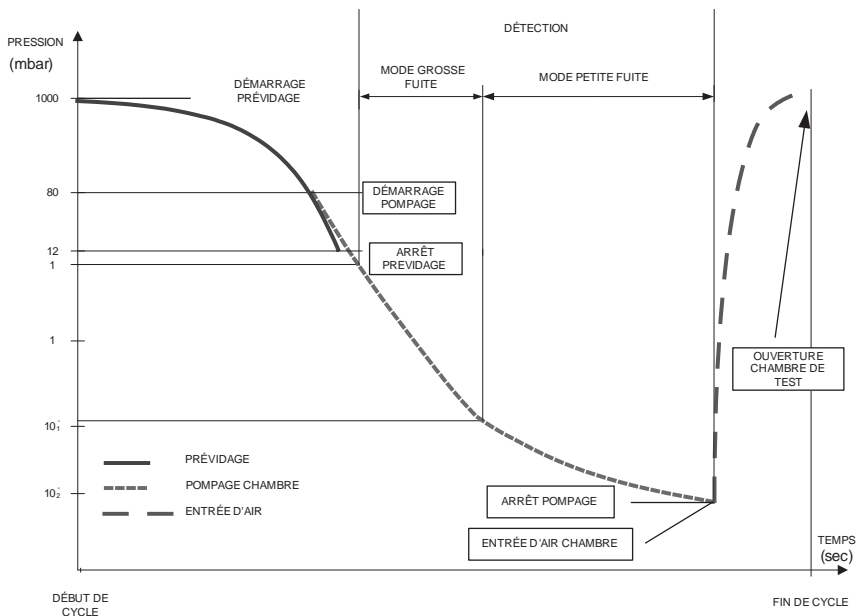
Dès que le niveau de vide est suffisant, c'est-à-dire dès que la pression est assez basse, le détecteur d'hélium est raccordé à la chambre (ouverture de la vanne de test).

La pression qui règne dans l'enceinte étant suffisamment basse, le signal donné par le détecteur (bruit de fond) est lui-même de faible valeur. Cela permet de détecter de très petites fuites.

La difficulté réside souvent dans le fait de connecter la pièce dans une chambre à vide, ceci sans créer de fuite parasite. La qualité des outillages de connexion conditionne donc complètement la fiabilité du système.

Un cycle de test complet dans une chambre à vide avec groupe auxiliaire de pompage (roots) se déroule comme suit :

Figure 16 : Descente en vide dans une enceinte de test



Au démarrage à la pression atmosphérique, les pompes multipalettes sont les plus efficaces et assurent la descente en vide.

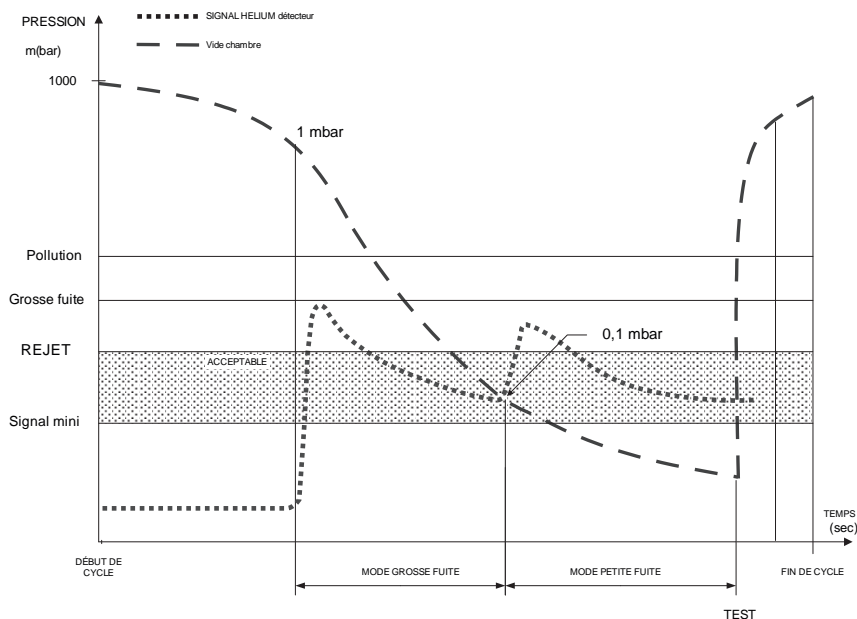
À partir d'environ 80 mbar, les pompes roots viennent « aider » car on entre dans leur courbe d'efficacité.

Dès qu'on atteint le seuil de pression de test en mode grosse fuite du détecteur installé, on ouvre la vanne de test correspondant et on commence la mesure dans la chambre (sensibilité réduite).

Au seuil de pression du mode petite fuite, le détecteur et ses vannes commutent, la mesure est alors au maximum de sa sensibilité.

Quand la mesure est terminée, on referme les vannes du détecteur et on laisse entrer l'air dans la chambre de test pour pouvoir ouvrir la porte.

Figure 17 : Signal du détecteur hélium lors d'un test sous vide



Le signal du détecteur évolue comme le montre cette figure : avant le test, le signal est très bas car les vannes du détecteur sont fermées. On appelle cette valeur le bruit de fond du détecteur. Si cette valeur n'est pas suffisamment faible, cela signifie soit que le détecteur est pollué par de l'hélium suite à une grosse fuite, soit qu'il a besoin d'une révision ou d'un étalonnage.

À l'ouverture de la vanne de test en mode grosse fuite, le signal fait un pic puis redescend car le pompage continue. Le phénomène est le même lorsqu'on passe en mode petite fuite. La valeur du signal sur une pièce bonne en fin de mesure conditionne le rapport signal sur bruit. On comprend vite que si sa valeur est proche du seuil de refus, la probabilité de se tromper augmente, notamment le risque de rejeter à tort une pièce.

Qualités	Défauts
Bonne sensibilité	Cher
Test global	Maintenance complexe
Haute cadence car temps de réponse court	Conductance de la connexion à la pièce

5.2.3.2 Test par aspersion

Une autre manière de faire un test local consiste à faire le vide dans la pièce à l'aide du détecteur et d'un groupe de pompage auxiliaire si le volume à vider est trop important.

Une fois le vide suffisant, le spectromètre de masse peut être raccordé (ouverture de la vanne de test) et la mesure commence. La concentration d'hélium dans la pièce est abaissée par le fait du pompage, ce qui permet une mesure de fuite très petite, c'est-à-dire une grande sensibilité.

En première approche, on peut travailler « sur le bruit de fond de l'air ». En effet, s'il y a une fuite, de l'air contenant 5 ppm d'hélium entre dans la pièce et cela se voit dans la valeur du signal donné par le détecteur. Ce signal restera figé à une valeur stable correspondant à la pression partielle d'hélium générée par le débit entrant. L'air sert alors le gaz traceur ! Mais cela ne permet que de mettre en évidence les grosses fuites. En l'absence de fuite importante, le signal descendra jusqu'à une valeur très basse. On pourra alors commencer l'aspersion d'hélium sur la pièce ou la partie à contrôler. En cas de fuite, l'hélium présent devant le défaut sera aspiré et suivra le parcours de pompage jusqu'au détecteur, qui l'indiquera par une remontée de son signal.

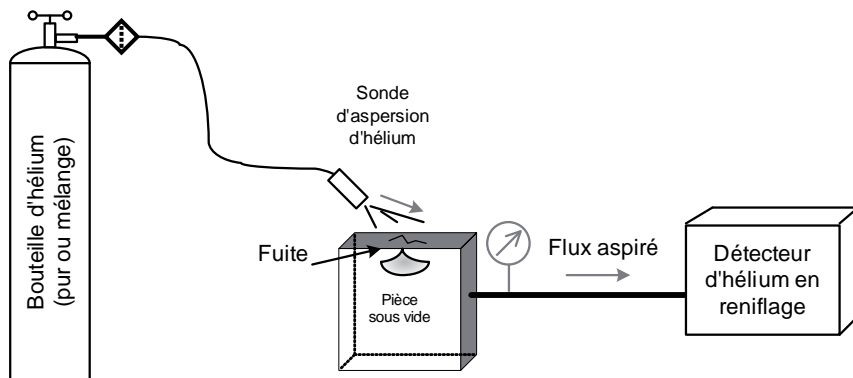
Qualités	Défauts
Bon marché	Sensibilité limitée
Test local ou global	Temps de réponse
Bonne sensibilité	Conductance de la connexion à la pièce

Le temps que l'hélium arrive jusqu'au détecteur peut être long et constituer un handicap pour la localisation de fuite. C'est le cas par exemple des pièces tubulaires comme les circuits frigorifiques. En outre, si la connexion à la pièce est de faible section, cela augmentera considérablement le temps de transfert du gaz vers la cellule d'analyse.

Rappelons pour terminer que le fait de faire le vide dans un circuit ou une pièce peut le rendre plus étanche par compression des joints (pression atmosphérique). Il faut toujours essayer de respecter le sens

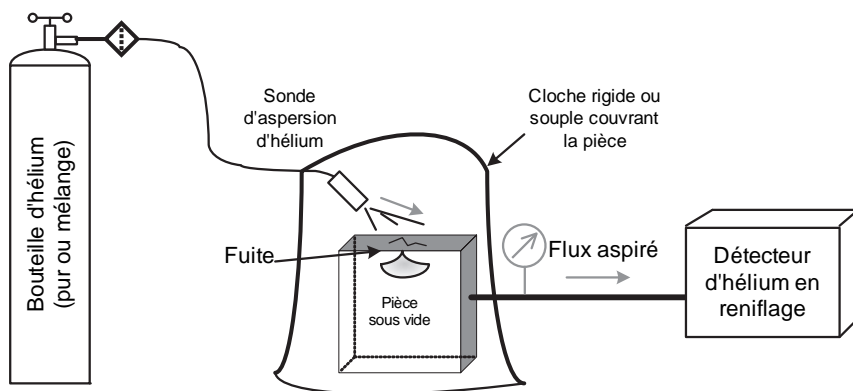
des pressions tel qu'il sera lors de l'utilisation finale de l'objet du test. Ce type de contrôle est donc plus adapté pour les installations fonctionnant sous vide, mais il permet néanmoins dans bien des cas de localiser des fuites sans avoir à pressuriser et donc en toute sécurité.

Figure 18 : Test local en asperson



Un opérateur déplace manuellement la sonde d'asperson. Cette méthode est très pratique pour contrôler et localiser les fuites sur les chambres à vide.

Figure 19 : Test global en asperson



Si l'ensemble de l'objet du test est aspergé par de l'hélium, le test devient global. La cloche peut être constituée d'un ensemble rigide mécano soudé, mais une enveloppe souple (une bâche par exemple) peut

suffire. Son rôle est juste d'empêcher que l'hélium ne s'envole et de l'obliger à rester sur les contours de la pièce. Son coût n'est donc pas élevé.

5.2.4 Test en reniflage

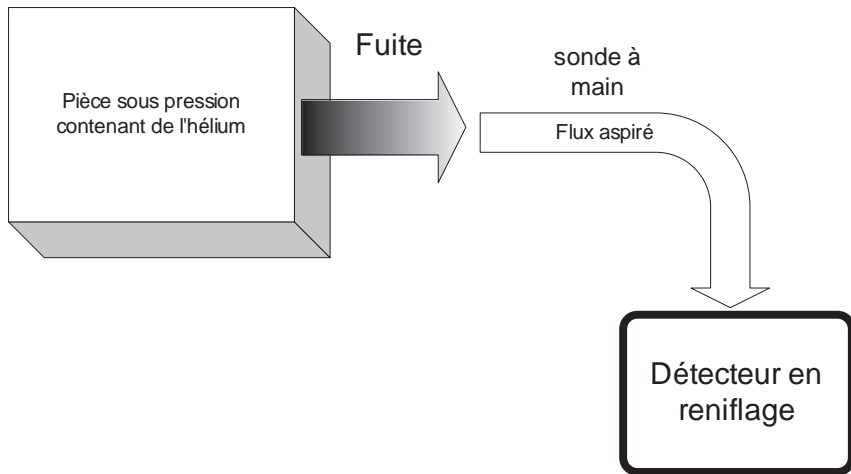
Le test sous vide n'est pas toujours possible pour des raisons de coût, de compatibilité de la pièce avec le vide, de la taille de l'objet à contrôler, etc. D'autre part, pour pouvoir réparer les pièces quand c'est possible, ou analyser les défauts, il est indispensable de pouvoir localiser les fuites. Les détecteurs d'hélium par spectrométrie de masse ont donc été adaptés pour permettre des mesures à la pression atmosphérique.

Figure 20 : Détecteur renifleur



5.2.4.1 Principe de base

Un flux est aspiré par une sonde et la pression partielle d'hélium qu'il contient est mesurée par le détecteur. La sonde peut être déplacée sur la zone de recherche par un opérateur ou gérée par un système dans le cas de machines automatiques.

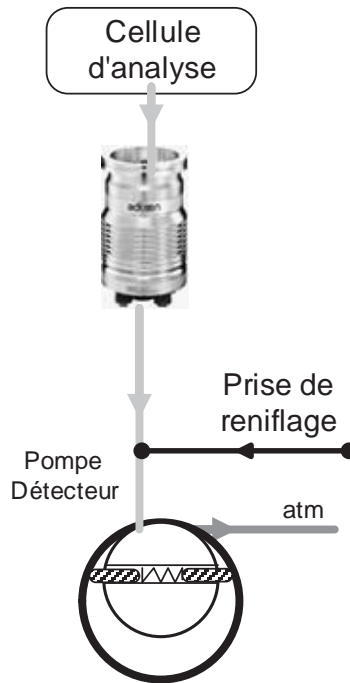
Figure 21 : Principe du reniflage hélium

- Configuration du contrôle en mode reniflage : la pièce est pressurisée avec de l'hélium ;
- La détection est effectuée à la pression atmosphérique.

Comment mesurer un débit alors que le spectromètre de masse mesure la pression partielle d'hélium ?

Nous avons vu que de l'hélium entrant dans le circuit de pompe va générer une pression partielle d'hélium qui va se propager dans tout le circuit en tenant compte des ratios de compression des pompes. Pour permettre le reniflage à pression atmosphérique, la première solution est d'utiliser cette particularité en injectant un flux de reniflage à un endroit du circuit où cela est compatible. Si de l'hélium est présent dans ce flux, par contre-courant on pourra le quantifier dans la cellule qui reste sous vide poussé dans tous les cas.

Le débit qui entre par le port de reniflage doit être calibré pour permettre une mesure fiable et éviter une remontée de pression trop importante entre les deux pompes. Cela peut être assuré dans la sonde de reniflage elle-même ou par une vanne de laminage. La pression partielle qui s'établit dans le circuit à l'entrée de la pompe secondaire, sera perçue dans la cellule d'analyse par contre-courant, au ratio de compression près.

Figure 22 : Détecteur de fuites hélium en reniflage

5.2.4.2 Conception de la sonde : quel débit ?

Comme nous venons de le voir, le débit entrant doit être compatible avec les conditions de fonctionnement requises des pompes utilisées dans le circuit. Ceci nous conduit vers des valeurs faibles, mais suffisantes pour faire des mesures ou localiser des fuites.

Le débit étant permanent, le détecteur mesurera en permanence l'hélium naturel contenu dans l'air. Le signal ne sera donc jamais nul. La concentration naturelle d'hélium dans l'air est de 5 PPM. Ce signal minimum s'appelle le bruit de fond.

Quelle doit être la valeur du débit aspiré par la sonde ?

Prenons trois hypothèses de valeur

► a) Débit plutôt important

Débit $> 0,5 \text{ Pa.m}^3/\text{s}$

La valeur affichée par le détecteur sur la mesure de l'air ambiant sera :

$$Q_{\text{He bruit}} = Q_{\text{air}} \times 5 \cdot 10^{-6} = 0,5 \times 5 \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$$

Nous avons donc à l'affichage une grande valeur de bruit de fond. Il sera donc difficile de voir les fines fuites. Par contre, le temps de réponse sera court car le temps de transfert du gaz depuis le point de reniflage jusqu'à la pompe et la cellule sera plus court avec une vitesse de transfert plus élevée. En reniflage, on se pose toujours la question du captage de la fuite. Quelle partie de la fuite est aspirée, diluée ?

Dans le cas présent, le pourcentage du débit de fuite capté par la sonde sera important, avec tout de même un risque de dilution en prenant un peu d'air ambiant au passage.

► b) Débit plutôt faible

Débit hélium sonde de $0,02 \text{ Pa.m}^3/\text{s}$

Le détecteur affiche une faible valeur de bruit de fond sur l'air ambiant :

$$Q_{\text{He bruit}} = Q_{\text{air}} \times 5 \cdot 10^{-6} = 0,02 \times 5 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$$

Ceci nous permet de détecter des petites fuites mais avec un temps de réponse assez long. En effet, la vitesse de transfert du gaz depuis le point de reniflage jusqu'à la pompe est faible. De même, le pourcentage du débit capté risque fort d'être inférieur à la fuite elle-même, d'où une erreur de lecture potentielle.

► c) C'est pourquoi on a choisi un débit moyen

Débit hélium sonde de $0,1 \text{ Pa.m}^3/\text{s}$ ($\approx 1 \text{ atm.cm}^3/\text{s}$)

Le détecteur affiche une valeur de bruit de fond correcte par rapport aux fuites recherchées. Cela nous permet de détecter des fuites relativement petites avec un temps de réponse acceptable.

De plus, le pourcentage du débit de fuite capté par la sonde est satisfaisant.

Le signal donné par le détecteur sur de l'air ambiant est de :

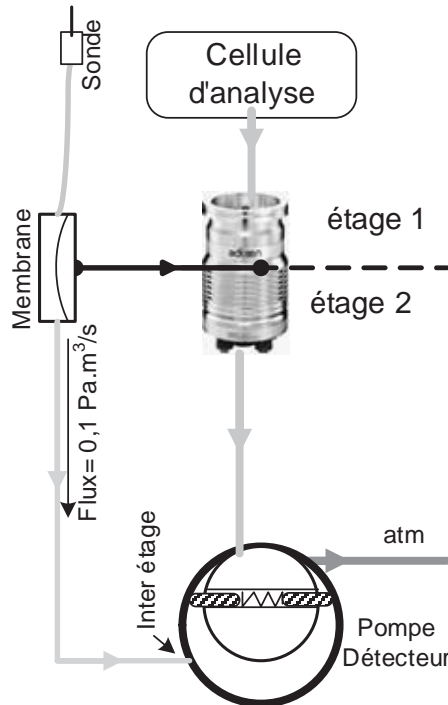
$$Q_{\text{He bruit}} = Q_{\text{air}} \times 5 \cdot 10^{-6} = 0,1 \times 5 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$$

C'est la solution la plus courante pour les détecteurs et les sondes de reniflage classiques du commerce.

Il existe différentes manières de construire un détecteur de fuite hélium pour en faire un renifleur. La première, nous l'avons vu, consiste à laisser entrer un débit calibré à l'aspiration de la pompe primaire.

La seconde utilise une membrane perméable à l'hélium uniquement. D'un côté de la membrane règne le vide généré par les pompes, et de l'autre passe le flux calibré de 1 atm.cm³/s. Si la pression partielle d'hélium dans le flux augmente, elle augmentera aussi de l'autre côté de la membrane.

Figure 23 : Détecteur de fuite hélium par reniflage avec membrane



Dans ce cas, le flux aspiré n'entre pas dans le circuit au niveau de la pompe moléculaire. Mais l'hélium traverse la membrane perméable.

5.2.4.3 Plus petit signal détectable

En gaz traceur, la principale limitation vient du niveau de bruit de fond que l'on peut atteindre. Pour les mesures effectuées dans l'atmosphère, comme c'est le cas en reniflage, le bruit de fond est l'hélium naturel de l'air (5 PPM). Comme la sonde est balayée par un flux d'air ambiant de 0,1 Pa.m³/s (1 atm.cm³/s), il existe un flux permanent d'hélium :

$$Q_{\text{He bruit}} = Q_{\text{air}} \times 5 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$$

Nous avons vu que le bruit de fond peut être plus faible avec une sonde ayant une vitesse d'aspiration plus faible, mais que dans ce cas la

question du captage de la fuite devient délicate. De manière générale, il est difficile de garantir que l'on capte la totalité du flux de la fuite en reniflage, quel que soit le gaz traceur utilisé. Le déplacement de la sonde doit être aussi précis que possible pour limiter les risques de manquer une fuite. Une coquille de reniflage sécurise souvent le captage quand cette solution peut être mise en place.

5.2.4.4 Vitesse de déplacement de la sonde

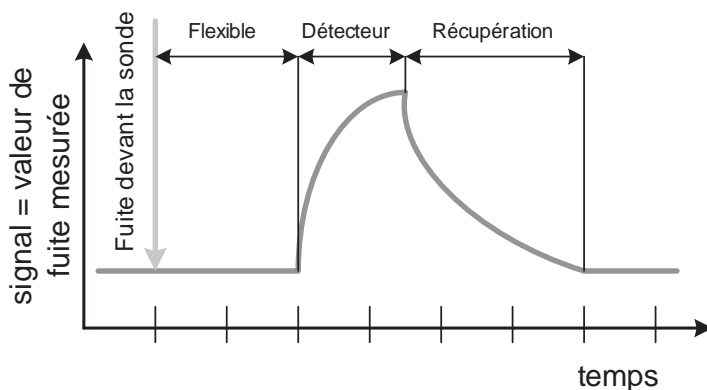
Un opérateur déplace la sonde le long du parcours à inspecter (cordon de soudure, tour de brides, assemblages, etc.). En cas de détection d'hélium, le détecteur donne un signal qui peut être visuel ou sonore (ou les deux). Comme pour le reniflage d'hydrogène, la vitesse conseillée est de l'ordre du centimètre par seconde. Se reporter à la page 70, Reniflage pour localisation de fuite.

5.2.4.5 Temps de réponse

Il dépend essentiellement de la longueur du tuyau (flexible) reliant la sonde au détecteur de fuite. Un faible diamètre de tuyau assure une vitesse de transfert du gaz aspiré élevée.

Si la vitesse de transfert du gaz est égale à 5 m/s, le temps de réponse sera de 2 secondes avec un flexible de 10 mètres de long.

Figure 24 : Profil du signal en cas de détection d'une fuite



Mais le détecteur a aussi un temps de réponse qui lui est propre, assez court en général.

Quand une fuite vient d'être détectée, il faut laisser au détecteur le temps de récupérer avant de pouvoir reprendre la recherche sans risquer de manquer une montée du signal qui pourrait être masquée.

5.2.4.6 Mesure de concentration

Un détecteur renifleur hélium peut aussi être utilisé pour mesurer la concentration (C) d'hélium dans l'air. En effet, il est conçu pour mesurer et afficher le débit d'hélium (Q_{He}) capté par la sonde. Or nous avons vu que avec un débit de 1 atm.cm³/s, ce qui équivaut pratiquement à 1 mbar.l/s (qui est l'unité de base d'affichage par défaut des détecteurs), nous avons :

$$Q_{He} = Q_{air} \times C_{air} = 1 \text{ mbar.l/s}$$

Donc on a : $C = Q_{He}$ si l'affichage en mbar.l/s est sélectionné (coefficient de 1). Le détecteur affiche donc directement la concentration d'hélium dans l'air ! Il suffit de faire abstraction de l'unité de débit.

Valeur affichée : $5 \cdot 10^{-6}$ mbar.l/s ce qui correspond à une concentration de 5 parties par million.

5.2.4.7 Procédure de calibrage en reniflage

On utilise pour cela une fuite calibrée que l'on place aussi près que possible de la sonde de reniflage. Il s'agit le plus souvent d'une bouteille d'hélium fermée par un diaphragme perméable.

Figure 25 : Utilisation d'une fuite calibrée intégrée en reniflage



Certains détecteurs sont équipés d'une fuite calibrée intégrée permettant à tout moment et de manière simple à l'opérateur de recalibrer l'appareil.

De manière générale la procédure consiste à régler le détecteur pour qu'il affiche la valeur de la fuite calibrée mesurée. Cette valeur de fuite doit être choisie aussi élevée que possible – de l'ordre de 10^{-6} Pa.m³/s (10^{-5} mbar.l/s) – pour ne pas être gêné par le bruit de fond de l'air pendant la mesure.

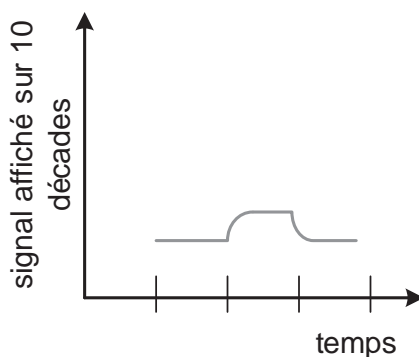
Il est également possible de calibrer le détecteur en utilisant directement le bruit de fond de l'air, c'est une concentration d'hélium de (5 PPM) de référence gratuite et toujours disponible. Attention toutefois dans les ateliers où l'atmosphère peut être polluée par de l'hélium provenant d'autres machines de test voisines.

5.2.4.8 Fonction auto zéro

La fonction d'auto zéro permet de mesurer de plus petites variations du signal masquées par le bruit de fond. Elle peut être utilisée en test sous vide comme en reniflage. On peut utiliser un « zéro flottant » pour éviter d'avoir un signal négatif quand le bruit de fond baisse après une pollution par exemple. L'affichage passe en mode zoom (2 décades, par exemple) pour affiner la visualisation du résultat.

Attention, l'auto zéro ne supprime pas le bruit de fond. Il en supprime l'affichage par soustraction.

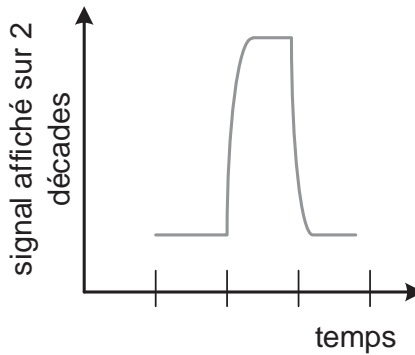
Figure 26 : Signal fourni par le détecteur sans auto zéro



L'échelle étant logarithmique et couvrant une dizaine de décade, la variation du signal pour une fuite située au-dessus du bruit de fond est

faible et peu perceptible. Le risque d'erreur est grand dans ces conditions.

Figure 27 : Signal fourni par le détecteur avec auto zéro



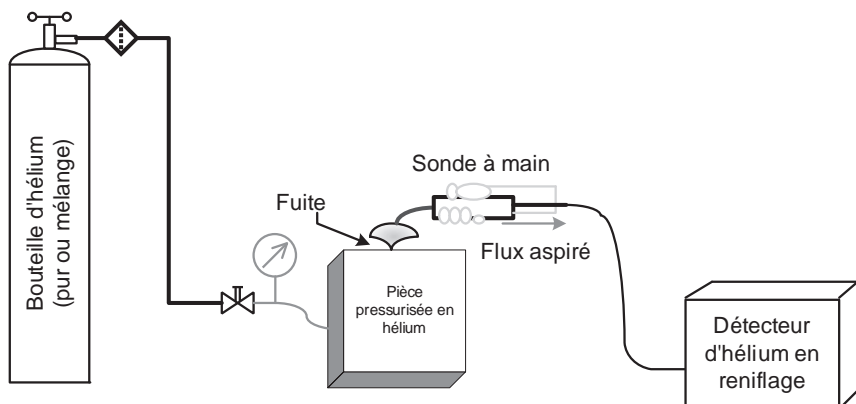
La variation du signal est amplifiée par le fait que l'échelle utilisée pour l'affichage du signal correspondant à la valeur de fuite est réduite. Cela revient à faire un zoom sur la mesure.

5.2.4.9 Test local

La pièce à tester est pressurisée avec de l'hélium. Un opérateur déplace ensuite la sonde de reniflage en suivant le parcours à contrôler.

Qualités	Défauts
Bon marché	Sensibilité limitée
La pièce testée n'est pas mise sous vide	L'efficacité dépend de l'opérateur

Figure 28 : Réalisation d'un test par reniflage avec sonde manuelle



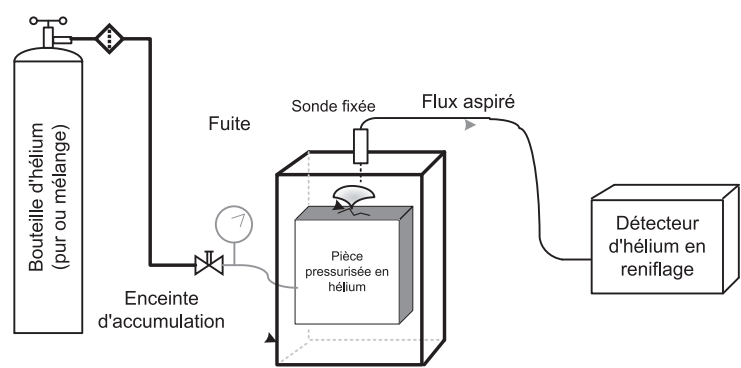
5.2.4.10 Test global

Pour tester entièrement une pièce ou quand la sensibilité ne permet pas une mesure instantanée, on a recours à la méthode dite « par accumulation » ce qui nous permet de faire un test global.

L'ensemble des fuites est collecté dans une chambre ou une coquille d'accumulation. La concentration mesurée après un temps d'attente défini ou mesuré nous permet de connaître le taux de fuite global de l'ensemble testé. L'enceinte d'accumulation est de fabrication simple car elle n'est soumise à aucune pression différentielle. Il suffit d'éviter les « courants d'air » avec l'extérieur.

Qualités	Défauts
Bon marché	Répétabilité délicate : l'homogénéité dépend de la qualité du brassage
	Cadence limitée

Figure 29 : Reniflage avec accumulation



Montage du test : la sonde de reniflage est fixée sur une chambre de test qui reste à pression atmosphérique. En cas de fuite, l'hélium va se répandre dans l'enceinte close et sa concentration va augmenter petit à petit.

En connaissant la relation entre la mesure du détecteur et la valeur de fuite, on peut calculer le taux de fuite global à partir d'une mesure de concentration effectuée après un temps d'accumulation.

En effet, nous avons vu pour l'hydrogène qu'en cas de fuite, la concentration d'hélium augmente en suivant cette loi :

$$C = Q_{\text{He}} \times t/V$$

Cela ne change pas avec de l'hélium, nous utiliserons simplement :

C	concentration d'hélium
Q_{He}	débit d'hélium en atm.cm ³ /s (valeur de la fuite)
t	durée d'accumulation

On peut donc connaître la valeur de fuite (Q_{He}) en mesurant la concentration d'hélium dans la chambre au bout d'un temps d'attente (t) en mettant en place ce type de test :

1. La pièce à tester est pressurisée en hélium et couverte par une chambre de test.
2. En cas de fuite, l'atmosphère dans la chambre contiendra de plus en plus d'hélium.

Cette méthode est très pratique en laboratoire pour vérifier l'étanchéité d'un produit quand un test sous vide n'est pas possible et qu'on a le temps ; typiquement lors d'essais prototypes sur de nouvelles pièces. Il n'est pas employé dans les applications de production à hautes cadences.

5.2.5 Récupération de l'hélium

La consommation d'hélium est un coût qui entre en grande partie dans le calcul du coût unitaire du test. Le récupérer est donc une manière évidente de faire des économies d'une part, et de limiter les rejets d'autre part, fussent-ils de gaz neutre comme l'hélium. Nous savons d'autre part que ce gaz n'est pas disponible à l'infini et que son coût ne pourra qu'augmenter avec la raréfaction du pétrole.

Un système de récupération d'hélium est constitué d'un compresseur, de filtres, de réservoirs basses pressions pour accueillir le retour d'hélium, de réservoirs hautes pressions pour stocker le gaz comprimé afin d'alimenter la ou les machines de test.

Pour diminuer le coût de la consommation de ce gaz traceur, les deux solutions les plus souvent retenues sont la récupération et le passage au mélange, autrement dit la dilution. Attention, si on passe de 100 % d'hélium à 20 % d'hélium, le seuil de refus est divisé par environ 5 (voir le chapitre sur les calculs, p. 23). Il conviendra alors de s'assurer que la sensibilité du test tel qu'il est réalisé est compatible avec ce changement.

On peut récupérer l'hélium pur ou le mélange air hélium. Compte tenu du coût de la récupération (achat et entretien du système), la récupération concerne plus souvent les utilisateurs d'hélium pur.

Figure 30 : Récupérateur d'hélium



© Cirrus

Dans le cas de recyclage de mélange, il faut veiller à ce que le mélange ne s'appauvrisse pas par de l'ajout d'air. Ce peut être le cas si le circuit de pressurisation de la pièce se trouve à un moment donné en dessous de la pression atmosphérique. En cas de fuite, l'air entrerait et la teneur en hélium s'en trouverait réduite.

Pour palier ce risque, on peut intégrer un analyseur binaire air hélium sur le circuit de récupération. En cas de baisse du taux d'hélium, une alarme sera émise pour intervention du service de maintenance.

5.2.5.1 Calcul de la consommation d'hélium

Pour estimer le coût de ces contrôles d'étanchéité, il est nécessaire d'évaluer la consommation d'hélium. Le calcul est assez simple, il suffit de quantifier la quantité PV, pression \times volume, de gaz consommé à chaque cycle et de multiplier ensuite cette valeur par la cadence de production.

Consommation horaire d'hélium = production horaire \times volume pressurisé \times (pression de test – pression dans la pièce avant remplissage)

Ce qui peut encore s'écrire :

Cons (bar.l/h) = Prod (pièces/h) \times ($V_{\text{pièce}} + V_{\text{pressu}}$) \times ($P_f - P_i$) \times taux d'hélium dans le mélange

P_f = pression absolue finale dans la pièce en bar

P_i = pression absolue initiale dans la pièce avant sa pressurisation en bar. Il faut répondre à cette question : fait-on le vide dans la pièce avant de la remplir de gaz traceur ? La valeur de ce vide sera à prendre en compte dans l'affirmative, sinon ce sera la pression atmosphérique.

Si on utilise les unités du SI, la consommation sera exprimée en Pa.m³/s.

5.2.5.2 Calcul du taux de récupération d'hélium

Le taux de recyclage ne dépend pas du système de récupération mais des paramètres du cycle de test. Le calcul revient à faire le ratio entre la quantité d'hélium qu'on a mise dans la pièce pour faire le test et la quantité d'hélium qu'on récupère en fin de cycle. Le récupérateur d'hélium recycle 100 % du gaz qui lui sera envoyé.

Il se calcule donc comme suit (formule n° 19) :

$$\text{Re cup} = \frac{\text{He mis dans la pièce}}{\text{He envoyé au récupérateur}} = \frac{\text{Volume pressurisé} \times (P_{\text{test}} - P_i)}{\text{Volume pressurisé} \times (P_{\text{test}} - P_d)}$$

$$\text{Re cup} = \frac{(P_{\text{test}} - P_i)}{(P_{\text{test}} - P_d)}$$

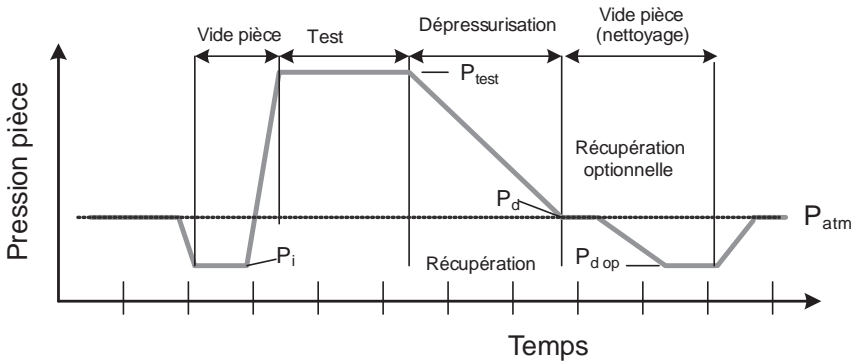
Avec :

P_{test} : pression absolue de test en Pa (ou bar)

P_i : pression dans la pièce avant de commencer la pressurisation

P_d : pression dans la pièce en fin de dépressurisation vers le récupérateur

Figure 31 : Cycle de pression dans une pièce pendant un cycle de test

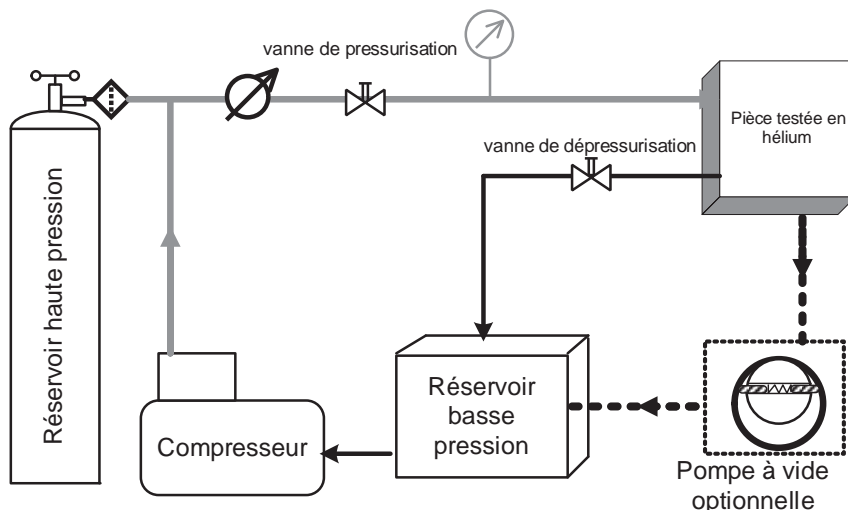


Le cycle de pressurisation pièce se déroule comme suit :

- Tirage au vide de la pièce. Quand c'est possible, sur des pièces tubulaires, on peut remplacer le tirage au vide par un balayage. Dans ce cas la pression de départ sera la pression atmosphérique. Le rôle de cette phase est d'assurer qu'il y a du gaz traceur dans toute la pièce. L'hélium ne se propage pas instantanément et des tampons d'air peuvent subsister. Si une fuite est présente à cet endroit et alimentée par de l'air, elle ne sera pas détectée.
- Le test. Il peut être en reniflage, par accumulation ou non, ou dans une chambre à vide.
- La dépressurisation. C'est par nature la phase pendant laquelle le flux sera envoyé au récupérateur d'hélium.
- Nettoyage pièce par tirage au vide. L'objectif est de ne pas polluer l'environnement de travail par une émission d'hélium quand on va déconnecter la pièce. Le tirage au vide extrait l'hélium résiduel de la pièce. Il peut être récupéré mais attention :
 - le fait de pomper nous fait descendre en dessous de la pression atmosphérique. En cas de fuite, de l'air entrera dans le circuit et altèrera la teneur en hélium du gaz de test recyclé. Ceci ne peut arriver tant que le circuit reste au-dessus de la pression atmosphérique. L'ajout fortement conseillé d'un analyseur de gaz rend cette option onéreuse et compliquée ;

- l'ensemble de pompage doit être étanche et dédié à cette fonction. En cas de fuite, on risque de polluer le lieu du test.

Figure 32 : Cycle de récupération d'hélium



5.3 Autres gaz traceurs

5.3.1 Détecteur à conductivité thermique

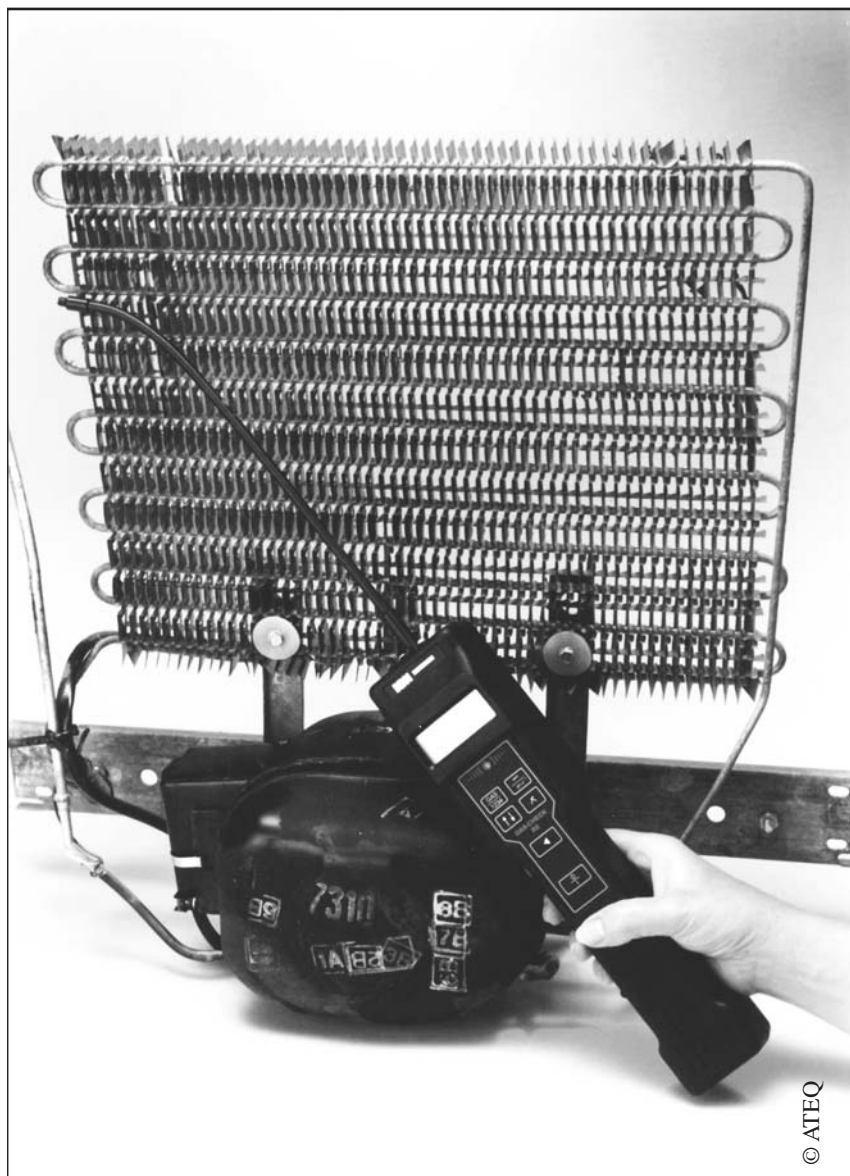
Pour la mesure, on utilise un pont de Wheatstone. Chaque résistance du pont est constituée d'un élément chauffé, dont la résistance varie avec la température. Le système est réglé pour se stabiliser sur un point d'équilibre correspondant au débit (fixe) de l'appareil, et au gaz de référence, l'air en général. Cette même température va varier si la nature du gaz change. En effet, chaque gaz a un coefficient d'échange qui lui est propre.

Quand le détecteur est allumé, un petit ventilateur draine l'atmosphère testée vers les éléments sensibles depuis la sonde jusqu'au détecteur. La mesure est faite par comparaison avec les références et la différence d'échange thermique est interprétée comme une valeur de fuite.

L'appareil ainsi constitué est léger et bon marché. Il est très utile pour les opérations de maintenance. Le reproche qu'on peut lui faire c'est de ne pas être sélectif, c'est-à-dire qu'il réagit au changement de gaz, quel que

soit ce nouveau gaz. Il peut être influencé par des solvants utilisés dans l'atelier, par exemple, et induire l'opérateur en erreur.

Figure 33 : Recherche de fuite de fréon sur un circuit frigorifique



5.3.2 Détection multigaz quadripôle

Le détecteur de fuite à quadripôle (ou quadrupôle) permet de détecter les gaz de masses plus grandes que l'hélium.

Il est constitué de :

- 4 électrodes ;
- 2 paires d'électrodes métalliques, cylindriques + un filament pour permettre l'ionisation.

On applique une tension (+) à une paire d'électrodes et (–) à l'autre. On y ajoute une combinaison de tension continue et alternative de fréquence ω à chaque paire. Les ions présents entre les électrodes oscillent à cause des forces électriques alternatives (attractives et répulsives). Les électrodes à tension positive filtrent les ions de hautes masses, celles de tension négative, les ions de basses masses.

Les tensions sont ajustées pour que seuls les ions de certaines masses aient une trajectoire stable ; elles seront collectées dans un collecteur en cage de Faraday.

Ce principe de détecteur est peu utilisé en détection de fuite monogaz. Comme il permet de détecter et mesurer la présence de plusieurs gaz, on le retrouvera plus souvent utilisé pour de la surveillance de processus de fabrication.

5.3.3 La lampe haloïde

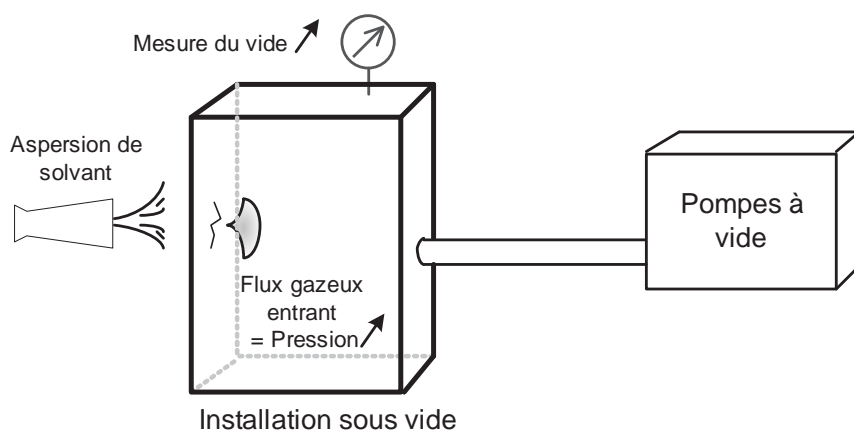
Une flamme chauffe une plaque de cuivre. En présence de chlore, la flamme devient verdâtre. Cette lampe ne fonctionne qu'avec les fluides chlorés. Son utilisation est inadaptée aux HFC. Elle est peu fiable pour les fuites de moins de 14 g/an et elle ne permet pas de quantifier la fuite. Cela reste néanmoins un outil précieux pour le frigoriste qui peut l'emporter partout grâce à son faible encombrement, sa légèreté et son autonomie.

5.3.4 Contrôle d'étanchéité des circuits sous vide

Il s'agit d'un cas un peu particulier. Dans le cas des systèmes fonctionnant sous vide par nécessité pour le processus de fabrication (semi-conducteurs, traitements de surfaces, etc.), une fuite peut venir perturber le processus en cours. Pour localiser la fuite afin de la neutra-

liser, l'aspersion de solvant est une méthode bien pratique. Les zones de probabilité de défaillance d'étanchéité sont situées dans les jonctions (brides, raccords, soudures, etc.). La méthode consiste à asperger un solvant sur ces parties de l'installation tout en surveillant le niveau de vide qui règne à l'intérieur. En cas de fuite, le produit qui a une faible viscosité pénètre à l'intérieur du système dépressurisé. Comme la pression régnant de l'autre côté de la paroi est très basse, le produit s'évapore immédiatement, créant ainsi un flux de gaz. Ce flux engendre une remontée de pression, visible sur le système de surveillance et de pilotage de l'installation. On sait ainsi où se trouve la fuite¹.

Figure 34 : Aspersion de solvant sur une installation sous vide



Quand l'aspersion de solvant n'est pas possible ou infructueuse, la seule méthode efficace consiste à isoler une à une chaque branche du circuit jusqu'à localiser la partie fuyarde du circuit. C'est une méthode longue et fastidieuse, mais qui marche à tous les coups.

1. Si le solvant est compatible avec le procédé en cours, ce test peut avoir lieu sans arrêter la production et sans casser le vide.

6.1 La voie humide

On remplit l'objet à tester avec un liquide, le plus souvent de l'eau, et on applique une pression. Dans certains cas, le poids du liquide suffit à générer la pression différentielle recherchée. On inspecte ensuite l'extérieur (voir paragraphe 2.3, p. 14). Cette méthode est également utilisée pour faire des tests d'épreuve (éclatement, vérification de la rigidité mécanique) car l'énergie accumulée par un liquide sous pression est bien moindre que celle accumulée par un gaz.

Exemple d'application : avec cette méthode, on contrôle la tenue à la pression des bouteilles de plongée.

6.2 Bac à eau

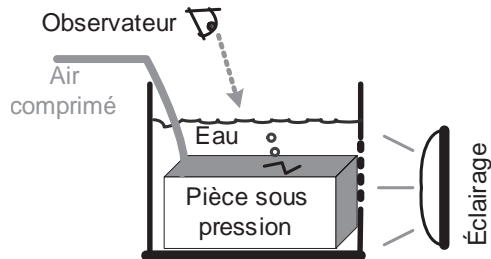
Nous avons vu au paragraphe 2.2.2, page 9, qu'une fuite de la taille de quelques millimètres peut être bouchée durablement par la présence de liquide. Pour un test en pression d'air sous eau, il est impératif de pressuriser la pièce à tester avant son immersion. Afin de protéger l'opérateur, on peut commencer avec une basse pression, puis élever cette pression dans la pièce une fois que cette dernière est immergée et que les protections (capots, etc.) ont été mises en place.

Le débit de fuite créé, même à basse pression, empêchera l'eau de pénétrer dans le défaut et de l'obstruer.

6.2.1 Mise en œuvre

- une pression P est appliquée à la pièce à tester ;
- la pièce est placée sous l'eau ;
- en cas de fuite, une bulle (ou plusieurs) apparaît après un certain temps. Cela permet d'identifier les pièces fuyardes et de localiser la fuite.

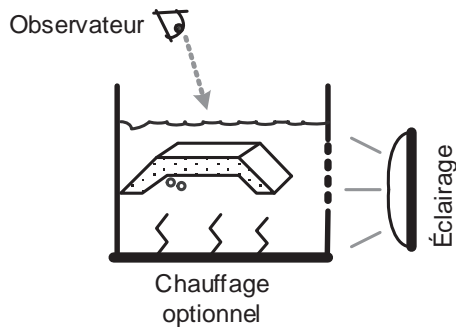
Figure 1 : Contrôle d'étanchéité par immersion



Après le test, si la pièce doit être séchée, cela ajoute un coût supplémentaire qui n'est pas négligeable.

6.2.2 Fiabilité

Figure 2 : Certaines bulles risquent de ne pas être visibles



Le risque subsiste toujours de ne pas voir une fuite. D'autre part, on voit bien que si l'on demande à l'opérateur de compter des bulles dont le diamètre est incertain, la méthode est peu fiable en ce qui concerne la quantification. Pourtant cette méthode ancienne permet de garantir un niveau d'étanchéité. En effet, si on prend comme critère l'absence d'apparition de bulles pendant le temps d'observation, on peut dire que le taux de fuite est inférieur ou égal à cette valeur calculée. Ainsi, point d'erreur de comptage possible. Seul le risque de ne pas voir les bulles subsiste.

Exemple

Le critère de rejet est une bulle par minute. Traduisons : si une bulle apparaît au bout d'une minute d'observation de la pièce immergée sous pression, la pièce est rejetée. Une pièce sera donc déclarée bonne si aucune bulle n'a été détectée par l'observateur au bout d'une minute. Pour améliorer la « fluidité » des bulles, on peut chauffer l'eau et y ajouter des produits visant à diminuer les tensions de surfaces.

6.2.3 Quantification

Comment quantifier une fuite en comptant les bulles ? On s'en doute, cela ne peut être précis. L'exercice exige néanmoins d'être fait car il donne un ordre de grandeur relatif aux observations effectuées. Cet ordre de grandeur se précise quand on prend comme critère l'absence de bulle, car la bulle prise en compte pour le calcul sera cette fois purement théorique comme nous venons de le voir.

$$\text{Volume d'une sphère : } V = \frac{4\pi r^3}{3}$$

Volume théorique d'une bulle en fonction de son diamètre

Diamètre de bulle en mm	Volume de la sphère en mm ³
1	0,52
2	4,19
3	14,14

Une valeur courante de référence est 2 mm. Mais en réalité, la valeur réelle dépend du débit et aussi de la forme du défaut.

Pour un diamètre de bulle de 2 mm, le débit de fuite correspondant est :

$$0,1 \text{ Pa.m}^3/\text{s} = 1 \text{ cm}^3/\text{s} = 240 \text{ bulles/s}$$

$$10^{-2} \text{ Pa.m}^3/\text{s} = 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{s} = 24 \text{ bulles/s}$$

$$10^{-3} \text{ Pa.m}^3/\text{s} = 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{s} = 2,4 \text{ bulles/s}$$

$$10^{-4} \text{ Pa.m}^3/\text{s} = 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s} = 14 \text{ bulles/min}$$

$$10^{-5} \text{ Pa.m}^3/\text{s} = 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s} = 1,4 \text{ bulle/min}$$

La précision sur l'évaluation du diamètre ainsi que sur le comptage des bulles est aléatoire. Pourtant le test air sous eau est très fiable en lui-même, parce qu'il est très simple ! Il permet de « voir » les fuites. La

conversion de ces bancs de test vers une méthode globale soulève toujours la difficulté pour les opérateurs de ne plus visualiser les fuites et de faire confiance au système. La plupart du temps, on utilise le banc de test par immersion en double contrôle jusqu'à ce que tout le monde soit convaincu que le système de remplacement (chute de pression, hélium, etc.) est aussi fiable. C'est surtout le risque d'erreur humaine, ou celui de manquer une fuite cachée, qui conduit les décideurs à remplacer ces postes par des techniques automatisables.

Dans le cas de séchage ou d'étuvage des pièces après le test, le coût de la consommation énergétique et l'utilisation d'une surface au sol importante sont des arguments supplémentaires de changement.

6.3 Colorant

Comme précédemment, on remplit l'objet à tester d'un fluide auquel on ajoute un additif coloré. En cas de fuite, on pourra repérer visuellement la présence de ce produit sur l'enveloppe externe, localisant, du même coup, la fuite. Pour des raisons de nocivité et de compatibilité entre le colorant et les joints, on préfère utiliser un produit fluorescent.

Comment pratique-t-on le contrôle d'étanchéité des échangeurs thermiques tels que les préparateurs d'eau chaude sanitaire, etc. ?

La fluorescéine a l'avantage d'être soluble dans l'eau. Alors qu'il est difficile de contrôler l'étanchéité d'échangeurs « mouillés », cela est possible avec ce produit colorant qui suivra le parcours du fluide. Très utile pour les échangeurs à plaques qui sont difficiles à vider totalement. Par contre, cette méthode ne permet pas de quantifier le niveau d'étanchéité.

Autre application typique : lors des appoints de fluide frigorigène dans le circuit d'une automobile, le garagiste peut vous proposer en option d'ajouter à la charge un traceur coloré. Celui-ci n'est pas visible à l'œil nu car on ne voudrait pas courir le risque de détériorer l'aspect du véhicule en cas de grosse fuite dans l'habitacle. Une inspection avec une lampe spéciale permettra ultérieurement au garagiste de localiser la fuite, d'identifier le composant défaillant, et de faire un devis pour une réparation efficace.

6.4 Technique de détection acoustique : ultrasons

La détection acoustique s'utilise de deux façons. La première consiste à capter l'énergie sonore ou ultrasonique générée par la détente d'un gaz au travers d'un trou. Typiquement cela se situe autour de 40 000 Hz.

Figure 3 : Équipement complet de détection par ultrasons avec antenne parabolique portable



© SDT

Utilisée pour tester les réseaux de canalisations, cette technique permet même de détecter les fuites de courants sur les isolateurs haute tension. On peut utiliser une petite antenne parabolique que l'on place autour du micro pour relever des mesures à distance (depuis le sol dans le cas de réseaux aériens, par exemple). Ce sont de petits appareils simples, légers et peu onéreux, mais qui ne détectent que des fuites assez importantes.

Ce type de contrôle est très utile pour vérifier l'étanchéité des réseaux d'air comprimé dans les ateliers. L'ensemble des fuites qu'ils comportent fait, en effet, fonctionner inutilement les compresseurs d'air et entraîne un surcoût.

Figure 4 : Contrôle d'étanchéité des réseaux d'air comprimé



© SDT

Figure 5 : Émetteur d'ultrasons



© SDT

La deuxième façon de l'utiliser consiste à placer un émetteur d'ultrasons à l'intérieur de l'enceinte à contrôler (habitacle de véhicule, local de confinement, etc.). La mesure s'effectue à l'extérieur.

Figure 6 : Contrôle d'étanchéité habitacle véhicule

© SDT

Autre application typique d'utilisation d'émetteur d'ultrasons : contrôle de l'étanchéité des cales de navires après chargement et mise en place des plaques de pont.

Figure 7 : Contrôle de l'étanchéité des plaques de pont d'un navire à l'aide d'un émetteur d'ultrasons

Fuite = l'appareil capte les ultrasons à l'extérieur de la cale

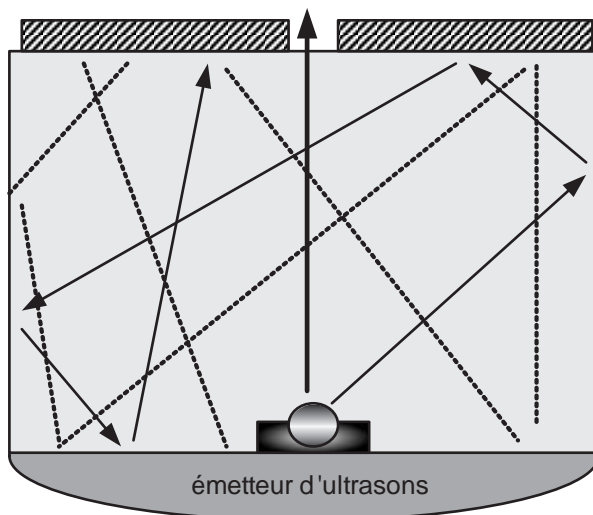


Figure 8 : Contrôle d'une cuve enterrée

© SDT

Grâce à des capteurs sensibles, le détecteur d'ultrasons capte les fréquences comprises dans la gamme des 40 kHz et les convertit en fréquences audibles afin de rendre perceptible à l'être humain une partie jusqu'alors inconnue de son environnement. Un indicateur digital affiche (en dB) la valeur crête du signal ultrasonore détecté.

Méthode : Une pompe crée un vide progressif dans la citerne. Dès que la dépression créée est supérieure à la pression hydrostatique due à la hauteur du liquide, des fuites génèrent des signaux ultrasonores. Deux capteurs placés à l'intérieur de celle-ci (l'un au-dessus, l'autre dans le liquide) permettent de détecter même les petites fuites et de contrôler par conséquent l'étanchéité des citernes de carburants.

Lorsque le vide suffisant est atteint :

1. Si la citerne est étanche, aucun signal ne peut être détecté par l'un ou l'autre des capteurs et la valeur affichée est nulle ou négative (0 ou - 3 à - 4 dB).
2. Si la citerne fuit, des signaux inaudibles mais mesurables sont détectés. La méthode acoustique est moins contraignante mécaniquement et plus économique que la méthode hydraulique.

6.5 Décharges électriques

Une électrode est alimentée par une source de haute tension. L'objet à tester est intercalé entre cette électrode et le plan de masse. En cas de défaut traversant, une ionisation précède un courant de décharge. Ce courant est mesuré et permet de signaler le défaut. La décharge marque généralement la pièce, ce qui permet de garder une trace de l'emplacement du défaut.

Cette technique n'est utilisable que pour tester des objets non métalliques : verre, plastique, etc.

Figure 9 : Détecteur de fuite par courant de décharge



© ATEQ

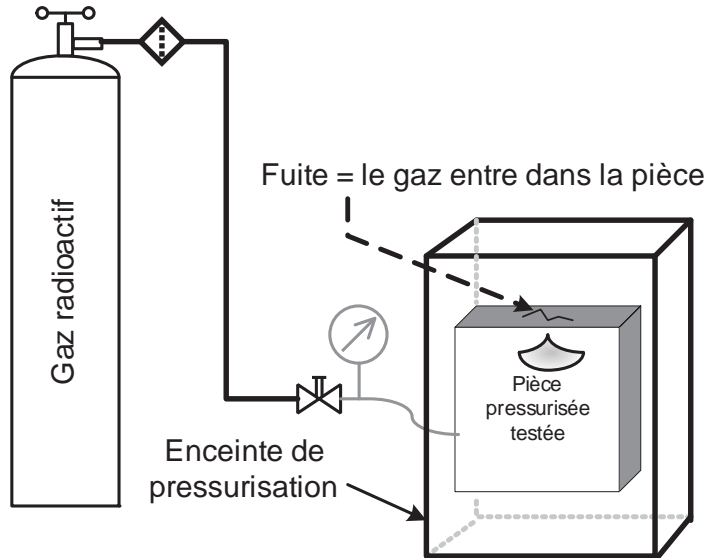
6.6 Détection des radio-isotopes

La technique par radio-isotope est uniquement utilisée pour tester les composants scellés. Cette technique de ressuage est également utilisée avec d'autres gaz (l'hélium, etc.) comme traceur.

Sa mise en œuvre s'opère en trois étapes.

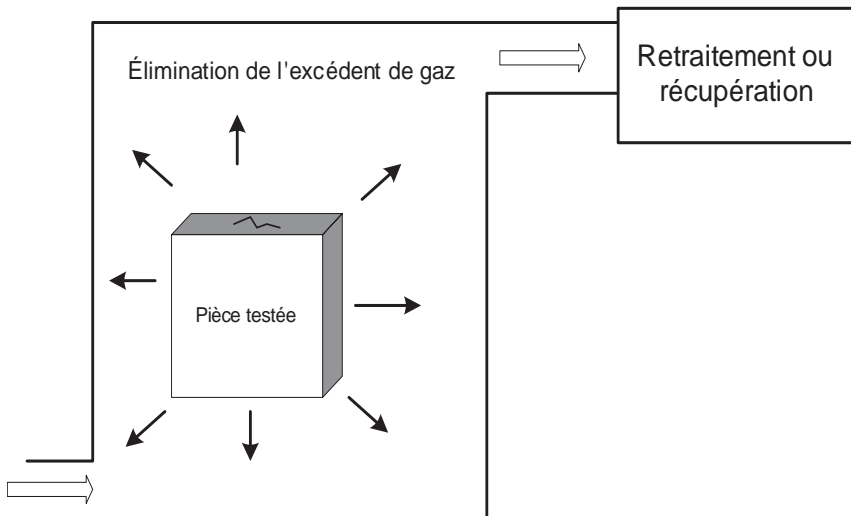
Première étape : on pressurise la pièce à tester avec un gaz radioactif. En cas de défaut profond, le gaz pénétrera à l'intérieur de la pièce.

Figure 10 : Première étape : pressurisation



Deuxième étape : la pièce est ventilée pour la débarrasser de son excédent de gaz traceur.

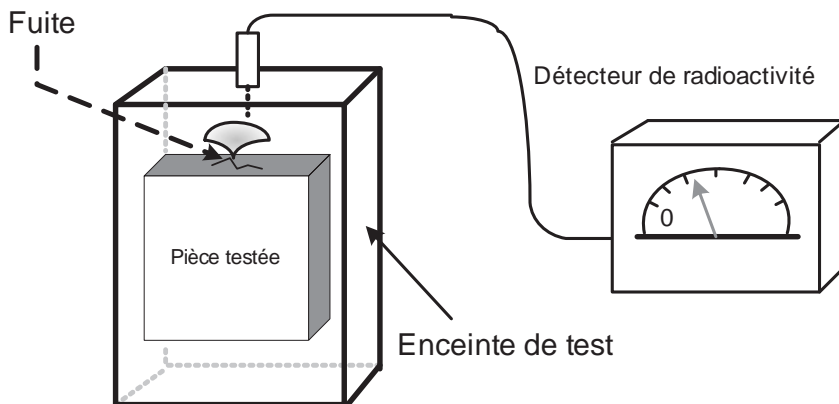
Figure 11 : Deuxième étape : ventilation



Troisième étape : on place l'objet qui a été pressurisé dans une enceinte de test. On mesure ensuite la radioactivité dans l'enceinte. Si celle-ci est

anormalement élevée, c'est que du gaz radioactif a été stocké dans un défaut de la pièce. La radioactivité est un phénomène facilement détectable avec une très grande sensibilité, c'est ce qui fait de cette méthode la plus sensible du marché pour ce type de test.

Figure 12 : Troisième étape : test



Inconvénients : ces instruments sont très chers et la manipulation de gaz radioactifs est soumise à une législation très restrictive qui ne permet pas une utilisation très répandue. C'est donc une méthode rare malgré sa très grande sensibilité.

Cette méthode est également couramment pratiquée avec de l'hélium comme gaz traceur. Le détecteur de radioactivité est alors remplacé par un détecteur d'hélium et l'étape 3 a lieu sous vide.

6.7 L'interface pièce testée - système de contrôle

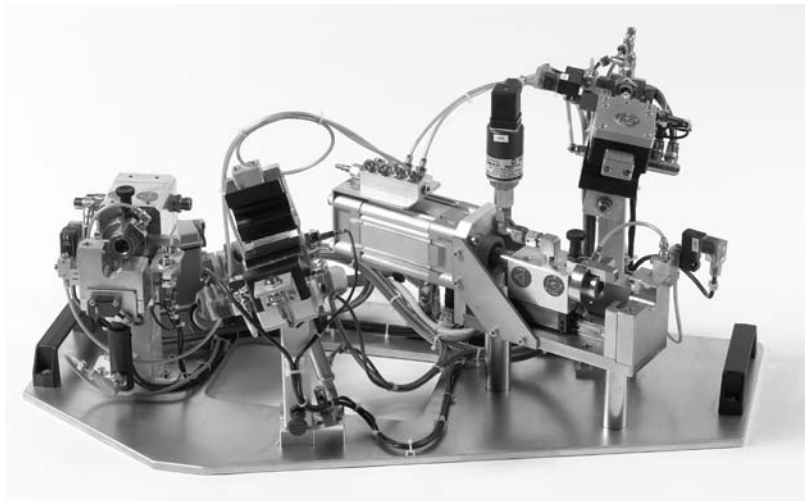
Dans les systèmes industriels, le lien entre une machine de contrôle d'étanchéité et les pièces testées est toujours le fruit d'une adaptation spécifique. La qualité de cette connexion conditionne la fiabilité de la machine en général et du résultat de test en particulier. C'est pourquoi de nombreux efforts ont été faits pour améliorer cette fonction, notamment avec les outillages de connexion automatiques.

Des outillages automatiques de connexion permettent :

- de réduire le temps opérateur : suppression des mouvements manuels ;

- de réduire le temps de cycle dans les systèmes de test sous vide : la connexion de la pièce se fait en même temps que le mouvement de fermeture de la porte de l'enceinte ;
- d'automatiser le chargement/déchargement du système : robots, bras manipulateurs, etc.
- de réduire le nombre de faux fuyards par une meilleure fiabilité de la connexion. Plus d'intervention « parasite » des opérateurs sur les réglages.

Figure 13 : Les outillages de connexion sont de première importance pour la qualité du test



© b.e.a.

Attention, les vérins embarqués dans des chambres à vide doivent être suffisamment étanches pour ne pas perturber le bruit de fond (hélium par exemple). Certains vérins du commerce peuvent convenir, mais on leur préférera le plus souvent des vérins pneumatiques spécialement conçus et fabriqués pour cet usage.

Nous l'avons dit : la fiabilité d'un système industriel de contrôle d'étanchéité dépend entièrement de la fiabilité du mécanisme de connexion pièce/machine. Une fuite à ce niveau entraîne un rejet (probablement à tort) de la pièce testée.

Voici deux indicateurs pertinents qui doivent déclencher un contrôle des systèmes de connexion :

- un taux de rebuts plus important sur une station de test ou sur un outillage de connexion en particulier, que sur les autres postes de production

- un taux de faux fuyards important. Rappel : on entend par *faux fuyards* des pièces rejetées à tort que l'on finit par accepter en les testant une seconde fois.

Il est rare de trouver du premier coup la solution optimale en termes de connexions automatiques. La forme des connecteurs, la dureté des embouts, les tolérances dimensionnelles des pièces testées sont autant de variables qui influent sur le résultat final.

De même, les matériaux utilisés doivent être compatibles avec le test et la pièce. Le système de connexion ne doit pas :

- perturber le vide
- retenir le gaz traceur avec lequel il peut être mis en contact en cas de fuite
- abîmer la pièce par son contact
- perturber la mesure, quelle que soit la technique utilisée

Les systèmes de connexion interchangeables se présentent souvent sous forme de platines que l'on installe dans la machine et qui correspondent au modèle de pièce en cours. Au changement de référence de pièces testées, on change la platine complète. Ces platines sont validées et réceptionnées à part selon une procédure identique à celles de réception de machines, ceci afin de s'assurer de l'intégrité de ce sous-ensemble dont la fiabilité est indispensable.

Pour des seuils de refus assez bas, il est nécessaire de faire le vide dans l'enceinte de test pour permettre l'utilisation d'un spectromètre de masse, pour détecter l'hélium la plupart du temps. Il est utile dans ce cas de connaître les techniques de génération de vide les plus couramment utilisées dans l'industrie. Le vide en détection de fuite a trois justifications :

- permettre au spectromètre de se connecter à l'ambiance à mesurer ;
- réduire le bruit de fond, c'est-à-dire diminuer la pression partielle (ou concentration) naturelle en gaz traceur. Dans le cas de l'hélium, cela permet de diminuer le signal dû à l'hélium de l'air pour « voir » les très petites fuites. Cela revient à améliorer le rapport signal sur bruit ;
- vider une pièce de son air avant remplissage en gaz traceur.

7.1 Notions de vide

Qu'est-ce que le vide ? On dit d'un récipient qu'il est vide quand il ne contient rien. Celui qui nous concerne est l'absence d'air dans une enceinte.

7.1.1 Qu'est-ce que la pression atmosphérique ?

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse de notre planète.

La pression atmosphérique est le poids de la colonne d'air du lieu où l'on se trouve.

Pression atmosphérique = 760 mm de mercure = 1 013 mbar = $1,013 \cdot 10^5$ Pa

Nous avons pris comme définition du vide l'absence d'air. En réalité, ce résultat est quasiment impossible à atteindre et nous devons nous contenter d'une raréfaction de l'air dans l'espace considéré. Cela revient à faire baisser la pression jusqu'à des valeurs suffisamment faibles pour nous permettre de réaliser les opérations prévues. La valeur de cette

pression définit un niveau de vide. En fonctions des niveaux à atteindre, le temps nécessaire et les technologies mises en œuvre varient.

En fait, le seul vide absolu que l'on connaît se trouve entre les molécules. Donc du point de vue macroscopique, c'est-à-dire celui qui nous intéresse, il faut considérer le vide comme une grandeur continue de pression qui part de l'atmosphère et qui descend dans l'infiniment petit, jusqu'à devenir négligeable, mais pas nulle.

Pour bien se rendre compte, nous pouvons regarder le nombre de molécules présentes dans un volume de 1 mm^3 quand on fait le vide à l'intérieur :

$1\ 000 \text{ hPa} \Rightarrow 3.10^{16}/\text{mm}^3$ (pression atmosphérique)

$100 \text{ hPa} \Rightarrow 3.10^{15}/\text{mm}^3$

$10 \text{ hPa} \Rightarrow 3.10^{14}/\text{mm}^3$

$1 \text{ hPa} \Rightarrow 3.10^{13}/\text{mm}^3$: niveau de passage en mode grosse fuite des détecteurs de fuite hélium

$10 \text{ Pa} \Rightarrow 3.10^{12}/\text{mm}^3$: niveau de passage en mode petite fuite des détecteurs de fuite hélium

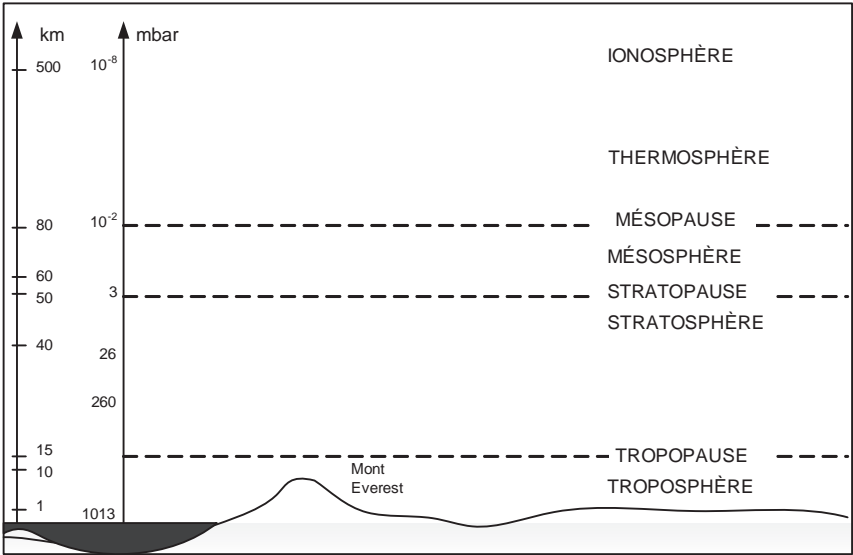
$1 \text{ Pa} \Rightarrow 3.10^{11}/\text{mm}^3$: vide limite d'une pompe à palettes standard

Vu comme ça, on comprend qu'on est loin de l'absence totale d'air. La raréfaction de l'air, et donc des gaz qui le composent, doit permettre de connecter un spectromètre, de réaliser des processus de fabrication comme des traitements de surface ou des usinages microscopiques, de faire des analyses, etc. La « qualité » du vide requise dépend donc de la raison pour laquelle on le fait.

Le vide grossier n'est qu'une étape intermédiaire dans notre cas et nous ne nous y attarderons pas. Il est quand même utilisé dans de nombreuses applications :

- pour la manipulation de pièces par ventouses ;
- en milieu hospitalier pour la connexion de systèmes de drainage ;
- dans des fours ;
- dans la détection de fuite par remontée de pression, etc. ;
- vider une pièce avant l'injection de gaz traceur.

Figure 1 : Les différentes couches de l'atmosphère



L'altitude est aussi un moyen d'obtenir le vide. Les stations orbitales se servent de ce phénomène pour leurs expériences.

7.1.2 Composition de l'atmosphère

L'air qui constitue notre atmosphère est un mélange de gaz. Sa constitution est la suivante :

Gaz	% en poids	% en volume	Pression partielle en Pa
Azote	75,51	78,1	79200
Oxygène	23,01	20,93	21200
Argon	1 ,29	0,93	947
Gaz carbonique	0,04	0,03	31
Néon	1,2.10 ⁻³	1,8.10 ⁻³	1,9
Hélium	7.10 ⁻⁵	7.10 ⁻⁵	0,53
Méthane	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	0,2
Krypton	3.10 ⁻⁴	1,1.10 ⁻⁴	0,11
Oxyde d'azote NO ₂	6.10 ⁻⁵	5.10 ⁻⁵	5.10 ⁻²
Xénon	4.10 ⁻⁵	8,7.10 ⁻⁶	9.10 ⁻³
Ozone	9.10 ⁻⁶	7.10 ⁻⁶	7.10 ⁻³
TOTAL	100 %	100 %	101 380

Le gaz majoritaire est l'azote, vient ensuite l'oxygène, indispensable à la vie et à la combustion. Les autres constituants, on le voit, sont présents dans de faibles proportions, et sont donc des candidats potentiels pour être des gaz traceurs pour des contrôles d'étanchéité. C'est le cas par exemple de l'hélium et l'hydrogène qui sont les plus courants.

7.1.3 La pression partielle

Dans un mélange gazeux, la pression partielle d'un des gaz le constituant sera considérée comme égale au pourcentage de ce gaz dans le mélange que multiplie la pression absolue du mélange.

Pression partielle d'un gaz = Pression absolue du mélange \times % gaz

La loi de Dalton nous dit que la pression partielle d'un gaz parfait est le rapport des fractions molaires. Dans la pratique, on considère que la somme des pressions partielles est égale à la pression absolue ou pression totale.

$P_{abs} = \Sigma PP_{gaz}$

Cela vient du fait que dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte comme s'il était seul à occuper le volume en entier.

Exemple de calcul

à pression atmosphérique (1013 mbar = 101 300 Pa)

la pression partielle d'argon est : $P_{Ar} \Rightarrow 0,93 \% \times 101\,300 = 942,1 \text{ Pa}$
(9,421 mbar)

la pression partielle d'oxygène est : $P_{O_2} \Rightarrow 21 \% \times 101\,300 = 21\,273 \text{ Pa}$
(212,73 mbar)

Les différences avec le tableau du paragraphe 7.1.2 Composition de l'atmosphère proviennent du fait que ce ne sont pas des gaz parfaits.

7.2 Les niveaux de vide

Le niveau de vide se mesure par la pression totale qui règne à l'endroit considéré. Les applications requièrent des niveaux de vide différents :

Le vide grossier : de 100 à 1 hPa

Réseau milieu hospitalier, manipulation de pièces par ventouses, emballage sous vide, lyophilisation, détection de fuite par remontée de pression, fusion...

Vide moyen (ou primaire) : 1 à 10^{-3} hPa

Détection de fuite par spectrométrie de masse, lyophilisation...

Vide poussé (ou secondaire) : de 10^{-3} à 10^{-7} hPa

Cellule de mesure de spectromètre de masse, semi-conducteur, métallisation, traitement de surface, nanotechnologies...

Ultra vide : $< 10^{-7}$ hPa

Recherche fondamentale, nucléaire...

7.3 Génération de vide : le pompage

Comme nous l'avons vu, le vide n'est jamais total et il se mesure par la pression. En fonction de cette qualité du vide recherché, il faudra mettre en œuvre différentes technologies de pompes qui ont des performances différentes et souvent complémentaires.

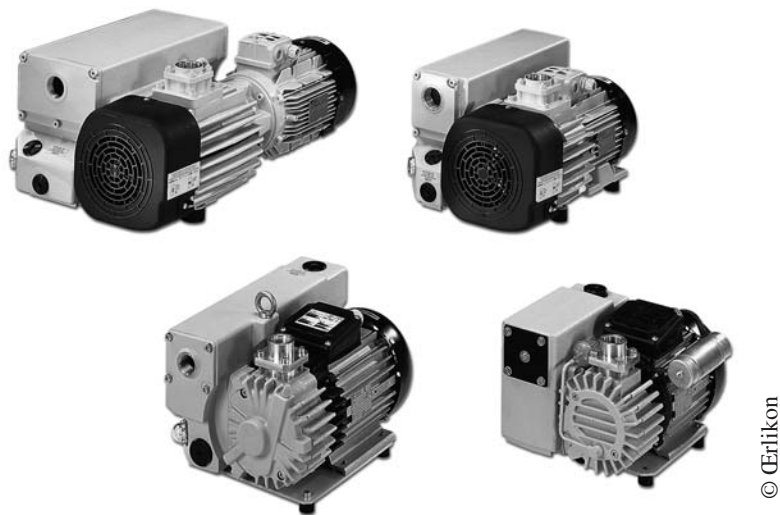
C'est pourquoi il est courant de trouver trois technologies différentes de pompe dans les systèmes de détection de fuite par hélium sous vide. Les pompes à palettes assurent un vide grossier, les pompes roots améliorent ce vide et surtout accélèrent le pompage pour la cadence ; enfin, une pompe turbo ou moléculaire maintiendra la cellule du spectromètre de masse sous un vide poussé.

Sans entrer démesurément dans le détail, ce chapitre expose les types de pompes utilisées et leurs gammes de fonctionnement.

Ce qui caractérise avant tout une pompe c'est son débit pour une pression donnée. La performance débit/pression est fournie par le constructeur au travers d'une courbe. L'autre donnée importante est le vide limite, c'est-à-dire la plus basse pression que peut atteindre la pompe. Pour mesurer le vide limite, on obture l'admission de la pompe. La pression dans l'installation va ainsi descendre jusqu'à une pression stable à laquelle le débit sera nul. Ce régime de fonctionnement n'abîme absolument pas les pompes. Par exemple, c'est sur ce vide limite qu'elles fonctionnent quand toutes les vannes du réseau sont fermées.

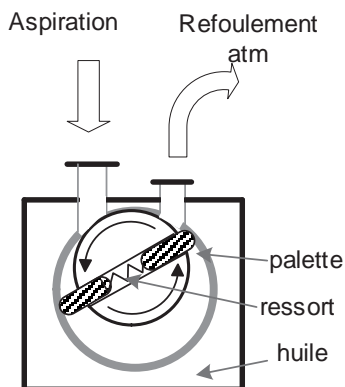
7.3.1 Pompes à palettes

Figure 2 : Les pompes à palettes couvrent une large gamme de débit



Le rotor est excentré par rapport au stator. Les palettes tournent en frottant le stator car elles sont poussées vers l'extérieur par un ressort. Le parcours effectué constitue une variation du volume poussé par chaque palette. Il s'accroît côté aspiration et diminue côté refoulement. L'étanchéité entre l'aspiration et le refoulement est assurée par le film d'huile entre le rotor et le stator. C'est pour ça qu'on les appelle quelquefois des pompes à joint d'huile. Pour cela, les palettes barbotent dans cette huile.

Figure 3 : Pompe à palette simple étage

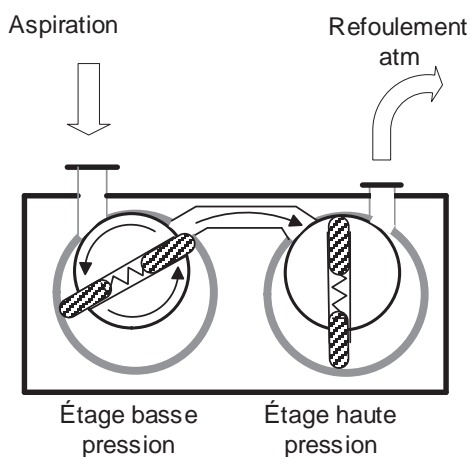


L'huile est utilisée pour :

- la lubrification ;
- l'étanchéité en bout de palette ;
- la dissipation thermique.

Pour plus d'efficacité, certaines pompes contiennent deux étages de transfert en série. On les appelle alors des pompes double étage ou bi-étagées.

Figure 4 : Pompes à palettes à deux étages



Ce type de pompe est utilisé entre autre par les frigoristes pour tirer au vide les circuits frigorifiques avant de les charger en fluide.

Figure 5 : Les pompes à palettes servent surtout pour les petits débits

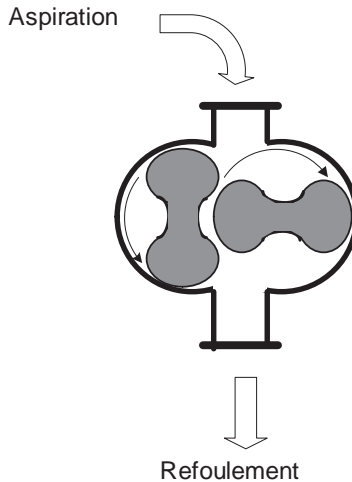


Pour le prévidage de l'installation, on utilisera des pompes appelées « multipalettes ». Le principe de fonctionnement est le même à cette particularité près : elle possèdent plus de deux palettes, de 3 à 5 en général. Cela leur confère un débit supérieur à haute pression (P_{atm} à 10 mbar) et une grande robustesse. Mais leur vide limite est moins bon que pour les pompes bi-palettes traditionnelles.

7.3.2 Pompes roots

Les pompes de cette technologie sont des pompes de transfert. Leur capacité propre de pompage est ridicule, surtout en termes de taux de compression. Mais associée à une pompe primaire, généralement à palettes, elle améliore substantiellement ses performances. C'est pourquoi aux États-Unis elles ont hérité du nom de *booster*.

Figure 6 : Principe de fonctionnement des pompes de transfert par lobes



Le principe est basé sur la rotation synchronisée par engrenages de deux lobes dont la forme assure deux génératrices complémentaires. L'espace entre ces deux lobes constitue un jeu mécanique qui doit être aussi faible que possible, mais pas nul. Les lobes ne doivent pas se toucher. Le jeu fonctionnel étant localisé entre les deux axes de rotations, le volume pompé est transféré par l'espace compris entre l'extérieur des parties en rotations et le carter de la pompe.

Compte tenu de sa conception et de son absence de joints d'huile, les pompes roots ont un faible taux de compression (10 à 100), mais une

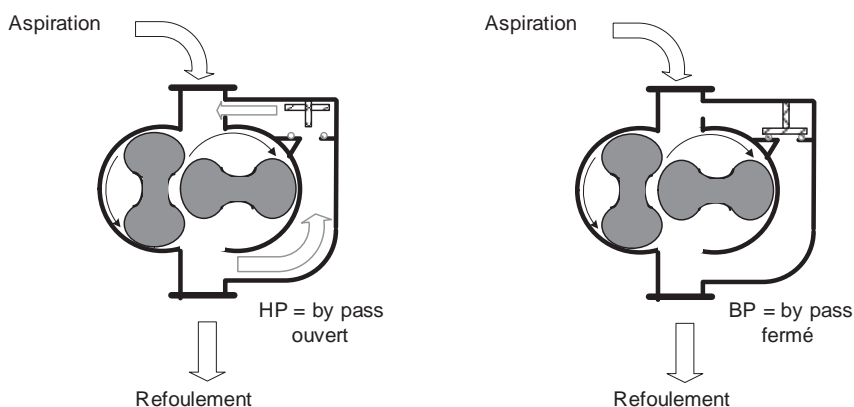
grande vitesse de pompage. Ils sont donc toujours associés à une pompe primaire.

► Principe du clapet de décharge pour un fonctionnement hors plage

Les pompes roots ne supportent pas les pressions « élevées », supérieures à environ 100 mbar à l'aspiration. Elles trouvent toute leur efficacité pour des pressions plus basses, là où les pompes à palettes « s'essouffent ». C'est pourquoi pour permettre de démarrer le pompage à la pression atmosphérique, certains modèles de pompes roots sont équipés d'un clapet de bypass qui évacue l'excédent de débit du refoulement vers l'aspiration.

Ce clapet intégré permet de démarrer le pompage à la pression atmosphérique. Dans les systèmes de contrôle d'étanchéité économiques, le groupe de pompage est souvent constitué d'une pompe multi-palettes associée à un roots avec clapet de bypass (ou de décharge).

Figure 7 : Fonctionnement du clapet de décharge



► Vérification du sens de rotation

À la mise en service de la pompe « roots », les moteurs triphasés exigent une vérification, et si nécessaire une correction, du sens de rotation.

Quand le moteur est externe, on peut voir facilement son sens de rotation. Si le moteur est à « rotor sous vide », on ne peut pas voir l'axe de rotation, et le sens de marche du ventilateur ne nous est d'aucun secours. En effet, ce dernier est doté de son propre moteur équipé d'un condensateur ; il tourne donc forcément dans le bon sens. Le seul moyen vraiment efficace est de donner une impulsion au moteur et de regarder par l'orifice d'aspiration comment tournent les lobes. Le sens correct est

quand on les voit monter vers soi au centre, le transfert se faisant à l'extérieur comme nous l'avons vu (voir figure 6).

L'autre moyen est de chronométrer le temps de pompage nécessaire pour descendre une enceinte jusqu'à une pression donnée. Si la pompe tourne à l'envers, son manque d'efficacité sera mis en évidence par une descente en vide beaucoup trop longue.

7.3.3 Pompes turbo moléculaires

Une pompe turbo est constituée d'ailettes orientées vers le refoulement de la pompe. Comme elle ne fonctionne qu'à un niveau de vide poussé, les molécules sont très mobiles avec un libre parcours moyen important. Leur captation est donc statistique. Le nombre d'étages varie en fonction du modèle de pompe. Pour faciliter sa fabrication, on ne fait tourner qu'un étage sur deux créant ainsi un mouvement relatif.

Leur vitesse de rotation est généralement comprise entre 27 000 et 60 000 tours par minute.

Figures 8 et 9 : Deux modèles différents de pompes turbo



Pour lui assurer ces vitesses de rotation élevées, ce type de pompe est alimenté par un coffret électronique de synchronisation. C'est pourquoi au démarrage d'un spectromètre détecteur d'hélium, on voit s'afficher des messages comme : accélération pompe turbo, pompe turbo synchronisée, défaut synchronisation, etc. Son entretien est simple, il consiste surtout à un graissage périodique des paliers et roulements. Ces pompes étant équilibrées, il faut respecter scrupuleusement les quantités

de graisse injectées à chaque point de lubrification. Il existe des modèles de pompe turbo sans lubrification, à paliers magnétiques. Le rotor est maintenu en lévitation et en rotation grâce à des champs magnétiques asservis. Il n'y a donc plus de frottement, donc plus d'entretien à faible périodicité. Mais ces modèles sont chers et ne sont quasiment pas utilisés dans la détection de fuite. Ils sont surtout employés dans des process de fabrication qui exigent une grande fiabilité et peu d'arrêts.

7.3.4 Pompes moléculaires

Figure 10 : Une pompe moléculaire



Ce type de pompe a été conçu vers 1922 par Fernand Holweck. Elle a bien sûr été améliorée depuis.

Une pompe moléculaire est constituée d'un cylindre tournant dans un second cylindre contenant une empreinte hélicoïdale. Les molécules de gaz se déplacent à grande vitesse, et en cas de collision avec la paroi elles restent collées un court instant avant de repartir. L'empreinte hélicoïdale donne une direction majoritaire vers la sortie de refoulement.

Figure 11 : Une pompe moléculaire



© Adixen

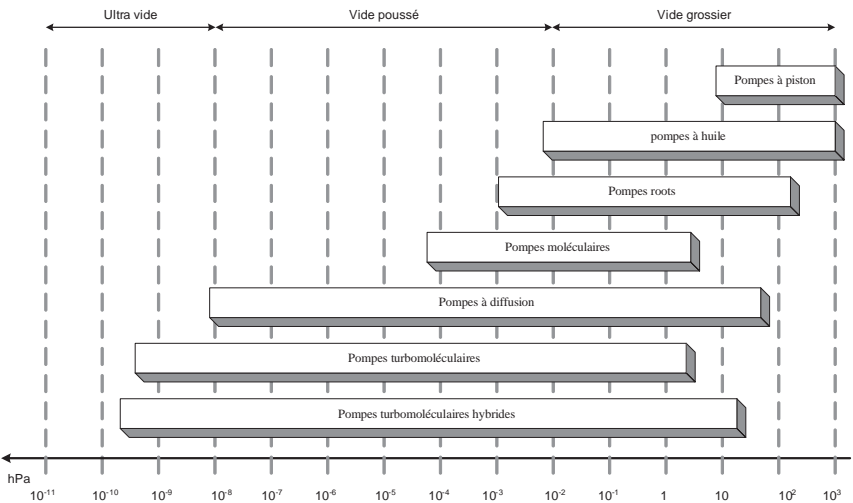
Pour améliorer les performances sans augmenter l’encombrement de la pompe, le parcours est composé de deux étages emboîtés l’un dans l’autre.

7.3.5 Pompes turbo moléculaires hybrides

C’est une pompe qui associe les deux technologies, turbo et moléculaire, en série pour plus d’efficacité.

Plage d’utilisation des pompes :

Figure 12 : Une pompe moléculaire



7.3.6 Groupe de pompage pour la détection de fuite

Le niveau de vide couramment utilisé en détection de fuite se situe à des pressions inférieures à 100 Pa (1 mbar). Le rôle du groupe de pompage est double :

- obtenir une pression absolue qui permette au détecteur d'être connecté à la chambre de test et de mesurer ainsi la pression partielle d'hélium qui y règne
- atteindre un taux d'hélium résiduel dans la chambre qui soit négligeable comparé au seuil de rejet (rapport signal sur bruit). Le test hélium ne sera fiable qu'à cette condition

Le dégazage, la température et l'humidité peuvent impacter la durée du pompage. Au-dessus de 10 Pa (0,1 mbar) ces phénomènes sont négligeables, d'où l'intérêt de travailler à « haute pression ». D'autre part, les traitements de surface sont une autre source de perturbations et doivent être évités dans une enceinte de test sous vide chaque fois que c'est possible.

7.3.7 Dimensionnement du groupe de pompage pour un test sous vide

Nous traiterons dans ce chapitre du calcul de la descente en vide en fonction de la capacité de pompage et du volume connecté.

Nous avons vu que le vide dans une enceinte est nécessaire pour faire un test à l'hélium pour deux raisons : le spectromètre de masse ne peut être connecté à la chambre de test que si une pression très basse règne dans celle-ci. Les pressions maximales admissibles sont des caractéristiques propres à chaque détecteur. Elles varient généralement de 10 à 20 mbar en mode grosse fuite et de 2 à 10^{-1} mbar en mode petite fuite. Le mode de calcul présenté ici est adapté aux systèmes de contrôle d'étanchéité. Sa précision est suffisante pour les cas qui nous concernent.

Une des difficultés réside dans le fait que la performance d'une pompe varie en fonction de la pression régnant à l'aspiration. Son débit n'est pas constant mais varie au fur et à mesure que le vide s'améliore. C'est la notion de plage d'utilisation qui nous permettra de sélectionner le type de pompe à mettre en œuvre. Ensuite, à l'intérieur de chaque plage, nous effectuerons un calcul qui nous permettra de connaître le temps qui sera nécessaire pour passer d'une pression à une autre. Pour connaître le temps total, nous additionnerons les durées calculées pour chaque plage. Si le temps est trop long par rapport au temps de cycle objectif, il faut

choisir des pompes plus puissantes. Il est alors utile de regarder quelle est la plage de pompage qui est la plus pénalisante et de renforcer celle-là.

Comment prendre en compte le fait que la performance des pompes à vide varie en suivant la pression ?

Pour simplifier l'approche, nous utiliserons un coefficient de sécurité qui tiendra compte de la décroissance de cette capacité qui est liée à la pression. On peut aussi utiliser la vitesse de pompage moyenne sur la plage de pression à parcourir que l'on extraira de la courbe donnée par le constructeur.

Figures 13 et 14 : Jauges pour mesure du vide



© Eriikon

Voici une formule pratique pour évaluer le temps nécessaire pour descendre la pression dans une enceinte dont on connaît le volume, de la pression P_1 à la pression P_2 :

$$t = 2,3 \times \frac{V}{S} \times \text{Log} \left[\frac{P_1}{P_2} \right] \quad (\text{Formule n}^\circ 20)$$

- | | |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| t | temps en seconde pour descendre la pression de P_1 jusqu'à P_2 |
| V | volume à pomper en m^3 |
| S | vitesse de pompage moyenne constructeur en m^3/s dans la plage de pression allant de P_1 à P_2 |

Le logarithme étant décimal, si on prend un rapport de décade, pour descendre de 10^5 Pa (1 000 mbar) jusqu'à 10^3 Pa (10 mbar), ce rapport

se simplifie par équivalence avec le nombre de décades (2 dans l'exemple présent).

Exemple

Quel est le temps nécessaire pour tirer au vide une enceinte cubique de 1 mètre de côté et atteindre une pression de 1 000 Pa ?

Volume = 1 m³

$P_1 = 10^5$ Pa

$S = 63 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0175 \text{ m}^3/\text{s}$

$P_2 = 10^3$ Pa

Le temps de pompage sera de 263 secondes.

Pour faire un calcul quand on n'a pas la courbe de pompage, on part du débit nominal que l'on multiplie par 0,7, ce qui nous donne une estimation tout à fait correcte du temps de pompage nécessaire.

Ce coefficient de 0,7 peut varier selon la confiance que l'on a dans le débit donné par le constructeur de la pompe (catalogue). Dans le doute, on peut prendre 0,65.

Pour un calcul de descente de bruit de fond hélium dans une enceinte, on peut utiliser la même formule mais en utilisant la vitesse de pompage hélium de la pompe ou du groupe de pompage. En effet, sous vide, les pompes n'ont pas des caractéristiques équivalentes en fonction de la nature du gaz pompé. Comme l'air est un mélange, à basse pression il sera plus difficile de pomper certains de ses composants comme l'hélium. Il faut rappeler que sa pression partielle dans l'air au départ à pression atmosphérique est déjà très basse : $5,3 \cdot 10^{-3}$ mbar soit 0,53 Pa.

La vitesse de pompage hélium est rarement connue, sauf pour les pompes turbo et moléculaires. Pour pouvoir dimensionner un groupe de pompage d'enceinte, il va falloir l'estimer. On peut prendre comme première estimation un ratio de 1/3 par rapport au débit nominal pour des pompes à palette (joint d'huile) ou roots. Ainsi une pompe de 100 m³/h aura une vitesse de pompage hélium estimée de 33,3 m³/h soit de 9,3 litres/seconde.

Attention, les pompes multipalettes ont des vitesses de pompage hélium moindres que les pompes à palettes bi-étagées. Elles ne sont pas particulièrement bien adaptées à la réduction du bruit de fond hélium à moins de les associer à une pompe de type roots.

Ces formules sont valables pour des pressions autour de 0,1 mbar. Pour des pressions plus basses, les pompes turbo moléculaires sont plus adaptées et leurs vitesses de pompage hélium sont connues.

Cela va nous servir car l'hélium naturel contenu dans l'air constitue un bruit de fond gênant pour détecter les petites fuites. En retirant cet hélium, ou plutôt en réduisant sa pression partielle pour la rendre négligeable, on augmente ainsi l'acuité du système de détection. C'est le rapport signal sur bruit qui intègre le niveau du bruit de fond au moment où l'on prend la mesure. La valeur « S » du signal dans ce rapport correspond à la valeur du signal hélium mesuré pour une fuite égale au seuil de refus. Si ce rapport est grand, cela signifie que la différence entre une pièce « étanche » et une pièce rejetée est importante et le risque de se tromper (risque fournisseur, de rejeter à tort une pièce) est faible. Cette caractéristique du dimensionnement impacte directement le taux de faux rebus.

On trouve sur le terrain deux formules largement utilisées :

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Bruit}} = \frac{\text{Valeur du signal hélium pour fuite} - \text{seuil de refus}}{\text{Valeur du signal hélium en l'absence de fuite}}$$

ou encore :

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Bruit}} = \frac{\text{Signal hélium pour fuite} - \text{signal hélium sans fuite}}{\text{Signal hélium pour fuite}}$$

Le calcul de dimensionnement va donc se dérouler en deux étapes :

- première étape : descente de la pression totale (vide) ;
- deuxième étape : diminution du bruit de fond – obtention du rapport signal sur bruit désiré.

7.3.8 D'où vient le bruit de fond ?

Le bruit de fond est le signal donné par le spectromètre lorsqu'il n'y a aucune fuite sur la pièce testée. Ses origines peuvent être multiples et il faut les connaître pour pouvoir effectuer des recherches efficaces en cas de problème de bruit de fond trop élevé sur une machine.

Il peut avoir plusieurs origines :

- la connexion outillage/pièce ;
- l'outillage ou dispositif de connexion lui-même ;
- la connexion ou liaison outillage/machine ;
- l'hélium résiduel de l'air ;
- une fuite sur l'enceinte ou la porte (air entrant) ;
- huile de la pompe polluée par de l'hélium.

Si tout est suffisamment étanche, le bruit de fond sera le résultat de la capacité du groupe de pompage à pomper l'hélium et du temps de pompage alloué.

7.4 Pompage parallèle

Pour satisfaire aux cadences industrielles, on dimensionne les pompes en fonction du temps de cycle admissible.

Les détecteurs d'hélium ont une capacité de pompage intrinsèque, mais elle est limitée. On aura donc recours pour des volumes d'enceinte importants et/ou des temps de cycle courts à l'ajout d'un groupe auxiliaire.

Le détecteur d'hélium (spectromètre) ne recevra alors qu'une partie du flux de fuite, un échantillon en quelque sorte. Le rapport du flux partant au travers du groupe auxiliaire et du flux aspiré par le détecteur est déterminé par leurs vitesses de pompage hélium respectives.

Le seuil de rejet du détecteur devra tenir compte de ce ratio.

Dans les systèmes sous vide, une fuite calibrée dont le débit est connu est mesurée. En comparant le résultat de la mesure avec celui de la fuite étalon, on calcule ce ratio appelé coefficient d'affaiblissement ou facteur machine. Cette séquence de mesure est appelée : calibrage dynamique.

$$Q_b = \frac{S_b}{(S_b + S_a)} \times Q_t \text{ (Formule n° 21)}$$

Avec :

Q_b	lecture détecteur hélium en $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
S_b	vitesse de pompage hélium détecteur en m^3/s
S_a	vitesse de pompage hélium des pompes auxiliaires en m^3/s
Q_t	taux de fuite à détecter en $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

Dans la pratique, on utilise souvent S_a et S_b exprimé en l/s

Exemple de calcul

$S_b = 0,6 \text{ litre/s}$

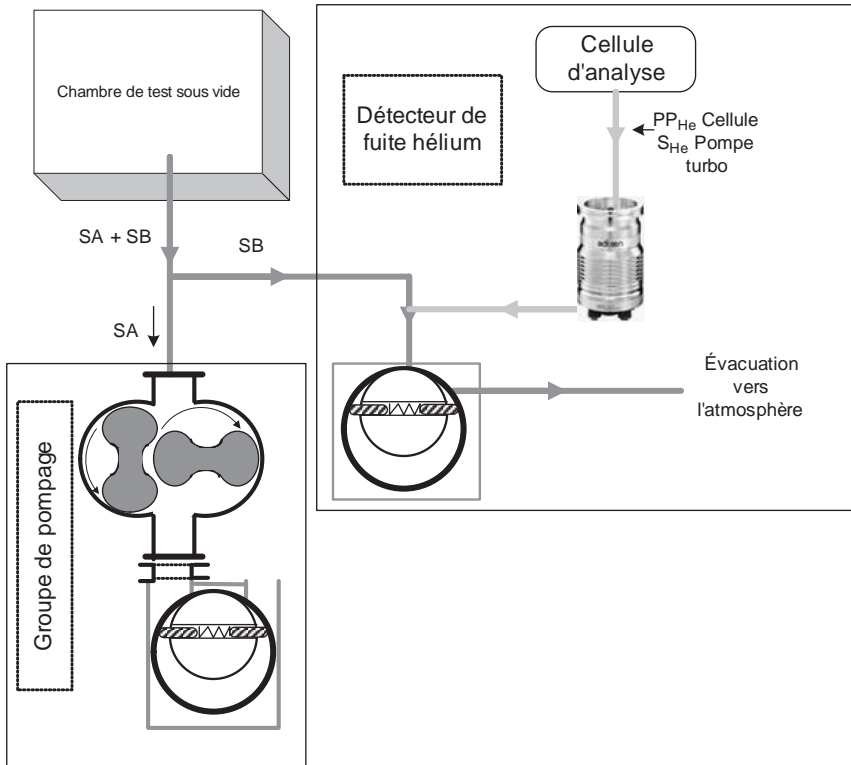
$S_a = 2,5 \text{ litres/s}$

$Q_t = 1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \text{ d'hélium}$

$$Q_b = \frac{0,6}{(2,5 + 0,6)} \times 10^{-8} = 1,9 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$$

Le coefficient d'affaiblissement est 0,19. On peut prendre la valeur inverse, 5,17, comme coefficient machine. Il faut multiplier la mesure du détecteur par ce coefficient pour obtenir la valeur réelle.

Figure 15 : Répartition des flux d'hélium dans le circuit de pompage et mesure



7.5 Temps de réponse

Lorsqu'il y a une fuite sur une pièce testée dans une chambre à vide, le signal hélium du détecteur ne s'établit pas instantanément. Les deux facteurs qui interviennent caractérisent le temps que va mettre le spectromètre à mesurer un signal stable et représentatif de la fuite : le temps d'apparition de la fuite et le temps de réponse du détecteur.

7.5.1 Temps d'apparition de la fuite

Ce temps est lié à la pièce testée elle-même. C'est le temps nécessaire pour que l'hélium, amené dans la pièce pendant la phase de pressurisation,

traverse la paroi et arrive physiquement dans l'enceinte. Le chemin n'est quelquefois pas directe et peut passer par des volumes intermédiaires (deux joints toriques successifs par exemple). Si le temps d'apparition de la fuite est supérieur au temps de mesure du détecteur pendant un cycle automatique, il y a un risque de ne pas détecter certaines fuites.

7.5.2 Temps de réponse du détecteur

Le détecteur a une vitesse de pompage qui lui est propre et qui dépend des pompes qui l'équipent. Quand la fuite apparaît dans l'enceinte, le flux d'hélium et la pression partielle qui en découle s'établissent en fonction de ces vitesses de pompage hélium. En production industrielle, on attend rarement d'avoir 100 % du signal. On arrête la mesure dès que le signal du détecteur assure un reflet fiable de ce qu'il y a dans la chambre de test. La valeur minimale est 63 % et correspond à un temps écoulé égal à une fois la constante de temps du système.

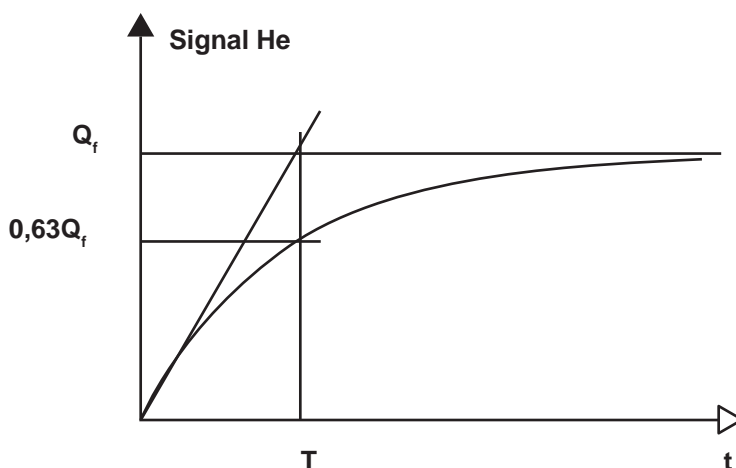
Le temps de réponse correspond au temps nécessaire pour atteindre 63 % du signal :

$$T = \frac{V}{S}$$

C'est la constante de temps du système.

Le signal de fuite sur le détecteur s'établit sous cette forme :

Figure 16 : Établissement du signal hélium sur le détecteur en fonction du temps



Exemples de calcul de la constante de temps

Exemple n° 1 :

V = 50 litres

S = 0,2 litre/s (vitesse de pompage hélium du détecteur)

⇒ T = 50/0,2 = 250 secondes (4,2 minutes)

Exemple n° 2 :

V = 50 litres

S = 4,4 litres/s

⇒ T = 50/4,4 = 1,14 seconde

Le temps de réponse est bien plus court dans l'exemple n° 2. On voit tout de suite l'importance d'avoir un détecteur avec une vitesse de pompage élevée pour un système réactif et rapide.

En fait, quand une fuite (Q_f) apparaît dans la chambre de test, le signal (Q) arrivant au détecteur va s'établir selon cette loi :

$$Q = Q_f \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \text{ (Formule n° 22)}$$

Avec T = V/S comme nous venons de le voir. Ce tableau nous donne la correspondance entre la constante de temps d'un système et la proportion de la valeur de fuite vue par le détecteur en fonction du temps.

Il faudra	Pour obtenir
0,63 Q _f	T
0,9 Q _f	2,3 T
0,95 Q _f	3 T
0,99 Q _f	4,6 T

7.5.3 Disparition du signal

Nous avons vu que le signal, ou flux d'hélium venant de la fuite vers le détecteur, ne s'établit pas instantanément. Il en va de même quand le flux d'hélium dans la chambre ou la canalisation disparaît. Le valeur indiquée par le spectromètre va mettre un certain temps pour rejoindre la valeur réelle du flux. C'est encore le temps nécessaire pour que le détecteur recouvre sa sensibilité après avoir été exposé à une fuite donnée.

Il se calcule comme cela :

$$t_d = \frac{V}{S} \times 2,3 \times \log \frac{Q}{Q_{bf}} \text{ (Formule n° 23)}$$

Avec :

t	temps de disparition du signal en secondes
V	volume en m ³ (unité de terrain : litres)
S	vitesse de pompage hélium en m ³ /seconde (ou litres si volume en litres)
Q	fuite à mesurer en Pa.m ³ /sec (mesurée)
Q _{bf}	plus petite fuite détectable (bruit de fond prévu en Pa.m ³ /s)

Exemple de calcul d'un temps de disparition du signal

S = 4,4 litres/seconde V = 10 litres

Q = 1 × 10⁻⁵ Pa.m³/s et Q_{bf} = 1 × 10⁻⁹ Pa.m³/s

$$t_d = \frac{10}{4,4} \times 2,3 \times \log \left(\frac{10^{-5}}{10^{-9}} \right) = 21 \text{ secondes}$$

Attention, ce temps calculé ne tient pas compte d'une « mémoire hélium » éventuelle du système. C'est le temps lié au détecteur uniquement. Si d'autres phénomènes libèrent de l'hélium dans le système, le temps sera plus long et il conviendra alors d'en chercher les causes (hélium dans l'huile des pompes par exemple).

7.6 Mesure de la vitesse de pompage hélium d'un groupe de pompage

La valeur de 2,3 × T correspond au temps nécessaire pour descendre d'une décade le signal hélium sur un volume donné. Cette particularité est très utile pour mesurer la vitesse de pompage hélium d'une installation quand on ne la connaît pas.

La méthode à suivre est la suivante. Mettre une fuite calibrée en liaison avec l'enceinte de test dont on connaît le volume. Laisser le signal s'établir sur le détecteur. Fermer la vanne de la fuite calibrée en démarrant le chronomètre. Mesurer le temps qu'il faut au signal indiqué

par le détecteur pour remonter d'une décade (ou de deux si c'est trop rapide).

À l'aide de cette formule :

$$t = 2,3 \times \frac{V}{S} \times \text{Log} \left[\frac{P_1}{P_2} \right]$$

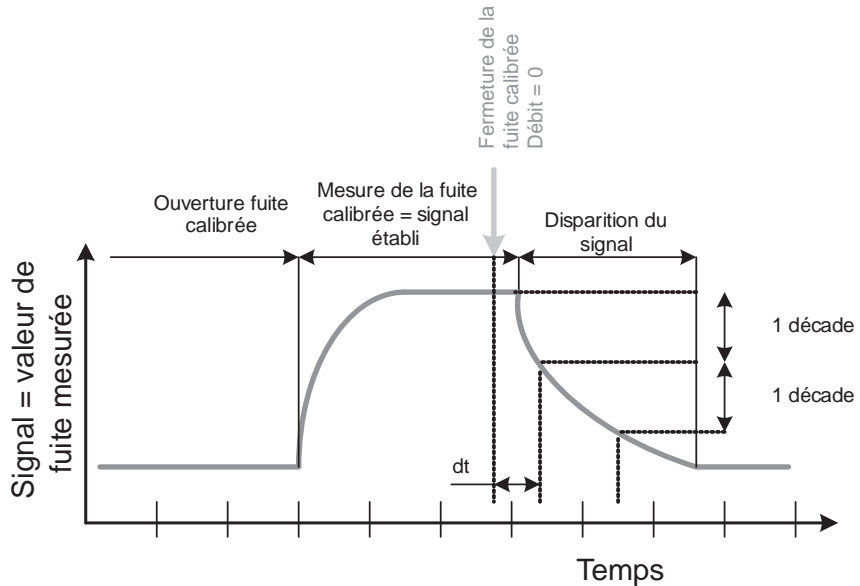
On peut extraire S_{He} , la vitesse de pompage hélium que l'on veut connaître.

$$S = 2,3 \times \frac{V}{t} \times \text{Log} \left[\frac{P_1}{P_2} \right] \text{ (Formule n° 24)}$$

Avec :

$\text{Log} (P_1/P_2)$ = nombre de décades parcourues par le signal

Figure 17 : Mesure de vitesse de pompage hélium d'une installation



Cette mesure nous permet de travailler avec des valeurs sûres et non estimatives.

Masses molaires des fluides frigorigènes

Frigorigène	Formule	Masse molaire
HFC - 32	CH ₂ F ₂	52,02
HFC - 125	CHF ₂ CF ₃	120,02
HFC - 134a	CH ₂ FCF ₃	102,03
HFC - 143a	CH ₃ CF ₃	84,04
HFC - 152a	CH ₃ CHF ₂	66,05
HFC - 123	CHC ₁₂ CF ₃	152,93
HFC - 124	CHC ₁ FCF ₃	136,48
Mélanges de HFC		
R404A	R125/143A/134a (44/52/4)	97,6
R407A	R32/125/134a/ (20/40/40)	90,11
R407B	R32/125/134a (10/70/20)	102,94
R407C	R32/125/134a (23/25/52)	86,20
R407D	R32/125/134a (15/15/70)	90,96
R407E	R32/125/134a (25/15/60)	83,78
R410A	R32/125 (50/50)	72,58
R507A	R125/143a/ (50/50)	98,86
Hydrocarbures		
RC270	CH ₂ CH ₂ CH ₂ (cyclopropane)	42,08
R290	CH ₂ CH ₃ CH ₃ (propane)	44,10
R600	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₃ (butane)	58,12
R600a	CH(CH ₃) ₂ -CH ₃ (isobutane)	58,12
R170	CH ₃ CH ₃ (éthane)	30,07
R1270	CH ₃ CH=CH ₂ (propylène)	42,08
Fluides inorganiques		
R718	H ₂ O (eau)	18,02
R744	CO ₂ (dioxyde de carbone)	44,01
R717	NH ₃ (amoniac)	17,03

Liquide	γ (N·m ⁻¹) à 20 °C
eau (à 20 °C)	73×10^{-3}
eau (à 0 °C)	$75,6 \times 10^{-3}$
huile végétale	32×10^{-3}
éter	17×10^{-3}
mercure	480×10^{-3}
éthanol	22×10^{-3}

Conversion des débits

De	Vers	atm.cm ³ /s	mbar.l/s	Pa.m ³ /s	atm.mm ³ /s	atm.cm ³ /mn	atm.l/mn	Torr.l/s
atm.cm ³ /s		1	1,013	0,1013	1 000	60	0,06	0,759
mbar.l/s		0,987	1	0,1	987	59,22	0,059	0,75
Pa.m ³ /s		9,87	10	1	10 130	592,2	0,592	7,5
atm.mm ³ /s		1.10 ⁻³	1.10 ⁻³	1,01.10 ⁻⁴	1	0,06	6.10 ⁻⁵	7.10 ⁻⁴
atm.cm ³ /mn		1,66.10 ⁻²	1,68.10 ⁻²		16,7	1	0,001	0,012
atm.l/mn		16,66	16,88		16 667	10 ³	1	12,67
SCCM		1,66.10 ⁻²	1,68.10 ⁻²	1,66.10 ⁻³	1,66	0,996	9,96.10 ⁻⁴	1,26.10 ⁻²
Torr.l/s		1,316	1,33	0,133	1 316	0,0789	7,9.10 ⁻⁵	1

Conversion des pressions

De	Vers	Pa	bar	kg/cm ²	atm	g/cm ²	Torr	mbar	PSI
Pa		1	10 ⁻⁵	1,02.10 ⁻⁵	9,869.10 ⁻⁶	1,02.10 ⁻²	0,75.10 ⁻²	10 ⁻²	1,451.10 ⁻⁴
bar		10 ⁵	1	1,02	0,9869	1 020	750	1 000	14,51
kg/cm ²		9,98.10 ⁴	0,980	1	0,968	1 000	735	980	14,22
atm		1,013.10 ⁵	1,013	1,033	1	1 033	760	1 013	14,70
g/cm ²		98	9,8.10 ⁻⁴	10 ⁻³	9,869.10 ⁻⁴	1	0,735	0,98	1,422.10 ⁻²
Torr		133,3	1,33.10 ⁻³	1,36.10 ⁻³	1,31.10 ⁻³	1,36	1	1,33	1,451.10 ⁻²
mbar		100	10 ⁻³	1,02.10 ⁻³	9,869.10 ⁻⁴	1,02	0,750	1	0,491
PSI		6 890	6,89.10 ⁻²	7,03.10 ⁻²	6,8.10 ⁻²	70,3	51,71	68,947	1

Résumé des formules en unités SI

Formule n° 1

Calcul du flux de référence :

Transformer une perte annuelle massique de gaz en flux instantané :

$$Q_R = \frac{R}{M} \times \frac{2\,240}{365 \times 24 \times 3\,600} \times \frac{T}{273}$$

Formule n° 2

La formule du débit laminaire d'un gaz pour un capillaire équivalent : relation de Poiseuille :

$$Q = \frac{\pi \times D^4}{256 \times \eta \times L} \times (P_{am}^2 - P_{av}^2)$$

Formule n° 3

Dans le cas du test en reniflage à la pression atmosphérique, calcul du débit de gaz traceur dans les conditions de test avec la formule (2) :

$$Q_{TR} = Q_R \times \frac{\eta_R}{\eta_{Test}} \times \frac{(P_{Test}^2 - P_{atm}^2)}{(P_{Ref}^2 - P_{atm}^2)} \times \frac{P_{TR}}{P_{Test}}$$

Formule n° 4

Dans le cas du test sous vide, le calcul du flux équivalent au flux de référence dépend du régime d'écoulement. Pour le calcul du flux en régime moléculaire, il est nécessaire d'évaluer le diamètre équivalent de fuite.

En flux laminaire :

$$Q_{TRL} = Q_R \times \frac{\eta_R}{\eta_{Test}} \times \frac{(P_{Test}^2 - P_{vide}^2)}{(P_{Ref}^2 - P_{atm}^2)} \times \frac{P_{TR}}{P_{Test}}$$

Formule n° 5

Calcul du diamètre équivalent de la fuite :

$$D = \left[\frac{256 \times \eta_R \times L \times Q_R}{\pi (P_{REF}^2 - P_{atm}^2)} \right]^{0,25}$$

Formule n° 6

Calcul du flux moléculaire :

$$Q_{TRM} = \frac{1}{6} \times \sqrt{\frac{2 \times \pi \times R \times T}{M}} \times \frac{D^3}{L} \times (P_{TR} - P_{vide})$$

Formule n° 7

Calcul du flux total de gaz traceur dans les conditions de test :

$$Q_{T_total} = Q_{TRL} + Q_{TRM}$$

Formule n° 8

Calcul du débit liquide en fonction du fluide et de la pression en régime laminaire :

$$Q_m = \frac{\pi D^4 \rho}{128 \eta L} (P_{am} - P_{av})$$

Formule n° 9

Calcul du débit liquide en fonction du fluide et de la pression en régime laminaire, avec tensions de surface :

$$Q_m = \frac{\pi D^4 \rho}{128 \eta L} (P_{am} - P_{av} - \frac{8\gamma}{D})$$

Formule n° 10

Calcul du diamètre critique en deçà duquel il n'y a pas de débit à cause des tensions de surface :

$$D = \frac{8 \times \gamma}{(P_{am} - P_{av})}$$

Formule n° 11

Calcul du taux de fuite initial pour une chute de pression dans un réservoir sur une longue durée :

$$\text{Le flux de fuite à } t_0 \text{ est : } Q_0 = \frac{V(P_0^2 - P_{\text{atm}}^2)}{2P_{\text{atm}}(t - t_0)} \text{Ln} \left(\frac{(P_0 - P_{\text{atm}})(P + P_{\text{atm}})}{(P - P_{\text{atm}})(P_0 + P_{\text{atm}})} \right)$$

Formule n° 12

Évolution de la pression en fonction d'une valeur de fuite, sur une longue période (t) :

$$\frac{P - P_{\text{atm}}}{P + P_{\text{atm}}} = \frac{P_0 - P_{\text{atm}}}{P_0 + P_{\text{atm}}} e^{\frac{2Q_0 P_{\text{atm}}(t - t_0)}{V(P_0^2 - P_{\text{atm}}^2)}}$$

Formule n° 13

À température et volume constants, le débit de fuite peut se calculer ainsi :

$$Q = \frac{\Delta P \times V}{\Delta t}$$

Formule n° 14

La loi des gaz parfaits :

$$P \times V = n \times R \times T$$

Formule n° 15

La variation de pression est la résultante de toutes les variations :

$$\Delta P = \frac{\Delta n \times R \times T}{\Delta V}$$

Formule n° 16

À température et volume constants, la chute de pression correspondant à un débit de fuite donné peut être calculée avec cette relation en utilisant les unités de terrain spécifiées :

$$\Delta P(\text{Pa / s}) = \frac{\text{Fuite}(\text{cm}^3 / \text{min})}{6.10^{-4} \times \text{Volume}_{\text{testé}}(\text{cm}^3)}$$

Formule n° 17

À température constante, la mesure d'un mass flow positionné entre le réservoir de référence et la pièce testée se corrige ainsi :

$$Q_r = Q_{\text{mesuré}} \times \frac{V_1 + V_2}{V_1}$$

Formule n° 18

Évolution de la pression partielle, et donc de la concentration d'un gaz traceur dans une cloche d'accumulation en fonction de la valeur de fuite et du temps d'accumulation écoulé :

$$PP_{\text{traceur}} = C_{\text{traceur}} \times \frac{Q_{\text{fuite}}}{\text{Vol}_{\text{cloche}}} \times t_{\text{acc}}$$

Formule n° 19

Calcul du taux de récupération d'hélium en fonction des pressions dans la pièce testée :

$$\text{Recup}\% = \frac{\text{He mis dans la pièce}}{\text{He envoyé au récupérateur}} = \frac{\text{Volume pressurisé} \times (P_{\text{test}} - P_i)}{\text{Volume pressurisé} \times (P_{\text{test}} - P_d)}$$

$$\text{Recup}\% = \frac{(P_{\text{test}} - P_{\text{avant_pressurisation}})}{(P_{\text{test}} - P_{\text{après_dépressurisation}})}$$

Formule n° 20

Calcul du temps de pompage dans une enceinte à vide :

$$t = 2,3 \times \frac{V}{S} \times \text{Log} \left[\frac{P_1}{P_2} \right]$$

Formule n° 21

Calcul du débit corrigé dans le cas d'un système avec groupes de pompage en parallèle en fonction de leurs vitesses de pompage S_a et S_b respectives :

$$Q = \frac{S_b}{(S_a + S_b)} \times Q_t$$

Formule n° 22

Calcul du temps d'apparition du signal sur un spectromètre de masse hélium en fonction du volume et de la vitesse de pompage hélium :

$$Q_{\text{détecteur}} = Q_{\text{fuite}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \text{ avec } T = \frac{V}{S_{\text{He}}}$$

Formule n° 23

Calcul du temps de disparition du signal sur un spectromètre de masse hélium en fonction du volume et de la vitesse de pompage hélium :

$$t_{\text{disparition}} = 2,3 \times \frac{V}{S} \times \text{Log} \left[\frac{Q_{\text{fuite}}}{Q_{\text{bruit_de_fond}}} \right]$$

Formule n° 24

Calcul de la vitesse de pompage hélium d'une pompe en fonction du temps mis pour descendre le signal de une ou plusieurs décades :

$$S_{\text{He}} = 2,3 \times \frac{V}{t} \times \text{Log} \left[\frac{P_1}{P_2} \right]$$

Le contrôle d'étanchéité

**Bernard
Seemann**

Le contrôle d'étanchéité, également appelé détection de fuite, consiste à vérifier qu'une paroi n'autorise pas ou quasiment pas le passage d'un fluide, et constitue ainsi une séparation efficace. Il peut s'agir d'un tuyau comme d'un emballage, ou même d'un local dans le bâtiment. Par extension, la détection de fuite permet quelquefois de localiser le défaut d'étanchéité.

Les méthodes les plus intuitives concernant la recherche de fuite sont visuelles, comme la chambre à air de vélo que l'on gonfle et que l'on met sous l'eau. Avec les évolutions de la technique, des méthodes plus performantes sont apparues, comme le contrôle du maintien de la pression dans l'objet du test ou encore la spectrométrie capable de détecter une très petite présence de gaz qui se serait échappé par une fuite.

Les domaines d'application sont nombreux car ce type de contrôle se généralise. Les réseaux d'eau et de gaz sont ainsi vérifiés à la réception des bâtiments. On se sert également de ces techniques pour les ensembles mécano soudés, les pièces fabriquées par injection plastique, les installations sous pression ou sous vide, ou même garantir la stérilité dans le domaine médical. Depuis les câbles et réseaux enterrés jusque dans les avions, les techniciens et ingénieurs doivent mettre en œuvre des méthodes de test pour s'assurer de la qualité de la réalisation.

Ce livre s'adresse à tous ceux qui vont devoir aborder le sujet du contrôle d'étanchéité sans avoir reçu

de formation spécifique. Il permet de sélectionner rapidement les méthodes de contrôle qui peuvent être adaptées à leurs besoins et leur mise en œuvre. Une fois cette étape franchie, les fabricants qui ont une grande expérience chacun dans leur domaine, apporteront une aide complémentaire pour la définition des appareils de test à acquérir.

Cet ouvrage est basé sur une approche transversale des techniques existantes pour identifier rapidement quelles sont les méthodes les plus adaptées à un besoin donné.

L'ouvrage apporte de nombreuses indications pour une mise en œuvre réussie de ces techniques sur le terrain. Par exemple, comment s'assurer qu'un réseau de chauffage enterré est étanche ? En pratiquant un test par variation de pression. Et s'il n'est pas étanche, comment localiser la fuite ? En injectant un mélange inerte contenant de l'hydrogène dans le circuit, nous pouvons localiser le défaut d'étanchéité depuis la surface, avec un détecteur approprié.

À qui s'adresse cet ouvrage

Dans l'industrie, les services méthodes, industrialisation, maintenance, R & D, qualité, achats, etc., l'industrie automobile, les équipementiers ; quant aux autres industries : le nucléaire, l'alimentaire, le packaging, les fonderies, l'injection plastique.

Les utilisations de la méthode hydrogène devraient se généraliser sur les chantiers pour contrôler les réseaux de canalisation avec l'arrivée d'appareil moins chers sur le marché.