UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CORRÉLATION ENTRE LES FUITES DE DIFFÉRENTS GAZ AU TRAVERS DE JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ À PARTIR DE L'ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS GAZEUX

VINCENT MASI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
SEPTEMBRE 1997

©Vincent Masi, 1997.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33161-X

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CORRÉLATION ENTRE LES FUITES DE DIFFÉRENTS GAZ
AU TRAVERS DE JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ
À PARTIR DE L'ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS GAZEUX

présenté par : MASI Vincent

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MARCHAND Luc, Ph.D, président

M. DERENNE Michel, M.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. BAZERGUI André, Ph.D, membre

REMERCIEMENTS

Cette étude est le fruit d'un travail mené au sein du laboratoire d'étanchéité (Tightness Testing and Research Laboratory) de L'École Polytechnique de Montréal. Je souhaite donc associer aux résultats obtenus l'ensemble du personnel de ce laboratoire. Je remercie plus particulièrement Monsieur Michel Derenne qui a accepté de superviser mes recherches ainsi que Messieurs Luc Marchand et Abdel-Hakim Bouzid dont les précieux conseils tant scientifiques que techniques m'ont permis de progresser dans mes travaux.

Je tiens, de plus, à remercier l'ensemble du personnel technique de la section de Mécanique Appliquée dont l'assistance lors de la phase expérimentale de ce projet fut indispensable.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble du personnel du laboratoire d'étanchéité du CETIM de Nantes (France), et plus particulièrement à Messieurs Yves Birembaut et Thierry Ledauphin, dont le soutien et les conseils lors de mon séjour parmi eux furent une aide précieuse.

RÉSUMÉ

Afin de mieux cerner l'influence de la nature du gaz sur le niveau d'étanchéité de joints, ces derniers sont assimilés à un réseau de capillaires. Le débit massique du gaz qui s'en échappe est alors exprimé suivant les différentes lois de la mécanique des fluides qui régissent l'écoulement de gaz au travers de tubes. L'application de ces équations au problème de l'influence du type de gaz sur l'étanchéité de joints permet de mettre en œuvre trois modes de calcul appelés laminaire, intermédiaire et moléculaire. Chaque mode de calcul est associé à la nature de l'écoulement au sein du joint. Les performances de ce type de modèle sont ensuite validées expérimentalement. Les fuites de deux types de joints associés à différents gaz (He, Ar, CH_4, SF_6) sont mesurées. Les trois modes de calcul sont alors simultanément utilisés pour calculer les fuites de différents gaz à partir des fuites mesurées avec l'hélium. Les résultats de ces calculs sont ensuite comparés aux mesures effectuées. Le bon agrément alors obtenu permet de mettre en évidence les changements de la nature de l'écoulement au sein de joints. Celle-ci dépend surtout de la structure interne du joint et de son écrasement. Le type de gaz, même s'il modifie la valeur de la fuite, ne semble pas posséder d'influence majeure sur la nature de l'écoulement. Si la nature de l'écoulement au sein du joint considéré est connue, le modèle utilisé permet alors de prévoir avec précision la fuite de différents gaz à partir de celles d'un gaz de référence. Ce modèle ne fonctionne cependant plus lorsque la perméation du gaz devient prépondérante par rapport aux autres types d'écoulement. Les différents résultats de l'étude sont ensuite appliqués aux techniques de conception de systèmes étanches. Dans un premier temps, la méthode actuellement utilisée pour déterminer le serrage à appliquer sur une bride munie d'un joint est évaluée. Des modifications de cette méthode sont proposées afin que l'influence de la pression interne sur le niveau d'étanchéité de joints soit mieux prise en compte lors de la conception.

ABSTRACT

Effect of gas nature on mass leak rate of gaskets is studied with a model based on the assumption that a gasket is composed of a set of capillaries. This model would help to understand the effect of gas nature on mass leak rate and for different types of gaskets. Based on the theory of flow through pipes, this model provides three ways to calculate the effect of the gase type : laminar, intermediate and molecular which are associated with flow nature. Experimental results are used to validate the proposed model. Two types of gaskets are used with different gases (He, Ar, CH_4, SF_6) and leak rates are measured. The three types of correlation proposed are used to determine the leakage rate of different gases based on helium leak rate measurement. The comparison of the predictions obtained from the model and the experimental results agrees well and shows that flow nature depends on the gasket compression and internal structure, whereas, the type of gas is not a main factor of influence on the flow nature. With the knowledge of flow nature it is possible, using one of the three ways of calculation, to predict, with precision, the leak rate of gases from the leak rate measurement of another gas. However, the limitation of the model is that it does not predict correctly the leak rate when permeation flow becomes predominant. The different results of the study are applied to the conception method of bolted flanged connections. First, the actual procedure for determining the bolt load on the flange is estimated. Then, different modifications of this procedure are proposed in order to achieve a better estimate of gas internal pressure influence on the gasket tightness.

CONDENSÉ

1. Introduction

L'objectif principal de l'étude qui a été menée est d'améliorer la prévision des fuites de joints d'étanchéité obtenues avec un gaz quelconque à partir de celles mesurées avec un gaz de référence. La corrélation entre les fuites de différents gaz à un impact direct sur la conception de systèmes étanches.

L'étude du lien entre les fuites de différents gaz a déjà fait l'objet de différents travaux [1,2]. Cependant aucune réponse réellement définitive n'a été apportée à ce problème. De plus, comme les normes en matière de pollution et de sécurité deviennent de plus en plus sévères, il devient important de rendre la conception de systèmes étanches plus précise. L'amélioration de cette corrélation entre les fuites de différents gaz est une des étapes permettant de répondre à cette exigence.

C'est donc cet objectif que se propose d'atteindre le présent travail. Pour cela, une approche théorique simplifiée du problème va, tout d'abord, être menée. Celle-ci débouchera sur la mise en évidence de trois modes de calcul permettant l'estimation des fuites obtenues avec un gaz quelconque à partir de celles mesurées pour un gaz de référence. La validité des prévisions issues de ces trois modes de calcul sera ensuite estimée au travers de la comparaison de leurs résultats avec ceux issus d'expériences. La compréhension des phénomènes associés à ce problème mènera, enfin, à des propositions de modifications concernant certains aspects relatifs à la conception de brides d'étanchéité munies de joints. Ces modifications sont destinées à rendre plus précises les techniques de conception de systèmes étanches.

2. Approche théorique

L'approche théorique adoptée est extrêmement simplifiée. Elle revient à modéliser tout joint d'étanchéité par un ensemble de capillaires rectilignes et uniformes. Le nombre de ces capillaires ainsi que leurs diamètres respectifs restent indéterminés. A partir de ce modèle et des équations d'écoulements de fluides au travers de tubes, il est possible de définir trois modes de calculs.

Ce premier mode de calcul est le calcul laminaire. Dans ce cas, les capillaires à l'intérieur du joint sont supposés suffisamment gros pour que l'écoulement gazeux suive la loi de Poiseuille. Le débit massique au travers du joint, à la température standard, s'exprime en fonction de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la bride :

$$Q_m = \frac{\pi N_l D_l^4}{128L} \frac{1}{\upsilon^*} \frac{1}{2P^*} \left(P_1^2 - P_2^2\right)$$

N_l, D_l, L : Nombre, diamètre et longueur des capillaires.

υ^* : viscosité cinématique du gaz dans les conditions standard.

Dans ce cas le rapport entre les fuites massiques obtenues avec deux gaz différents et pour une même structure interne du joint s'exprime comme suit :

$$\frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = \frac{\upsilon_1^*}{\upsilon_2^*}.$$

Le second mode de calcul est appelé moléculaire. L'hypothèse associée à ce calcul est que les canaux constituant le joint ont un diamètre suffisamment petit pour que le gaz s'y écoule suivant la loi de Knudsen. Dans ce cas le débit massique au travers du joint s'écrit :

$$Q_m = \frac{N_m D_m^3}{6L} \sqrt{\frac{2\pi M}{RT^*}} \left(P_1 - P_2\right)$$

M : Masse molaire du gaz considéré.

De cette équation découle directement une nouvelle expression du rapport entre les fuites massiques de différents gaz, toujours pour une structure interne du joint identique :

$$\frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}.$$

Le troisième mode de calcul, appelé intermédiaire, prends en compte le fait que le joint est constitué de capillaires de diamètres très divers. L'écoulement au travers de chaque capillaire est donc, suivant son diamètre, soit laminaire, soit intermédiaire soit moléculaire. Le débit massique du joint est donc un combinaison de ces trois écoulements fondamentaux :

$$Q_m = \frac{\pi\left(N_l D_l^4 + N_i D_i^4\right)}{128L}\frac{1}{\upsilon^*}\frac{1}{2P^*}\left(P_1^2 - P_2^2\right) + \frac{\left(N_i D_i^3 + N_m D_m^3\right)}{6L}\sqrt{\frac{2\pi M}{RT^*}}\left(P_1 - P_2\right)$$

Le passage de la fuite d'un gaz de référence à celle d'un gaz cible nécessite, dans ce cas, un calcul plus complexe. Il est nécessaire d'exprimer le débit massique du gaz de référence sous la forme d'une équation du second degré en fonction de la pression :

$$Q_{m1} = A_1 P^2 + B_1 P$$

La fuite massique du gaz cible, est alors obtenue par la transformation suivante :

$$Q_{m2} = A_1 \frac{\upsilon_1^*}{\upsilon_2^*} P^2 + B_1 \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} P$$

Les trois modèles qui viennent d'être présentés ne fonctionnent que pour une structure interne du joint constante. C'est la condition pour pouvoir éliminer des équations les paramètres inconnus tels que le nombre de canaux et leur diamètre.

Afin d'analyser la pertinence de ce modèle très simplifié et des modes de calcul qui en découlent, différents essais expérimentaux ont été effectués. Leurs résultats ont ensuite été confrontés à ceux issus des trois modes de calcul.

3. Validation expérimentale des modes de calculs théoriques

3.1 Expérimentation et validité des résultats

Afin de vérifier les modes de calcul présentés des mesures de fuites ont été effectuées sur deux types de joints, un graphite (G2) et un amiante (A9), et avec quatre gaz; l'hélium, l'argon, le méthane et l'hexafluorure de soufre.

Le montage expérimental utilisé est une bride réelle modifiée afin de permettre une mesure par remontée de pression. Ce montage permet de mesurer avec précision des fuites supérieures ou égales à 10^{-4} mg/s d'hélium.

Le mode opératoire adopté peut se résumer en trois points. Tout d'abord, un niveau de contrainte est appliqué sur le joint. Ensuite, les fuites des différents gaz sont mesurées pour différents niveaux de pression interne. Enfin, la contrainte est augmentee Les fuites seront donc mesurées pour différents niveaux de contrainte et de pression interne. Trois joints de chacun des deux types utilisés ont été testés. Les résultats obtenus avec chaque gaz ont été répétés au moins deux fois.

Les résultats expérimentaux obtenus peuvent être validés à l'aide de trois moyens La stabilité des mesures de fuites est visualisée. La conservation des conditions d'essai lors des mesures de fuites avec différents gaz est vérifiée. La répétabilité des mesures est étudiée au travers de la comparaison des résultats obtenus lors des différents tests. Enfin, les résultats sont comparés avec ceux d'une étude précédemment menée [2]. Cette dernière mettait en jeu des gaz et des joints comparables mais avec un protocole d'essai différent. La mise en oeuvre de ces trois étapes (annexe 4) permet de conclure de manière positive quant à la validité des résultats obtenus.

3.2. Analyse des résultats

L'un des points importants relevé lors de l'analyse des résultats est que le rapport entre les fuites de deux gaz dépend fortement de la nature du matériau constituant le joint d'étanchéité ainsi que de la contrainte qui lui est appliquée.

Dans le cas du joint amiante, les rapports entre les fuites de deux gaz calculés à partir des mesures effectuées diminuent lorsque le niveau de contrainte sur le joint augmente. Pour le joint graphite, ces rapports restent constants jusqu'à une contrainte de 40 MPa puis augmentent avec la contrainte. Ces phénomènes sont vérifiés pour tous les gaz et tous les niveaux de pression pris en compte. Ces résultats peuvent être visualisés sur les figures de l'annexe 8.

Le comportement mécanique des deux types de joints montre que le joint en amiante est plus rigide que le joint en graphite. L'écrasement subi par le joint en amiante s'avère nettement inférieur à celui du joint en graphite.

Les résultats expérimentaux ont, ensuite, été confrontés avec ceux fournis par les trois modes de calculs présentés précédemment.

Les résultats obtenus pour les différents joints et les différents gaz étudiés sont présentés par les figures de l'annexe 9. Ces figures présentent l'évolution de la fuite en fonction de la pression du gaz. A partir des fuites d'hélium mesurées, les fuites de différents gaz sont calculées simultanément par les modes de calcul laminaire, intermédiaire et moléculaire. Les prédictions de ces trois calculs sont comparées aux mesure effectuées.

Au niveau du joint amiante il est remarquable que, dans tous les cas présentés, les mesures effectuées avec le méthane s'adaptent parfaitement aux résultats d'un des trois modes de calcul utilisés. A faible niveau de contrainte le modèle laminaire s'adapte bien aux résultats expérimentaux. Lorsque la contrainte augmente, ce sont, tour à tour, les deux modèles intermédiaire et moléculaire qui s'adaptent de manière convenable.

En ce qui concerne le joint graphite, les résultats sont très différents. Dès le premier niveau de contrainte, les mesures s'ajustent au modèle moléculaire. Lorsque la contrainte augmente le modèle moléculaire continue de s'adapter. Pour un niveau de contrainte important, on note cependant un décalage entre la prévision moléculaire et les mesures. C'est le seul cas pour lequel aucun des trois modes de calcul présentés ne s'adapte aux résultats expérimentaux. Cependant il est intéressant de noter que même si les courbes calculées pour un haut niveau de contrainte ne s'adaptent pas à celle des mesures, ces dernières restent parallèles à celles du modèle moléculaire.

4. Interprétation des résultats

Les résultats précédents mettent en évidence les changements qui se produisent au niveau du régime d'écoulement d'un gaz au travers d'un joint d'étanchéité. Le régime d'écoulement dépendra donc, non seulement du niveau de contrainte sur le joint, mais aussi de sa structure interne.

Le modèle utilisé, pourtant très simplifié, permet d'expliquer ce qui se passe à l'intérieur d'un joint. Lorsque la contrainte, et donc l'écrasement du joint, augmentent, les diamètres des capillaires diminuent. Cette diminution entraîne celle du nombre de Knudsen qui conditionne le régime d'écoulement au sein de capillaires. L'écoulement passera donc successivement de laminaire à intermédiaire et, enfin, à moléculaire. Ceci explique l'adaptation successive des différents modes de calcul aux mesures effectuées.

La différence de comportement entre les deux types de joints peut s'expliquer par l'observation de leur écrasement relatif. Le joint graphite, moins rigide, subi, dès 7 MPa, un écrasement égal à celui du joint amiante à 69 MPa. Ainsi dès le premier serrage, les canaux sont déjà suffisamment petits pour que l'écoulement soit moléculaire. L'augmentation de la contrainte ne fera que diminuer les diamètres des canaux. L'écoulement restera donc moléculaire. Lorsque la contrainte est suffisante pour " refermer " les canaux, un nouveau type d'écoulement apparaît. Il s'agit probablement du phénomène de perméation qui n'est pas pris en compte par le modèle utilisé. Cela expliquerait pourquoi les courbes expérimentale et celles représentatives du modèle moléculaire se décalent mais restent parallèles. La perméation est, en effet, un phénomène qui, comme l'écoulement moléculaire, est régi par une loi fonction linéaire de la pression.

Il s'avère donc nécessaire de connaître la nature de l'écoulement au travers d'un joint pour que la corrélation entre les fuites de différents gaz puisse être menée de manière efficace. En effet, la valeur du rapport entre les fuites de deux gaz est directement conditionnée par la nature de l'écoulement. La nature de l'écoulement s'avère surtout influencée par la structure interne du joint et par son écrasement La pression interne du gaz ainsi que le type de gaz ne semblent pas être des facteurs capables de modifier fondamentalement le type d'écoulement en présence. Enfin, la nature de l'écoulement ne peut pas être liée de manière directe au niveau de fuite. Un écoulement moléculaire peut, en effet, générer des fuites importantes.

Il est donc nécessaire de mettre en œuvre un quantificateur du type d'écoulement. A l'aide de cet indicateur, il sera possible de connaître le type d'écoulement au travers du joint et donc d'appliquer le mode de corrélation le plus approprié.

5. Quantificateur de l'écoulement

Le but est de pouvoir déterminer la nature de l'écoulement à partir des mesures de fuites d'un gaz de référence. Le coefficient " s " est ici proposé comme quantificateur de l'écoulement. Ce coefficient est la pente de la droite liant le logarithme de la pression interne à celui du débit massique : $\text{Log } P = s \text{ Log } Q + b$. De manière théorique, si " s " vaut 0,5, alors l'écoulement est de nature laminaire. Si " s " vaut 1 alors l'écoulement est moléculaire. Si " s " est entre ces deux limites alors l'écoulement sera intermédiaire.

Les résultats expérimentaux obtenus confirment ces considérations théoriques et permettent de préciser les valeurs limites de " s " pour chaque type d'écoulement. L'inconvénient de ce coefficient est que sa valeur peut être influencée par la manière dont elle est calculée. Par exemple, le calcul de la pente se faisant par régression linéaire, le nombre de points de mesure utilisés sera important. L'utilisation de ce quantificateur permet néanmoins d'obtenir une bonne indication de la nature de l'écoulement.

La réalisation d'un essai complémentaire ou le joint est soumis à des cycles de chargement et de déchargement permet de mettre en évidence l'importance primordiale de l'écrasement d'un joint sur la nature de l'écoulement qui le traverse. Cet essai montre que la nature de l'écoulement lors du déchargement d'un joint est identique à la nature de l'écoulement au sein du joint lorsqu'il possédait la même épaisseur pendant son serrage. Ce point sera exploité lors de la mise en œuvre de procédures de conception de systèmes étanches.

L'ensemble de ces résultats montrent qu'il est possible de connaître la nature de l'écoulement en calculant, à partir de résultats expérimentaux, le coefficient " s ". Il est donc ensuite possible de calculer la fuite du joint avec un autre gaz en appliquant le mode de calcul approprié : soit laminaire soit intermédiaire ou, enfin, moléculaire.

La réponse au problème posé semble donc, à ce stade de l'étude, être en partie atteinte. Le lien entre les fuites de différents gaz est maintenant précisé. La méthode de calcul nécessite tout d'abord la connaissance du type d'écoulement en présence puis l'application du calcul judicieux. La seule limite de ces calculs doit être associée au cas où la perméation s'avère prédominante au sein de l'écoulement. L'ensemble des résultats obtenus peuvent s'avérer utiles pour tenter d'améliorer les techniques de conception de systèmes étanches.

6. Impact des résultats sur la conception de systèmes étanches

Seul le cas des brides d'étanchéité munies de joints est ici considéré. L'objectif de la conception de tels systèmes est de déterminer la contrainte de serrage à appliquer à un joint donné pour que la fuite obtenue soit inférieure à une limite fixée. Pour ce faire, les données issues de la caractérisation en laboratoire du joint considéré sont utilisées.

La procédure actuelle fait intervenir le coefficient Tp qui caractérise l'étanchéité d'un joint. Plus ce coefficient est haut, plus le joint sera étanche. L'utilisation de ce coefficient avec les résultats des essais réalisés lors de la présente étude montre qu'il ne permet pas une prise en compte correcte de l'influence de la pression interne du gaz sur la fuite du joint (annexe 14). Ceci est lié à sa formulation basée sur l'hypothèse que l'écoulement est seulement de type laminaire.

La modification proposée revient à introduire le quantificateur de l'écoulement " s " au sein de la définition du paramètre Tp. Le but est de produire un nouveau coefficient qui s'adapterait à la nature de l'écoulement au travers du joint. La mise en œuvre pratique de ce nouveau paramètre Tp montre que ce dernier permet une nette amélioration de la prise en compte de l'influence de la pression interne sur le niveau de fuite.

Compte tenu de ces résultats, de nouvelles procédures de caractérisation de joints et de conception de brides sont proposées. Elles apportent certaines modifications aux procédures actuellement employées. Ces modifications mineures sont rendues nécessaires par l'emploi du coefficient Tp où la nature de l'écoulement, et son évolution, sont considérés. Ces nouvelles procédures intègrent, de plus, le moyen de mieux prendre en compte l'influence de la nature du gaz sur le niveau de fuite d'un joint. Même si ces procédures ainsi que les performances du coefficient Tp modifié restent à valider, les évolutions proposées semblent capables de rendre la conception des assemblages boulonnés munis de joints plus juste.

7. Conclusion

L'ensemble du travail mené permet donc de mieux comprendre les phénomènes liés à l'écoulement de gaz au sein de joints d'étanchéité. Cet écoulement conditionne le rapport entre les fuites de différents gaz. Les résultats obtenus fournissent une méthode de corrélation précise entre les fuites de deux gaz. La seule limite de cette méthode est associée au cas où la perméation du gaz devient prépondérante au sein de l'écoulement. De plus, une étape préalable à toute corrélation s'avère nécessaire, celle de la détermination de la nature de l'écoulement.

Enfin, l'application de l'ensemble des résultats à la conception de systèmes étanches montre qu'il serait certainement possible d'améliorer la précision des calculs effectués. Seules certaines modifications aux techniques de calcul existantes seraient nécessaires. C'est notamment vers la validation de ces nouvelles procédures de calcul proposées que pourraient notamment s'orienter de prochains travaux de recherche.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS iv
RESUMÉ v
ABSTRACT vi
CONDENSÉ vii
TABLE DES MATIERES xvii
LISTE DES TABLEAUX xxii
LISTE DES FIGURES xxiii
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS xxv
LISTE DES ANNEXES xxix

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET PRINCIPE DE L'ETUDE 6

2.1. Présentation 6
2.2. Revue des études précédentes 7
2.3. Principe général de l'étude 12
2.3.1. Types de gaz étudiés 13
2.3.2. Types de joints étudiés 14
2.4. Synthèse 15

CHAPITRE 3 : APPROCHE THEORIQUE 17

3.1. Présentation 17

3.2. Les écoulements élémentaires 18

3.2.1. Ecoulement visqueux dans un tube 18

3.2.2. Ecoulement intermédiaire dans un tube 20

3.2.3. Ecoulement moléculaire dans un tube 22

3.2.4. Limite de validité des écoulements élémentaires 23

3.2.5. Correction tenant compte de l'écart entre gaz réel et parfait 24

3.2.6. La perméation 26

3.3. Modèle d'écoulement dans les joints 27

3.3.1. Modélisation du joint 27

3.3.2. Equations associées au modèle 27

3.3.3. Evaluation du modèle 29

3.3.4. Quantificateur du type d'écoulement 29

3.4. Application du modèle à l'étude de l'influence du type de gaz 31

3.4.1. Calcul laminaire 31

3.4.2. Calcul moléculaire 32

3.4.3. Calcul intermédiaire 32

3.4.4. Hypothèses associées aux trois modes de calculs 33

3.4.5. Prise en compte de l'éloignement des gaz parfaits 34

3.5. Synthèse 35

CHAPITRE 4 : DESCRIPTION DES ESSAIS ET VALIDATION DES RESULTATS 36

4.1. Présentation 36

4.2. Le montage expérimental 37

4.2.1. La bride utilisée 37

4.2.2. Serrage et mise en pression de la bride 37

4.2.3. La mesure de fuites 39

4.2.4. Le système d'acquisition de données 41

4.3. Le protocole d'essai 41

4.4. Conditions d'essai et nombre de tests 43

4.5. Validité des résultats obtenus 47

4.6. Synthèse 49

CHAPITRE 5 : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS 50

5.1. Présentation 50

5.2. Comparaison du comportement des deux types de joints 51

5.2.1. Comportement mécanique des joints 51

5.2.2. Etanchéité des deux types de joint 53

5.2.3. Rapports entre fuites de différents gaz 54

5.3. Performances des modes de calcul 57

5.3.1. Corrélation entre fuites de différents gaz pour le joint en amiante A9 58

5.3.2. Corrélations entre fuites de différents gaz pour le joint en graphite G2 62

5.3.3. Synthèse des principaux résultats 64

5.4. Analyse des résultats et évolution de la nature de l'écoulement 65

5.4.1. Performance quantitative des modes de calcul 66

5.4.2. Evolution de la nature de l'écoulement 70

5.4.3. Commentaires sur les résultats des précédentes études 72

5.5. Synthèse 73

CHAPITRE 6 : INTERPRETATION DES RESULTATS ET PREVISION DE L'INFLUENCE DU TYPE DE GAZ SUR L'ETANCHEITE DE JOINTS 74

6.1. Présentation 74

6.2. Explication des phénomènes observés à l'aide du modèle de joint adopté 75

6.2.1. Influence du niveau de contrainte sur la nature de l'écoulement 75

6.2.2. Limite du modèle et mise en évidence de la perméation du gaz 76

6.2.3. Influence de la pression sur la nature de l'écoulement 78

6.2.4. Conclusions sur les modifications de l'écoulement dans un joint 79

6.2.5. Pertinence des hypothèses associées au modèle utilisé 80

6.3. Quantification du type d'écoulement et influence du desserrage du joint 83

6.3.1. Quantification du type d'écoulement 83

6.3.2. Influence du desserrage du joint 86

6.3.3. Conclusion sur la quantification de la nature de l'écoulement 88

6.4. Prévision de l'influence du type de gaz sur la mesure de fuites 89

6.5. Synthèse des principaux résultats 93

CHAPITRE 7 : IMPACT DES RESULTATS OBTENUS SUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES ETANCHES MUNIS DE JOINTS 97

7.1. Présentation 97

7.2. Présentation du concept de Tp 98

7.3. Evaluation des performances du paramètre Tp 99

7.3.1. Méthode d'évaluation 99

7.3.2. Résultats obtenus 101

7.3.3. Remarques sur la validation du paramètre Tp 103

7.4. Proposition de modification du paramètre Tp 104

7.4.1. Concept de la modification 104

7.4.2. Evaluation du paramètre Tp modifié 105

7.4.3. Résultats obtenus 106

7.4.4. Conclusions sur la modification proposée 107

7.5. Conception de systèmes étanches à l'aide du paramètre Tp modifié 109

7.5.1. Caractérisation de joints d'étanchéité 110

7.5.2. Conception d'un système étanche 112

7.5.3. Remarques sur les nouvelles procédures proposées 115

7.6. Conclusion 117

CHAPITRE 8 : CONCLUSION ET NOUVELLES VOIES DE RECHERCHE 119

BIBLIOGRAPHIE 125

ANNEXES 127

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Caractéristiques des gaz étudiés 14

Tableau 3.1 Régimes d'écoulement dans un tube 24

Tableau 4.1 Facteurs de correction prenant en compte l'éloignement du comportement des gaz de la loi des gaz parfaits 40

Tableau 4.2 Récapitulatif du protocole d'essai 46

Tableau 6.1 Synthèse des résultats obtenus - Calcul des fuites d'un gaz cible à partir de celles d'un gaz de référence 92

LISTE DES FIGURES

Figure 5.1 Courbes contrainte-écrasement obtenues lors des trois essais pour chaque type de joint (A9 et G2) 52

Figure 5.2 Fuites d'hélium, d'argon, de méthane et d'hexafluorure de soufre en fonction de la contrainte appliquée sur le joint, ... 53

Figure 5.3 Evolution des rapports entre les fuites de différents gaz et les fuites d'hélium pour les deux types de joints (A9 et G2) et pour une pression interne de 0,689 MPa 55

Figure 5.4 Corrélation entre l'hélium et l'argon suivant les trois modes de calcul, pour le joint de type A9, lors de l'essai 3 et pour une contrainte nominale sur le joint de 42 MPa 59

Figure 5.5 Corrélation entre l'hélium et l'argon suivant les trois modes de calcul, pour le joint de type A9, lors de l'essai 3 et pour une contrainte nominale sur le joint de 69 MPa 59

Figure 5.6 Corrélation entre l'hélium et le méthane suivant les trois modes de calcul, pour le joint de type G2, lors de l'essai 3 et pour une contrainte nominale sur le joint de 7 MPa 62

Figure 5.7 Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite d'hélium mesurée, lors de l'essai 3 sur le joint de type A9 en utilisant le méthane comme gaz cible 67

Figure 5.8 Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite d'hélium mesurée, lors de l'essai 3 sur le joint de type G2 en utilisant le méthane comme gaz cible 67

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

a :	Constante caractérisant l'étanchéité d'un joint lors de son chargement
A_1 :	Coefficient dans l'expression du débit massique du gaz 1 (équation 3.20)
A_2 :	Coefficient dans l'expression du débit massique du gaz 2 (équation 3.22)
A9 :	Joint à base de fibres d'amiante
Ar :	Gaz argon
b :	Solubilité d'un gaz dans un matériau (cm^2/s)
B_1 :	Coefficient dans l'expression du débit massique du gaz 1 (équation 3.20)
B_2 :	Coefficient dans l'expression du débit massique du gaz 2 (équation 3.22)
C :	Concentration d'un gaz au sein d'un matériau
CH_4 :	Gaz méthane
d :	Coefficient de diffusion d'un gaz dans un matériau (m^2/s)
D :	Diamètre d'un capillaire (m)
Dg :	Ecrasement d'un joint (m)
D_i :	Diamètre moyen des capillaires dont l'écoulement est intermédiaire (m)
DJ :	Double Jacketed ; joint formé d'une enveloppe métallique
D_l :	Diamètre moyen des capillaires dont l'écoulement est laminaire (m)
D_m :	Diamètre moyen des capillaires dont l'écoulement est moléculaire (m)
Eg :	Coefficient de décompression d'un joint (MPa/m)
f :	Fraction de molécules absorbées et réémises par les parois d'un tube
f(Dg) :	Fonction liant s à Dg
G2 :	Joint en graphite renforcé de métal
Gb :	Constante caractérisant l'étanchéité d'un joint lors de son chargement (MPa)
GEM :	Joint en graphite expansé
Gs :	Constante caractérisant l'étanchéité d'un joint lors de son déchargement (MPa)
h :	Epaisseur d'une paroi (m)

h(Sg) :	Fonction liant Dg à Sg
He :	Gaz hélium
K :	Coefficient de perméation d'un gaz dans un matériau (m^3(STP) $m/m^2/Pa/s$)
k :	Constante de Boltzmann (1,38 10^{-23} J/°K)
k(Sg) :	Fonction liant s à Sg
L :	Longueur d'un capillaire (m)
L_{max} :	Fuite admissible gaz quelconque (mg/s)
L_{maxHe} :	Fuite maximale admissible exprimée pour l'hélium (mg/s)
L_{rm} :	Fuite massique d'un joint (mg/s)
L_{rmf}	Fuite finale gaz quelconque (mg/s)
L_{rmHef} :	Fuite massique finale d'un joint exprimée pour l'hélium (mg/s)
M :	Masse molaire d'un gaz (kg/mol)
M_1 :	Masse molaire du gaz 1 (kg/mol)
M_2 :	Masse molaire du gaz 2 (kg/mol)
N :	Nombre de capillaires constituant le joint
n :	Nombre de moles (mol)
N_i :	Nombre de capillaires dont l'écoulement est intermédiaire
N_l :	Nombre de capillaires dont l'écoulement est laminaire
N_m :	Nombre de capillaires dont l'écoulement est moléculaire
P :	Pression d'un gaz, et, par extension, pression interne relative de la bride (Pa)
P^* :	Pression standard (0,1013 MPa)
P_1 :	Pressions en amont d'un capillaire (Pa)
P_2 :	Pressions en aval d'un capillaire (Pa)
$\overline{P}$:	Pression moyenne sur la longueur d'un capillaire (Pa)
P_f :	Pression finale du circuit de mesure de fuite (Pa)
P_i :	Pression initiale du circuit de mesure de fuite (Pa)
PTFE :	Polytétrafluoroéthylène
Q :	Flux gazeux ($Pa.m^3/s$)

Q_m : Débit massique (mg/s)

Q_{m1} : Débit massique associé au gaz 1 (mg/s)

Q_{m2} : Débit massique associé au gaz 2 (mg/s)

Q_{mi} : Débit massique du gaz considéré comme parfait (mg/s)

Q_{mr} : Débit massique du gaz réel (mg/s)

Q_v : Débit volumique (m^3/s)

R : Constante des gaz parfaits (8,3144 J/mol/°K)

r : Nombre de Knudsen

ROTT : ROom Tightness Test ; essai d'étanchéité à température ambiante

s : Pente de la droite liant d'équation : $\text{Log } P = s \text{ Log } Q_m + \text{constante}$

SF_6 : Gaz hexafluorure de soufre

Sg : Contrainte appliquée sur un joint (MPa)

Sg_1 : Contrainte à appliquer sur un joint pour que son Tp soit égal à T_{pmin} (MPa)

Sm : Contrainte restant sur le joint après déchargement du joint (MPa)

SW : Spiral Wound ; joint spiralé

Sy : Contrainte à appliquer sur un joint lors du serrage de la bride (MPa)

t : Temps (s)

T : Température (°C)

T^* : Température standard (20 °C où 293,15 °K)

T_f : Température finale du circuit de mesure de fuite (°C)

T_i : Température initiale du circuit de mesure de fuite (°C)

Tp : Tightness Parameter, paramètre d'étanchéité

Tpf : Paramètre d'étanchéité final

Tpmin : Paramètre d'étanchéité minimal

V : Volume de gaz (m^3)

V_f : Volume final du circuit de mesure de fuite (m^3)

V_i : Volume initial du circuit de mesure de fuite (m^3)

Z : Coefficient de compressibilité d'un gaz

ρ : Densité d'un gaz (kg/m^3)

ρ^* : Densité d'un gaz dans les conditions standard (kg/m^3)

ρ_m : Densité moyenne d'un gaz (kg/m^3)

η : Viscosité absolue d'un gaz (Pa.s)

η^* : Viscosité absolue d'un gaz dans les conditions standard (Pa.s)

υ : Viscosité cinématique d'un gaz (m^2/s)

υ^* : Viscosité cinématique d'un gaz dans les conditions standard (m^2/s)

λ : Libre parcours moyen d'un gaz (m)

$\upsilon 1$: Viscosité cinématique du gaz 1 (m^2/s)

$\upsilon 2$: Viscosité cinématique du gaz 2 (m^2/s)

ε : Diamètre d'une molécule de gaz considérée comme une sphère rigide (m)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Prise en compte de l'éloignement du comportement des gaz de la loi des gaz parfaits 128

ANNEXE 2 : Le montage expérimental 139

ANNEXE 3 : Description des essais 142

ANNEXE 4 : Validation des résultats 145

ANNEXE 5 : Présentation des mesures expérimentales 161

ANNEXE 6 : Répétabilité des résultats expérimentaux 177

ANNEXE 7 : Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus lors d'une précédente étude 185

ANNEXE 8 : Rapports entre fuites de différents gaz 194

ANNEXE 9 : Performances des modes de calcul 197

ANNEXE 10 : Conservation de la structure interne du joint 213

ANNEXE 11 : Influence de la nature du gaz sur le régime d'écoulement 218

ANNEXE 12 : Indicateur du type d'écoulement 223

ANNEXE 13 : Influence du desserrage du joint 232

ANNEXE 14 : Le paramètre d'étanchéité Tp et la conception de systèmes étanches 255

CHAPITRE 1
INTRODUCTION

La maîtrise de l'étanchéité de systèmes mécaniques peut sembler n'être, à première vue, qu'une difficulté de second ordre. Cependant, toute conception mécanique où différentes pièces doivent être ajustées en présence de liquide ou de gaz sera confrontée à ce problème. La résolution satisfaisante de cet obstacle s'avérera bien souvent nettement plus complexe qu'elle ne le paraît à priori.

Ainsi, de nombreuses industries se trouvent fréquemment aux prises avec des problèmes d'étanchéité. Les industries pétrochimiques ou associées à l'énergie nucléaire font partie de celles dont les conséquences d'une perte d'étanchéité peuvent s'avérer excessivement dangereuses aussi bien pour leur fonctionnement que pour les populations environnantes. La réalisation de projets liés à l'aérospatiale, à la construction d'infrastructures sous-marines et même à l'automobile se heurte, elle aussi, fréquemment à d'importantes difficultés dans ce domaine. L'étanchéité n'est donc pas un domaine marginal de la mécanique mais bien un secteur où les problèmes sont nombreux, variés et souvent complexes.

Depuis une quinzaine d'années, la prise en compte industrielle de ce problème s'est accentuée. La prise de conscience des industriels de la nécessité d'une meilleure appréhension de l'étanchéité des systèmes qu'ils conçoivent a initié de nombreuses recherches dans ce domaine. Les enjeux de l'étanchéité du point de vue des industriels, d'une part, et de celui des laboratoires spécialisés, d'autre part, ne sont cependant pas les mêmes.

Du point de vue industriel, la maîtrise de l'étanchéité est associée à deux enjeux principaux. Tout d'abord, il s'agit pour les entreprises concernées de satisfaire les normes de sécurité et de protection de l'environnement en vigueur. Ces normes sont devenues, depuis quelques années, nettement plus strictes. Il devient donc nécessaire, d'une part, de mieux contrôler les émissions de sites industriels, mais aussi, d'assurer la résistance des installations à des situations accidentelles.

Le second de ces enjeux est plus particulièrement associé à la qualité et à la rentabilité des produits réalisés ou des installations industrielles utilisées. Les économies que peut générer un meilleur contrôle de l'étanchéité peuvent s'avérer importantes. Ces économies se situent à plusieurs niveaux. Lors du transport de liquides ou de gaz coûteux, la minimisation des pertes pourra s'avérer financièrement intéressante. De plus, la connaissance de la durée de vie des systèmes étanches présents sur un site industriel permettra une planification efficace des travaux de maintenance à y effectuer, et ainsi d'éviter des arrêts imprévus de la production. Les arrêts de sites tels que ceux liés à l'industrie pétrochimique sont en effet des opérations extrêmement coûteuses dont il est fortement rentable de diminuer le nombre.

Du point de vue des laboratoires d'étanchéité maintenant, les enjeux sont tout autres. Il est là aussi possible de mettre en avant deux domaines principaux d'activité. Le premier se propose de caractériser les systèmes d'étanchéité, comme par exemple les joints, afin d'en déterminer les performances sous différentes conditions. Cela permet, d'une part, aux utilisateurs de ces systèmes de faire le choix du produit le plus adapté à leurs besoins, et d'autre part, aux fabricants de ces éléments d'étanchéité d'en améliorer la conception.

Le second domaine principal d'activité se situe au niveau de la conduite d'activités de recherches. Ces activités ont pour but de développer des techniques expérimentales permettant de satisfaire les exigences liées à la qualification de joints d'étanchéité ou de tout autre composant étanche. Elles ont un autre objectif, associé à une recherche plus fondamentale, destinée à mieux comprendre les phénomènes physiques associés à l'étanchéité. Les résultats de ces travaux ont un impact direct sur les méthodes de calcul utilisées pour la conception de systèmes étanches.

Le lien entre les industriels et les laboratoires de recherche se situe justement au niveau des codes de calcul de connections étanches. L'utilisation, au travers de ces moyens de calcul, des données fournies par la qualification en laboratoire de produits d'étanchéité, doit permettre la conception la plus simple et efficace possible de systèmes étanches. Par exemple, dans le cas, excessivement répandu, de brides boulonnées munies de joints d'étanchéité, le calcul englobe non seulement le choix du joint permettant de satisfaire au mieux des exigences industrielles précises, mais aussi, le choix du type de bride et du serrage optimal à lui appliquer. De ce lien entre techniques de laboratoire et réalité industrielle dépendra la qualité des réalisations industrielles concernées. De part la complexité des phénomènes physiques associés à l'étanchéité et leur nécessaire simplification liée au besoin d'une conception plus aisée, ce transfert entre laboratoire et industriels se heurte à de nombreuses difficultés. Les codes de calcul actuellement utilisés possèdent, en effet, tous leurs avantages mais aussi leurs limites.

Cette introduction rapide des divers enjeux de l'étanchéité permet de replacer le travail présenté par le présent document dans un contexte plus général. L'objectif global du présent travail sera donc de tenter d'améliorer certains aspects de ce lien entre laboratoires de recherche et réalité industrielle. Cet objectif va maintenant être détaillé.

Au travers d'une approche principalement expérimentale, l'étude se propose de déboucher sur des propositions concrètes permettant d'améliorer certains points de la méthode de conception de systèmes étanches. Même si le travail mené ici s'intéressera plus particulièrement au cas des joints d'étanchéité et des brides boulonnées qui leur sont associées, les résultats obtenus pourraient être adaptés à d'autres types de systèmes étanches. Les joints d'étanchéité sont, cependant, les composants les plus répandus lorsqu'il s'agit de joindre de manière étanche différentes pièces mécaniques.

L'extrême diversité dans les dimensions des joints existants ainsi que la multiplicité des fluides concernés rend impossible la caractérisation en laboratoire de tous les types de systèmes étanches. Il est impensable de réaliser des essais pour chaque cas particulier rencontré dans l'industrie. C'est pourquoi les codes de calcul sont basés sur les résultats d'essais standard, comme par exemple le test ROTT [6]. Cet essai simule certaines des conditions réelles que peut rencontrer un joint. Il est basé sur des joints aux dimensions standard, en utilisant des plateaux de presses hydrauliques pour la compression du joint et en employant comme gaz de référence l'hélium. Les résultats obtenus devront donc être exploitables pour des joints aux dimensions diverses, pouvant être associés à des brides de différentes rigidités et mis en contact avec des gaz ou fluides quelconques. Les techniques de calcul doivent donc permettre le passage de ces résultats d'essais standard aux conditions réelles rencontrées sur sites industriels.

Afin d'atteindre l'objectif du présent travail, soit l'amélioration du lien entre travaux de laboratoire et réalité industrielle, un sujet précis va être abordé. Il s'agit du lien entre les fuites obtenues avec différents gaz. Ce thème est important compte tenu de la différence entre les gaz utilisés sur site industriel et celui généralement utilisé lors d'essais en laboratoire.

Les essais de laboratoire utilisent comme gaz de référence l'hélium. L'utilisation industrielle de joints les met en contact avec des gaz aux caractéristiques souvent très éloignées de celles de l'hélium. Il est donc important de pouvoir, lors de la conception de systèmes étanches, ramener aux conditions de l'essai celles rencontrées sur site industriel. Cela nécessite la connaissance de la corrélation entre le niveau de fuite mesuré avec l'hélium et celui qui sera obtenu, pour le même joint avec un autre gaz.

Actuellement, cette corrélation est basée sur une approche dont l'amélioration semble souhaitable puisque les nouvelles normes en vigueur, plus sévères, nécessitent une conception plus juste des assemblages étanches. Ce travail sur la corrélation entre les niveaux de fuites obtenus avec différents gaz conduira, de plus, à une réflexion sur la nature des écoulements au sein de joints d'étanchéité. L'impact des résultats qui seront obtenus sur les techniques de calcul de systèmes étanches sera ensuite mis en évidence. L'ensemble de ce travail permettra d'approcher l'objectif visé soit l'amélioration de l'intégration des données de laboratoire pour une conception plus juste des systèmes étanches.

Le présent document sera donc organisé autour de différents points. Tout d'abord, les précédents travaux menés sur le problème de la corrélation entre les fuites de différents gaz seront présentés. A la suite de cet exposé, la manière dont sera abordé le problème ainsi que le principe de l'étude réalisée seront mis en avant. Les résultats théoriques et expérimentaux obtenus seront, ensuite, tour à tour détaillés. Le but sera alors la présentation d'une méthode permettant de calculer la fuite d'un gaz quelconque à partir des résultats d'un essai d'étanchéité réalisé à l'aide d'un gaz de référence. Enfin, l'impact de l'ensemble des résultats obtenus sur les techniques actuelles de conception de brides d'étanchéité munies de joints sera évalué. Ce dernier point permettra, notamment, de vérifier l'intérêt pratique des informations qui auront été obtenues.

CHAPITRE 2
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET PRINCIPE DE L'ETUDE

2.1. Présentation

Afin d'améliorer le lien entre les techniques de laboratoire et la réalité industrielle, le présent travail va s'orienter sur la compréhension d'un phénomène physique dont l'impact sur la conception de systèmes étanches s'avère important. Comme cela a été précisé lors de l'introduction de ce document, le problème physique auquel va s'intéresser le présent travail concerne l'influence du type de gaz sur les performances de joints d'étanchéité.

L'enjeu de ce projet est d'améliorer la prévision du comportement d'assemblages boulonnés munis de joints, et ce à partir de résultats d'essais menés en laboratoire. Les essais utilisés en laboratoire sont basés sur des mesures de fuites à partir d'un seul type de gaz, en général l'hélium. Cependant les installations industrielles mettent en oeuvre des gaz très divers qui peuvent posséder des caractéristiques assez éloignées de celles de l'hélium. Il est donc essentiel de pouvoir corriger, lors de la conception d'assemblages étanches, les résultats obtenus en laboratoire en fonction du gaz cible rencontré sur le site industriel concerné. C'est donc à ce problème que va s'attaquer la présente étude.

Ce problème a déjà fait l'objet d'études qui se sont proposées d'apporter leur propre contribution à la compréhension des phénomènes mis en jeu. Avant de présenter plus en détail le principe de l'étude menée ici, il semble important de mettre en évidence les résultats fournis par ces différents travaux.

2.2. Revue des études précédentes

Les études traitant spécifiquement du lien existant entre les fuites de différents types de gaz ne sont pas nombreuses, ce qui explique pourquoi seulement trois seront présentées ici.

L'objectif de la publication réalisée conjointement par Bazergui et Louis [1] était d'étudier expérimentalement le comportement de deux types de joints en contacts avec trois gaz, l'hélium, l'argon et l'azote. Le premier type de joint étudié, nommé "Double Jacketed" (DJ), se présente sous la forme d'une enveloppe métallique remplie d'un matériau pouvant être de nature diverse. Le second type, dénommé "Spiral Wound" (SW), est un joint composé de spires métalliques entre lesquelles est inséré un matériau à base de fibres d'amiante. Le montage expérimental, la méthode d'essai ainsi que la technique de mesure de fuites utilisés sont semblables à ceux de la présente étude et seront détaillés ultérieurement.

Les conclusions de ces travaux traitent de deux points essentiels et indissociables, la relation existant entre les fuites obtenues avec différents gaz, d'une part, et le régime d'écoulement de gaz au sein de joints, d'autre part.

Les résultats obtenus permettent, tout d'abord, aux auteurs d'affirmer qu'il est possible de prédire la fuite d'un gaz à partir de celle d'un gaz de référence en utilisant une relation basée sur l'hypothèse que les écoulements gazeux sont de nature laminaire. Le rapport entre les fuites de deux gaz devient alors inversement proportionnel au rapport de leurs viscosités cinématiques.

Cette étude montre, de plus, que les courbes représentant l'évolution de la pression interne en fonction de la fuite mesurée sont, sur un graphique logarithmique, linéaires. Les pentes de ces droites donnent une indication sur le régime d'écoulement. Les auteurs montrent que, pour les types de joint qu'ils ont utilisés, ces pentes varient entre 0,55 et 0,6. Une pente égale à 0,5 signifie que le régime de l'écoulement est purement laminaire. Pour le joint de type SW, la pente s'avère égale à 0,6. L'explication associée avec ce résultat est que la fuite se créée dans ce cas au travers de chemins plus complexes. Lors de leurs calculs, les auteurs utiliseront avec succès une valeur de cette pente égale à 0,5 pour les deux types de joints considérés. Ce choix donne de bons résultats au niveau des corrélations entre gaz et permet une intéressante simplification pour la comparaison du comportement de différents types de joints.

Enfin, les auteurs lient le régime d'écoulement d'un gaz à la géométrie des passages de fuite à l'aide du diamètre équivalent de ces passages, et du libre parcours moyen du gaz. Une de leurs conclusions est qu'un régime d'écoulement de type moléculaire doit être associé à de faibles niveaux de fuites.

Les informations contenues dans la référence [1] sont donc excessivement intéressantes. Cette référence donne, notamment, une relation simple entre les fuites de différents types de gaz. Deux remarques s'imposent, néanmoins, au sujet de ce travail. Elles concernent les types de joints et de gaz étudiés. Les trois gaz impliqués ont des architectures moléculaires simples et proches les unes des autres. Les joints employés possèdent une structure de nature à rendre l'écoulement de type laminaire prédominant, que ce soit dans le joint lui-même ou bien à l'interface bride - joint.

Une autre étude s'est ensuite intéressée au problème de la corrélation entre fuites de différents gaz. Cette dernière, réalisée par Marchand et Derenne [2], se proposait d'étudier l'influence de la nature du fluide et de la température sur les écoulements de quatre gaz au travers de deux types de joints en feuilles. Les conclusions de ces travaux concernant l'influence de la température ne seront pas, ici, abordées.

L'étude mettait en oeuvre quatre gaz ; l'hélium, le méthane, l'hexafluorure de soufre et le propane. Les joints testés furent très différents de ceux employés lors de la précédente étude. Le premier, nommé A9, est un joint découpé à l'intérieur d'une feuille de fibres d'amiante compressée. Le second, appelé G2, est issu d'une feuille de graphite renforcée de métal. Le mode opératoire utilisé est basé sur un type d'essai standard : l'essai ROTT [6]. Différents essais ROTT avaient été menés sur deux types de montages différents, le premier spécifique au test ROTT, et le second sur une machine adaptée à la conduite d'essais à température élevée. L'utilisation de deux types de montages expérimentaux explique pourquoi les mesures de fuites avaient alors été réalisées, suivant le cas, à l'aide de deux techniques différentes : la remontée de pression ou la chute de pression.

Pour terminer avec la présentation du mode opératoire employé, il est à noter qu'une importante différence existe entre celui employé lors de l'étude présentee auparavant [1], et celui adopté lors de l'étude de la référence [2]. Dans le premier cas, la comparaison des fuites pour différents gaz s'effectue à partir de mesures réalisées sur un même joint. Dans le second cas, les mesures utilisées pour la comparaison sont réalisées, dans des conditions identiques, mais sur des joints différents. Cette même différence de procédure se retrouvera aussi, comme cela sera précisé ultérieurement, entre celle employée lors de l'étude de la référence [2] et celle utilisée lors des essais expérimentaux du présent travail.

Les résultats de l'étude [2] concernant la corrélation entre les fuites de différents gaz sont très différents de ceux mis en évidence par la référence [1]. Contrairement à cette dernière, il est montré qu'une corrélation basée sur le rapport des viscosités cinématiques des gaz n'est pas valable pour les gaz et les joints étudiés. En fonction des gaz, du type de joint et des contraintes qui leur sont appliquées, les prédictions basées sur l'hypothèse d'écoulement laminaire entraînent, soit une sous-estimation soit une surestimation des rapports entre les fuites de différents gaz. Les écarts rencontrés s'avèrent, de plus, importants. Enfin l'évolution des rapports entre les fuites de différents gaz avec l'état de contrainte, diffère fortement d'un type de joint à l'autre. Pour les deux joints étudiés, ces rapports ne restent pas constants comme le suppose la théorie d'écoulement laminaire.

Dans les conclusions de ce travail, il est recommandé de prendre en compte des types d'écoulement autres que le simple écoulement laminaire. Ceci permettrait probablement d'expliquer l'évolution du rapport entre les fuites de différents gaz avec la contrainte sur le joint. Une étude plus approfondie des mécanismes d'écoulement permettrait donc certainement d'améliorer la corrélation entre les fuites de différents gaz.

Cette étude montre donc que la relation entre gaz, qui semblait validée par des essais impliquant des gaz de structure moléculaire simple, ne semble plus exacte lorsque des gaz plus complexes, mais aussi plus proches de ceux employés dans l'industrie, sont considérés. De plus, l'influence du type de joint sur la nature de l'écoulement, déjà pressentie lors de la première étude présentée, se confirme ici. Les recommandations que contient le travail qui vient d'être présenté orientent de manière intéressante les recherches dans la direction d'un questionnement sur les différents régimes d'écoulement au travers de joints.

C'est dans cette direction que s'est orienté le troisième et dernier travail qui va, maintenant, être présenté. Ce dernier, mené par Massart et Vignaud [3], ne se voulait pas aussi général que les précédents. Lors de ce travail, les auteurs se sont proposés de mieux appréhender le lien entre fuites d'hélium et fuites de vapeur d'eau et d'eau. Seul le cas associé au lien entre vapeur d'eau et hélium sera, ici, mentionné. De plus, l'étude n'a pris en compte qu'un seul type de joint, nommé GEM. Celui-ci est constitué d'une bague de graphite expansé, matricée et placée entre deux anneaux métalliques. Un des grands intérêts de cette étude est qu'elle se propose, non plus d'étudier seulement la validité d'un lien entre fuites de différents gaz basé sur le seul écoulement de type laminaire, mais de mettre en oeuvre un modèle plus complet prenant en compte un écoulement à la fois laminaire et moléculaire.

Le modèle théorique ainsi mis en oeuvre a ensuite été confronté à des mesures expérimentales. Celles-ci ont été réalisées grâce à un montage permettant la mise sous contrainte du joint à l'aide d'une presse hydraulique munie de plateaux chauffants. L'essai consistait alors à mesurer la fuite soit d'hélium soit de vapeur d'eau en faisant évoluer la pression interne de fluide pour une température et un écrasement du joint constant.

Les conclusions des auteurs sur leur travail sont encourageantes mais aussi teintées d'interrogations. En effet, les relations théoriques utilisées permettent de retrouver les allures des courbes expérimentales même si les ordres de grandeur ne sont pas toujours exacts. Ainsi, les auteurs estiment que le modèle utilisé est intéressant pour comprendre les données expérimentales obtenues à partir d'essais complexes. Ils questionnent simultanément la validité de leur démarche théorique puisque les prédictions effectuées ne sont pas toujours très exactes . Il est cependant intéressant de noter que dans le cas du travail qui vient d'être présenté, les auteurs devaient prendre en compte d'importantes variations de pression du gaz, située entre 0,1 et 20 MPa. Ceci rend l'application du modèle employé plus complexe.

Les trois travaux qui viennent d'être présentés montrent que le problème de la prédiction des fuites d'un gaz à partir de celles mesurées pour un gaz de référence est loin d'être un problème simple. Que ce soit au niveau théorique ou expérimental, les contraintes et les difficultés sont nombreuses. Cependant ces trois travaux donnent, sinon des réponses concrètes, au moins des pistes de recherche extrêmement intéressantes.

L'étude objet de ce document se propose donc d'apporter sa contribution à une meilleure compréhension de l'influence du type de fluide sur l'étanchéité de joints. Son principe général va maintenant être mis en évidence. Il sera, notamment, montré comment les contributions des précédents travaux seront utilisées.

2.3. Principe général de l'étude

Afin de mieux appréhender le problème du lien entre fuites de différents gaz, la présente étude se propose de réaliser deux étapes. La première sera la mise en oeuvre d'un modèle théorique décrivant l'écoulement de gaz dans des joints d'étanchéité La seconde étape sera la vérification expérimentale de ce modèle et des différents modes de calcul qui en découleront.

La mise en oeuvre du modèle théorique se fera d'une manière similaire à celle employé lors des travaux menés par Massart et Vignaud [3]. Une attention particulière sera mise dans la description et l'utilisation des équations liées à différents types d'écoulements fondamentaux. Le modèle théorique obtenu ne conduira pas à un seul type de calcul mais à trois corrélations différentes. Ces trois modes de calcul seront, ensuite, vérifiés expérimentalement.

La vérification expérimentale qui sera mise en place va, elle aussi, utiliser certains des éléments issus des travaux précédents. Ainsi, le choix des gaz étudiés et des types de joints sera fait afin de pouvoir effectuer des comparaisons avec les résultats des études précédentes. De plus, le montage expérimental utilisé sera identique, à quelques détails prés à celui utilisé lors de l'étude de Bazergui et Louis [1]. Les gaz et types de joints utilisés lors de l'étude vont maintenant être décrits.

2.3.1. Types de gaz étudiés

Une des conclusions de la première des études qui viennent d'être présentées est que la théorie de l'écoulement laminaire appliquée au changement de gaz donne de bons résultats. Cette étude impliquait des gaz de structure moléculaire simple. Lors de la seconde étude, mettant en oeuvre des gaz bien plus complexes, les conclusions ont été bien différentes. Ces deux remarques ont guidées le choix des gaz étudiés lors de la présente étude.

Ainsi quatre gaz seront étudiés : l'hélium, utilisé comme gaz de référence, un gaz de structure moléculaire simple; l'argon; et deux gaz plus complexes; le méthane et l'hexafluorure de soufre. Les quatre gaz utilisés auront donc tous été déjà étudiés lors des précédentes études, ce qui pourra, le cas échéant, fournir des comparaisons intéressantes.

Le tableau 2.1 présente les caractéristiques des gaz qui seront utilisées tout au long de l'étude. Les valeurs qui s'y trouvent sont issues de la référence [12]. Il est à noter que toutes les valeurs de ce tableau sont données aux conditions standard (T=293,15 K, P=101 KPa) sauf celles indiquées par une étoile (*) qui correspondent à une pression de 100 KPa. Cet écart sera, par la suite, considéré comme négligeable.

	He	CH4	Ar	SF6
Masse molaire (g/mol)	4,003	16,040	39,940	146,050
Densité (Kg/m^3)	0,164*	0,659*	1,632*	6,500
Viscosité absolue ($x\ 10^{-6}$ Pa.s)	19,410	10,870	22,170	14,785*
Viscosité cinématique ($x\ 10^{-6}\ m^2/s$)	118,354	16,495	13,585	2,275

(*) valeurs données pour une température de 293,15 K et une pression de 100 KPa.

Tableau 2.1 : Caractéristiques des gaz étudiés.

Au sujet des gaz impliqués dans l'étude, deux courtes remarques s'imposent. Tout d'abord, l'utilisation du méthane, gaz de nature explosive, nécessitera la mise en oeuvre de précautions lors de la réalisation des essais. Enfin, l'hexafluorure de soufre est un gaz qui possède une pression de vapeur saturante relativement basse, égale à 2,21 MPa (320 psig). Ainsi, lors des essais, la pression maximale, à laquelle ce gaz sera soumis, sera limitée à 1,72 MPa (250 psig) ceci afin d'éviter l'apparition de vapeur saturante dans les différents circuits du montage.

2.3.2. Types de joints étudiés

Les joints qui seront utilisés lors de l'étude sont les mêmes que ceux employés lors de l'étude menée par la référence [2]. Ce choix a été fait pour deux raisons. D'une part, cela permettra des comparaisons utiles, notamment, pour la validation des mesures qui seront effectuées ici. D'autre part, la différence de comportement remarquée au niveau de ces deux joints semble intéressante à approfondir.

Décrire de manière précise la structure de ces joints est une opération difficile compte tenu du peu d'informations fournies par les fabricants. Le premier type de joint, appelé A9, est un joint composé de fibres d'amiante compressées. Ces fibres se retrouvent donc orientées, à l'intérieur du joint, de façon aléatoire. Le second type, nommé G2, est composé de graphite expansé renforcé de métal. Il est à noter que le graphite possède une structure plus lamellaire que l'amiante. Dans les deux cas, les joints testés seront découpés à l'intérieur de feuilles du matériau correspondant.

Cette étape de découpe des joints sera certainement la source de petits écarts au niveau des dimensions des joints testés. Les dimensions nominales adoptées sont identiques à celles utilisées lors de l'étude de la référence [2]. Les diamètres nominaux seront de 149,225 mm (5,875 pouces) pour l'extérieur et de 123,825 mm (4,875 pouces) pour l'intérieur. L'épaisseur nominale des joints, correspondant à celle des feuilles dans laquelle ils seront coupés, sera de 1,6 mm (0,0625 pouces). Le nombre de joints testés, ainsi que leurs dimensions exactes, seront précisés lors de la présentation des essais réalisés.

2.4. Synthèse

Une meilleure approche de l'influence du type de gaz sur le niveau d'étanchéité de joints compléterait les informations permettant une meilleure utilisation de résultats d'essais menés en laboratoire. La conception de tels systèmes, c'est-à-dire le choix du type de joint le mieux adapté et le calcul des efforts de serrage à lui appliquer pourrait alors être améliorée de manière intéressante.

Les travaux déjà menés dans le sens d'une meilleure compréhension de ce problème ne semblent pas permettre de tirer des conclusions définitives. Ils fournissent cependant d'intéressantes pistes de recherche. Ce sont ces informations que la présente étude se propose d'exploiter et de compléter afin d'approcher l'objectif fixé.

Deux étapes seront donc utilisées lors de cette étude. La première permettra une approche théorique du problème découlant sur différents modes de calcul. La seconde se proposera d'étudier, expérimentalement, les performances de ces calculs. Ce sont ces deux étapes que se proposent de présenter les prochains chapitres.

CHAPITRE 3
APPROCHE THEORIQUE

3.1. Présentation

L'étude de l'influence du type de gaz sur le niveau de fuite d'un joint d'étanchéité passe nécessairement par une meilleure compréhension des phénomènes qui régissent les écoulements qui s'y produisent. Cependant, devant la diversité des types de matériaux entrant dans la composition des joints, il devient très complexe de définir de manière à la fois précise et universelle ces écoulements. De plus, même si l'écoulement de gaz dans un type de joint donné pourrait certainement être défini avec précision, ceci n'aurait qu'un intérêt pratique secondaire puisque ce travail devrait alors être répété pour chaque type de joint.

L'objectif de l'approche théorique qui va être menée est de décrire un modèle d'écoulement suffisamment précis pour satisfaire la nécessité d'une meilleure compréhension globale des écoulements, mais aussi, suffisamment général pour que ce modèle ne soit pas limité à un seul type de joint. Ainsi, dans un premier temps, différents types d'écoulement fondamentaux seront présentés. A l'aide de ces derniers, l'écoulement de gaz dans un joint d'étanchéité, sera modélisé. Enfin, ce modèle sera appliqué au sujet principal de l'étude, à savoir l'influence de la nature du gaz sur le niveau de fuite.

3.2. Les écoulements élémentaires

3.2.1. Ecoulement visqueux dans un tube

Soit un tube circulaire rectiligne de diamètre constant D et de longueur L. Le débit massique lié à l'écoulement laminaire et stationnaire d'un fluide incompressible, visqueux et newtonien peut être décrit par la loi de Hagen-Poiseuille [7,8] :

$$Q_m = \frac{\pi D^4}{128L}\frac{\rho}{\eta}\left(P_1 - P_2\right) \tag{3.1}$$

Q_m :	débit massique (kg/s),
D, L :	diamètre et longueur du tube (m),
ρ, η :	densité (kg/m^3) et viscosité absolue (Pa.s) du fluide
P_1, P_2 :	pressions (Pa) en amont et en aval du tube.

Pour que les hypothèses énoncées soient satisfaites, il faut que le fluide possède une densité constante (incompressible) et une viscosité indépendante de la valeur de la contrainte de cisaillement fluide et du gradient de vitesse dans la direction perpendiculaire à l'écoulement (newtonien). De plus, l'écoulement doit être, pour que la relation (3.1) soit applicable, indépendant du temps (stationnaire), entièrement développé, c'est-à-dire considéré suffisamment loin des extrémités du tube, et tel que son nombre de Reynolds soit inférieur à 1100 (écoulement laminaire).

Dans le cas d'un gaz, compte tenu de sa compressibilité, l'équation (3.1) ne devrait plus être exploitable. Cependant, celle-ci peut être appliquée à un petit élément de longueur du tube où la densité est supposée constante, ce qui conduit à l'équation suivante:

$$Q_m = -\frac{\pi D^4}{128}\frac{\rho}{\eta}\frac{dP}{dL} \tag{3.2}$$

En considérant les différentes formulations de la loi des gaz parfaits :

$$PV = nRT, \qquad P = \frac{\rho RT}{M} \tag{3.3}$$

$$\rho = \rho^{\bullet} \frac{P}{P^{\bullet}} \frac{T^{\bullet}}{T}$$

P: pression du gaz (Pa),

n, M: nombre de moles et masse molaire (kg/mol) du gaz,

R : constante universelle des gaz parfaits : R = 8,3144 J/(mol.K),

T : température du gaz (K),

$\rho^{\bullet}$, $P^{\bullet}$, $T^{\bullet}$: densité (kg/m^3), pression (Pa) et température (K) du gaz dans les conditions standard.

L'équation (3.2) devient, pour un écoulement à température standard :

$$Q_m = -\frac{\pi D^4}{128} \frac{\rho^{\bullet}}{\eta^{\bullet}} \frac{1}{P^{\bullet}} \frac{PdP}{dL} \tag{3.4}$$

$\eta^{\bullet}$: viscosité absolue du gaz à température standard.

En intégrant cette équation, sur la longueur du tube, toujours pour un écoulement isotherme, et en considérant que la viscosité ne varie qu'avec la température, on obtient :

$$Q_m = \frac{\pi D^4}{128L} \frac{\rho^{\bullet}}{\eta^{\bullet}} \frac{1}{2P^{\bullet}} \left(P_1^2 - P_2^2\right) = \frac{\pi D^4}{128L} \frac{1}{\upsilon^{\bullet}} \frac{1}{2P^{\bullet}} \left(P_1^2 - P_2^2\right) \tag{3.5}$$

$\upsilon^{\bullet}$: viscosité cinématique du gaz dans les conditions standard (m^2/s).

L'expression (3.5) revient à utiliser l'équation de Hagen-Poiseuille, pour un fluide incompressible à la température standard, associée à la densité moyenne du gaz ($\rho_m = \rho^* \frac{P_1 + P_2}{2P^*}$). Cette équation peut se justifier par les faibles vitesses impliquées lors d'écoulements laminaires et isothermes. En effet, il est courant de considérer que, lorsque les vitesses d'écoulement sont très inférieures à la vitesse du son, les relations définies pour des fluides incompressibles puissent être adaptées au cas des gaz parfaits [8]. Une intégration rigoureuse des équations de la mécanique des fluides appliquées aux fluides compressibles entraînerait une formulation plus complexe du problème où le logarithme de la pression jouerait un rôle.

Dans l'étude menée ici, la caractérisation de l'écoulement laminaire d'un gaz dans un tube circulaire rectiligne sera associée à l'équation (3.5). Cette même expression est fréquemment rencontrée dans la littérature, que ce soit dans des ouvrages généraux sur la mécanique des fluides [8], ou lors d'études plus spécifiques à l'étanchéité [1,2]. Enfin, cette expression n'est valable que si l'écoulement reste de la même nature tout au long du tube.

3.2.2. Ecoulement intermédiaire dans un tube

Le développement de l'équation de Hagen-Poiseille, caractéristique d'un écoulement laminaire, prend en compte le fait que la vitesse du fluide, en l'occurrence du gaz, est nulle aux parois du tube. Dans la réalité, les particules entrent en collision avec les aspérités des parois. Elles sont alors absorbées puis réémises avec différentes vitesses et directions. Ceci engendre une mince couche de gaz proche des parois qui entraîne une traînée visqueuse. Ce phénomène peut être pris en compte en ajoutant un terme de glissement à l'expression laminaire présentée précédemment.

L'expression du flux gazeux, soit le produit pression-volume par unité de temps, associée à ce glissement est donnée par la relation suivante [7]:

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} = \frac{\pi D^3}{16L}\sqrt{\frac{\pi RT}{2M}}\frac{2-f}{f}(P_1 - P_2) \qquad (3.6)$$

f : fraction de molécules absorbées et réémises,

Q : flux gazeux ($Pa.m^3/s$) ($Q = \frac{RT}{M}Q_m$).

La loi des gaz parfaits, donnée par la relation (3.3), peut être utilisée pour exprimer le débit massique associé au glissement. Il est alors possible d'obtenir le débit massique de l'écoulement intermédiaire, dans les conditions standard de température, en ajoutant le débit massique laminaire au débit massique de glissement :

$$Q_m = \frac{\pi D^4}{128L}\frac{\rho^*}{\eta^*}\frac{1}{2P^*}(P_1^2 - P_2^2) + \frac{\pi D^3}{16L}\sqrt{\frac{\pi M}{2RT^*}}\frac{2-f}{f}(P_1 - P_2) \qquad (3.7)$$

Knudsen donne à cette dernière équation la forme suivante, ici adaptée aux conditions standard, où la fraction f de particules absorbées et réémises est explicitée [7]:

$$Q_m = \frac{\pi D^4}{128L}\frac{\rho^*}{\eta^*}\frac{1}{2P^*}(P_1^2 - P_2^2) + \frac{D^3}{6L}\sqrt{\frac{2\pi M}{RT^*}}\left[\frac{1+\sqrt{\frac{M}{RT^*}}\frac{D\bar{P}}{\eta^*}}{1+1.24\sqrt{\frac{M}{RT^*}}\frac{D\bar{P}}{\eta^*}}\right](P_1 - P_2) \qquad (3.8)$$

$\bar{P}$: pression moyenne sur la longueur du tube (Pa).

Lorsque le terme $\sqrt{\frac{M}{RT}}\frac{D\bar{P}}{\eta^*}$ de l'expression (3.8) devient petit devant l'unité, le terme entre crochets devient proche de 1. Cela est notamment le cas lorsque des canaux de très petits diamètres sont impliqués.

La formulation simplifiée du débit d'un écoulement intermédiaire dans un tube, telle qu'elle sera utilisée ultérieurement dans cette étude, devient alors :

$$Q_m = \frac{\pi D^4}{128L}\frac{1}{\upsilon^*}\frac{1}{2P^*}\left(P_1^2 - P_2^2\right) + \frac{D^3}{6L}\sqrt{\frac{2\pi M}{RT^*}}\left(P_1 - P_2\right) \qquad (3.9)$$

Comme dans le cas laminaire, la validité de cette équation n'est vérifiée que si l'écoulement reste intermédiaire sur toute la longueur du tube.

3.2.3. Ecoulement moléculaire dans un tube

Dans ce type d'écoulement, les molécules n'ont plus d'interaction entre elles. Elles se déplacent de manière aléatoire et entrent en collision avec les parois du tube. L'écoulement satisfait alors l'équation de Knudsen [7] :

$$Q_m = \frac{D^3}{6L}\sqrt{\frac{2\pi M}{RT}}\left(P_1 - P_2\right) \qquad (3.10)$$

Cet écoulement correspond au cas limite de l'écoulement intermédiaire présenté précédemment. Il est possible de considérer, de manière simplifiée, que la proportion de particules entrant en collision avec les parois augmente lorsque le diamètre du tube ou la pression diminuent. Ainsi l'écoulement intermédiaire tend lentement vers l'écoulement moléculaire où, comme les molécules n'ont plus d'interaction entre elles, les forces de viscosité s'annulent. L'équation du débit d'un écoulement moléculaire telle que donnée précédemment nécessite, elle aussi l'uniformité de l'écoulement sur toute la longueur du tube. Enfin, il est à noter que les équations définissant les débits massiques des régimes intermédiaires et moléculaires sont cohérentes avec les expressions des débits volumiques données par la référence [3].

3.2.4. Limite de validité des écoulements élémentaires

La formulation générale de l'écoulement d'un gaz dans un tube circulaire rectiligne peut donc être assimilée à l'équation (3.9) caractérisant l'écoulement intermédiaire. Cet écoulement possède deux cas limites, le cas de l'écoulement laminaire où seules les forces de viscosité sont influentes, et le cas de l'écoulement moléculaire où seule l'interaction des molécules avec les parois des tubes joue un rôle.

Le passage d'un type de ces écoulements à l'autre est conditionné par le nombre de Knudsen, ici noté r, rapport liant la géométrie du tube à une des caractéristiques du gaz :

$$r = \frac{D}{\lambda} \quad \text{avec } \lambda = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}\varepsilon^2}\frac{1}{P} \tag{3.11}$$

λ : libre parcours moyen du gaz (m),

ε : diamètre de la molécule de gaz assimilée à une sphère (m),

k : constante de Boltzmann.

Le libre parcours moyen λ du gaz correspond à la distance moyenne traversée par toutes les molécules entre leurs collisions successives. Il est, à température constante, inversement proportionnel à la pression du gaz. Le lien entre la valeur du rapport précédent et le régime d'écoulement dans un tube, à température standard, est résumé dans le tableau (3.1).

$r = \frac{D}{\lambda}$	Type d'écoulement	Expression du débit
r>110	**Laminaire**	$Q_m = \frac{\pi D^4}{128L} \frac{1}{\upsilon^*} \frac{1}{2P^*} \left(P_1^2 - P_2^2\right)$
1<r<110	**Intermédiaire**	$Q_m = \frac{\pi D^4}{128L} \frac{1}{\upsilon^*} \frac{1}{2P^*} \left(P_1^2 - P_2^2\right) + \frac{D^3}{6L} \sqrt{\frac{2\pi M}{RT^*}} \left(P_1 - P_2\right)$
r<1	**Moléculaire**	$Q_m = \frac{D^3}{6L} \sqrt{\frac{2\pi M}{RT^*}} \left(P_1 - P_2\right)$

Tableau 3.1 : Régimes d'écoulement dans un tube

Si, à diamètre du tube constant, la pression en amont du tube augmente, le libre parcours moyen du gaz diminue et le nombre de Knudsen augmente, l'écoulement tend alors vers sa limite laminaire.

Si à pression du gaz constante, c'est-à-dire pour un libre parcours moyen constant, le diamètre du tube diminue, l'écoulement tendra vers sa limite moléculaire. En effet lorsque D devient plus petit que λ, les particules auront plus tendance à heurter les parois qu'à interagir entre elles, ce qui caractérise l'aspect moléculaire de l'écoulement.

3.2.5. Correction tenant compte de l'écart entre gaz réel et parfait

La loi des gaz parfaits, donnée sous différentes formes par les équations (3.3), permet de décrire le comportement idéal d'un gaz. Le comportement des gaz réels diffère de cette loi, notamment lorsque les conditions de pression et de température sont proches des conditions de changement d'état du gaz considéré.

Le comportement des gaz réels peut être décrit plus précisément par les relations :

$$PV = nZRT \text{ ou } P = \frac{\rho ZRT}{M},$$

$$\rho = \rho^* \frac{P}{P^*} \frac{Z^*}{Z} \text{ (à la température standard)} \qquad (3.12)$$

Le facteur Z est le coefficient de compressibilité du gaz, égal à 1 pour un gaz parfait, et qui dépend des conditions de pression, de température et du type de gaz.

Les équations donnant les débits massiques de chaque type d'écoulement utilisent la loi des gaz parfaits. Le premier paragraphe de l'annexe 1 présente le calcul mis en oeuvre pour évaluer l'écart entre les débits calculés à l'aide des formules précédentes et ceux qui prennent en compte l'éloignement des gaz parfaits.

Ce calcul permet de définir, pour chaque gaz, une fonction de la pression en amont du tube, par laquelle il conviendrait de multiplier les expressions précédentes des débits pour prendre en compte l'éloignement des gaz de la loi des gaz parfaits. Cependant il est possible de constater, d'après la figure A1.2 de l'annexe 1 que la prise en compte de cette déviation n'entraînerait que de faibles différences avec le calcul de débits en considérant le gaz comme parfait. L'écart maximal se produirait pour l'hexafluorure de soufre. Dans ce cas, l'erreur relative entre calcul réel et calcul idéal n'excéderait pas 16 %.

3.2.6. La perméation

La perméation concerne la possibilité qu'ont les gaz de traverser les solides même si ceux-ci ne possèdent pas d'orifices suffisamment importants pour permettre un écoulement tel que ceux présentés précédemment. De manière schématique, il est possible de décomposer ce phénomène en trois étapes. Tout d'abord, le gaz se dissout dans le solide, diffuse ensuite au travers de la paroi, puis est finalement émis, par désorption, à l'extérieur du solide.

Lors des étapes de dissolution et de réémission du gaz, la concentration C de ce dernier peut être liée à sa pression par $C = bP^{1/j}$ [7] où b est la solubilité du gaz dans le solide et j est un coefficient en général égal à 1 mais qui peut prendre la valeur 2 dans le cas de la dissolution de gaz diatomiques dans des métaux.

La diffusion du gaz dissous dans un solide de surface 1 cm^2 suit, lorsque le régime est établi, la première loi de Flick [7] liant le flux gazeux au gradient de concentration

$$Q = -d\frac{dC}{dx} \qquad (3.13)$$

d, Q : coefficient de diffusion et flux gazeux d'un gaz.

Le flux gazeux d'un gaz traversant par perméation un solide dont la surface est de 1 cm^2, dont l'épaisseur vaut h et dont les parois sont aux pressions P_1 et P_2 peut alors être obtenu en combinant les deux expressions précédentes :

$$Q = db\frac{P_1^{1/j} - P_2^{1/j}}{h} = K\frac{P_1^{1/j} - P_2^{1/j}}{h} \qquad (3.14)$$

K est alors appelée constante de perméation. Cette constante est exprimée en volume de gaz, dans les conditions standard, qui traverse, par seconde, une surface de 1 cm^2 sur une épaisseur de 1 cm et pour une différence de pression d'une atmosphère.

Il est important de noter que ce coefficient K dépend du couple gaz-matériau et que seule l'expérimentation permet de le déterminer.

3.3. Modèle d'écoulement dans les joints

Différents types d'écoulements fondamentaux ainsi que leurs équations caractéristiques viennent d'être présentés. Leur utilisation pour la mise en oeuvre d'un modèle d'écoulement dans les joints va maintenant être abordée.

3.3.1. Modélisation du joint

Le principe du modèle est simple. Le joint va être considéré comme un ensemble de tubes rectilignes, ou capillaires, de diamètre différents. Ce modèle physique permet donc de considérer que le débit massique de l'écoulement au travers du joint est la combinaison des débits laminaire, intermédiaire et moléculaire présentés précédemment. Ce modèle ne prend donc pas en compte le phénomène de perméation. Ce dernier est régi par une loi d'écoulement qui fait intervenir un coefficient K qui n'est en général pas connu dans le cas de joints d'étanchéité.

3.3.2. Equations associées au modèle

Le modèle considéré assimile le joint à un ensemble de N capillaires rectilignes de diamètres constants sur leur longueur. Soit N_l le nombre de capillaires, de diamètre moyen D_l, pour lesquels l'écoulement est, sur toute leur longueur laminaire. Soit N_i le nombre de capillaires de diamètre moyen D_i pour lesquels l'écoulement est intermédiaire.

Soit, enfin, N_m le nombre de capillaires de diamètre D_m pour lesquels l'écoulement est moléculaire. Ces tubes sont supposés de longueur identique et égale à la largeur du joint L. Ils sont tous soumis à la même différence de pression. Leurs diamètres respectifs vérifient la relation $D_l > D_i > D_m$.

Le débit massique, à température standard, de l'ensemble de ces capillaires peut alors s'écrire comme la somme des débits associés aux écoulements élémentaires :

$$Q_m = \frac{\pi\left(N_l D_l^4 + N_i D_i^4\right)}{128L}\frac{1}{\upsilon^*}\frac{1}{2P^*}\left(P_1^2 - P_2^2\right) + \frac{\left(N_i D_i^3 + N_m D_m^3\right)}{6L}\sqrt{\frac{2\pi M}{RT^*}}\left(P_1 - P_2\right) \qquad (3.15)$$

De cette équation de l'écoulement intermédiaire, il est possible d'en extraire deux autres qui permettront de caractériser les cas extrêmes : les lois d'écoulement laminaire et moléculaire.

Considérer que l'écoulement du joint est laminaire revient à dire que le nombre de canaux dont le diamètre est suffisamment gros pour permettre un écoulement laminaire est très supérieur aux autres. Dans ce cas, le débit massique de l'écoulement laminaire de gaz au travers d'un joint d'étanchéité s'écrit :

$$Q_m = \frac{\pi N_l D_l^4}{128L}\frac{1}{\upsilon^*}\frac{1}{2P^*}\left(P_1^2 - P_2^2\right) \qquad (3.16)$$

Si c'est le nombre de canaux de diamètre très petit, pour lesquels l'écoulement est moléculaire, qui est prédominant, alors le débit massique devient :

$$Q_m = \frac{N_m D_m^3}{6L}\sqrt{\frac{2\pi M}{RT^*}}\left(P_1 - P_2\right) \qquad (3.17)$$

3.3.3. Evaluation du modèle

Le type de modèle mis en oeuvre ici est évidemment très schématique. Dans la réalité le joint serait plutôt assimilable, non pas à un ensemble de canaux, mais à une structure poreuse constituée de passages tortueux interconnectés. L'intérêt principal de ce modèle est de permettre l'emploi d'équations simples pour en caractériser l'écoulement. Ce type de modèle a déjà fait l'objet d'études [15, 16, 17] dans le domaine des milieux poreux. Les résultats alors obtenus n'ont pas toujours été totalement satisfaisants. Ces études se proposaient surtout d'estimer la valeur du débit au travers d'une structure poreuse. Or, dans ce cas il faut évaluer le nombre de canaux et leur diamètre respectif ce qui s'avère très périlleux.

L'objectif de la présente étude est tout autre, il s'agit de déduire la fuite pour un gaz connaissant celle obtenue avec un gaz de référence. Il sera alors vu comment éliminer les paramètres inconnus comme le nombre de canaux et leur diamètre.

3.3.4. Quantificateur du type d'écoulement

Avant de présenter la méthode permettant la mise en équation de l'influence du type de gaz sur le débit d'un joint, il semble intéressant de décrire un paramètre qui sera utilisé pour tenter d'évaluer la nature de l'écoulement au sein d'un joint.

Les équations qui viennent d'être données expriment le lien entre le débit massique de gaz au travers d'un joint et la différence de pression à laquelle ce dernier est soumis. La différence majeure entre les expressions laminaire (3.16), intermédiaire (3.15) et moléculaire (3.17) est, outre les paramètres liés au gaz et à la géométrie du joint, l'exposant auquel la différence de pression est élevée.

Le paramètre qui sera utilisé pour quantifier la nature de l'écoulement découle de cette dernière remarque. Ce paramètre, noté "s", est la pente de la droite définie par :

$$\text{Log } P_1 = s \text{ Log } Q_m + b$$

D'après l'équation du débit donnée par la relation (3.15), en supposant la pression en aval P_2 négligeable devant la pression en amont P_1, il peut être déduit que :

- lorsque l'écoulement est à dominante laminaire, le terme en P_1^2 domine et $s = 0,5$,
- lorsque l'écoulement est à dominante moléculaire, le terme en P_1 domine et $s=1$.

De plus, lorsque l'écoulement est intermédiaire, même si l'équation liant Log P_1 à Log Q_m n'est plus exactement représentative d'une droite, il est possible d'en approcher l'équation par une droite dont la pente varie entre 0,5 et 1. Ceci est lié au fait, qu'en général, une courbe du second degré peut être représentée, avec suffisamment de précision par une fonction puissance : $Q_m = A P_1^2 + B P_1 \approx \alpha P_1^\beta$.

Le calcul du logarithme décimal des deux termes de l'approximation obtenue conduit à l'équation d'une droite telle que celle présentée précédemment.

Ce raisonnement simple met donc en évidence le paramètre quantificateur du type d'écoulement qui sera utilisé par la suite. Le choix de ce paramètre particulier est lié au fait que ce dernier joue un rôle important, comme cela sera vu ultérieurement, dans certains concepts du domaine de l'étanchéité. La validité de ce quantificateur de l'écoulement sera étudiée lors de l'analyse expérimentale de la présente étude.

3.4. Application du modèle à l'étude de l'influence du type de gaz

Le modèle du joint qui consiste à le considérer équivalent à un réseau de capillaires va maintenant être employé pour définir des techniques de calcul destinées à prévoir la fuite d'un gaz à partir de celle d'un gaz de référence. Comme trois équations caractéristiques du type d'écoulement ont été mises en évidence, trois modes de calcul associés vont maintenant être présentés.

3.4.1. Calcul laminaire

Cette approche part de l'hypothèse que l'écoulement dans un joint d'étanchéité est à dominante laminaire. Ainsi pour deux gaz il est possible d'écrire le rapport des débits massiques à température standard donnés par l'équation (3.16) :

$$\frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = \frac{\dfrac{\pi N_1 D_1^4}{128L}\dfrac{1}{\upsilon_2^{\bullet}}\dfrac{1}{2P^{\bullet}}\left(P_1^2 - P_2^2\right)}{\dfrac{\pi N_1 D_1^4}{128L}\dfrac{1}{\upsilon_1^{\bullet}}\dfrac{1}{2P^{\bullet}}\left(P_1^2 - P_2^2\right)} \quad \text{d'où} \quad \frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = \frac{\upsilon_1^{\bullet}}{\upsilon_2^{\bullet}} \qquad (3.18)$$

Q_{m1}, Q_{m2} : débits massiques des gaz 1 et 2,

$\upsilon_1^{\bullet}$, $\upsilon_2^{\bullet}$: viscosité cinématique des gaz 1 et 2 dans les conditions standard.

Le calcul laminaire implique donc que le rapport des fuites de deux gaz est inversement proportionnel au rapport de leurs viscosités cinématiques exprimées à la température standard.

3.4.2. Calcul moléculaire

De manière similaire à l'approche laminaire, ce mode de calcul considère que les deux gaz s'écoulent tous les deux suivant un régime moléculaire. Dans ce cas, le rapport des débits s'écrit, à l'aide de l'équation (3.17) :

$$\frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = \frac{\frac{N_m D_m^3}{6L}\sqrt{\frac{2\pi M_2}{RT^*}}\left(P_1 - P_2\right)}{\frac{N_m D_m^3}{6L}\sqrt{\frac{2\pi M_1}{RT^*}}\left(P_1 - P_2\right)} \quad \text{d'où} \quad \frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \qquad (3.19)$$

M_1, M_2 : masses molaires des gaz 1 et 2.

Le mode de calcul moléculaire associe donc au rapport des fuites le rapport des racines carrées de leurs masses molaires respectives.

3.4.3. Calcul intermédiaire

Toujours suivant le même concept, ce mode de calcul suppose que les deux gaz considérés s'écoulent suivant un régime de type intermédiaire. Cependant, dans ce cas le calcul devient plus complexe car le simple rapport des débits intermédiaire, tel que défini par l'équation (3.15), ne permet plus d'éliminer les paramètres inconnus tels que le nombre de canaux, leur diamètre et leur longueur.

Le mode de calcul intermédiaire nécessite, tout d'abord, l'écriture de l'équation du débit (3.15), appliquée à un gaz 1, sous la forme :

$$Q_{m1} = A_1 P^2 + B_1 P \qquad (3.20)$$

Cette écriture néglige l'influence de la pression en aval P_2 par rapport à celle de la pression en amont, ici notée P. Les coefficients A_1 et B_1 contiennent les paramètres liés au joint et les caractéristiques du gaz 1.

Si l'évolution, en fonction de la pression en amont du joint, de la fuite du gaz 1 est connue, il sera alors possible de déterminer les coefficients A_1 et B_1 correspondants. Les paramètres du joint peuvent alors être isolés en multipliant ces coefficients par les caractéristiques du gaz 1. Les coefficients A_2 et B_2 du gaz 2 peuvent alors être exprimés par :

$$A_2 = A_1 \frac{\upsilon_1^*}{\upsilon_2^*} \quad \text{et} \quad B_2 = B_1 \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \tag{3.21}$$

Le débit massique correspondant au gaz 2 peut alors être calculé par :

$$Q_{m2} = A_2 P^2 + B_2 P \tag{3.22}$$

Le calcul intermédiaire permet donc de prendre en compte le fait que viscosités et masses molaires des gaz ont une influence sur le lien entre les fuites de différents gaz.

3.4.4. Hypothèses associées aux trois modes de calculs

La première des hypothèses est évidemment associée à la conservation des conditions auxquelles est soumis le joint. Ces calculs permettent seulement de déterminer la correspondance entre les fuites de différents gaz pour un même type de joint soumis à une même différence de pression, à une même contrainte et pour une même température, ici la température standard. La structure interne du joint doit rester identique pour que la corrélation soit possible. De plus, dans le cas du calcul intermédiaire, la pression en aval est supposée négligeable devant la pression en amont du joint, ce qui est, dans la réalité, souvent justifié.

La seconde hypothèse suppose que la nature du fluide ne modifie pas de manière significative la structure interne du joint. Celle ci semble raisonnable dans le sens où le type de fluide ne semble pas pouvoir, par lui même, créer de nouveaux canaux où en modifier le diamètre.

Finalement, il est supposé que la nature du gaz n'influence pas de manière excessive le régime d'écoulement. Cette hypothèse est nécessaire pour que les trois modes de calcul précédents fonctionnent. Elle est plus difficile à justifier à priori mais sera vérifiable expérimentalement.

3.4.5. Prise en compte de l'éloignement des gaz parfaits

Comme cela à été vu précédemment, il conviendrait, afin de prendre en compte l'éloignement des gaz de la loi des gaz parfaits, de multiplier les débits massiques calculés par des fonctions de la pression dépendantes de la nature du gaz. Cette correction impliquerait que les rapports entre débits de différents gaz devraient eux aussi être multipliés par le rapport des fonctions de corrections propres à chaque gaz et données par la figure A1.2 de l'annexe 1. Ceci entraîne une complication importante des calculs nécessaires pour déterminer le débit d'un gaz à partir de celui d'un gaz de référence.

Le modèle utilisé est déjà très schématique. De plus la correction maximale apportée sur les rapports calculés n'excéderait un faible pourcentage de ces rapports, sauf pour l'hexafluorure de soufre où la correction pourrait atteindre 20%. Compte tenu de ces deux remarques et du fait que dans le cadre de mesures de fuites une correction même de 20 % n'aurait qu'une signification minime, il a été décidé de ne pas appliquer de correction aux formules permettant le calcul de l'influence du gaz sur le niveau de fuite.

3.5. Synthèse

Lors de ce chapitre l'écoulement de gaz au sein d'un joint d'étanchéité à été modélisé. Pour cela le joint a été assimilé à un réseau de canaux rectilignes. L'écoulement a été associé à la somme de trois écoulements fondamentaux.

Les équations de chacun de ces régimes d'écoulement ont été présentées. Ces relations ont été appliquées à la mise en oeuvre de calculs permettant de déterminer la fuite de n'importe quel type de gaz à partir de celle d'un gaz de référence. Les hypothèses associées à ces méthodes de calcul ont ensuite été énoncées. Enfin, un paramètre simple permettant d'estimer le régime d'écoulement d'un gaz dans un joint à été présenté.

Tous ces concepts vont maintenant être utilisés et vérifiés. C'est l'objectif que se propose d'atteindre l'étude expérimentale présentée par les prochains chapitres.

CHAPITRE 4
DESCRIPTION DES ESSAIS ET VALIDATION DES RESULTATS

4.1. Présentation

La vérification des concepts et formules qui viennent d'être présentés et qui permettent l'analyse de l'influence du changement de gaz sur le niveau de fuite va maintenant être réalisée. Pour cela, la confrontation des résultats que fournissent les modes de calcul laminaire, intermédiaire et moléculaire à des résultats expérimentaux va être menée.

Le principe de l'étude est simple. Puisque le gaz le plus couramment utilisé en laboratoire est l'hélium, il sera considéré comme gaz de référence. Ainsi chaque mesure de fuite hélium sera utilisée pour calculer, suivant les trois modes de calcul, la fuite obtenue avec différents gaz cibles. Ces valeurs seront ensuite confrontées aux mesures effectuées avec ces mêmes gaz.

Lors de ce chapitre, le montage expérimental ainsi que le protocole d'essai utilisés seront détaillés. La validité des résultats obtenus sera ensuite discutée. Le prochain chapitre présentera, finalement, les résultats de l'étude.

4.2. Le montage expérimental

4.2.1. La bride utilisée

Afin de rapprocher le plus possible les conditions d'essai aux conditions d'utilisation réelles, les mesures de fuites ont été effectuées sur des joints montés sur une bride normalisée ANSI de 4'' - Classe 600lb. Les deux flasques de la bride sont montés sur un poteau central tel que représenté à la figure A2.1 de l'annexe 2.

Comme la mesure de fuite s'effectue par remontée de pression, deux plaques assurent la compression du joint testé et un anneau muni de joints toriques vient compléter l'enceinte étanche de mesure. Les deux plaques qui compriment le joint testé possèdent un fini de surface plus doux que celui recommandé par les normes industrielles Il correspond à une rugosité moyenne de 1,62 10^{-6} m (64 10^{-6} pouces) alors que la norme industrielle la recommande située entre 3,17 10^{-6} m (125 10^{-6} pouces) et 12,7 10^{-6} m (500 10^{-6} pouces) [11]. L'influence du fini de surface sur le niveau de fuite et sur le régime d'écoulement est un paramètre difficile à quantifier de manière simple puisque cette influence sera associée au type de joint utilisé. Ainsi, même si le choix d'un fini de surface doux éloigne quelque peu le montage de la réalité industrielle, il possede néanmoins l'avantage de limiter l'influence de ce paramètre sur le sujet étudié.

4.2.2. Serrage et mise en pression de la bride

Le serrage de la bride est effectué manuellement à l'aide d'une clef dynamométrique. Les huit boulons sont munis de jauges extensiométriques qui permettent de contrôler avec exactitude la force qui leur est appliquée.

Le serrage des boulons s'effectue en plusieurs passes et de manière à assurer au maximum un serrage uniforme du joint. La contrainte appliquée sur le joint est calculée en tenant compte de la force dans les boulons, de la surface du joint et de la pression interne du gaz qui a tendance à relâcher le joint. Même si la rigidité de la bride est modifiée par l'utilisation de plaques et de joints toriques pour comprimer le joint testé et réaliser une enceinte de mesure étanche, cela n'aura que peu d'influence sur l'état de contrainte réel du joint. De précédentes études menées au TTRL montrent notamment que la force récupérée par les joints toriques est négligeable par rapport à celle développée par les boulons. L'avantage d'un montage utilisant de telles plaques est de pouvoir mesurer les fuites par la technique de montée de pression plus précise et fiable que, par exemple, la chute de pression.

La mise en pression du gaz est elle aussi effectuée manuellement. Le circuit de mise en pression est présenté à la figure A2.2 de l'annexe 2. Le fait que la mise en pression, comme le serrage, soient effectués manuellement sera certainement la cause de certains des écarts constatés lors des différents essais effectués. Cependant, tout au long de l'expérimentation, une attention toute particulière à été portée pour la minimisation de l'influence de ces facteurs.

Il est à noter que la conception du montage expérimental utilisé permet de minimiser l'effet de fond. La mise en pression de la bride n'entraînera qu'un faible déchargement du joint. Cet aspect du montage est important pour l'étude menée ici puisqu'il permet de s'assurer que la structure interne du joint ne subira que de faibles modifications lors de la mise en pression de la bride. Puisque le joint ne subira qu'un faible déchargement, le diamètre des chemins de passage du gaz au sein du joint ne sera que peu affecté par la mise en pression du montage.

4.2.3. La mesure de fuites

La mesure de fuites est effectuée par la méthode de remontée de pression. Le gaz qui s'échappe du joint d'étanchéité est collecté dans le circuit de mesure. Ce dernier est présenté à la figure A2.2 de l'annexe 2. Sa pression est mesurée à l'aide d'un capteur différentiel donnant la différence de pression entre ce circuit et un petit volume de référence à la pression atmosphérique et thermiquement isolé. Le capteur utilisé permet de mesurer une augmentation maximale de pression relative de 2,758 10^{-2} MPa (4 psig). A partir des mesures de l'augmentation de la pression dans le circuit, la fuite peut être calculée comme suit :

$$Q_v = \frac{1}{\Delta t}\left(\frac{T^*}{P^*}\right)\left(\frac{P_f V_f}{T_f} - \frac{P_i V_i}{T_i}\right) \tag{4.1}$$

Q_v :	débit volumique exprimé en cm^3 de gaz, aux conditions standard, par seconde (cm^3/s STP),
Δt :	durée de la mesure (s),
P_f, V_f, T_f, P_i, V_i, T_i :	pression, volume et température initiales et finales.

Le débit massique du gaz s'échappant du joint peut être simplement relié au débit volumique mesuré à l'aide de la densité du gaz dans les conditions standard.

Les variations de températures sont prises en compte dans le calcul. La température est ici mesurée par un thermocouple au contact du raccord entre la bride et le circuit de mesure. Il est à noter que l'ensemble des raccords des circuits de mise en pression et de mesures ont été thermiquement isolés à l'aide soit de bande adhésive isolante, soit de plaques de tissus isolant.

Le volume du circuit de mesure, ainsi que ses variations, sont liées aux changements d'épaisseur du joint. Ceux-ci sont mesurés à l'aide de deux capteurs de déplacement dont la position est présentée à la figure A2.1 de l'annexe 2. Il est, de plus, à noter qu'au volume naturel du circuit de mesure peut être ajouté, dans le cas de mesure de grosses fuites, un volume additionnel de 3800 cm^3.

L'évaluation exacte de la précision et de la sensibilité de la méthode de mesure telle qu'utilisée ici est délicate. Cependant lors des essais, la mesure de fuites de gaz inférieures à 10^{-4} cm^3/s s'est avérée très difficile et celle de fuites entre 10^{-4} et 10^{-3} cm^3/s parfois assez longue. Devant la difficulté d'estimer la précision des mesures, celles-ci ont été répétées plusieurs fois afin de pouvoir être comparées entre elles. Ceci permettra de valider les résultats obtenus.

Enfin, la mesure de fuite, telle que présentée ici, est basée sur la loi des gaz parfaits. Comme cela a déjà été mentionné lors du chapitre 3, le comportement des gaz réels s'éloigne de cette loi. La méthode de prise en compte de cet écart est présentée au second paragraphe de l'annexe 1. Cette méthode montre que la prise en compte de l'éloignement de la loi des gaz parfaits peut être effectuée en multipliant les débits massiques mesurés par un coefficient de correction dépendant du type de gaz. Ces coefficients sont les suivants :

	Hélium	Argon	SF6	Méthane
Facteurs de correction	**0,998**	**1,002**	**1,022**	**1,005**

Tableau 4.1 : Facteurs de correction prenant en compte l'éloignement du comportement des gaz de la loi des gaz parfaits

Lors de la présentation des formules permettant le passage d'un type de gaz à un autre, les corrections à apporter avaient été négligées notamment compte tenu des nombreuses simplifications que comporte, par ailleurs, le modèle employé. Dans le cas de la mesure de fuites, le problème est différent. Il est, en effet, essentiel que les mesures effectuées soient les plus proches possibles de la réalité afin de pouvoir évaluer avec objectivité le modèle proposé. Cependant, les facteurs de corrections étant très proches de 1, le produit des fuites massiques mesurées par ces facteurs de correction ne sera pas, ici, effectué.

4.2.4. Le système d'acquisition de données

L'acquisition des données a été réalisée à partir d'un programme, réalisé au TTRL, utilisant le logiciel LABVIEW. L'emploi d'un tel système permet d'enregistrer la totalité des paramètres mis en jeu. Il est, de plus, possible de contrôler, en temps réel, le déroulement de l'expérimentation. C'est à partir des informations fournies, lors des mesures, par ce programme que la qualité du serrage ou la stabilité des mesures de fuites, ont été évaluées.

4.3. Le protocole d'essai

La procédure employée pour la réalisation des essais découle directement des considérations théoriques présentées précédemment. Il a été vu que le modèle d'écoulement mis en oeuvre permet de caractériser les débits massiques gazeux en fonction de la différence de pression et de la structure du joint assimilé à un réseau de capillaires. Cette structure est considérée seulement dépendante de l'écrasement du joint.

L'expérimentation se déroulera donc en mesurant, pour un niveau de serrage constant, les fuites pour différents niveaux de pression à l'intérieur de la bride. Cette opération sera évidemment répétée pour différents niveaux de serrage.

Afin de comparer les fuites obtenues pour différents gaz, l'évolution de la fuite avec la pression interne sera mesurée, pour chaque niveau de serrage, successivement avec trois gaz. L'avantage principal de cette procédure est d'assurer un maximum de correspondance entre les conditions d'essai lors des mesures pour différents gaz. Les rapports entre fuites de différents gaz seront donc calculés à partir de mesures effectuées sur un même joint. Les différences éventuelles entre les comportements de deux joints, même de nature identique, seront donc sans influence sur les résultats de l'étude.

Cette procédure possède néanmoins deux inconvénients. Le premier est lié à au fluage du joint, c'est-à-dire, à la diminution, avec le temps, de son épaisseur. Le fluage s'accompagne de la diminution, ou relaxation, de la contrainte. La contrainte appliquée sur le joint lors des mesures avec différents gaz ne sera donc pas rigoureusement la même.

Le second inconvénient de la procédure est lié au fait qu'un même joint sera, lors des essais, traversé successivement par différents types de gaz. Avant de mesurer les fuites avec un gaz, il sera nécessaire d'évacuer le gaz précédent afin de réduire les conséquences éventuelles de cette présence sur le comportement du joint. Pour ce faire, lors du changement de type de gaz, un temps d'attente devra être respecté avant de débuter les mesures. Lors de ce temps d'attente, la bride sera pressurisée avec le gaz dont les mesures de fuites veulent être réalisées. L'écoulement ainsi créé dans le joint devrait permettre d'éliminer, en grande partie, le gaz précédent encore présent dans le montage expérimental et le joint.

Il est important de noter que la procédure d'essai utilisée diffère fondamentalement de celle employée lors de l'étude menée par Marchand et Derenne [2] et dont les résultats ont déjà été exposés au chapitre 2. Lors de cette dernière analyse expérimentale, les rapports entre les fuites de différents gaz avaient été calculés à partir de mesures effectuées sur des joints différents. En effet, pour chaque type de gaz et chaque joint étudié, un essai ROTT [6] nécessitant l'utilisation d'un nouveau joint, avait été mené. Les différences de comportement pouvant exister entre deux joints de même nature devenaient donc, contrairement à la présente analyse, influentes sur les corrélations effectuées. Cette remarque est importante puisque les résultats expérimentaux de la présente étude seront comparés à ceux de la référence [2].

Afin que les résultats obtenus soient les plus fiables possibles, de nombreux essais ont été menés. Tous l'ont été suivant la procédure qui vient d'être présentée. Ces différents essais vont être maintenant détaillés.

4.4. Conditions d'essai et nombre de tests

Tout l'enjeu des essais réalisés était de parvenir à couvrir l'éventail de niveaux de fuites le plus large possible parmi ceux que permettait de mesurer le montage expérimental utilisé. C'est dans cette optique que les niveaux de contrainte et de pression interne employés ont été déterminés. La difficulté qui se présentait alors était la faible connaissance initiale des performances du montage expérimental.

Dans un premier temps, quatre essais préliminaires ont donc été menés, 3 utilisant un joint de type A9 et un avec un joint de type G2. Seuls deux gaz, l'hélium et l'argon, étaient alors utilisés. Les niveaux de contraintes et de pression appliqués ont été modifiés plusieurs fois afin d'en déterminer la séquence la plus adaptée.

Ces essais préliminaires ont, de plus, permis d'évaluer les temps d'attente nécessaires, d'une part pour la stabilisation des mesures de fuites, et, d'autre part, pour chasser le gaz précédent lors de chaque changement de gaz. Les résultats obtenus lors de ces quatre premiers essais ne seront pas exploités plus en détail lors de la présentation des résultats finaux de cette étude. Les disparités entre les procédures employées ne les rendent, en effet, que faiblement significatifs.

Le coeur de l'étude est donc constitué par les six essais qui ont ensuite été réalisés. Trois essais ont été menés avec chacun des deux types de joints étudiés. Chaque essai a été conduit avec trois gaz différents. La combinaison des gaz utilisés a varié d'un essai à l'autre de manière à ce que les mesures de fuites effectuées sur chaque gaz soient répétées deux fois avec chaque type de joint. De plus l'hélium, utilisé comme gaz de référence, faisait obligatoirement partie des trois gaz utilisés. Les fuites d'hélium ont donc été mesurées pour chacun des six joints testés.

Les niveaux de contrainte appliqués sur les joints ont été identiques pour chacun des trois essais réalisés sur chaque type de joint. Cependant, toujours dans l'optique de couvrir le plus large éventail de niveaux de fuites, la contrainte maximale appliquee au joint graphite a été plus élevée que celle associée au joint amiante. Ceci a été rendu possible par le fait que les fuites mesurées à haute contrainte avec le joint graphite sont plus élevées que celles obtenues avec le joint amiante dans les mêmes conditions

Les niveaux de pression interne ont, dans la majorité des cas, été conservés identiques. Ils ont été choisis afin de couvrir une plage allant de 0,689 MPa (100 psi) à 5,516 MPa (800 psi) tout en permettant l'obtention d'un nombre de mesures suffisant pour mener les corrélations souhaitées. Deux facteurs sont à l'origine de certains changements dans les pressions appliquées.

Le premier est lié au type de gaz. Pour le SF6, compte tenu de sa faible pression de vapeur saturante de 2,2 MPa (320 psi), la pression maximale à laquelle il a été soumis est de 1,72 MPa (250 psi). Afin de posséder suffisamment de points de mesures, la pression du SF6 a donc évolué entre 0,344 MPa (50 psi) et 1,72 MPa (250 psi) à un intervalle de 0,344 MPa (50 psi). Lorsqu'un essai impliquait le SF6 il était alors nécessaire d'appliquer ces mêmes niveaux de pression au gaz de référence, soit l'hélium.

Le second de ces facteurs est lié à la difficulté de mesurer certaines fuites, notamment celles à basse pression pour de hauts niveaux de contrainte. Cette difficulté a parfois entraîné certains changement dans les niveaux de pression appliqués. Cependant, dans le majorité des cas, le protocole initialement fixé a été respecté. Enfin, il est à noter que pour les essais effectués sur le joint amiante soumis à une contrainte de 7 MPa, la pression interne maximale fut limitée à 2,757 MPa (400 psi) en raison des fuites importantes, proches de 5 mg/s pour l'hélium, déjà obtenues à cette pression.

Le protocole d'essai est détaillé dans le tableau A3.1 de l'annexe 3. Cette annexe présente aussi les résultats de la métrologie effectuée sur les joints avant chaque essai.

Le tableau 4.2 résume les points importants du protocole d'essai, à savoir, pour chaque type de joint, le numéro de l'essai associé, les gaz alors utilisés, ainsi que les niveaux de contrainte et les pressions limites employés. Les valeurs des pressions internes sont, ici, pour des raisons de simplicité, données en psi. Elles peuvent être ramenées en bar ou en MPa à l'aide des deux conversions suivantes :

1 MPa = 145 psi et 1 MPa = 10 bar.

Essai	Gaz	Type de joint	
		Amiante A9	Graphite G2
		Contraintes (MPa) : 7-28-42-55-69	Contraintes (MPa) : 7-28-42-62-83
		Pressions limites (psi)	Pressions limites (psi)
Essai 1	He	50-800	50-800
	Ar	100-800	100-800
	SF6	50-250	50-250
Essai 2	He	50-800	50-800
	SF6	50-250	50-250
	CH4	100-800	100-800
Essai 3	He	100-800	100-800
	Ar	100-800	100-800
	CH4	100-800	100-800

Tableau 4.2 : Récapitulatif du protocole d'essai

Dans ce qui suit les essais seront identifiés à partir du type de joint impliqué, A9 ou G2 et de son numéro soit un, deux ou trois. Le tableau précédent pourra alors être utilisé pour rappeler les conditions exactes du test.

A ce stade de l'étude, le montage expérimental ainsi que le protocole utilisé pour la conduite des essais ont été présentés. Cette étape préliminaire est nécessaire à la compréhension de certains des phénomènes observés lors de l'expérimentation. Les informations qu'elle contient seront donc fréquemment utilisées pour l'explication des résultats obtenus. Ce sont ces résultats qui vont maintenant être présentés puis analysés.

4.5. Validité des résultats obtenus

L'objectif de la présente étude est de mieux cerner le lien entre les fuites de différents gaz notamment par la confrontation de résultats expérimentaux avec des modèles théoriques. Cependant, avant d'atteindre cet objectif, il semble essentiel de s'assurer que les résultats sur lesquels ce lien sera basé possèdent suffisamment de crédibilité. Les études expérimentales en général, et celles portant sur l'étanchéité en particulier, sont influencées par de nombreux paramètres extérieurs qui peuvent fausser les résultats. La validation des résultats semble donc nécessaire. C'est ce travail de validation qui va maintenant être mené. Trois étapes ont été choisies pour le mener à bien.

La première étape a, en fait, été menée tout au long de l'expérimentation et concerne la stabilisation des mesures de fuites ainsi que la justesse des niveaux de pression et de contraintes appliqués.

La seconde étape consiste à utiliser les différents essais effectués pour en comparer les mesures. Cette opération revient à en évaluer la répétabilité, même si l'utilisation de ce terme n'est pas, ici, complètement apropriée.

La troisième et dernière étape de cette validation est la comparaison de certains résultats avec ceux issus de calculs ou d'expérimentations précédentes. Dans cette optique, les résultats seront comparés à ceux obtenus lors de l'étude présentée par la référence [2]. Cette étude mettait en jeux des types de joint et de gaz identiques mais utilisait un protocole d'essai différent.

La conduite de ces trois étapes est détaillée par l'annexe 4. La première permet de constater que, de manière générale, l'ensemble des essais effectués conduisent à l'obtention de mesures de fuites stables. Lorsque les mesures n'apparaissaient pas totalement stabilisées après plusieurs heures d'enregistrement, les valeurs correspondantes n'ont pas été retenues pour le reste de l'étude. Ceci se produit surtout pour de faibles valeurs de fuites. Enfin, l'analyse des enregistrements des essais a démontré la bonne conservation, au cours d'un essai, de la contrainte initialement appliquée sur le joint et ce malgré les cycles de compression et de décompression causés par les mises en pression successives. Ces mises en pression s'avèrent donc avoir un effet relativement faible au niveau de la contrainte appliquée sur le joint.

La seconde étape a montré la bonne répétabilité des mesures de fuites ainsi que des rapports entre les fuites de différents gaz. Seul le second essai, basé sur un joint graphite a donné des résultats ne paraissant pas tout à fait satisfaisants lors des mesures de fuites du méthane.

Enfin, la troisième étape, par une comparaison entre les résultats obtenus et ceux extraits d'une précédente étude, permet de déduire que les valeurs des fuites et des rapports obtenus sont réalistes. La principale cause des écarts observés semble pouvoir être associée aux différences entre les joints de type amiante pris en compte. Les tendances observées lors des deux études, notamment au niveau de l'évolution des rapports avec la contrainte sur le joint, s'avèrent identiques.

L'étude de la validité des résultats donne donc des résultats globalement très positifs. Même si certaines anomalies ont été relevées, celles-ci restent acceptables et même normales dans le cadre d'une étude expérimentale. Cette validation assure que les développements futurs de l'étude seront menés sur des résultats expérimentaux crédibles.

4.6. Synthèse

Lors de ce chapitre le déroulement de la phase expérimentale a été présenté. Les différents aspects du montage expérimental utilisé ont été étudiés. La manière dont les essais ont été planifiés, afin de permettre l'obtention de résultats significatifs, a été décrite. Enfin, la validation des résultats, basée sur trois approches différentes, a été menée.

Jusqu'à présent il n'a pas été question de la signification des résultats obtenus. Cette interprétation approfondie des données expérimentales va être l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 5
PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

5.1. Présentation

Le montage expérimental ainsi que le protocole d'essai, ont été décrits. La validité des résultats obtenus a été évaluée. L'objet de ce chapitre est donc de détailler ces résultats afin d'approcher une solution au problème du lien entre les fuites de différents gaz.

Cette analyse va se dérouler en plusieurs étapes. La première se proposera d'étudier le comportement, tant au niveau mécanique qu'en terme d'étanchéité, des deux types de joint utilisés.

Lors de la seconde étape, les performances des modes de calcul laminaire, moléculaire et intermédiaire, mis en évidence lors du chapitre 3, seront considérées. La manière dont ils permettent de décrire les fuites réellement mesurées sera estimée.

Ces résultats seront ensuite utilisés afin de décrire la manière dont évolue l'écoulement au sein de joints d'étanchéité. Quelques commentaires au sujet des précédentes études menées sur le sujet pourront alors être formulés.

Les résultats qui vont maintenant être présentés ne comprendront pas la totalité des mesures effectuées. Une telle démarche entraînerait des lourdeurs risquant de nuire à la clarté de la présentation. Ainsi, comme la répétabilité des résultats à déjà été vérifiée, seul un essai pour chaque gaz et type de joint sera utilisé. Pour les deux types de joints, les mesures hélium, argon et méthane prises en compte seront celles issues de l'essai 3 tandis que celles de l'hexafluorure de soufre seront celles de l'essai 2. Les rapports entre gaz seront toujours calculés à partir de mesures issues d'un même essai et obtenues dans des conditions identiques.

5.2. Comparaison du comportement des deux types de joints

La comparaison du comportement des deux types de joint utilisés semble importante pour permettre la compréhension ultérieure de l'évolution des rapports entre les fuites de différents gaz. Cette comparaison sera axée sur trois points. Le premier concernera le comportement mécanique des différents joints, le second leur étanchéité, le troisième les rapports entre les fuites de différents gaz qui leur sont associés.

5.2.1. Comportement mécanique des joints

Lors de l'expérimentation, l'écrasement du joint est mesuré à l'aide de deux capteurs de déplacements. Cela permet de s'assurer de l'uniformité du serrage, de calculer les variations du volume du circuit de mesure mais aussi d'analyser le comportement mécanique du joint. La figure 5.1 regroupe les courbes présentant l'évolution de la contrainte sur le joint en fonction de son écrasement moyen. Deux séries de courbes sont identifiées. Chacune correspond aux trois essais effectués sur chaque type de joint.

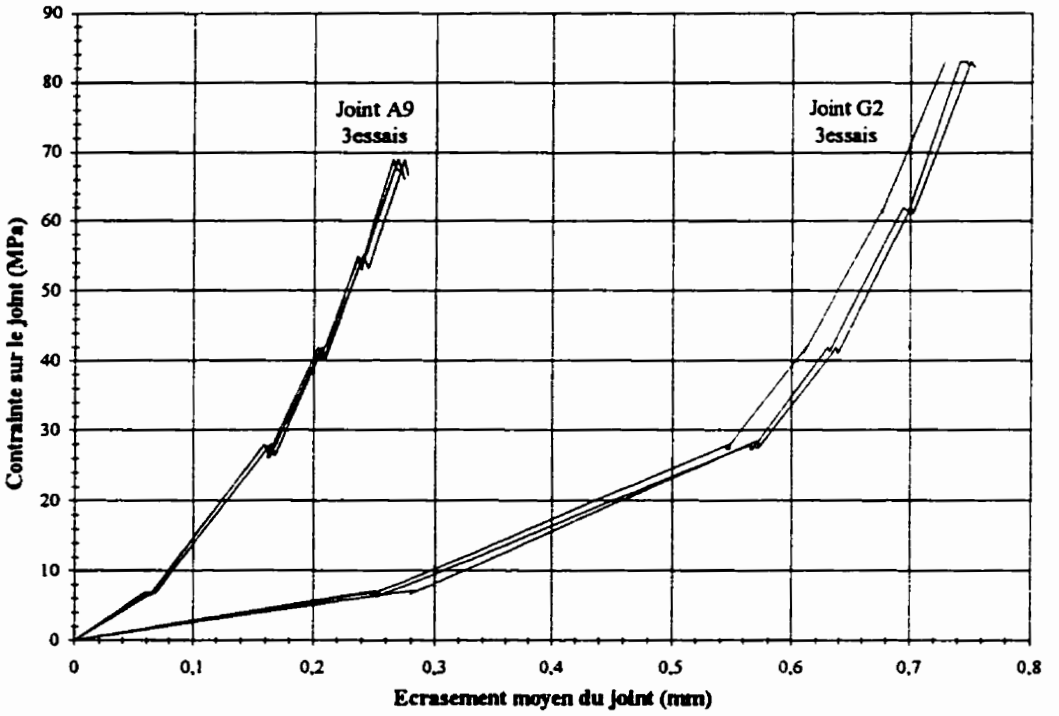


Figure 5.1 : Courbes contrainte-écrasement obtenues lors des trois essais pour chaque type de joint (A9 et G2)

Ces courbes mettent en évidence les différences dans le comportement mécanique des deux types de joint. Il semble bon de rappeler que l'épaisseur nominale initiale de chaque joint était de 1,6 mm. Les courbes présentées montrent tout d'abord que l'écrasement du joint graphite est nettement supérieur à celui du joint amiante. A la fin de l'essai, le joint graphite aura perdu presque la moitié de son épaisseur. Celle du joint amiante ne sera réduite que d'environ un sixième. De plus, la linéarité des courbes présentées est nettement meilleure dans le cas du joint amiante.

Le joint amiante s'avère donc beaucoup plus rigide et plus linéaire que le joint graphite. Il est surtout très important de remarquer que l'écrasement du joint graphite obtenu lorsqu'il est soumis à une contrainte de 7 MPa, soit le premier des niveaux de contraintes employés, est identique à l'écrasement du joint amiante soumis à la contrainte maximale de 69 MPa.

Il sera ultérieurement intéressant de voir si un lien éventuel peut être trouvé entre les caractéristiques mécaniques des joints étudiés et celles associées aux écoulements gazeux qui traversent chaque type de joint. C'est ce dernier aspect, lié à l'étanchéité de chacun des deux types de joint testés, qui va maintenant être abordé.

5.2.2. Etanchéité des deux types de joint

Les résultats qui vont maintenant être étudiés permettent de mettre clairement en évidence l'évolution comparative des niveaux de fuite obtenus pour chaque type de joint. C'est ce que se propose de faire la figure 5.2.

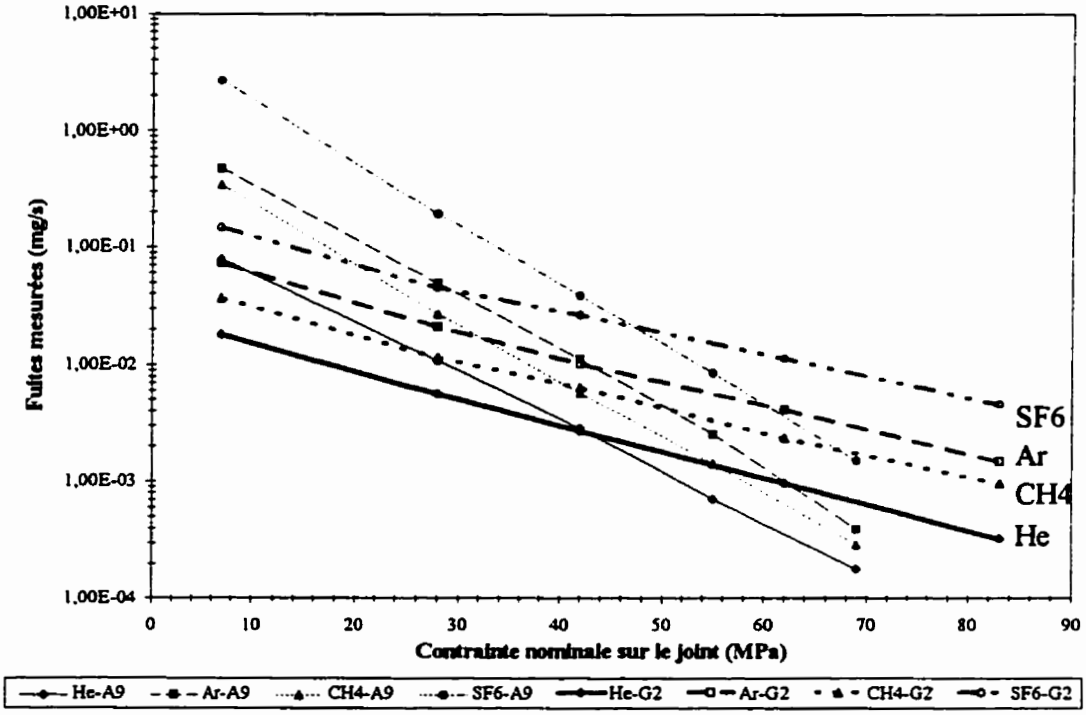


Figure 5.2 : Fuites hélium, argon, méthane et SF6 en fonction de la contrainte Joints type A9 et G2 - Pression interne de 0,689 MPa

Cette figure est représentative de ce qui peut être observé pour tous les autres niveaux de pression interne étudiés. Les remarques qui seront faites à son sujet resteront donc valables pour tous les niveaux de pression.

La première remarque concerne les évolutions respectives des fuites mesurées pour les deux types de joints pris en compte. Il apparaît clairement que l'étanchéité à faible niveau de contrainte est meilleure pour le joint graphite que pour le joint amiante. Cette tendance s'inverse avec l'augmentation de la contrainte puisqu'à haut niveau de contrainte ce sont les fuites obtenues avec le joint graphite qui s'avèrent supérieures.

La seconde remarque concerne l'ordre dans lequel se trouvent les fuites mesurées pour les différents gaz. Cet ordre est identique d'un joint à l'autre. Ainsi la fuite hélium qui est la plus faible de celles mesurées pour le joint graphite le restera aussi dans le cas du joint amiante. Le même type de raisonnement s'applique pour les autres gaz considérés. Le classement, par ordre croissant, en fonction du type de gaz, des fuites mesurées est donc celles obtenues avec l'hélium, le méthane, l'argon puis, enfin, l'hexafluorure de soufre.

La figure 5.2 qui vient d'être présentée donne un meilleur aperçu des performances, en terme d'étanchéité, de chacun des deux types de joint testés. Des premières informations concernant l'influence du fluide sur le niveau de fuite ont pu en être tirées. L'influence du type de gaz sur l'étanchéité va être approfondie au travers de l'analyse de l'évolution des rapports entre les fuites de différents gaz.

5.2.3. Rapports entre fuites de différents gaz

L'influence du type de gaz sur le niveau d'étanchéité d'un joint a été présentée par la figure 5.2. L'analyse qui va maintenant être menée se propose d'approfondir ce sujet en abordant de manière concrète le problème du lien entre les fuites de différents gaz. Les impacts de la nature du gaz et du type de joint seront, tour à tour, abordés.

Les figures de l'annexe 8 présentent l'évolution des rapports entre les fuites d'un des gaz cibles et celles d'hélium en fonction de la contrainte sur le joint. Les fuites utilisées pour le calcul de ces rapports ont été obtenues dans des conditions d'essai identiques. L'intérêt de ces graphiques est de présenter des résultats permettant d'étudier simultanément l'influence du type de gaz, du type de joint et du niveau de contrainte. La figure 5.3 donne des résultats typiques pour une pression interne du gaz de 0,689 MPa (100 psi).

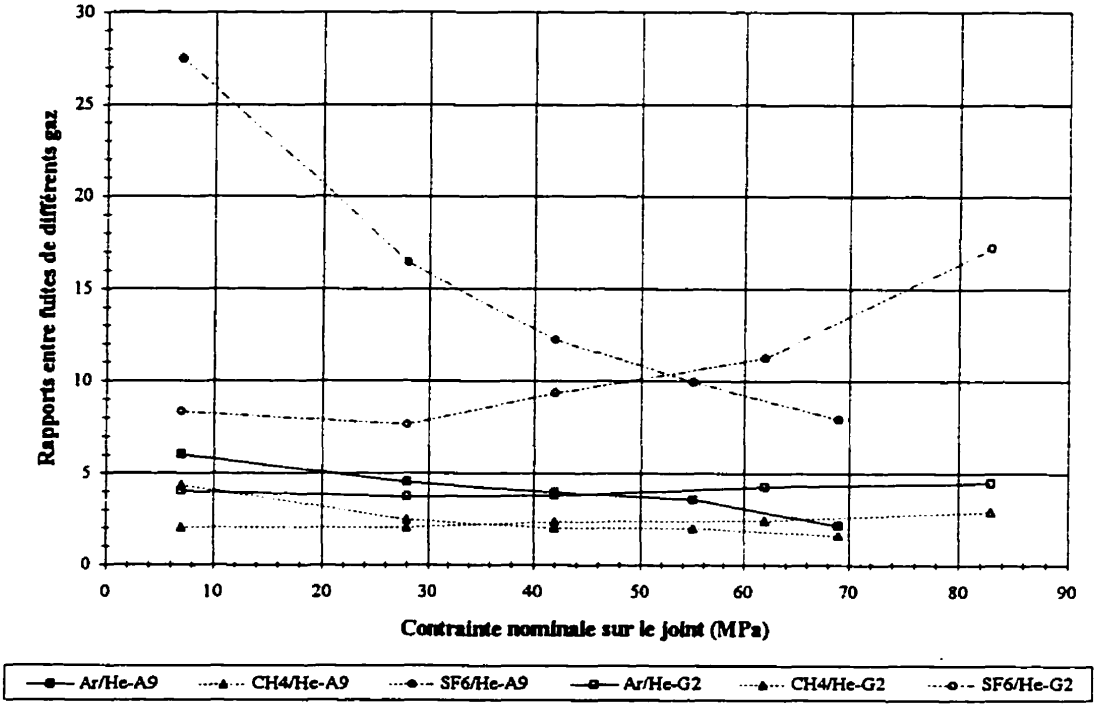


Figure 5.3 : Evolution des rapports entre les fuites de différents gaz et les fuites d'hélium - Joints A9 et G2 Pression interne 0,689 MPa

La première remarque évidente, issue de l'observation des figures de l'annexe 8, est que l'évolution observée des rapports entre fuites de différents gaz et celles d'hélium diffère radicalement suivant le type de joint considéré.

Dans le cas du joint amiante, les rapports entre chaque gaz et l'hélium diminuent avec l'augmentation de la contrainte. Dans celui du joint graphite, les rapports restent constants pour des contraintes inférieures à 45 MPa puis augmentent avec le niveau de contrainte. Il est tout aussi intéressant de remarquer que les rapports calculés à haute contrainte pour le joint amiante sont très proches de ceux obtenus à faible contrainte pour le joint graphite. Ceci reste vrai quelque soit le gaz considéré.

Il faut, de plus, noter que, même si les rapports calculés sont très différents d'un gaz à l'autre, leurs évolutions avec la contrainte sont identiques quelque soit le gaz pris en compte. Si le rapport, calculé en utilisant un gaz cible donné, croît avec la contrainte, alors ceux calculés en utilisant les autres gaz augmenteront eux aussi. Les amplitudes de variations seront néanmoins très différentes selon le gaz"

Les conclusions qui peuvent être tirées de ces remarques concernent l'influence du type de joint d'une part, et celle du type de gaz, d'autre part.

Tout d'abord, l'influence du type de joint sur le lien entre les fuites de différents gaz est très importante. Tant au niveau des rapports calculés pour une contrainte donnée qu'à celui de leur évolution avec la compression du joint, d'importantes différences existent entre les deux joints.

Le type de gaz influence la valeur des rapports entre les fuites de ce gaz et celles du gaz de référence. Cependant, il est plus important de noter que les mécanismes qui commandent les changements de ces rapports avec la contrainte ne semblent pas influencés par la nature du gaz. Ceci se traduit par le fait que les évolutions des rapports entre les fuites de chaque gaz et celles d'hélium sont identiques quelque soit le gaz cible considéré.

L'objectif du présent travail ne se limite pas à la simple observation de l'influence de ces divers paramètres. Il s'agit, comme cela a déjà été expliqué, de comprendre les mécanismes liant les fuites de différents gaz et de proposer une méthode permettant un calcul plus juste des fuites d'un gaz quelconque à partir de celles d'un gaz de référence. C'est vers cet aspect que va maintenant se tourner l'étude. Pour cela, les performances des différents modes de calcul présentés lors du chapitre 3 vont être évaluées par l'intermédiaire de la confrontation de leurs résultats avec les mesures expérimentales effectuées.

5.3. Performances des modes de calcul

L'approche théorique menée lors du chapitre 3 a permis de définir trois modes de calcul différents. Ils permettent de calculer la fuite d'un gaz cible à partir de la mesure de celle d'un gaz de référence et ce pour un joint soumis à des conditions identiques. Les deux modes de calcul laminaire et moléculaire expriment le rapport des fuites de deux gaz par une valeur constante seulement dépendante des gaz considérés. Les évolutions des rapports entre les fuites de différents gaz qui viennent d'être présentées montrent déjà qu'aucun de ces deux calculs ne sera suffisant pour décrire l'ensemble des phénomènes qui se produisent au sein de joints d'étanchéité. Ces rapports ne restent pas constants comme le prédisent ces deux calculs.

Afin d'analyser plus en détail les performances des trois modes de calculs, les figures présentées par l'annexe 9 vont maintenant être étudiées. Ces figures permettront notamment d'évaluer les influences de la pression interne et de la contrainte sur la performance des modes de calcul.

Chacune de ces figures présente l'évolution des fuites, soit calculées, soit issues de mesures, en fonction de la pression interne du gaz. Chaque figure est associée à un type de joint, à un niveau de contrainte, et à un gaz cible. Les mesures de l'hélium, utilisé comme gaz de référence sont, tout d'abord, présentées. La courbe polynomiale du second degré qui représente le mieux ces mesures leur est associée. Cette courbe a été calculée par la méthode des moindres carrés et lie le débit massique d'hélium Q_m à la pression interne P. Les coefficients qui apparaissent dans l'équation sont les coefficients A_1 et B_1 utilisés lors de la définition du mode de calcul intermédiaire effectuée au chapitre 3. Trois courbes sont ensuite présentées. Elles représentent les résultats de chacun des trois modes de calcul. Enfin la courbe expérimentale du gaz cible est illustrée. Ces figures donnent donc un bon aperçu de la corrélation entre les résultats des trois modes de calcul et les résultats expérimentaux.

L'analyse sera menée en deux temps. Les résultats des corrélations associées au joint amiante A9 puis au joint graphite G2 seront alors détaillés.

5.3.1. Corrélation entre fuites de différents gaz pour le joint en amiante A9

Les figures 5.4 et 5.5, issues de l'annexe 9, présentent les résultats des corrélations entre les mesures de fuites de l'argon et les résultats des trois modes de calcul lorsque le joint A9 est soumis à des contraintes nominales de 42 MPa et 69 MPa. Ces figures montrent tout d'abord qu'aucun des trois modes de calcul n'est suffisant, à lui seul, pour décrire l'ensemble des phénomènes qui se produisent. Par contre, il est extrêmement intéressant de noter que les mesures effectuées sur le gaz cible s'ajustent bien à l'un des trois modes de calcul utilisés. Ces informations sont confirmées par l'ensemble des figures liées au joint A9 présentées par l'annexe 9.

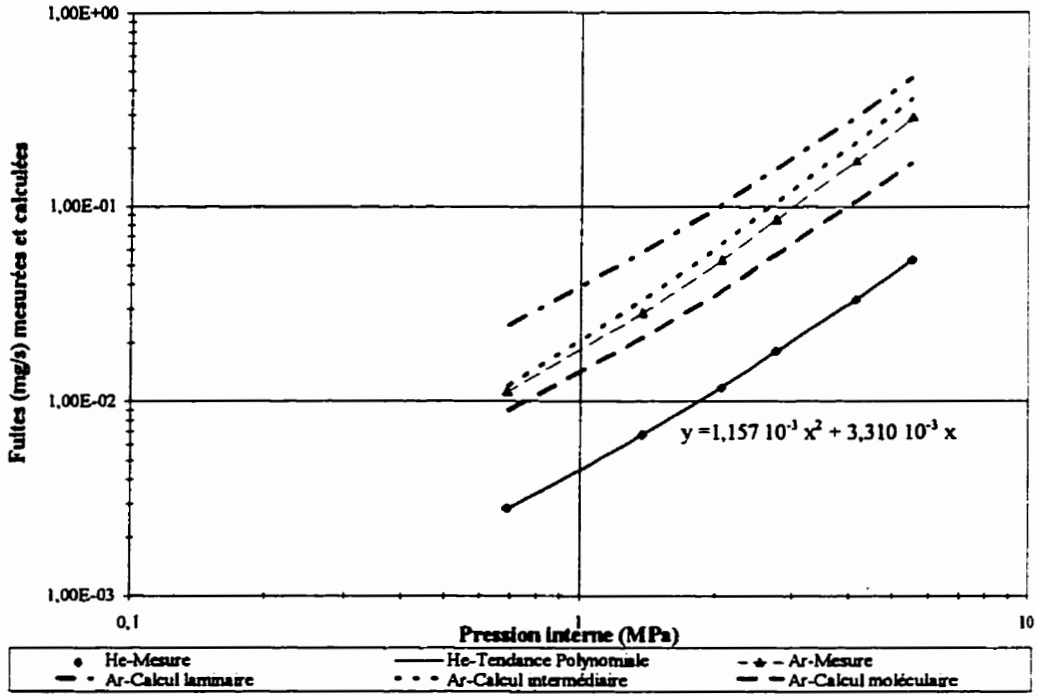


Figure 5.4 : Corrélation He - Ar suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 42 MPa

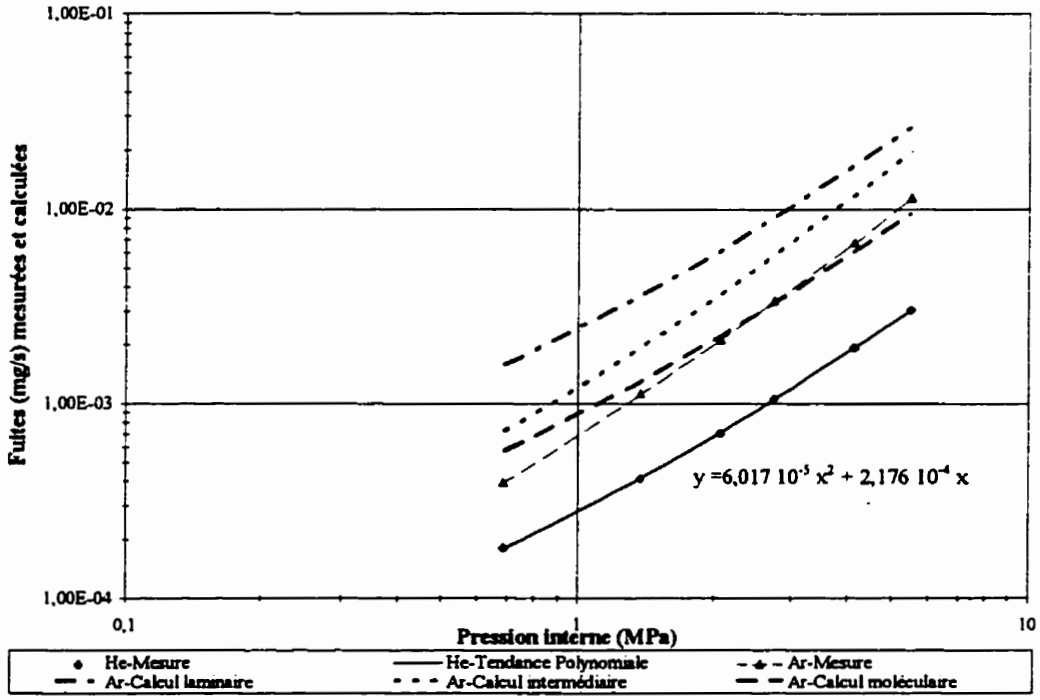


Figure 5.5 : Corrélation He - Ar suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 69 MPa

Les figures de l'annexe 9 montrent que lorsque la contrainte nominale est faible (7 MPa), le modèle intermédiaire s'adapte très bien aux mesures et ce sur toute la plage de pression interne prise en compte. Le modèle laminaire donne, malgré tout, dans ce cas des prédictions assez proches des mesures expérimentales.

Lorsque la contrainte nominale peut être qualifiée de moyenne, soit pour 42 MPa, le seul modèle à s'adapter convenablement est le modèle intermédiaire. Enfin, pour un niveau de contrainte élevé, soit 69 MPa, le seul modèle à s'ajuster fidèlement aux mesures de fuites du gaz cible est le modèle moléculaire.

Ces constatations sont vérifiées quelque soit le gaz cible considéré. Ceci vient appuyer ce qui a été vu lors de l'analyse de l'évolution des rapports entre fuites de différents gaz avec la contrainte (voir section 5.2.3). Il avait alors été constaté que la nature du gaz, même si elle influençait la valeur du rapport entre les fuites de deux gaz, ne semblait pas jouer de rôle prédominant au niveau de l'évolution de ces rapports. La diminution des rapports entre les fuites de différents gaz lorsque la contrainte sur le joint augmente peut donc maintenant être associée à l'adaptation successive des mesures aux différents modes de calcul proposés.

Les figures étudiées précédemment permettent aussi d'étudier l'influence de la pression sur les performances des modes de calcul. De manière générale, une haute valeur de la pression va augmenter la performance du calcul laminaire tandis qu'une basse valeur de la pression va améliorer les résultats des corrélations menées avec le calcul moléculaire. Les performances du modèle intermédiaire ne sont pas influencées par le niveau de pression. C'est, en effet, le seul des trois modes de calcul qui, lorsqu'il s'adapte aux résultats expérimentaux, le fait sur toute la gamme des niveaux de pression étudiés. Ces remarques sont notamment illustrées par les figures A9.4 et A9.5 de l'annexe 9.

Il est nécessaire de relativiser ces dernières observations en fonction du niveau de contrainte auquel est soumis le joint. Lorsque celle-ci est faible, le mode de calcul laminaire donne de bons résultats sur la quasi totalité de la plage de pression. Lorsque la contrainte est élevée, le calcul moléculaire s'ajuste aux résultats expérimentaux pour l'ensemble des pressions utilisées. La pression influence donc moins la performance des modes de calcul à haute et basse contrainte.

Les figures présentées par l'annexe 9 donnent donc d'importantes informations sur les performances des modes de calcul utilisés. Les résultats expérimentaux sont dans tous les cas proches de l'un de ces trois modes de calcul. A faible niveau de contrainte, les modes de calcul intermédiaire et laminaire s'ajustent aux mesures. Dans ce cas, le mode de calcul laminaire s'adapte surtout bien lorsque la pression interne est élevée. Lorsque la contrainte sur le joint augmente, ce sont, tour à tour, les modes de calcul intermédiaire et moléculaire qui s'adaptent le mieux.

Ces premiers résultats semblent montrer que la modélisation du joint par un ensemble de capillaires rectilignes donne de bons résultats dans le cas de l'étude de l'influence du type de gaz sur le niveau d'étanchéité. Cependant, un seul des trois modes de calcul qui découlent de ce modèle ne sera pas suffisant pour prédire l'influence du gaz. Ces trois modes de calcul seront valables alternativement suivant l'état de contrainte du joint ou la pression interne à laquelle il est soumis.

Ces conclusions ne sont basées que sur les résultats obtenus pour le seul type de joint A9 constitué d'amiante. Il va maintenant être intéressant de voir si elles s'appliquent aussi au cas du joint G2 en graphite.

5.3.2. Corrélations entre fuites de différents gaz pour le joint en graphite G2

La figure 5.6 est issue de l'annexe 9 présentant les résultats des corrélations entre les résultats expérimentaux et ceux des calculs. L'analyse des figures de cette annexe portant sur le joint graphite met en évidence d'importantes différences entre les comportements des deux types de joint étudiés.

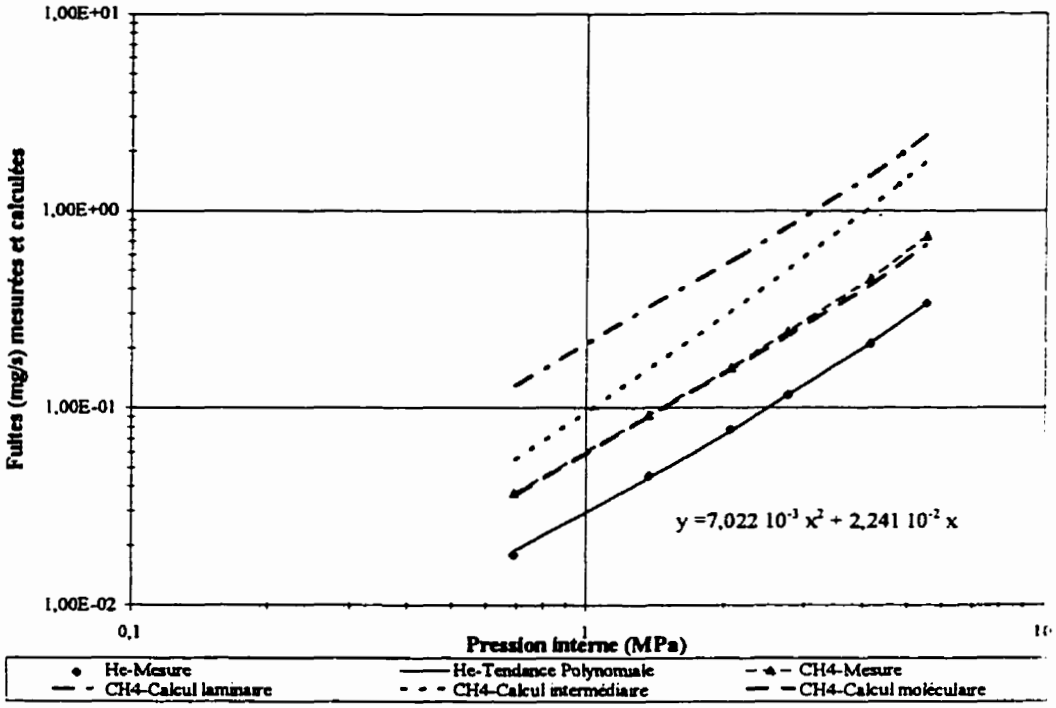


Figure 5.6: Corrélation He - CH4 suivant les trois modes de calcul
Joint type G2 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 7 MPa

Dès le premier niveau de contrainte, soit 7 MPa, les mesures de fuites effectuées avec le méthane s'ajustent bien aux résultats fournis par le mode de calcul moléculaire. Cette remarque s'applique également aux deux autres gaz considérés, l'argon et le SF6. Lorsque le niveau de contrainte augmente, c'est toujours le mode de calcul moléculaire qui s'applique le mieux. Enfin, lorsque la contrainte devient importante, on note l'apparition d'un décalage entre la courbe expérimentale et celle associée au calcul moléculaire.

Ce cas de haute contrainte appliquée sur un joint de type graphite est le seul cas, de tous ceux rencontrés avec les deux types de joint considérés, où aucun des trois modes de calcul proposés ne s'adapte aux mesures expérimentales. Il est important de noter que même si un décalage se produit entre les mesures de fuites du gaz cible et le calcul moléculaire, les deux courbes correspondantes restent parallèles.

Comme dans le cas du joint en amiante, ces résultats obtenus peuvent être associés à l'évolution du rapport entre les fuites de différents gaz en fonction de la contrainte. Dans le cas du joint graphite il avait été noté que ce rapport restait constant lorsque la contrainte augmentait et ce jusqu'à une contrainte proche de 45 MPa. Cela est donc maintenant à associer avec l'adaptation des mesures de fuites au mode de calcul moléculaire. L'augmentation subséquente de ce rapport lorsque la contrainte devient supérieure à 45 MPa ne peut pas, quant-à-elle, être associée à l'adaptation d'un des trois mode de calcul. Ce résultat, observé pour de hautes contraintes appliquées sur le joint graphite, fait apparaître une limite du modèle utilisé pour prévoir l'influence du type de gaz sur le niveau d'étanchéité.

L'influence de la pression du gaz sur les performances des calculs proposés est simple à étudier puisque lorsque le mode de calcul moléculaire s'applique, il le fait sur toute la plage de pression étudiée. Ce résultat est donc identique à ce qui avait été vu lors de l'étude du joint amiante puisque, dans ce cas, il avait été remarqué qu'à haut niveau de contrainte, l'influence de la pression devenait moins importante.

Toutes les informations tirées des figures étudiées sont indépendantes du type de gaz considéré. La seule remarque pouvant être faite sur ce point est que, dans certains cas, les corrélations basées sur le SF6 sont moins précises que celles effectuées avec les autres gaz.

Le SF6 est le gaz qui, parmi tous ceux étudiés, possède des caractéristiques, masse molaire et viscosité, les plus éloignées de celles de l'hélium pris comme gaz de référence. Il est donc normal que ce soit avec ce gaz que les prédictions soient le moins précises. Néanmoins, le lien entre les mesures de fuites et les résultats des calculs effectués reste, lorsqu'il a été établi, sans équivoque.

Les résultats issus des essais menés avec les différents gaz et différents types de joints pris en compte, ont donc été présentés. Avant de débuter l'interprétation de l'ensemble des résultats obtenus, il semble nécessaire d'effectuer une rapide synthèse des principales informations qui viennent d'être fournies.

5.3.3. Synthèse des principaux résultats

Le comportement mécanique des deux types de joints testés fait apparaître d'importantes différences. L'écrasement du joint graphite est beaucoup plus important que celui du joint amiante. Lorsqu'une contrainte de 7 MPa est appliquée au joint graphite, ce dernier subit un écrasement égal à celui du joint amiante soumis à une contrainte de 69 MPa.

L'étanchéité à basse contrainte s'avère meilleure avec le joint graphite. Pour des contraintes supérieures à 45 MPa elle le sera avec le joint amiante. Ce résultat est indépendant du gaz considéré.

L'évolution des rapports entre les fuites d'un gaz cible et celles de l'hélium diffère énormément suivant le type de joint, comme le montre la figure 5.3. Avec le joint amiante, ce rapport diminue lorsque la contrainte augmente, en tout cas pour les niveaux de contraintes atteints lors de l'étude expérimentale.

Avec le joint graphite, ces rapports restent tout d'abord constants lorsque la contrainte augmente, puis, lorsqu'elle devient supérieure à 45 MPa, les rapports augmentent avec la contrainte.

Les performances des modes de calculs dépendent elles aussi du type de joint considéré. Pour le joint amiante, lorsque la contrainte augmente, les mesures effectuées avec tous les gaz cibles s'ajustent successivement aux modes de calcul laminaire, intermédiaire et moléculaire. Pour le joint graphite, dès le premier niveau de contrainte, les mesures s'adaptent correctement au calcul moléculaire. Enfin, la limite du modèle proposé semble être atteinte avec le joint graphite sur lequel est appliquée une contrainte supérieure à 45 MPa puisque, dans ce cas, aucun des trois modes de calcul n'est capable de prédire avec exactitude les fuites mesurées.

L'influence du type de gaz est importante lorsque la valeur du niveau de fuite, ou des rapports entre les fuites de différents gaz sont considérés. Par contre, le type de gaz ne semble pas avoir d'influence majeure sur les mécanismes impliqués. En effet, les remarques effectuées précédemment, s'avèrent vérifiées pour tous les types de gaz pris en compte.

5.4. Analyse des résultats et évolution de la nature de l'écoulement

La performance qualitative des modes de calcul proposés à été étudiée. L'approche qui va maintenant être menée se propose d'être plus globale. Il va s'agir d'exploiter les résultats obtenus afin de proposer une explication aux phénomènes observés. Ce n'est que lorsque cette compréhension sera améliorée que la résolution du problème de lien entre fuites de différents gaz pourra être approchée.

5.4.1. Performance quantitative des modes de calcul

Les performances des différents modes de calcul laminaire, intermédiaire et moléculaire vont, tout d'abord, être approfondies. En effet lors de l'analyse précédente, seul l'aspect qualitatif de ces performances a été étudié au travers des résultats présentés par la première série de figures de l'annexe 9. Afin de pouvoir associer ces performances aux écoulements présents dans le joint, il semble nécessaire de quantifier les écarts entre les fuites mesurées et celles calculées par chaque mode de calcul. C'est cette quantification des performances des modes de calcul que se propose d'illustrer la seconde série de figures de l'annexe 9 dont les figures 5.7 et 5.8 sont extraites.

Les figures A9.19 à A9.30 de l'annexe 9 permettent de visualiser et de quantifier l'écart entre la fuite du gaz cible calculée et la mesure expérimentale correspondante. Cet écart est exprimé par le rapport, multiplié par 100, entre la fuite calculée et celle mesurée, pour un même gaz cible. Ainsi une valeur relative de 100% signifie que le calcul donne la même valeur que la fuite mesurée.

L'évolution des performances de chaque mode de calcul est évaluée en fonction de la fuite hélium mesurée. Evidemment, la fuite hélium mesurée ainsi que les fuites du gaz cible calculées et mesurées correspondent toutes au même essai. Les rapports sont calculés pour des conditions de contrainte sur le joint et de pression interne identiques. Le choix de ce type de représentation a été fait afin de pouvoir présenter de manière claire les écarts qu'engendre chaque mode de calcul et ce pour l'ensemble des mesures effectuées. L'inconvénient de cette représentation est qu'elle génère des courbes irrégulières. Enfin, le choix d'une échelle logarithmique permet de conserver, visuellement, un même aspect pour les différentes courbes, que les fuites calculées correspondent à une surestimation ou à une sous-estimation de la valeur mesurée.

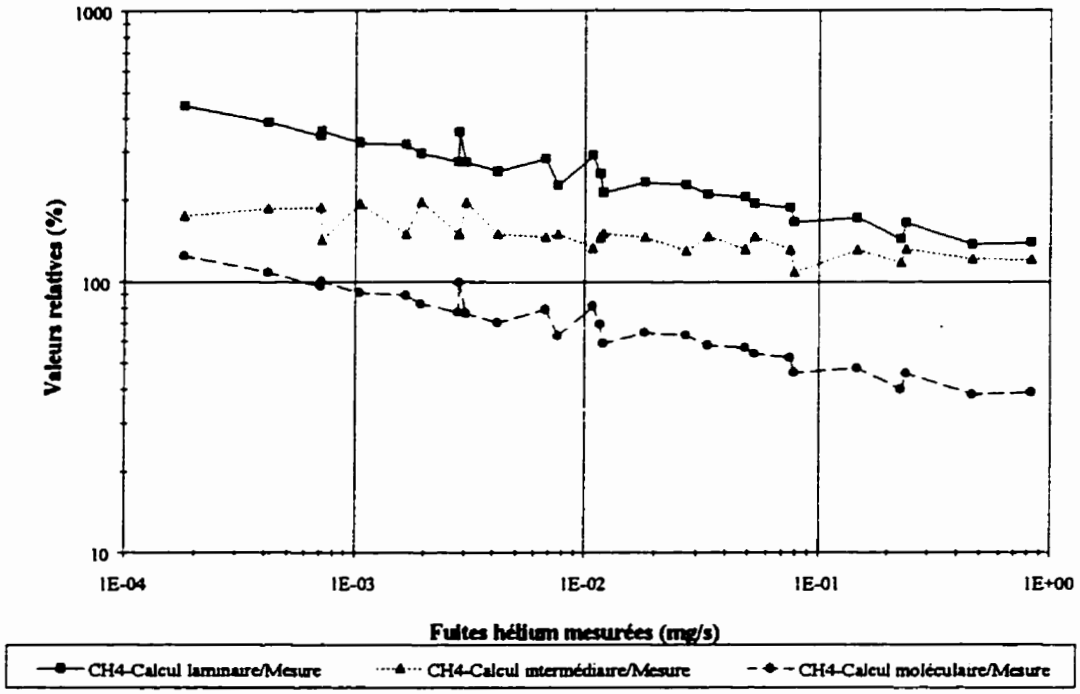


Figure 5.7 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type A9 - CH4 - Essai 3

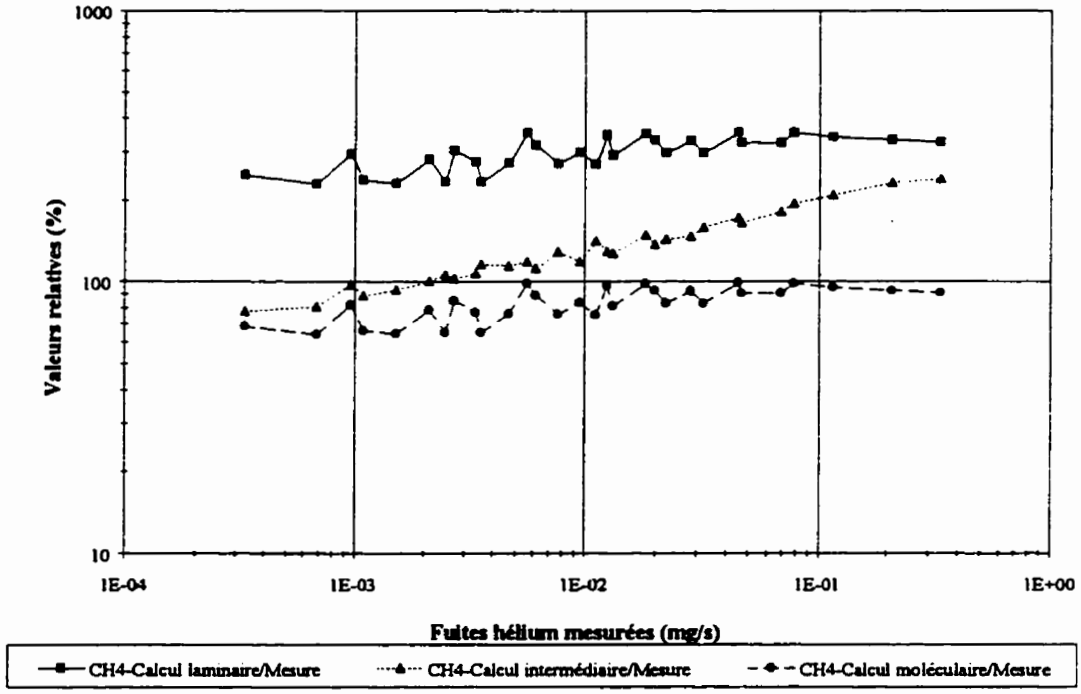


Figure 5.8 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type G2 - CH4 - Essai 3

Le premier constat issu des figures de l'annexe 9 est que l'utilisation du calcul laminaire peut conduire à des erreurs importantes. Si ce calcul est utilisé pour estimer la fuite d'un gaz cible à partir de celle de l'hélium, il est possible que cette estimation donne une valeur de fuite 5 à 6 fois supérieure à la fuite réelle. C'est par exemple ce qui se produit dans le cas du joint A9 associé au méthane (figure 5.7). Les fuites d'hélium associées à cette erreur sont, de plus, suffisamment importantes pour rendre l'erreur significative puisque ces fuites sont supérieures à 10^{-4} mg/s. Un constat identique peut être effectué lorsque le mode de calcul moléculaire est pris en compte. La différence est que ce mode de calcul entraîne une sous-estimation de la fuite réelle du gaz cible considéré, comme le montre les figures 5.7 ou A9.24 (annexe 9). L'ampleur des écarts constatés reste, cependant, sensiblement identique à ceux notés pour le calcul laminaire. Cela s'illustre par la symétrie des figures présentées. Cette symétrie est d'ailleurs plus visible dans le cas du joint amiante.

Le calcul intermédiaire est celui qui permet d'obtenir, pour l'ensemble des mesures effectuées, l'écart relatif le plus faible. Il donne des résultats acceptables sur toute la gamme de mesures prises en compte comme le montre la figure A9.21 de l'annexe 9. Dans le pire des cas, la valeur relative entre la prévision de ce calcul et la mesure n'excède pas 200% . Ce cas se produit pour le joint G2 associé à de faibles niveaux de serrage, ou de hautes valeurs de fuites d'hélium. La seule exception à cette règle doit être associée au joint graphite soumis à de fortes contraintes.

Les évolutions des courbes présentées viennent confirmer et préciser ce qui a été vu lors de l'analyse qualitative de ces résultats concernant les conditions pour lesquelles chaque mode de calcul s'adapte le mieux. Cependant, même si les tendances relevées sont identiques pour chaque gaz testé, la précision des résultats sera influencée par la nature du gaz. Les trois calculs sont, en effet, moins efficaces lorsque l'hexafluorure de soufre est pris en compte. Les meilleures performances sont à associer à l'argon.

La simple comparaison des caractéristiques de chaque gaz avec celles de l'hélium, ne permet pas d'expliquer ces différences associées aux gaz étudiés. Il semble que ce soit plutôt la complexité de la structure moléculaire de chaque gaz qui influence les performances de chaque calcul. L'influence de l'éloignement de la loi des gaz parfaits de chaque gaz peut aussi être la cause de ces variations dans la précision des résultats puisqu'aucune correction n'a été apportée aux mesures pour prendre cet effet en compte. Les calculs menés permettent cependant, même dans le cas de l'hexafluorure de soufre, une description satisfaisante de la réalité tant que le modèle utilisé n'a pas atteint ses limites mises en évidences précédemment.

Il serait intéressant, à ce stade de l'étude, de tenter d'associer les performances de chaque modèle à un intervalle de fuites de l'hélium. Cela fournirait une méthode simple pour connaître, à partir d'un essai réalisé avec l'hélium, le mode de calcul le plus approprié et donc de calculer la fuite du gaz cible avec précision. Cependant l'observation des figures 5.7 et 5.8 montre qu'une telle tentative serait complexe. En effet, pour une même fuite d'hélium mesurée sur les deux types de joints étudiés, le mode de calcul le plus efficace n'est pas identique. Par exemple, pour une fuite d'hélium située entre 10^{-3} mg/s et 10^{-4} mg/s, le mode de calcul moléculaire sera, dans le cas du joint A9 (amiante), le calcul le plus performant. Pour le joint G2 (graphite), aucun des trois modèles ne donne, dans ce cas, de résultats satisfaisants.

Ce dernier point est important à noter. En effet, dans le cas des courbes présentant les résultats obtenus avec le joint graphite lorsque de faibles niveaux de fuite sont considérés, il apparaît que suivant l'essai et le gaz cible ce ne soit pas le même mode de calcul qui s'adapte le mieux aux mesures. Ces résultats sont, d'ailleurs, à associer aux divergences notées, lors de la validation des résultats, au niveau de l'évolution des rapports de fuites avec la contrainte. Ceci ne se produit pas dans le cas du joint amiante où les courbes évoluent de manière identique, quelques soient l'essai et le gaz considérés.

Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la performance des calculs proposés dans le cas de hautes contraintes sur le joint graphite, soit pour des fuites d'hélium situées entre 10^{-3} mg/s et 10^{-4} mg/s, n'est qu'apparente. La proximité des valeurs calculées à celles mesurées ne semble pas fondée sur une exacte description des phénomènes en présence. Cela sera justifié davantage dans ce qui suit.

L'évolution des performances de chaque mode de calcul traduit, en fait, d'importants changements dans la nature de l'écoulement qui traverse le joint. Lorsqu'un type de calcul fonctionne de manière significative c'est qu'il traduit de manière acceptable ce qui se passe à l'intérieur du joint. Il est intéressant de noter qu'une technique analogue est présentée par les auteurs de la référence [7] pour dissocier la perméation de gaz au travers des métaux de l'écoulement qui pourrait s'y produire par l'intermédiaire d'un petit orifice. Dans ce cas, l'élévation de pression de deux gaz différents d'un coté du matériau testé est mesurée. Si le rapport entre les deux mesures est lié au rapport des racines carrées des masses molaires des deux gaz, cela signifie, d'après l'auteur, qu'un orifice existe. Une telle relation revient, en fait, à associer l'écoulement à un écoulement moléculaire.

5.4.2. Evolution de la nature de l'écoulement

L'étude des performances des différents modes de calcul proposés permet donc de décrire l'écoulement qui traverse un type de joint, et ce pour toute condition de pression et de contrainte.

L'écoulement de gaz au travers du joint amiante passe donc, lorsque la contrainte augmente, de laminaire à intermédiaire. L'écoulement moléculaire est ensuite atteint. C'est ce que traduisent les performances successives des différents modes de calcul.

Dans le cas du joint graphite, l'écoulement est, dès le premier niveau de contrainte, de nature moléculaire. L'augmentation de la contrainte entraîne la modification de l'écoulement en un écoulement autre que ceux pris en compte par les trois calculs proposés.

Il s'agit, ici, de relativiser ces remarques. En fait, l'écoulement au sein du joint ne sera jamais complètement laminaire ou complètement moléculaire. Il existera toujours une composante moléculaire dans un écoulement laminaire et vice versa. Ceci explique pourquoi la performance du mode de calcul intermédiaire, qui prend en compte ces deux types d'écoulements, est plus générale que celle des deux autres modes de calcul. Encore une fois, l'analyse quantitative des performances de chaque type de calcul, permet d'évaluer l'importance de chaque type d'écoulement élémentaire sur l'écoulement total. Ainsi, les essais réalisés montrent qu'un écoulement purement laminaire n'a jamais été atteint. Par contre, la prédominance de l'écoulement moléculaire s'avère plus manifeste, notamment avec l'utilisation du joint graphite (figure 5.6).

Les différents modes de calcul utilisés permettent donc de mettre clairement en évidence la nature de l'écoulement au travers de certains joints. Il semble donc, que dans le cas du joint graphite soumis à un fort niveau de contrainte, l'écoulement ne soit d'aucun des trois types pris en compte par les calcul (figures A9.18 et A9.27, annexe 9).

Avant de passer à une analyse plus globale des phénomènes observés, il devient intéressant de comparer les informations recueillies avec les conclusions de certaines des études précédemment menées dans ce domaine et dont il a déjà été question lors du chapitre 2.

5.4.3. Commentaires sur les résultats des précédentes études

La première remarque concerne le lien entre la nature de l'écoulement et le niveau de fuite. D'après Bazergui et Louis [1], " A molecular regime is found in high performance seals where the leakage is pratically undetected unless special instrumentation is utilized (mass spectrometer) ". L'idée que l'écoulement moléculaire soit associé à de petites fuites est d'ailleurs extrêmement répandue dans le domaine de l'étanchéité. L'ensemble des résultats présentés ici montrent qu'il est aussi possible que ce régime d'écoulement produise des fuites importantes. Par exemple, lors des essais basés sur le joint graphite à faible niveau de contrainte, le régime d'écoulement est indiscutablement moléculaire. Pourtant la fuite d'hélium associée peut être qualifiée d'importante puisqu'elle est située entre 10^{-1} et 1 mg/s.

Lors de la même étude [1], il a été montré que le calcul laminaire appliqué au gaz argon et aux joints alors étudiés donnait de bons résultats. Il apparaît, ici, qu'en utilisant des joints différents, même pour des gaz de structure moléculaire simple comme l'argon, le calcul laminaire peut entraîner des erreurs importantes. Les valeurs de fuites de l'argon calculées à partir des fuites d'hélium mesurées peuvent être 4 fois plus importantes que les fuites réelles. Ceci se produit notamment dans le cas du joint amiante soumis à un niveau de contrainte élevé.

Les résultats de la présente étude permettent donc de compléter les informations issues de précédents travaux. L'exploitation de ces résultats devra donc s'efforcer de fournir une solution plus appropriée au problème du lien entre les fuites de différents gaz.

5.5. Synthèse

Lors de ce chapitre, les premiers résultats expérimentaux obtenus ont été présentés et analysés. Le comportement des joints testés à tout d'abord été étudié. Les performances de chacun des calculs proposés ont été évaluées. Cela a permis de mettre en évidence la nature des écoulements qui traversent les joints d'étanchéité étudiés.

Jusqu'à présent il a seulement été question des modes de calcul laminaire, intermédiaire et moléculaire. De plus, même si les résultats de ces derniers calculs ont été associés aux écoulements rencontrés, les raisons du changement de la nature de l'écoulement n'ont pas encore été fournies.

Pour mener à bien cette explication, le prochain chapitre se proposer d'utiliser le modèle de joint adopté par le présent travail et présenté lors du chapitre 3. L'explication de ce qui se passe au niveau de l'écoulement conduira à des propositions concernant la résolution du problème de la corrélation entre les fuites de différents gaz.

CHAPITRE 6
INTERPRETATION DES RESULTATS ET PREVISION DE L'INFLUENCE DU TYPE DE GAZ SUR L'ETANCHEITE DE JOINTS

6.1. Présentation

Les différents modes de calcul présentés sont issus d'un modèle physique du joint. Ce modèle assimile le joint d'étanchéité à un ensemble de capillaires rectilignes de diamètres constants. La dimension de ces canaux conditionne le type d'écoulement et donc le mode de calcul approprié. Ce modèle constitue une représentation excessivement simplifiée de la réalité. Il va néanmoins être utilisé pour tenter d'expliquer les phénomènes observés. Les influences de la pression interne et de la contrainte sur le joint seront tour à tour abordées. A la suite de ces explications, la validité de la modélisation adoptée va être analysée. Pour ce faire les différentes hypothèses qui lui avaient été associées seront commentées.

Lorsque les changements se produisant au sein de l'écoulement auront été explicités, deux points essentiels à la mise en œuvre d'une corrélation efficace entre les fuites de différents gaz seront étudiés. Il s'agira tout d'abord de mettre en œuvre un moyen de quantifier la nature de l'écoulement. L'influence du déchargement du joint sur la nature de l'écoulement sera ensuite explorée.

L'ensemble des informations recueillies seront enfin utilisées pour mener à bien différentes propositions concernant le calcul des fuites d'un gaz quelconque à partir de celles mesurées pour un gaz de référence.

6.2. Explication des phénomènes observés à l'aide du modèle de joint adopté

6.2.1. Influence du niveau de contrainte sur la nature de l'écoulement

Lorsqu'une faible contrainte est appliquée sur un joint amiante, les passages sont suffisamment gros pour que l'écoulement soit laminaire. Ces passages peuvent, en fait être soit à l'intérieur du joint, comme le décrit le modèle physique, soit entre le joint et la bride. Dans les deux cas, les équations qui décrivent l'écoulement sont très semblables [7]. Lorsque la contrainte, et donc l'écrasement du joint augmente, l'écoulement devient successivement intermédiaire puis moléculaire. Cette évolution s'explique par la diminution du diamètre des canaux causée par la diminution de l'épaisseur du joint. Cette diminution entraîne celle du nombre de Knudsen $\frac{D}{\lambda}$.

Lors de l'approche théorique, il a été vu que lorsque le nombre de Knudsen diminue, l'écoulement de gaz au sein d'un tube passe successivement de laminaire à intermédiaire puis à moléculaire. De plus, les rapports entre les fuites de deux gaz associés successivement à ces trois régimes sont décroissants. La séquence observée des régimes d'écoulement associée à cette dernière remarque explique pourquoi les rapports entre les fuites de différents gaz diminuent lorsque la contrainte augmente.

Dans le cas du joint graphite la situation paraît très différente. Cependant, les phénomènes observés peuvent être expliqués de manière analogue. La grande différence entre les écoulements au sein de ces deux joints est que, dès le premier niveau de serrage, l'écoulement au sein d'un joint graphite est incontestablement moléculaire. Cette différence de comportement s'explique par le fait que l'écrasement du joint graphite à ce premier serrage est identique à celui du joint amiante à son dernier serrage (figure 5.1). Ainsi il est possible d'imaginer un diamètre semblable des chemins de passage gazeux.

Lorsque la contrainte sur le joint graphite augmente, l'écoulement reste de nature moléculaire. Les rapports entre fuites de différents gaz restent donc constants. En effet, puisque l'écoulement moléculaire est un cas limite des écoulements gazeux au travers de passages, toute diminution du diamètre de ces passages ne fera que renforcer ce type d'écoulement. A partir d'une certaine contrainte, l'écoulement se modifie de nouveau, mais de manière non prévue par le modèle physique utilisé (figures A7.13 à A7.16 de l'annexe 7). Cela se traduit par l'augmentation des rapports entre les fuites de différents gaz. Cette augmentation se poursuit avec celle de la contrainte. Ce phénomène met en évidence la limite du modèle physique utilisé.

Le modèle de joint utilisé permet donc d'expliquer l'influence de la contrainte sur l'évolution de l'écoulement au sein de joints. Les comportements des deux joints étudiés semblent, à première vue, très différents. Cependant ils peuvent être expliqués de manière identique par la diminution des diamètres des passages gazeux associée à l'augmentation de la contrainte. La limitation des explications fournies par le modèle va maintenant être abordée.

6.2.2. Limite du modèle et mise en évidence de la perméation du gaz

Deux hypothèses peuvent être associées à ce qui se produit lorsque le modele atteint sa limite. La première de ces hypothèses est que le niveau de contrainte atteint vienne fissurer le joint et donc créer des chemins de passage pour le gaz plus gros. Ces derniers ajouteraient donc à l'écoulement une composante de type laminaire ce qui entraînerait l'augmentation du rapport entre les fuites. La seconde hypothèse est que l'écoulement ne soit plus du type d'un écoulement de gaz au travers de capillaires mais devienne de la perméation.

La première hypothèse, même si elle semble possible, ne paraît pas fondée. La performance des modes de calcul intermédiaire et laminaire a été montrée. Si l'hypothèse de la fissuration du joint était fondée, les rapports entre les fuites de différents gaz obtenus expérimentalement devraient s'ajuster à ceux prévus par l'un de ces calculs. L'observation des figures de l'annexe 9, comme par exemple les figures A9.15 et A9.18, montre clairement que cela n'est pas vérifié.

De plus, le décalage qui apparaît entre les courbes de l'écoulement moléculaire et les courbes expérimentales se fait de manière parallèle. Ce dernier point montre que l'influence de la pression sur le nouvel écoulement est proche de celle qu'elle a sur l'écoulement moléculaire.

Ceci conduit à la seconde hypothèse, celle qui semble la plus plausible. L'augmentation de la contrainte sur un joint de type graphite, entraînerait la prédominance de l'écoulement de perméation dont le principe a été présenté lors de l'approche théorique (paragraphe 3.2.6). L'équation de cet écoulement est en général une fonction linéaire de la pression, comme celle de l'écoulement moléculaire. Cela justifierait le décalage parallèle des courbes respectives de ces écoulements.

De plus, compte tenu de l'écrasement important du joint graphite lorsque la contrainte augmente, il est possible de penser que les passages de gaz, déjà petits lors de l'écoulement moléculaire, viennent se " refermer ". Le gaz se trouverait donc devant un matériau compact que seul le phénomène de perméation lui permettrait de traverser.

Un autre élément permettrait de conforter l'idée selon laquelle l'écoulement devient de la perméation. Il concerne le temps de stabilisation nécessaire pour obtenir une mesure de fuite stable. Il est fort probable que ce temps d'attente soit lié à la nature de l'écoulement.

Or, dans tous les cas, et notamment, pour de hauts niveaux de contrainte, les temps d'attente pour obtenir la stabilisation des fuites sur le joint graphite ont été plus longs que ceux observés au niveau du joint amiante. Ceci est vérifié même si les fuites associées à haute contrainte au joint graphite sont supérieures à celles du joint amiante. Ce temps de stabilisation augmenterait donc lorsque l'écoulement se transforme graduellement de laminaire à perméation.

Certains lient le temps de stabilisation au fluage du joint qui viendrait, lors d'une mesure, modifier la structure du joint et donc rendre la fuite instable. Même si cela a certainement une influence, un raisonnement similaire à celui qui sera mené dans l'annexe 10 permettrait de montrer que le fluage des joints pris en compte ici ne semble pas capable de modifier la valeur de la fuite. Ce phénomène ne sera donc pas la cause première d'un long temps de stabilisation de la fuite mesurée. Pour montrer de manière exacte que le temps de stabilisation de la fuite dépend du régime d'écoulement, il faudrait mettre en évidence les équations du régime transitoire de ces écoulements respectifs. Ce travail déborde du cadre de la présente étude.

6.2.3. Influence de la pression sur la nature de l'écoulement

Le modèle physique du joint mis en oeuvre permet, de plus, d'expliquer l'influence de la pression sur le régime d'écoulement. Cette influence est nettement moindre que celle de la contrainte mais est visible sur les courbes de l'annexe 9 (figures A9.4 et A9.5 par exemple). Sur ces courbes présentant les fuites en fonction de la pression, il est possible de constater que, dans le cas du joint amiante, le régime passe, pour un même niveau de contrainte, soit de moléculaire à intermédiaire, soit d'intermédiaire à laminaire. Ceci s'explique encore une fois par l'évolution du nombre de Knudsen.

Le libre parcours moyen d'un gaz diminue avec l'augmentation de la pression de ce gaz. Puisque le niveau de contrainte reste constant, il est possible de considérer que l'écrasement du joint reste quasiment inchangé. Les diamètres des canaux restent donc identiques. Ainsi, le nombre de Knudsen augmentera avec la pression du gaz. Cette augmentation du nombre de Knudsen explique le passage de l'écoulement de moléculaire à intermédiaire puis laminaire lorsque la pression du gaz augmente.

6.2.4. Conclusions sur les modifications de l'écoulement dans un joint

La première conclusion concerne la possibilité d'expliquer, à partir du modèle pourtant très simplifié mis en oeuvre, la plupart des phénomènes rencontrés. Seule reste hypothétique, mais fortement probable, la prédominance de l'écoulement de perméation lorsque la structure du joint ne permet plus la fuite de gaz au travers de passages assimilables à des canaux.

La seconde conclusion concerne la manière dont l'écoulement se produit au sein d'un joint. Cet écoulement est, en fait, la somme de quatre écoulements fondamentaux laminaire, intermédiaire, moléculaire et de perméation. Lorsque les chemins de passage sont importants, ou la pression élevée, la composante laminaire domine l'écoulement Si la contrainte augmente, ou la pression diminue, la composante laminaire de l'écoulement s'atténue, pour finalement quasiment disparaître, l'écoulement devenant alors à dominance moléculaire. Enfin si la compression du joint continue d'augmenter, ce type d'écoulement va, lui aussi perdre son caractère moléculaire pour devenir principalement de la perméation.

La transformation de l'écoulement explique les évolutions des rapports entre les fuites de différents gaz avec celles de l'hélium. Lorsque l'écoulement passe de laminaire à moléculaire la valeur de ces rapports diminue (figures A6.9 à A6.11 de l'annexe 6).

Quand l'écoulement devient principalement de la perméation, la valeur de ces rapports semble augmenter. Cette évolution ne peut pas être justifiée ici, puisque les rapports font alors intervenir les constantes de perméation de chaque gaz dans chaque type de joint. Ces constantes sont inconnues dans la plupart des cas associés à l'étanchéité.

Enfin, sur la base des essais réalisés ici, le type de joint ne semble pas avoir d'influence sur la manière dont se modifie l'écoulement. La seule différence réside dans le fait que la structure du joint favorisera, dès le début, un type d'écoulement particulier. La modification de l'écoulement se fera donc comme présenté précédemment mais avec un écoulement de départ différent. Ainsi, il est possible de croire que, si lors des essais effectués sur le joint amiante, la contrainte maximale appliquée sur le joint avait été supérieure, alors les rapports entre les fuites de différents gaz auraient augmentés, comme dans le cas du joint graphite. Ceci a d'ailleurs été observé lors de l'étude de référence [2].

Le modèle utilisé permet donc de mieux comprendre ce qui se passe au niveau des écoulements au sein de joints d'étanchéité. Les changements de régime s'expliquent par la modification des diamètres des canaux d'une part et par l'évolution du nombre de Knudsen, d'autre part. Afin d'être complet dans l'analyse de ce modèle, il semble maintenant important de vérifier les hypothèses sur lesquelles il est fondé.

6.2.5. Pertinence des hypothèses associées au modèle utilisé

Lors du chapitre présentant l'aspect théorique du modèle utilisé, trois hypothèses avaient été formulées (paragraphe 3.4.4). Compte tenu des résultats obtenus, il va maintenant être possible de vérifier la pertinence de deux d'entre elles. La troisième, celle concernant la possibilité que la nature du fluide modifie la structure interne du joint, ne semble pas nécessiter de plus amples développements.

La première hypothèse, nécessaire pour que les modes de calculs donnent de bons résultats, était que les fuites de différents gaz soient obtenues pour une structure du joint identique. C'est une condition essentielle pour pouvoir éliminer des expressions théoriques les caractéristiques du joint inconnues telles que le diamètre ou le nombre de capillaire. Le mode expérimental utilisé ne permettait pas le contrôle de l'écrasement du joint et ne garantissait donc pas la conservation de la structure interne du joint. Le montage expérimental employé permettait par contre la minimisation de l'effet de fond causé par la mise en pression de la bride. Les courbes contrainte - écrasement des joints (figure 5.1) font néanmoins apparaître deux phénomènes : le fluage du joint, c'est-à-dire sa diminution d'épaisseur, et la relaxation, ou diminution, de la contrainte. Le problème est que ces phénomènes se produisent lors des mesures de fuites avec les différents gaz. Ainsi, il est possible que la structure du joint se soit légèrement modifiée entre les fuites mesurées pour deux gaz différents. Ceci entraînerait la comparaison de résultats expérimentaux avec des résultats de calculs qui ne seraient plus appropriés et pourrait donc remettre en cause l'ensemble des résultats obtenus.

Lors de la validation des résultats, il avait été estimé que l'ampleur du fluage du joint et de la relaxation de la contrainte ne semblaient pas de nature à modifier la structure du joint de manière suffisante pour invalider les modes de calcul proposés. Maintenant que les régimes d'écoulement au sein du joint ont été déterminés, il est possible d'utiliser les équations qui leur sont associées pour estimer l'influence réelle du fluage sur les mesures de fuites effectuées. C'est cette estimation que présente l'annexe 10.

Le raisonnement et les calculs menés dans cette annexe montrent que le fluage du joint lors des mesures de fuites effectuées successivement sur les trois gaz ne semble pas de nature à modifier les valeurs des fuites obtenues. Les résultats utilisés pour calculer les rapports entre fuites de différents gaz, peuvent donc bien être associés à une même structure du joint.

L'hypothèse concernant la conservation de la structure du joint est donc vérifiée et les comparaisons des rapports expérimentaux avec les résultats fournis par les différents modes de calculs s'avèrent appropriées.

La seconde hypothèse importante concernait le fait que la nature du fluide ne devait pas venir influencer de manière excessive la nature de l'écoulement. Il a été vu que la modification du libre parcours moyen d'un gaz avec la pression interne engendrait des modifications du type d'écoulement. Or, à une pression donnée, les libres parcours moyens des gaz utilisés, sont différents. Ces écarts doivent donc avoir une influence similaire sur le type d'écoulement. Le moyen mis en oeuvre pour quantifier l'influence des gaz sur les régimes d'écoulement est présenté en annexe 11. Le résultat de ce travail est que la nature du gaz ne semble pas être capable de modifier de manière franche la nature de l'écoulement. L'hypothèse étudiée ici semble donc pleinement vérifiée.

Cependant, il a déjà été signalé que les écoulements dans le joint ne sont jamais purement laminaires où moléculaires. Les résultats de l'annexe 11 permettent de déduire que l'écoulement d'un gaz autre que l'hélium devrait comporter une composante laminaire plus importante. Cependant, cela ne sera pas suffisant pour rendre les types d'écoulements de deux gaz fondamentalement différents et donc pas suffisant pour invalider les modes de calculs employés ici.

A ce stade de l'étude, le modèle de joint a été employé pour expliquer ce qui entraîne les modifications de l'écoulement. Les hypothèses de ce modèle ont été vérifiées, ses limites clairement établies. Il est donc maintenant possible d'affirmer que l'estimation précise de l'influence du type de fluide sur le niveau d'étanchéité passe par la connaissance du type d'écoulement en présence dans le joint. A partir de cette information il serait possible d'appliquer le mode de calcul approprié pour estimer la fuite d'un gaz cible. C'est dans cette direction que va maintenant s'orienter la présentation.

6.3. Quantification du type d'écoulement et influence du desserrage du joint

La résolution précise du problème de la prévision de fuites de différents gaz passe donc par la connaissance du type d'écoulement dans le joint. L'objectif est de pouvoir déterminer à partir d'un essai hélium, le régime d'écoulement présent dans le joint, à un état de contrainte donné. Il sera ensuite possible d'appliquer la relation la plus appropriée. De plus, lors de la conception d'un assemblage utilisant un joint, la prise en compte de son desserrage est capitale. Il semble donc primordial de procéder à une première évaluation de l'influence du desserrage sur la manière dont la nature de l'écoulement évolue et peut être quantifiée.

6.3.1. Quantification du type d'écoulement

Lors de l'approche théorique présentée au chapitre 3, il a été montré comment la pente "s" de la droite d'équation : $\text{Log } P = s \text{ Log } Q_m + b$ pouvait être employée pour déterminer la nature de l'écoulement. Il a été vu qu'une valeur de ce coefficient de 0,5 signifie que l'écoulement est purement laminaire. Si "s" vaut 1, l'écoulement est purement moléculaire. Si sa valeur est entre ces deux limites, l'écoulement est intermédiaire.

Les corrélations effectuées ont mis en évidence les différents régimes d'écoulement. Les évolutions de la pente "s" vont pouvoir être présentées afin d'évaluer la validité de ces considérations théoriques. Si cette validité était montrée, un indicateur simple du type d'écoulement serait alors disponible. L'annexe 12 présente l'ensemble des calculs et leur analyse. Cette analyse porte sur l'évolution du coefficient " s " en fonction du type de joint et de la contrainte qui lui est appliquée. L'importance de la manière dont les calculs sont effectués est, elle aussi, prise en compte.

L'ensemble des remarques de l'annexe 12 montre que le coefficient "s" possède des évolutions cohérentes avec l'ensemble des observations précédentes. Son avantage principal est de pouvoir décrire la nature de l'écoulement à l'aide d'un calcul simple. Compte tenu des valeurs de "s" obtenues et des résultats précédents concernant le lien entre la contrainte et le type d'écoulement, il semble possible de préciser expérimentalement les considérations théoriques précédentes. Tant que le coefficient "s" est inférieur à 0,55, l'écoulement peut être considéré comme laminaire. Pour une valeur de "s" comprise entre 0,55 et 0,70, l'écoulement sera intermédiaire. Pour "s" supérieur à 0,70, l'écoulement peut être considéré comme moléculaire.

Toutefois, il reste difficile de dissocier, à l'aide de ce quantificateur, un écoulement moléculaire du phénomène de perméation. Si ce type d'écoulement se confirmait il serait certainement possible de préciser la valeur de "s" à partir de laquelle l'écoulement deviendrait principalement de la perméation. Cette valeur se situerait vraisemblablement aux alentours de 0,85.

Les valeurs qui viennent d'être données sont basées sur les résultats des essais sur l'hélium. Ces résultats ne seraient que peu affectés par la prise en compte des mesures effectuées à l'aide d'un autre gaz. En fait, comme le montre l'annexe 11, les autres gaz ont tendance à ajouter une composante laminaire à l'écoulement. Les valeurs du coefficient " s " limitant chaque type d'écoulement seraient alors légèrement plus proches de 0,5. C'est ce que confirment les figures de l'annexe 12.

La difficulté associée au coefficient "s" réside dans son calcul. Le calcul est en lui même simple, mais il nécessite un choix judicieux des mesures prises en compte. La plage de pression utilisée devra être choisie la plus large possible et les points utilisés suffisamment nombreux. Il est, de plus important que les niveaux de pression soient régulièrement espacés afin de ne pas biaiser le calcul de "s".

En guise de conclusion, les considérations théoriques mises en avant lors de la présentation du quantificateur de l'écoulement sont vérifiées par l'expérience. Même si le coefficient "s" nécessite quelques précautions de calcul, il fourni une méthode simple pour prévoir la nature de l'écoulement au sein d'un joint.

Ainsi, à partir d'un essai hélium sur un type de joint donné, il semble possible de déduire la nature de l'écoulement qui le traverse. L'évolution de l'écoulement en fonction de la contrainte appliquée sur un joint donné pourra donc être quantifié.

Une remarque peut être apportée concernant un autre indicateur qui pourrait être employé mais qui nécessiterait une étude plus approfondie. Il s'agit de la durée de stabilisation de la fuite. Il a déjà été mentionné que cette durée pourrait être liée au régime d'écoulement. Certains auteurs [10] lient l'écoulement d'un joint de type PTFE à une valeur de "s" proche de 1. Ce qui signifierait, d'après ce qui vient d'être vu, que l'écoulement est moléculaire ou de perméation. Or, les mesures de fuites effectuées sur des joints de cette nature montrent que leur durée de stabilisation est souvent excessivement longue. Cependant ce lien entre durée de stabilisation de la fuite et régime d'écoulement mériterait d'être confirmé par une étude plus complète. Si un tel lien pouvait être établi, la durée de stabilisation de la fuite pourrait alors devenir un autre indicateur du type d'écoulement dans le joint.

La présentation d'un indicateur de la nature de l'écoulement est basée sur la seule étude de ce qui se produit lors de la phase de serrage d'un joint. Si cet indicateur doit être utilisé pour la conception de système étanche, il est nécessaire qu'il englobe aussi le comportement du joint lors de son desserrage. C'est ce qui va maintenant être présenté.

6.3.2. Influence du desserrage du joint

Jusqu'à présent, il n'a pas été fait de distinction entre le niveau de contrainte sur le joint et son écrasement. Cela était tout à fait justifié puisque tout au long des essais considérés, la contrainte appliquée sur le joint a été croissante. L'étude du comportement d'un joint lorsque la contrainte qui lui est appliquée diminue est un aspect important à prendre en compte lors de la conception de systèmes étanches. Par exemple, dans le cas de brides munies de joints, la mise sous pression de la bride s'accompagnera, à cause de l'effet de font, d'une diminution de la contrainte sur le joint. La caractérisation des performances de joints menée en laboratoire prend évidemment cet aspect en considération. L'essai standard ROTT [6] permet notamment, par l'application de cycles de compression et de décompression sur un joint, d'analyser l'impact du desserrage sur son étanchéité.

Avant de proposer des solutions au problème du lien entre fuites de différents gaz, il semble important de procéder à une première évaluation de l'influence du desserrage du joint sur les phénomènes rencontrés. Il s'agit, ici de vérifier le fait que la nature de l'écoulement est directement liée à l'écrasement d'un joint donné. Si cette hypothèse pouvait être vérifiée, cela permettrait de généraliser les résultats obtenus jusqu'ici. De plus, la quantification de l'écoulement utilisant le paramètre " s " serait simplifiée.

L'analyse du desserrage d'un joint est détaillée par l'annexe 13. L'étude menée ici ne repose que sur les résultats d'un seul essai. L'objectif est donc de posséder une première idée de l'impact de ce phénomène et de proposer des pistes de recherche pour de futures études.

La réalisation de cet essai s'est heurtée à une difficulté importante. L'absence de contrôle permanent sur l'écrasement du joint rend influent le phénomène de "fluage inverse" ("Reverse Creep"). Celui-ci se caractérise par un gonflement important du joint suite à son desserrage. Ce problème a pu être atténué en respectant d'importants temps d'attente entre le desserrage du joint et la mesure de fuites.

Les résultats obtenus semblent aller dans le sens de l'hypothèse émise à savoir que la nature de l'écoulement ne serait, au sein d'un type de joint donné, qu'une fonction de son écrasement. Il est donc possible de conclure que l'écoulement après desserrage du joint sera de même nature que celui obtenu lorsque le joint possédait la même épaisseur en phase de serrage.

L'impact de cette remarque sur la corrélation entre fuites de différents gaz est important. Puisqu'il a été vu que la corrélation permettant de lier les fuites de différents gaz dépend de la nature de l'écoulement gazeux au sein d'un joint, il est capital de pouvoir décrire cette nature quelques soient les conditions d'utilisation du joint. Le travail qui vient d'être mené sur l'impact du desserrage semble montrer qu'il ne sera pas nécessaire de déterminer directement la nature de l'écoulement lors les phases de desserrage du joint. En effet, il suffira de connaître l'évolution de l'écoulement lors de la phase de serrage ainsi que l'épaisseur du joint lors du desserrage. La nature de l'écoulement lors du desserrage pourra être déduite en comparant l'épaisseur du joint alors obtenue avec celle du joint lors de la phase de serrage. Le calcul direct du quantificateur de l'écoulement " s " lorsque le joint est desserré ne semble donc pas nécessaire. Il pourra être déduit des coefficients " s " calculés lors de la phase de serrage du joint en se ramenant à des écrasements identiques.

La mise en œuvre d'un seul essai à partir d'un montage ne permettant pas un contrôle parfait des conditions auxquelles est soumis le joint, peut ne pas sembler suffisant pour la vérification d'une hypothèse. Il serait probablement intéressant de confirmer le lien entre le régime d'écoulement et l'écrasement d'un joint par la réalisation d'essais complémentaires. Ceux-ci pourraient être menés en n'utilisant que le gaz hélium et une machine telle que celle destinée aux essais ROTT [6]. Celle-ci permet le contrôle de l'écrasement du joint. L'essai pourrait consister en la mesure de fuites d'un joint lors de l'application de cycles de compression et de décompression. Les fuites seraient alors obtenues pour différents niveaux de pression interne et pour un écrasement donné. Il serait alors possible de calculer, pour chaque écrasement, la pente "s" permettant de quantifier l'écoulement et de vérifier, à la manière de ce qui est présenté par la figure A13.12 de l'annexe 13, que la nature de l'écoulement ne dépend que de l'écrasement du joint.

6.3.3. Conclusion sur la quantification de la nature de l'écoulement

Le coefficient " s " permet donc de déduire, d'un essai utilisant l'hélium, la nature de l'écoulement qui se produit au sein d'un joint. L'évaluation de cet écoulement peut être réalisée à partir d'un essai standard tel que le test ROTT. Le calcul de ce coefficient ne sera, nécessaire que pour la partie A (phase de serrage) de l'essai. La nature de l'écoulement lors du desserrage pourra être déduite de celle obtenue lors du serrage lorsque l'écrasement du joint était identique.

Les performances du modèle proposé ainsi que des modes de calcul associés ont donc été montrées. Ces calculs permettent, dans la majorité des cas, d'obtenir une prévision précise des fuites d'un gaz cible à partir de celles d'un gaz de référence. Le champs d'application de chacun de ces calculs a, ensuite, été précisé.

Un indicateur a été évalué afin d'estimer sa capacité à définir, de manière simple, le régime d'écoulement rencontré. Des solutions au problème du calcul de fuites de différents gaz à partir de celles de gaz de références vont donc pouvoir être proposées.

6.4. Prévision de l'influence du type de gaz sur la mesure de fuites

Le but de la présente section est de proposer, au travers de la synthèse des principaux résultats obtenus lors de l'étude, une solution au problème posé. Il s'agit donc ici de mettre en avant la méthode qui semble la plus efficace pour la prévision des fuites d'un gaz quelconque à partir de celles d'un gaz de référence. Deux constatations semblent tout d'abord importantes à formuler.

La première est que l'utilisation, tel que réalisé actuellement, du seul mode de calcul laminaire pour lier les fuites de différents gaz peut conduire à d'importantes erreurs. Ceci est vrai même lorsque de hauts niveaux de fuites sont en jeux. La seconde constatation est que l'emploi d'une méthode basée sur le seul calcul moléculaire entraînerait des erreurs d'un même ordre de grandeur.

Bien que les deux modes de calculs laminaire et moléculaire soient les plus simples à utiliser, elles ne semblent pas appropriées, dans le contexte actuel où les prévisions des niveaux d'étanchéité doivent être rendues plus précises. La présente étude semble capable de proposer des solutions de calcul qui, en terme de précision, semblent bien plus satisfaisantes. Deux de ces solutions vont maintenant être proposées.

La première des deux solutions envisageables serait d'employer uniquement le calcul intermédiaire pour le calcul des fuites de différents gaz. Ce mode de calcul est le seul des trois proposés à procurer une bonne estimation des niveaux de fuites réels et ce pour la grande majorité des cas rencontrés. En effet, les fuites calculées par ce mode de calcul se situent entre 0,5 fois et 2 fois la fuite réellement mesurée. Ceci est vérifié pour l'ensemble des gaz testés qui constituent un échantillon représentatif des gaz pouvant être utilisés. La seule exception à cette règle se situe dans le cas de hautes contraintes appliquées au niveau du joint graphite. Dans ce cas, l'écoulement semble être de la perméation.

L'avantage de cette première solution est de permettre une estimation plus efficace des fuites de différents gaz sans la mise en oeuvre de calcul complexe. Cependant, même si le calcul n'est pas complexe, il nécessite une approche plus complète que l'emploi des calculs laminaire ou moléculaire seuls. Dans ces deux derniers cas, la fuite d'un gaz quelconque peut être déterminée en multipliant celle d'un gaz de référence par un simple coefficient. Dans le cas du calcul intermédiaire, il est nécessaire de disposer de plusieurs mesures de fuites et ce pour différents niveaux de pression interne Au moins deux mesures de fuites pour un même état d'écrasement du joint sont, en effet, nécessaires. Elles permettent d'évaluer les coefficients A_I et B_I de l'équation du second degré représentative de l'écoulement du gaz de référence et de la transformer pour l'appliquer au gaz cible (équation 3.20). Cette solution possède tout de même un limitation. Elle pourra conduire à des erreurs lorsque la perméation devient prédominante au sein de l'écoulement.

La seconde solution permettrait de rendre l'estimation des fuites de différents gaz encore plus précise. Cette solution nécessite la détermination préalable de la nature de l'écoulement au sein du joint. Une fois l'écoulement correctement identifié, le mode de calcul correspondant pourrait être appliqué.

Comme il a été montré que les modes de calcul fournissent, lorsqu'il sont appliqués dans les bonnes circonstances, des valeurs très proches de la réalité, la précision des prédictions serait nettement améliorée. Ceci constitue le principal avantage de cette méthode.

Cette solution présente les deux mêmes inconvénients que la précédente. Elle est elle aussi limitée par le fait qu'elle ne prend pas en compte la prédominance possible, au sein de l'écoulement, de la perméation. De plus, comme elle englobe les trois modes de calcul, dont l'intermédiaire, elle nécessite la connaissance de la fuite à au moins deux niveaux de pression pour un écrasement donné du joint considéré.

La mise en oeuvre de cette dernière solution nécessite donc la connaissance de la nature de l'écoulement. Cette information peut être obtenue à l'aide du quantificateur de l'écoulement "s" présenté précédemment. Lors de la qualification d'un joint d'étanchéité, il serait nécessaire de déterminer les valeurs de ce coefficient en fonction de l'écrasement du joint. Compte tenu des résultats précédents, il ne serait pas utile d'étudier les cas associés au desserrage du joint. Lors de la conception d'assemblages munis de joints, il faudrait, en fonction de l'écrasement du joint, se reporter à la valeur correspondante de "s" et, ensuite, appliquer le mode de calcul, laminaire, intermédiaire ou moléculaire approprié. Le calcul de "s" permettrait, de plus, de s'assurer que l'écoulement n'est pas de la perméation. Si la perméation domine l'écoulement, la mise en œuvre du calculs précis de la fuite d'un gaz cible n'est pas possible, dans l'état actuel des connaissances.

Le tableau 6.1 regroupe le lien entre les valeurs du coefficient "s", la nature de l'écoulement et le calcul de la fuite d'un gaz quelconque à partir de celle d'un gaz de référence. Il constitue une synthèse de la réponse au problème du lien entre les fuites de différents gaz.

Quantificateur de la nature de l'écoulement : " s "	Nature de l'écoulement	Corrélation entre fuites de deux gaz
0,5<s<0,55	**Laminaire**	$\frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = \frac{\dot{\upsilon}_1}{\dot{\upsilon}_2}$
0,55<s<0,7	**Intermédiaire**	$Q_{m1} = A_1P^2 + B_1P$ $A_2 = A_1\frac{\dot{\upsilon}_1}{\dot{\upsilon}_2},\ B_2 = B_1\sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$ $Q_{m2} = A_2P^2 + B_2P$
0,7<s<0,85	**Moléculaire**	$\frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$
0,85<s<1	**Perméation** **(à confirmer)**	Inconnue, liée aux coefficients de perméation de chaque gaz avec chaque type de joint.

Tableau 6.1 : Synthèse des résultats obtenus - Calcul des fuites d'un gaz cible (2) à partir de celles d'un gaz de référence (1)

Les deux solutions qui viennent d'être proposées montrent que l'évaluation par un calcul simple de l'influence du type de gaz sur le niveau d'étanchéité ne semble pas possible. Il sera, en effet, difficile de répondre de manière directe à une question demandant de donner, par exemple, l'équivalent en méthane d'une fuite de 0,5 mg/s d'hélium. La réponse à une telle question ne pourra être donnée que si les informations concernant l'écoulement au sein du joint concerné sont disponibles ou, au moins, peuvent être estimées. Le prochain chapitre de ce document se proposera d'intégrer ces résultats au sein d'une méthode de conception de systèmes étanches.

Les deux solutions proposées ici sont issues des informations fournies par la présente étude. Elles permettent une intéressante amélioration de la situation actuelle où la corrélation basée sur le calcul laminaire s'avère en fait plutôt une estimation. Ces solutions, même si elles semblent répondre de manière satisfaisante au problème posé ne constituent pas les seules informations fournies par le présent travail. Ce sont ces principales informations que se propose de rappeler la conclusion de cette étude.

6.5. Synthèse des principaux résultats

Afin de permettre une amélioration de l'estimation des niveaux de fuites obtenus avec différents types de gaz, une étude expérimentale a été menée. Elle se proposait d'estimer les performances de trois modes de calcul issus d'un modèle physique de joint très simplificateur de la réalité.

A l'issue de cette étude, des résultats ont été obtenus, non seulement sur le lien entre les fuites de différents gaz, mais aussi sur des concepts plus fondamentaux liés a la nature de l'écoulement traversant un joint d'étanchéité. Ces deux domaines s'averent intimement liés.

La résolution du problème de l'influence de la nature du gaz passe, en effet, par la compréhension des écoulements au sein de joints.

La présente étude met notamment en évidence le fait qu'il n'existe aucun lien direct entre le niveau d'une fuite et le régime d'écoulement du gaz. Une fuite peut être importante et pourtant être générée par un écoulement de type moléculaire. Le nombre plus important de capillaires pouvant compenser l'effet de leurs plus petits diamètres.

Le régime d'écoulement est fortement influencé par la nature du joint. En fait, les deux paramètres qui influencent le plus la nature de l'écoulement sont d'une part la structure interne du joint, et, d'autre part, son écrasement. La pression interne du gaz jouera elle aussi un rôle mais dans une moindre mesure. Enfin, le type de gaz n'aura pas un influence prépondérante sur le régime d'écoulement. Si l'écoulement est de nature moléculaire avec un gaz il le sera avec tout autre gaz. Le changement de gaz ne s'accompagnera pas de brusque modification de la nature de l'écoulement. Ce point est capital pour le calcul des fuites de gaz cibles à partir de celles d'un gaz de référence.

L'écoulement du gaz au sein d'un joint peut donc être représenté par la somme de quatre écoulements fondamentaux : laminaire, intermédiaire, moléculaire et de perméation. En fonction du type de joint, et des conditions d'écrasement et de pression interne auxquelles il est soumis, un de ces écoulements s'avérera prédominant.

La compréhension des mécanismes de l'écoulement de gaz au sein de joints permet de mieux appréhender le lien entre les fuites de différents gaz. La valeur du rapport entre les fuites de différents gaz n'est influencée que par les gaz considérés et la nature de leur écoulement. Le type de joint influencera donc ces rapports par le fait qu'il conditionne la nature de l'écoulement en son sein. Cependant deux joints différents mais dont l'écoulement sera de nature identique conduiront à des rapports égaux entre les fuites de différents gaz.

Le rapport entre les fuites de deux gaz décroît lorsque l'écoulement passe de laminaire à intermédiaire puis à moléculaire. Par exemple, deux joints dont les fuites hélium sont identiques mais qui possèdent des écoulements de nature différente ne présenteront pas les même fuites méthane. Il reste toujours une inconnue. Celle-ci est liée à la valeur du rapport entre les fuites de deux gaz lorsque l'écoulement est de manière prédominante de la perméation.

Enfin la présente étude propose un modèle de joint. Bien que simpliste, ce modèle permet le calcul précis des fuites d'un gaz quelconque à partir de celles d'un gaz de référence obtenues pour un même joint dans des conditions identiques. Ce modèle découle sur trois modes de calcul. Ainsi, il s'adapte aux conditions de contrainte, ou plutôt d'écrasement, et de pression auxquelles est soumis un joint. La performance du modèle est cependant associée à deux conditions.

La première est que la nature de l'écoulement doit être connue pour que le mode de calcul adéquat soit employé. C'est pourquoi l'utilisation de ce modèle doit être associée à celle d'un quantificateur de l'écoulement comme le paramètre "s" mis en évidence lors de l'étude. La seconde est liée au fait que le modèle ne prend pas en compte la perméation. Ainsi lorsque l'écoulement devient de la perméation, les calculs effectués resteront approximatifs. Cependant, le quantificateur de l'écoulement "s" peut être utilisé pour savoir si la perméation est prépondérante au sein de l'écoulement.

Les conclusions de l'étude montrent qu'il est possible d'améliorer la précision des prévisions de fuites pour différents gaz. Evidemment, la prise en compte exacte de l'influence du type de gaz s'avère, à l'issue du présent travail, plus complexe que ce qui est actuellement réalisé. La méthode de corrélation proposée par le présent travail nécessite la prise en compte de la nature de l'écoulement et des conditions qui la modifie. Il est à noter que les éléments nécessaires à la mise en œuvre de la méthode proposée pourraient être déduits d'essais existants tels que le test ROTT.

Les résultats obtenus lors de la présente étude pourraient servir de base à de prochains travaux. Trois sujets semblent s'inscrire dans la continuité du présent travail. Tout d'abord une étude spécifique à la perméation de gaz pourrait permettre de compléter le présent modèle. Ensuite, il serait certainement intéressant de confirmer l'influence du desserrage du joint sur l'écoulement qui les traverse par la conduite d'essais complémentaires. Enfin, le mode de calcul du coefficient "s" utilisé comme quantificateur de l'écoulement, notamment le choix des niveaux de pression de gaz à considérer, nécessite d'être plus amplement étudiée.

Outre la résolution du problème de lien entre fuites de différents gaz, cette étude a permis de mettre en évidence la modification de l'écoulement au sein de joints d'étanchéité. Cette modification n'est pas toujours prise en compte lors de la conception d'assemblages boulonnés. Jusqu'à présent, en effet, l'écoulement de type moléculaire était associé à de petites fuites pour lesquelles la précision nécessaire est plus relative. L'objectif étant de concevoir des assemblages à brides qui satisfont les normes présentes et futures concernant l'émission de gaz polluants dans l'atmosphère, l'importance d'une conception plus précise de ces assemblages semble clairement nécessaire. La prise en compte des modifications de l'écoulement au sein de joints pourrait constituer un moyen de rendre cette conception plus précise.

Certains aspects actuels de la conception de systèmes étanches vont donc être abordés. Il sera vu comment les résultats de la présente étude peuvent apporter des améliorations aux procédures de conception. Ce travail va être présenté par le prochain chapitre.

CHAPITRE 7
IMPACT DES RESULTATS OBTENUS SUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES ETANCHES MUNIS DE JOINTS

7.1. Présentation

A l'issue des précédents chapitres, des conclusions ont pu être apportées sur le comportement de joints d'étanchéité. Ces conclusions fournissent des informations permettant de mieux appréhender le lien entre la qualification de joints en laboratoire et l'utilisation de ces mêmes joints sur site industriel, notamment par une meilleure prise en compte de l'influence du type de gaz. Le présent chapitre se propose de mettre en évidence, de manière pratique, l'impact de ces informations sur la conception de systèmes étanches.

Le point principal de la discussion qui va être menée concerne un concept très utilisé pour la conception de brides munies de joints, celui du coefficient Tp. Les fondements théoriques de ce paramètre ne seront pas exposés ici, il conviendra pour plus d'information de se reporter aux documents de référence existants [19]. Par contre les performances de ce concept seront illustrées. Des modifications permettant d'améliorer ces performances seront, ensuite, proposées. Celles-ci seront directement issues des travaux menés précédemment au sujet du lien entre les fuites de différents gaz et, plus particulièrement, des régimes d'écoulements au sein de joints d'étanchéité.

7.2. Présentation du concept de Tp

Le Tp, ou paramètre d'étanchéité ("Tightness Parameter") est un coefficient sans dimension qui illustre le lien entre la fuite massique d'un joint et la pression interne de gaz, pour une contrainte donnée. Il s'exprime par la relation suivante :

$$T_p = \frac{P}{P^*}\left(\frac{1}{L_{rm}}\right)^{0,5} \qquad (7.1)$$

Lrm, P: fuite massique (mg/s) et pression interne du gaz associées,

P^* : pression standard.

Du coefficient Tp découle le calcul des constantes "Gb", "a" et "Gs" du joint [20]. Ces dernières permettent de déterminer la contrainte à appliquer sur un joint donné pour que la fuite obtenue soit inférieure à une limite définie. Les détails de la technique de conception basée sur ces constantes sont précisés par la référence [21].

L'expression (7.1), montre que la fuite d'un joint peut être déterminée, connaissant la valeur de Tp, pour tous les niveaux de pression interne du gaz. L'exposant 0,5 de cette expression modélise l'influence de la pression sur le niveau de fuite. Il suppose que l'écoulement au sein du joint est laminaire. Le problème est que l'écoulement au sein d'un joint n'est pas toujours de nature laminaire, comme cela a clairement été établi lors de la précédente étude. Cet exposant peut donc être à l'origine d'inexactitudes dans la manière dont le paramètre Tp permet de prédire les fuites.

A l'aide de certains des résultats expérimentaux précédemment obtenus, l'écart entre la réalité et ce que permet de prévoir l'approche basée sur le Tp va être évalué. L'intérêt sera surtout porté sur la capacité de ce coefficient à bien prendre en compte l'influence de la pression interne sur l'étanchéité de joints.

7.3. Evaluation des performances du paramètre Tp

7.3.1. Méthode d'évaluation

L'objectif de l'évaluation qui va être menée est d'estimer les performances du paramètre Tp en ce qui concerne son aptitude à décrire l'évolution du niveau de fuite en fonction de la pression interne du gaz et de l'état de contrainte sur le joint.

La technique la plus récente de conception d'un assemblage boulonné est basée sur les résultats d'un essai ROTT. A partir de ce type d'essai, la courbe de l'évolution de Tp en fonction de la contrainte Sg peut être tracée. Les constantes de joints, "Gb", "a" et "Gs", peuvent alors être déterminées à partir de cette courbe.

L'essai ROTT mesure les fuites pour deux pressions internes du gaz (2,758 MPa et 5,516 MPa, soit 400 psi et 800 psi) et ce pour différents niveaux de compression du joint. La séquence des niveaux de contrainte sur le joint lors des différents cycles de compression et de décompression est standardisée. Ce type d'essai ainsi que les constantes qui en sont déduites sont décrits en détails dans la référence [6].

Ce qui va être réalisé ici est, en fait, la simulation d'un essai ROTT et d'un calcul de constantes. Elle sera menée à partir des résultats des essais réalisés lors du précédent travail sur le lien entre les fuites de différents gaz. En effet, lors de cette étude des mesures de fuites ont été réalisées sur deux types de joint (A9 et G2), pour différents niveaux de contraintes et surtout pour de nombreux niveaux de pression.

Dans un premier temps, les données proches de celles qu'auraient fournies un essai ROTT seront extraites de l'ensemble des résultats. Seules les fuites obtenues pour 2,758 MPa et 5,516 MPa (400 et 800 psi) de pression interne seront utilisées. Le Tp sera alors calculé et la courbe représentant la contrainte sur le joint Sg en fonction du Tp sera tracée. Les constantes du joint seront ensuite calculées. A partir de celles-ci, les fuites du joint pour différents niveaux de pression interne pourront être calculées. Elles seront alors comparées à celles mesurées sur le joint lors des différentes expériences.

Il sera donc possible de considérer la manière dont le coefficient Tp, obtenu à partir de mesures avec deux niveaux de pression, permet de décrire le comportement du joint pour une pression interne quelconque. Il est à noter que l'objectif ne sera pas ici de traiter du problème du calcul des constantes "Gb", "a" et "Gs". La méthode employée pour le calcul de ces constantes ne sera pas détaillée. Par contre, elle restera identique tout au long de l'étude afin que les comparaisons effectuées ne soient pas faussées par la technique de calcul employée.

Cette validation sera menée en prenant en compte trois des essais réalisés précédemment. Les deux essais numéro 3 (voir tableau 4.2) réalisés sur les joints amiante (A9) et graphite (G2) avec l'hélium seront exploités. L'essai de compression et de décompression mené sur le joint amiante sera lui aussi utilisé et ce malgré les difficultés rencontrées lors de l'expérimentation notamment au niveau du "fluage inverse" du joint testé. Les deux premiers de ces essais permettront d'analyser les performances du Tp lors de la phase de compression du joint (partie A de l'essai ROTT), tandis que l'essai de desserrage mené sur le joint amiante permettra d'estimer celles liées à la phase de décompression du joint (partie B de l'essai ROTT).

7.3.2. Résultats obtenus

Les figures A14.1 et A14.3 de l'annexe 14 présentent les courbes liant la contrainte sur le joint Sg en fonction de Tp et obtenues pour la compression des deux joints A9 et G2. Les droites représentées sur ces figures permettent de déduire les deux constantes "Gb" et "a". Ces droites sont définies par l'équation:

$$S_g = G_b T_p^a \tag{7.2}$$

Les figures A14.2 et A14.4 de l'annexe 14 présentent la comparaison entre les fuites calculées à partir des constantes "Gb" et "a" et du coefficient Tp et celles mesurées lors de la phase expérimentale. Le calcul des fuites se fait en utilisant successivement les relations (7.2) et (7.1) avec les valeurs de "Gb" et "a" calculées et pour Sg et P fixés.

Deux constats peuvent être menés au sujet de ces figures. Tout d'abord, les représentations de Sg en fonction de Tp montrent un décalage entre les valeurs de Tp calculées à niveau de contrainte donné pour les deux pressions 400 psi et 800 psi. Ce décalage apparaît plus important pour le cas du joint G2. Il est l'illustration du fait que l'écoulement dans le joint n'est pas laminaire comme le suppose l'exposant 0,5 du paramètre Tp. L'exposant devrait être supérieur à 0,5 pour que ce décalage disparaisse.

La seconde remarque est associée aux figures A14.2 et A14.4. Il est visible que les courbes représentant les fuites calculées et mesurées, pour un même niveau de contrainte, ne sont pas exactement identiques. Les pentes des droites représentatives des fuites calculées et mesurées sont différentes. L'écart entre ces pentes est une autre illustration de l'erreur commise au niveau de l'évaluation de la nature de l'écoulement.

Il est à noter qu'à basse contrainte, les fuites calculées sont très éloignées de celles mesurées. Par exemple, les fuites calculées pour 7 MPa dans le cas du joint amiante sont supérieures à 1 mg/s et n'apparaissent donc pas sur la figure A14.2. Cet écart important est lié à la méthode de calcul des constantes du joint qui utilise les mesures expérimentales effectuées à haute contrainte.

La figure A14.9 présente le calcul des constantes lorsque la compression et la décompression du joint A9 sont prises en compte. Comme précédemment, la droite tracée permet de calculer les constantes "Gb" et "a". Les deux cycles de décompression sont utilisés pour déterminer deux constantes "Gs". La méthode de calcul des constantes proposée dans la littérature n'aurait conduit qu'à une seule valeur "Gs". Cependant, afin que le calcul de cette valeur unique ne vienne pas fausser l'évaluation du coefficient Tp, deux constantes seront ici prises en compte "Gs_1" et "Gs_2". Les constantes "Gb", "a", "Gs_1" et "Gs_2" sont ensuite utilisées pour recalculer les fuites lors de la phase de compression et lors des deux cycles de décompression. Ces résultats sont présentés par les trois figures A14.10, A14.11 et A14.12.

Que ce soit pour la phase de compression ou de décompression du joint, les constatations sont identiques à celles formulées précédemment. Il est manifeste que les pentes des droites présentant les fuites en fonction de la pression interne et issues soit des calculs, soit des mesures ne sont pas identiques. C'est encore l'illustration d'une prise en compte inexacte de la nature de l'écoulement. Ce décalage est, de plus, illustré par l'écart entre les valeurs des Tp calculées pour une même contrainte mais à deux niveaux de pression interne (figure A14.9).

7.3.3. Remarques sur la validation du paramètre Tp

Le paramètre Tp tel qu'utilisé actuellement ne permet donc pas de prendre en compte de manière précise la nature de l'écoulement dans le joint. Cela conduit à des erreurs dans l'estimation de l'influence de la pression sur le niveau d'étanchéité d'un joint. Cette erreur sera d'autant plus manifeste que l'écoulement dans le joint est éloigné de l'écoulement laminaire supposé par l'exposant 0,5 intervenant dans le Tp.

Les écarts mis en évidence entre les fuites prévues et celles réellement mesurées peuvent ne pas paraître, à première vue, très importants. Notamment dans le cas du joint A9, la prévision des fuites donne des résultats acceptables même si un décalage manifeste existe au niveau des pentes des droites obtenues. Ce dernier type de joint fonctionne, comme cela a précédemment été démontré, suivant un régime d'écoulement qui n'est pas trop éloigné de l'écoulement laminaire ce qui explique l'amplitude modérée des écarts constatés. Il est cependant important de considérer que les erreurs induites par le coefficient Tp actuel risquent d'être amplifiées lorsque les résultats obtenus seront transposés à ceux liés aux fuites de gaz autres que l'hélium. De plus, ces erreurs seraient bien plus importantes si les calculs portaient sur les niveaux de fuite associés à des pressions internes plus grandes puisque les pentes des courbes calculées et mesurées diffèrent (figure A14.2).

Si l'objectif est d'améliorer la conception de systèmes étanches, il semble nécessaire de mettre en oeuvre un coefficient Tp qui permette une meilleure prise en compte de l'influence de la pression sur les fuites du joint. Ceci passe par une meilleure adaptation aux changements de la nature de l'écoulement au sein du joint. La prochaine section se propose donc de mettre en évidence un coefficient Tp modifié et d'en évaluer les performances. Ces dernières seront comparées à celles du coefficient Tp actuel afin d'estimer les améliorations apportées.

7.4. Proposition de modification du paramètre Tp

7.4.1. Concept de la modification

La première idée sur laquelle est basée la modification proposée est que les données utilisées pour les différents calculs doivent être accessibles à partir de l'essai ROTT tel qu'il est réalisé actuellement. Ainsi il ne sera pas nécessaire pour mettre en œuvre la modification de posséder plus d'informations sur le comportement du joint que celles déjà fournies par l'essai ROTT classique. Par contre, une meilleure exploitation de l'ensemble de ses résultats sera nécessaire afin de rendre la caractérisation d'un joint plus précise.

Le concept associé au coefficient Tp modifié est simple. Puisque les erreurs générées par le Tp actuel sont associées à une mauvaise prise en compte de la nature de l'écoulement, c'est sur ce point que doit porter la modification. Celle-ci consiste donc a remplacer le coefficient 0,5 de l'équation du Tp actuel (équation 7.1) par le quantificateur de l'écoulement "s". Cet indicateur, sa signification et son calcul ont deja été amplement discutés (annexe 12). Sa valeur évoluera avec le type de joint et les conditions de serrage qui lui sont appliquées. Il sera notamment lié de manière simple a la contrainte sur le joint, ou de manière plus universelle, à son écrasement.

Afin d'évaluer l'impact d'une telle modification sur la prévision de fuites, une analyse similaire à celle menée sur le coefficient Tp actuel va être menée.

7.4.2. Evaluation du paramètre Tp modifié

Les données des essais réalisés vont de nouveau être exploitées afin de simuler les résultats fournis par un essai ROTT. Les fuites obtenues pour chaque niveau de contrainte avec les deux niveaux de pression interne (2,758 MPa et 5,516 MPa, soit 400 psi et 800 psi) seront utilisées. Les valeurs du coefficient "s" calculées pour chaque niveau de contrainte seront elles aussi exploitées.

Ainsi, pour chaque niveau de contrainte, le coefficient Tp sera calculé suivant la formulation suivante :

$$T_p = \frac{P}{P^*}\left(\frac{1}{L_{rm}}\right)^s \qquad (7.3)$$

L'exposant "s" est la pente de la droite liant Log L_{rm} à Log P pour un niveau de contrainte donné. Les constantes "Gb" et "a" seront ensuite calculées comme précédemment.

Dans le cas de l'essai de desserrage, le coefficient "s" ne sera pas issu d'un calcul direct. Ceci serait impossible à partir des résultats d'un essai ROTT standard puisque la mesure de fuite ne se fait qu'à un seul niveau de pression pour la partie B (phase de desserrage) de l'essai. Le coefficient "s" lors du desserrage sera donc estimé à partir de l'évolution de "s" en fonction de l'écrasement du joint pendant le serrage (partie A de l'essai) et de la valeur de l'écrasement lorsque le joint est desserré (partie B). Cette méthode est justifiée par l'étude menée sur l'influence du desserrage au niveau de la nature de l'écoulement et présentée en annexe 13. Il y est montré que la nature de l'écoulement ne dépend, pour un joint donné, que de son écrasement. Les valeurs du Tp pourront alors être déterminées lors du déchargement du joint. Les deux constantes "Gs_1" et "Gs_2" pourront ensuite être calculées comme précédemment.

L'ensemble des contantes "Gb", "a", "Gs_1" et "Gs_2" seront ensuite utilisées pour calculer les fuites du joint pour différents niveaux de pression. Ces calculs seront comparés aux différentes mesures réalisées.

7.4.3. Résultats obtenus

Les résultats obtenus à l'aide du coefficient Tp modifié sont présentés en annexe 14. Le lien entre la contrainte Sg et le paramètre Tp ainsi que la comparaison des fuites calculées et mesurées y sont illustrés.

La première remarque importante est associée aux évolutions de la contrainte Sg en fonction du Tp modifié. Ces évolutions sont présentées par les figures A14.5, A14.7 et A14.13. Il est clair que le changement de la formulation du Tp entraîne d'importantes modifications de sa valeur. Par contre il est capital de considérer que l'allure des courbes obtenues reste identique à celles associées à la formulation actuelle du Tp. Ainsi le principe de calcul des constantes du joint ne sera pas affecté par la modification du Tp même si les valeurs de ces constantes sont très différentes de celles obtenues par l'application de la formulation actuelle du Tp.

L'impact de la modification apportée est déjà visible sur ces mêmes figures liant Sg à Tp. En effet, le décalage qui était visible entre les Tp actuels calculés pour un même niveau de contrainte et les deux pressions 2,758 MPa et 5,516 MPa (400 psi et 800 psi) ne se retrouve plus sur les courbes obtenues à l'aide du Tp modifié. C'est le premier signe d'une meilleure prise en compte de la nature de l'écoulement.

La conséquence de la modification apportée est encore plus clairement illustrée par l'ensemble des figures qui mettent en parallèle les fuites calculées à celles mesurées (figures A14.6, A14.8 et A14.14 à A14.16). Dans tous les cas présentés, il est clair que les pentes des droites calculées sont proches de celles issues des mesures. Ce constat est vrai que la phase de serrage ou de desserrage soit prise en compte. Ces résultats montrent donc que l'utilisation d'un paramètre Tp où la nature de l'écoulement est impliquée permet d'améliorer la précision des prévisions des fuites d'un joint et ce pour tout niveau de pression interne.

Il est cependant à noter que les courbes des fuites mesurées et calculées, même si elles possèdent dans tous les cas des pentes très proches, sont parfois décalées et ce surtout lorsque la partie B de l'essai est considérée. Ce décalage est à associer au calcul des constantes, et plus particulièrement des constantes "Gs". Les valeurs des Tp calculées par la nouvelle formulation proposée sont plus grandes que celles précédemment obtenues. Ainsi l'écart entre le Tp réel et celui déduit des constantes du joint sera plus important que dans le cas de la formulation actuelle du Tp. Cet écart est la cause du décalage entre les fuites mesurées et calculées qui peut être observé dans certains cas (figures A14.15 et A14.1) et n'est donc pas directement lié à la nouvelle formulation du Tp mais plutôt au calcul des constantes du joint. Le mode de calcul des constantes du joint n'est pas l'objet du présent travail.

7.4.4. Conclusions sur la modification proposée

La modification apportée au coefficient Tp est basée sur la prise en compte des changements de la nature de l'écoulement. Cette prise en compte est effectuée par l'intermédiaire du facteur "s" qui quantifie l'écoulement et dont la valeur est associée à l'écrasement du joint considéré.

La mise en oeuvre de cette modification est donc très simple. La seule opération supplémentaire est le calcul du coefficient "s" pour chaque niveau de contrainte de la partie A de l'essai ROTT. L'évolution de "s" en fonction de l'écrasement du joint peut alors être obtenue et le Tp calculé pour toutes les valeurs de Sg qu'elles correspondent aux parties A ou B de l'essai.

Les résultats obtenus à l'aide du coefficient Tp modifié montrent que l'influence de la pression est nettement mieux décrite par cette nouvelle formulation. Les courbes liant la contrainte Sg au Tp modifié sont d'allure inchangée par rapport à la formulation actuelle ce qui assure la conservation des méthodes de calcul des constantes.

Le travail qui vient d'être mené montre donc l'intérêt que pourrait avoir l'utilisation d'un paramètre Tp modifié. L'influence de la pression interne sur le niveau d'étanchéité de joints est mieux prise en compte. Ce nouveau coefficient possède une formulation qui lui permet de s'adapter aux différents types de joints existants.

L'utilisation de ce paramètre Tp modifié nécessite cependant la mise en œuvre d'une procédure de conception de systèmes étanches différente de celle actuellement utilisée. Il faut, en effet, que cette procédure contienne des étapes supplémentaires telles que la détermination du quantificateur de l'écoulement "s" et la possibilité de calculer l'écrasement d'un joint donné. L'objet de la prochaine section de ce chapitre est de proposer une procédure de conception de brides d'étanchéité munies de joints adaptée au paramètre Tp modifié.

7.5. Conception de systèmes étanches à l'aide du paramètre Tp modifié

L'objectif de la procédure de conception de systèmes étanches et de permettre le calcul de la contrainte à appliquer sur un joint donné pour que sa fuite de service soit inférieure à une limite fixée. La fuite de service d'un joint est sa fuite lorsqu'il sera installé sur une bride avec une pression interne et un type de gaz bien définis.

Tout l'enjeu du calcul de conception est donc l'exploitation des résultats de l'essai de qualification en laboratoire du joint (essai ROTT) pour le calcul de cette contrainte.

La procédure de calcul actuellement utilisée est décrite par la référence [22]. Elle est basée sur le paramètre Tp défini par l'équation 7.1, et sur les constantes du joint "Gb", "a" et "Gs". L'équation 7.2 permet de lier les constantes du joint, la contrainte à lui appliquer et le paramètre Tp. Ces informations sont directement issues de l'essai ROTT réalisé en laboratoire.

L'utilisation du paramètre Tp modifié, même si elle semble permettre une intéressante amélioration des prévisions de fuites, nécessite une meilleure exploitation des résultats de l'essai ROTT. De plus, certains aspects du calcul actuel de la contrainte à appliquer sur un joint doivent être adaptés au nouveau paramètre.

Ce sont donc les deux aspects de la conception de systèmes étanches, soit la caractérisation d'un joint d'étanchéité et le calcul de la contrainte de serrage, qui vont maintenant être détaillés.

7.5.1. Caractérisation de joints d'étanchéité

Cette étape de caractérisation correspond au travail réalisé par un laboratoire d'étanchéité pour décrire le comportement d'un joint donné. Il s'agit de fournir aux utilisateurs de joints les outils nécessaires à une conception adéquate du système étanche qui utilisera ce joint. Ces informations seront déduites d'un essai de type ROTT.

Actuellement, l'essai ROTT débouche sur la réalisation du graphe liant la contrainte sur le joint au coefficient Tp. A partir de ce dernier, les constantes du joint "Gb", "a" et "Gs" sont déduites. Les constantes du joint sont les seules informations employées par les utilisateurs de joints lors de la conception de systèmes étanches. Si le coefficient Tp était modifié comme proposé précédemment, cette conception nécessiterait de plus amples informations. L'ensemble des informations qu'il serait alors nécessaire de déduire d'un essai ROTT est présenté par la figure A14.17 de l'annexe 14.

Cette figure montre la succession des étapes qui permettraient de déterminer le graphe liant le Tp modifié à la contrainte Sg ainsi que les constantes "Gb", "a" et "Gs" du joint. Cette procédure comporte en fait deux étapes supplémentaires par rapport à ce qui est actuellement réalisé. Ces deux étapes sont rendus nécessaires par la nouvelle formulation du Tp. Cette dernière nécessite la connaissance du quantificateur de l'écoulement "s" et de son évolution avec l'écrasement du joint. Les deux points d'analyse supplémentaires sont donc liés au comportement mécanique du joint et à l'évolution de la nature de l'écoulement en son sein.

L'aspect mécanique du joint sera complètement modélisé par l'obtention de deux caractéristiques. Le première est la fonction liant l'écrasement Dg du joint et la contrainte qui lui est appliquée Sg, pour la partie A de l'essai. La seconde est le coefficient de décompression du joint Eg dont une définition est donnée par la figure A14.17 de l'annexe 14. A l'aide de ces deux informations il sera possible de connaître l'écrasement d'un joint associé à un niveau de contrainte de la phase de serrage ou de déchargement du joint.

L'évolution de l'écoulement au sein du joint sera modélisée lorsque les fonctions liant le quantificateur de l'écoulement "s" à la contrainte et à l'écrasement du joint seront connues. De ces deux fonctions, seule celle liant "s" à l'écrasement du joint sera utilisée pour le calcul du Tp. La fonction liant "s" à la contrainte sur le joint ne sera utilisée que lors de la phase de calcul pour l'estimation d'un Tp minimal. De plus, il ne sera nécessaire d'estimer ces fonctions que pour la partie A de l'essai ROTT. En effet, il a été précédemment montré que la nature de l'écoulement ne dépend, pour un joint donné, que de son écrasement. Le fait que cet écrasement soit obtenu après le chargement ou le déchargement du joint n'est pas important.

Lorsque les deux étapes précédentes sont complétées, il est possible de déterminer la courbe liant la contrainte sur le joint Sg au Tp modifié. Pour chaque niveau de contrainte, l'écrasement du joint est connu. Cette information est directement fournie par l'essai ROTT. A l'aide de la fonction liant "s" à l'écrasement, il est donc possible de calculer la valeur de "s" pour chaque niveau de contrainte, que ce soit sur la partie A ou B de l'essai. Le Tp peut alors être déterminé à l'aide de la relation (7.3). Enfin, les constantes "Gb", "a" et "Gs" peuvent être déduites du graphe liant la contrainte Sg au Tp modifié. Ceci sera possible puisque même si le Tp modifié ne possède pas les mêmes valeurs que la formulation actuelle, son évolution avec la contrainte reste identique.

7.5.2. Conception d'un système étanche

La procédure de conception d'un système étanche a pour but de déterminer la contrainte de serrage à appliquer à un joint pour que, lors de la mise sous pression du système, la fuite reste inférieure à une fuite limite fixée. Les données initiales sont donc d'une part la pression de service du système et le type de gaz concerné, et, d'autre part, l'ensemble des données issues de la caractérisation du joint en laboratoire.

L'utilisation du paramètre Tp modifié engendre certaines modifications à la procédure de calcul de la contrainte de serrage. Ces modifications ne sont pas capitales puisque l'ensemble des techniques de calcul actuelles associées au graphe liant la contrainte Sg au paramètre Tp restent inchangées. La nouvelle procédure, présentée par la figure A14.18 de l'annexe 14, se propose de n'ajouter que deux étapes à la procédure actuelle.

La première de ces deux étapes est préliminaire au mode de calcul actuel. Il s'agit, tout d'abord, de ramener la fuite maximale admissible d'un gaz quelconque à la fuite correspondante pour l'hélium. Compte tenu de ce qui a précédemment été présenté, il n'est pas possible de calculer avec précision cette fuite hélium tant que le régime d'écoulement n'est pas connu. Lors d'un calcul de conception, ce régime d'écoulement n'est pas déterminé a priori puisqu'il dépend de l'état d'écrasement du joint lors de la mise en service. Il est donc nécessaire d'estimer la fuite hélium. Cette première estimation peut être réalisée à l'aide du mode de calcul laminaire faisant intervenir les viscosités de chacun des gaz. L'utilisation de la formulation laminaire permettra de rester conservateur puisque les rapports entre les fuites de différents gaz obtenus à l'aide de ce calcul s'avèrent, d'après les résultats du présent travail, supérieurs ou égaux aux rapports réels.

Cette étape préliminaire est, de plus, nécessaire pour le calcul d'un Tp minimum, soit la valeur minimale du Tp nécessaire pour que la fuite du joint considéré soit inférieure à la fuite limite fixée. La procédure actuelle rend cette étape immédiate puisque pour une valeur de fuite limite il est possible de calculer, connaissant la pression de service, le Tp minimal en utilisant la relation (7.1). L'utilisation de la formulation modifiée du Tp rend cela impossible puisque cette formulation dépend du type de joint considéré et de son écrasement. La valeur de Tp minimale sera donc, avec la nouvelle formulation, à déterminer pour chaque type de joint considéré.

Ce calcul du Tp minimal ne sera cependant pas complexe. Il s'agit de calculer la contrainte qu'il faudrait appliquer sur le joint pour que, lors de son serrage, la fuite obtenue soit égale à la fuite maximale admissible. Cette contrainte peut être calculée par l'équation suivante, issue des relations (7.2) et (7.3):

$$S_{gl} = G_b \frac{P_s}{P^a} \left(\frac{1}{L_{maxHe}} \right)^{\left[a\, k(S_{gl}) \right]} \tag{7.4}$$

P_s : pression de service (Pa),

L_{maxHe} : fuite maximale admissible estimée pour l'hélium,

Gb, a : constantes du joint,

Sg_l : contrainte sur la partie A pour laquelle la fuite du joint sera égale à la fuite maximale admissible,

k(Sg) : fonction liant "s" à Sg pour le serrage du joint.

Il est ensuite possible de déduire le Tp minimal, Tp_{min}, associé à cette contrainte par la relation suivante :

$$S_{gl} = G_b T_{p\,min}{}^a \tag{7.5}$$

Dans la réalité, le joint va subir un déchargement. Il sera donc nécessaire de lui appliquer un contrainte de serrage supérieure à Sg_1. Cependant, le concept de Tp minimal permet de s'assurer que si, après déchargement du joint, la valeur de Tp est égale à la valeur de Tp minimale, alors la fuite du joint sera au maximum égale à la fuite limite autorisée.

A ce stade de la procédure, il est possible d'utiliser la méthode de calcul actuelle. Les différents facteurs pouvant entraîner le déchargement du joint peuvent être pris en compte. L'utilisation de la courbe liant Sg à Tp permet de calculer la contrainte de serrage Sy à appliquer pour que, lors du déchargement, le Tp final, Tp_f, reste supérieur ou égal à la valeur de Tp minimale précédemment calculée. A l'issue de ce calcul, la contrainte de serrage Sy et la contrainte sur le joint après déchargement Sm seront donc connues.

La nouvelle procédure se propose alors d'ajouter à la suite de ce calcul une étape de vérification. Lors de l'étape préliminaire, la nature de l'écoulement était inconnue ce qui nécessitait l'utilisation d'approximations. Par contre, à la suite du calcul des contrainte Sy et Sm, il est possible de calculer le coefficient "s" et donc de déterminer à l'aide de la valeur de Tp_f la fuite hélium finale L_{rmHef} du joint lors de la mise en service. De plus, comme "s" est connu, il est possible de calculer, à partir de la fuite hélium finale L_{rmhef} la fuite du gaz cible en utilisant le mode de calcul laminaire, intermédiaire ou moléculaire, le plus approprié.

La comparaison de la valeur obtenue avec la fuite maximale admissible permettra d'estimer la validité du calcul de la contrainte de serrage Sy. Suivant le résultat de cette comparaison, une itération supplémentaire pourra alors être effectuée. Elle conduira à un choix de contrainte de serrage différent et donc à une fuite finale différente.

7.5.3. Remarques sur les nouvelles procédures proposées

L'utilisation de la formulation du Tp modifié engendrera donc quelques modifications au niveau de la conception de systèmes étanches. Cependant, les concepts liés à l'utilisation du graphe liant Sg à Tp et à celle des constantes du joint restent inchangés. La nouvelle procédure ne préconise que l'ajout d'une étape préliminaire et d'une étape de vérification au calcul actuel. Il est de plus important de noter que les modifications de la procédure ne sont pas associées à des calculs compliqués. Le seul calcul supplémentaire est lié à l'estimation du Tp minimal. L'équation à résoudre (7.4) peut l'être en utilisant des moyens informatiques minimes tels qu'un logiciel de type tableur.

Au niveau de la caractérisation de joints en laboratoire, la nouvelle procédure proposée ne nécessite pas l'obtention de données expérimentales supplémentaires. Seule une plus grande exploitation de celles déjà fournies par l'essai ROTT semble nécessaire. Cette exploitation permettra une meilleure prise en compte des différences entre les joints existants.

L'utilisation d'un Tp modifié semblent donc de nature à rendre la conception de systèmes étanches plus précise. L'influence de la pression interne sera notamment mieux modélisée. Les différences de comportement entre chaque type de joint seront mieux prises en compte. Cependant, quelques commentaires préalables à la mise en oeuvre de telles modifications s'imposent.

Tout d'abord, l'utilisation du coefficient Tp modifié rend difficile la comparaison des comportements de deux joints différents. Actuellement la superposition des graphes liant la contrainte Sg au Tp est utilisée pour comparer les performances de différents joints. Comme le coefficient Tp modifié possédera une formulation différente pour chaque joint, cette opération perdra tout son sens. Néanmoins, il est à noter que la superposition actuelle des graphes n'est pas dépourvue d'approximations. En effet, il n'est pas garanti, avec la procédure actuelle, qu'un joint dont le Tp est supérieur à celui d'un autre sera plus étanche pour tout niveau de pression interne. De plus, il existe d'autres moyens aussi efficaces que la superposition actuelle permettant de comparer en première approche les performances de deux joints. Par exemple, une courbe liant la fuite du joint à sa contrainte, pour une pression interne donnée, fournirait des informations identiques à la superposition actuelle des graphes liant Sg à Tp. Enfin, comme l'ensemble de la procédure de conception proposée ici peut être informatisée il n'est pas exclu de réaliser ces calculs pour les joints dont les performances veulent être comparées.

La mise en oeuvre des procédures proposées possédera, de plus, un impact sur le concept de Tp minimal. Comme cela a été précisé, il ne sera plus possible avec le nouveau Tp de formuler un critère d'étanchéité sous la forme d'un Tp minimal. Ces critères d'étanchéité devront donc revenir à leur forme la plus simple, directement liée au niveau de fuite maximal acceptable.

De manière théorique, les procédures proposées semblent être applicables. Des vérifications concernant leur simplicité de mise en oeuvre s'imposent néanmoins. Certains points seront, en effet, à considérer. Le premier concerne la possibilité d'estimer le coefficient "s" à partir des deux mesures de fuites réalisées lors de l'essai ROTT. Même si en théorie deux points de mesure sont suffisants pour mener à bien ce calcul, il s'agira de vérifier si, en pratique, cela s'avère suffisant.

Lors de la présentation du quantificateur de l'écoulement "s", il a été vu que le nombre de points de mesure et les niveaux de pression pris en compte jouent un rôle sur le calcul de "s" (annexe 12). La précision des mesures peut, elle aussi, s'avérer influente.

De plus, il s'agira de s'assurer que le comportement mécanique des joints peut être modélisé de la manière proposée. La manière de déterminer les fonctions liant l'écrasement à la contrainte pour la phase de serrage du joint reste à définir. Le mode de calcul du coefficient de décompression Eg reste, lui aussi, à préciser.

L'allure des graphes liant la contrainte Sg au Tp modifié semble permettre de conserver les techniques de calcul des constantes du joint "Gb", "a" et "Gs". Cependant, la mise en oeuvre pratique de ces calculs ainsi que leur pertinence devra être validée.

Enfin, la prise en compte de l'influence du type de gaz sur l'étanchéité de joints est introduite dans les nouvelles procédures proposées. La méthode utilisée est directement issue de l'une des solutions présentées à la fin du chapitre 6. Elle s'avère donc limitée par la prédominance possible de la perméation au sein de l'écoulement. Dans ce cas, le lien entre les fuites de différents gaz n'est pas actuellement bien maîtrisé.

7.6. Conclusion

La technique de conception actuelle de systèmes étanches est principalement basée sur le concept de Tp et les constantes "Gb", "a" et "Gs" qui en découlent. Ce concept privilégie la prise en compte de l'effet de la contrainte sur celui de la pression interne. La présence de l'exposant 0,5 suppose que l'écoulement au sein de tous les joints est de nature laminaire. Cette simplification s'avérait suffisante lorsque les technologies utilisées pour la conception de joints d'étanchéité, notamment les matériaux utilisés, étaient simples.

Avec le perfectionnement de ces technologies, de nouveaux types de joints plus performants mais aussi se comportant très différemment ont vu le jour. La formulation de Tp ne semble donc plus toujours adapté aux joints qu'il tente de caractériser.

Un modification de la formulation du Tp a donc été proposée. L'idée de cette modification est liée aux résultats obtenus lors de la présente étude. Elle se propose d'adapter le coefficient Tp aux différents types d'écoulement qui peuvent se créer au niveau de joints. Ainsi, l'impact de la structure interne des joints sur leur étanchéité semble pouvoir être pris en compte de manière plus satisfaisante. Les influences de la pression interne et du type de gaz sur leur niveau de fuite seront donc mieux modélisées.

Les modifications proposées nécessiteront une plus grande attention au niveau de la caractérisation de joints en laboratoire. L'étape de conception de systèmes étanches ne sera que peu modifiée. L'utilisation de moyens informatiques simples semble possible pour permettre une automatisation des différents calculs à effectuer.

La présente étude se proposait d'apporter des améliorations au niveau du lien entre caractérisation de joints en laboratoire et utilisation de systèmes étanches sur site industriel. Les résultats de ce chapitre s'inscrivent pleinement dans cette optique A partir des résultats d'une étude portant sur un phénomène physique concret, des propositions ont été formulées afin de rendre la conception de systèmes étanches plus précise. Ces propositions reposent sur une utilisation plus approfondie des données fournies par les essais en laboratoire. Même si ces propositions restent à valider, les premiers résultats obtenus semblent montrer que la conception de systèmes étanches pourrait bénéficier de leur application.

CHAPITRE 8
CONCLUSION ET NOUVELLES VOIES DE RECHERCHE

La conception plus juste de systèmes étanches permet la réalisation d'économies importantes, la satisfaction des normes de sécurité en vigueur et l'augmentation de la fiabilité des installations industrielles concernées. Elle se heurte cependant à d'importantes difficultés. Ces dernières sont surtout liées à la complexité des phénomènes impliqués. La maîtrise de l'étanchéité ne peut être atteinte que si le comportement des matériaux d'une part et les écoulements de fluides, d'autre part, sont pris en compte.

L'objectif de toute conception de système étanche est d'en déterminer les conditions de montage, comme, par exemple, la contrainte à appliquer sur un joint d'étanchéité. Ces conditions doivent permettre un fonctionnement satisfaisant du produit considéré. Sa fuite devra, par exemple, rester inférieure à une limite fixée. La conception sera menée en prenant en compte le comportement des différentes composantes du système, notamment celui des joints utilisés. Elle sera guidée par des codes de calcul qui fournissent les méthodes permettant l'intégration de l'ensemble des caractéristiques de ces composantes pour la satisfaction des contraintes fixées par l'utilisateur.

L'objectif du présent travail était de participer à l'amélioration des méthodes de conception de systèmes étanches et plus particulièrement de brides munies de joints. Pour ce faire, l'intérêt à tout d'abord été porté sur la compréhension des écoulements au sein de joints d'étanchéité et, plus précisément, sur la corrélation entre les fuites de différents gaz. L'approche adoptée comportait la mise en oeuvre d'un modèle théorique très simplifié et la validation expérimentale des calculs issus de ce modèle.

Les joints d'étanchéité ont donc été assimilés à un ensemble de capillaires rectilignes de diamètre constants. De ce modèle découle trois modes de calcul permettant de déterminer les fuites d'un gaz quelconque à partir de celles mesurées d'un gaz de référence. Ces trois modes de calculs, laminaire, intermédiaire et moléculaire sont associés à la nature de l'écoulement au sein du joint.

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus montrent la validité du modèle adopté et des calculs proposés. Connaissant la fuite d'un joint avec un gaz donné et la nature de l'écoulement en son sein, il est possible de prévoir avec précision le niveau de fuite qui sera obtenu avec n'importe quel autre gaz. Cette précision est obtenue en choisissant le mode de calcul associé à la nature de l'écoulement au sein du joint.

La méthode proposée présente un moyen de déterminer la nature de l'écoulement au sein de joints d'étanchéité. Le quantificateur de l'écoulement adopté, noté "s", est simple à calculer. Ce calcul doit cependant être mené avec certaines précautions, notamment au niveau du choix des mesures utilisées, pour que les informations données par l'indicateur soient utilisables.

La technique de corrélation entre les fuites de différents gaz proposée ici possède une limitation. Cette limitation est associée au phénomène de perméation. La perméation est un type d'écoulement qui semble jouer un rôle important pour certains types de joints. Lorsque cela est le cas, la méthode proposée ne permet pas d'estimer avec précision l'influence du type de gaz sur le niveau de fuite.

Les principaux enjeux de l'étude menée semblent donc satisfaits. La compréhension des phénomènes associés aux écoulements au sein de joints et au lien entre les fuites de différents gaz a été améliorée. Des techniques de calcul ont été proposées et validées par la confrontation de leurs résultats à des mesures expérimentales.

Les modes de calcul proposés permettent une prise en compte plus correcte du lien entre les fuites de différents gaz. La précision des calculs effectuée est nettement améliorée. Cependant, l'étude menée n'a pas seulement apporté des informations nouvelles sur la corrélation entre les fuites de différents gaz. Elle a aussi permis la clarification de certains points liés à l'étanchéité.

Le travail mené montre notamment que l'écoulement au sein de joints d'étanchéité peut être considéré comme la somme de quatre écoulements fondamentaux : laminaire, intermédiaire, moléculaire et de perméation. Compte tenu du type de joint considéré et des conditions qui lui sont appliquées, un de ces écoulement sera prédominant. Parmi ces quatre écoulements fondamentaux, seule la présence de la perméation reste encore à confirmer. De sérieux indices semblent, néanmoins, démontrer son existence.

Il a, de plus, été montré que la nature de l'écoulement au sein d'un joint est indépendante du type de gaz considéré. En fait, le passage d'un gaz à un autre n'engendrera que de légères modifications de l'écoulement. Par exemple la composante laminaire d'un écoulement sera augmentée lorsque l'on passe de l'hélium au méthane Cependant, ces modifications ne seront pas suffisantes pour entraîner un changement radical du type d'écoulement. Si l'écoulement est de nature moléculaire avec un gaz, il semble qu'il le sera avec tout autre gaz.

Toujours au sujet des écoulements en présence au sein de joints d'étanchéite, l'importance prépondérante de l'écrasement des joints semble mise en évidence. La nature de l'écoulement au travers de joints sera conditionnée par la structure interne du joint et par son écrasement. Les cycles de compression et de décompression appliqués sur un joint ne sont pas influents au niveau de la nature des écoulements en présence. Seul l'écrasement résultant du joint considéré conditionnera la manière dont le gaz s'écoulera.

Enfin, l'écoulement de nature moléculaire ne semble plus pouvoir seulement être associé à de petits niveaux de fuites. Il est possible que des niveaux de fuites importants, de l'ordre du milligramme par seconde, soient issus d'un écoulement de nature moléculaire. Cette remarque est importante puisqu'elle justifie notamment la nécessité d'utiliser différents modes de calculer pour lier les fuites de différents gaz. Si les fuites associées à un écoulement moléculaire étaient toujours faibles, il ne serait pas forcement nécessaire que les calculs effectués possède une grande précision.

Les différentes informations issues de cette étude portant sur les phénomènes physiques associés aux écoulements gazeux au sein de joints ont ensuite été mises en pratique. Elles ont été utilisées afin de proposer des modifications à la procédure de conceptions de brides d'étanchéité munies de joints.

Afin de justifier les modifications proposées, la procédure actuelle a été brièvement évaluée. Certaines de ses limites ont été mises en évidence. Les changements proposés se proposent de mieux prendre en compte la nature de l'écoulement. Les calculs effectués permettraient ainsi de représenter plus justement l'influence de la pression interne sur l'étanchéité de joints. L'impact de ces modifications sur la validité des calculs a été estimée afin d'en montrer l'intérêt.

Compte tenu de ces modifications, les procédures actuelles de caractérisation de joints et de conception de systèmes étanches ont été complétées. Ces nouvelles procédures permettent d'atteindre l'objectif général de la présente étude, soit une conception plus juste de systèmes étanches. Le lien entre les résultats d'essais en laboratoires et leur utilisation lors de la conception de systèmes étanches pourrait être amélioré par les modifications proposées. Les calculs de conception seraient rendus plus précis et plus représentatifs de la réalité. La satisfaction des critères d'étanchéité associés au fonctionnement de ces produits serait donc plus aisée.

Les modifications proposées au niveau des procédures de caractérisation de joints et de conception de systèmes étanches nécessitent cependant d'être plus amplement validées. Cette validation fait partie des voies de recherche possibles à l'issue du présent travail.

La validation des procédures proposées passe tout d'abord par la vérification de la faisabilité des calculs qu'elles contiennent. Il s'agira de montrer que les résultats de l'essai ROTT actuel permettent bien de modéliser le comportement du joint et de l'écoulement en son sein. Un des points importants de ce travail sera de valider l'approche basée sur le quantificateur de l'écoulement "s". Il sera, de plus, nécessaire de considérer la modélisation du comportement mécanique des joints afin que le calcul de leur écrasement pour tout niveau de contrainte soit possible.

La présente étude permet de mieux cerner les écoulements au sein de joints. Sur ce sujet, d'autres recherches semblent pouvoir s'inscrire dans la continuité des résultats obtenus. L'écoulement par perméation de gaz au travers de joints nécessite d'être étudié avec plus de précision. Ce phénomène ainsi que ses mécanismes devront être clairement mis en évidence. Cela permettrait notamment de compléter le lien entre les fuites de différents gaz. Les performances des nouveaux types de joint qui arrivent actuellement sur le marché s'avèrent bien meilleure. Il est fort probable que l'importance de la perméation au sein de ces nouveaux produits soit plus grande. La nécessité de mieux comprendre ce phénomène et ses implications s'avère donc tout à fait justifiée.

Toujours au niveau des écoulements, certains points de l'étude semblent devoir être confirmés. C'est notamment le cas de l'importance de l'écrasement d'un joint sur la nature de l'écoulement. Une méthode qui pourrait être employée à cet effet a déjà été proposée lors de l'analyse de l'influence du desserrage sur la nature de l'écoulement.

D'autres domaines liés à l'étanchéité pourraient profiter de certains des résultats du travail mené. L'utilisation d'un modèle de joint très simplifié semble donner de bons résultats. Cela est notamment le cas lorsque le comportement d'un joint soumis à certaines conditions veut être déduit des résultats obtenus lors d'un essai en laboratoire. Un modèle de joint similaire pourrait donc, par exemple être employé pour étudier l'influence de la géométrie d'un joint sur son étanchéité. La largeur du joint, ses diamètres intérieur et extérieur, ainsi que son épaisseur sont autant de paramètres à considérer lors de la conception de systèmes étanches. Leur influence n'est pas toujours totalement maîtrisée. Il serait intéressant de tenter de lier le diamètre et la longueur des capillaires associés au modèle de joint aux dimensions du joint considéré. Le modèle permettrait alors certainement d'obtenir une meilleure estimation de l'influence des dimensions d'un joint sur son étanchéité.

Enfin un modèle de joint similaire pourrait probablement être employé pour quantifier avec plus de précision l'influence du fluage du joint sur l'évolution du niveau de fuites. L'ébauche d'un tel travail a été entreprise lors de la présente étude (annexe 10). Il pourrait s'avérer intéressant de considérer l'utilisation d'un modèle de joint simplifié pour estimer de l'impact du fluage d'un joint sur son niveau de fuite.

BIBLIOGRAPHIE

1. BAZERGUI, A. et LOUIS, G. (1987). Predicting leakage for various gases in gasketed joints. *Proceeding 1987 Spring Conference Experimental Mechanics*, Houston, Texas.
2. MARCHAND, L. et DERENNE, M. (1996) Fugitive emission characteristics of gaskets. *PVRC Project N° 92-25*.
3. MASSART,T.et VIGNAUD J.C. (1993). Mesure et calcul du débit de fuite d'un joint en eau et vapeur d'eau. *Troisième colloque international de l'étanchéité*, CETIM Nantes, France, 521 - 532.
4. CHEN, J.; KUO, J. et MISKELL, C. (1996). A link between gasket tightness and fugitive emission leak definition. *The 6th Annual Fluid Sealing Association Technical Symposium*, Houston, 130-144.
5. Environmental Protection Agency. (1995). Protocol for equipment leak emission estimates.*EPA/453/R-95/017*.
6. PAYNE, J.R. (1994). Standard test method for bolted joint design. *ASTM Draft 9*.
7. ROTH, A. (1976). *Vacuum Technology*. North-Holland Publishing Company.
8. MASSEY, B.S. (1979). *Mechanics of fluids*. Van Nostrand Reinhold Compagny, 4th Edition.
9. BARRER, R. (1941). *Diffusion in and through solids*. The Cambridge Series of Physical Chemistry.
10. BATISTA, P.P. (1994). *Etude analytique et expérimentale de la fuite à travers un joint d'étanchéité*. Mémoire de Maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada.

11. The American Society of Mechanical Engineers. (1981). *Pipe flanges and flanged fittings*. American National Standard, ANSI B16.5.

12. Chemical Rubber Company. (1996-1997). *CRC Handbook of chemistry and physics*. Chemical Rubber Pub. Co.

13. REID, R.; PRAUSNITZ, J. et POLING, B. (1987). *The properties of gases and liquids*. Mc Graw-Hill, 4th Edition.

14. TALLON, J. *Le contrôle d'étanchéité*. ALCATEL CIT.

15. CHOI, J.; OVERCASH, M. et LIM, K. (1992). Capillary-flow mechanism for fugitive emissions of volatile organics from valves and flanges. *Environmental Science & Technology*, Vol. 26, 478-484

16. HEADLEY, L.C.; PIERCE, C. Experiments on gas flow in porous media at low pressures. *U.S. Bureau of Mines*, Report of investigation N°7583.

17. HOUPEURT, A. (1959) *Sur l'écoulement des gaz dans les milieux poreux*. Société des éditions technip.

18. TTRL, Ecole Polytechnique de Montréal. (1997). *The PVRC gasket performance characterization technology for bolted flanged connections*.

19. BAZERGUI, A. ; MARCHAND, L. *PVRC Milestone gasket tests - First results*. Welding Research Council Bulletin N°292.

20. PAYNE, J.R. ; BAZERGUI, A. et LEON,G.F. (1988). Getting new gasket design constants from gasket tightness data. *Experimental Techniques*. 22-27.

21. HSU, K.H. ; PAYNE, J.R. et WINTER, J.R. (1994). PVRC bolted flanged connection research program and 5-Year plan. *Proc. ASME/PVP Conference*, Minneapolis. PVP-Vol.274. Advanced computer applications. 53-62.

22. PAYNE, J.R. ; SCHNEIDER, R.W. Comparison of proposed ASME rules for bolted flanged joints. *Proc. of 8th International Conference on Pressure Vessel Technology*. ASME Vol 1. 147-167.

ANNEXES

ANNEXE 1

PRISE EN COMPTE DE L'ELOIGNEMENT DU COMPORTEMENT DES GAZ DE LA LOI DES GAZ PARFAITS

Les résultats présentés par cette annexe se proposent de montrer comment l'éloignement du comportement de gaz de la loi des gaz parfaits peut être pris en compte.

Cette influence au niveau de la formulation des débits massiques sera, tout d'abord, considérée. Des coefficients de correction permettant la prise en compte du comportement réel des gaz seront formulés.

L'impact de l'éloignement des gaz de la loi des gaz parfaits au niveau des mesures de fuites sera, ensuite estimé. Ici aussi, des coefficients de correction permettant le lien entre le gaz considéré comme idéal et son comportement réel seront calculés.

1. Correction du point de la formulation des débits

Les équations exprimant la valeur des débits massiques de différents types d'écoulement, telles que données au chapitre 3, utilisent la loi des gaz parfaits $PV = nRT$. Dans ce qui suit l'influence sur les calculs de débits de l'utilisation de la loi prenant en compte l'éloignement des gaz parfaits $PV = nZRT$ va être étudiée.

1.1. Expressions corrigées des débits massiques laminaire et moléculaire

Les équations (3.2) et (3.12) permettent d'écrire le débit massique tenant compte de la déviation de la loi des gaz parfaits pour un écoulement laminaire :

$$Q_m = -\frac{\pi D^4}{128}\frac{\rho^*}{\eta}\frac{Z^*}{P^*}\frac{P}{Z(P)}\frac{dP}{dL} \qquad \text{(A1.1)}$$

Dans le cas de l'écoulement moléculaire, l'équation (3.10), obtenue à partir de la loi des gaz parfaits, permet de retrouver l'expression différentielle du flux gazeux :

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} = -\frac{D^3}{6}\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}\frac{dP}{dL} \qquad \text{(A1.2)}$$

En utilisant maintenant l'équation (3.12) prenant compte de l'éloignement de la loi des gaz parfaits, le débit massique corrigé s'écrit :

$$Q_m = -\frac{D^3}{6}\frac{1}{Z(P)}\sqrt{\frac{2\pi M}{RT}}\frac{dP}{dL} \qquad \text{(A1.3)}$$

1.2. Expression de rapports entre débits massiques corrigés et initiaux

Pour l'écoulement laminaire, le rapport C_l entre le débit Q_{mr} (A1.1) calculé en prenant compte du comportement réel du gaz et le débit Q_m (3.5) du gaz considéré parfait s'écrit, après intégration :

$$C_l = \frac{Q_{mr}}{Q_m} = -\frac{2Z^*}{P_1^2 - P_2^2} \int_{P_1}^{P_2} \frac{P}{Z(P)}\, dP \qquad \text{(A1.4)}$$

Pour l'écoulement de type moléculaire, le rapport de correction C_m, entre les équations (A1.3) et (3.10), s'écrit, après intégration sur le domaine des pressions:

$$C_m = \frac{Q_{mr}}{Q_m} = -\frac{1}{P_1 - P_2} \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{Z(P)} \qquad \text{(A1.5)}$$

Enfin, le débit massique de l'écoulement intermédiaire étant la somme des débits laminaire et moléculaire, il est difficile d'exprimer le rapport C_i de manière indépendante des propriétés du gaz et des caractéristiques du joint.

Cependant, le rapport C_i entre écoulement intermédiaire réel Q_{mir} et écoulement intermédiaire calculé à l'aide de la loi des gaz parfaits Q_{mi}, vérifie la relation suivante :

$$C_i = \frac{Q_{mir}}{Q_{mi}} = C_l \frac{Q_{ml}}{Q_{ml} + Q_{mm}} + C_m \frac{Q_{mm}}{Q_{ml} + Q_{mm}} \qquad \text{(A1.6)}$$

Q_{ml}, Q_{mm} : débits massiques des composantes laminaire et moléculaire de l'écoulement.

Comme la proportion, au sein de l'écoulement intermédiaire, des deux composantes laminaire et moléculaire est inconnue, cette relation ne peut être simplifiée. Elle permet néanmoins de connaître la limite supérieure du rapport C_i :

$$C_i \leq \text{Max}\,(C_l, C_m) \qquad \text{(A1.7)}$$

Dans le reste du développement, le rapport C_i sera donc pris égal au plus grand des deux rapports C_l et C_m. Cette approche permettra de connaître l'influence maximale, sur le calcul des débits massiques, de l'éloignement des gaz de la loi des gaz parfaits.

1.3. Intégration des rapports entre débits réels et idéaux

Les expressions de C_l et C_m contiennent des intégrales de la fonction Z(P). Le coefficient de compressibilité Z d'un gaz peut être déterminé à partir de l'équation de Van der Waals [13] :

$$Z^3 - B^*Z^2 + A^*Z - A^*B^* = 0 \qquad \text{(A1.8)}$$

$$\text{avec } A^* = \frac{aP}{R^2T^2} \text{ et } B^* = \frac{bP}{RT},$$

a, b : constantes de Van der Waals du gaz considéré.

La résolution analytique de cette équation, suivie de l'utilisation des résultats dans les formules intégrales présentées précédemment s'avère complexe.

Ce que se propose de réaliser la présente étude est de calculer la valeur de Z pour différentes pressions P_1 et P_2. Ainsi pour l'intervalle de pression choisi il sera possible d'approcher la fonction Z(P) par une forme plus simple et, par la suite, de procéder aux intégrations nécessaires. Cette procédure devra cependant être réalisée pour chaque gaz étudié.

Pour les gaz et les niveaux de pression pris en compte dans cette étude, la fonction Z(P) peut être représentée, avec suffisamment de précision par une fonction polynomiale du type : $Z(P) = \alpha P^2 + \beta P + \gamma$.

Les coefficients α, β et γ dépendent du gaz considéré. Il est à noter que $\gamma=1$ si la pression absolue est utilisée dans l'équation. En fait, pour l'hélium, le méthane et l'argon, une expression linéaire aurait été tout aussi satisfaisante. Cependant, afin d'homogénéiser les expressions, la formulation du second degrés à été choisie. L'intégration des expressions de C_l et C_m est donc, maintenant possible. Ces rapports s'expriment en fonction du différentiel de pression et des coefficients α et β :

$$C_l = \delta\left[\frac{-\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1}\ln\left(\frac{P_2-\lambda_1}{P_1-\lambda_1}\right)+\frac{\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}\ln\left(\frac{P_2-\lambda_2}{P_1-\lambda_2}\right)\right] \text{ avec } \delta = \frac{-2\left(\alpha P^{*2}+\beta P^{*}+\gamma\right)}{\alpha\left(P_1^2-P_2^2\right)}$$

(A1.9)

$$C_m = \delta'\left[\frac{-1}{\lambda_2-\lambda_1}\ln\left(\frac{P_2-\lambda_1}{P_1-\lambda_1}\right)+\frac{1}{\lambda_2-\lambda_1}\ln\left(\frac{P_2-\lambda_2}{P_1-\lambda_2}\right)\right] \text{ avec } \delta' = \frac{-1}{\alpha\left(P_1-P_2\right)}$$

$\lambda 1$ et $\lambda 2$ sont les racines de l'équation : $Z(P)=\alpha P^2+\beta P+\gamma=0$.

Dans le cas de l'argon, l'équation du second degrés décrivant Z(P), obtenue par la méthode des moindres carrés, ne possède pas de racines. L'intégration des coefficients C_l et C_m conduit alors à des expression bien plus complexes (intégrales d'Euler).

Pour des raisons de simplicité, la fonction de Z(P) de l'argon à donc ete approchée par une fonction linéaire : $Z(P)=\beta P+\gamma$. Dans ce cas les coefficients Cl et Cm prennent la forme suivante:

$$C_l = \delta\left[\left(P_2-P_1\right)-\frac{\gamma}{\beta}\ln\left(\frac{\beta P_2+\gamma}{\beta P_1+\gamma}\right)\right] \qquad \text{avec } \delta = \frac{-2\left(\beta P^{*}+\gamma\right)}{\beta\left(P_1^2-P_2^2\right)}$$

(A1.10)

$$C_m = \delta'\ln\left(\frac{\beta P_2+\gamma}{\beta P_1+\gamma}\right) \qquad \text{avec } \delta' = \frac{-1}{\beta\left(P_1-P_2\right)}$$

1.4. Evaluation des rapports C_l, C_m et C_i

L'évolution des rapports C_l, C_m et C_i va être calculée pour les différents gaz utilisés lors de cette étude. Lors du calculs des coefficients, la pression relative P_2 sera prise constante et égale à 0 MPa. La pression relative P_1 évoluera entre 0 MPa et 5,516 MPa (800 psi) pour l'Hélium, le méthane et l'argon ou entre 0 MPa et 1,862 MPa (270 psi) pour le SF6. De plus la pression absolue de référence est prise égale à 0,1 MPa.

L'évolution des différents coefficients Z en fonction de la pression relative est présentée dans le tableau A1.1 et illustrée par la figure A1.1. Les calculs ont été effectués à partir de la relation (A1.8) en utilisant des pressions absolues.

Compte tenu de sa faible valeur de pression saturante (pression relative de 2,2 MPa soit 320 psig), le SF6 connaît la plus grande déviation de la loi des gaz parfaits. Les coefficients α, β et γ, pour chaque gaz, sont présentés sur la figure précédente. Ils permettent maintenant de calculer les rapports entre débits massiques réels et débits massiques calculés à l'aide de la loi des gaz parfaits.

Pression relative			Pression relative				
MPa	Psig	Z-SF6	MPa	Psig	Z-He	Z-Ch4	Z-Ar
0.0000	0	0.9902	0.0000	0	1.0010	0.9979	0.9991
0.0138	2	0.9889	0.0138	2	1.0011	0.9976	0.9989
0.0276	4	0.9875	0.0276	4	1.0012	0.9973	0.9988
0.1379	20	0.9765	0.7584	110	1.0080	0.9818	0.9918
0.3447	50	0.9554	1.3790	200	1.0137	0.9686	0.9859
0.7584	110	0.9103	2.0684	300	1.0200	0.9538	0.9795
1.0342	150	0.8778	2.7579	400	1.0264	0.9389	0.9732
1.3790	200	0.8335	4.1369	600	1.0392	0.9092	0.9609
1.8616	270	0.7614	5.5158	800	1.0520	0.8798	0.9493

Tableau A1.1 : Valeurs du coefficient de compressibilité Z de différents gaz T=293,15 K (20 °C)

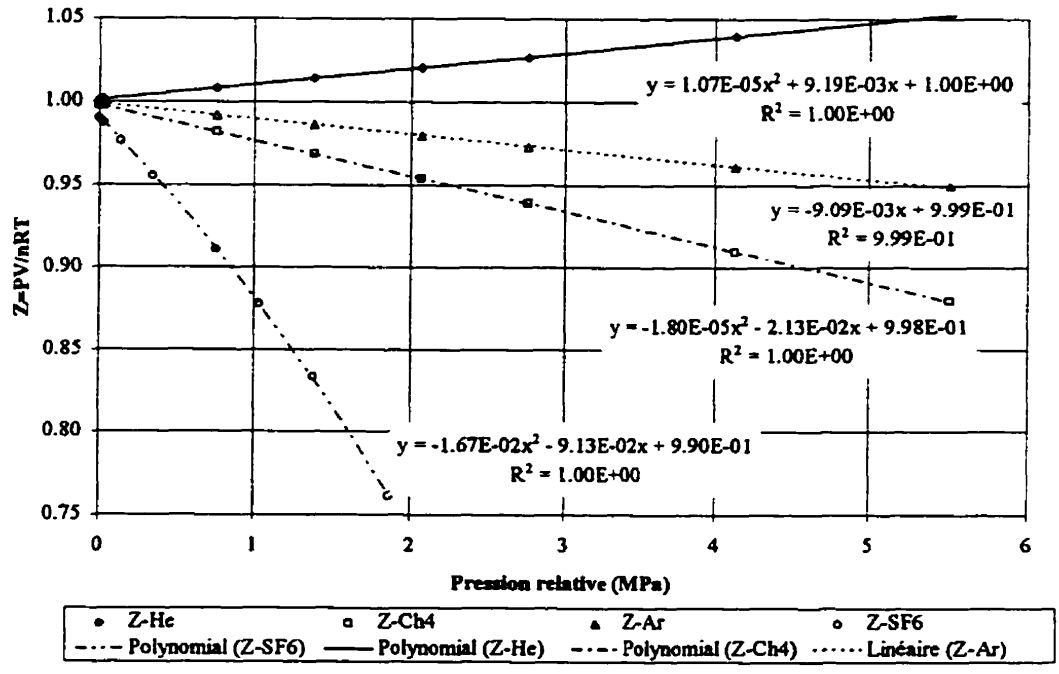


Figure A1.1 : Coefficient de compressibilité Z de différents gaz -T=293,15 K (20 °C)

Ce calcul montre que pour tous les gaz et niveaux de pression, les rapports C_l et C_m sont très proches. Afin de simplifier l'approche, tous les rapports seront considérés identiques et pris, à une pression donnée, égaux au maximum des deux valeurs données par Cl et Cm. Ce rapport, exprimant, pour tous les types d'écoulements, la déviation du calcul des débits due à l'application de la loi des gaz parfaits sera noté C. L'évolution du rapport C, en fonction de la pression relative, pour chacun des gaz considéré est présentée par la figure A1.2 :

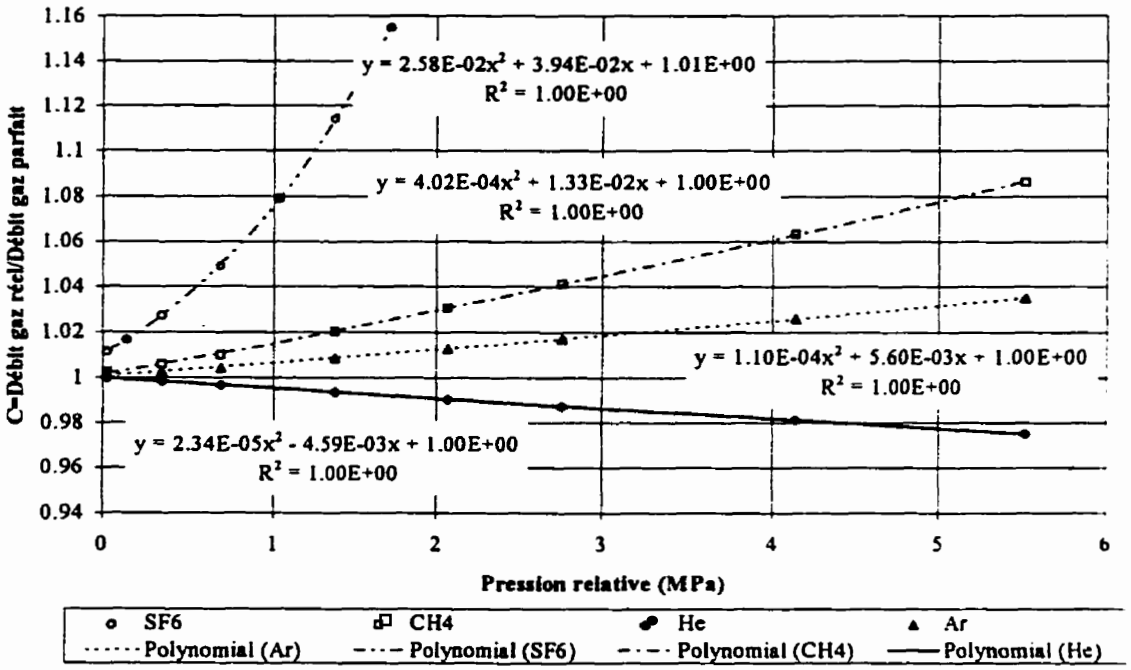


Figure A1.2 : Evolution du rapport de correction C entre débits massiques pour un gaz réel et débits massiques calculés en considérant le gaz parfait

Pour chacun des gaz considéré ici, il est donc possible d'exprimer le rapport de correction C par des polynômes du second degré en fonction de la pression. Les expressions de ces polynômes sont données sur la figure précédente. Ainsi, à une pression donnée, il est possible d'estimer le rapport entre la valeur réelle du débit et celle calculée en considérant le gaz parfait.

2. Correction du point de vue de la mesure de fuites

Lors de la mesure de fuite par une technique basée sur la mesure de pression, l'éloignement du comportement du gaz de la loi des gaz parfaits peut entraîner des erreurs importantes. Afin d'évaluer cette erreur, il est nécessaire de revenir à la méthode de mesure de fuite.

Lorsque la fuite est mesurée par remontée de pression, le circuit de mesure de volume V contient, initialement, un nombre de moles de gaz égal, d'après la loi des gaz parfaits, à :

$$n_i = \frac{P_i V}{RT} \qquad \text{(A1.11)}$$

En considérant température et volume constants, le nombre de moles de gaz présents à la fin de la mesure sera donné par :

$$n_f = \frac{P_f V}{RT} \qquad \text{(A1.12)}$$

Le nombre de moles correspondant au débit massique mesuré, obtenu en considérant le gaz comme idéal, est donc égal à :

$$\Delta n_{\text{idéal}} = n_f - n_i = \frac{V}{RT}\left(P_f - P_i\right) \qquad \text{(A1.13)}$$

Si la loi des gaz parfaits est remplacée, dans ces calculs, par la loi prenant en compte le facteur de compressibilité des gaz $PV = nZRT$, le nombre de moles associées au débit massique mesuré devient :

$$\Delta n_{\text{réel}} = n_f - n_i = \frac{V}{RT}\left(\frac{P_f}{Z(P_f)} - \frac{P_i}{Z(Pi)}\right) \qquad \text{(A1.14)}$$

Le rapport entre les débits massiques réel et idéal s'exprime donc comme suit :

$$\frac{Q_{mr}}{Q_{mi}} = \frac{\Delta n_{réel}}{\Delta n_{idéal}} = \frac{\frac{P_f}{Z(P_f)} - \frac{P_i}{Z(P_i)}}{P_f - P_i} \qquad (A1.15)$$

Dans le cadre des mesures effectuées lors de cette étude, la pression absolue initiale dans le circuit de fuite, P_1, est la pression atmosphérique (1,1013 MPa), la pression absolue maximale atteinte lors d'une mesure est de 0,1289 MPa (4 psig) ce qui correspond à la limite de mesure du capteur. Le rapport de correction peut donc être calculé pour chaque gaz, à l'aide des valeurs du coefficient Z, données, pour des pressions relatives, dans le tableau A1.1. Les valeurs du rapport entre débit du gaz réel Q_{mr} et le débit massique du gaz considéré idéal Q_{mi} sont récapitulés dans le tableau suivant :

Gaz	**Z initial (Pression absolue 0,1013 MPa)**	**Z final (Pression absolue 0,1289 MPa)**	**Rapport de correction** $\frac{Q_{mr}}{Q_{mi}}$
He	1,0010	1,0012	0,998
Ar	0,9991	0,9988	1,002
SF6	0,9902	0,9875	1,022
CH4	0,9979	0,9973	1,005

Tableau A1.2 : Coefficients de correction à appliquer aux mesures de fuites

Le débit massique mesuré du gaz réel peut donc être obtenu en multipliant le débit massique mesuré du gaz considéré parfait par les facteurs de correction donnés par le tableau précédent.

Ces facteurs ont été établis en faisant deux approximations. La première est que toutes les mesures de fuites sont effectuées en laissant la pression du circuit de mesure augmenter de 0,0276 MPa, ce qui n'a, en fait, pas toujours été le cas. La seconde est que le circuit de mesure ne contient qu'un seul type de gaz, ce qui n'est pas totalement vrai. Il est, en effet, probable qu'une fraction de chaque gaz testé reste emprisonnée dans le montage expérimental.

Cependant, les coefficients qui viennent d'être caiculés donnent une idée suffisamment précise de l'influence, sur la mesure de fuites de l'éloignement du comportement des gaz de la loi des gaz parfaits.

ANNEXE 2
LE MONTAGE EXPERIMENTAL

Cette annexe contient deux schémas.

Le premier (figure A2.1), présente la bride utilisée. Les plaques entre lesquelles le joint est comprimé, les joints toriques permettant de réaliser l'enceinte étanche, ainsi que les capteurs de déplacements y sont représentés.

Le second présente (figure A2.2) le montage expérimental dans son ensemble. Les circuits de mise en pression, d'une part, et de mesure de fuites, d'autre part, y sont indiqués.

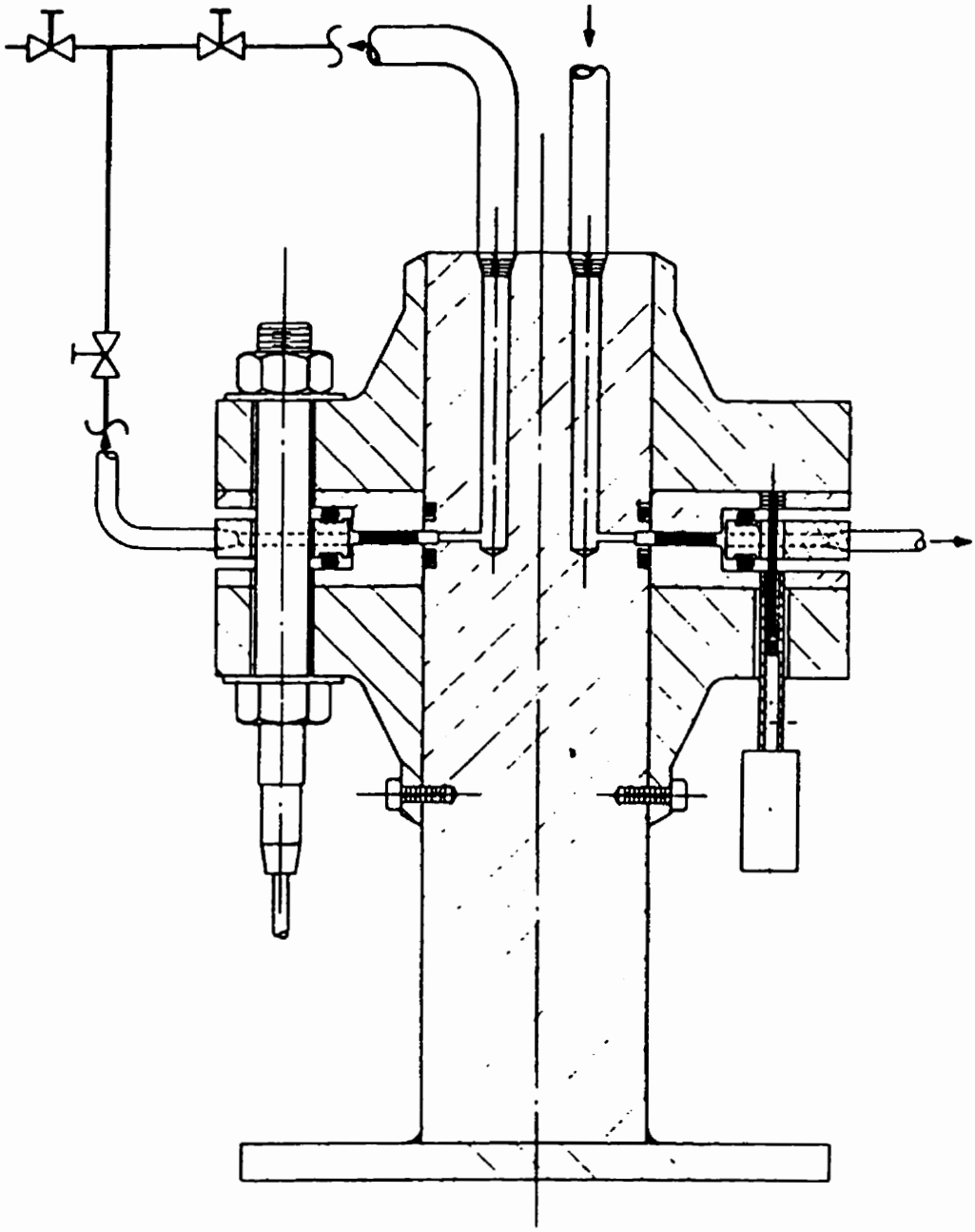


Figure A2.1 : Bride employée

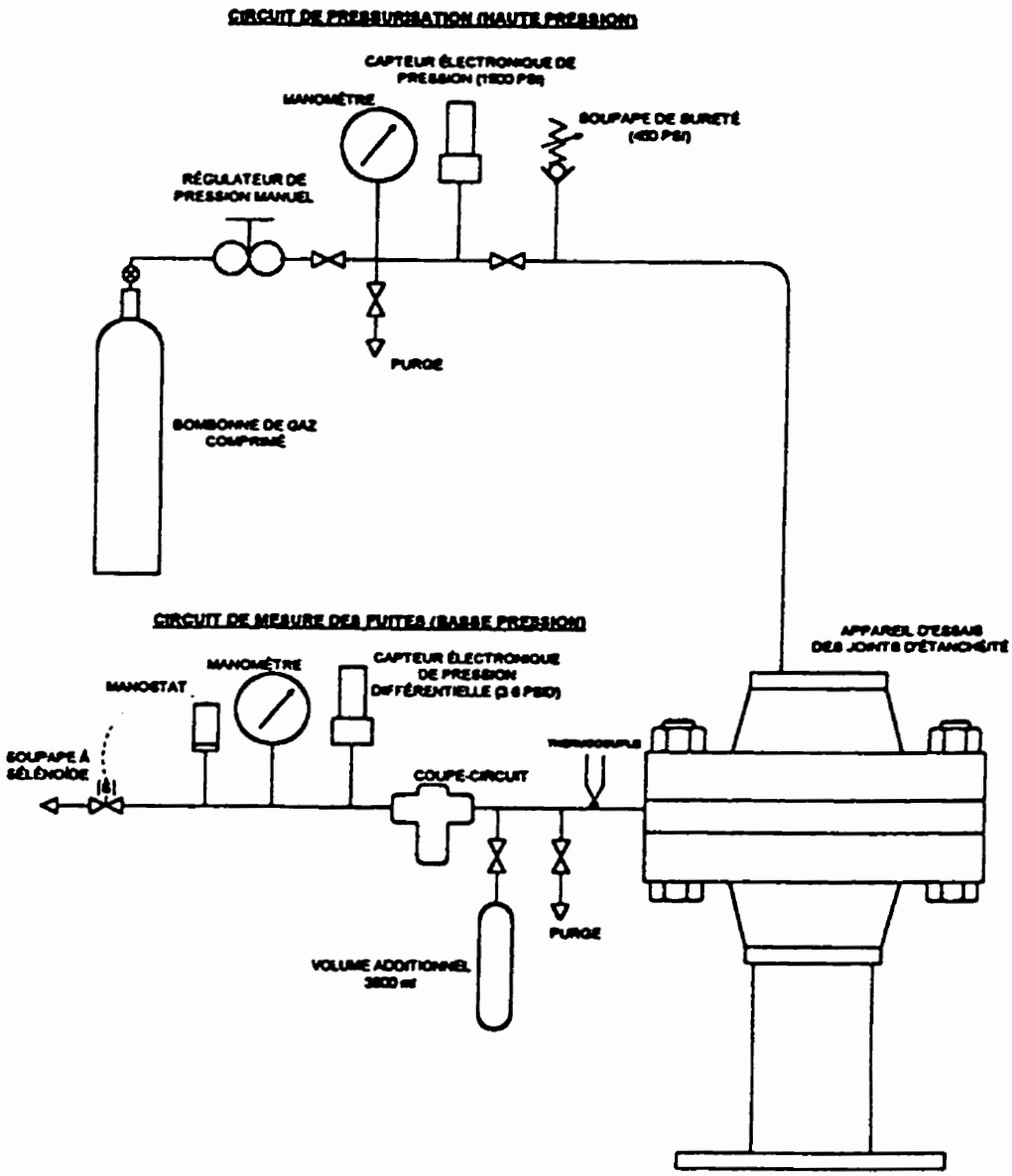


Figure A2.2 : Montage expérimental utilisé

ANNEXE 3
DESCRIPTION DES ESSAIS

Cette annexe se propose de présenter deux types d'informations liées au déroulement de la phase expérimentale de l'étude.

Tout d'abord, des informations complémentaires concernant le déroulement des essais réalisées seront fournies. Dans ce but, le tableau A3.1 détaillera le protocole d'essai employé. Le numéro de l'essai, le type de joint, les contraintes et pressions utilisées, seront ainsi récapitulés.

Le tableau A3.2 présentera, ensuite, les dimensions des joints telles qu'elles ont été mesurées avant chaque essai. Les valeurs qui apparaîtront dans ce tableau sont les moyennes de quatre mesures effectuées. Il est à noter que les joints des essais 2 et 3 ont été découpés au même moment.

Essai	Gaz	Type de joint	
		Amiante A9	Graphite G2
		Contraintes (MPa):7-28-42-55-69	Contraintes (MPa):7-42-55-62-83
		Pressions (psi)	Pressions (psi)
Essai 1	He	50-100-200-250-300-400-600-800 (50-150-200-250-350-600-800 pour le dernier niveau de contrainte 100-200-300-400 pour le premier)	50-100-200-250-300-400-600-800
	Ar	100-200-300-400-600-800 (150-250-350-600-800 pour le dernier niveau de contrainte 100-200-300-400 pour le premier)	100-200-300-400-600-800
	SF6	50-100-150-200-250 (150-200-250 pour le dernier niveau de contrainte)	50-100-150-200-250
Essai 2	He	50-100-200-250-300-400-600-800 (100-200-300-400 pour le premier niveau de contrainte)	50-100-200-250-300-400-600-800
	SF6	50-100-150-200-250	50-100-150-200-250
	CH4	100-200-300-400-600-800 (100-200-300-400 pour le premier niveau de contrainte)	100-200-300-400-600-800
Essai 3	He	100-200-300-400-600-800 (100-200-300-400 pour le premier niveau de contrainte)	100-200-300-400-600-800
	Ar	100-200-300-400-600-800	100-200-300-400-600-800
	CH4	100-200-300-400-600-800 (100-200-300-400 pour le premier niveau de contrainte)	100-200-300-400-600-800

Tableau A3.1 : Protocole d'essai

Joint type amiante A9	**Essai 1**	**Essai 2**	**Essai 3**
Diamètre extérieur (mm)	150,52	149,35	149,53
Diamètre intérieur (mm)	124,59	124,29	124,43
Epaisseur (mm)	1,61	1,61	1,6

Joint type graphite G2	**Essai 1**	**Essai 2**	**Essai 3**
Diamètre extérieur (mm)	149,8	149,74	149,75
Diamètre intérieur (mm)	124,97	124,38	124,85
Epaisseur (mm)	1,59	1,57	1,57

Tableau A3.2 : Métrologie des joints avant essais

ANNEXE 4
VALIDATION DES RESULTATS

Lors de cette annexe, la validité des résultats expérimentaux obtenus sera discutée. Trois étapes seront successivement menées.

La première se propose de commenter les enregistrements des essais réalisés. Ces enregistrements permettent notamment de visualiser la manière dont les fuites mesurées se stabilisent. Ces enregistrements sont présentés par l'annexe 5.

La seconde étape réalisée à pour but de comparer les résultats obtenus lors des différents essais. En effet, les mesures des fuites d'un type de joint associé à chaque gaz ont toutes été répétées au moins deux fois. Il s'agit alors de considérer les écarts éventuels entre ces différentes mesures. Ces résultats sont illustrés par les figures de l'annexe 6.

Enfin, la troisième étape comparera les mesures effectuées lors de la présente étude à celles obtenues lors de l'analyse menée par la référence [2]. Cette référence présente des résultats d'essais qui mettait en jeux des types de joint et de gaz identiques mais avec un protocole d'essai différent. Ces comparaisons sont illustrés par les figures de l'annexe 7.

1. Présentation des mesures

L'ensemble des données qui entrent en jeu lors de l'expérimentation ont été enregistrées. Ces enregistrements vont maintenant être utilisés pour une première évaluation de la validité des mesures effectuées.

Ces enregistrements sont présentés par les figures de l'annexe 5. Ces figures correspondent aux mesures effectuées, pour un niveau de contrainte nominale sur le joint, avec, successivement, trois des gaz concernés. Elles permettent de visualiser l'évolution des fuites mesurées, de la contrainte sur le joint, de la température et de la pression interne. Elle mettent en évidence trois séries de mesures de fuites, exprimées en cm^3/s, chacune correspondant à un gaz différent.

Elles illustrent, de plus, les temps d'attentes respectés entre chaque mesure, d'une part, et pour chaque changement de gaz, d'autre part. Les temps d'attente entre chaque mesure de fuite sont destinés à permettre à l'écoulement de s'établir en fonction de la nouvelle pression mise dans la bride. Ceux entre les mesures pour différents gaz permettent, comme cela a été mentionné, d'évacuer le gaz précédent emprisonné dans la bride et le joint.

Certaines des courbes présentées par cette annexe portent la mention " essai arrêté pendant 12 heures". Cela signifie que pendant un intervalle de temps proche de 12 heures, la bride a été mise en pression avec le gaz dont les fuites allaient ensuite être mesurées, toujours dans le but d'éliminer les traces du gaz précédent. Ces interruptions étaient rendues nécessaires notamment par l'extrême longueur des essais lorsque de hauts niveaux de contrainte étaient atteints.

Le premier point intéressant à noter concerne les évolutions , au cours de chaque essai, de la température et de la contrainte. Même si l'échelle de représentation n'est pas, dans le cas des mesures de température, très précise, il est possible de constater que les variations relevées, au cours de chaque mesure de fuite, ne sont pas importantes. Ceci permet de penser que, compte tenu de l'inertie thermique de la bride, l'influence de la température sur les mesures réalisées sera limitée. De plus, les fluctuations de températures auraient une influence sur la stabilisation des fuites. Si les fuites mesurées sont stables c'est donc que ces fluctuations sont négligeables.

L'évolution de la contrainte sur le joint ne semble pas, elle non plus, de nature à influencer de manière négative les résultats des essais. En effet, lorsque la pression interne du gaz augmente, la contrainte sur le joint, à cause de l'effet de fond, diminue. Cette diminution n'est, cependant généralement que peu importante et reste semblable lors des mesures effectuées avec différents gaz. L'influence limitée de l'effet de fond est due à la conception du montage expérimental qui possède un poteau central qui diminue le volume intérieur de la bride. De plus, lorsque le gaz est, à la fin des mesures de fuites, purgé du montage expérimental, la contrainte sur le joint revient quasiment à son niveau initial. Ces remarques permettent de penser que la structure interne des joints testés ne sera pas modifiée lors des essais. Cela sera ultérieurement vérifié de manière plus précise (annexe 10).

Le second aspect important des informations contenues dans les figures de l'annexe 5 concerne plus spécifiquement les mesures de fuites et, surtout, leur stabilité. Sur ce point essentiel de la méthode expérimentale, quelques remarques semblent nécessaires afin de justifier la validité des résultats obtenus.

Certaines figures font apparaître des mesures de fuite très courtes, notamment pour les serrages de 7 et 28 MPa. Ceci s'explique par l'importance des fuites. La limite du capteur de pression installé au niveau du circuit de mesure est donc rapidement atteinte. Afin de contrebalancer ces temps de mesures courts deux opérations ont été menées. Tout d'abord, un temps d'attente plus long à été respecté avant ces mesures afin que l'écoulement puisse se stabiliser avant le début de l'enregistrement. Ensuite, certaines de ces mesures ont été effectuées deux fois successivement afin d'en comparer les valeurs. Ces deux étapes simples permettent de s'assurer que des mesures, mêmes courtes, donnent des valeurs de fuites proches de la réalité. Enfin, il faut noter qu'il a été choisi de ne pas changer le volume du circuit de mesure, à l'aide du réservoir additionnel, au cours des mesures effectuées pour un serrage du joint. Ceci afin d'éviter toute modification de la précision des mesures qu'un tel changement pourrait entraîner. Ainsi, toutes les mesures effectuées lorsque la contrainte sur le joint est de 7 MPa l'ont été avec le gros volume tandis que pour tous les autres niveaux de serrage, le petit volume a été employé. Ce choix explique pourquoi les mesures effectuées à 28 MPa de contrainte et pour des hautes pression ont souvent été courtes.

Lorsque les niveaux de serrage deviennent plus importants, soit supérieur à 60 MPa, il est visible que la durée de certaines mesures est nettement plus importante et que leur stabilisation moins nette. Ainsi lorsque les fuites sont comprises entre 10^{-4} et 10^{-3} cm^3/s, les temps d'attente pour obtenir une stabilisation jugée suffisante pouvait atteindre plusieurs heures. Dans certains cas, la mesure n'a pas été possible, même après un long temps d'attente. L'exemple de la mesure de la fuite du SF6 pour 0,344 MPa de pression interne présenté par la figure A5.14 est représentatif de ce cas extrême. Ce cas semble illustrer l'atteinte de la limite de résolution du montage expérimental

Dans certains cas, les mesures peuvent n'apparaître que partiellement stables. Ce phénomène peut être soit associé à une mauvaise régulation de la pression interne, comme sur la figure A5.20, mais aussi à certains problèmes rencontrés lors de l'enregistrement des données. En effet, il est arrivé que, lors d'une mesure de fuite, certaines valeurs n'aient pas été enregistrées. Cela donne l'impression d'une mauvaise stabilisation de la fuite.

Néanmoins, de manière générale, l'observation de l'ensemble des figures de l'annexe 5 permet de conclure à la bonne stabilité des mesures effectuées. Celles dont la régularité n'a pas été jugée suffisante ne seront pas prises en compte lors des calculs subséquents, comme cela pourra être constaté lors de la présentation des résultats.

2. Répétabilité des résultats

Maintenant que la stabilité des mesures ainsi que le comportement des paramètres déterminant les conditions d'essai ont été présentés, il devient intéressant d'étudier la manière dont ont évolué les résultats obtenus au cours des différents essais réalisés. Comme pour chaque type de joint, trois essais ont été menés il est possible de recouper les résultats afin d'en analyser la répétabilité.

Le terme de répétabilité n'est pas, ici, employé de manière rigoureuse. En effet, les mesures qui vont être comparées ont été effectuées sur des joints différents. Ainsi, il serait plus juste, afin de prendre en compte les écarts potentiels pouvant exister entre deux joints d'un même type, d'utiliser le terme d'interchangeabilité. Cependant, l'objectif des comparaisons qui vont être menées reste le même. Il s'agit d'évaluer la pertinence des résultats au travers des différentes mesures effectuées sur des joints de même type soumis à des conditions d'essai identiques. Ces comparaisons vont être menées à deux niveaux.

Tout d'abord, l'évolution des fuites mesurées pour chaque joint testé et pour chacun des gaz utilisé vont être comparées. Ensuite ce sont les rapports entre les fuites de chaque gaz et celles d'hélium, obtenues dans des conditions d'essai identiques, qui le seront.

L'ensemble des figures qui seront utilisées pour mener à bien ces comparaisons sont présentées dans l'annexe 6. Les premières figures de cette annexe (figures A6.1 à A6.8) présentent l'évolution de la fuite, exprimée en mg/s, en fonction de la pression interne du gaz considéré. Différents niveaux de contrainte sont présentés sur chaque figure.

Le premier constat issu de ces figures est que l'écart qui peut être observé entre différents essais s'accroît avec le niveau de contrainte sur le joint. L'explication de ce phénomène est liée au mode de serrage manuel adopté lors de l'expérimentation. Les petites variations pouvant exister entre les serrages des différents joints s'inscrivent dans l'historique de ce dernier. L'accumulation de ces petits écarts est la cause de l'augmentation de l'intervalle entre fuites mesurées pour différents joints.

Il est, de plus, remarquable que, dans le cas du joint A9 (figures A6.1 à A6.4), les mesures de l'essai 1 s'éloignent de celles des essais 2 et 3 et ce quel que soit le gaz testé. Or lors de la phase expérimentale, les joints correspondant aux essais 2 et 3 ont été découpés simultanément alors que le joint de l'essai 1 l'a été indépendamment des deux autres. Il peut en résulter des variations dans le comportement du joint notamment à cause d'écarts dans les dimensions des joints. C'est d'ailleurs ce qui peut être vérifié au niveau de la métrologie des joints présentée en annexe 3.

Il est visible que les mesures associées aux essais menés sur le joint G2 (figures A6.5 à A6.8) sont plus rapprochées que dans le cas du joint amiante. Ce type de joint semble s'avérer moins sensible aux écarts pouvant apparaître au niveau des différents serrages. Seules les deux mesures effectuées avec le méthane, toujours dans le cas du joint G2, semblent, comporter des différences réelles. En effet, dans ce cas, présenté par la figure A6.7 de l'annexe 6, les mesures de l'essai 2 semblent, pour les faibles niveaux de pression, comporter des inexactitudes. Alors que toutes les autres courbes présentées possèdent une bonne linéarité, ces dernières mettent en évidence une inflexion associée à d'importants écarts pour des pressions inférieures à 2 MPa. Ces écarts restent difficiles à expliquer car ils constituent un phénomène seulement présent pour certains serrages de l'essai 2 est seulement pour les mesures méthane. L'observation des figures présentant le déroulement de cet essai (figures A5.15 à A5.19 de l'annexe 5) montrent, de plus, que ces mesures sont stables et que les niveaux de pression interne sont corrects. L'utilisation subséquente des résultats de l'essai 2, pour le joint de type G2, lors de la mesure au méthane sera donc menée avec précautions.

La conclusion de l'analyse de ces figures destinées à présenter la répétabilité, ou interchangeabilité, des résultats est, cependant, très encourageante. En effet, malgré les multiples facteurs extérieurs associés à la procédure expérimentale, les résultats se recoupent de manière satisfaisante. L'écart maximal entre les mesures associées à différents essais ne dépasse jamais un facteur de deux, ce qui est un écart acceptable dans le domaine de la mesure de fuite où les valeurs prises en compte sont faibles. Seule une série de mesures, celle associée à l'essai 2 du joint G2 pour le méthane, ne semble pas être représentative.

L'étude de la répétabilité des résultats va maintenant se porter sur les valeurs des rapports entre les fuites de deux gaz. Ces rapports ainsi que leur validité, sont, en fait, plus importants pour l'étude menée ici que les valeurs des fuites prises en tant que telles.

L'évolution de ces rapports au cours des essais est présentée par les figures A6.9 à A6.14 de l'annexe 6. Les rapports sont calculés avec les mesures de fuites d'hélium comme référence. Les courbes présentent ces rapports en fonction de la contrainte sur le joint et pour différents niveaux de pression du gaz. Les pressions choisies pour présenter l'évolution de ces rapports sont de 0,689 MPa (100psi), 1,379 MPa (200 psi), 2,758 MPa (400 psi) et 5,516 MPa (800 psi) pour l'argon et le méthane et de 0,689 MPa (100psi) et 1,379 MPa (200 psi) pour l'hexafluorure de soufre. Evidemment les résultats des deux essais réalisés avec chaque gaz sont présentés sur une même figure. Enfin, il semble important de rappeler que les rapports ont été calculés en prenant en compte les fuites de chaque gaz et celles d'hélium obtenues pour des mesures sur le même joint et dans des conditions d'essai identiques.

Les rapports obtenus lors des différents essais menés sur les joints de type A9 (figures A6.9 à A6.11) sont tous très proches les uns des autres. Cela est vérifié pour tous les niveaux de contrainte et de pression interne considérés. Ainsi les écarts qui avaient pu être observés lors de l'analyse des mesures de fuites pour différents essais ne semblent pas avoir d'effets sur les rapports entre les fuites de différents gaz obtenus.

Si les essais sur les joints de type G2 sont étudiés (figures A6.12 à A6.14), les conclusions sont quelque peu différentes.

Les rapports obtenus entre les fuites du méthane et celles de l'hélium (figure A6.13), présentent une dispersion plus importante dans le cas de l'essai 2 par rapport à ceux de l'essai 3. Ce résultat est à associer à ce qui a été dit au sujet de ce même essai 2, pour le méthane, lors de l'analyse de la répétabilité des mesures de fuites.

Les essais menés, toujours sur les joints de type G2, avec l'argon et le SF6 (figures A6.12 et A6.14) conduisent à d'autres constatations. En effet, dans ces deux cas, les rapports obtenus sont semblables d'un essai à l'autre tant que la contrainte nominale sur le joint est inférieure à 45 MPa Les rapports s'écartent les uns des autres lorsque la contrainte devient supérieure. Lors de l'analyse des mesures de fuites associées à ces essais, il n'a pas été remarqué d'irrégularités pouvant être la cause de ces divergences. Une des hypothèse qui peut alors être formulée est que l'écart observé lorsque la contrainte sur le joint augmente ne soit pas lié à la technique expérimentale, puisque les rapports obtenus pour de faibles niveaux de contraintes sont semblables d'un essai à l'autre, mais plutôt associé au comportement du joint et à la nature de l'écoulement gazeux qui le traverse.

Néanmoins il est à noter que, même si pour les essais menés sur les joints G2, des écarts sont observés au niveau des valeurs des rapports calculés, l'évolution des courbes tracées reste identique. En effet, les rapports entre les fuites de chaque gaz et celles de l'hélium restent quasiment constants pour des contraintes inférieures à 45 MPa et croissent ensuite avec la contrainte.

Compte tenu de l'ensemble des résultats présentés par les figures de l'annexe 6 liées à l'évolution des rapports entre fuites de différents gaz lors de différents essais, il est possible de conclure à la bonne répétabilité, ou interchangeabilité, de la technique expérimentale. Les essais menés sur les joints A9 sont plus probants que ceux menés sur les joints G2. Les écarts notés au niveau des joints G2 semblent trouver leur origine, soit au niveau de la mesure de fuite dans le cas des rapports entre le méthane et l'hélium, soit plutôt au niveau du comportement du joint pour les rapports impliquant l'argon et le SF6.

3. Comparaison avec des résultats précédents

Les résultats obtenus lors de l'étude présentée par la référence [2] vont maintenant être comparés avec ceux issus de l'expérimentation de la présente étude. Le travail mis en oeuvre par les auteurs de la référence [2] a déjà été présenté lors du chapitre 2 du présent document. La technique expérimentale alors adoptée, très différente de celle employée ici, ainsi que les principales conclusions de cette étude ont donc déjà été abordées. La comparaison qui va maintenant être menée est rendue possible par le choix similaire des types de joints et de certains des gaz étudiés.

Comme lors de l'étude de la répétabilité des mesures, deux aspects vont être étudiés. Le premier sera la comparaison des fuites mesurées lors des deux études. Le second aspect s'attardera sur la comparaison des rapports entre les fuites de différents gaz. Les trois gaz communs aux deux travaux, à savoir, l'hélium, le méthane et l'hexafluorure de soufre seront utilisés pour cette comparaison. Les résultats obtenus avec l'argon seront, même si ils ne seront pas utilisés à fin de comparaison, tout de même présentés. Enfin, dans le but d'alléger la présentation de ces comparaisons, seuls certains des essais réalisés seront maintenant pris en compte. Cela peut être fait sans nuire à la validité des conclusions puisque l'étude de la répétabilité des résultats à montré une bonne corrélation entre les mesures effectuées lors des différents essais. Ainsi, pour les deux types de joints, les mesures hélium, argon et méthane prises en compte seront celles issues de l'essai 3 tandis que celles de l'hexafluorure de soufre seront celles de l'essai 2. Il convient de se reporter au tableau A3.1 de l'annexe 3 pour disposer d'une description détaillées de ces essais.

Les figures de l'annexe 7 présentent donc la comparaison des résultats obtenus avec ceux de la référence [2] pour les fuites mesurées d'une part et les rapports entre fuites de différents gaz, d'autre part.

Les figures A7.1 à A7.8 de l'annexe 7 mettent en évidence l'évolution des fuites mesurées pour différents gaz en fonction de la contrainte nominale sur un joint donné et pour une pression interne précise. Trois pressions internes seront prises en compte pour cette comparaison : 0,689 MPa (100 psi), 2,758 MPa (400 psi) et 5,516 MPa (800 psi). Des courbes similaires, associées à une pression interne de 1,379 MPa (200 psi) seront, de plus, présentées. Celles-ci ne comprennent que les résultats de la présente étude puisque ce niveau de pression n'a pas été pris en compte par les auteurs de la référence. De même sur les figures de comparaison sont présentées les courbes associées à l'argon, même si ce gaz ne peut participer aux comparaisons menées. Ces résultats sont néanmoins montrés afin de compléter l'information.

Avant de débuter la discussion des résultats présentés par les figures de l'annexe 7, il semble utile de noter que lors de l'étude de référence la pression nominale à laquelle étaient soumis les gaz n'était pas de 0,689 MPa (100 psi) mais de 0,758 MPa (110 psi). Cependant l'observation des valeurs réellement appliquées lors des deux études montre que leur différence est faible. De plus, un écart, même de 0,0689 MPa (10 psi), au niveau de la pression interne n'aurait qu'une faible incidence sur les niveaux de fuite mesurés. Ceci permet de justifier la comparaison menée entre les résultats des deux études pour la pression nominale de 0,689 MPa.

Les résultats de ces comparaisons s'avèrent très différents selon le type de joint considéré. En ce qui concerne les comparaisons menées au niveau des joints de type A9 (figures A7.1 à A7.4), trois remarques peuvent être menées. La première concerne les mesures de fuites d'hélium. Un agrément acceptable est obtenu entre les fuites mesurées lors de la présente étude et celles mesurées lors de l'étude de référence. Cela est surtout vérifié dans le cas des mesures obtenues pour une pression interne de 0,689 MPa (100 psi).

La seconde remarque concerne la comparaison entre les fuites mesurées pour le SF6 pour une pression interne nominale de 0,689 MPa (100 psi). Dans ce cas, présenté par la figure A7.1, la correspondance entre les mesures des deux études reste bonne tant que la contrainte est inférieure à 45 MPa. Pour des contraintes supérieures, les deux courbes divergent fortement. Lors de la précédente étude, et contrairement a celle menée ici, le phénomène de "Tightnest Hardening" a été observé. Cela signifie qu'une augmentation de la contrainte sur le joint n'entraîne que de faibles variations de son étanchéité. Comme ce phénomène n'a pas été observé par les mesures effectuées ici, il ne sera pas plus en avant détaillé.

La dernière des remarques qui peut être faite concerne les mesures de fuites méthane. Dans ce cas, lors des deux niveaux de comparaison fournis par les mesures à 2,578 MPa (400 psi) et 5,516 MPa (800 psi) de pression interne, les valeurs obtenues présentent de très importantes différences d'une étude à l'autre.

Au niveau des essais menés sur les joints de type G2, les constatations s'avèrent très différentes. En effet, dans ce cas, les comparaisons pouvant être menées au niveau des trois gaz hélium, méthane et hexafluorure de soufre donnent, quelque soit le niveau de pression considéré, de très bons résultats. Seule celles concernant l'hexafluorure de soufre peuvent être considérées comme moins bonnes. Il faut rappeler que, dans le cas de l'hexafluorure de soufre, en plus des différences entre les procédures d'essai, les deux études se différencient par la technique de mesure de fuite alors adoptée. Lors de l'étude de la référence [2], les fuites d'hexafluorure de soufre étaient mesurées par chute de pression puis corrigées à l'aide de coefficients prenant en compte l'éloignement de la loi des gaz parfaits. Lors de la présente étude ces mêmes fuites sont mesurées par remontée de pression sans qu'aucune correction ne soit appliquée.

Cette différence dans les techniques de mesure de fuites, présente seulement dans le cas de l'hexafluorure de soufre, est une cause supplémentaire d'écarts potentiels entre les résultats comparés. Cependant l'agrément entre les deux études reste, dans ce cas précis, tout de même acceptable.

La conclusion qui peut être tirée à l'issue de cette comparaison entre les mesures de fuites effectuées lors de la présente étude et celles issues de la référence [2] est que les écarts observés sont vraisemblablement dus à une différence entre les comportements des joints en amiante considérés. Puisque les valeurs mesurées, ici, sur les joints en graphite donnent globalement des résultats proches de ceux de la précédente étude, les techniques expérimentales semblent validées. Le fait que les écarts observés le soient principalement au niveau des mesures sur les joints de type amiante pourrait indiquer que ces variations soient causées par des différences de comportement entre les joints en amiante testés.

De plus, toujours au niveau des joints amiante, le fait que les écarts observés entre les mesures des deux études soient différents d'un gaz à l'autre peut s'expliquer par la procédure adoptée lors des essais menées au cours des travaux présentés par la référence [2]. Dans ce cas, il a été vu que les fuites de chaque gaz étaient mesurées sur des joints différents. C'est certainement là que se trouve la cause de la disparité, avec le type de gaz testé, des écarts entre fuites mesurées lors des deux études.

La comparaison, qui vient d'être présentée, entre les fuites mesurées lors de deux études différentes permet donc de valider, globalement, les résultats du présent travail. Le point qui va maintenant être abordé concerne la comparaison des rapports entre fuites de différents gaz obtenus lors de ces deux mêmes études.

Cette dernière comparaison est mise en évidence par les figures A7.9 à A7.16 de l'annexe 7. Les rapports entre fuites de différents gaz et les fuites hélium y sont présentés en fonction de la contrainte nominale sur le joint et pour différents niveaux de pression interne. Comme précédemment, les rapports entre fuites argon et hélium, ainsi que les rapports associés à une pression interne de 1,379 MPa (200 psi) sont présentés même s'ils ne participeront pas aux comparaisons.

Comme cela pouvait être prévu suite à la comparaison entre les fuites mesurées, les écarts relevés, entre les deux études, au niveau de rapports de fuites sont bien plus importants dans le cas des essais sur joint amiante que dans celui des essais concernant les joints graphite. Dans ce dernier cas, la corrélation entre les évolutions des rapports considérés est bonne. Les explications des écarts éventuellement notés au niveau des essais basés sur les joints en amiante sont identiques à celles données pour expliquer les écarts au niveau des mesures de fuites : une différence de comportement des joints amiantes pris en compte et, au niveau des rapports impliquant l'hexafluorure de soufre, une différence additionnelle entre les techniques de mesure de fuites.

Un dernier point semble important à noter. Il concerne, non plus la comparaison des valeurs des rapports calculés lors de chaque étude mais plutôt l'allure des courbes obtenues. En effet, deux grandes tendances se retrouvent au sein des deux études.

Au niveau des essais sur les joints en amiante, les rapports entre les gaz cibles et l'hélium tendent à décroître lorsque la contrainte nominale sur le joint augmente. Cette tendance est vérifiée pour les niveaux de contrainte communs aux deux études. Pour les contraintes supérieures atteintes lors de l'étude de la référence [2], les rapports ont tendance à augmenter. De plus cette remarque doit être, dans le cas du rapport SF6, pondérée puisque le "Tightness Hardening" observé lors de l'étude de référence entraîne une augmentation, avec la contrainte, du rapport entre ces fuites et celles d'hélium.

Par contre la tendance qui se dessine, lors des deux travaux, au niveau des essais sur les joints en graphite tend à montrer une augmentation, avec la contrainte, des rapports entre les fuites des gaz cibles et celles d'hélium.

Cette différence de comportement fondamentale entre les deux types de joints sera approfondie ultérieurement. Il est cependant intéressant de remarquer que même si les valeurs des rapports entre fuites ne sont pas toujours, au niveau des deux études prises en compte, semblables, les grandes tendances mises en évidences sont bien identiques.

La comparaison des résultats de la présente étude avec ceux des travaux des auteurs de la référence [2] était la dernière des trois étapes destinées à valider les résultats obtenus. Ce recoupement de résultats issus d'expérimentations différentes à mis en évidence certaines disparités mais aussi de nombreuses similitudes. Les disparités observées semblent pouvoir s'expliquer, dans leur grande majorité, de manière indépendante des techniques expérimentales employées. L'objectif de validation des résultats par comparaison avec des résultats de référence semble donc tout à fait atteint.

4. Conclusion sur la validité des résultats de la présente étude

Compte tenu du nombre de paramètres susceptibles d'influencer les résultats d'une étude expérimentale telle que celle menée ici, une tentative de validation des résultats obtenus semblait nécessaire. Celle-ci à été menée en trois étapes.

La première étape a permis de constater que, de manière générale, l'ensemble des essais effectués ont conduit à l'obtention de mesures de fuites stables. De plus, lorsque, notamment pour de faibles valeurs de fuites, les mesures n'apparaissaient pas totalement stabilisées après plusieurs heures d'enregistrement, les valeurs correspondantes n'ont pas été retenues pour le reste de l'étude.

Enfin l'analyse des enregistrements des essais à démontré la bonne conservation, au cours d'un essai, de la contrainte nominale appliquée sur le joint et ce malgré les cycles de compression et de décompression causés par les mises en pression successives.

La seconde étape à montré la bonne répétabilité, ou interchangeabilité, des mesures de fuites et des rapports entre les fuites de différents gaz obtenus. Seul le second essai, basé sur un joint graphite, lors des mesures de fuites du méthane à donné des résultats ne paraissant pas tout à fait satisfaisants.

Enfin, la troisième étape, par une comparaison entre les résultats obtenus ici et ceux extraits d'une précédente étude, a permis de s'assurer que les valeurs des fuites et des rapports obtenus étaient réalistes. La principale cause des écarts observés semble pouvoir être associée aux différences entre les joints de type amiante pris en compte. Cependant, les tendances observées, lors des deux études, notamment au niveau de l'évolution des rapports avec la contrainte sur le joint, sont semblables.

L'étude de la validité des résultats qui vient d'être menée donne donc des résultats globalement très positifs. Même si certaines anomalies ont été relevées, celles-ci restent acceptables et même normales dans le cadre d'une étude expérimentale.

ANNEXE 5

PRESENTATION DES MESURES EXPERIMENTALES

Cette annexe présente les enregistrements de l'ensemble des essais réalisés. Ces enregistrements seront utilisés pour étudier la validité des résultats expérimentaux obtenus.

Les figures présentées par cette annexe permettent, de plus, de visualiser le protocole d'essai. Les évolutions de l'ensemble des paramètres influents tels que la pression interne et la contrainte appliquée y sont illustrés.

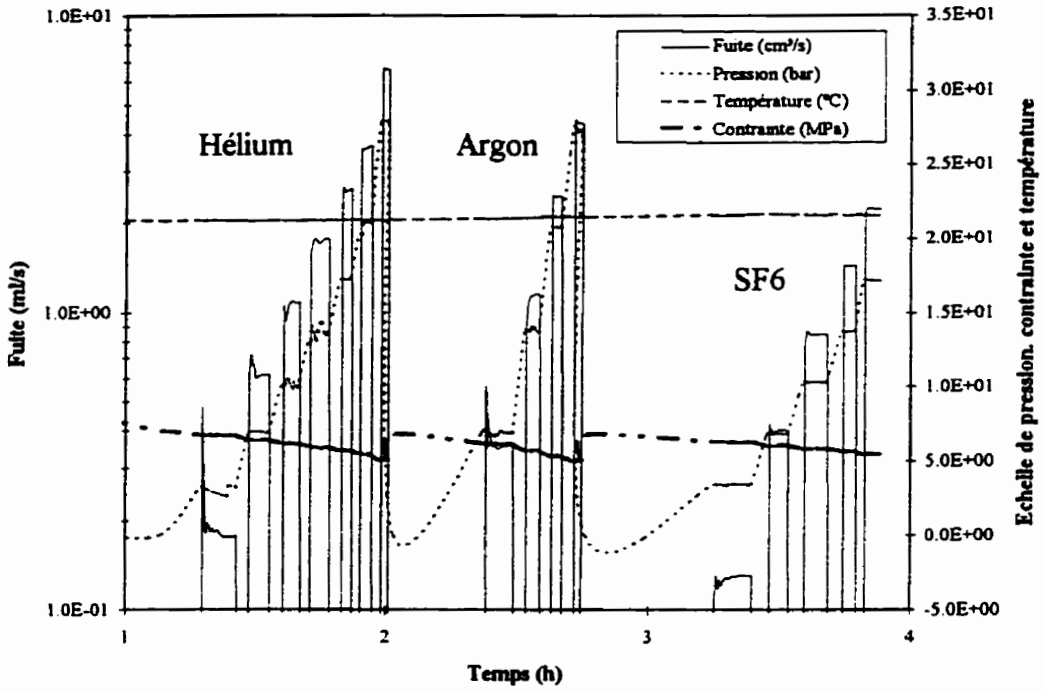


Figure A5.1 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type A9 - Essai 1
Contrainte nominale 7 MPa (1000 psi)

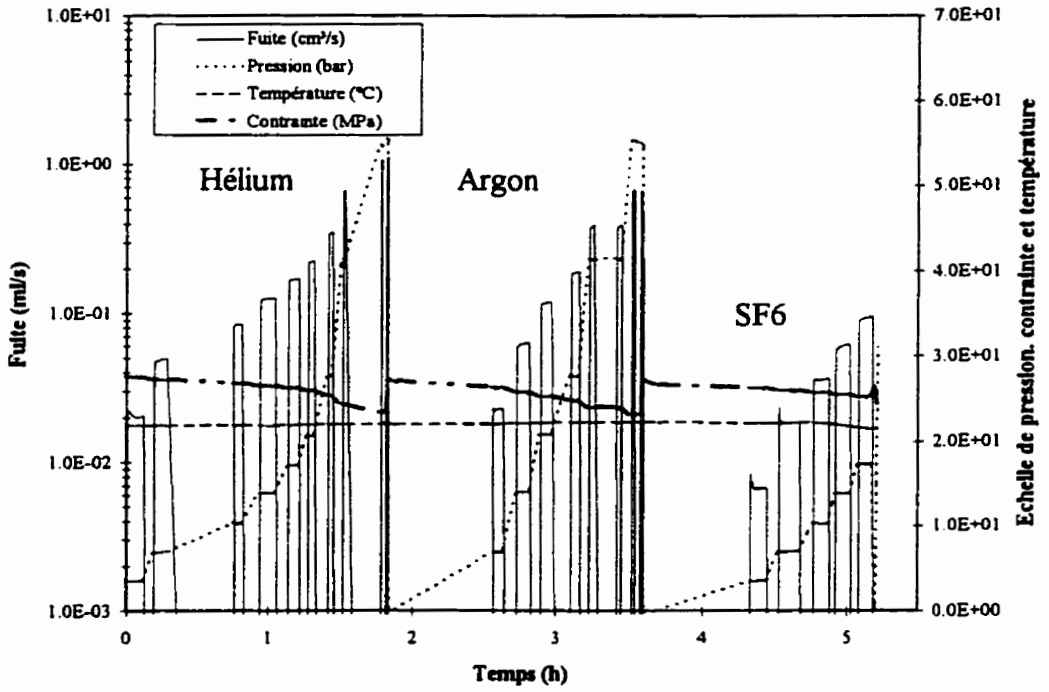


Figure A5.2 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type A9 - Essai 1
Contrainte nominale 28 MPa (4000 psi)

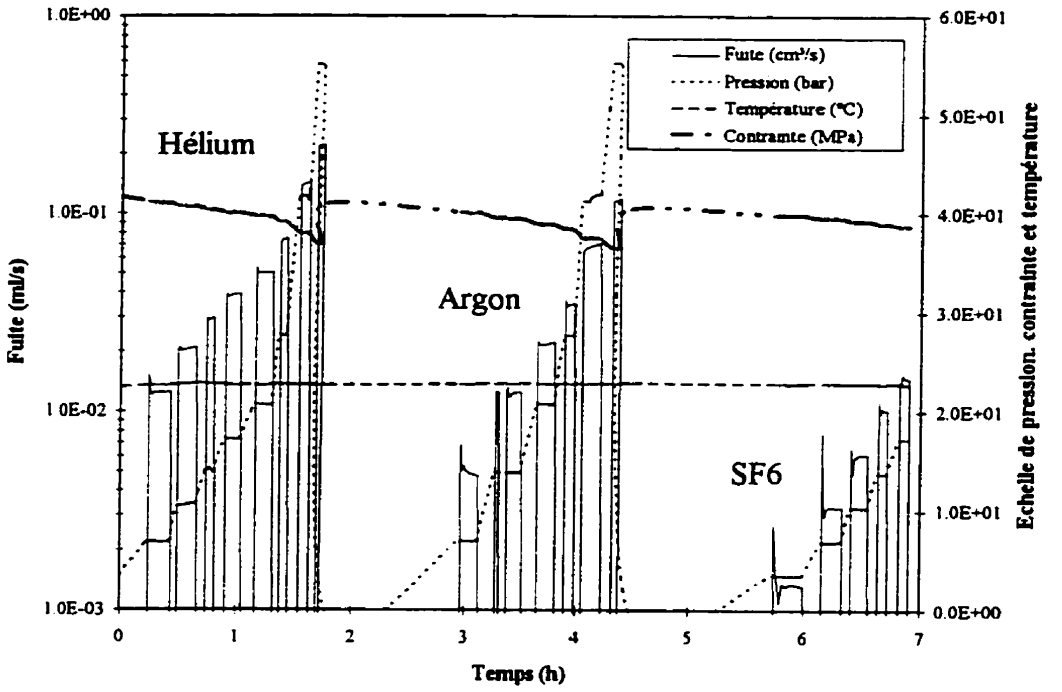
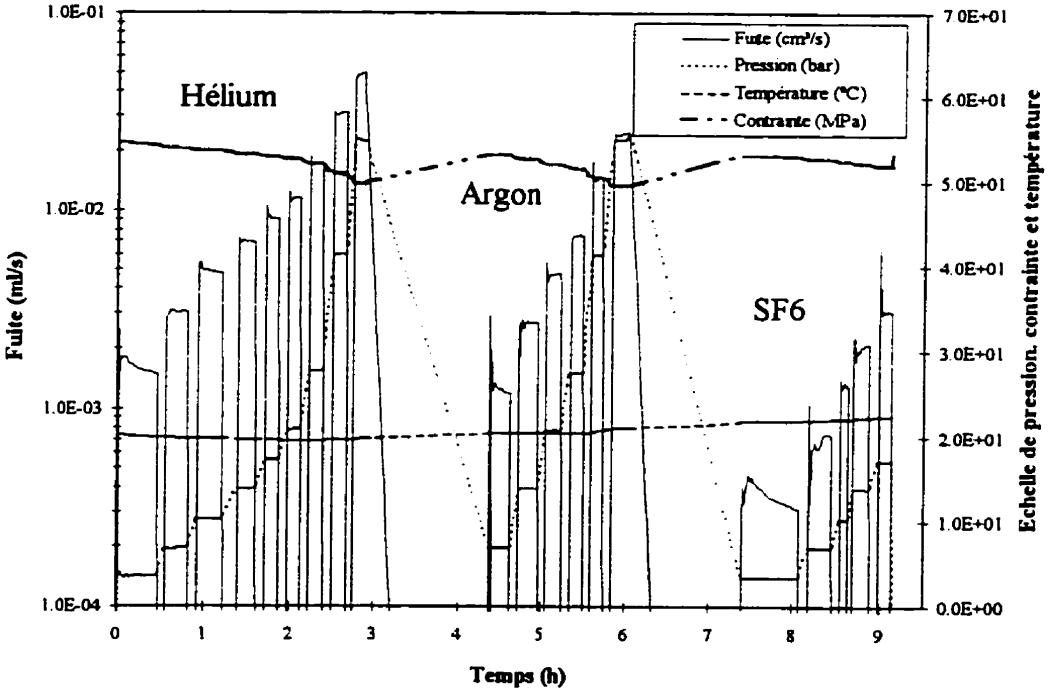


Figure A5.3 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type A9 - Essai 1
Contrainte nominale 42 MPa (6000 psi)



FigureA5.4 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type A9 - Essai 1
Contrainte nominale 55 MPa (8000 psi)

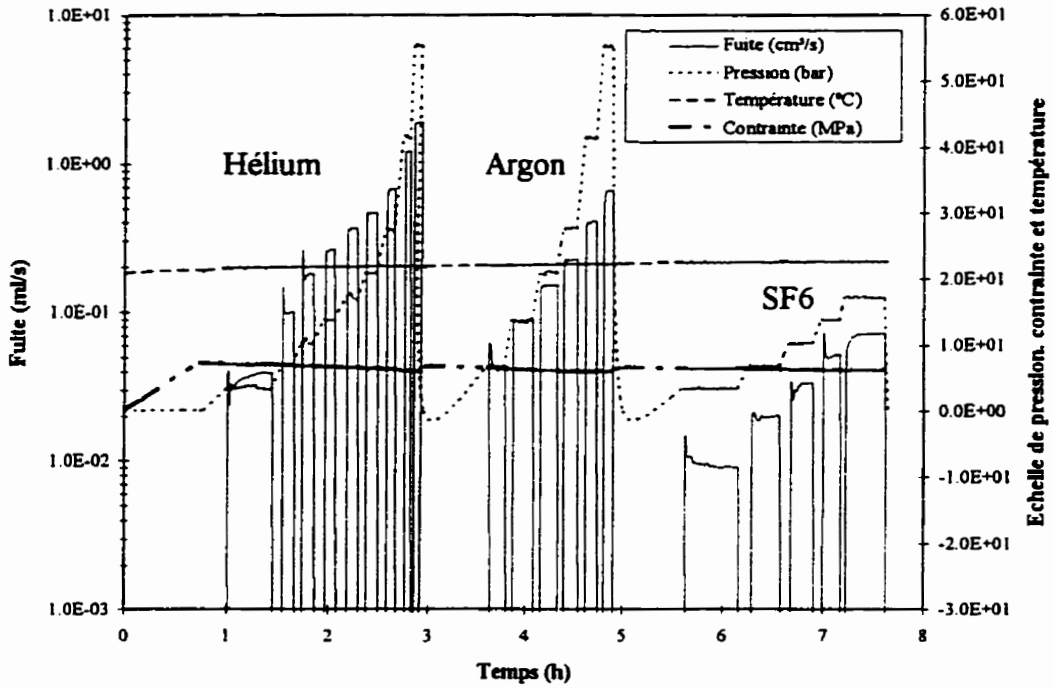


Figure A5.5 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type G2 - Essai 1
Contrainte nominale 7 MPa (1000 psi)

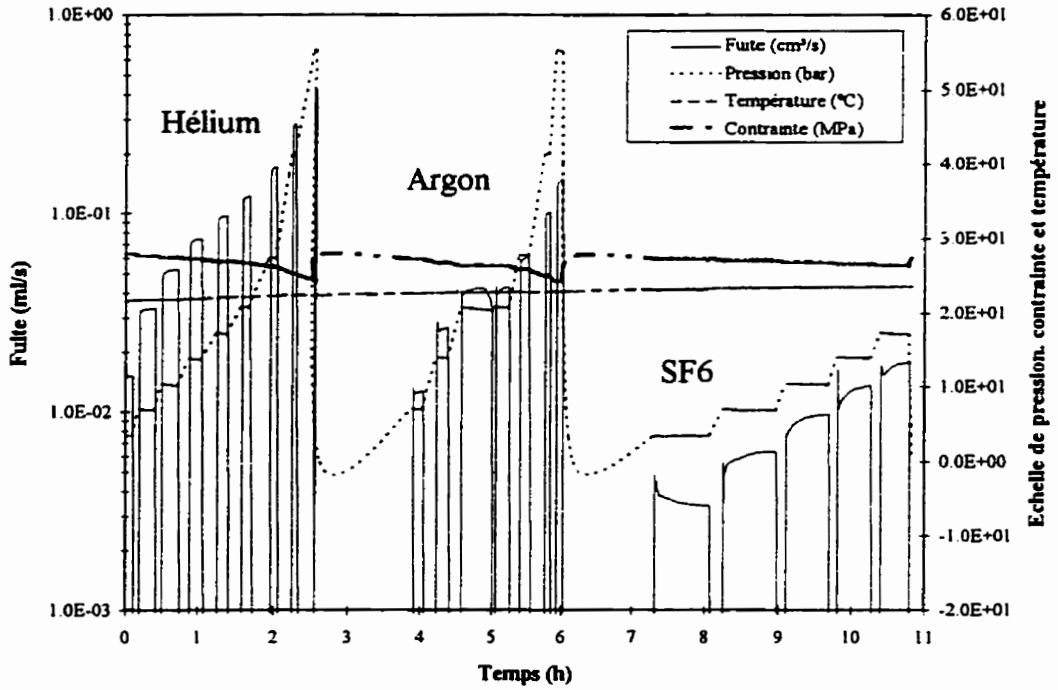


Figure A5.6 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type G2 - Essai 1
Contrainte nominale 28 MPa (4000 psi)

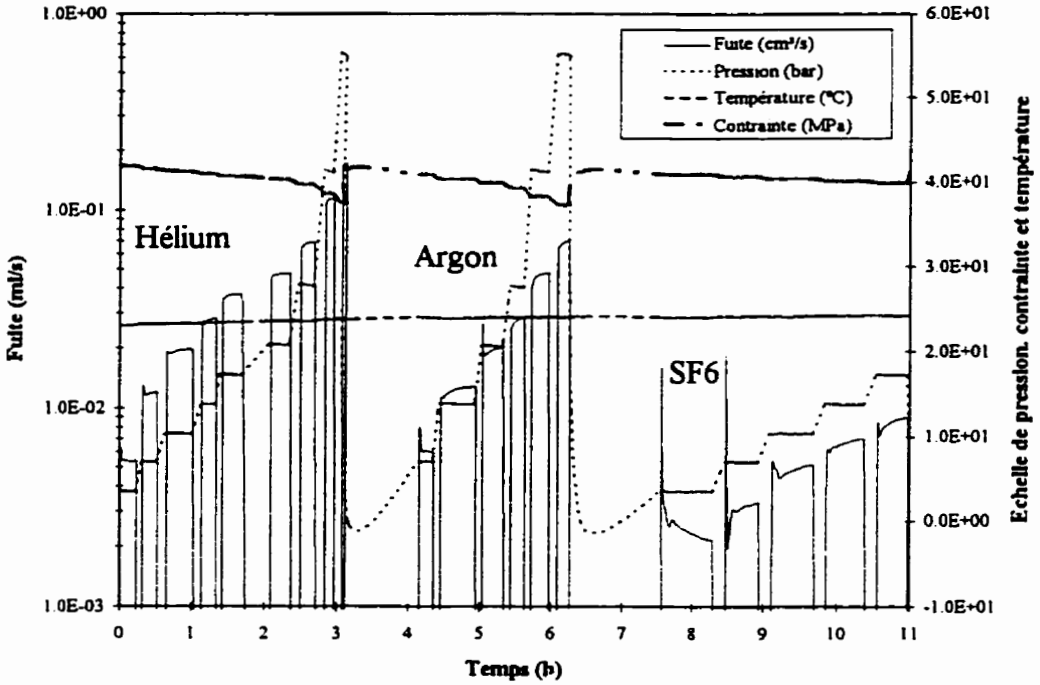


Figure A5.7 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type G2 - Essai 1
Contrainte nominale 42 MPa (6000 psi)

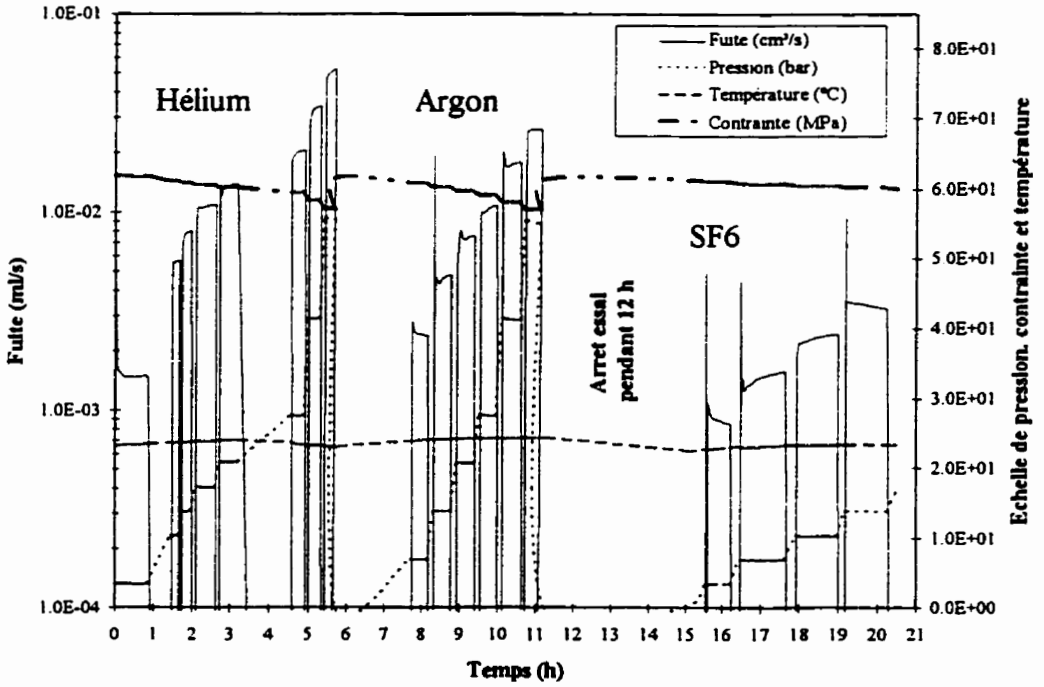


Figure A5.8 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type G2 - Essai 1
Contrainte nominale 62 MPa (9000 psi)

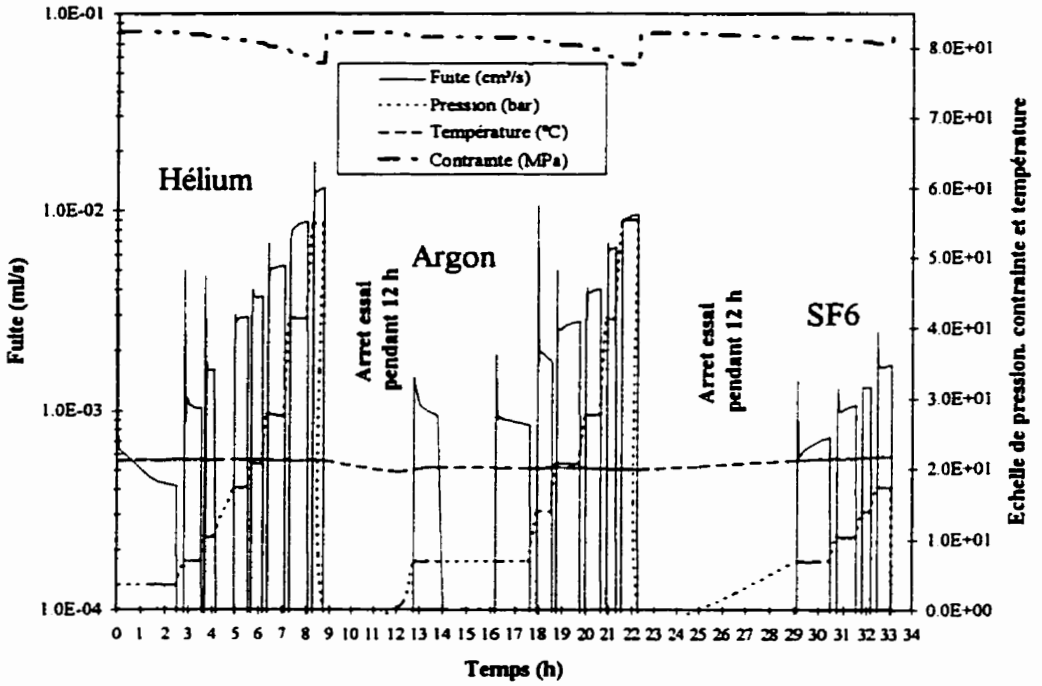


Figure A5.9 - Mesure de fuites Hélium, Argon et SF6 - Joint type G2 - Essai 1
Contrainte nominale 83 MPa (12000 psi)

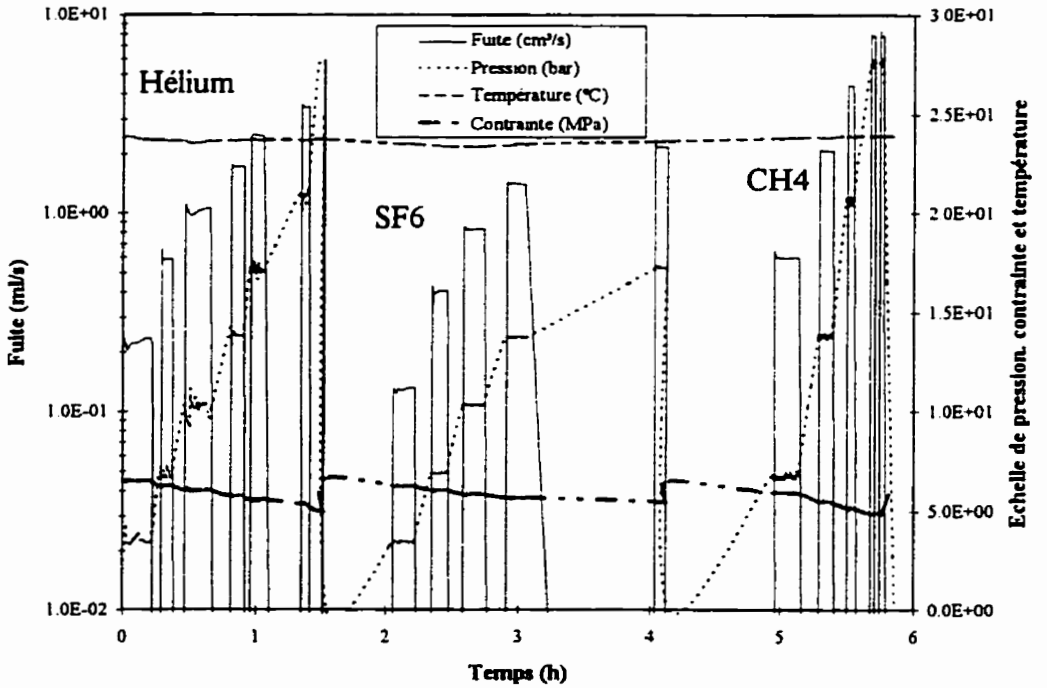


Figure A5.10 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type A9 - Essai 2
Contrainte nominale 7 MPa (1000 psi)

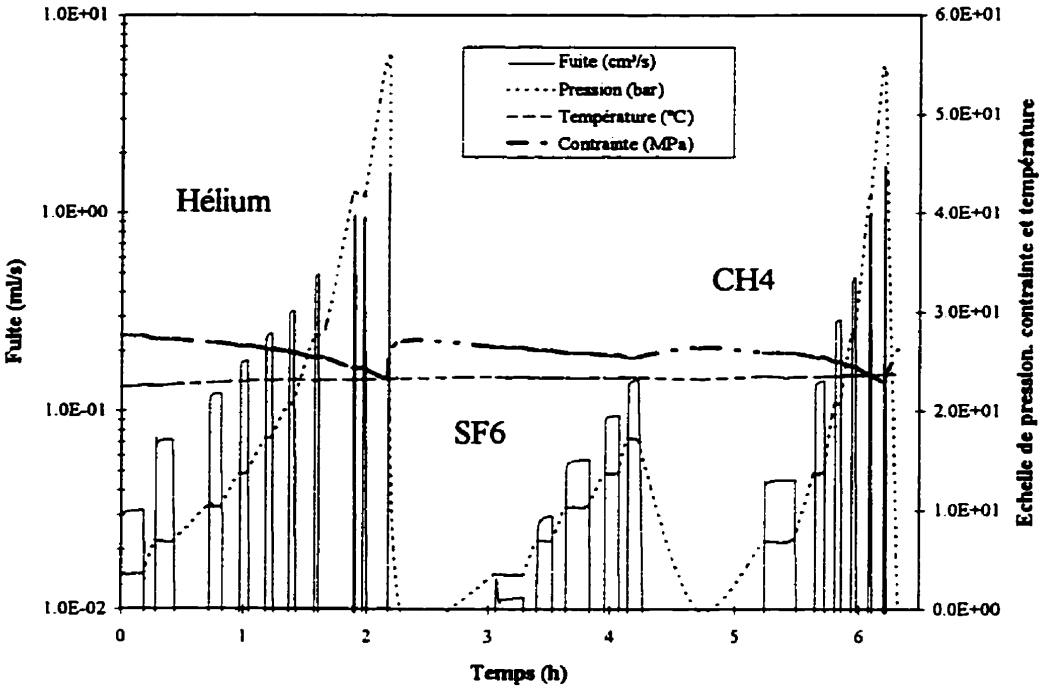


Figure A5.11 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type A9 - Essai 2
Contrainte nominale 28 MPa (4000 psi)

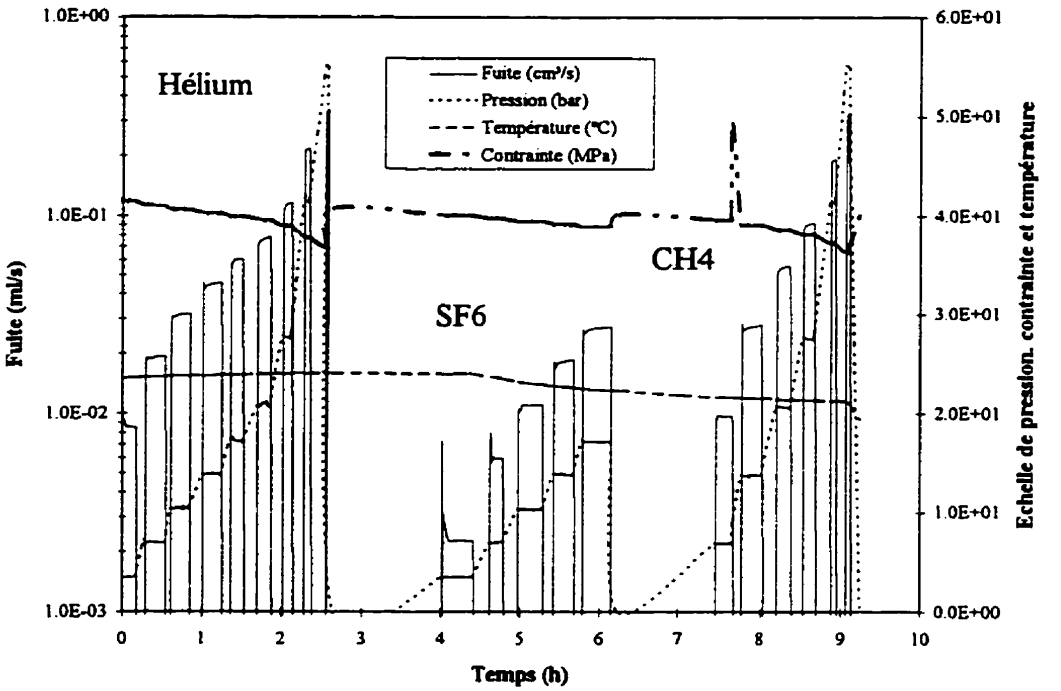


Figure A5.12 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type A9 - Essai 2
Contrainte nominale 42 MPa (6000 psi)

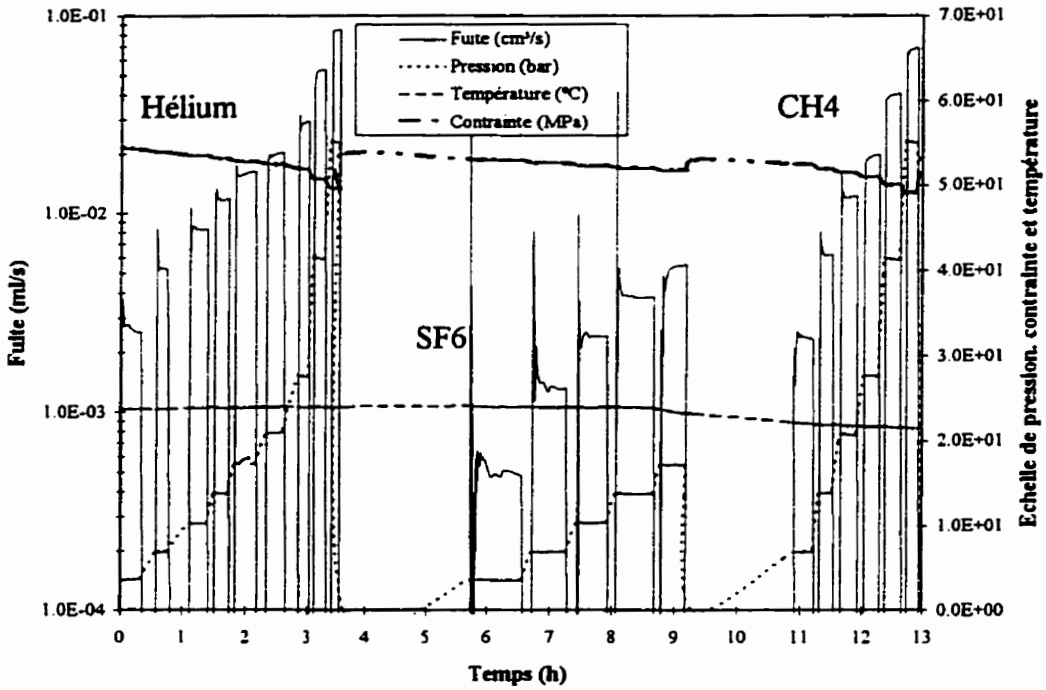


Figure A5.13 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type A9 - Essai 2
Contrainte nominale 55 MPa (8000 psi)

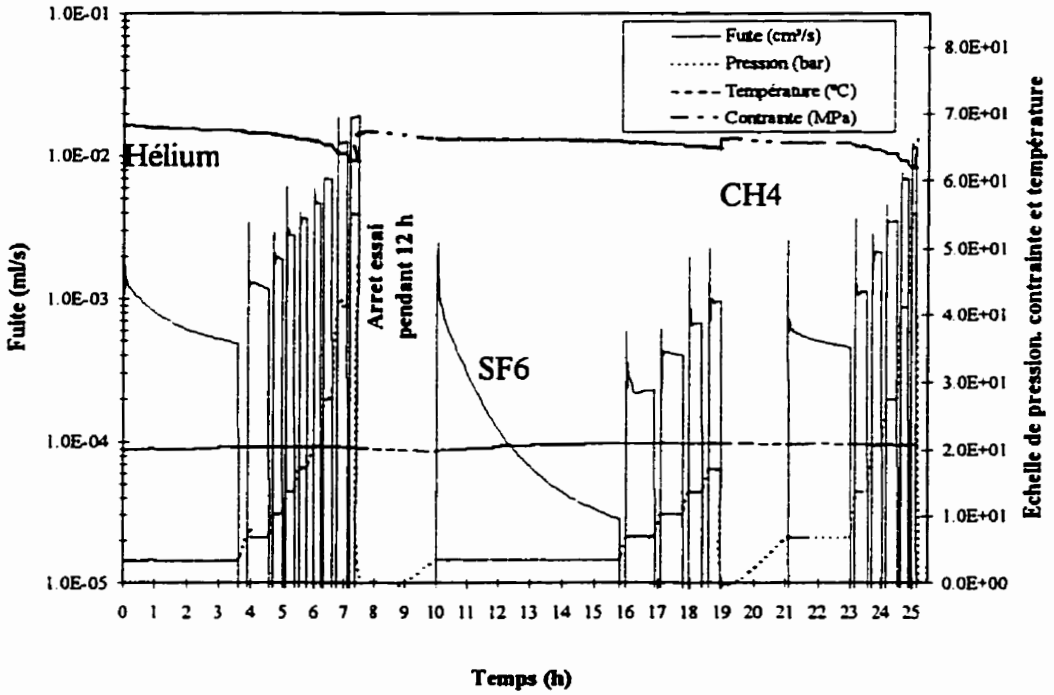


Figure A5.14 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type A9 - Essai 2
Contrainte nominale 69 MPa (10000 psi)

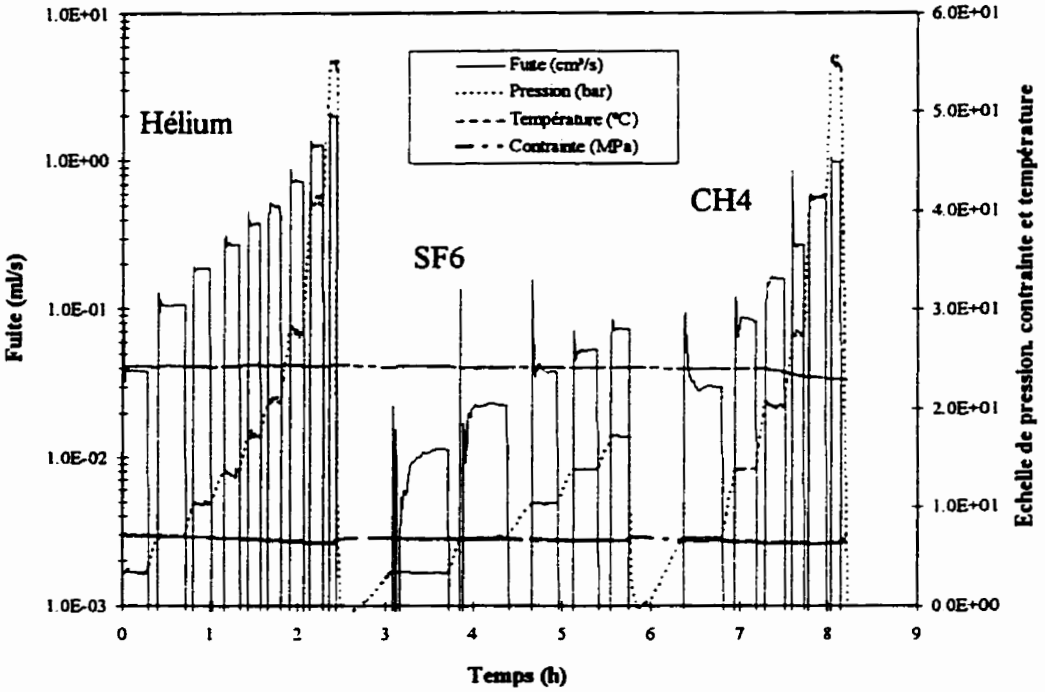


Figure A5.15 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type G2 - Essai 2
Contrainte nominale 7 MPa (1000 psi)

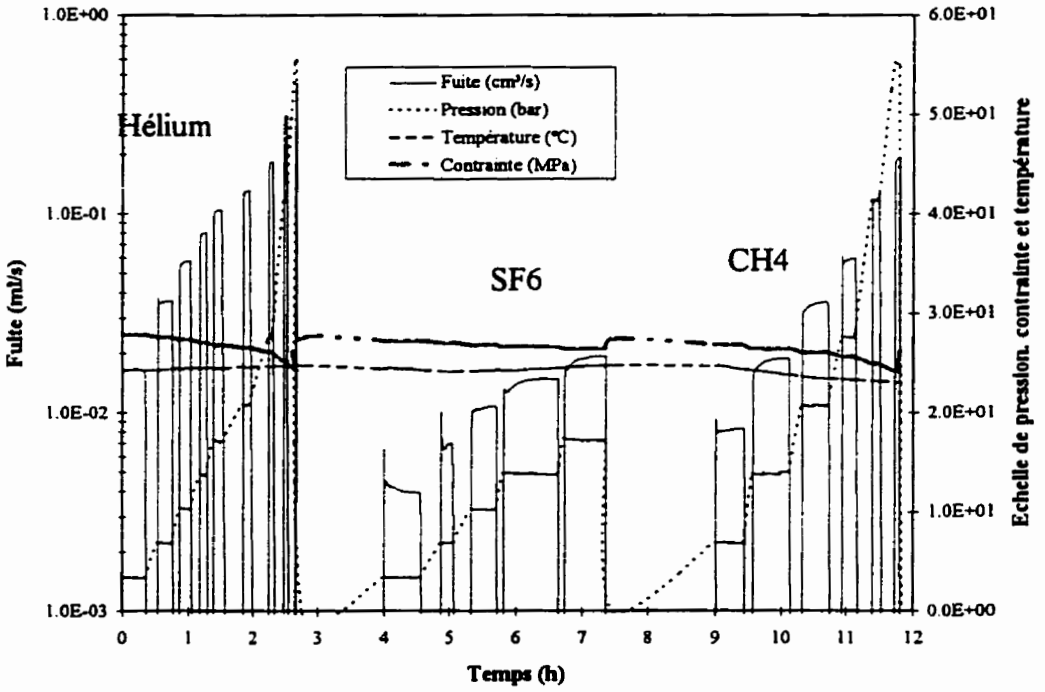


Figure A5.16 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type G2 - Essai 2
Contrainte nominale 28 MPa (4000 psi)

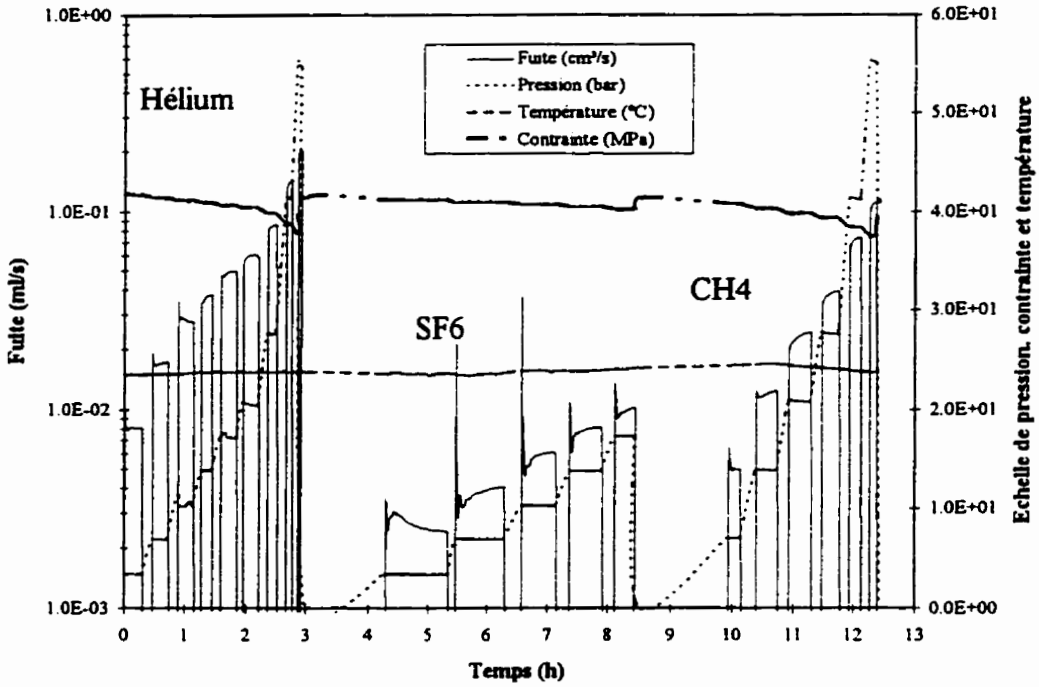


Figure A5.17 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type G2 - Essai 2
Contrainte nominale 42 MPa (6000 psi)

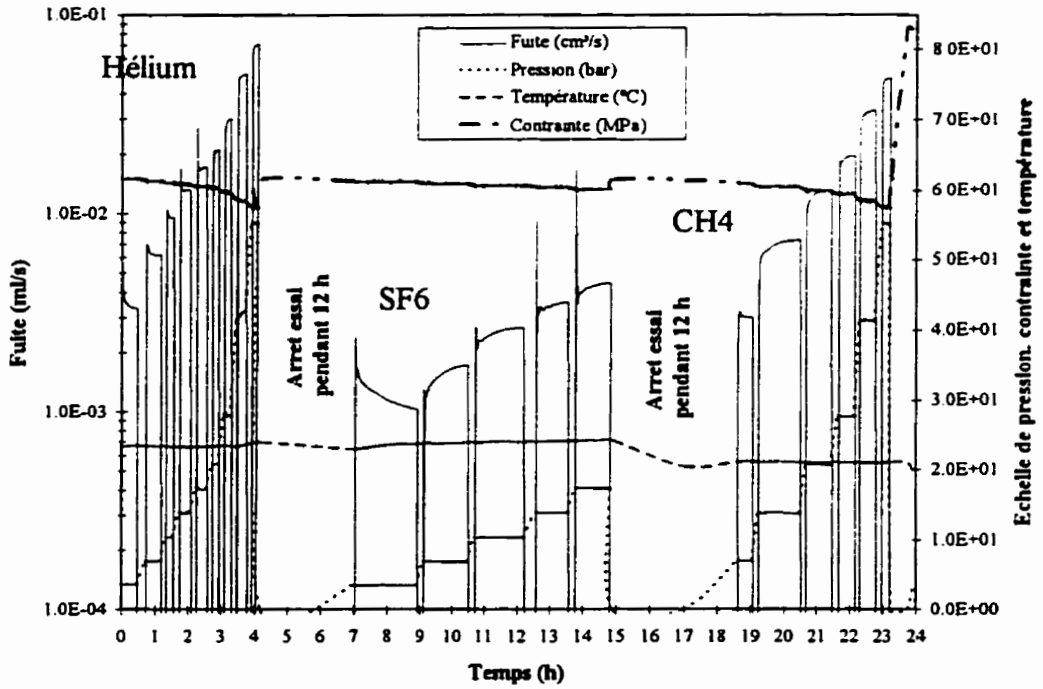


Figure A5.18 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type G2 - Essai 2
Contrainte nominale 62 MPa (9000 psi)

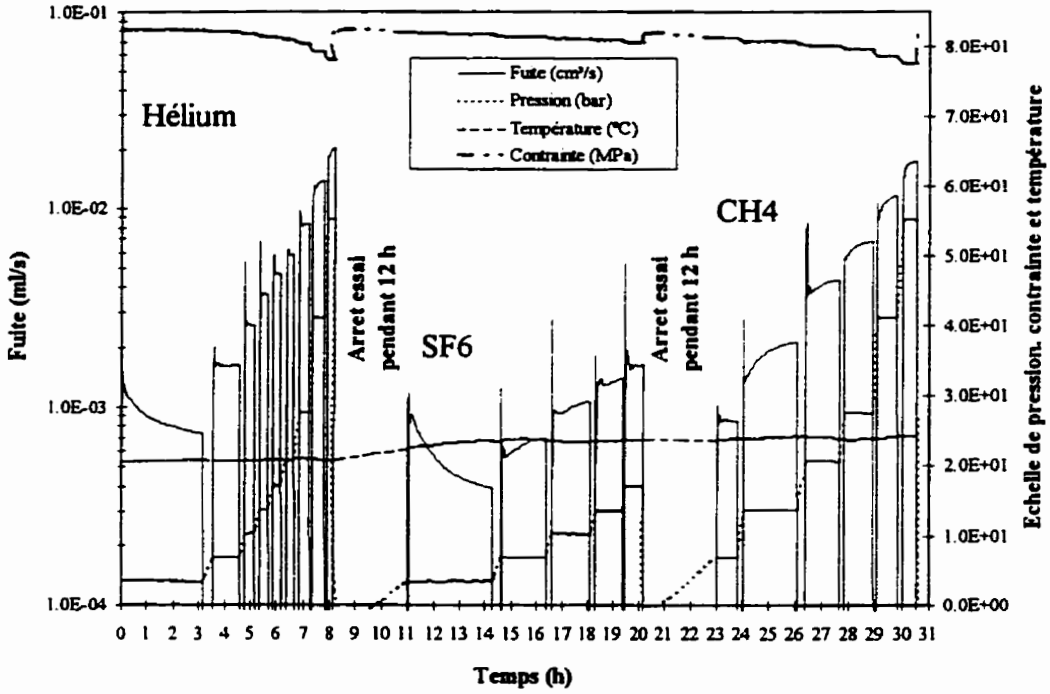


Figure A5.19 - Mesure de fuites Hélium, SF6 et Méthane - Joint type G2 - Essai 2
Contrainte nominale 83 MPa (12000 psi)

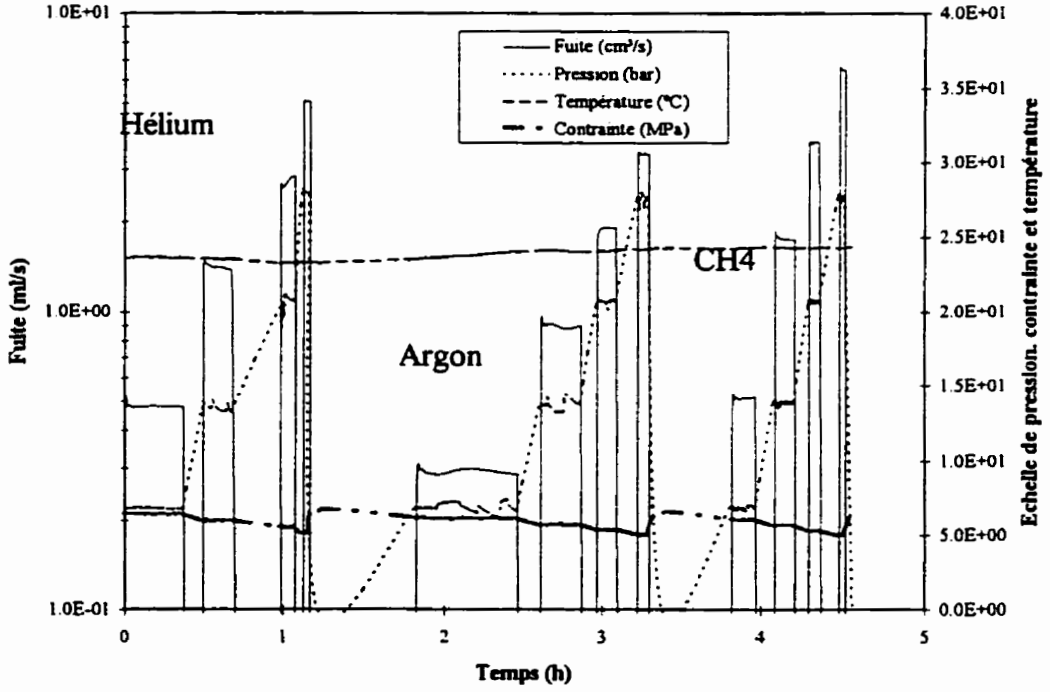


Figure A5.20 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type A9 -Essai 3
Contrainte nominale 7 MPa (1000 psi)

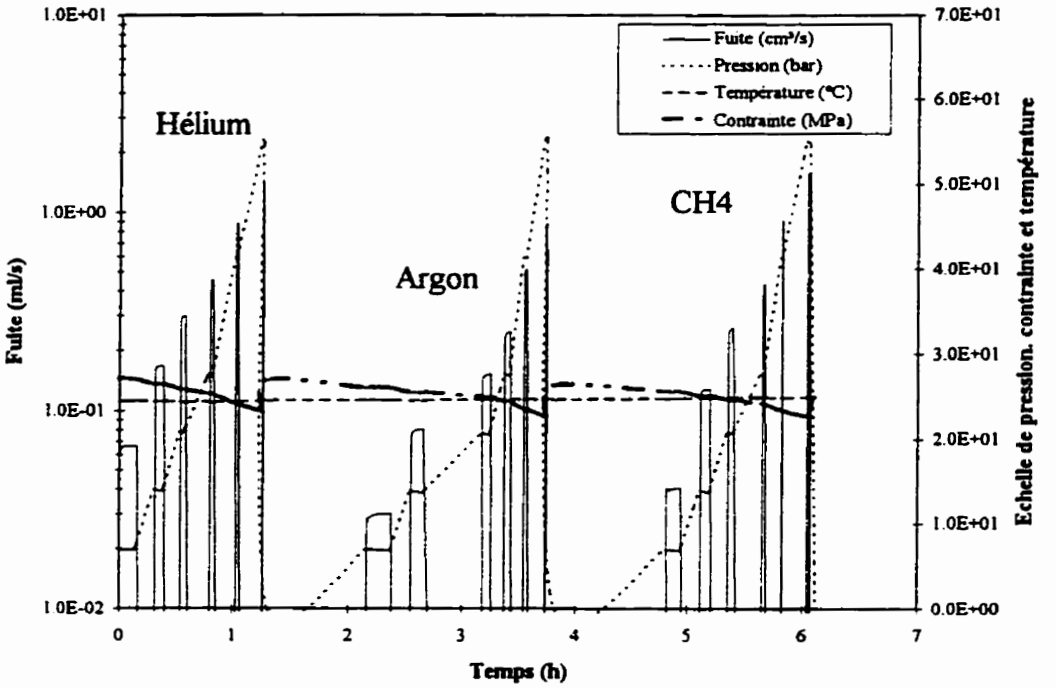


Figure A5.21 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type A9 -Essai 3
Contrainte nominale 28 MPa (4000 psi)

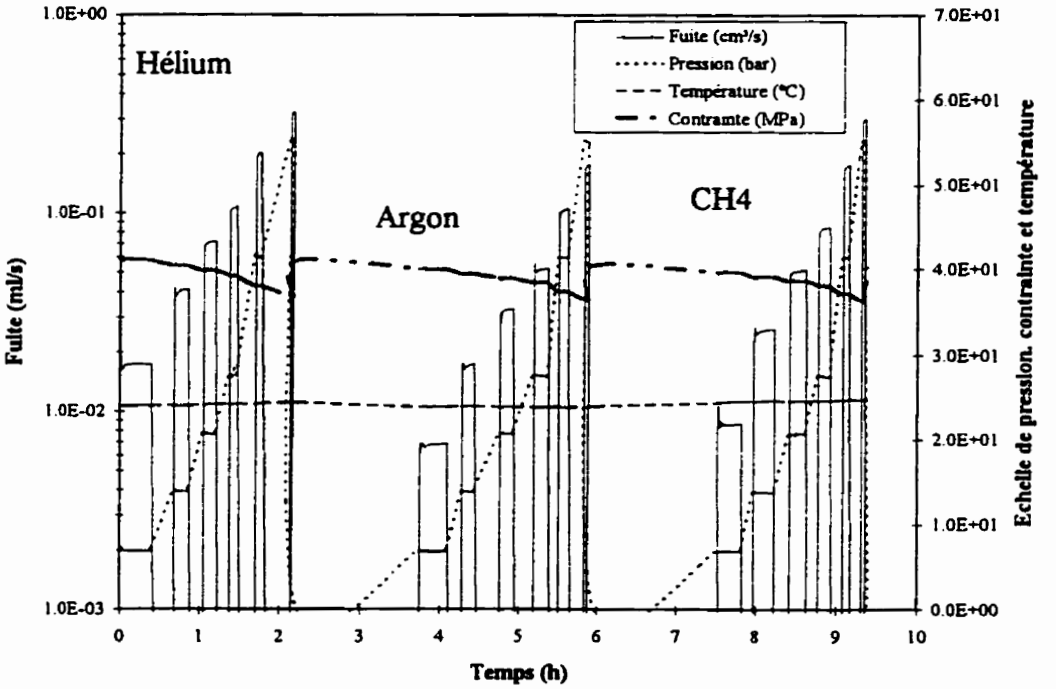


Figure A5.22 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type A9 -Essai 3
Contrainte nominale 42 MPa (6000 psi)

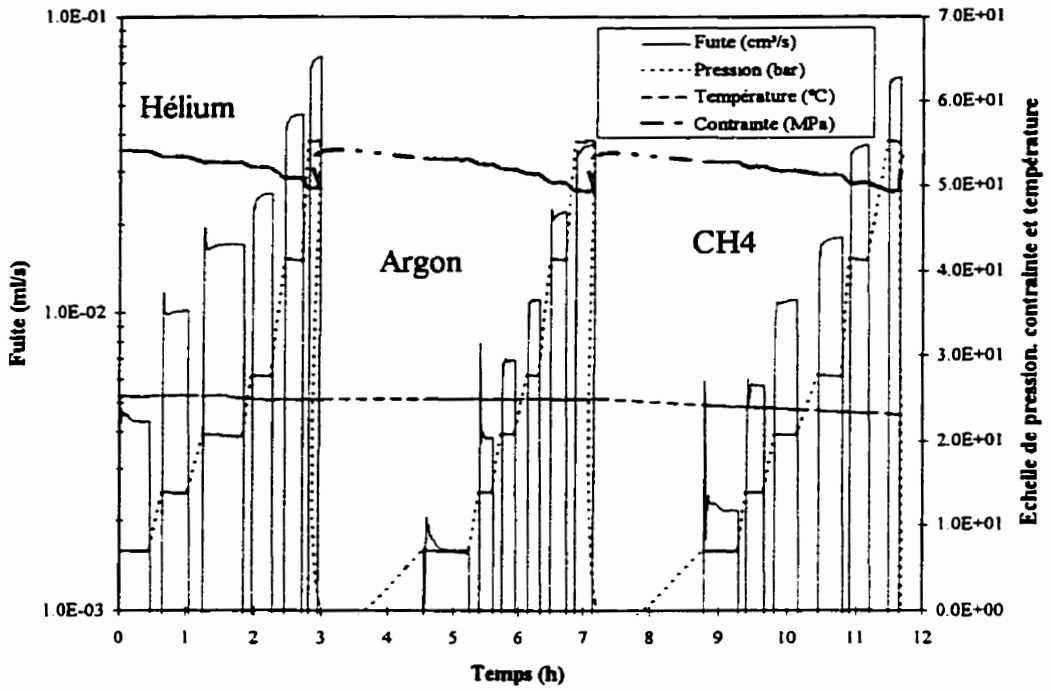


Figure A5.23 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type A9 -Essai 3
Contrainte nominale 55 MPa (8000 psi)

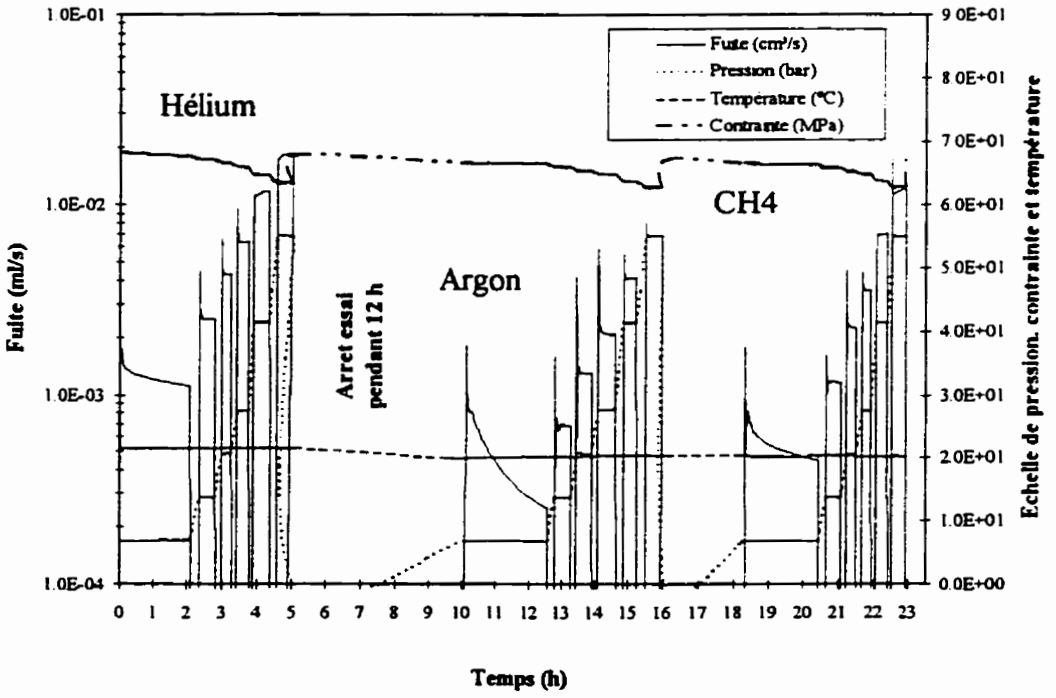


Figure A5.24 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type A9 -Essai 3
Contrainte nominale 69 MPa (10000 psi)

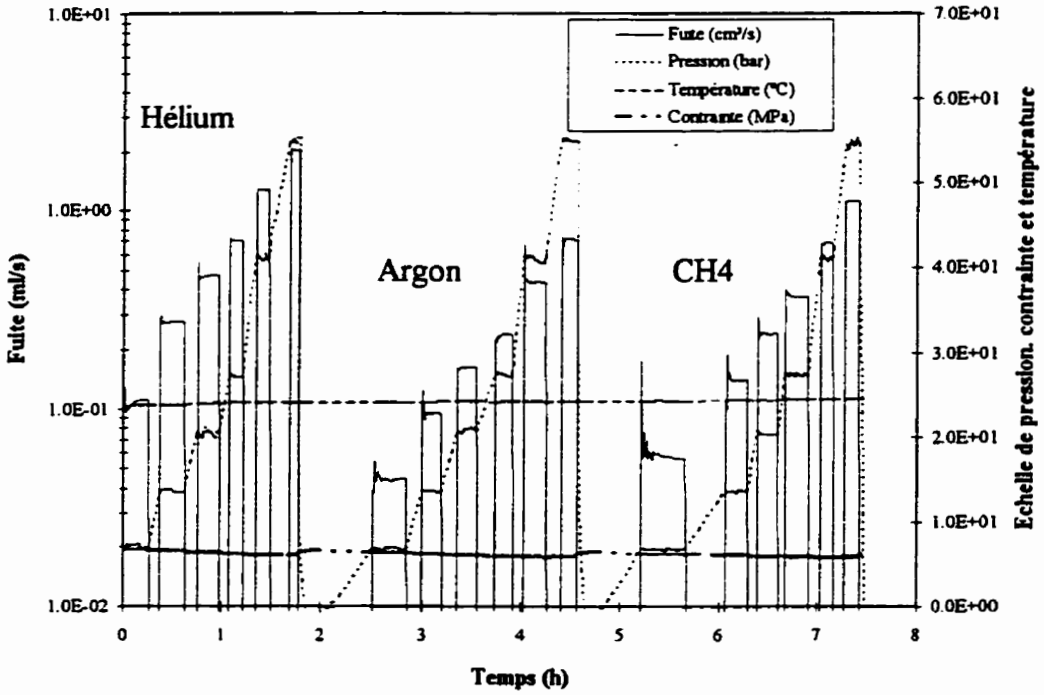


Figure A5.25 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type G2 -Essai 3 Contrainte nominale 7 MPa (1000 psi)

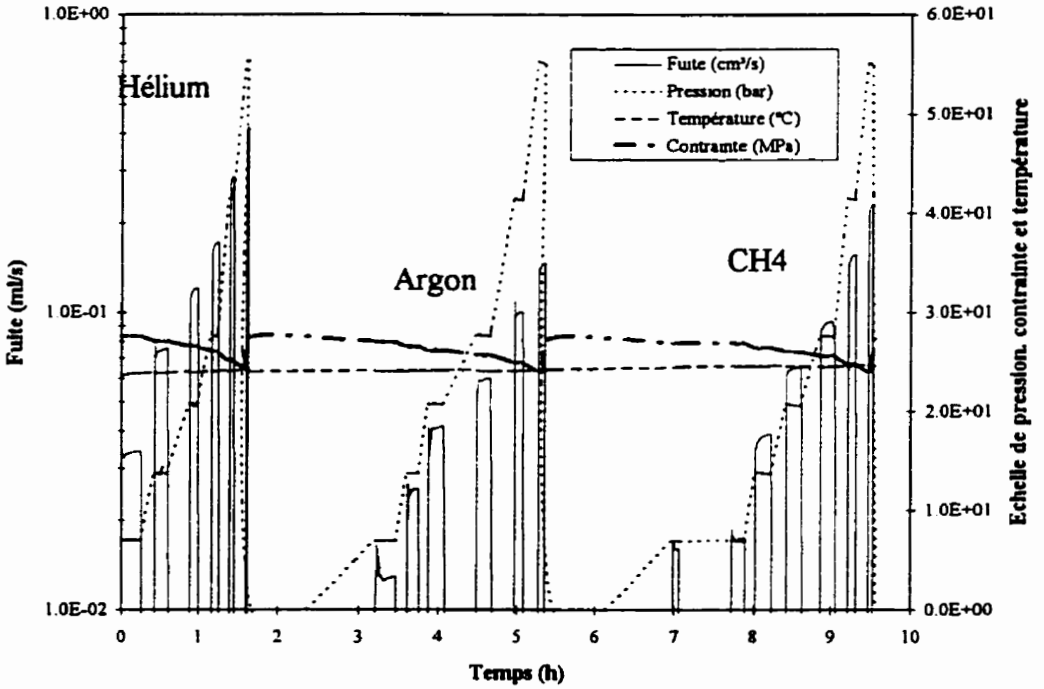


Figure A5.26 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type G2 -Essai 3 Contrainte nominale 28 MPa (4000 psi)

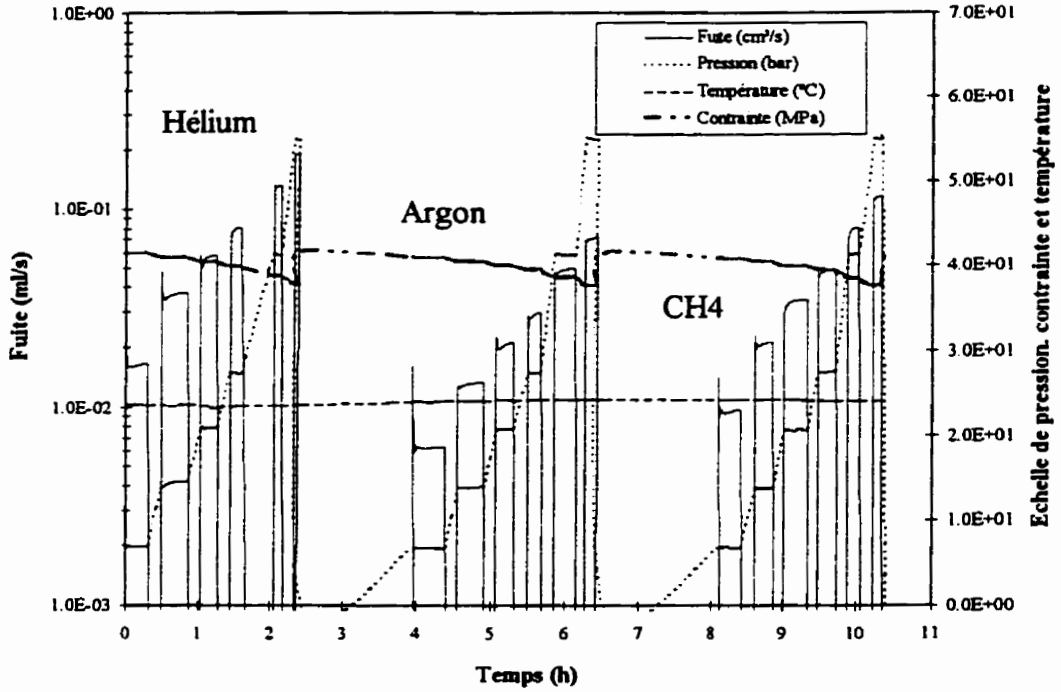


Figure A5.27 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type G2 -Essai 3
Contrainte nominale 42 MPa (6000 psi)

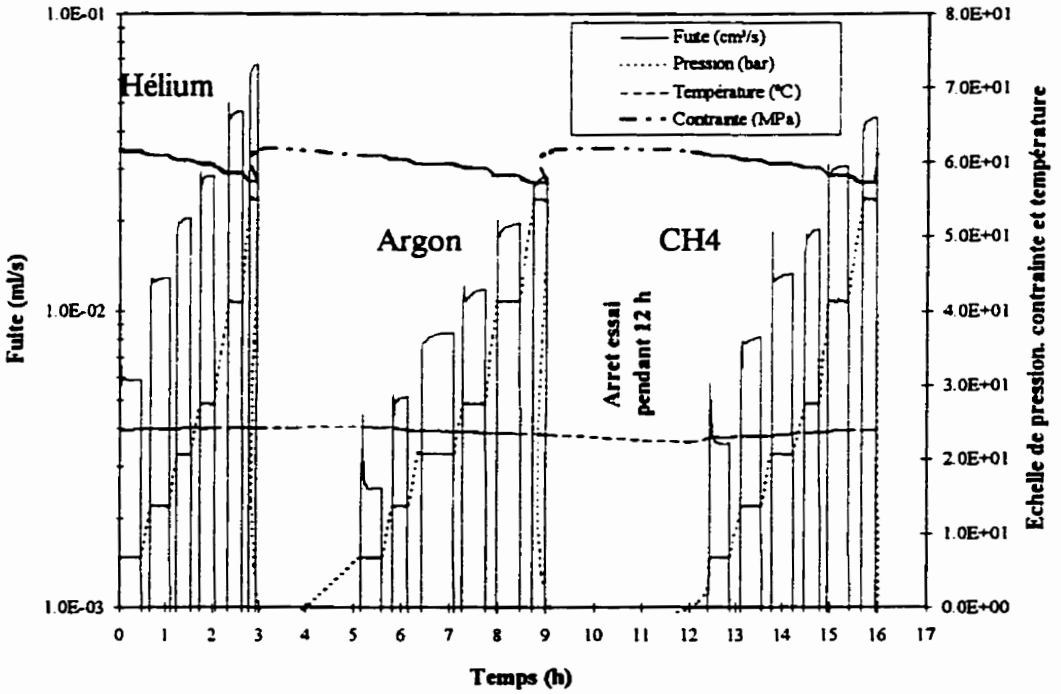


Figure A5.28 -Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type G2 -Essai 3
Contrainte nominale 62 MPa (9000 psi)

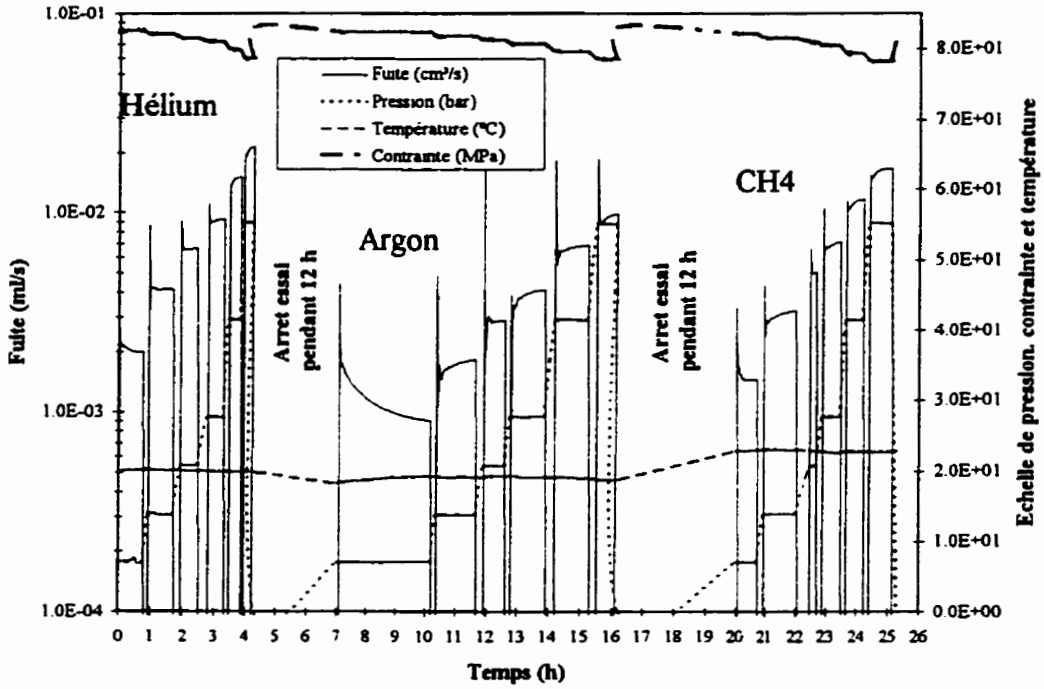


Figure A5.29 - Mesure de fuites Hélium, Argon et Méthane - Joint type G2 -Essai 3 Contrainte nominale 83 MPa (12000 psi)

ANNEXE 6

REPETABILITE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Cette annexe présente deux séries de figures.

La première série (figures A6.1 à A6.8) est destinée à présenter la répétabilité des mesures de fuites effectuées. Pour cela chaque figure présente l'évolution de la fuite d'un joint en fonction de la pression interne du gaz considéré. Chaque figure met en commun les résultats de plusieurs essais. De plus l'évolution de la fuite en fonction de la pression interne est tracée pour différents niveaux de contrainte sur le joint.

La seconde série (figures A6.9 à A6.14) se propose d'évaluer la répétabilité des rapports entre les fuites de différents gaz et celles d'hélium. Chaque figure doit être associée à un type de joint et à un gaz cible. L'évolution de ces rapports est présentée en fonction de la contrainte nominale sur le joint. Ces évolutions sont tracées pour différents niveaux de pression interne. Evidemment, les résultats de plusieurs essais sont présentés sur une même figure.

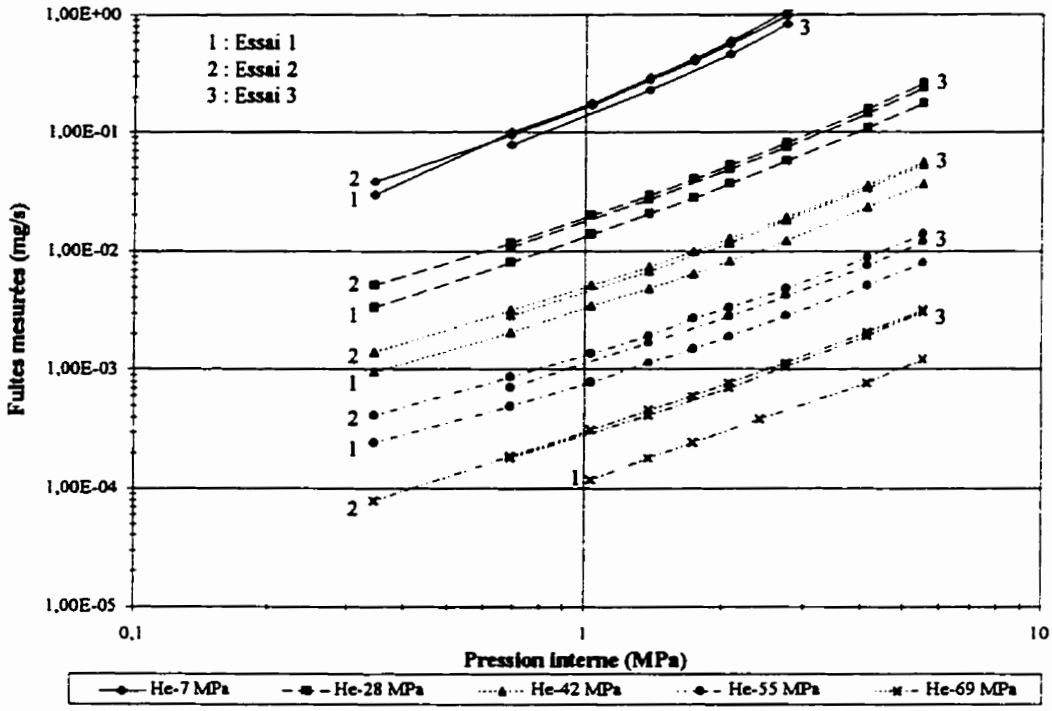


Figure A6.1 : Joint type A9 - He - Trois essais

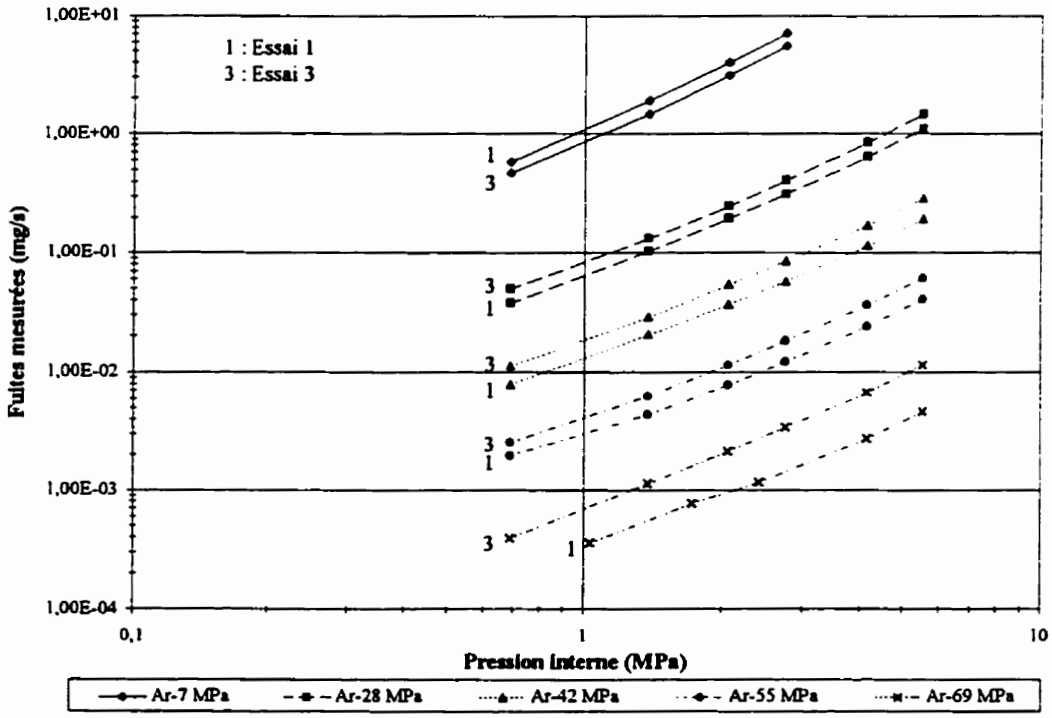


Figure A6.2 : Joint type A9 - Ar - Deux essais

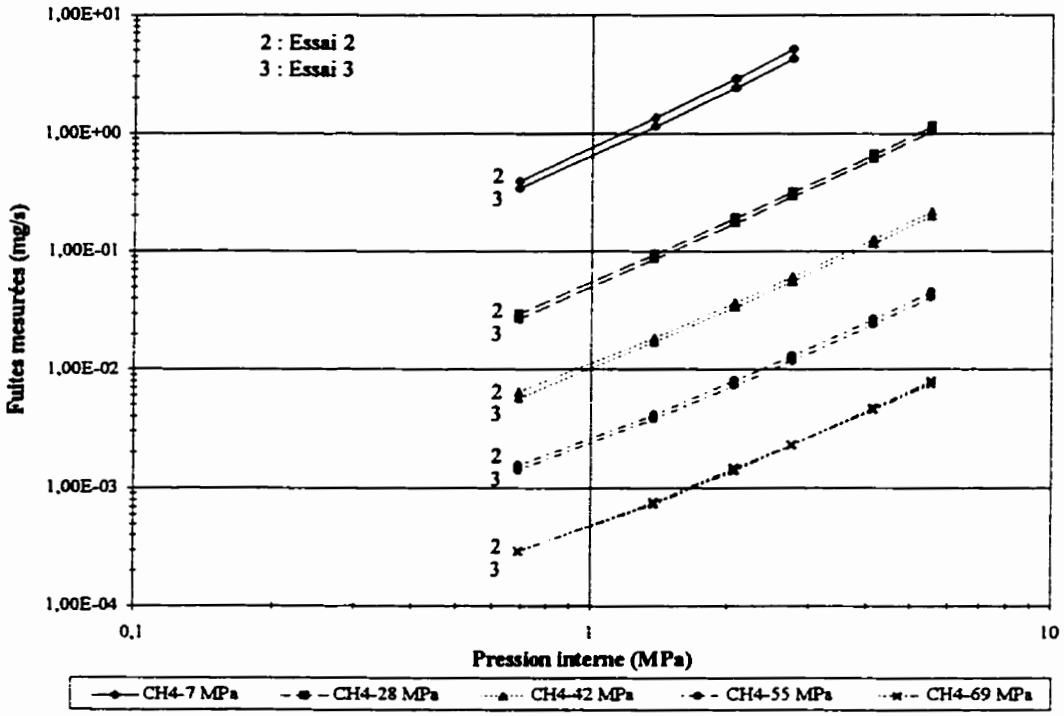


Figure A6.3 : Joint type A9 - CH4 - Deux essais

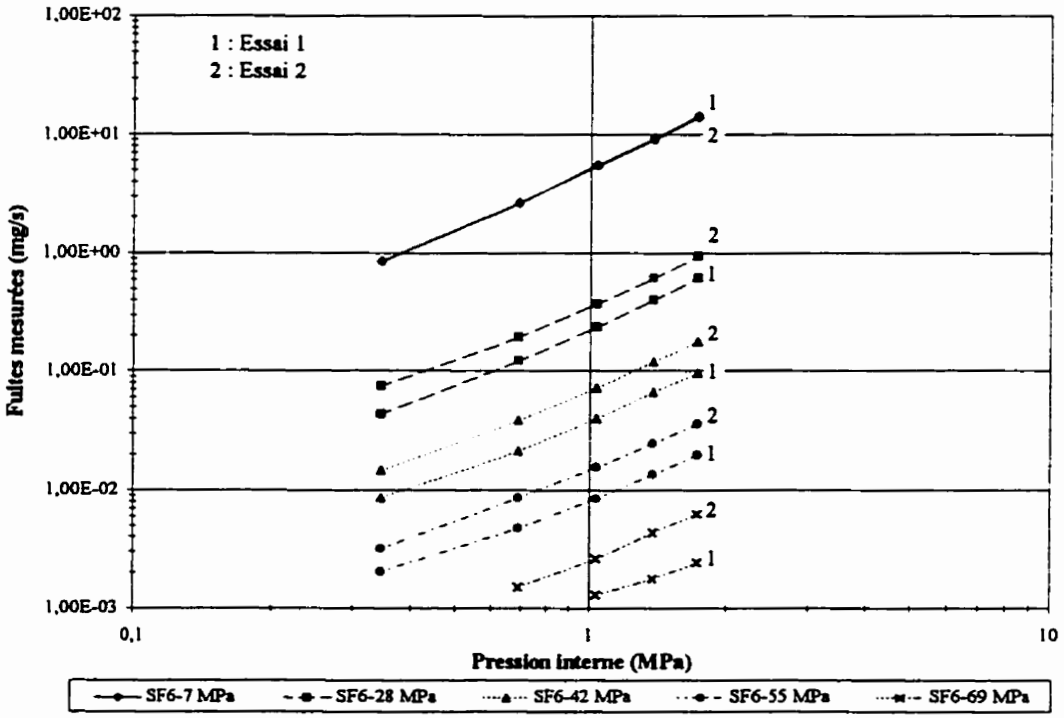


Figure A6.4 : Joint type A9 - SF6 - Deux essais

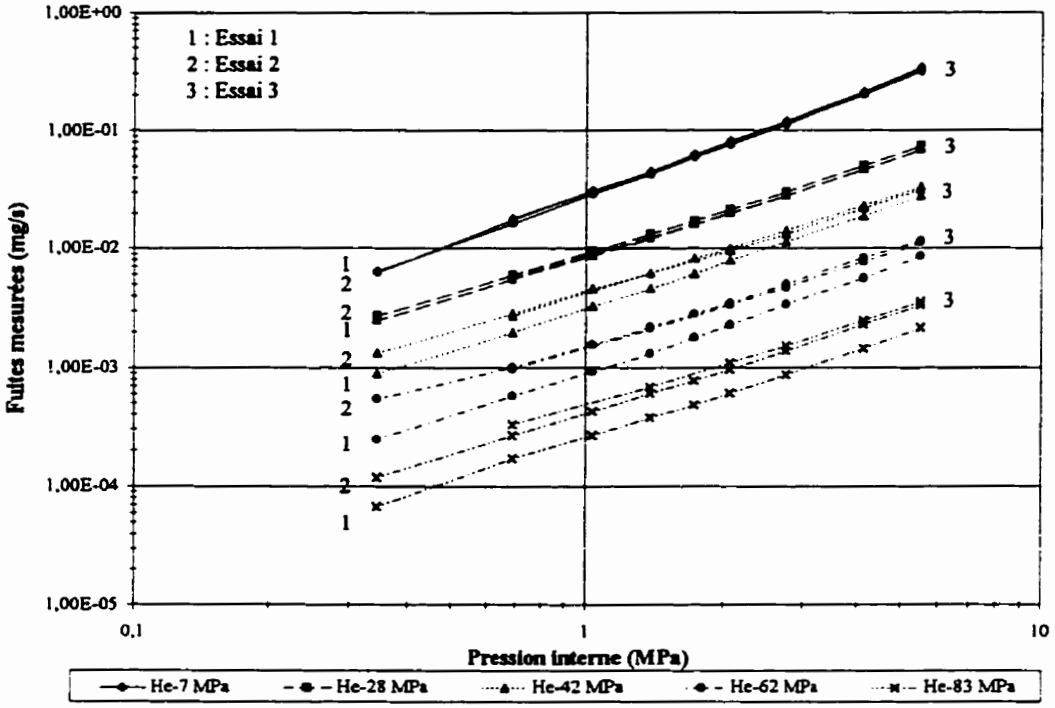


Figure A6.5 : Joint type G2 - He - Trois essais

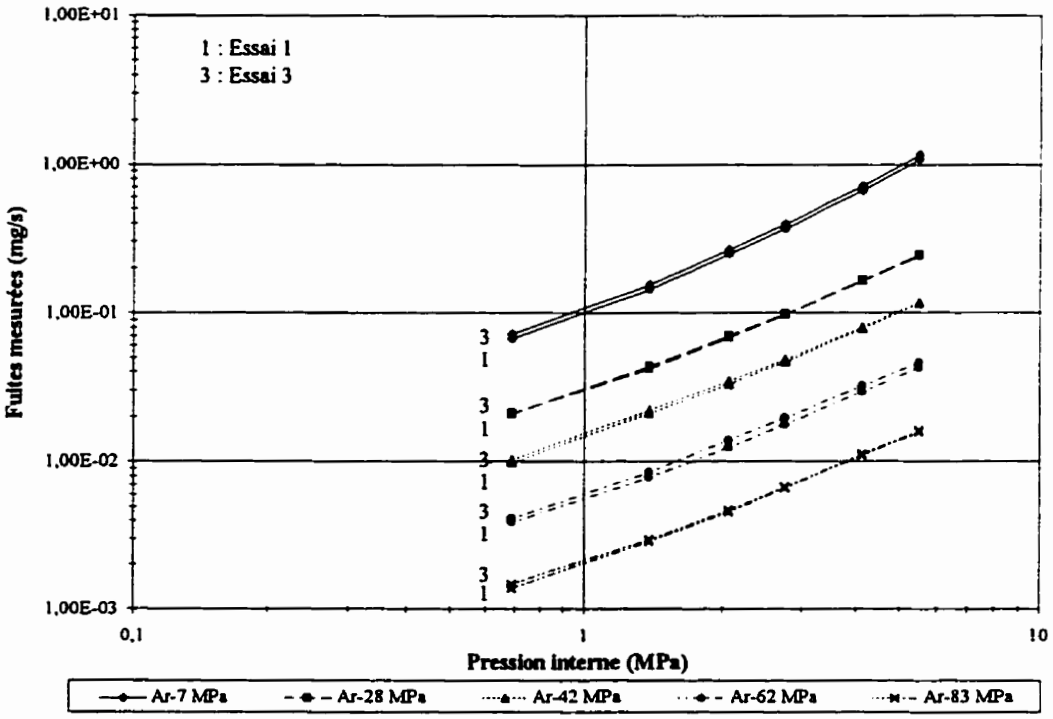


Figure A6.6 : Joint type G2 - Ar -Deux essais

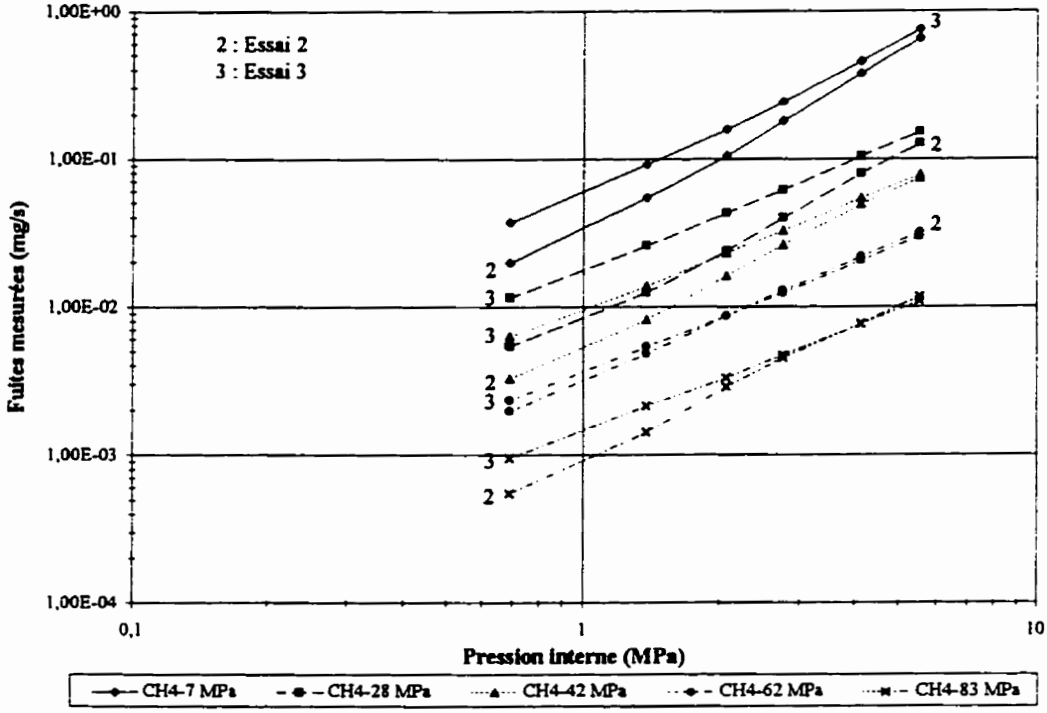


Figure A6.7 : Joint type G2 - CH4 - Deux essais

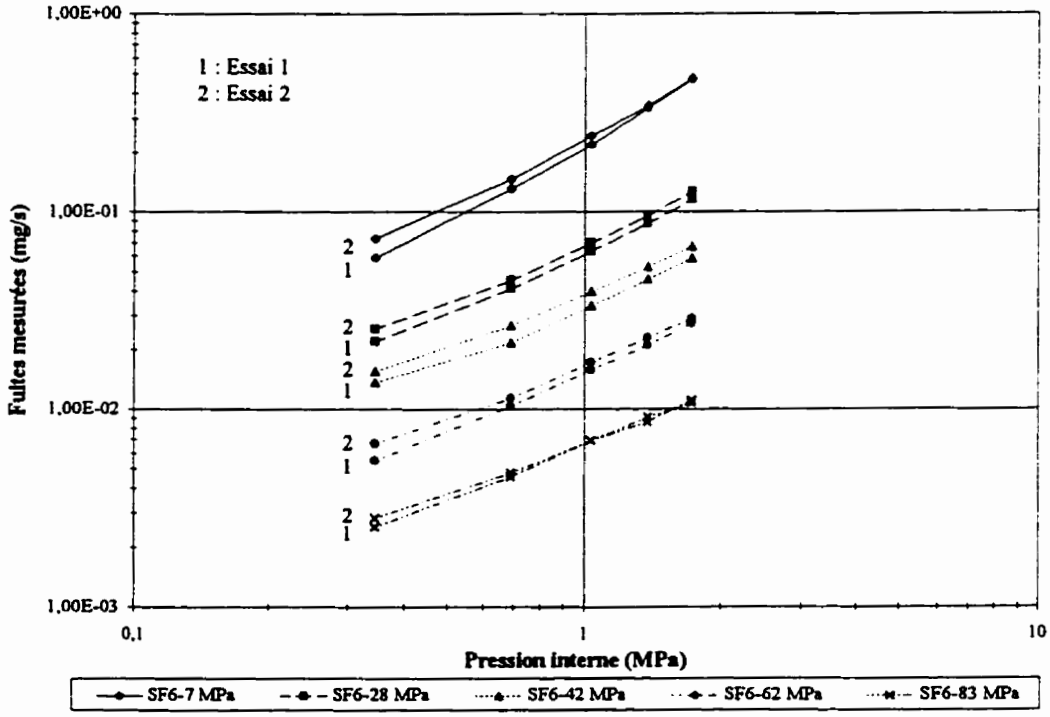


Figure A6.8 : Joint type G2 - SF6 - Deux essais

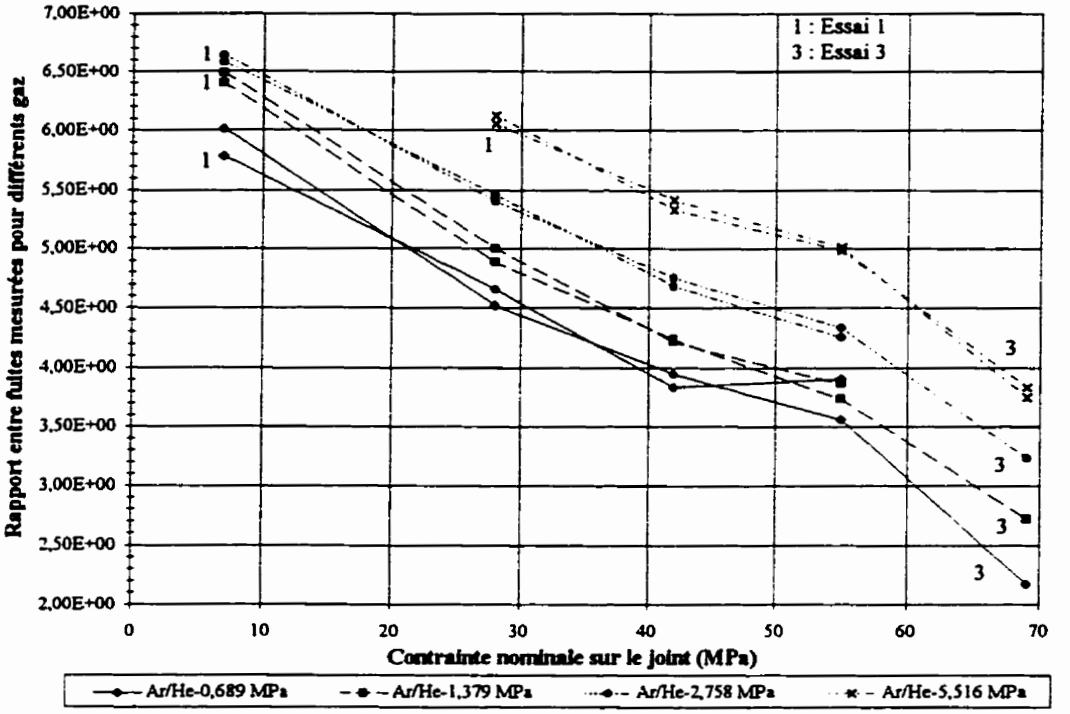


Figure A6.9 : Joint type A9 - Rapport Ar/He - Deux essais

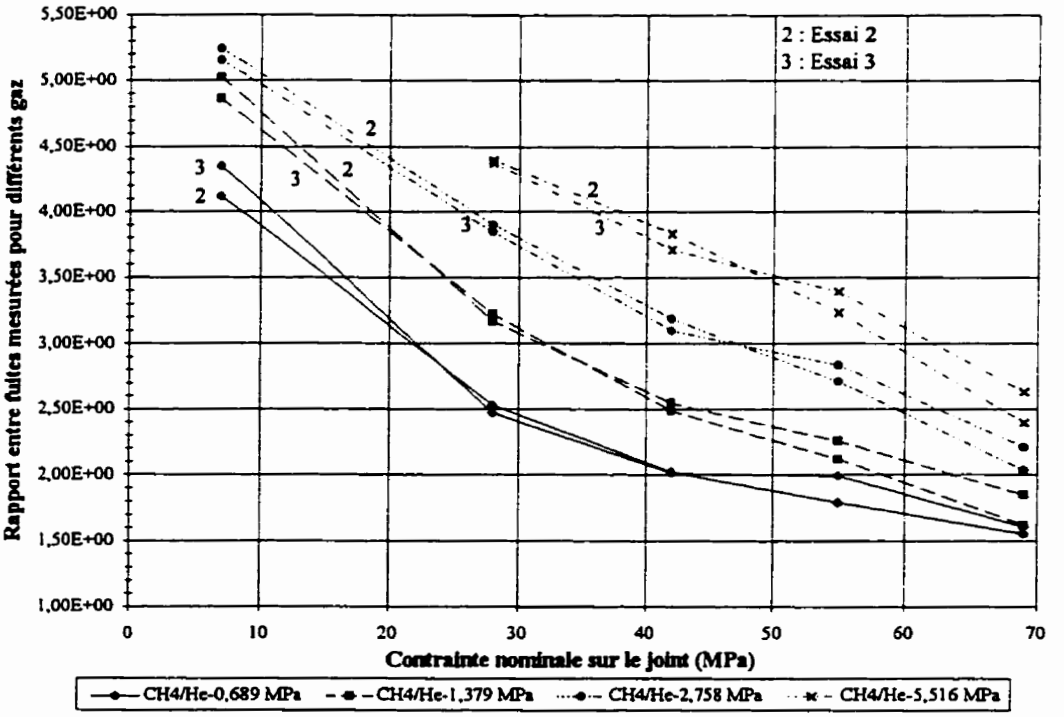


Figure A6.10 : Joint type A9 - Rapport CH4/He - Deux essais

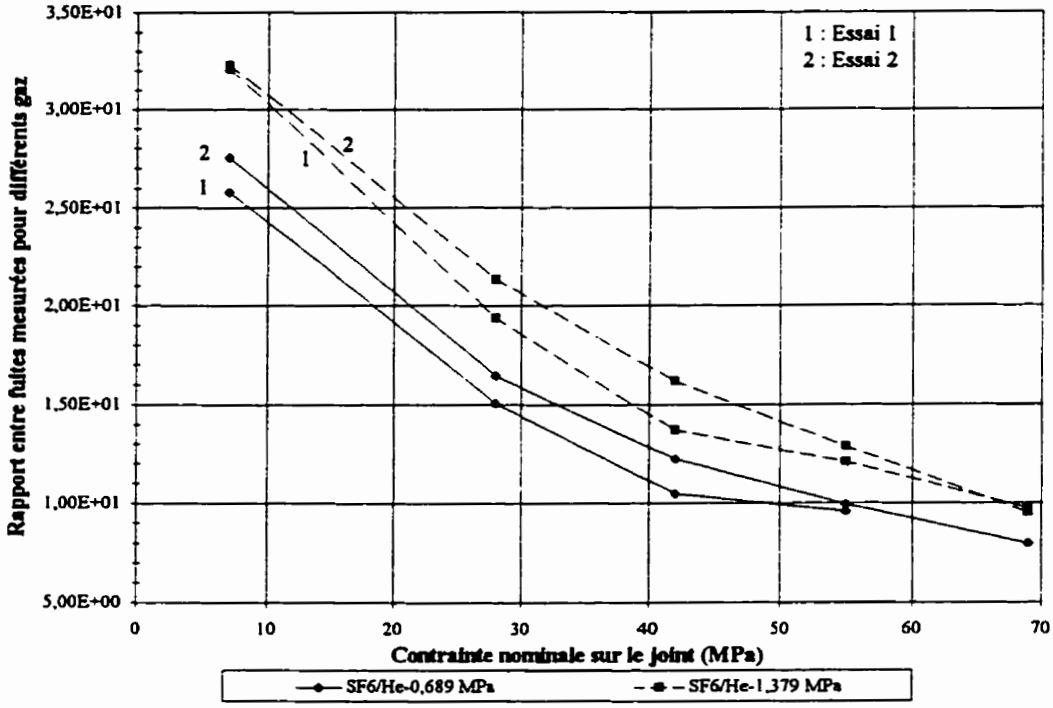
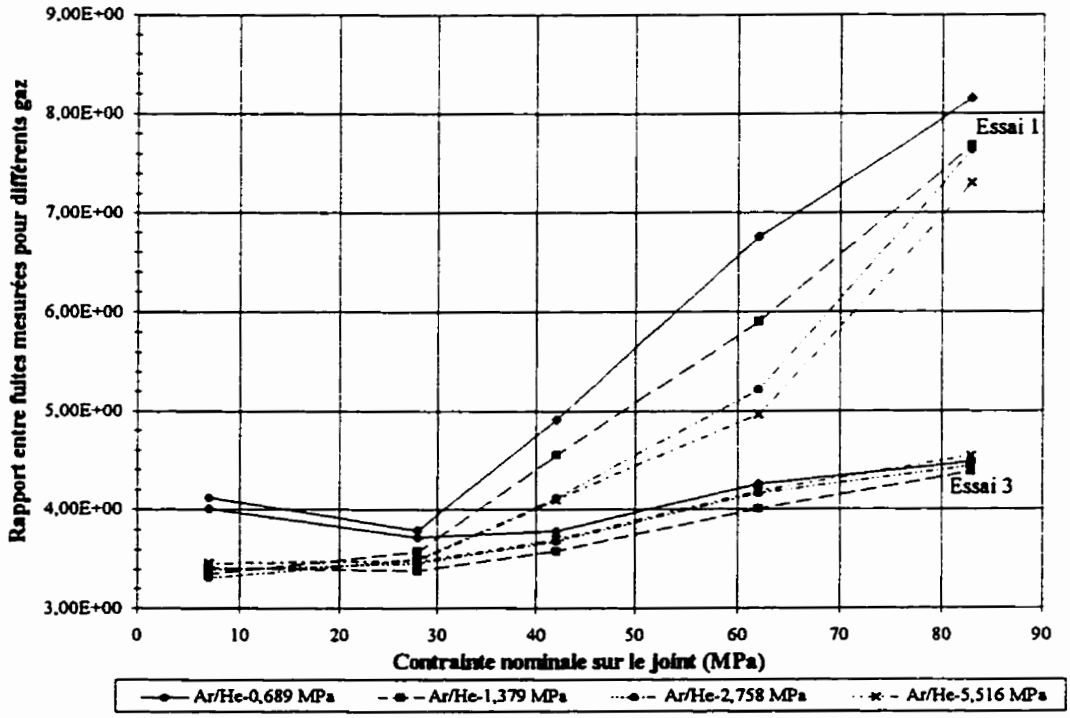


Figure A6.11 : Joint type A9 - Rapport SF6/He - Deux essais



FigureA6.12 : Joint type G2 - Rapport Ar/He - Deux essais

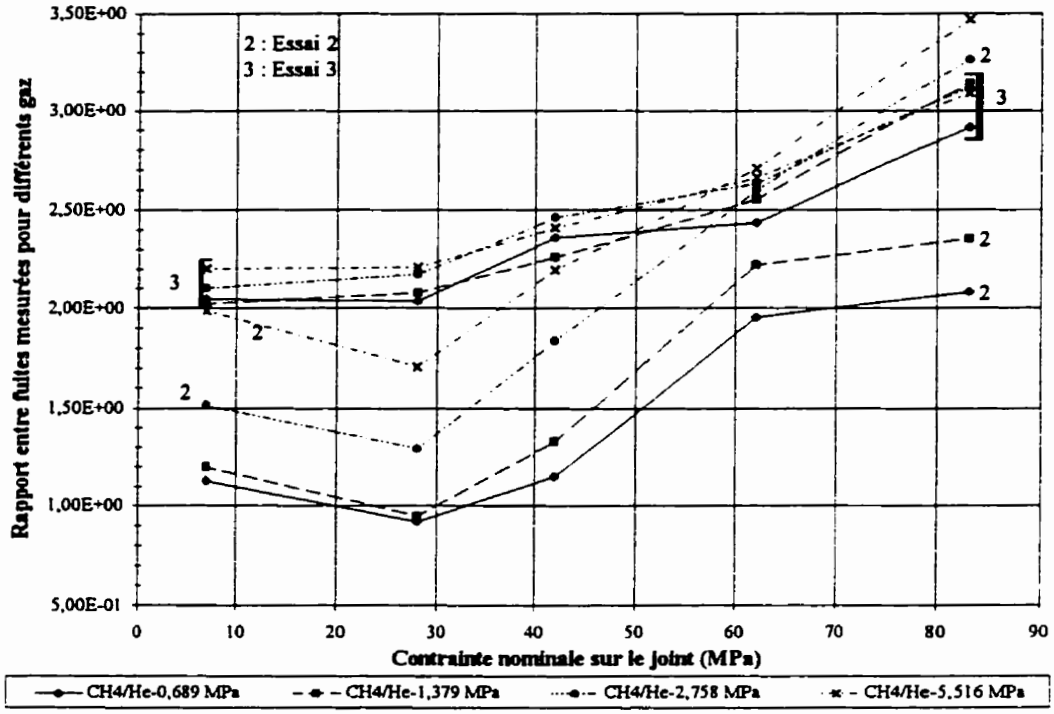


Figure A6.13 : Joint type G2 - Rapport CH4/He - 2 essais

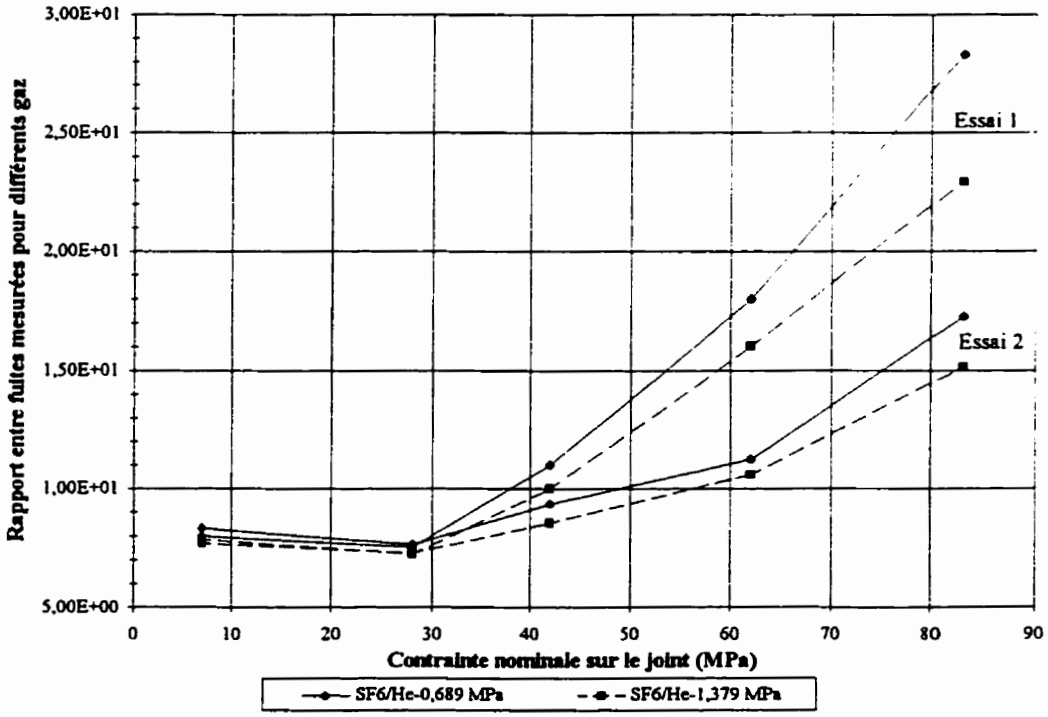


Figure A6.14 : Joint type G2 - Rapport SF6/He - 2 essais

ANNEXE 7

COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX AVEC CEUX OBTENUS LORS D'UNE PRECEDENTE ETUDE

La présente annexe se propose de présenter la comparaisons entre les résultats obtenus par la présente étude et ceux issus de la référence [2].

Cette comparaison sera orientée suivant deux axes.

Le premier sera la comparaison des niveaux de fuites obtenus dans les deux cas.

Le second concernera la comparaison des rapports entre les fuites obtenues pour différents gaz, eux aussi issus des deux études.

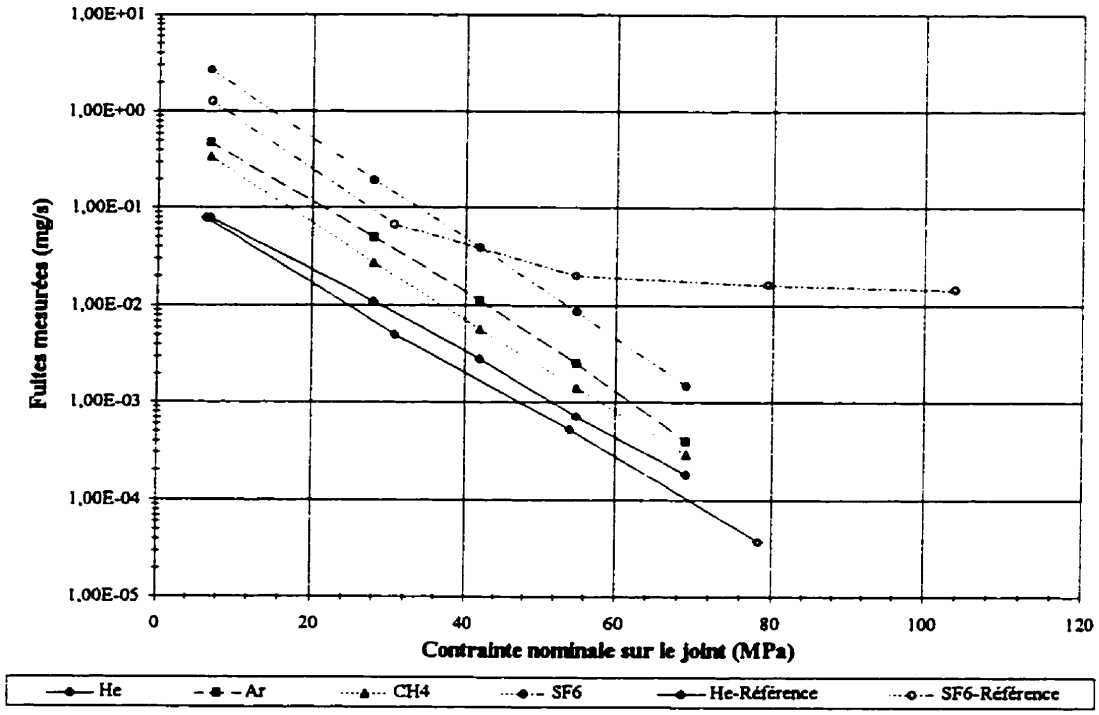


Figure A7.1 : Fuites mesurées - Pression interne 0,689 MPa - Joint type A9
Comparaison avec les résultats de la référence [2]

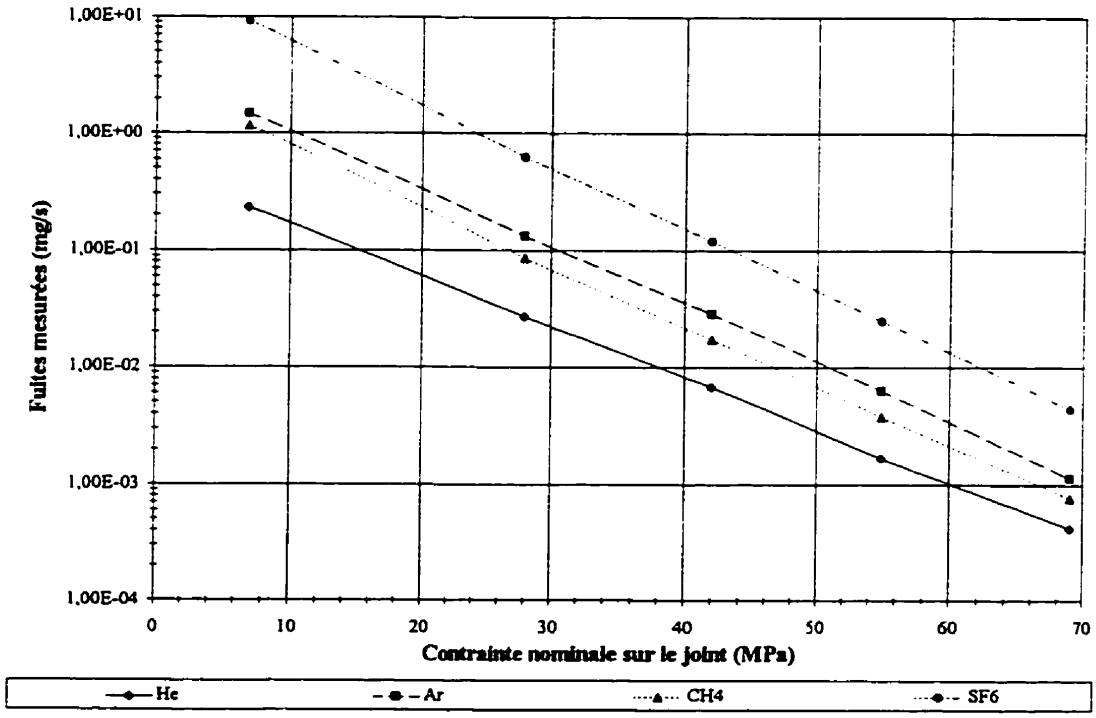


Figure A7.2 : Fuites mesurées - Pression interne 1,379 MPa - Joint type A9

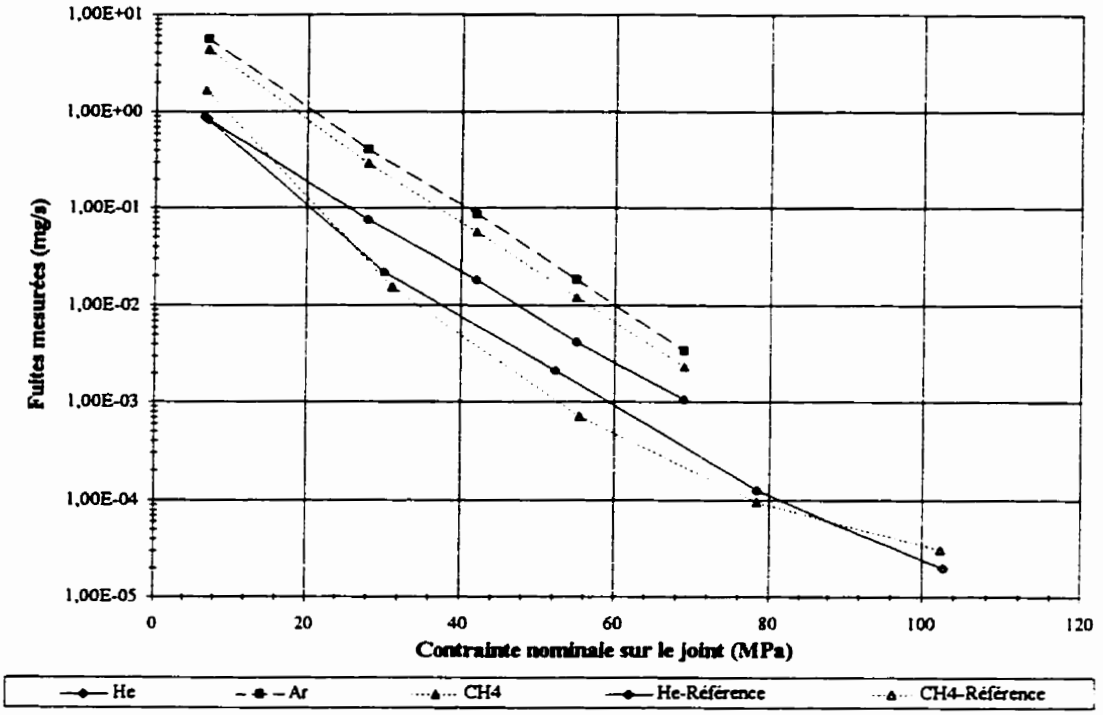


Figure A7.3 : Fuites mesurées - Pression interne 2,758 MPa - Joint type A9
Comparaison avec les résultats de la référence [2]

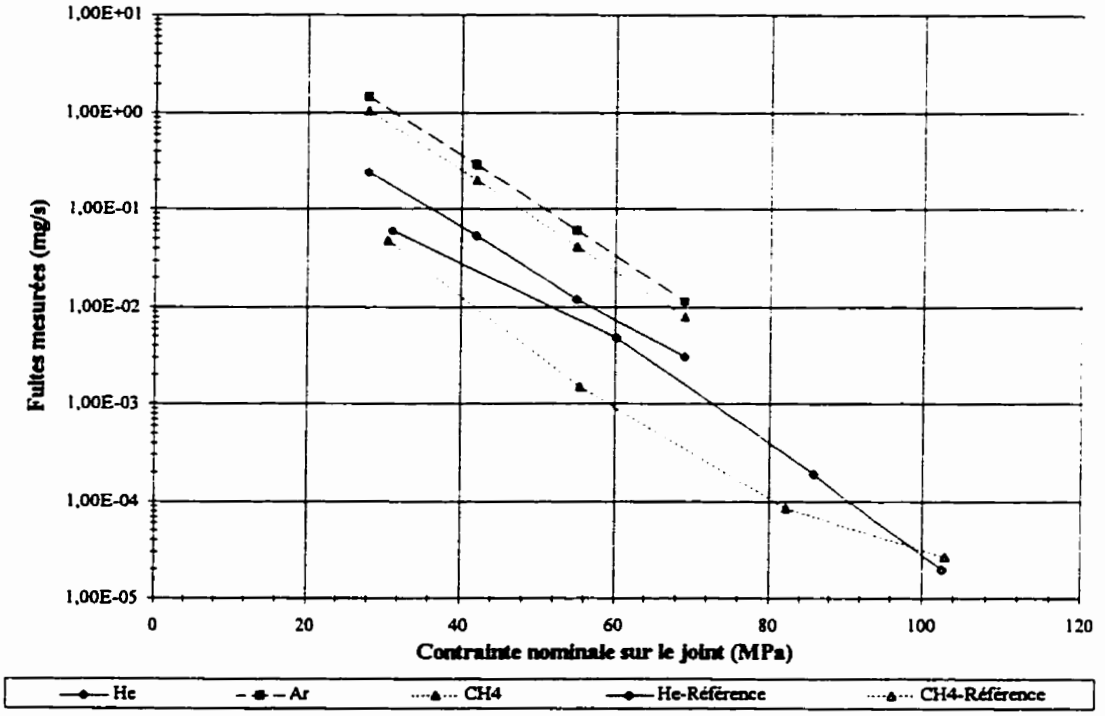


Figure A7.4 : Fuites mesurées - Pression interne 5,516 MPa - Joint type A9
Comparaison avec les résultats de la référence [2]

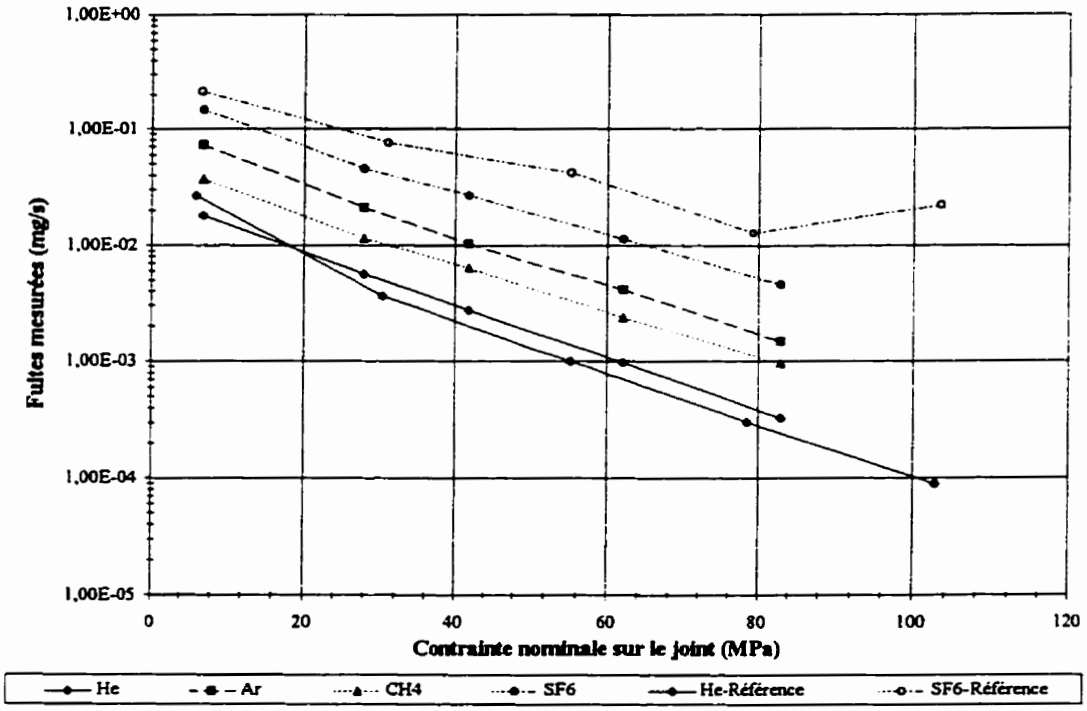


Figure A7.5 : Fuites mesurées - Pression interne 0,689 MPa - Joint type G2
Comparaison avec les résultats de la référence [2]

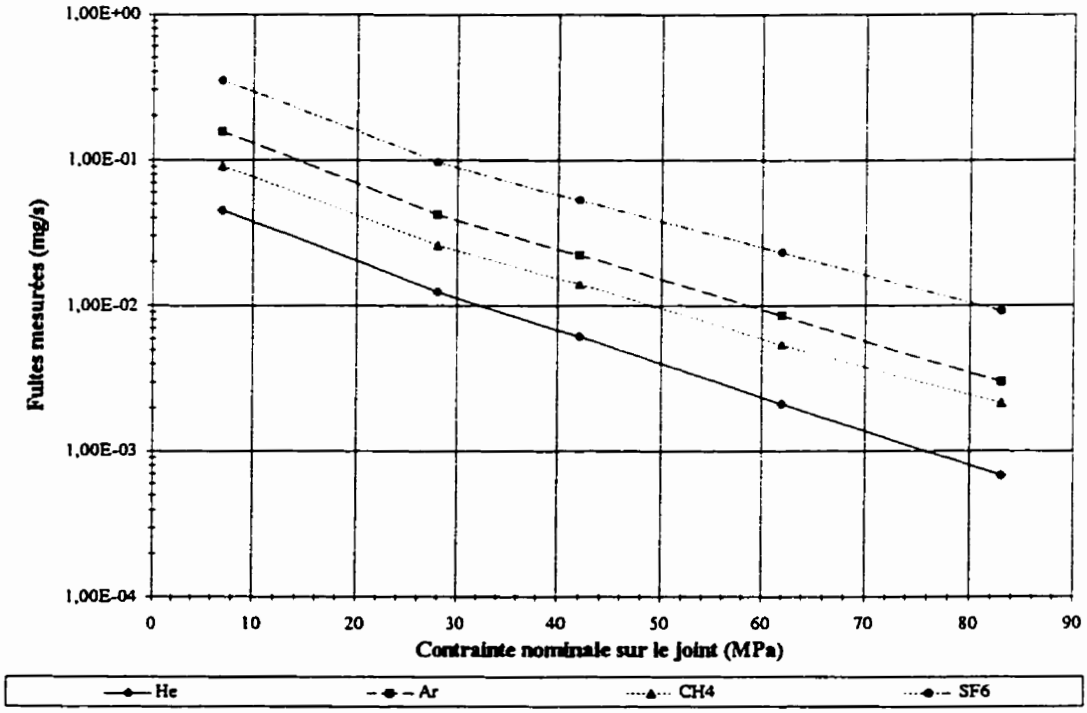


Figure A7.6 : Fuites mesurées - Pression interne 1,379 MPa - Joint type G2

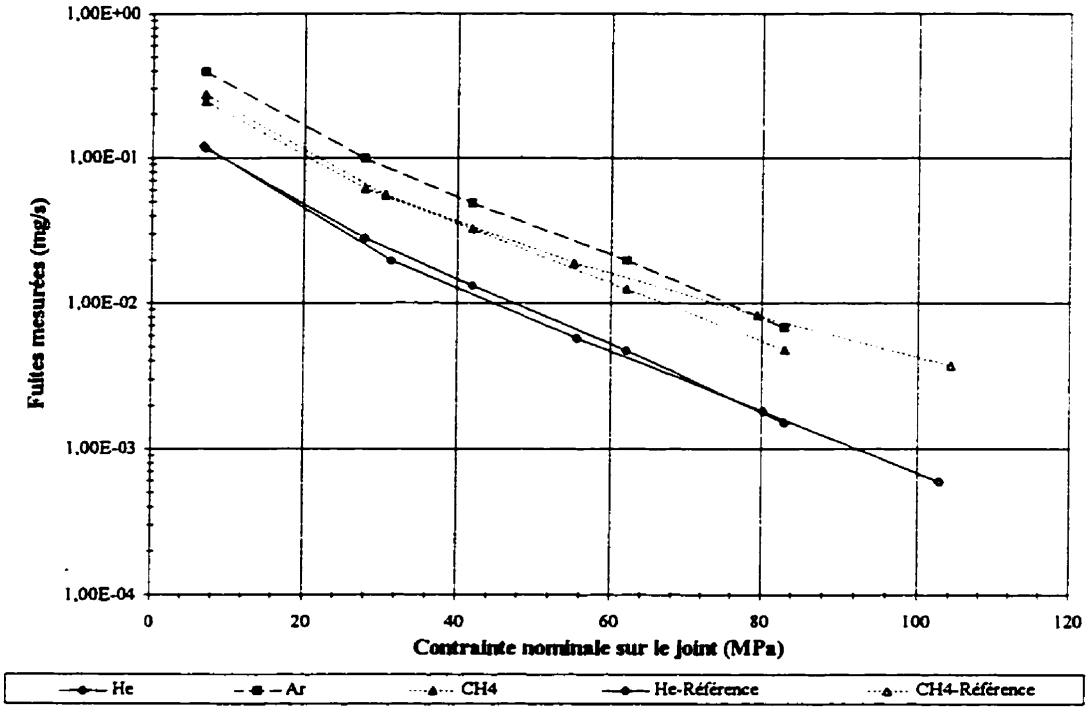


Figure A7.7 : Fuites mesurées - Pression interne 2,758 MPa - Joint type G2
Comparaison avec les résultats de la référence [2]

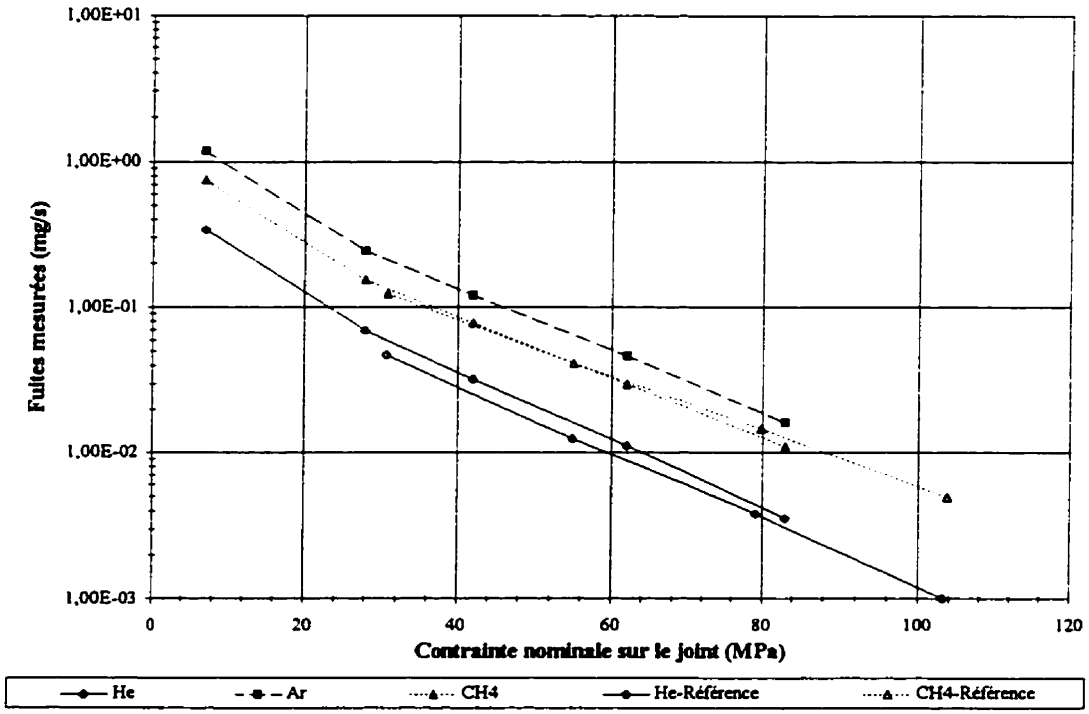


Figure A7.8 : Fuites mesurées - Pression interne 5,516 MPa - Joint type G2
Comparaison avec les résultats de la référence [2]

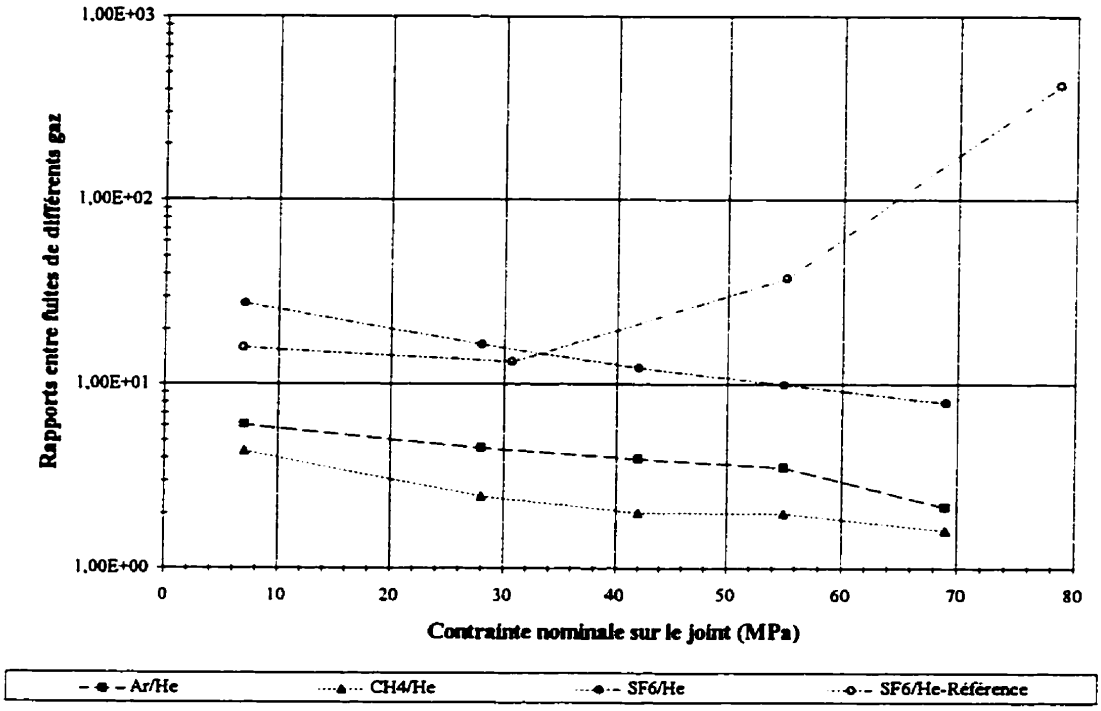


Figure A7.9 : Rapports entre fuites mesurées - Pression interne 0,689 MPa Joint type A9 - Comparaison avec les résultats de la référence [2]

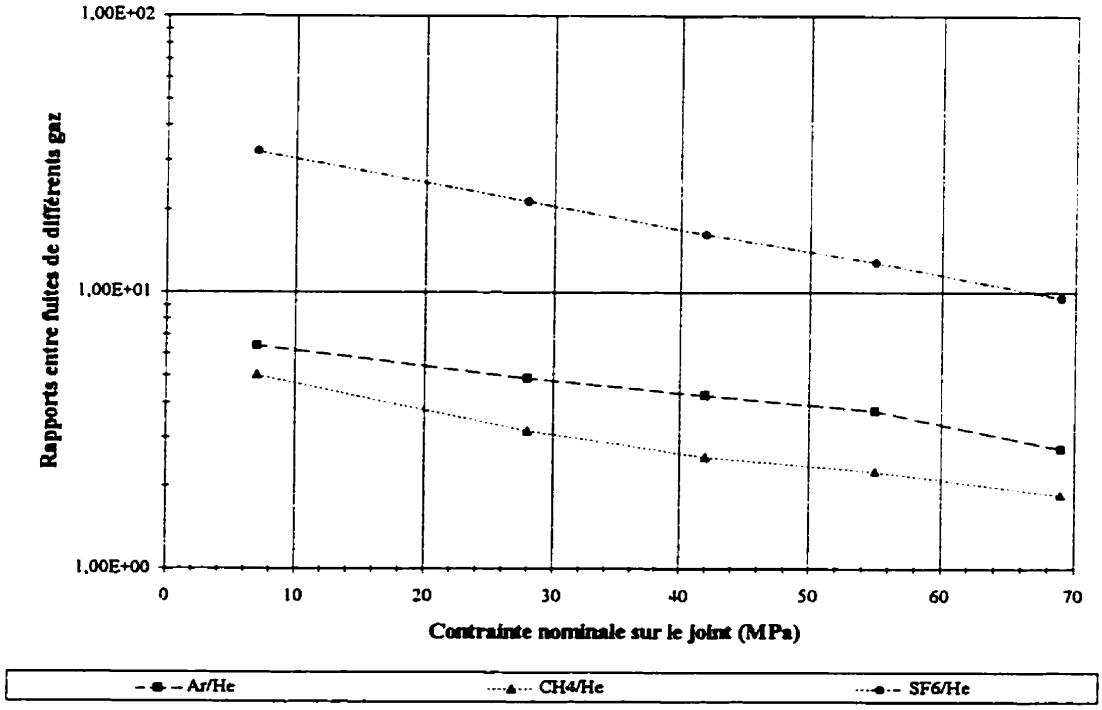


Figure A7.10 : Rapports entre fuites mesurées Pression interne 1,379 MPa - Joint type A9

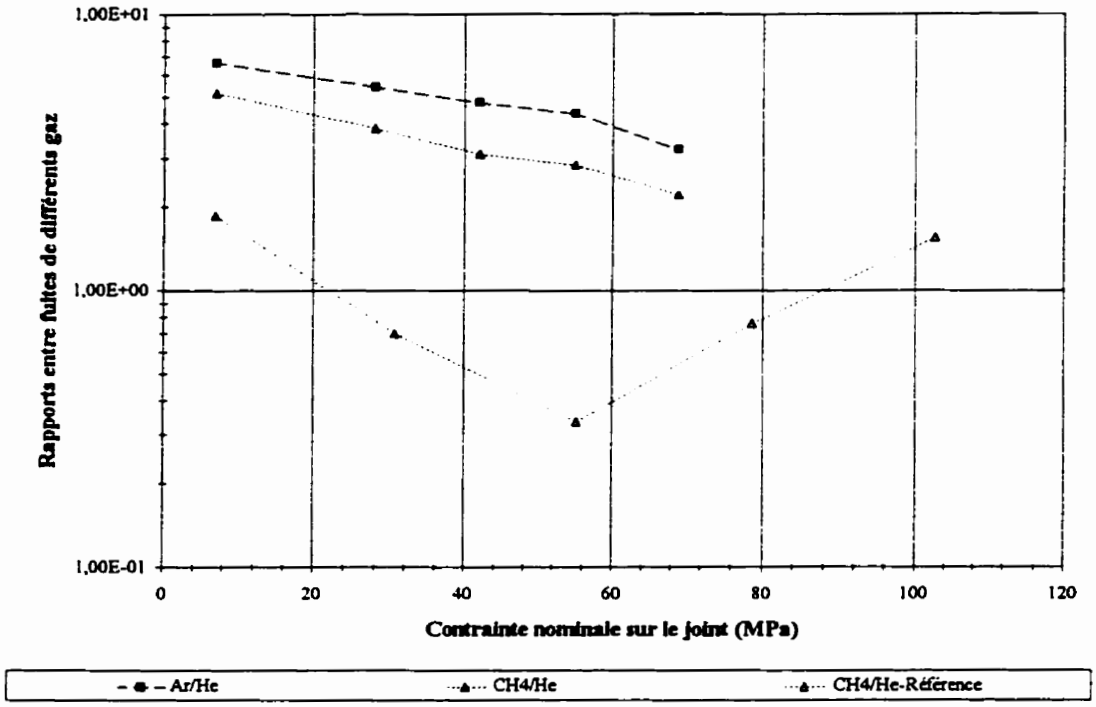


Figure A7.11 : Rapports entre fuites mesurées - Pression interne 2,758 MPa Joint type A9 - Comparaison avec les résultats de la référence [2]

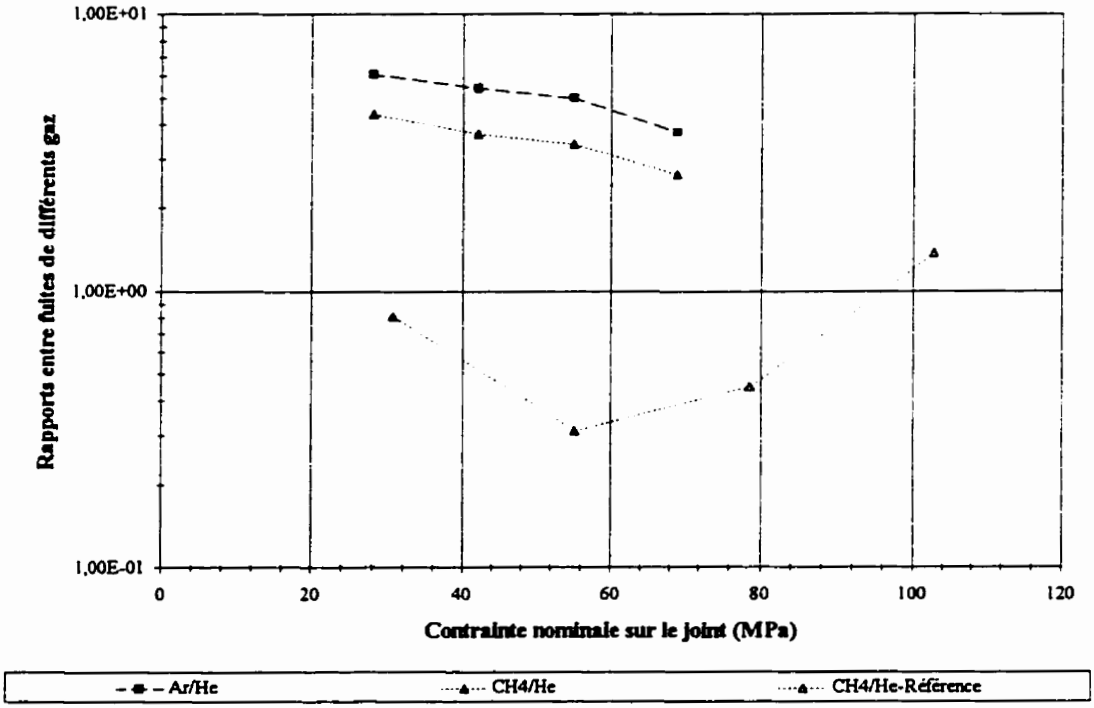


Figure A7.12 : Rapports entre fuites mesurées - Pression interne 5,516 MPa Joint type A9 - Comparaison avec les résultats de la référence [2]

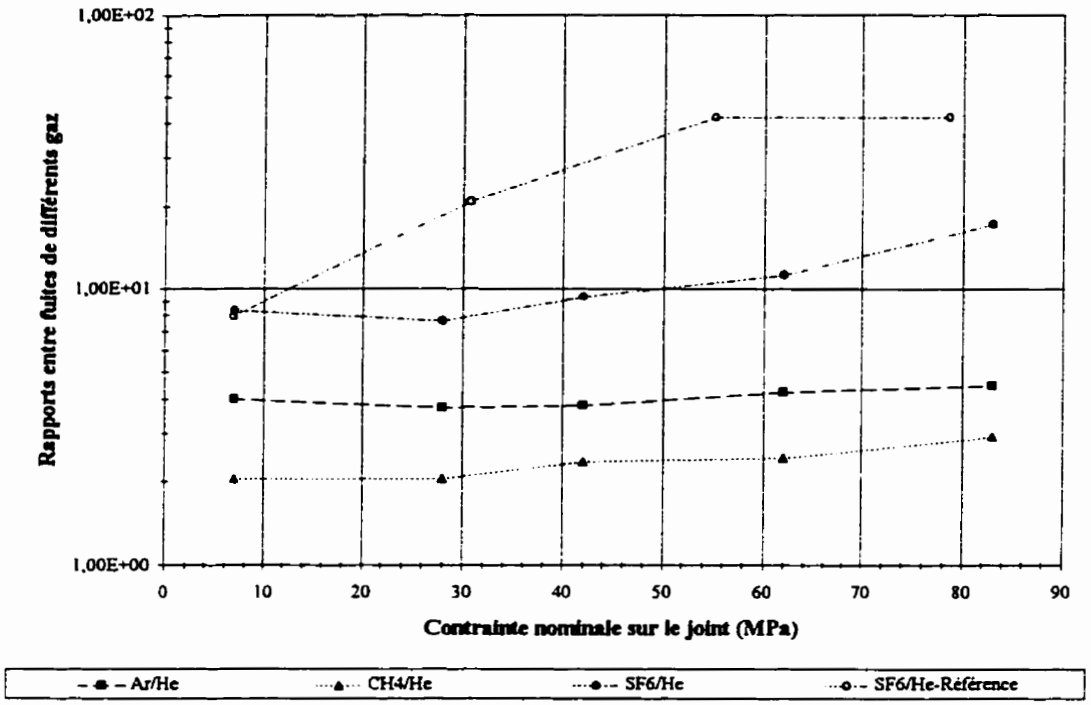


Figure A7.13 : Rapports entre fuites mesurées - Pression interne 0,689 MPa Joint type G2 - Comparaison avec les résultats de la référence [2]

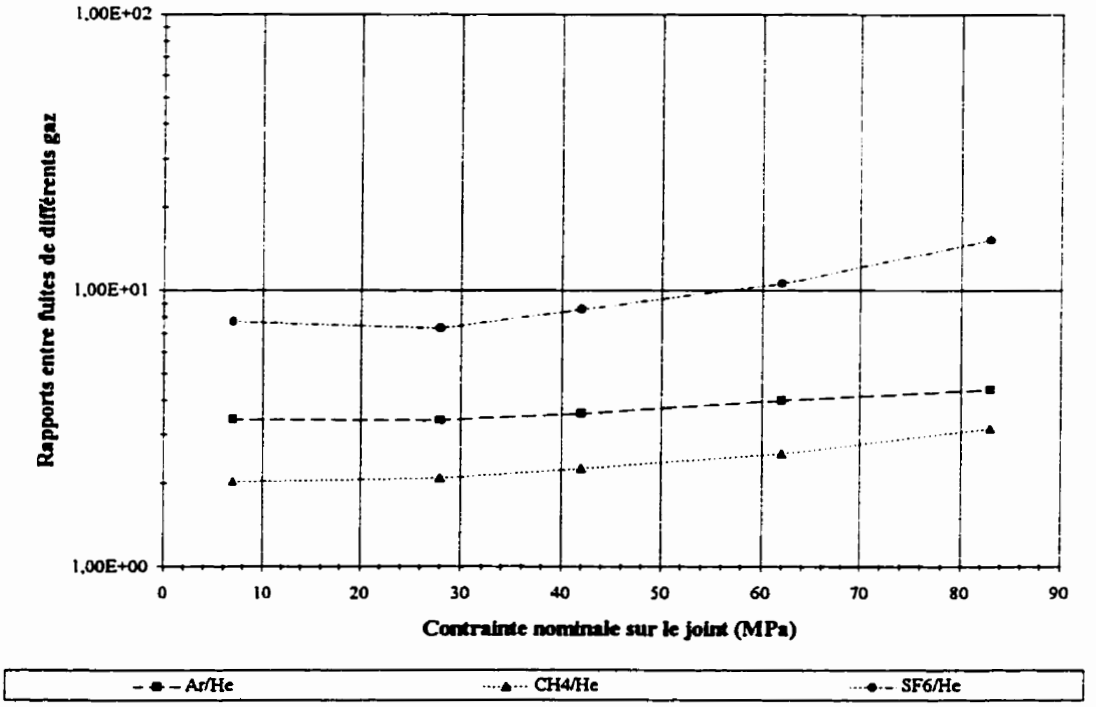


Figure A7.14 : Rapports entre fuites mesurées Pression interne 1,379 MPa - Joint type G2

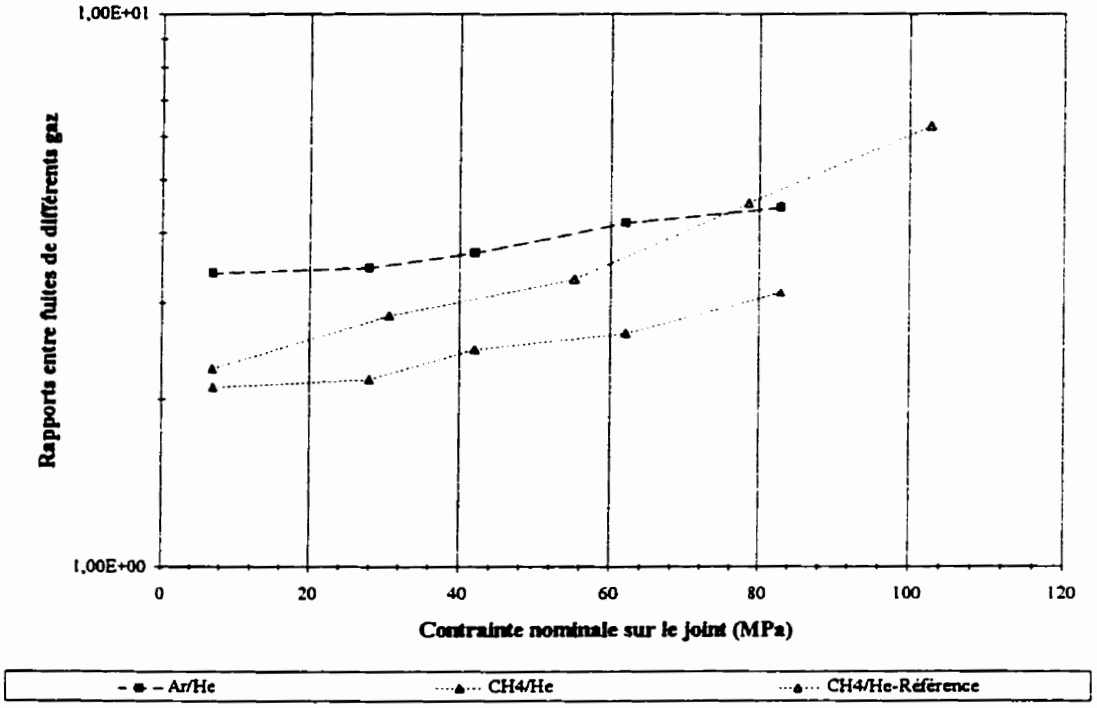


Figure A7.15 : Rapports entre fuites mesurées - Pression interne 2,758 MPa Joint type G2 - Comparaison avec les résultats de la référence [2]

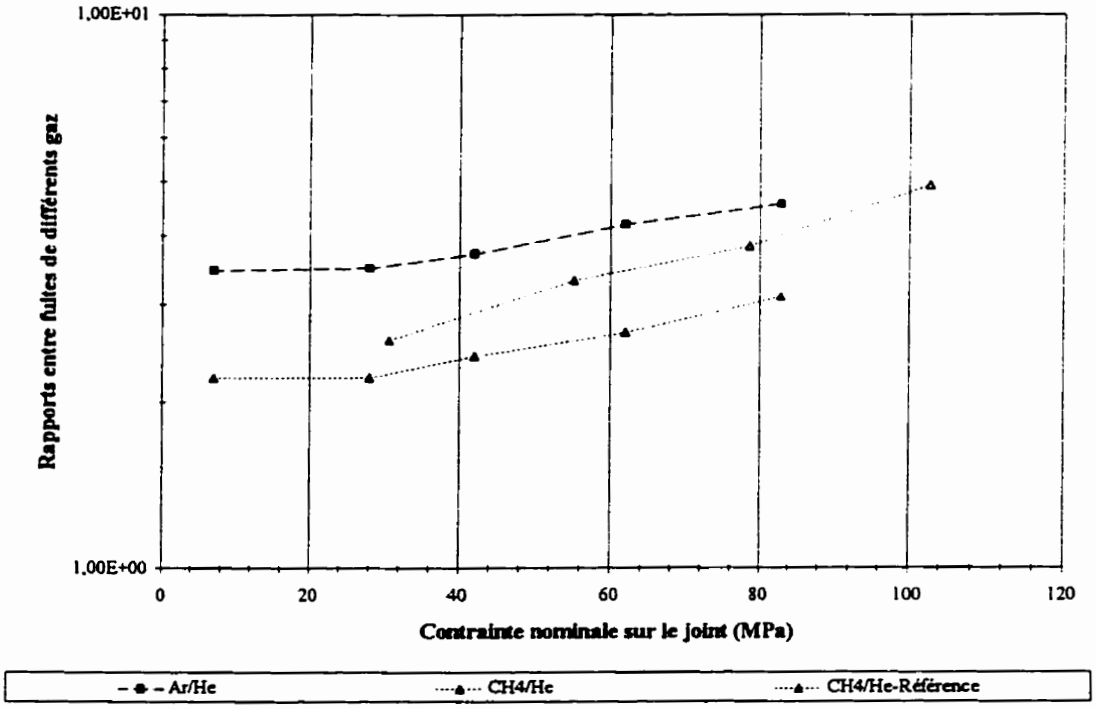


Figure A7.16 : Rapports entre fuites mesurées - Pression interne 5,516 MPa Joint type G2 - Comparaison avec les résultats de la référence [2]

ANNEXE 8

RAPPORTS ENTRE FUITES DE DIFFERENTS GAZ

Les figures de cette annexe présentent les évolutions avec la contrainte appliquée sur le joint des rapports entre les fuites mesurées des différents gaz utilisés et celles de l'hélium.

Les fuites utilisées pour le calcul de ces rapports sont issues d'un essai sur un même joint soumis à des conditions identiques de contrainte et de pression.

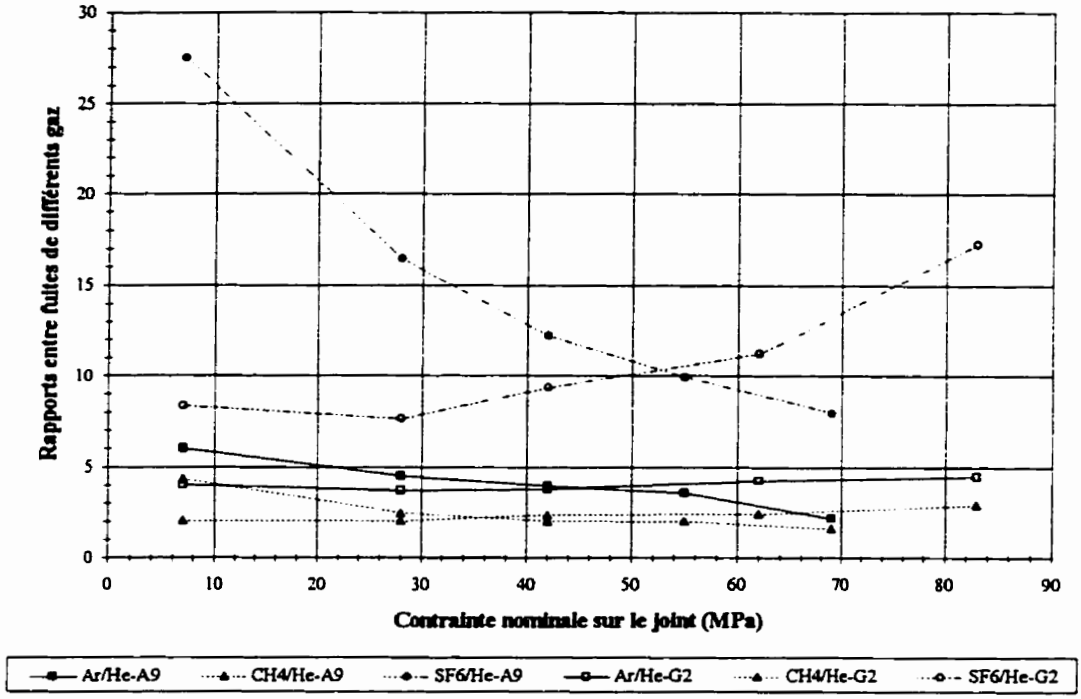


Figure A8.1 : Evolution des rapports entre les fuites de différents gaz et les fuites d'hélium - Joints A9 et G2 - Pression interne 0,689 MPa

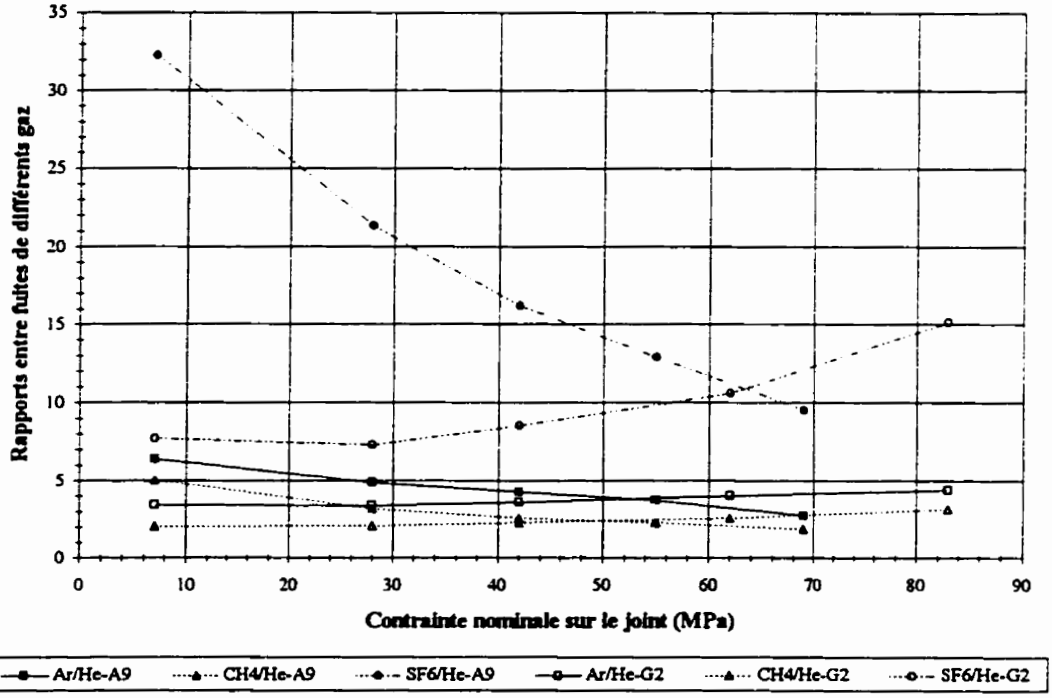


Figure A8.2 : Evolution des rapports entre les fuites de différents gaz et les fuites d'hélium - Joints A9 et G2 - Pression interne 1,379 MPa

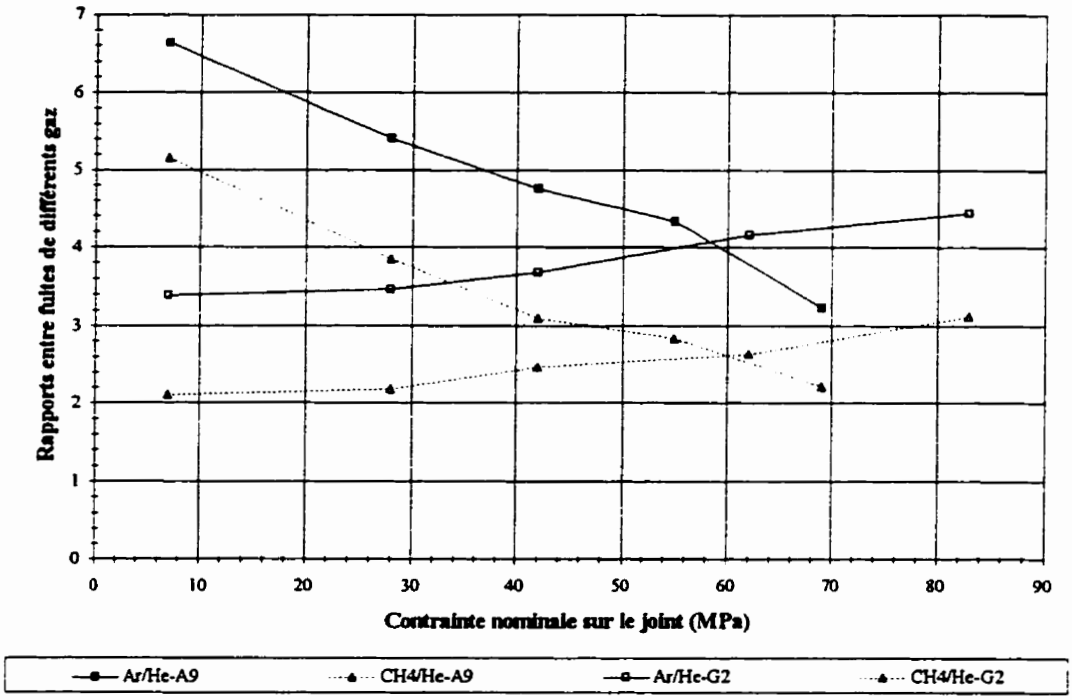


Figure A8.3 : Evolution des rapports entre les fuites de différents gaz et les fuites d'hélium - Joints A9 et G2 - Pression interne 2,758 MPa

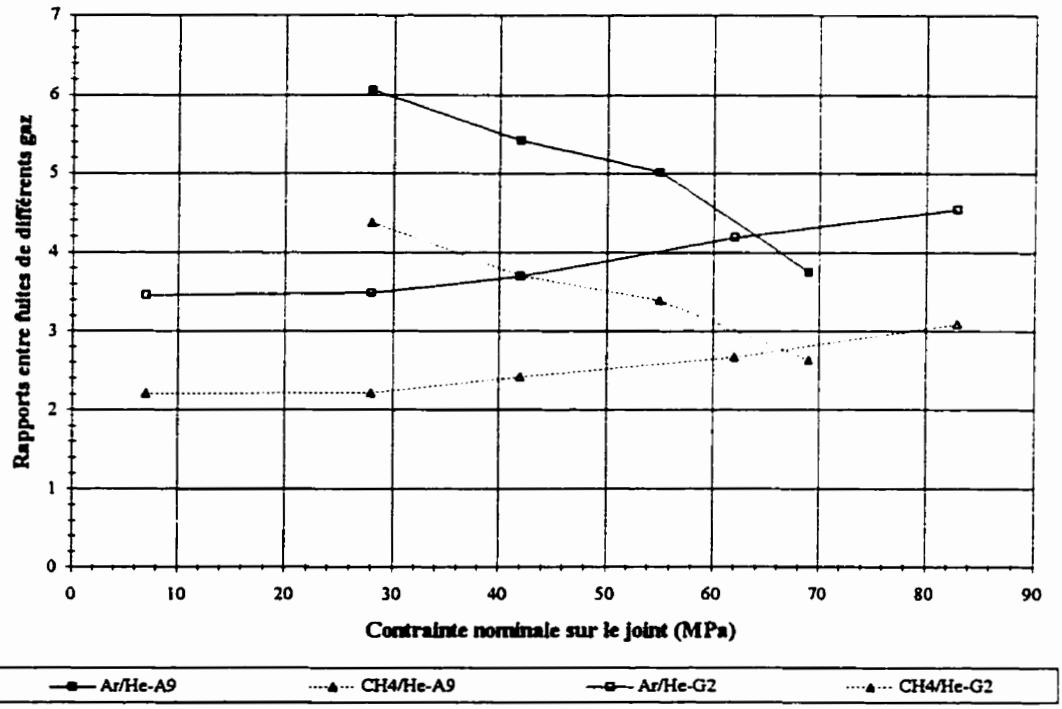


Figure A8.4 : Evolution des rapports entre les fuites de différents gaz et les fuites d'hélium - Joints A9 et G2 - Pression interne 5,516 MPa

ANNEXE 9

PERFORMANCES DES MODES DE CALCUL

Cette annexe présente deux séries de figure destinées à évaluer les performances des modes de calcul laminaire, intermédiaire et moléculaires proposés.

La première série de figures (A9.1 à A9.18) se propose d'étudier l'aspect qualitatif de ces performances. Les évolutions des fuites mesurées et calculées sont donc présentées en fonction de la pression. Sur chacune de ces figures, les mesures d'hélium sont présentées. L'équation de la courbe polynomiale, déterminée par la méthode des moindres carrés, qui représente le mieux ces mesures est donnée. Le paramètre y de ces équations correspond au débit massique du joint, le paramètre x correspond à la pression interne. Les courbes représentant les fuites du gaz cible calculées par chacun des trois modes de calcul sont ensuite tracées. Elles peuvent être comparées à l'évolution de la fuite de ce gaz cible mesurée lors des essais.

La seconde série de figures (A9.19 à A9.30) présentera l'aspect quantitatif de ces performances. Pour cela, la valeur relative entre les fuites calculées et celles mesurées est présentée en fonction de la fuite d'hélium mesurée. Sur chaque figure, les courbes correspondant aux trois modes de calcul, appliqués à un même gaz, sont illustrées. La valeur relative entre la fuite calculée et celle mesurée est définie par :

$$\text{Valeur relative (\%)} = \frac{\text{Fuite d'un gaz cible calculée par un mode de calcul}}{\text{Fuite mesurée de ce gaz cible}} * 100$$

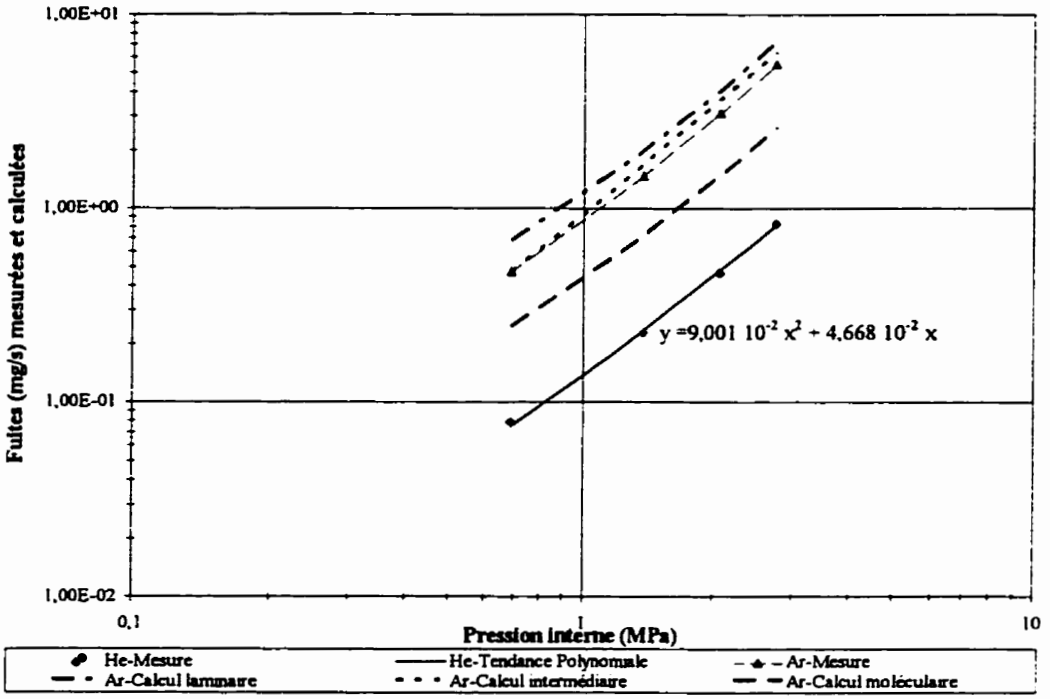


Figure A9.1 : Corrélation He - Ar suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 7 MPa

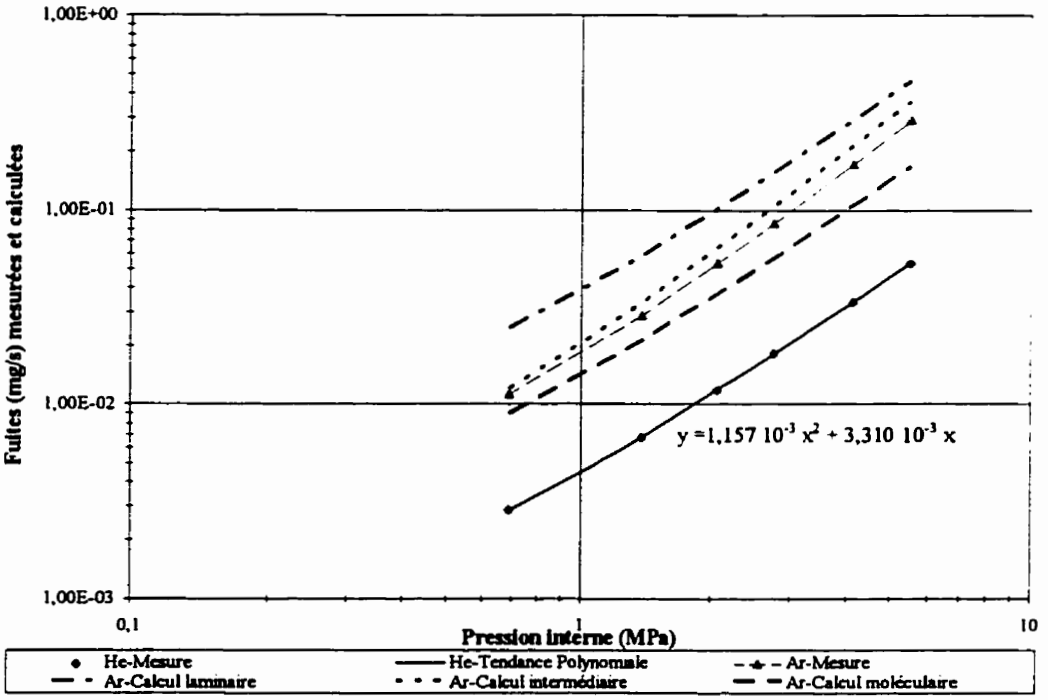


Figure A9.2 : Corrélation He - Ar suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 42 MPa

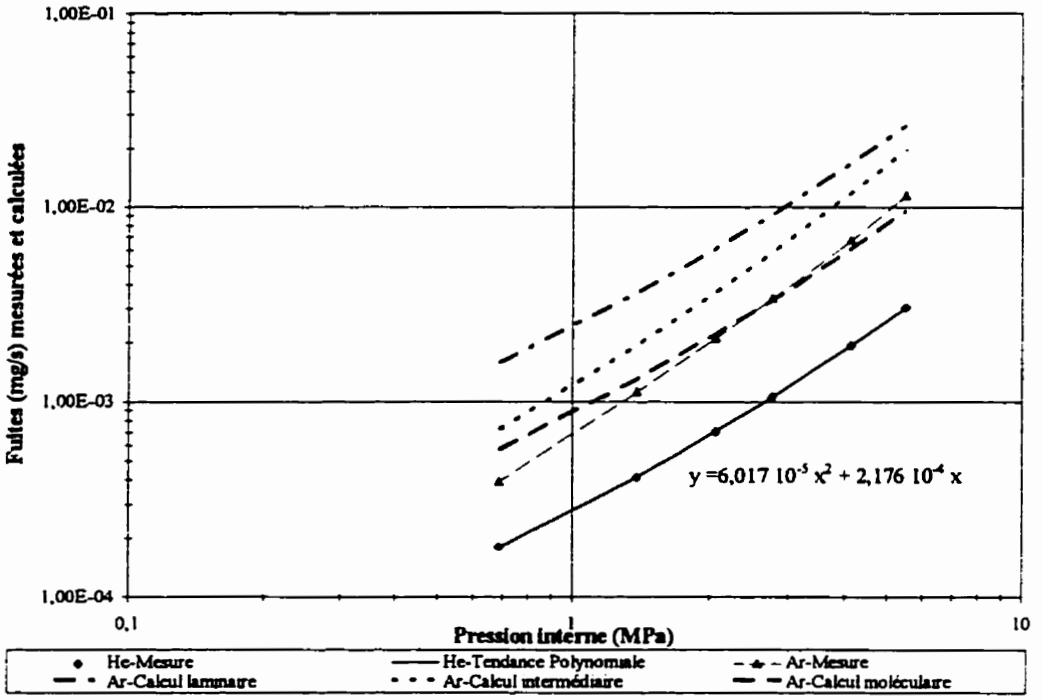


Figure A9.3 : Corrélation He - Ar suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 69 MPa

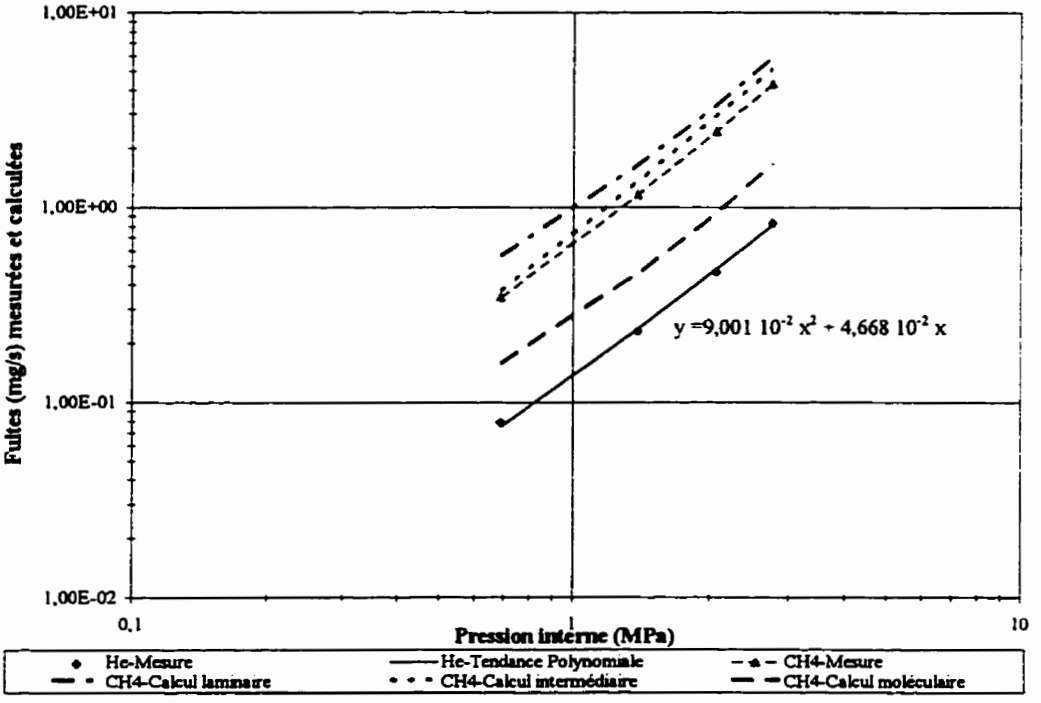


Figure A9.4 : Corrélation He - CH4 suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 7 MPa

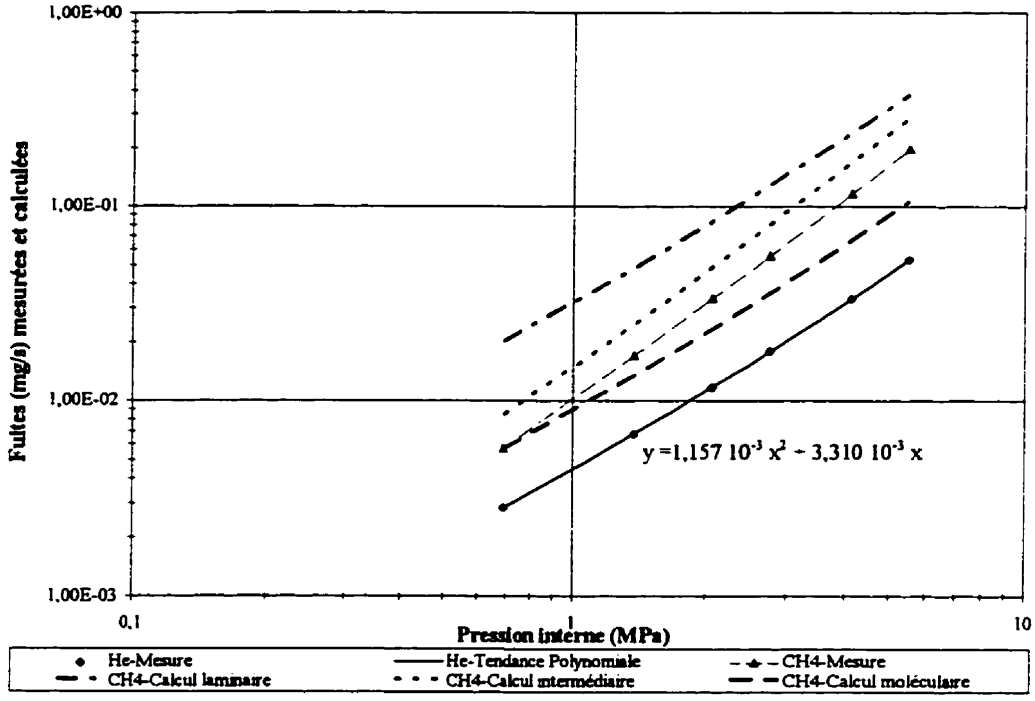


Figure A9.5 : Corrélation He - CH4 suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 42 MPa

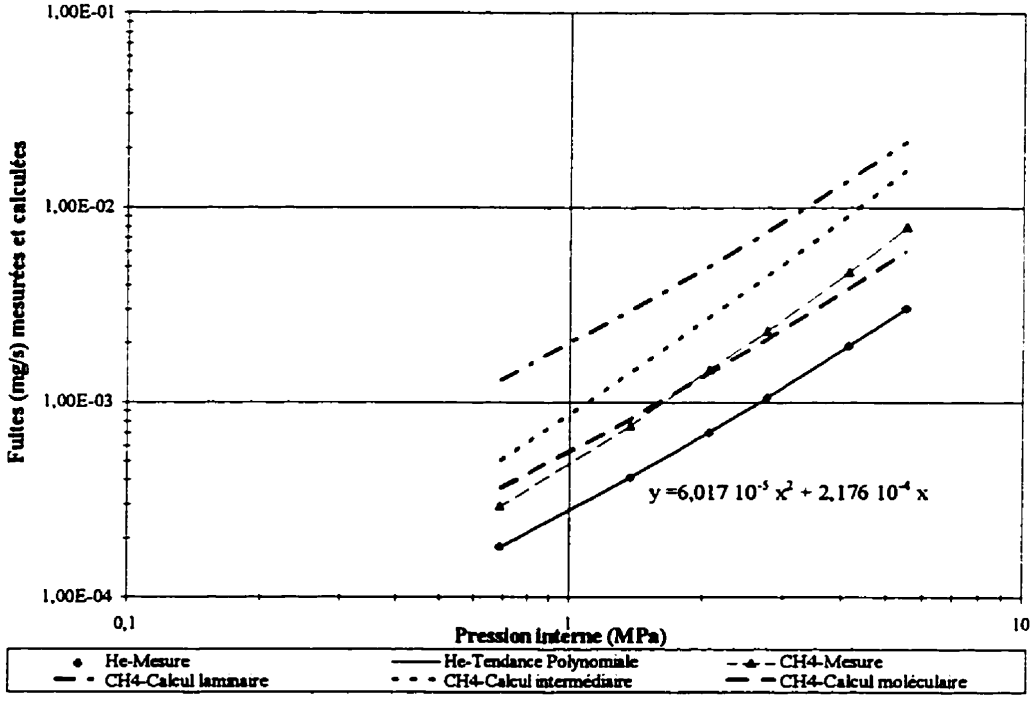


Figure A9.6 : Corrélation He - CH4 suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 69 MPa

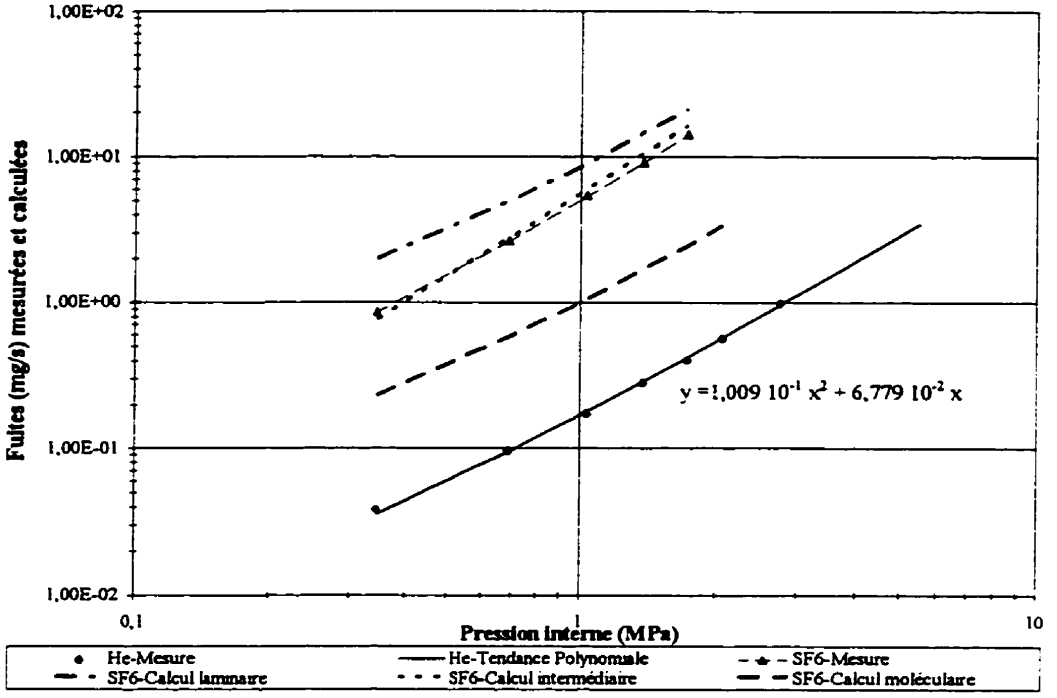


Figure A9.7 : Corrélation He - SF6 suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 2 - Contrainte nominale sur le joint 7 MPa

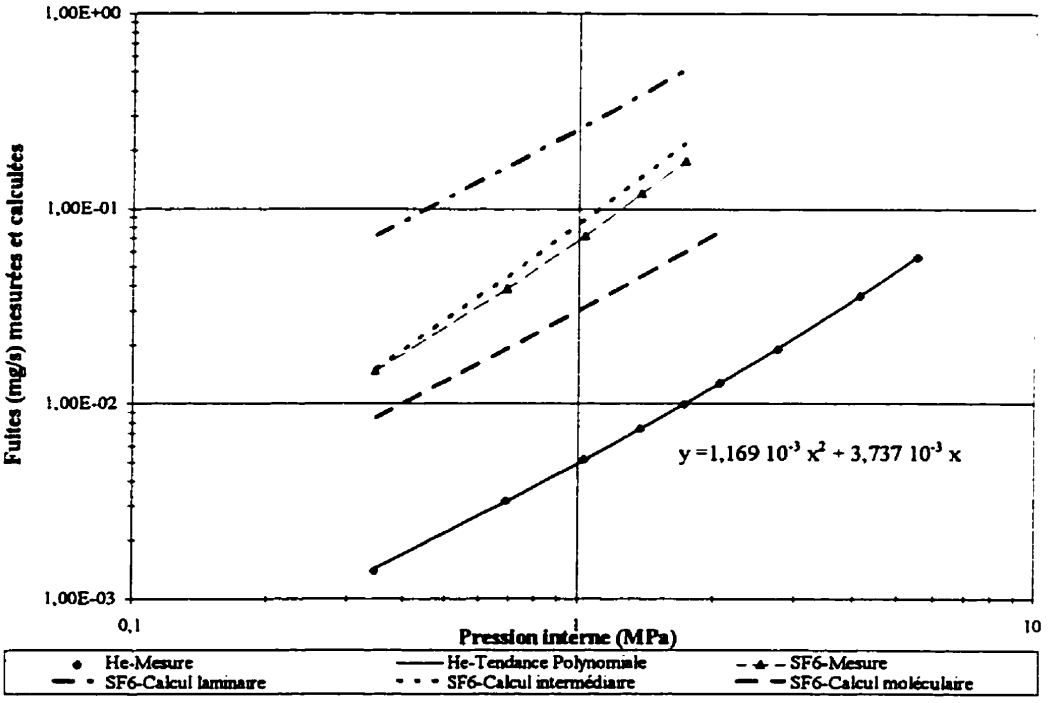


Figure A9.8 : Corrélation He - SF6 suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 2 - Contrainte nominale sur le joint 42 MPa

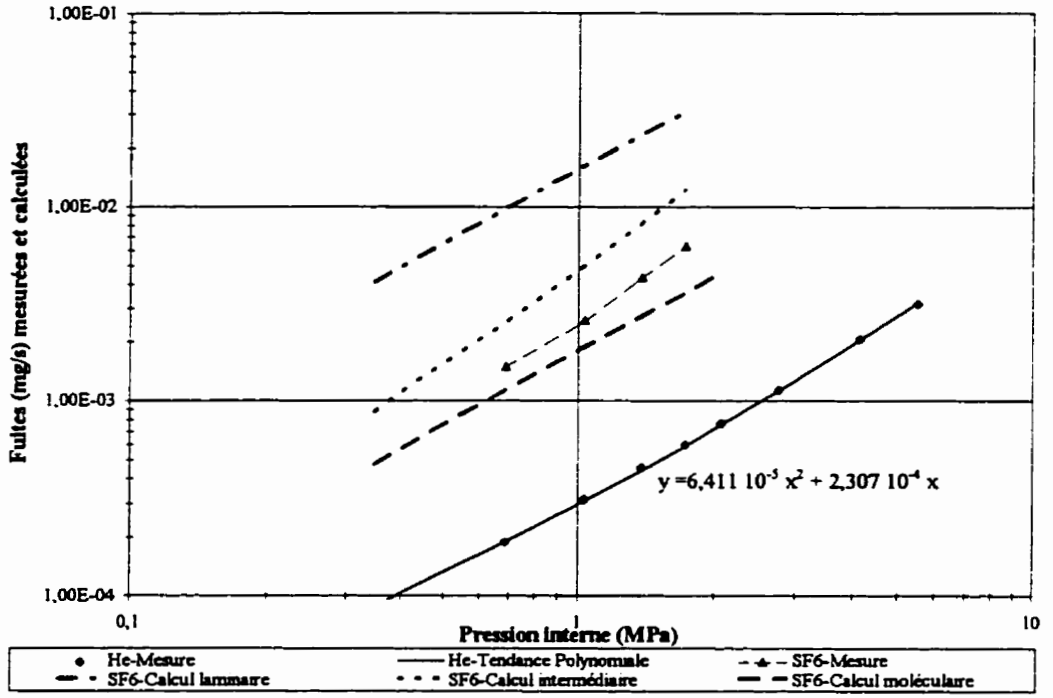


Figure A9.9 : Corrélation He - SF6 suivant les trois modes de calcul
Joint type A9 - Essai 2 - Contrainte nominale sur le joint 69 MPa

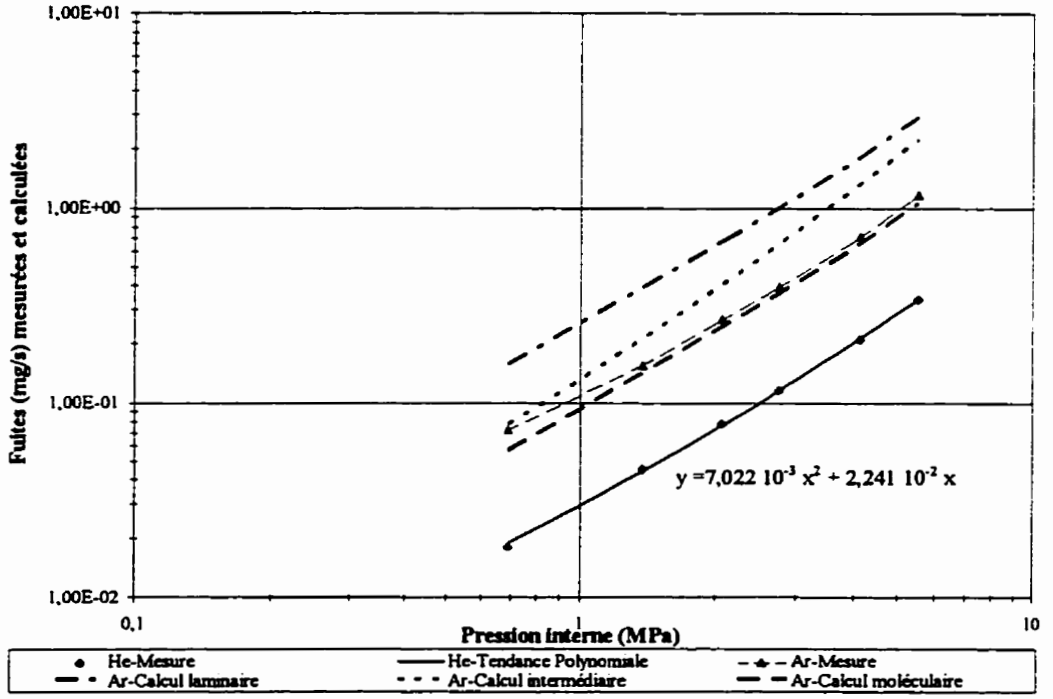


Figure A9.10 : Corrélation He - Ar suivant les trois modes de calcul
Joint type G2 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 7 MPa

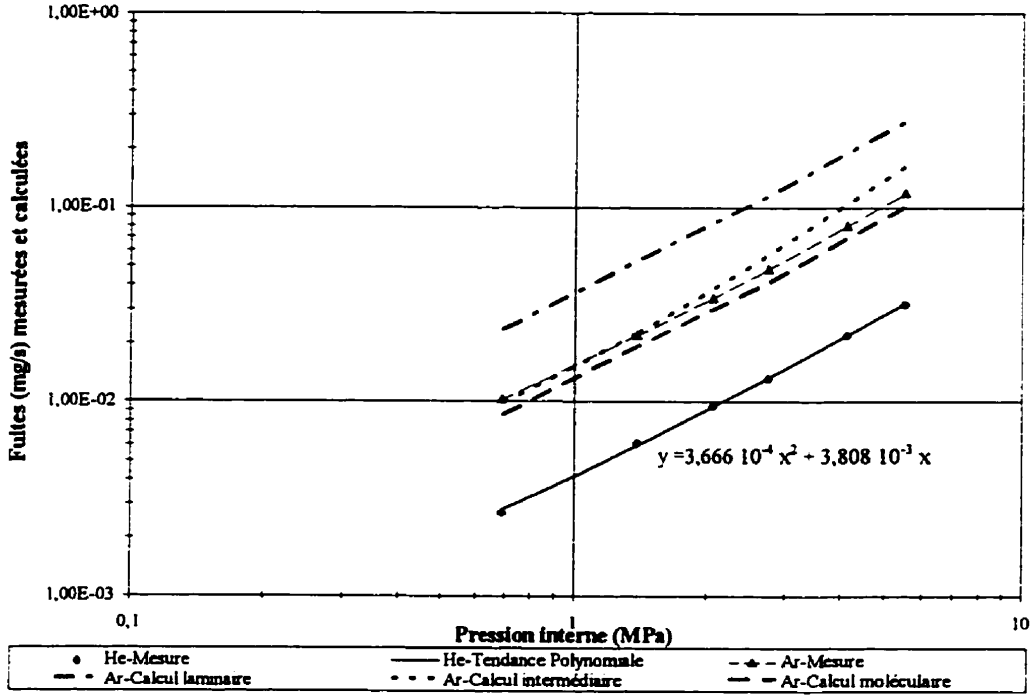


Figure A9.11 : Corrélation He - Ar suivant les trois modes de calcul Joint type G2 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 42 MPa

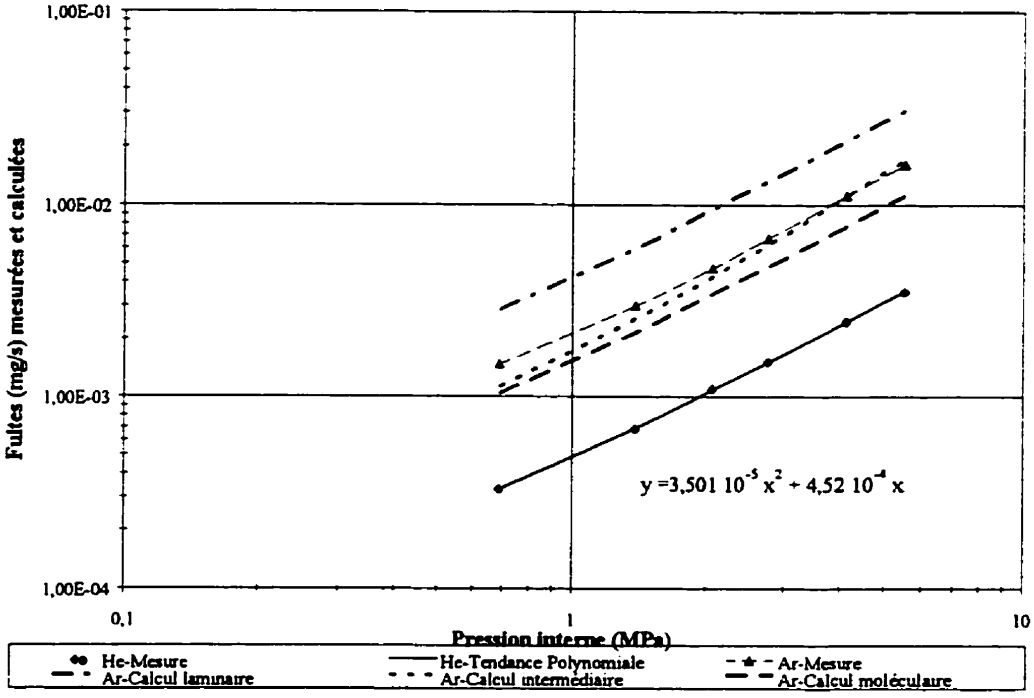


Figure A9.12 : Corrélation He - Ar suivant les trois modes de calcul Joint type G2 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 83 MPa

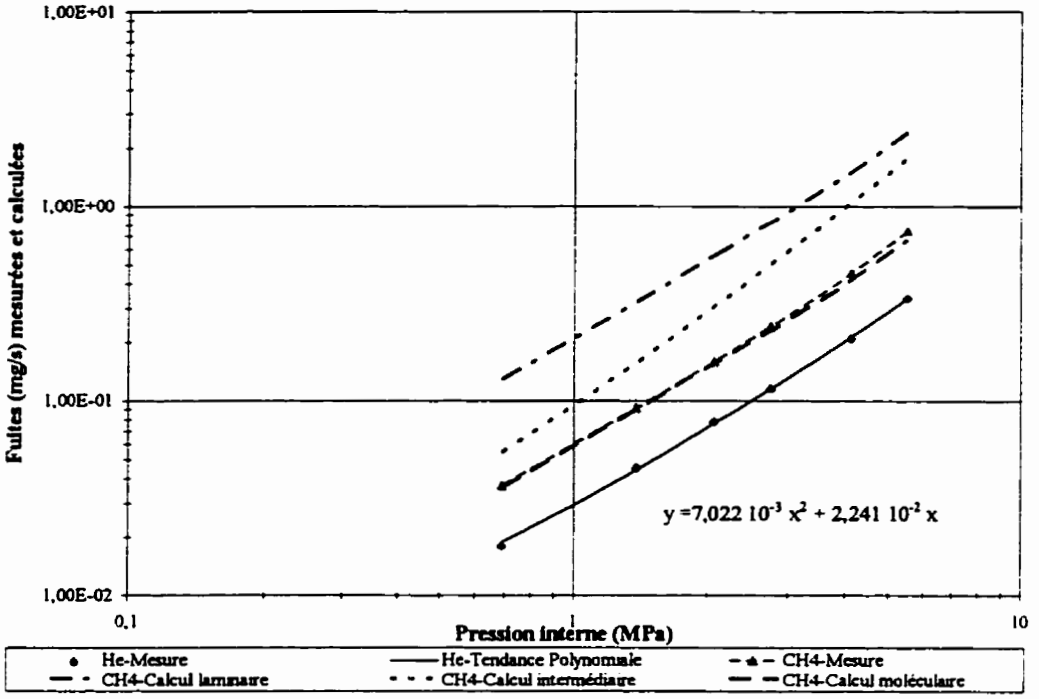


Figure A9.13 : Corrélation He - CH4 suivant les trois modes de calcul
Joint type G2 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 7 MPa

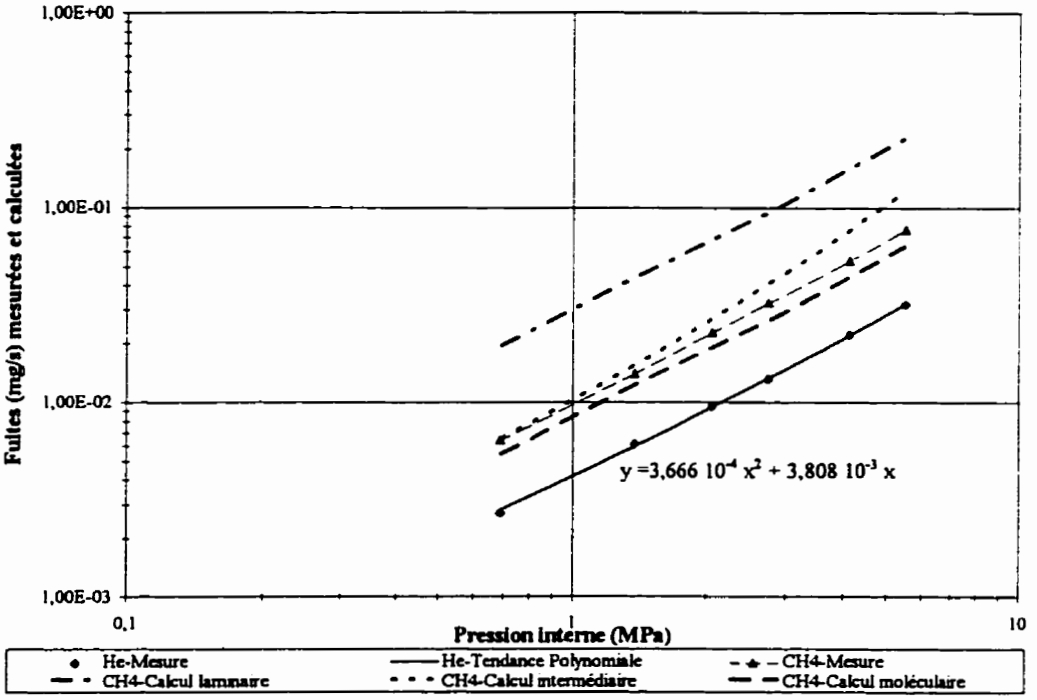


Figure A9.14 : Corrélation He - CH4 suivant les trois modes de calcul
Joint type G2 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 42 MPa

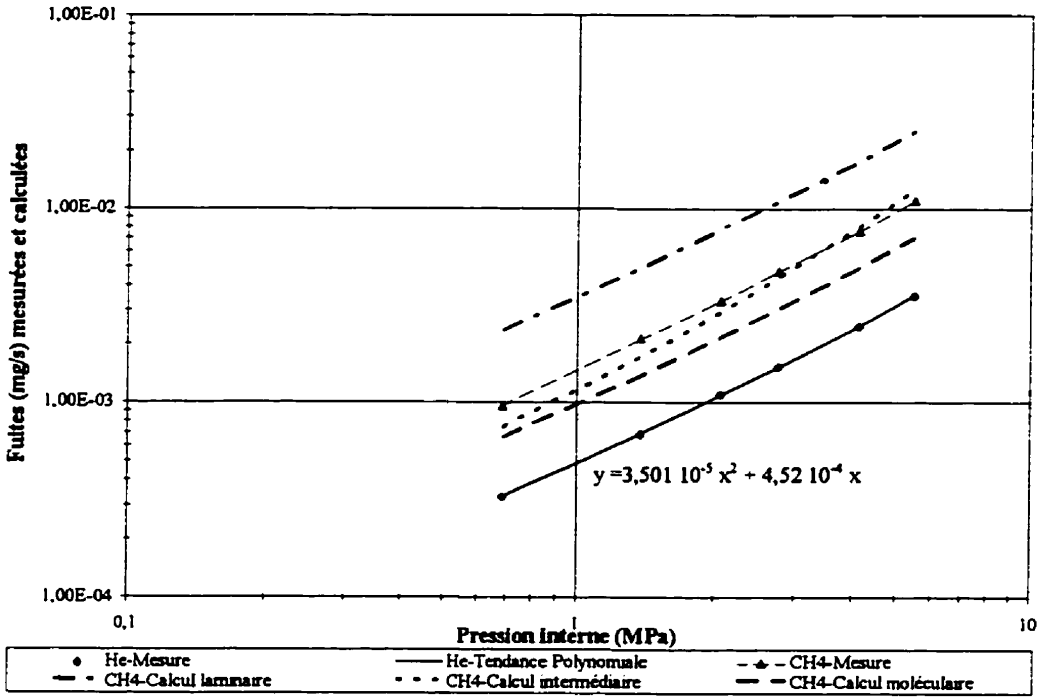


Figure A9.15 : Corrélation He - CH4 suivant les trois modes de calcul
Joint type G2 - Essai 3 - Contrainte nominale sur le joint 83 MPa

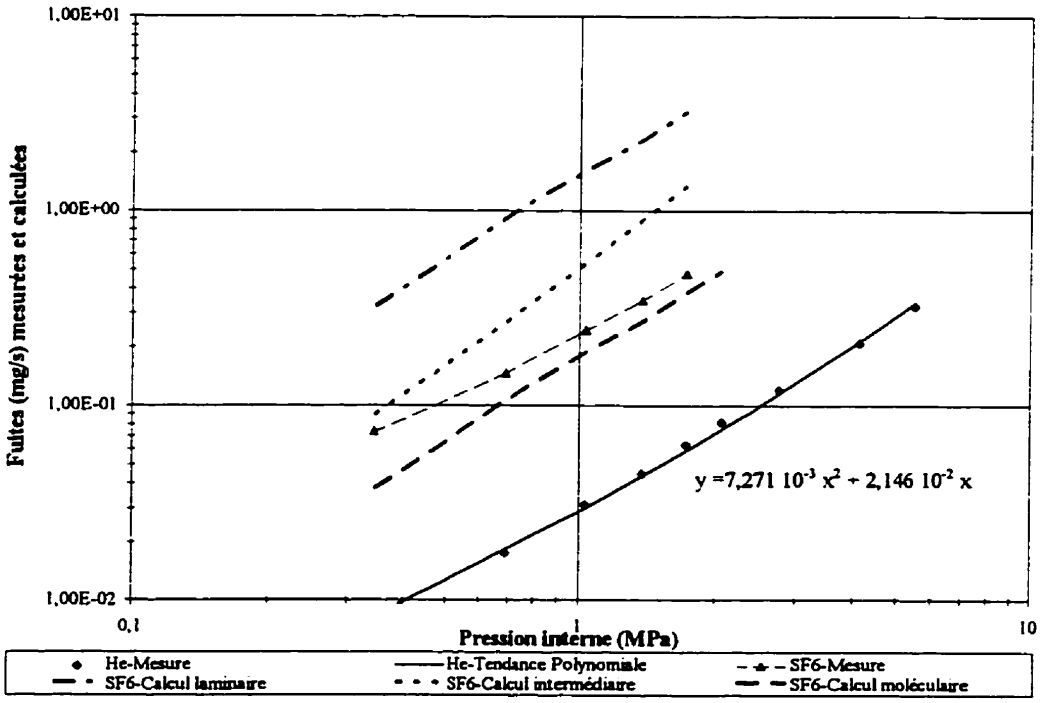


Figure A9.16 : Corrélation He - SF6 suivant les trois modes de calcul
Joint type G2 - Essai 2 - Contrainte nominale sur le joint 7 MPa

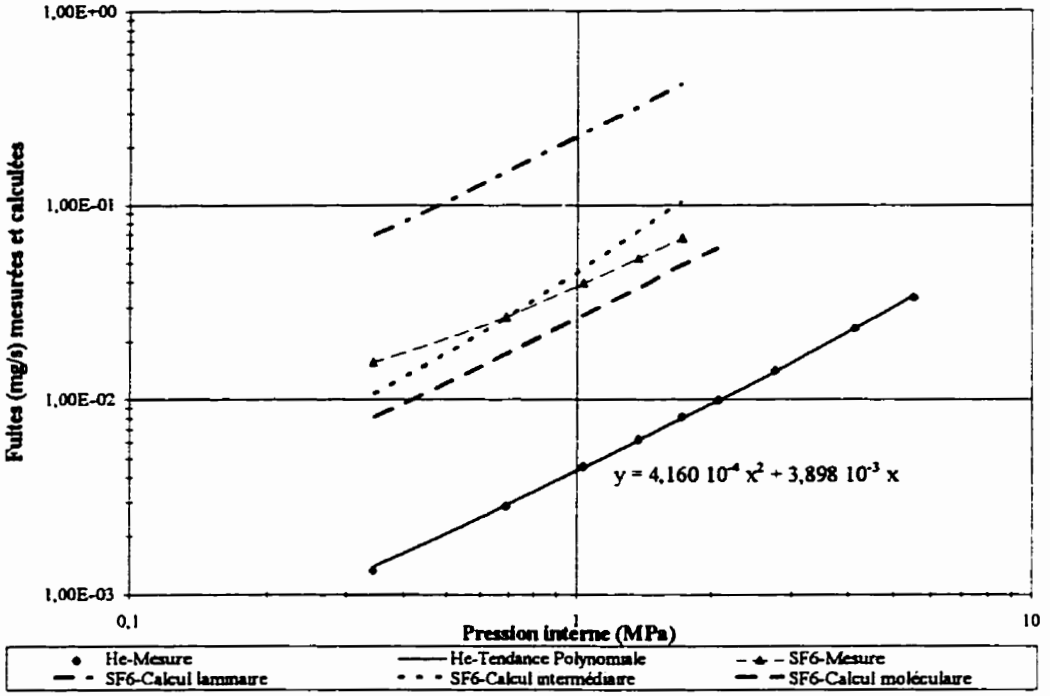


Figure A9.17: Corrélation He - SF6 suivant les trois modes de calcul Joint type G2 - Essai 2 - Contrainte nominale sur le joint 42 MPa

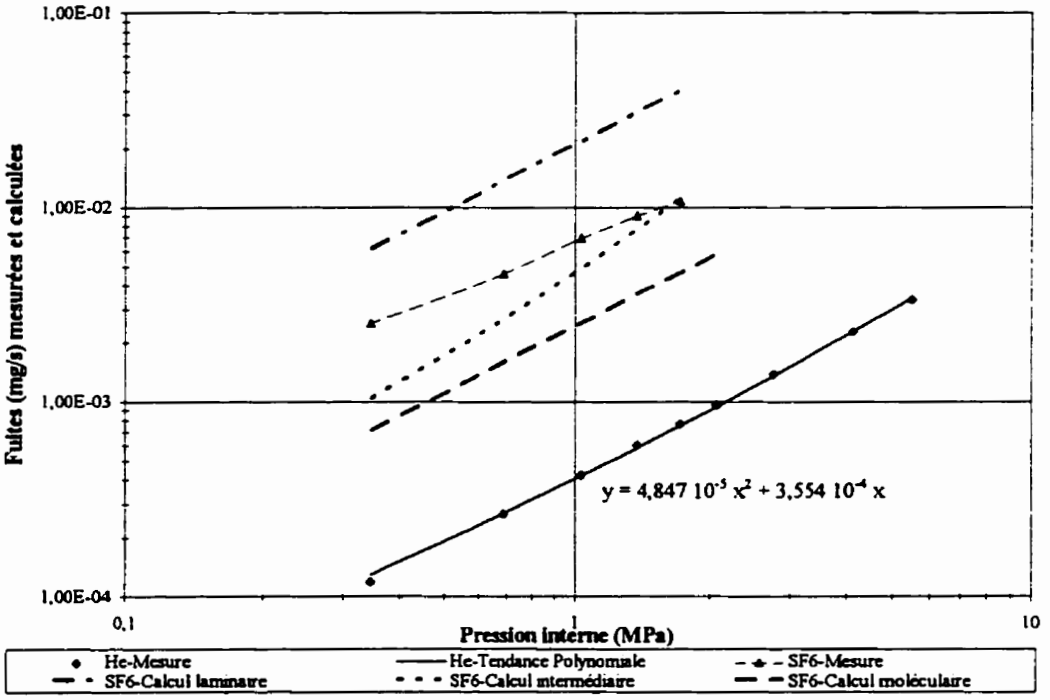


Figure A9.18 : Corrélation He - SF6 suivant les trois modes de calcul Joint type G2 - Essai 2 - Contrainte nominale sur le joint 83 MPa

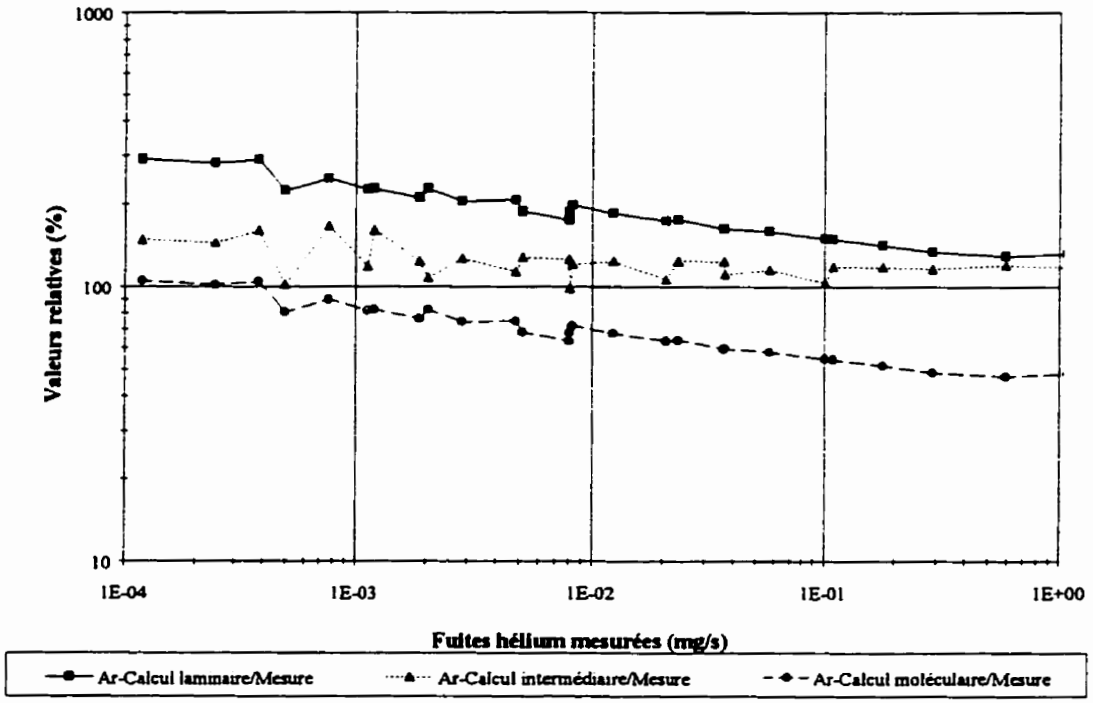


Figure A9.19 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type A9 - Argon - Essai 1

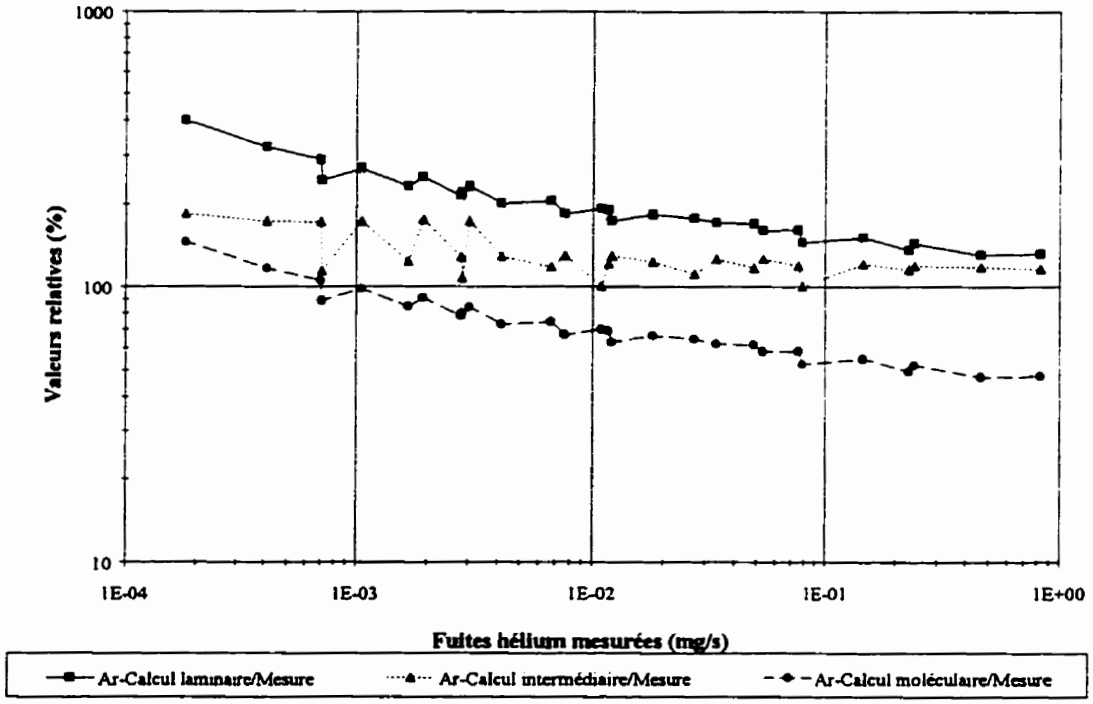


Figure A9.20 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type A9 - Argon - Essai 3

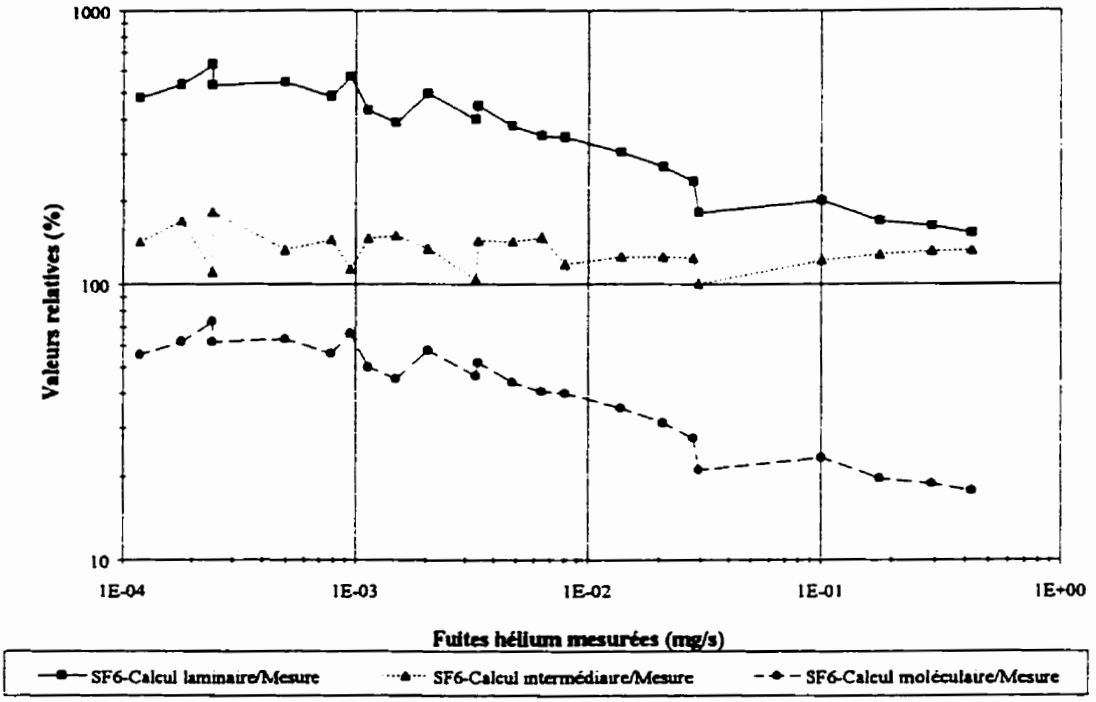


Figure A9.21 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type A9 - SF6 - Essai 1

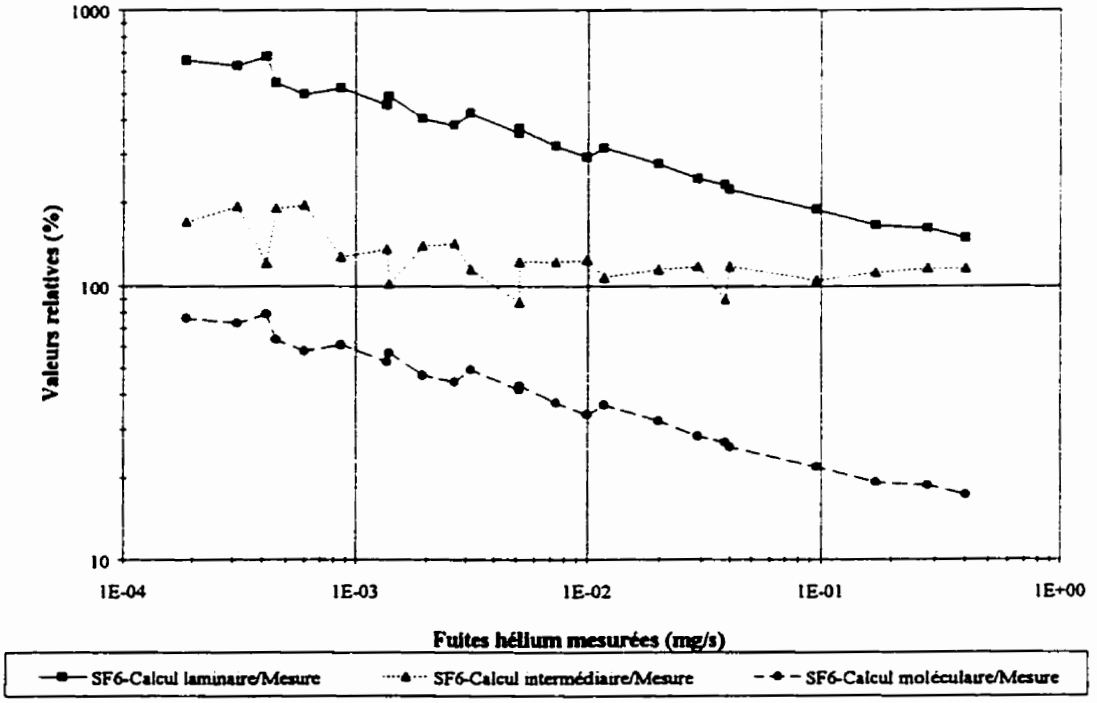


Figure A9.22 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type A9 - SF6 - Essai 2

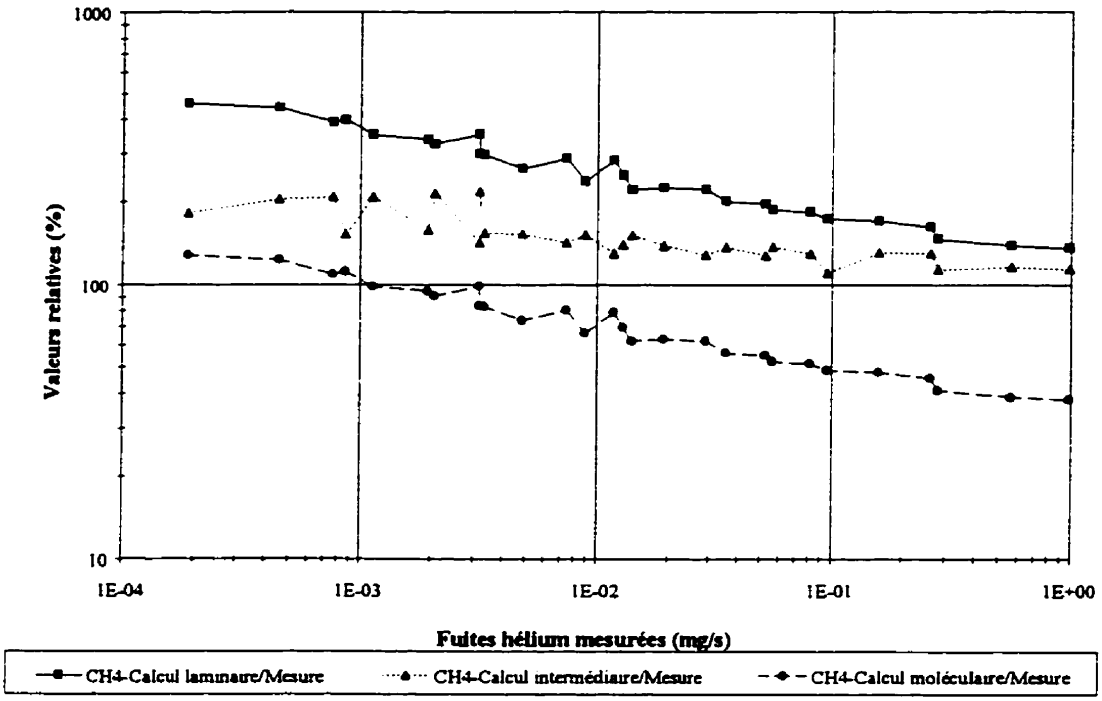


Figure A9.23 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type A9 - CH4 - Essai 2

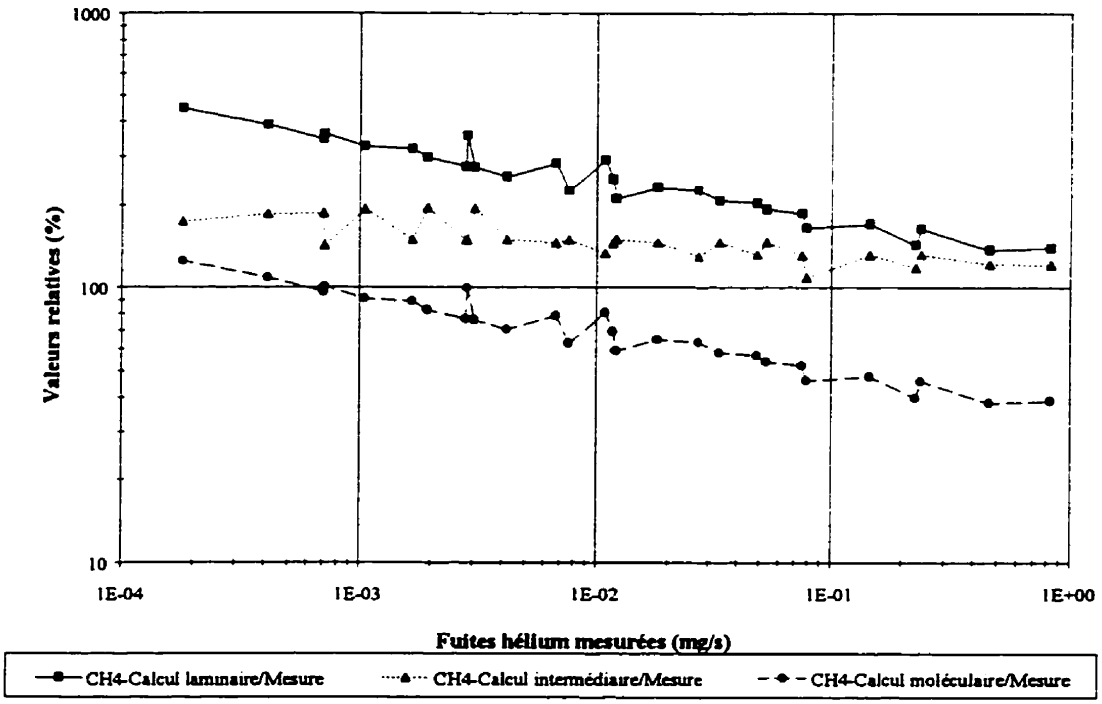


Figure A9.24 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type A9 - CH4 - Essai 3

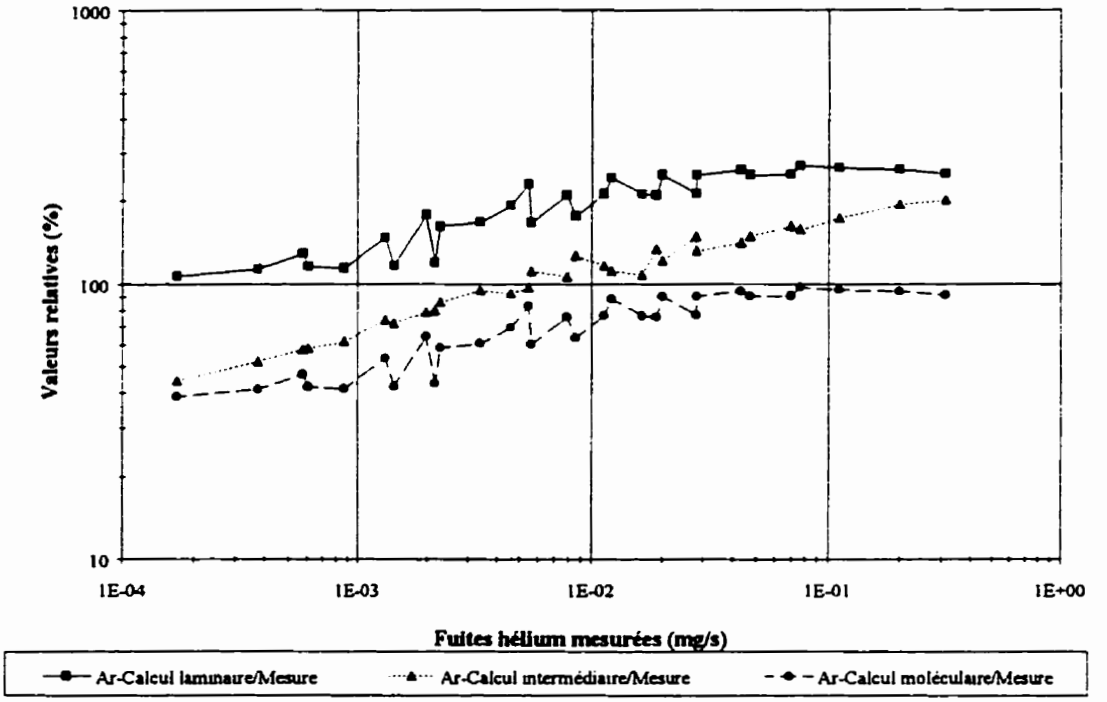


Figure A9.25 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type G2 - Argon - Essai 1

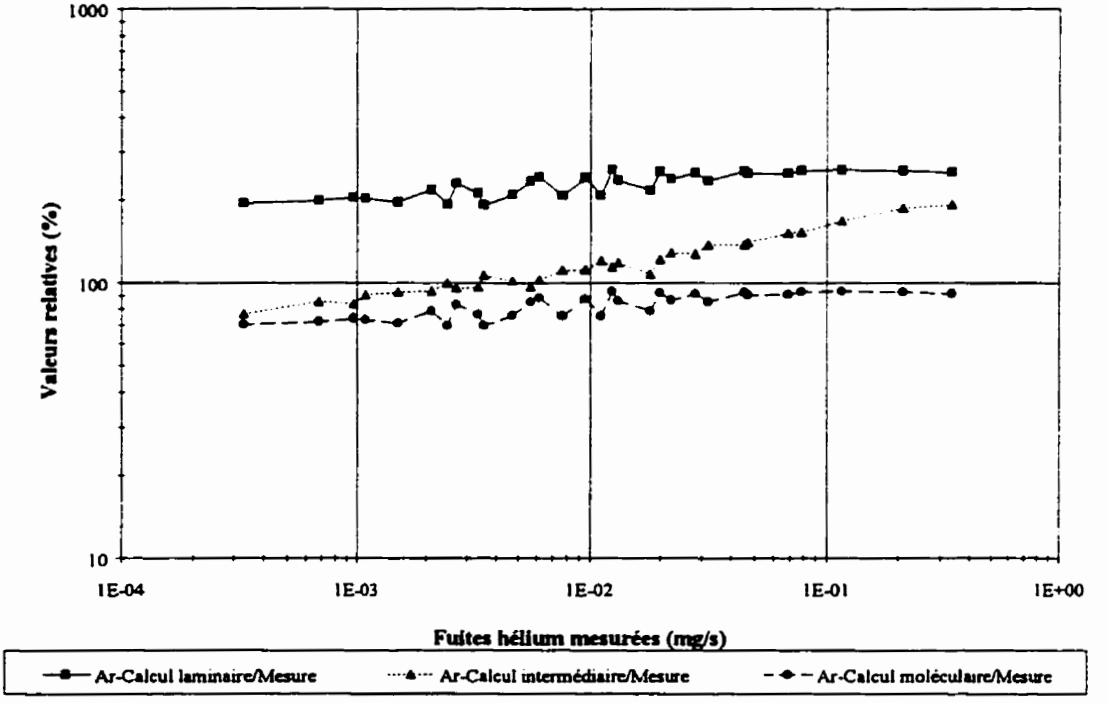


Figure A9.26 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type G2 - Argon - Essai 3

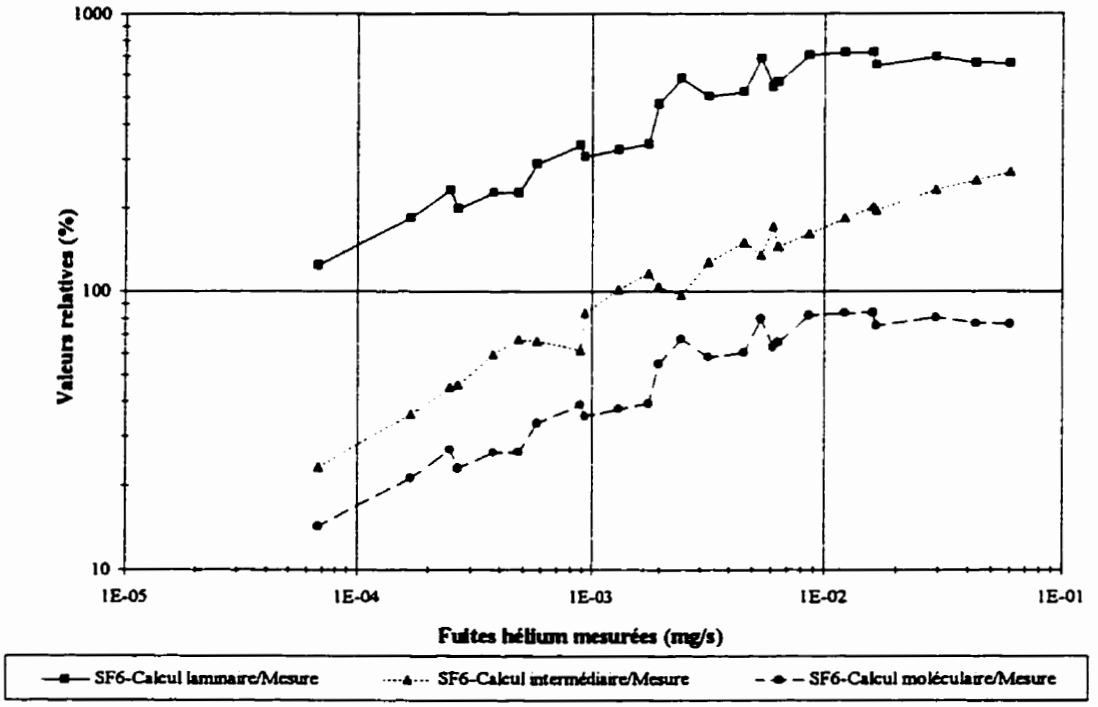


Figure A9.27 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type G2 - SF6 - Essai 1

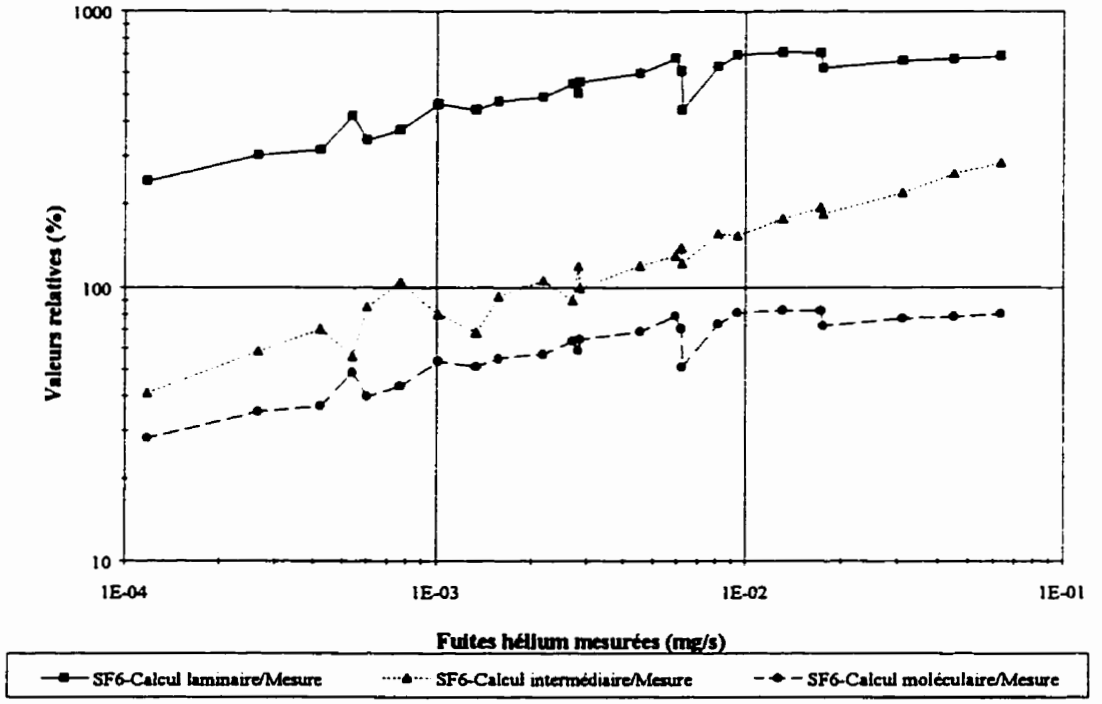


Figure A9.28 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type G2 - SF6 - Essai 2

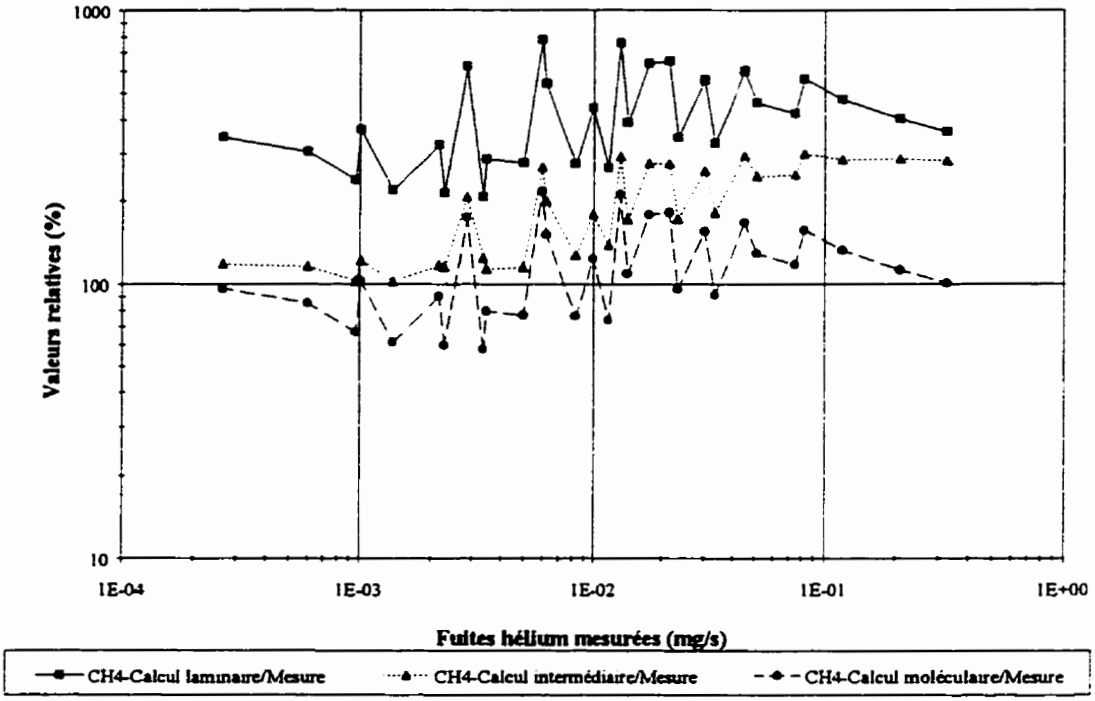


Figure A9.29 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type G2 - CH4 - Essai 2

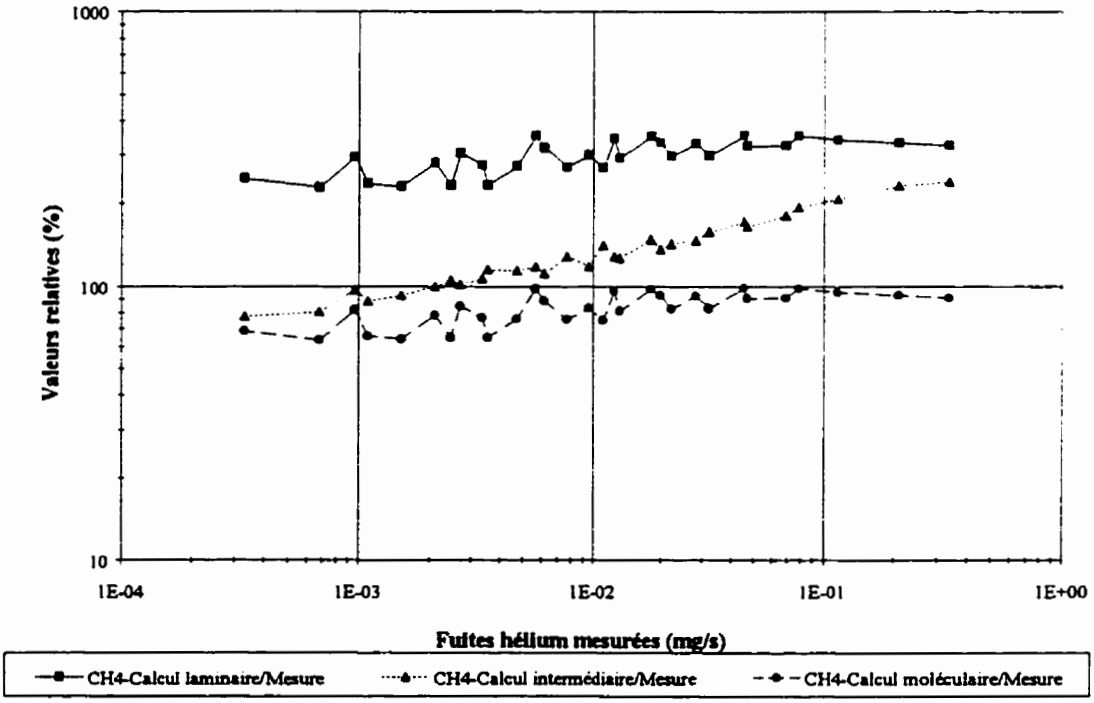


Figure A9.30 : Performance des calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire en fonction de la fuite hélium mesurée - Joint type G2 - CH4 - Essai 3

ANNEXE 10

CONSERVATION DE LA STRUCTURE INTERNE DU JOINT

Cette annexe se propose de mettre en œuvre un calcul simple permettant d'estimer l'influence du fluage du joint sur les fuites mesurées.

Le calcul qui va y être présenté s'avère nécessaire afin de vérifier l'hypothèse de conservation de la structure interne du joint au cours des essais. Cette hypothèse est indispensable à la pertinence des modes de calcul issus du modèle simplifié de joint.

1. Présentation

Les différents modes de calculs utilisés ne sont valables qui si les mesures utilisées pour calculer les rapports entre fuites de différents gaz ont été effectuées sur un joint dont la structure interne est identique. Le mode opératoire utilisé induit forcément des variations dans cette structure, notamment à cause de son fluage. L'objectif du raisonnement qui va être mené est de quantifier l'influence de ces changements sur les mesures de fuites effectuées et donc sur les rapports entre fuites calculées.

Le raisonnement suivi ici est le suivant. La correspondance entre les résultats expérimentaux et ceux fournis par les calculs laminaire, intermédiaire et moléculaire permet de mettre en évidence les différents écoulements gazeux au travers du joint. Comme les équations de ces écoulements sont connues, il va maintenant être possible de les utiliser pour calculer l'influence des modifications du joint sur les fuites mesurées.

S'il est montré que les fuites mesurées pour les différents gaz ne peuvent pas être associées à une même structure du joint, cela signifiera que les rapports entre les fuites de différents gaz ne peuvent pas être comparées aux différents modes de calculs. Cela entraînera donc la remise en question du bien fondé des types d'écoulements déterminés.

L'objectif est donc de lier la déformation que rencontrent les joints testés, lors des mesures effectuées avec différents gaz, avec la fuite mesurée. Une relation va donc être établie entre les fuites mesurées juste après le serrage du joint et celles qui le sont à la fin de l'essai mené avec les trois gaz. Entre ces deux types de mesures, le joint se sera modifié par fluage. Le lien établi entre ces fuites permettra d'évaluer l'influence de ce fluage sur la mesure effectuée.

2. Lien entre fuites mesurées au début et à la fin de l'essai

Soit E l'épaisseur initiale, avant tout essai, du joint. Soient E_1 et E_2 ses épaisseurs respectivement immédiatement après sa mise sous contrainte et à la fin des mesures de fuites des trois gaz cibles. Entre ces deux cas limites, le fluage du joint aura joué un rôle. Soient de plus, Q_1 et Q_2 les fuites d'un même gaz mesurées, après le serrage et suite au fluage du joint.

Le fluage du joint même si peut influencer le niveau de fuite, comme tente de l'évaluer cette approche, ne pourra en aucun cas modifier le régime d'écoulement. Cette dernière modification nécessite un écrasement du joint bien supérieur à la diminution d'épaisseur engendrée par son fluage. Si, par exemple, l'écoulement est laminaire après le serrage, il le sera aussi à la fin de l'essai, soit après le fluage du joint.

Il est donc possible d'écrire, d'après l'équation de l'écoulement laminaire au sein d'un joint (6.16), le rapport entre la fuite après et avant fluage, mesurées, évidemment, pour une même différence de pression.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 \qquad \text{(A10.1)}$$

D_1 et D_2 représentent les diamètres des capillaires avant et après fluage du joint.

Il parait, de plus, réaliste de considérer que le rapport entre les diamètres des capillaires avant et après fluage sera proche de celui entre les épaisseurs avant et après fluage :

$$\frac{D_2}{D_1} \cong \frac{E_2}{E_1} \qquad \text{(A10.2)}$$

On obtient alors la relation entre les fuites d'un même gaz, dans les mêmes conditions de pression, et mesurées après le serrage du joint et à la fin de l'essai :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^4 \qquad \text{(A10.3)}$$

Connaissant la variation de l'épaisseur du joint au cours de l'essai, il est donc possible de connaître l'influence du fluage du joint sur la fuite mesurée. C'est ce qui va maintenant être calculé.

3. Calcul de l'influence du fluage sur les fuites mesurées

Le calcul précédent ne présente que la cas d'un écoulement laminaire. Même s'il serait possible de mener un calcul identique pour le cas moléculaire, et, plus difficilement pour celui intermédiaire, cela ne sera pas fait ici. En effet le calcul laminaire fait intervenir un exposant 4, supérieur à ceux des autres écoulements. Son emploi entraînera, s'il est appliqué à un cas où l'écoulement est d'une autre nature, une surestimation de l'influence du fluage sur la fuite mesurée.

Ce calcul laminaire sera donc appliqué à tous les cas qui vont être traités. L'influence du fluage sera alors toujours inférieure ou égale aux résultats obtenus.

Afin de mener ce calcul à bien, les résultats des essais 3, effectués sur chaque type de joint, vont être considérés. Comme les écrasement de chaque joint ont été enregistrés, juste après chaque serrage et à la fin des mesures de fuites avec les trois gaz, il est possible de déduire, connaissant leurs épaisseurs initiales E, les épaisseurs E_1 et E_2 correspondantes. Les résultats des mesures et calculs sont regroupés dans les tableaux A10.1 et A10.2, les épaisseurs initiales de chaque joint étant issues de leur métrologie avant essai.

Contrainte nominale (MPa)	Ecrasement après serrage (mm)	Ecrasement après fluage (mm)	Rapport des épaisseurs	Rapport des fuites
7	**6,277E-02**	**6,422E-02**	**9,991E-01**	**0,996**
28	**1,590E-01**	**1,636E-01**	**9,968E-01**	**0,987**
42	**2,069E-01**	**2,084E-01**	**9,989E-01**	**0,996**
55	**2,360E-01**	**2,386E-01**	**9,981E-01**	**0,992**
69	**2,645E-01**	**2,704E-01**	**9,955E-01**	**0,982**

Tableau A10.1 : Influence du fluage sur la mesure de fuites - Joint A9

Epaisseur initiale : E = 1,6 mm

Contrainte nominale (MPa)	Ecrasement après serrage (mm)	Ecrasement après fluage (mm)	Rapport des épaisseurs	Rapport des fuites
7	**2,560E-01**	**2,522E-01**	**1,003E+00**	**1,012**
28	**5,663E-01**	**5,665E-01**	**9,998E-01**	**0,999**
42	**6,297E-01**	**6,313E-01**	**9,983E-01**	**0,993**
62	**6,945E-01**	**6,984E-01**	**9,955E-01**	**0,982**
83	**7,411E-01**	**7,483E-01**	**9,913E-01**	**0,966**

Tableau A10.2 : Influence du fluage sur la mesure de fuites - Joint G2

Epaisseur initiale : E = 1,574 mm

4. Conclusion

La conclusion des calculs qui viennent d'être présentés, est que le fluage rencontré sur les deux types de joints utilisés n'induit pas de modification significative de la structure du joint. En effet, dans le pire des cas, la fuite mesurée après le fluage du joint ne sera inférieure à sa valeur si elle avait été prise après le serrage, que de 4 %. Dans la plupart des cas cet écart est inférieur à 1%.

Puisque la mesure de fuite n'est pas, ici, influencée par le fluage du joint, cela signifie que les rapports de fuites sont calculés à partir de fuites mesurées pour une structure interne du joint identique. L'hypothèse concernant la conservation de la structure du joint, nombre de canaux et diamètre, est donc ainsi vérifiée.

ANNEXE 11

INFLUENCE DE LA NATURE DU GAZ SUR LE REGIME D'ECOULEMENT

Une des hypothèse importante sur laquelle sont basés les différents calculs est que le type de gaz n'influence pas de manière excessive la nature de l'écoulement. C'est ce que se proposent de vérifier les calculs mis en œuvre par cette annexe.

La validation de cette hypothèse permettra, de plus, l'obtention d'un autre résultat important. Si la nature de l'écoulement n'est que peu influencée par la nature du gaz, alors il sera possible de déterminer l'évolution de l'écoulement à partir de résultats d'essais menés avec un seul gaz. Les résultats obtenus pourront, ensuite être directement appliqués à tout autre gaz utilisé.

1. Présentation

Les différents modes de calculs utilisés ne sont valables qui si l'a nature de le type d'écoulement n'est pas influencé de manière excessive par le type de fluide. Ceci est nécessaire pour pouvoir éliminer les paramètres inconnus des équations des écoulements. L'évaluation de cette condition n'est pas aisée. Cependant un raisonnement simple peut être mené pour tenter d'estimer sa validité.

Le régime d'écoulement est régi par le nombre de Knudsen qui fait intervenir le libre parcours moyen du gaz considéré. Il a déjà été constaté que lorsque la pression de gaz évolue et que la contrainte sur le joint est constante, l'écoulement peut être modifié et passer soit de moléculaire à intermédiaire, soit d'intermédiaire à laminaire. La variation de pression nécessaire pour faire changer la nature de l'écoulement peut alors être estimée. A ce changement de pression peut être associé la variation du libre parcours moyen associé.

Si, maintenant, les libres parcours moyens des différents gaz, pour une pression donnée, sont comparés. Pour que le type de gaz ne puisse pas avoir d'influence sur le régime d'écoulement, il suffit que l'écart entre ces libres parcours moyen soit inférieur à celui rencontré lors d'un changement de régime causé par l'évolution de pression.

C'est ce raisonnement qui va maintenant être mis en application.

2. Evolution du libre parcours moyen des gaz

Les figures de l'annexe 9 présentent les corrélations entre les fuites mesurées et celles calculées pour différents gaz. L'observation des figures associées au joint amiante montre que le changement de régime nécessite, approximativement le passage de la pression de 0,689 MPa à 5,516 MPa. Cela signifie qu'il faut que la pression soit multiplié par 8 pour qu'éventuellement il puisse être détecté un changement du régime de moléculaire à intermédiaire ou d'intermédiaire à laminaire. Les changements de régime s'observent quand la courbe expérimentale des fuites d'un gaz s'ajuste à celle de différents modèles lorsque la pression augmente. On remarque ce phénomène notamment pour les courbes représentatives des essais au méthane et à l'argon. Dans le cas du SF6, comme la pression évolue dans un intervalle plus réduit, ce phénomène n'est pas observé.

L'expression du libre parcours moyen d'un gaz (équation 3.11) montre que ce dernier est, pour un gaz donné, inversement proportionnel à sa pression.

Ces différentes informations peuvent être synthétisées en deux points :

- si le libre parcours moyen d'un gaz est multiplié par 8, l'écoulement pourra passer soit d'un régime laminaire à un régime intermédiaire, soit d'intermédiaire à moléculaire, suivant son régime d'écoulement d'origine,
- si le libre parcours moyen d'un gaz est divisé par 8, l'écoulement pourra passer soit d'un régime moléculaire à un régime intermédiaire, soit d'intermédiaire à laminaire.

Cette synthèse est cohérente avec ce qui a déjà été vu sur le lien entre le nombre de Knudsen et le régime d'écoulement (chapitre 3, paragraphe 3.2.4).

Si, pour un gaz donné, le produit, ou quotient, du libre parcours moyen par un facteur 8 peut entraîner un changement dans le régime d'écoulement, cela sera nécessairement vrai si ce sont les libres parcours moyens de différents gaz qui sont considérés.

Comme tout au long de l'étude, le gaz de référence fut l'hélium, il suffit donc pour s'assurer que le changement de gaz n'entraîne pas de modification du type d'écoulement, d'avoir :

$$\frac{1}{8} \langle \frac{\lambda_i}{\lambda_{He}} \langle 8 , \qquad \text{(A11.1)}$$

λ_i étant le libre parcours moyen des gaz pris en compte par l'étude. Cette relation devant être vérifiée pour tous les gaz.

Toujours d'après la relation (6.11), le rapport entre le libre parcours moyen de deux gaz dans les mêmes conditions s'exprime par :

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_{He}} = \left(\frac{\varepsilon_{He}}{\varepsilon_i}\right)^2 \qquad \text{(A11.2)}$$

où ε est le diamètre de la molécule de gaz considérée comme une sphère rigide.

Les valeurs de ε pour les différents gaz pris en compte sont les suivantes [13] :

$\varepsilon_{He} = 2{,}551\ 10^{-10}$ m, $\varepsilon_{Ar} = 3{,}542\ 10^{-10}$ m,

$\varepsilon_{CH4} = 3{,}758\ 10^{-10}$ m, $\varepsilon_{SF6} = 5{,}128\ 10^{-10}$ m.

Les rapports entre leurs libres parcours moyens sont donc :

$$\frac{\lambda_{Ar}}{\lambda_{He}} = 0{,}519, \quad \frac{\lambda_{SF6}}{\lambda_{He}} = 0{,}247, \quad \frac{\lambda_{Ch4}}{\lambda_{He}} = 0{,}461.$$

Ces rapports sont tous compris dans l'intervalle précédemment défini. Il est, de plus intéressant de noter qu'ils sont tous inférieurs à 1. Cela signifie que tous les gaz employés aurait tendance à avoir une composante laminaire dans leur écoulement plus importante que celle présente dans l'écoulement de l'hélium. Cependant ce petit calcul semble montrer que cette tendance ne soit pas suffisante pour affecter de manière importante le régime d'écoulement.

3. Conclusion

Les calculs utilisés lors de cette étude sont basés sur l'hypothèse que la nature du fluide n'influence pas le type d'écoulement au sein du joint. Les résultats ce ces calculs ont été utilisés pour mettre en oeuvre un raisonnement simple qui permet, à posteriori, de vérifier cette hypothèse.

Il est cependant à noter que les résultats qui sont donnés ici ne sont que des estimations et qu'il n'est, en aucun cas question, ici, d'utiliser ce raisonnement, et les résultats qu'il entraîne, à d'autre fin que la seule vérification d'une hypothèse.

ANNEXE 12

INDICATEUR DU TYPE D'ECOULEMENT

Cette annexe présente les développements associés à la mise en œuvre d'un coefficient capable de donner une indication sur la nature de l'écoulement en présence dans un joint.

Un tel indicateur est indispensable pour la corrélation précise entre les fuites de différents gaz. A partir des informations qu'il fourni, il sera possible d'appliquer le mode de calcul laminaire, intermédiaire ou moléculaire approprié.

Lors de cette annexe, les résultats des essais réalisés seront exploités afin de comparer les considérations théoriques du chapitre 3 aux observations expérimentales. L'accent sera notamment mis sur le calcul du coefficient "s" utilisé comme quantificateur de l'écoulement.

1. Présentation

Lors de l'approche théorique, il a été montré comment la pente "s" de la droite d'équation : Log P = s Log Q + b pourrait être employée pour déterminer la nature de l'écoulement. Il a été vu qu'une valeur de ce coefficient de 0,5 signifie que l'écoulement est purement laminaire. Si "s" vaut 1 l'écoulement est purement moléculaire. Si sa valeur est entre ces deux limites, l'écoulement sera intermédiaire.

Maintenant que les différentes corrélations ont mis en évidence les différents régimes d'écoulement. Les évolutions de la pente "s" vont pouvoir être présentées afin de considérer si les constatations théoriques précédentes se vérifient. Si cela était le cas, un indicateur simple du type d'écoulement serait dont disponible. Les figures de cette annexe présentent donc l'évolution avec la contrainte des pentes "s", pour différents joints et gaz et pour l'ensemble des six essais effectués.

Afin de comprendre ce qui est montré, il est tout d'abord nécessaire de présenter le mode de calcul adopté.

2. Calcul du coefficient " s "

Pour chaque niveaux de contrainte, la pente de la droite définie précédemment est calculée par régression linéaire. La méthode des moindres carrés est utilisée pour définir la droite la plus représentative des mesures prises en compte. La technique de calcul est influencée par deux facteurs. Tout d'abord par le nombre de points utilisés pour le calcul. Plus ce nombre est important, plus l'équation de la droite déterminée aura des chances d'être juste. Les pentes sont, en effet calculées par la méthode des moindres carrés.

La position des points de mesures pris en compte influence aussi le résultat du calcul de "s". Par exemple, comme dans le cas de l'hexafluorure de soufre la pression maximale est limitée à 1,72 MPa (250 psi), plus de points de mesures ont été pris, pour ce gaz mais aussi pour l'hélium, pour des pressions inférieures à cette limite.

Ceci entraîne, dans le calcul, une pondération qui aura tendance à favoriser l'écoulement de type moléculaire, c'est-à-dire à surévaluer la valeur de la pente. Ce problème existe parce que dans le cas de l'écoulement laminaire, l'équation mathématique liant le logarithme décimal du débit à celui de la pression n'est pas rigoureusement celle d'une droite. Ce point à été abordé lors de l'approche théorique du chapitre 6.

Ainsi afin de posséder de bonnes bases de comparaison, le coefficient "s" a été calculé pour chaque gaz et pour l'hélium en prenant en compte les mêmes points de mesure. Ceci explique pourquoi les calculs avec l'hélium se retrouvent sur chaque figure présentées. Cela explique aussi pourquoi les courbes obtenues pour le même essai hélium peuvent différer selon la figure sur lesquelles elles sont présentées. Il sera donc possible, à l'aide des figures de cette annexe, d'étudier l'influence du type de gaz et de joint sur le coefficient " s " ainsi que celle de son mode de calcul. Ce sont ces influences qui vont être détaillées.

3. Influence du calcul sur la valeur " s "

En ce qui concerne le mode de calcul, tout d'abord, il est possible de noter que la figure présentant les évolutions comparées de l'hélium et du SF6 présentent les courbes les plus irrégulières. Ceci s'explique par la faible plage de pression couverte par ces essais. La mesure de la pente devient alors moins précise. De plus, ces courbes donnent des valeurs de "s" globalement plus élevées que les autres courbes. Ceci est à rapprocher du mode de calcul employé qui favorise l'écoulement moléculaire puisque les pression internes utilisées sont faibles. Dans le cas du SF6, des valeurs supérieures à 1 sont notamment obtenues, ce qui ne possède pas de justification physique.

Les figures présentant les résultats de l'argon et du méthane comparés à l'hélium montrent plus de régularité. La plage de pression couverte est, d'ailleurs plus significative puisqu'elle couvre, en général, des pressions allant de 0,689 MPa (100 psi) à 5,516 MPa (800 psi) . La courbe présentant l'essai 2 du méthane pour le joint graphite, est tres éloignée des autres, ce à quoi il fallait s'attendre compte tenu des remarques déjà faites sur cet essai. Il est, enfin, intéressant de noter que, de manière générale, les courbes des figures A12.1 et A12.2 présentent une bonne répétabilité entre les différents essais effectués. Seule une courbe de l'hélium associée au joint G2 s'éloigne de ce commentaire Il est cependant important de bien remarquer que l'échelle de ces figures est très précise et qu'ainsi, une inflexion importante de la courbe ne traduit, en fait que des variations faibles de la pente.

La comparaison des figures A12.1 et A12.2 à la figure A12.3 montre donc que plus la plage de mesures prises en compte est petite, plus résultats du calcul de la pente sont irréguliers. De plus si les pressions associées aux calcul de la pente sont faibles, la valeur de "s" risque d'être surestimée. La composante moléculaire de l'écoulement est alors surévaluée.

Malgré les irrégularités de certaines courbes, il est tout de même possible de dégager des tendances intéressantes concernant l'influence du type de joint et du type de gaz.

4. Influences du type de joint et du type de gaz sur le coefficient « s »

Tout d'abord, toutes les pentes calculées sont effectivement comprises entre 0,5 et 1. De plus, les valeurs limites de 0,5 et 1 ne sont pas atteinte ce qui semble confirmer que l'écoulement réel est une combinaison des écoulements fondamentaux et que suivant les conditions l'un d'entre eux devient prédominant. Les seules exceptions à ces remarques sont liées au cas du SF6. Ce dernier semble cependant moins significatif, notamment à cause de la faible plage de pression prise en compte.

En ce qui concerne l'influence du type de gaz, ce qui est montré par les évolutions du coefficient concerné vient confirmer ce qui a été vu précédemment. Le gaz ne possède pas d'influence majeure sur le type d'écoulement, et donc sur la valeur de la pente calculée. Pour être plus précis, un influence peut être observée tant que la pente est inférieure à 0,8. Ceci est notamment visibles sur les figures A12.1 et A12.2, plus explicites que celles présentant le cas du SF6, et ce pour les raisons précédemment exposées. Pour des valeurs de "s" supérieures à 0,8, il est remarquable que les courbes d'argon, d'hélium et de méthane sont toutes très proches. C'est remarques vont tout à fait dans le sens de ce qui à été vu précédemment. En effet, il a été montré que le type de gaz ne semblait pas de nature à changer radicalement le type d'écoulement. Mais les gaz étudiés avaient le potentiel d'ajouter une faible composante laminaire à l'écoulement. C'est en effet ce qui se produit puisque les pentes calculées pour l'argon et le méthane sont plus proches de la limite de 0,5 que celles de l'hélium.

Ces premières remarques permettent déjà de pressentir qu'une valeur de "s" inférieure à 0,8 serait représentative de l'écoulement intermédiaire. Au dessus de cette valeur, l'influence moléculaire est suffisamment forte pour que le type de fluide ne puisse plus affecter suffisamment l'écoulement par ajout d'une composante laminaire.

L'analyse du type de joint vient confirmer et préciser ces propos. Alors que pour le joint A9, les pentes varient entre 0,55 et 0,7, le cas du joint G2 est associé à des pentes comprises entre 0,70 et 0,85. Or il à été vu que l'écoulement associé au joint G2 est principalement de nature moléculaire alors que celui du joint A9, évolue avec la contrainte, de laminaire à moléculaire.

Cette influence de la contrainte sur le coefficient "s" est donc, elle aussi, cohérente à ce qui à été vu au sujet des écoulements. On remarque notamment que les pentes associées au joint G2 restent constantes pour des contraintes supérieures à 20 MPa. Cela ne signifie pas que l'écoulement ne subie plus de modification puisqu'il a été vu que les prévisions des modes de calcul employés ne s'ajustaient plus aux mesures dans le cas de hautes contraintes. Par contre cela signifie que l'écoulement qui succède à l'écoulement moléculaire possède une évolution identique avec la pression. Cette remarque vient conforter l'hypothèse de la prédominance d'un écoulement de perméation dans ces conditions.

L'ensemble de ces remarques montre que le coefficient "s" mis en évidence possède des évolutions cohérente avec l'ensemble des observations précédentes. Son avantage principal est de pouvoir décrire la nature de l'écoulement à l'aide d'un calcul fort simple. Compte tenu des valeurs de "s" obtenues et des résultats précédents concernant le lien entre la contrainte et le type d'écoulement, il semble possible de préciser expérimentalement les considérations théoriques.

5. Lien entre le coefficient " s " et la nature de l'écoulement

Les différentes remarques qui viennent d'être faites permettent de donner une estimation des valeurs limites du coefficient "s" pour chaque type d'écoulement :

- Tant que la pente " s " est inférieure à 0,55, l'écoulement sera laminaire.,
- Pour une valeur de "s" comprise entre 0,55 et 0,70, l'écoulement sera intermédiaire,
- Pour "s" supérieur à 0,70, l'écoulement peut être considéré comme moléculaire.

Il reste difficile de dissocier, à l'aide de ce quantificateur, un écoulement moléculaire du phénomène de perméation. Si ce type d'écoulement se confirmait il serait certainement possible de préciser la valeur de "s" à partir de laquelle l'écoulement deviendrait principalement de la perméation. Cette valeur se situerait vraisemblablement aux alentours de 0,85.

La difficulté associée à ce coefficient réside dans son calcul. Le calcul est, en lui même, simple, mais il nécessite un choix judicieux des mesures prises en compte La plage de pressions utilisées devra être choisie la plus large possible et le nombre de points utilisés suffisamment nombreux. Il est, de plus important que ces points soient régulièrement espacés afin de ne pas apporter de pondération dans le calcul.

En guise de conclusion, les considérations théoriques mises en avant lors de la présentation du quantificateur de l'écoulement sont vérifiées par l'expérience. Même si ce coefficient nécessite quelques précautions dans son calcul, il fourni une méthode simple pour prévoir la nature de l'écoulement au sein d'un joint. Ainsi à partir d'un essai hélium sur un type de joint donné, il semble possible de déduire la nature de l'écoulement qui le traverse.

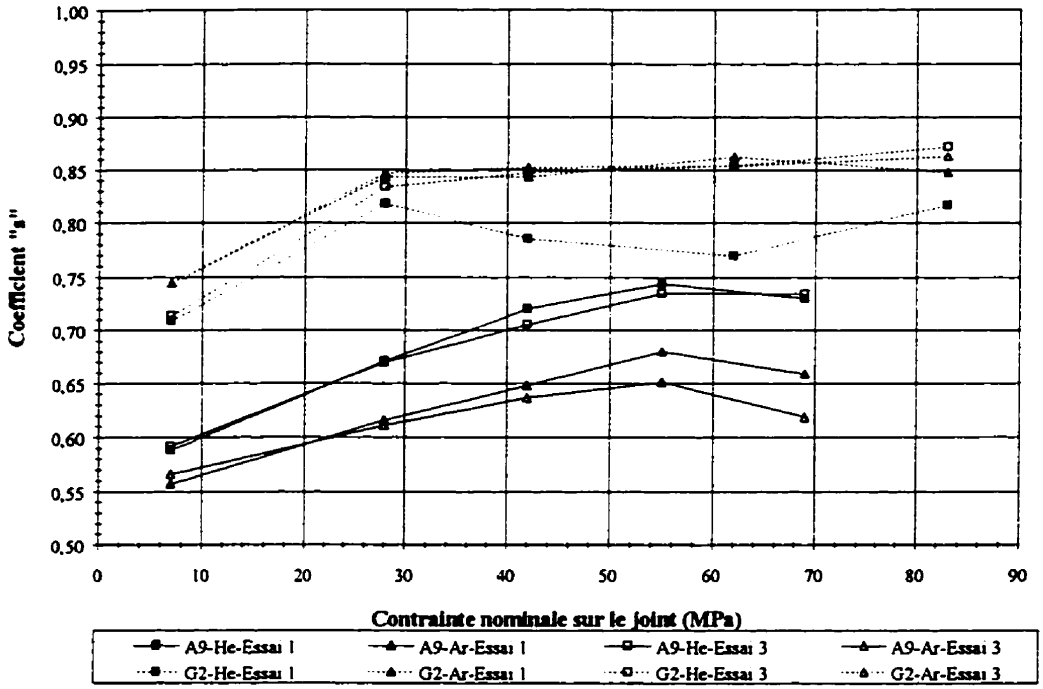


Figure A12.1 : Evolution du coefficient « s » avec la contrainte - Joints A9 et G2 Hélium et Argon - 2 Essais

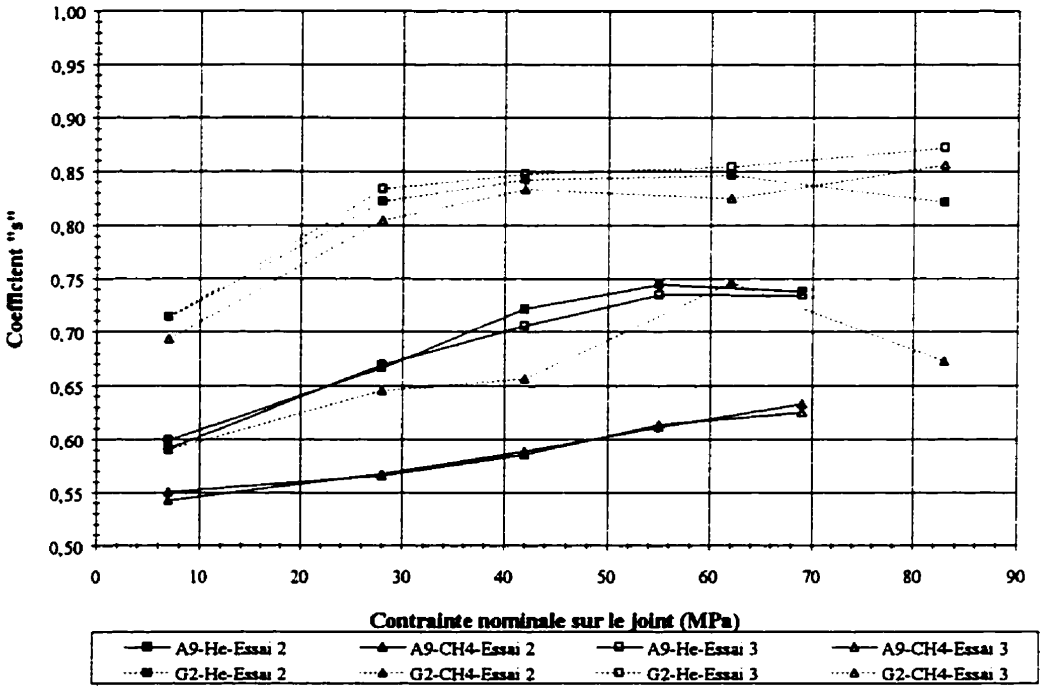


Figure A12.2 : Evolution du coefficient « s » avec la contrainte - Joints A9 et G2 Hélium et CH4 - 2 Essais

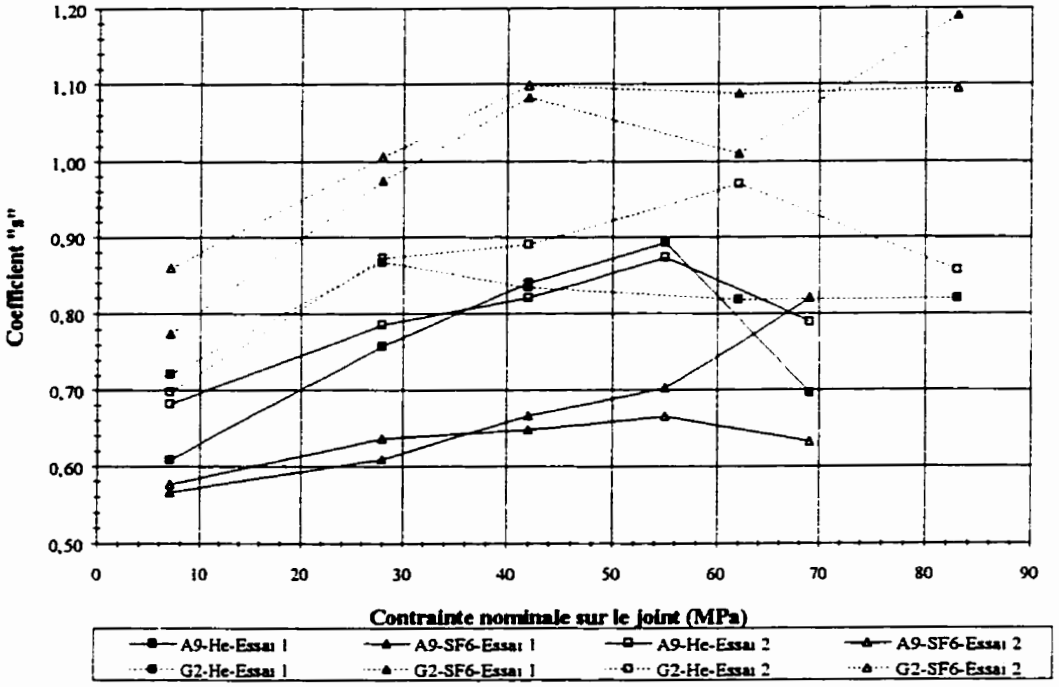


Figure A12.3 : Evolution du coefficient « s » avec la contrainte - Joints A9 et G2 Hélium et SF6 - 2 Essais

ANNEXE 13
INFLUENCE DU DESSERRAGE DU JOINT

Afin de compléter l'étude, un essai supplémentaire a été mené afin d'estimer l'influence du déchargement d'un joint sur l'écoulement qui s'y produit. Cet essai et la discussion détaillée de ses résultats sont l'objet de la présente annexe.

L'impact de ce point de l'étude est double. Il s'agit, tout d'abord, d'évaluer l'importance du desserrage sur la nature de l'écoulement. De plus, les résultats de ce travail pourraient permettre l'obtention d'une méthode simplifiée pour l'analyse de l'évolution du régime d'écoulement au sein de joints.

1. Présentation

Jusqu'à présent, il n'a pas été fait de distinction entre le niveau de contrainte sur le joint et son écrasement. Cela était tout à fait justifié puisque tout au long des essais considérés, la contrainte appliquée sur le joint a été croissante. L'étude du comportement d'un joint lorsque la contrainte qui lui est appliquée diminue est un important aspect à prendre en compte lors de la conception de systèmes étanches. Par exemple, dans le cas de brides munies de joints, la mise sous pression de la bride s'accompagnera, à cause de l'effet de fond, d'une diminution de la contrainte sur le joint. La caractérisation des performances de joints menée en laboratoire prend évidemment cet aspect en considération. L'essai standard ROTT [6] permet notamment, par l'application de cycles de compression et de décompression sur un joint, d'analyser l'impact du desserrage sur son étanchéité.

Avant de proposer des solutions au problème du lien entre fuites de différents gaz, il semble important de procéder à une première évaluation de l'influence du desserrage du joint sur les phénomènes rencontrés. L'objectif n'est pas, ici, de mener une étude complète sur ce point. Cela nécessiterait la réalisation d'un nombre d'expériences au moins égal a celui déjà mené jusqu'ici.

Le but est plutôt, ici, d'émettre une hypothèse simple et de tenter de la vérifier par la réalisation d'un essai unique. Ainsi il sera possible, d'une part, de posséder des premières indications sur l'influence du desserrage du joint, et, d'autre part, d'émettre des recommandations et de formuler des pistes de recherches pouvant être utilisées lors de futurs travaux.

L'hypothèse que va tenter de vérifier l'essai réalisé est la suivante. Puisque le modèle employé permet d'expliquer les changements de régime à partir de considérations concernant notamment les canaux du joint, il semble réaliste de penser que ces régimes d'écoulements sont directement liés à l'écrasement du joint. Tant que la contrainte augmente, son écrasement augmente aussi et le régime d'écoulement se modifie de la manière présentée précédemment. Si le joint est, maintenant desserré, son écrasement va diminuer. L'hypothèse formulée ici est que le régime d'écoulement obtenu après desserrage sera le même que celui du joint, lorsqu'il avait la même épaisseur lors de la phase de serrage. L'écoulement serait donc une fonction seulement dépendante, pour un type de joint donné, de son épaisseur.

Si cette hypothèse était vérifiée, il serait alors possible de connaître un des paramètres principaux d'influence sur la nature de l'écoulement. L'épaisseur d'un type de joint donné, conditionnerait alors le type de calcul devant être appliqué pour obtenir les fuites de différents gaz à partir de celles d'un gaz de référence.

Afin de vérifier cette hypothèse, un essai a été mené sur un seul joint de type A9. Le choix de ce joint semble judicieux puisque, d'après ce qui a été vu, il permet de mettre en évidence trois des quatre types d'écoulements fondamentaux. Il sera donc possible de suivre l'évolution de ces régimes avec l'épaisseur.

Dans un premier temps, l'essai mis en oeuvre va être succinctement présenté. La principale difficulté rencontrée ainsi que ses conséquences seront, ensuite, mis en avant. Les résultats obtenus ainsi que leur implication au niveau de l'hypothèse formulée seront, enfin, discutés. Certaines recommandations destinées à de futures études sur ce problème seront alors proposées.

2. Description de l'essai

L'essai réalisé, basé sur un joint en amiante (A9), prenait en compte deux gaz, l'hélium, toujours utilisé comme référence, et le méthane, comme gaz cible. Le protocole expérimental fut identique au précédent : les fuites des deux gaz étaient successivement mesurées en fonction de la pression interne du gaz pour chaque niveau de contrainte. Les niveaux de pression utilisés furent moins nombreux mais permettaient toujours de couvrir une plage allant de 0,689 MPa (100 psi) à 5,516 MPa (800 psi). Trois cycles de compression et de décompression ont été appliqués sur le joint. La séquence des niveaux de contraintes appliqués fut la suivante :

- premier cycle : 7MPa (1000 psi), 42 MPa (6000 psi), 7MPa (1000 psi),
- second cycle : 42 MPa (6000 psi), 69 MPa (10000 psi), 42 MPa (6000 psi), 7 MPa (1000 psi),
- troisième cycle : 83 MPa (12000 psi), 42 MPa (6000 psi) et 7 MPa (1000 psi).

Il est à noter que lors du troisième cycle, il n'a pas été effectué de mesures de fuites pour le niveau de contrainte de 83 MPa (12000 psi). La bonne étanchéité de ce joint à ce niveau de contrainte aurait rendu ces mesures difficiles. Ce niveau de contrainte sur le joint a néanmoins été maintenu pendant plus de 12 heures.

La figure A13.1 présente l'évolution de l'écrasement du joint en fonction de la contrainte appliquée. Les trois cycles précédents peuvent donc y être visualisés. L'analyse de cette figure met en évidence la principale difficulté rencontrée lors de l'essai. Cette difficulté ainsi que ses conséquences va maintenant être détaillée.

3. Principale difficulté rencontrée

Le montage expérimental utilisé ne permet pas de contrôler, de manière permanente, la contrainte appliquée et l'écrasement du joint. Lors des essais précédents, ce point avait déjà été relevé. Le fluage du joint et la relaxation de la contrainte avaient été remarqués. Il a, de plus été montré, que ces phénomènes n'avaient pas d'influence significative sur les résultats obtenus et sur les calculs effectués.

Dans le cadre du présent essai ou la contrainte sur le joint est alternativement augmentée et diminuée la situation s'est avérée bien différente. Lorsque le joint est serré, c'est-à-dire que la contrainte augmente, les remarques précédentes concernant le fluage du joint s'appliquent. Par contre lorsque le joint est desserré, le phénomène suivant a été observé. L'épaisseur du joint augmente en deux phases. Lors de la première, l'épaisseur du joint augmente rapidement suite au desserrage. La seconde phase concerne le gonflement subséquent du joint. Cette augmentation de l'épaisseur du joint à la suite du desserrage est beaucoup plus lente mais s'avère très importante. Il se produit, en fait, un phénomène similaire au fluage du joint mais dont l'effet est contraire. Ce phénomène est d'ailleurs souvent appelé " reverse creep " (" fluage inverse "). Le problème réside dans le fait que l'ampleur de ce phénomène est plus importante que celle du fluage. De plus, le temps nécessaire pour que ce " fluage inverse " se stabilise est très long.

Ce phénomène ainsi que son ampleur peuvent être observés sur la figure A13.1. Les paliers qui apparaissent sur cette figure, notamment pour les faibles niveaux de contrainte (7 MPa, 1000 psi) montrent les valeurs de l'écrasement et de la contrainte sur le joint au début et à la fin des mesures de fuite.

Ainsi, puisque le joint subit, au cours des mesures, une importante augmentation de son épaisseur, la structure du joint ne peut plus être considérée comme constante au cours de l'essai. Les rapports entre les fuites hélium et méthane ne sont plus effectués pour une même structure interne du joint, ce qui est une hypothèse essentielle associée aux trois modes de calcul. De manière pratique, cela se traduit par une augmentation des rapports entre les fuites des deux gaz lorsque l'écrasement du joint augmente. Ce résultat s'avère en complet désaccord avec ce qui a été vu précédemment où, pour le joint A9, les rapports entre les fuites de différents gaz diminuaient lorsque la contrainte, et donc, l'écrasement du joint, augmentaient.

Ce constat a été effectué lors des deux premiers cycles de chargement et de déchargement du joint où ce dernier subissait un gonflement important. A la fin du second cycle, au lieu de comprimer à nouveau le joint, la contrainte à été réajustée à 7 MPa et un temps d'attente de 12 heures a été observé. Durant ce temps le " fluage inverse " du joint à continué. La contrainte de 7 MPa a, une dernière fois été ajustée, puis les fuites des deux gaz ont été mesurées. Cette étape peut être observée sur le courbe contrainte - écrasement du joint (figure A13.1). Lors de ces nouvelles mesures l'augmentation de l'épaisseur du joint a été nettement moindre. Les rapports entre les fuites des deux gaz calculés se sont alors avérés bien moins importants que lors de l'étape précédente.

Cette vérification semble donc confirmer que le " fluage inverse " du joint peut être la cause d'une augmentation artificielle des rapports entre les fuites de différents gaz calculés. Ceux-ci n'ont alors pas de réelle signification puisque le joint ne possède pas, lors des mesures avec les deux gaz, la même structure interne. La solution à se problème fut donc de respecter des temps d'attente très longs entre le moment où le joint est desserré et celui où les fuites sont mesurées. C'est ce qui a été fait pour les mesures associées au troisième cycle de compression et de décompression du joint.

Il peut être observé que le " fluage inverse " mesuré lors des essais du troisième déchargement est nettement inférieur à celui observé précédemment. Dans la discussion des résultats qui va suivre, les premières mesures effectuées, influencées par le " fluage inverse " du joint, ne seront pas prises en compte. Seuls les résultats suivants seront considérés :

- partie A : 7 MPa, 42 MPa et 69 MPa
- partie B : 7 MPa (second desserrage, second essai), 42 MPa troisième desserrage et 7 MPa troisième desserrage.

Les termes partie A et B sont, ici, employés par analogie avec la terminologie de l'essai ROTT [6]. La partie A désigne les niveaux de contrainte appliqués lors du serrage du joint. La partie B ceux associées au déchargement du joint. Il est, enfin, à noter, que les temps d'attente observés avant de mesurer les fuites pour 42 MPa et 7 MPa (troisième desserrage) furent respectivement de 24 et 15 heures. Cela semble avoir permis de diminuer l'influence du "fluage inverse" sur les résultats obtenus. Ces résultats vont maintenant être analysés.

4. Résultats de l'essai

La présentation des résultats obtenus sera menée en plusieurs temps. Tout d'abord, quelques remarques d'ordre général seront effectuées. Les principaux résultats seront, ensuite, présentés. Cette présentation prendra en compte l'évolution, avec l'écrasement du joint, des rapports entre les fuites des deux gaz, les performances qualitatives et quantitatives des différents modes de calculs, et, enfin, l'évolution du coefficient "s" quantifiant le type d'écoulement.

4.1. Remarques concernant les résultats obtenus

Deux remarques vont être faites concernant les fuites mesurées. Tout d'abord, les niveaux de fuites obtenus avec le joint testé se sont avérés légèrement plus faibles que ceux mesurés avec les autres joints en amiante testés auparavant. Il est notamment intéressant de noter qu'il a été possible de mesurer des fuites plus faibles que lors de l'ensemble des essais précédents. Lors de cet essai, les temps d'attente pour obtenir la stabilisation de ces fuites se sont avérés bien inférieurs.

Lors des essais précédents, la mesure de fuites situées entre 10^{-3} mg/s et 10^{-4} mg/s d'hélium s'est avérée longue. Durant ce dernier essai, il a été possible de mesurer des fuites inférieures à 10^{-4} mg/s et ce avec un temps de stabilisation raisonnable. Ce qui pouvait donc sembler être la limite de mesure associée au montage expérimental a donc, lors de cet essai, été dépassé. Il sera proposé, lors des conclusions de cette annexe une explication à ce phénomène.

La seconde remarque concerne les fuites hélium et méthane mesurées lors des deux desserrages à 7 MPa et pour une pression interne de 5,516 MPa (800 psi). Ces fuites peuvent être visualisées sur les figures A13.7 et A13.9. Il est visible que ces mesures s'éloignent très fortement de la droite obtenue en liant les points associés aux autres niveaux de pression. Ce comportement n'avait pas été observé précédemment. Les courbes liant les fuites aux niveaux de pression interne présentaient toutes une excellente linéarité. Lors des deux desserrages à 7 MPa pris en compte, les fuites mesurées pour 5,516 MPa (800 psi) de pression interne sont à associer à une brutale perte d'étanchéité du joint. Cette perte brutale d'étanchéité est liée au fait que la pression interne est ici proche de la contrainte appliquée sur le joint. Certains joints soumis à de telles conditions perdent brutalement leur étanchéité.

Lors des calculs associés à la corrélation entre les fuites des deux gaz, ces deux points seront donc ignorés car seulement représentatifs d'un cas bien particulier. Ceci explique pourquoi ces points, bien que représentés sur les figures A13.7 et A13.9, ne sont associés à aucune des courbes tracées.

4.2. Evolution du rapport entre les fuites des deux gaz

Maintenant que ces deux remarques ont été menées, l'intérêt va se porter sur les résultats de l'essai. Les figures A13.2 et A13.3 présentent l'évolution des rapports entre les fuites des deux gaz en fonction de l'écrasement du joint. Ces figures sont notamment destinées à illustrer ce qui a été vu précédemment concernant l'influence du " fluage inverse ". L'ensemble des mesures effectuées pour deux pressions, 1,378 MPa et 2,757 MPa (200 et 400 psi), y sont représentées. Le tableau A13.1 permet d'identifier sur ces deux figures les points associés à un long temps d'attente préalable destiné à diminuer l'impact du "fluage inverse".

Les points reliés par une courbe correspondent aux mesures de la partie A du test On remarque immédiatement une évolution similaire à celle rencontrée lors des essais précédents. Les rapports entre les fuites de différents gaz qui diminuaient lorsque la contrainte augmentait, suivent évidemment la même évolution avec l'écrasement. Les points non reliés par la courbe représentent l'ensemble des mesures effectuées pour la partie B de l'essai. L'hypothèse que tente de vérifier cet essai le serait si les points de la partie B se retrouvaient sur la courbe de la partie A. Il serait alors possible d'associer le rapport entre les fuites de différents gaz, et donc le type d'écoulement, à l'écrasement du joint.

Il est visible que cela n'est pas toujours vérifié. Cependant, il est très intéressant de noter que les points associés à un " fluage inverse " important sont nettement plus éloignés de la courbe de la partie A que ceux issus de mesures où l'effet du " fluage inverse " à été diminué. Dans ce dernier cas, les points de mesures se retrouvent tout de même proches de la courbe de la partie A. Ces deux figures illustrent donc la remarque précédente menée au sujet du " fluage inverse ".

Dans ce qui suit, seuls les points associés à un effet moindre du " fluage inverse ", et présentés précédemment, seront pris en compte afin de vérifier la validité de l'hypothèse formulée.

4.3. Performances des modes de calcul

Les performances des trois modes de calculs vont maintenant être étudiées. Comme lors de l'étude précédente, deux types de figures sont présentées. Les premières (figures A13.3 à A13.9) présentent l'aspect qualitatif des corrélations. Les courbes expérimentales et issues de calculs sont présentées sur les mêmes figures.

Les figures suivantes (A13.10 et A13.11) présentent l'aspect quantitatif de ces performances. Elles illustrent l'évolution de la valeur relative entre calculs et mesures expérimentales, pour les trois modes de calcul étudiés. La valeur relative est ici définie par :

$$\text{Valeur relative (\%)} = \frac{\text{Fuite méthane calculée par un mode de calcul}}{\text{Fuite méthane mesurée}} * 100$$

La différence avec ce qui avait été présenté précédemment réside dans le fait que ces évolutions ne sont plus présentées en fonction de la fuite hélium correspondante mais en fonction de l'écrasement du joint. La distinction entre partie A et B de l'essai n'est, volontairement, plus effectuée. Cependant la contrainte associée à chaque point de mesure est indiquée afin de posséder tout de même cette information.

La première information qui peut être tirée des figures A13.3 à A13.9 est que les courbes expérimentales présentant les fuites méthane peuvent toujours être associées à un mode de calcul. De plus, ces courbes expérimentales ne sont jamais associées à celle représentative du calcul moléculaire, comme cela avait été le cas lors des essais précédents. Cela signifie que l'écoulement dans le joint testé, n'a pas été de nature totalement moléculaire. La plupart des essais peuvent, en fait, être associés au calcul intermédiaire.

De manière plus précise, la comparaison des figures associées à une même contrainte et soit au serrage soit au desserrage du joint (figures A13.4, A13.7, A13.9 et figures A13.5 et A13.8) montre que les corrélations au niveau de la partie B possèdent une composante moléculaire plus importante que celles de la partie A. Les courbes expérimentales des fuites méthane sont, dans le cas de la partie B, plus proches de celles associées au calcul moléculaire. La composante moléculaire de l'écoulement semble donc plus importante lorsque l'écrasement du joint est plus grand, même lorsque la contrainte appliquée sur le joint est identique.

Cela peut être observé de manière plus quantitative sur les figures A13.10 et A13.11. Ces figures, que seul le niveau de pression interne diffère, montrent que plus l'écrasement du joint est important, plus les prévisions effectuées à l'aide du calcul laminaire s'éloignent de la mesure réelle. Cette diminution des performances du calcul laminaire peut être associée à l'augmentation de celles du calcul moléculaire.

Les premières conclusions de l'étude semblent donc aller globalement dans le sens de l'hypothèse formulée. La composante moléculaire de l'écoulement est plus importante, lorsque le joint est plus écrasé même s'il est soumis à une contrainte égale. Cela est cohérent avec ce que propose le modèle de joint utilisé. En effet, l'augmentation de l'écrasement du joint peut être associé à la diminution des diamètres des passages gazeux qu'il contient. Cette diminution entraîne celle du nombre de Knudsen et donc une plus grande importance de l'aspect moléculaire de l'écoulement. Ainsi la nature de l'écoulement semble bien pouvoir être directement reliée à l'épaisseur du joint et ce indépendamment de son état de contrainte.

4.4. Evolution du quantificateur de l'écoulement

La dernière figure de l'annexe vient confirmer ce qui vient d'être formulé. La figure A13.12 présente l'évolution du quantificateur de l'écoulement "s" en fonction de l'écrasement du joint. Les points associés aux parties A et B de l'essai sont, ici, dissocies Deux séries de points sont associées à chacun des deux gaz testés. Il est à noter que les coefficients "s" ont été calculés en prenant en compte, dans tous les cas, les mêmes niveaux de pression pour le calcul. La technique des moindres carrés est toujours utilisee pour calcul des pentes de la droite définie par $\text{Log } P = s \text{ Log } Q + b$.

L'évolution des courbes de la partie A est similaire à celle déjà observée lors des essais précédents. Le coefficient passe, dans ce cas, de 0,55 à 0,75 pour l'hélium lorsque la contrainte, où l'écrasement, augmente. de plus un décalage existe entre les courbes hélium et méthane. Ce décalage est, lui aussi cohérent, avec ce qui avait été présenté. Lorsque l'écoulement est intermédiaire, il a été montré (annexe 11) que l'utilisation d'un gaz autre que l'hélium serait susceptible d'ajouter une composante laminaire à l'écoulement, c'est-à-dire de diminuer la valeur de la pente "s".

Les points associés à la partie B de l'essai se trouvent être proches des courbes tracées pour la partie A. un écart plus important est à associer au point correspondant au troisième desserrage à 42 MPa. Afin de relativiser cet écart, il est nécessaire de rappeler que l'échelle de représentation est précise et que le mode de calcul de "s" est sensible à la moindre variation des mesures de fuites prises en compte.

A l'aide de cette dernière figure, et des précédentes étudiées, il est possible de remarquer que, globalement, l'hypothèse formulée semble vérifiée. Il semble acquis que la nature de l'écoulement soit bien liée à l'écrasement du joint et ce indépendamment de son état de contrainte. L'augmentation de l'écrasement du joint entraînera une l'augmentation de la composante moléculaire de l'écoulement en son sein.

De plus, la figure A13.12 permet de mettre en évidence un méthode simplifiée de quantifier les changements de la nature de l'écoulement. En effet, les valeurs de "s" obtenues pour la partie B de l'essai sont positionnées à proximité de la courbe associée à la partie A. Ainsi, la nature de l'écoulement lors du desserrage d'un joint pourra être déduite de l'évolution de "s" déterminée sur la partie A. En reportant l'écrasement du joint mesuré lors de la partie B sur la courbe de la partie A, une bonne estimation de "s" pourra être obtenue.

5. Conclusions et recommandations

La mise en place d'un essai destiné à procéder à une première investigation de l'influence du desserrage sur la nature de l'écoulement au sein de joints d'étanchéité s'est heurtée à une difficulté importante. L'absence de contrôle permanent sur l'écrasement du joint rend influent le phénomène de "fluage inverse" qui se caractérise par un gonflement important du joint suite à son desserrage. Ce problème a, ici, été atténué en respectant d'importants temps d'attente entre le desserrage du joint et la mesure de fuites.

La remarque concernant la plus grande facilité de mesure de fuites comparativement aux essais précédents peut, maintenant, être associée à la nature des écoulements observés. En effet, même si certaines fuites ont été inférieures à celles précédemment mesurées, le temps de stabilisation nécessaire fut moindre. De plus, il a été remarqué que, pour ce dernier joint, l'écoulement n'a jamais été complètement moléculaire. Ces remarques viennent confirmer deux points qui ont été relevés précédemment.

Tout d'abord, il ne semble pas possible d'associer le niveau de fuite à un régime particulier d'écoulement. Lors de ce dernier essai, des fuites inférieures ont été mesurées et ont pu être associées à un écoulement intermédiaire. Lors des essais précédents les plus petites fuites mesurées avaient été associées à un écoulement moléculaire.

De plus il semble que le lien entre temps de stabilisation de la fuite et nature de l'écoulement, déjà pressenti, soit encore mis en avant par ce dernier essai. Quelque soit le niveau de fuite, l'écoulement moléculaire nécessitera un temps de stabilisation plus important que l'écoulement intermédiaire. C'est ce que nous indique la comparaison des temps de stabilisation observés lors des précédents essais et durant le dernier essai réalisé.

La difficulté rencontrée lors des précédents essais pour la mesure de petites fuites ne semble donc pas pouvoir, comme cela avait été pressenti, être associée aux seules performances du montage expérimental, mais plutôt à la nature de l'écoulement qui se manifeste par des temps de stabilisation des fuites plus ou moins longs.

Les résultats obtenus semblent confirmer l'importance de l'écrasement du joint sur la nature de l'écoulement qui le traverse. Ils semblent, de plus, aller dans le sens de l'hypothèse émise. La nature de l'écoulement ne serait, au sein d'un type de joint donné, qu'une fonction de son écrasement. Ainsi il est possible de conclure que l'écoulement après desserrage du joint sera de même nature que celui obtenu lorsque le joint possédait la même épaisseur lors de la phase de serrage. Cela s'illustre notamment par la mise en commun des résultats obtenus pour les parties A et B de l'essai comme sur la figure A13.12.

L'impact de cette remarque sur la corrélation entre fuites de différents gaz est important. Puisqu'il a été vu que la corrélation permettant de lier les fuites de différents gaz dépend de la nature de l'écoulement gazeux au sein d'un joint, il semble important de pouvoir décrire cette nature quelque soient les conditions d'utilisation du joint. Le travail qui vient d'être mené sur l'impact du desserrage semble montrer qu'il ne sera pas nécessaire de déterminer directement la nature de l'écoulement lors les phases de desserrage du joint. En effet il suffira de connaître l'évolution de l'écoulement lors de la phase de serrage ainsi que l'épaisseur du joint lors du desserrage. La nature de l'écoulement lors du desserrage pourra être déduite en comparant l'épaisseur du joint alors obtenue avec celles du joint lors de la phase de serrage.

La mise en œuvre d'un seul essai à partir d'un montage ne permettant pas un contrôle parfait des conditions auxquelles est soumis le joint, peut ne pas sembler suffisant pour la vérification d'une hypothèse. Il serait probablement intéressant de confirmer le lien entre le régime d'écoulement et l'écrasement d'un joint par la réalisation d'essais complémentaires.

Ceux-ci pourraient être menés en n'utilisant que le gaz hélium et une machine telle que celle destinée aux essais ROTT [6]. Celle-ci permet le contrôle de l'écrasement du joint. L'essai pourrait consister en la mesure de fuites d'un joint lors de l'application de cycles de compression et de décompression. Les fuites seraient alors obtenues pour différents niveaux de pression interne et pour un écrasement donné. Il serait alors possible de calculer, pour chaque écrasement, la pente "s" permettant de quantifier l'écoulement et de vérifier, à la manière de ce qui est présenté par la figure A13.12, que la nature de l'écoulement ne dépend que de l'écrasement du joint.

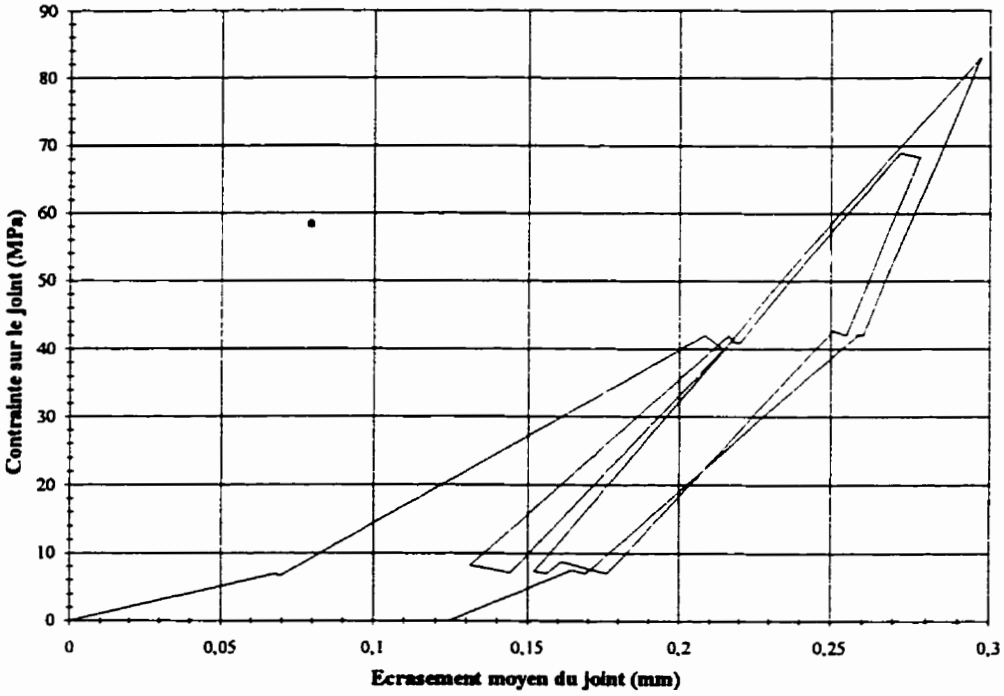


Figure A13.1 : Comportement du joint : Courbe contrainte - écrasement Joint type A9

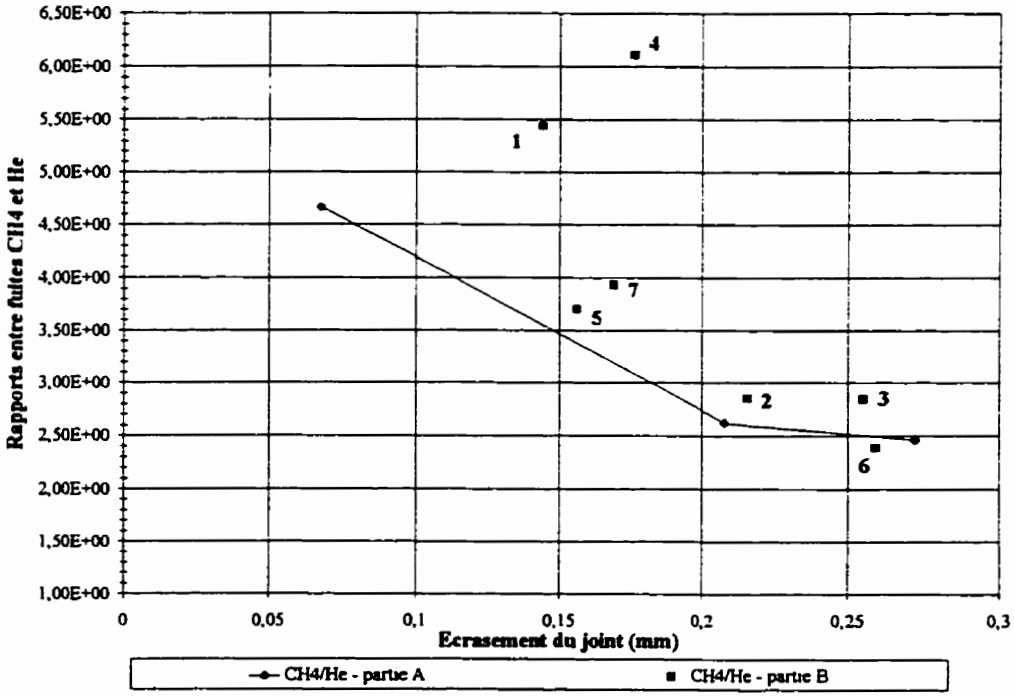


Figure A13.2 : Rapports entre fuites méthane et hélium en fonction de l'écrasement du joint - Pression interne 1,378 MPa (200 psi) - Joint type A9

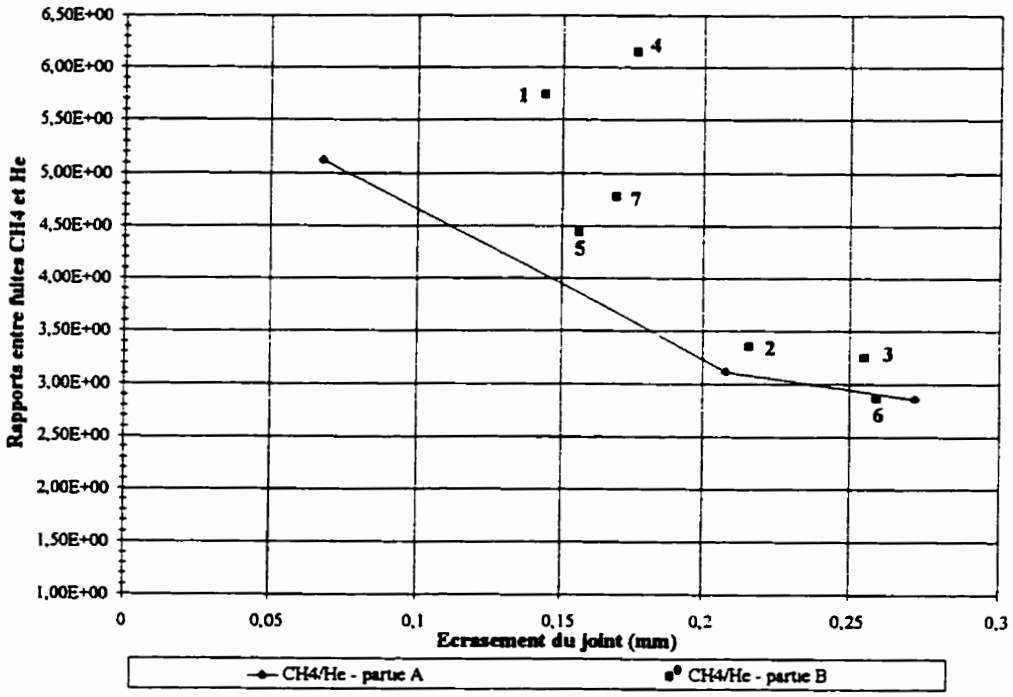


Figure A13.3 : Rapports entre fuites méthane et hélium en fonction de l'écrasement du joint - Pression interne 2,757 MPa (400 psi) - Joint type A9

Numéro	Description (niveau de contrainte , numéro du desserrage)	Long temps d'attente préalable pour atténuer l'effet du " fluage inverse "
1	7 MPa, Desserrage 1	Non
2	42 MPa, Desserrage 1	Non
3	42 MPa, Desserrage 2	Non
4	7 MPa, Desserrage 2, Essai 1	Non
5	7 MPa, Desserrage 2, Essai 2	Oui
6	42 MPa, Desserrage 3	Oui
7	7 MPa, Desserrage 3	Oui

Tableau A13.1 : Légende des figures A13.2 et A13.3 - Condition d'essai pour les mesures de la partie B du test

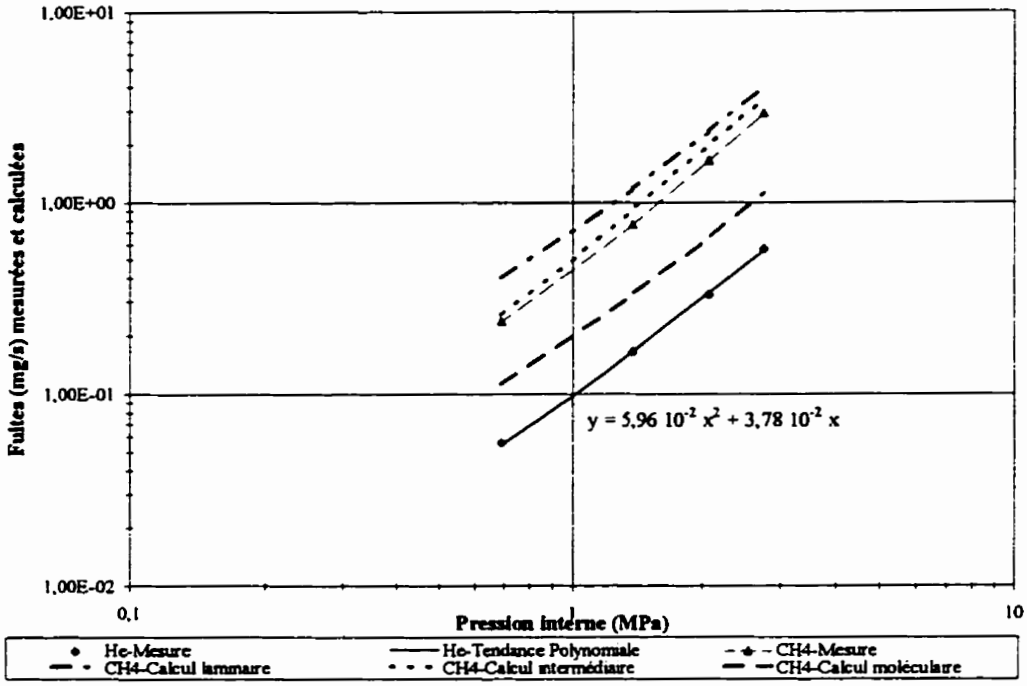


Figure A13.4 : Fuites mesurées et calculées par les trois modes de calcul Hélium et méthane - Joint type A9 - 7 MPa - Partie A (serrage)

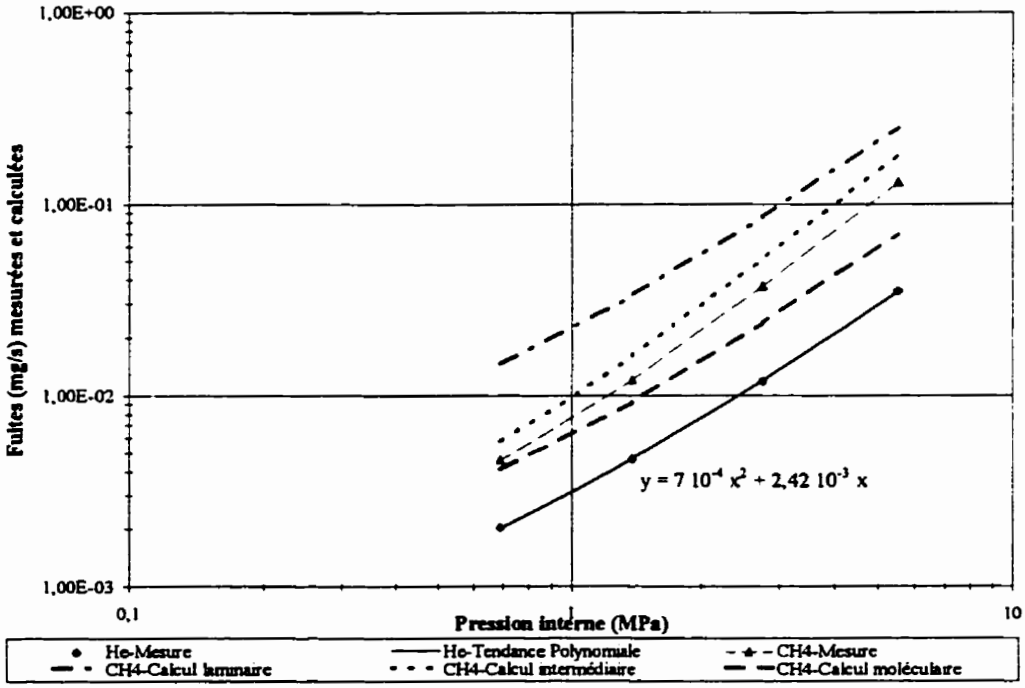


Figure A13.5 : Fuites mesurées et calculées par les trois modes de calcul Hélium et méthane - Joint type A9 - 42 MPa - Partie A (serrage)

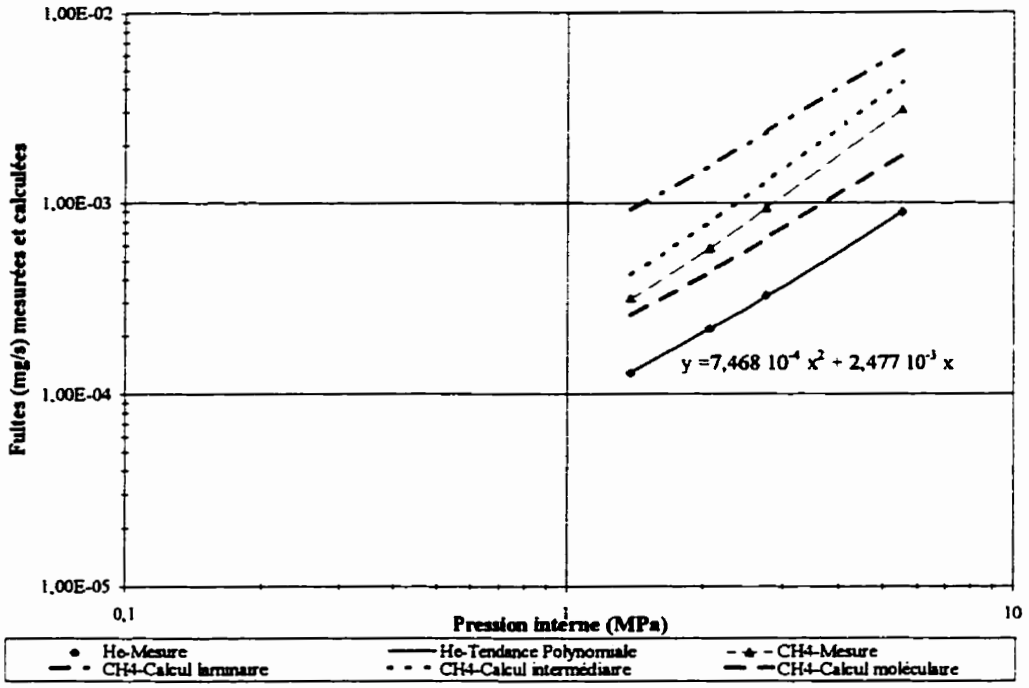


Figure A13.6 : Fuites mesurées et calculées par les trois modes de calcul Hélium et méthane - Joint type A9 - 69 MPa - Partie A (serrage)

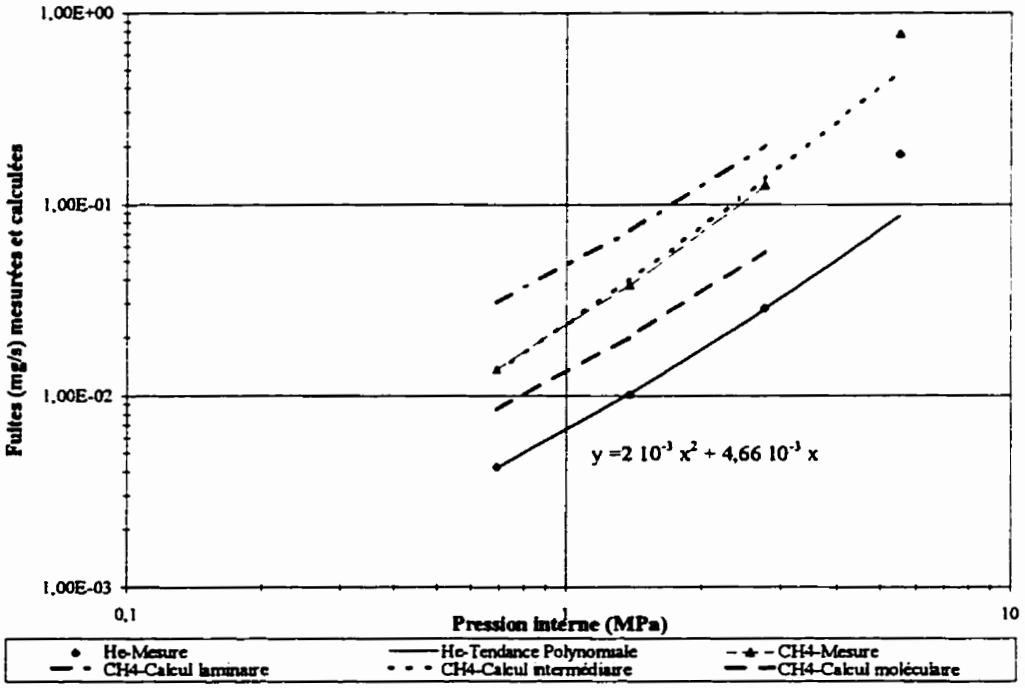


Figure A13.7 : Fuites mesurées et calculées par les trois modes de calcul - Hélium et méthane - Joint type A9 - 7 MPa - Partie B (second desserrage, premier essai)

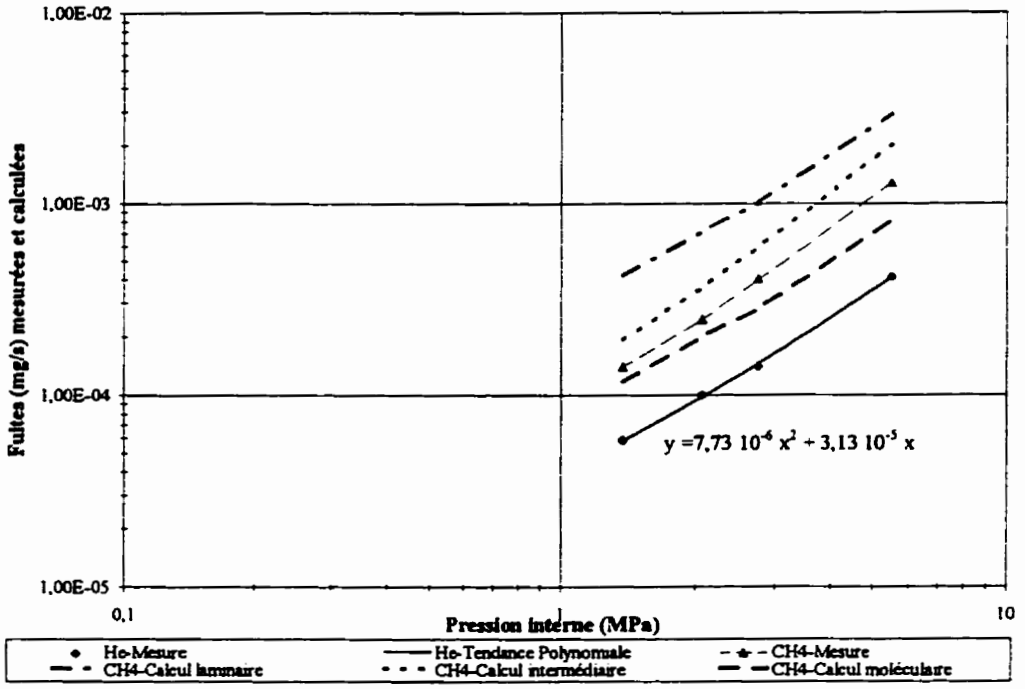


Figure A13.8 : Fuites mesurées et calculées par les trois modes de calcul Hélium et méthane - Joint type A9 - 42 MPa - Partie B (troisième desserrage)

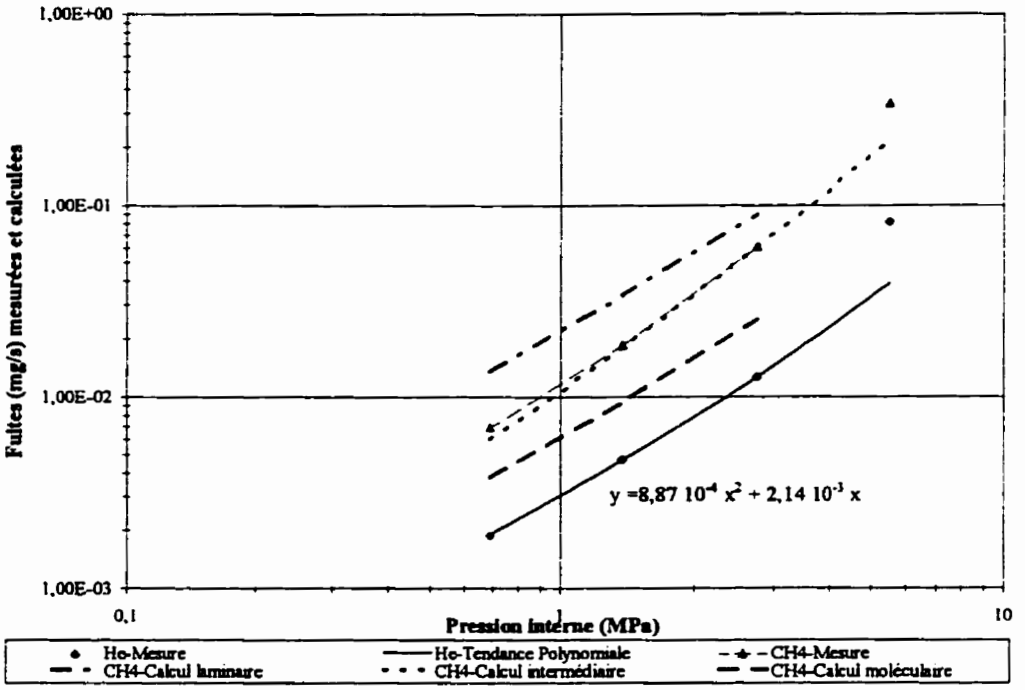


Figure A13.9 : Fuites mesurées et calculées par les trois modes de calcul Hélium et méthane - Joint type A9 - 7 MPa - Partie B (troisième desserrage)

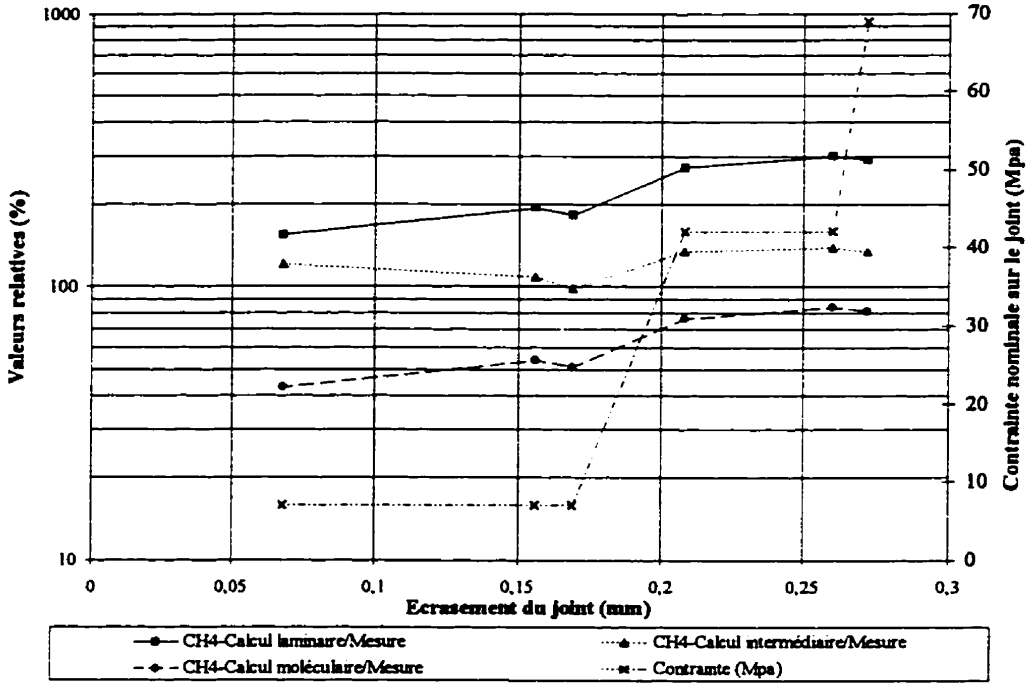


Figure A13.10 : Performances des trois modes de calcul en fonction de l'écrasement et de l'état de contrainte du joint - Pression interne 1,379 MPa

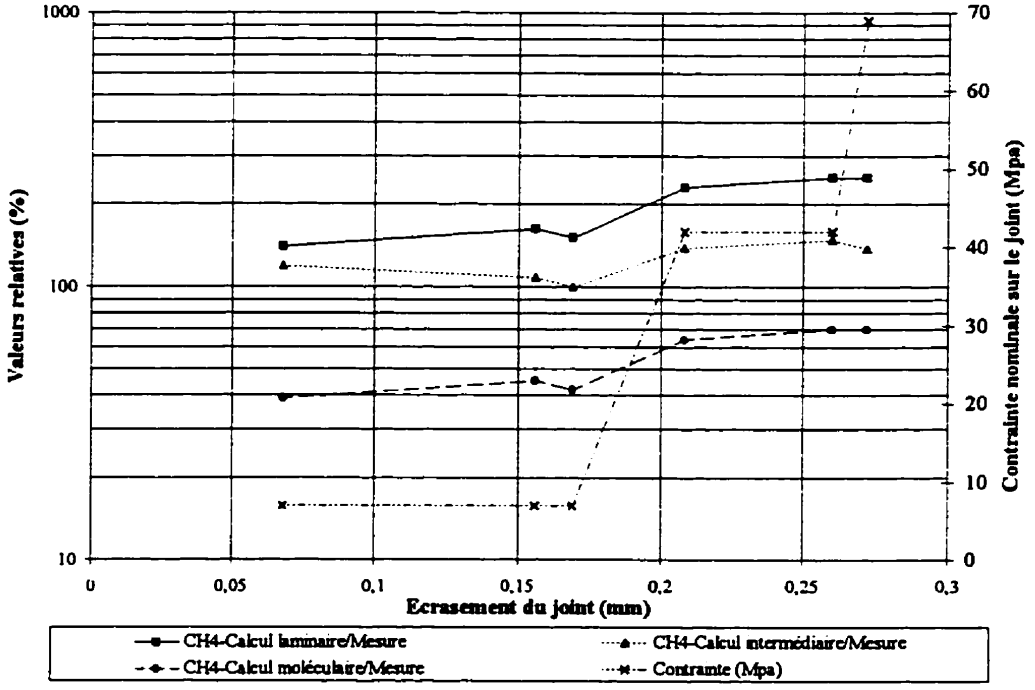


Figure A13.11 : Performances des trois modes de calcul en fonction de l'écrasement et de l'état de contrainte du joint - Pression interne 2,758 MPa

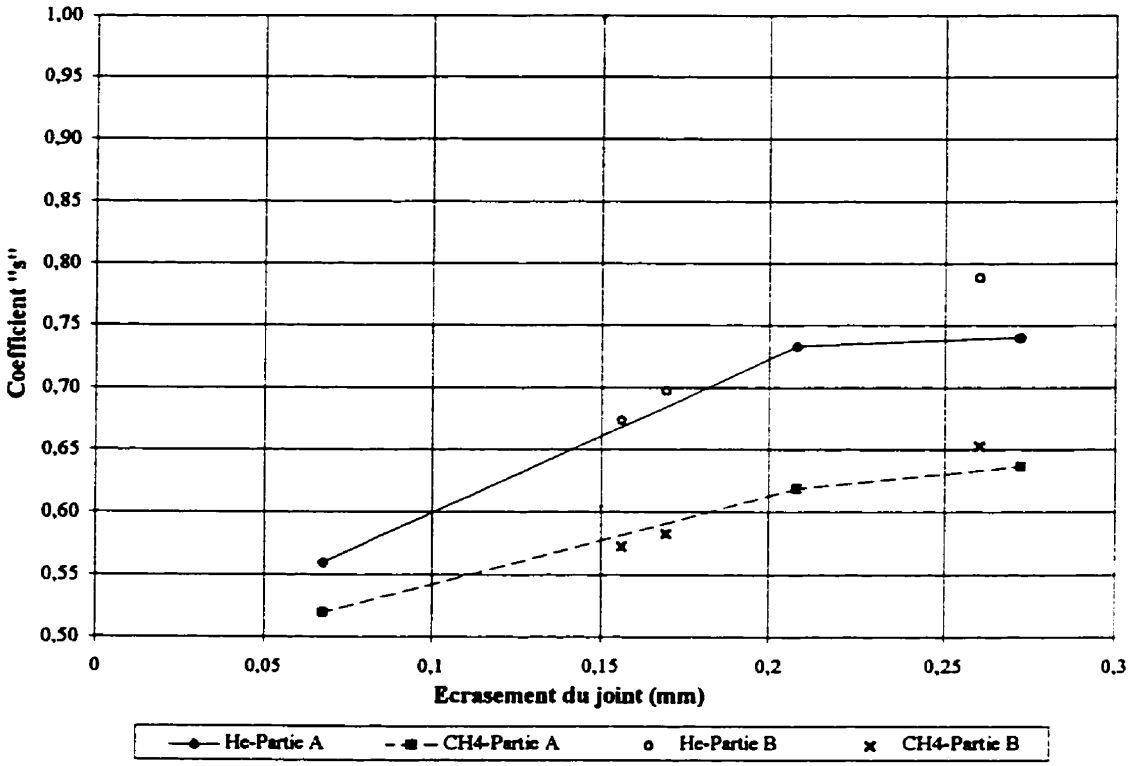


Figure A13.12 : Evolution du coefficient " s " avec l'écrasement du joint Hélium et CH4 - Partie A : Compression du joint - Partie B (desserrage)

ANNEXE 14

LE PARAMETRE D'ETANCHEITE Tp ET LA CONCEPTION DE SYSTEMES ETANCHES

L'objectif principal de l'étude est de proposer des améliorations aux techniques de conception de systèmes étanches. Les figures de cette annexe se proposent d'illustrer les résultats associés à ces propositions.

Dans un premier temps les figures présentées (figures A14.1 à A14.4 et A14.9 à A14.12) se proposent d'illustrer les performances du paramètre Tp.

L'impact d'une modification de ce paramètre sur les résultats obtenus sont présentés par une seconde série de figures (figures A14.5 à A14.8 et A14.3 à A14.16).

Enfin, les figures A14.17 et A14.18 illustrent les nouvelles procédures proposées pour la caractérisation de joints et la conception de systèmes étanches.

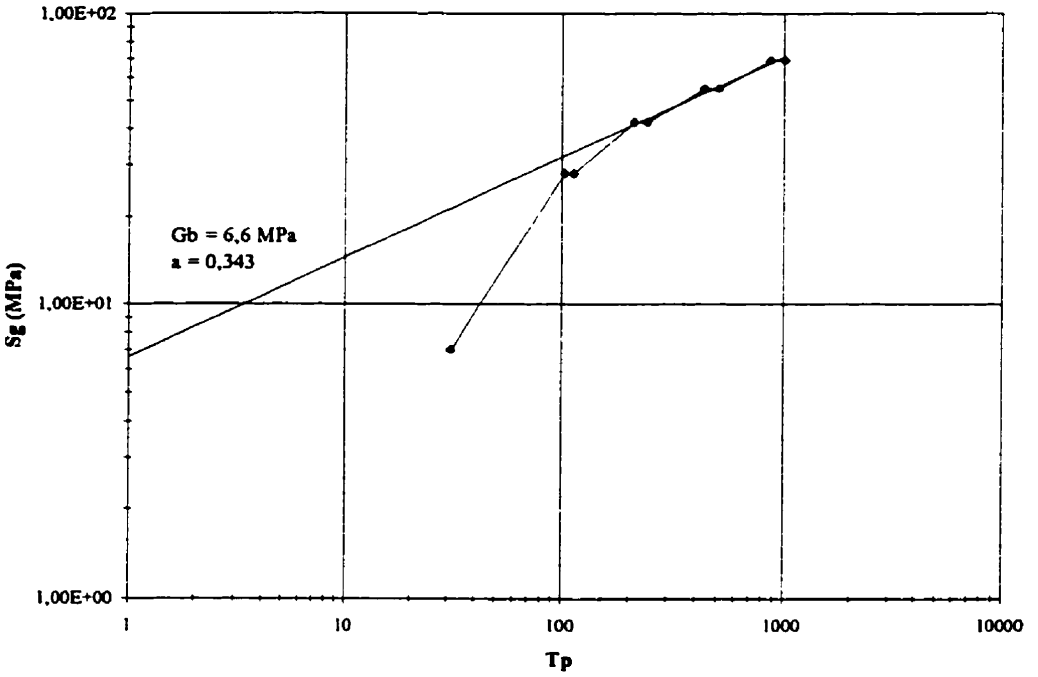


Figure A14.1 : Courbe liant le Tp à la contrainte sur le joint - Formulation actuelle Joint type A9

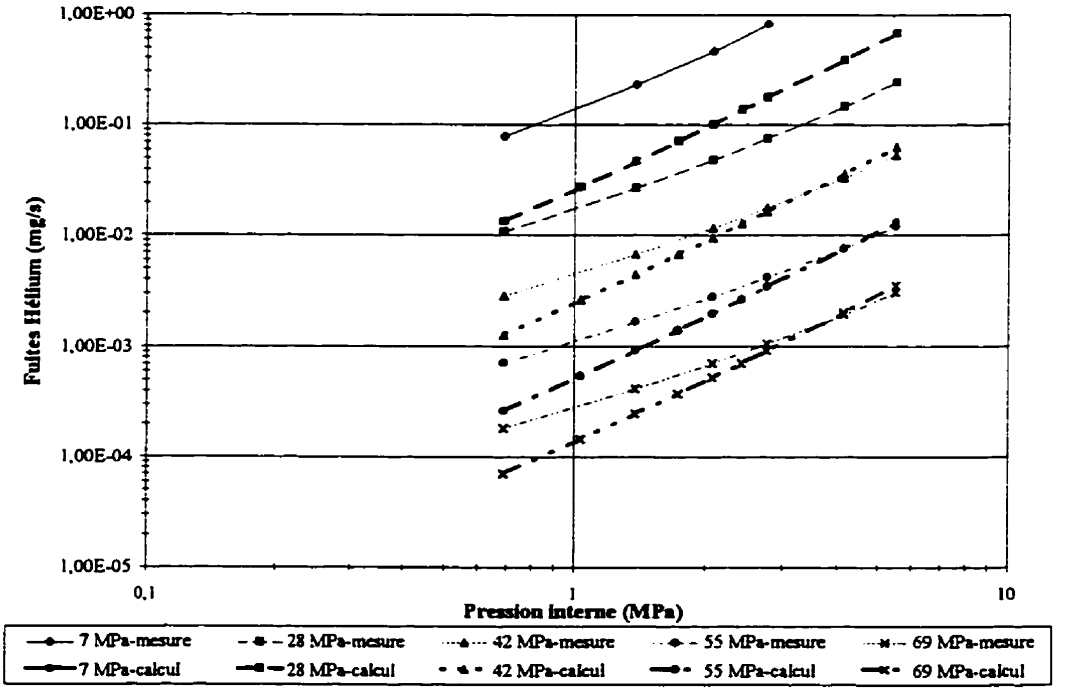


Figure A14.2 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a et de Tp avec les fuites mesurées - Formulation actuelle - Joint type A9

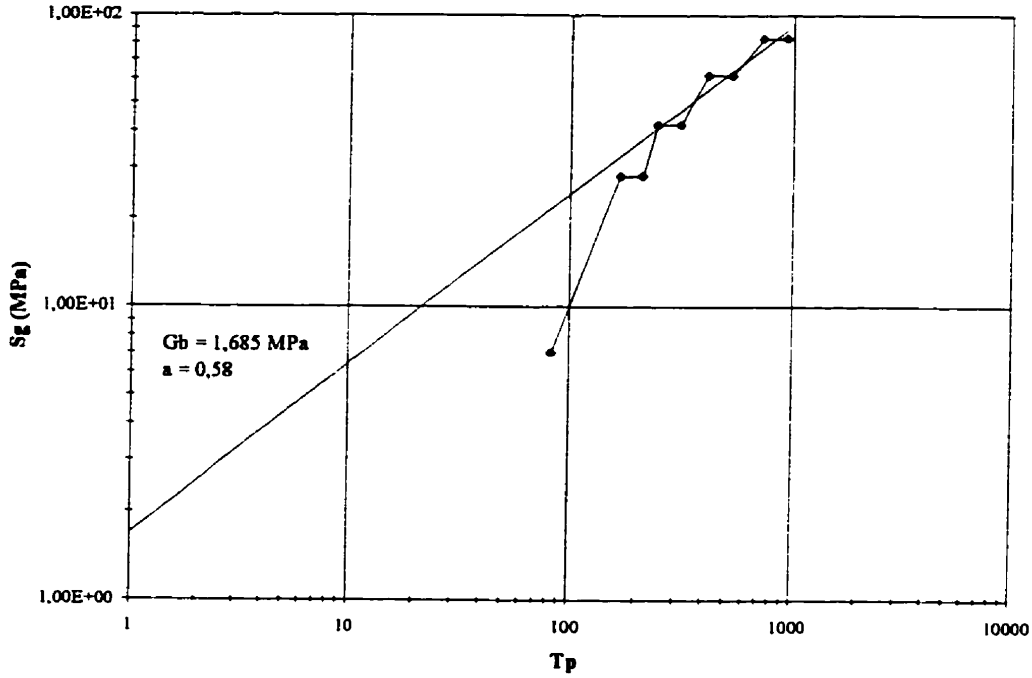


Figure A14.3 : Courbe liant le Tp à la contrainte sur le joint - Formulation actuelle Joint type G2

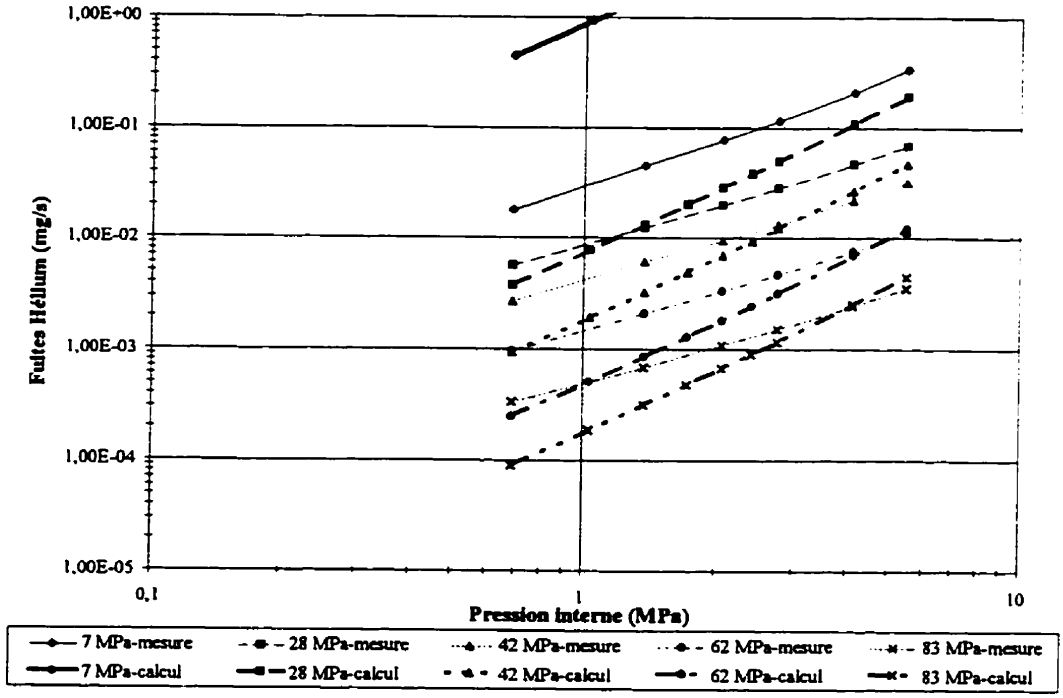


Figure A14.4 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a et de Tp avec les fuites mesurées - Formulation actuelle - Joint type G2

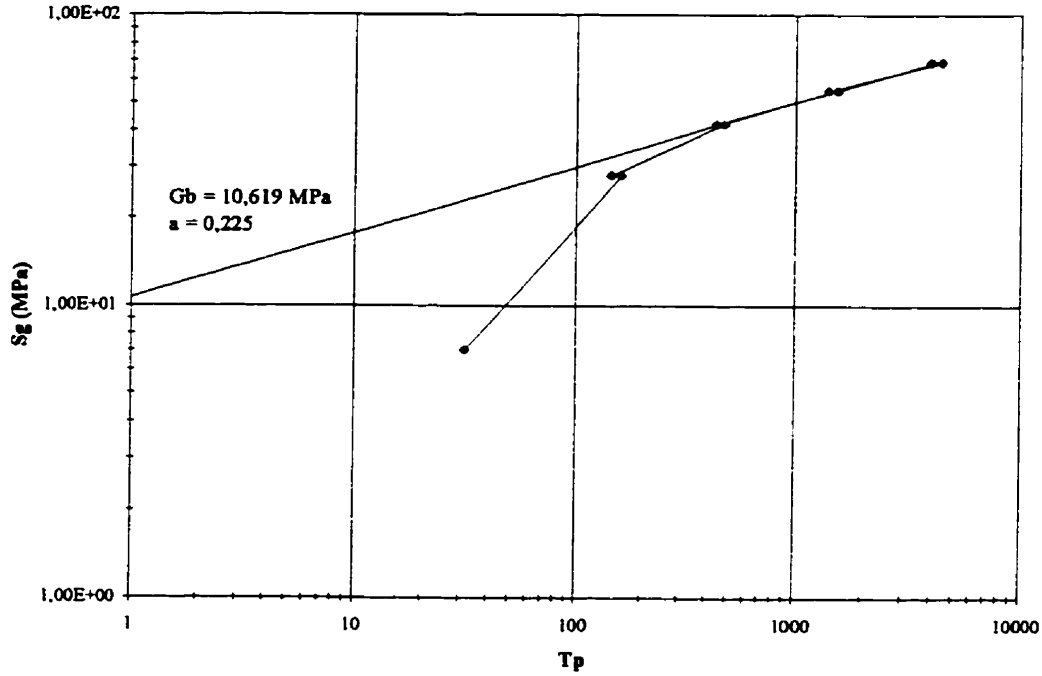


Figure A14.5 : Courbe liant le Tp à la contrainte sur le joint - Nouvelle formulation proposée - Joint type A9

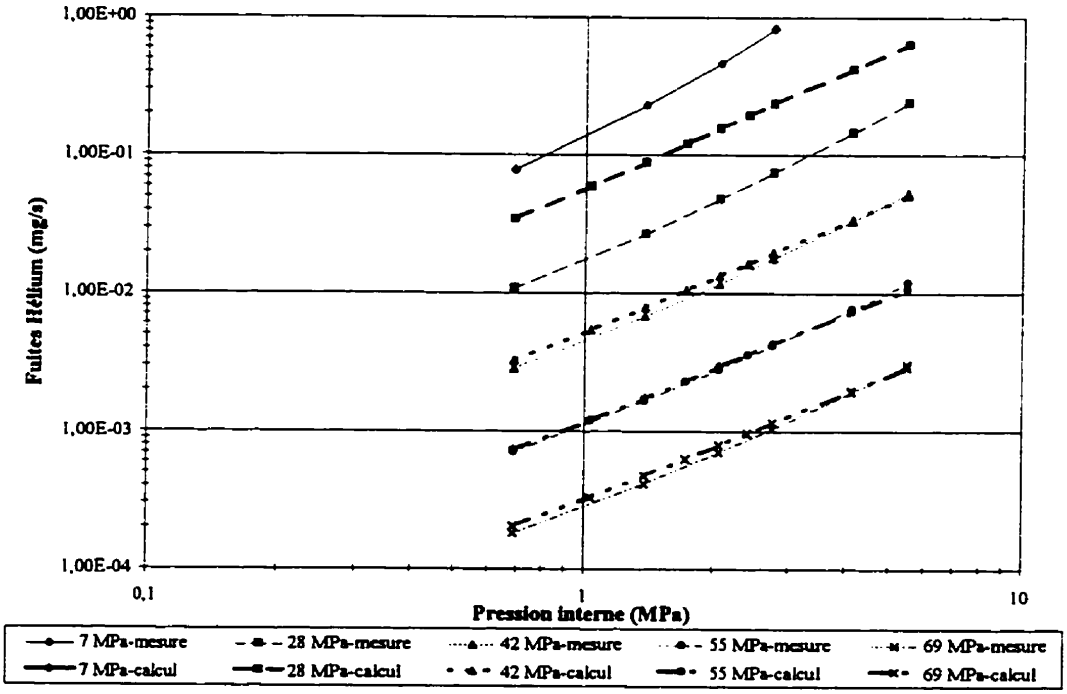


Figure A14.6 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a et de Tp avec les fuites mesurées - Nouvelle formulation proposée - Joint type A9

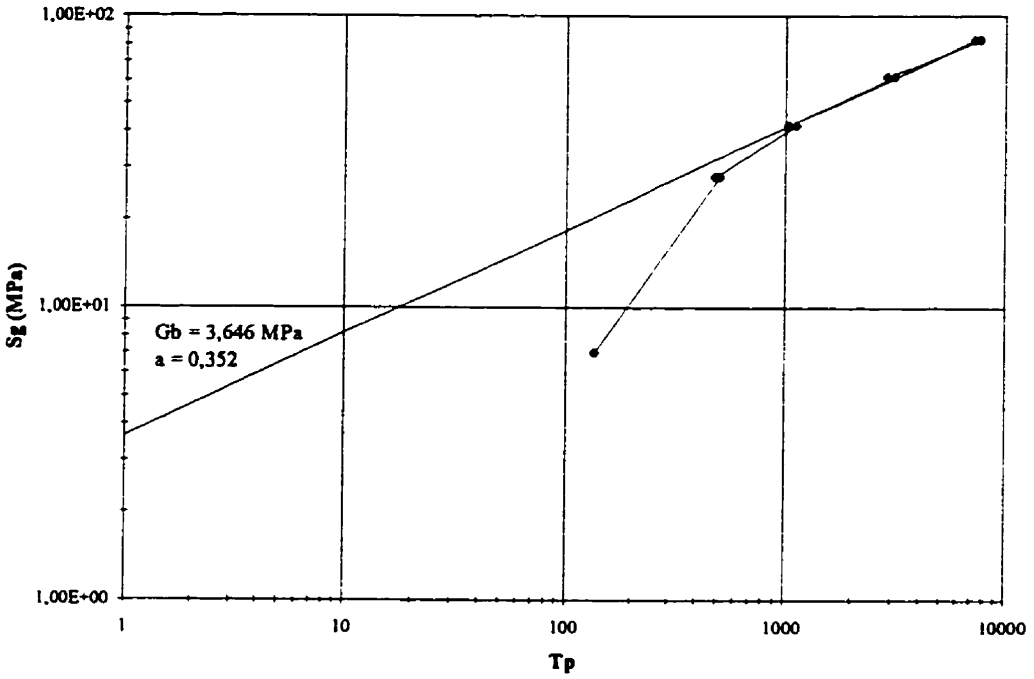


Figure A14.7 : Courbe liant le Tp à la contrainte sur le joint - Nouvelle formulation proposée - Joint type G2

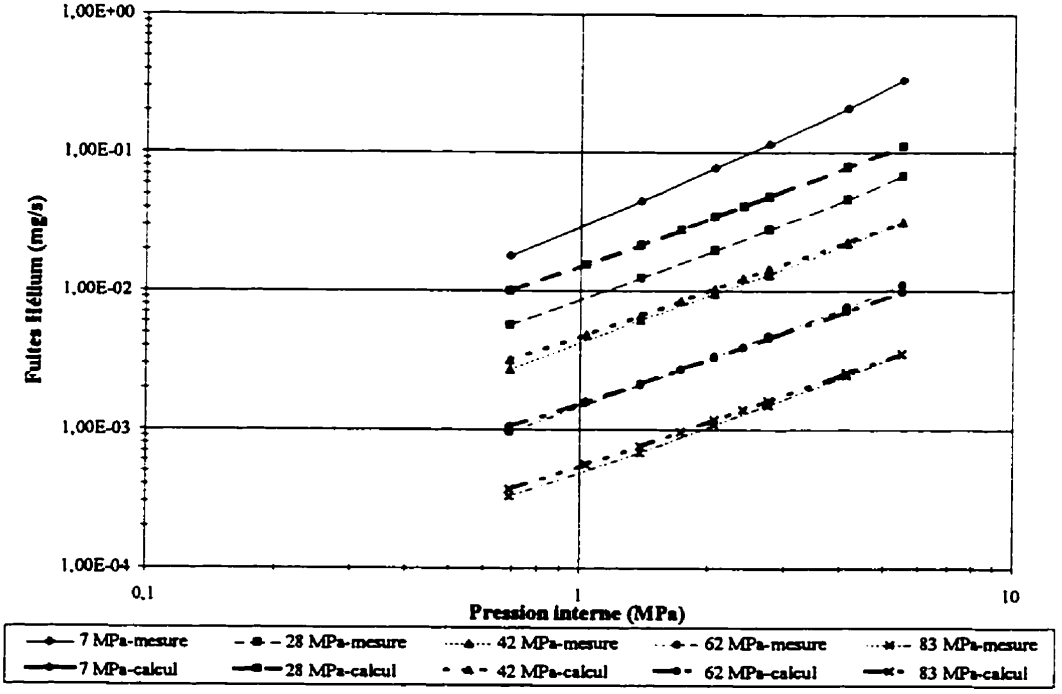


Figure A14.8 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a et de Tp avec les fuites mesurées - Nouvelle formulation proposée - Joint type G2

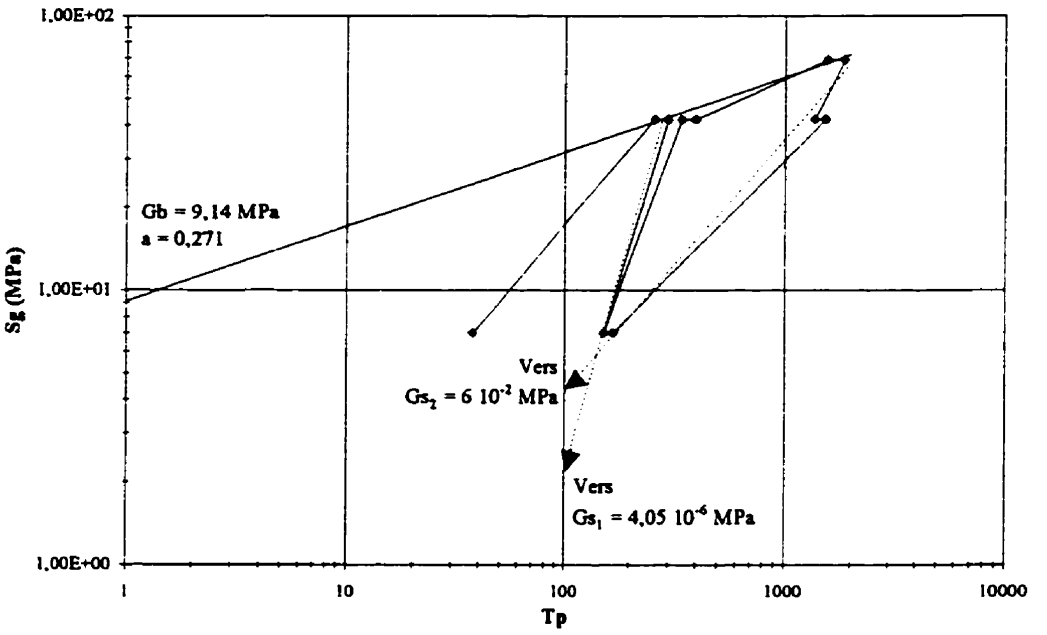


Figure A14.9 : Courbe liant le Tp à la contrainte sur le joint - Formulation actuelle Joint type A9

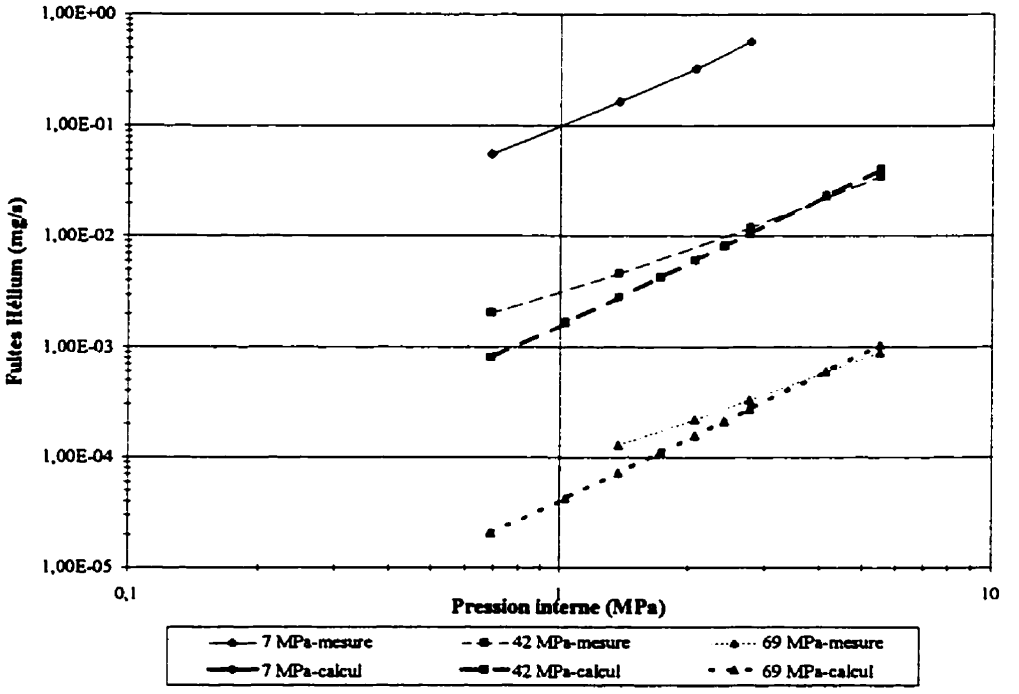


Figure A14.10 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a et de Tp avec les fuites mesurées - Formulation actuelle - Joint type A9 - Partie A

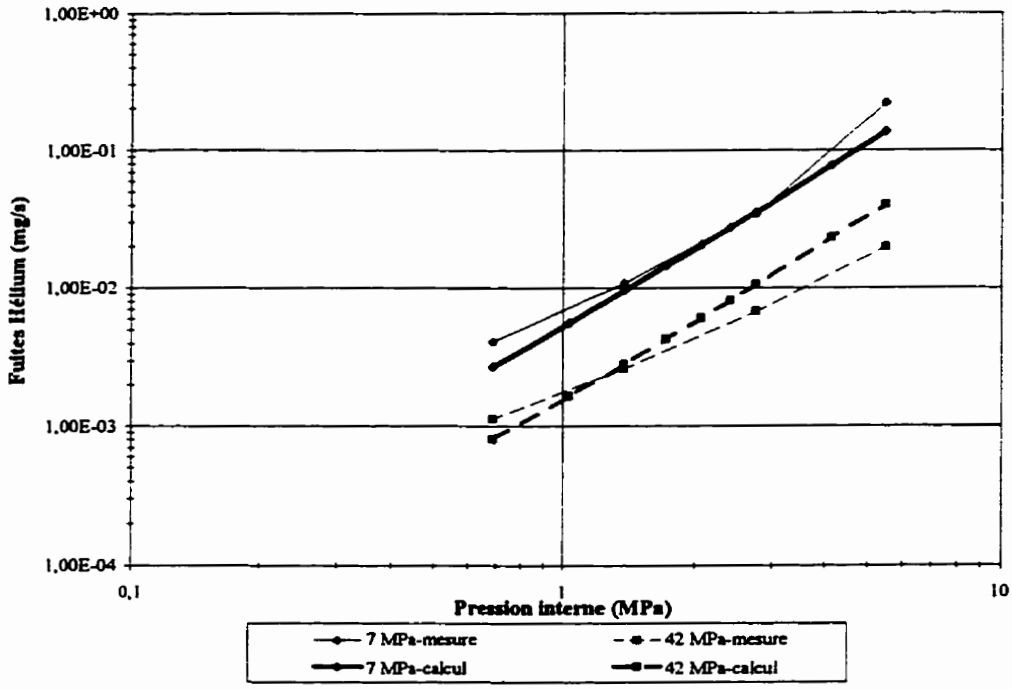


Figure A14.11 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a, Gs_1 et de Tp avec les fuites mesurées - Formulation actuelle - Joint type A9 - Partie B1

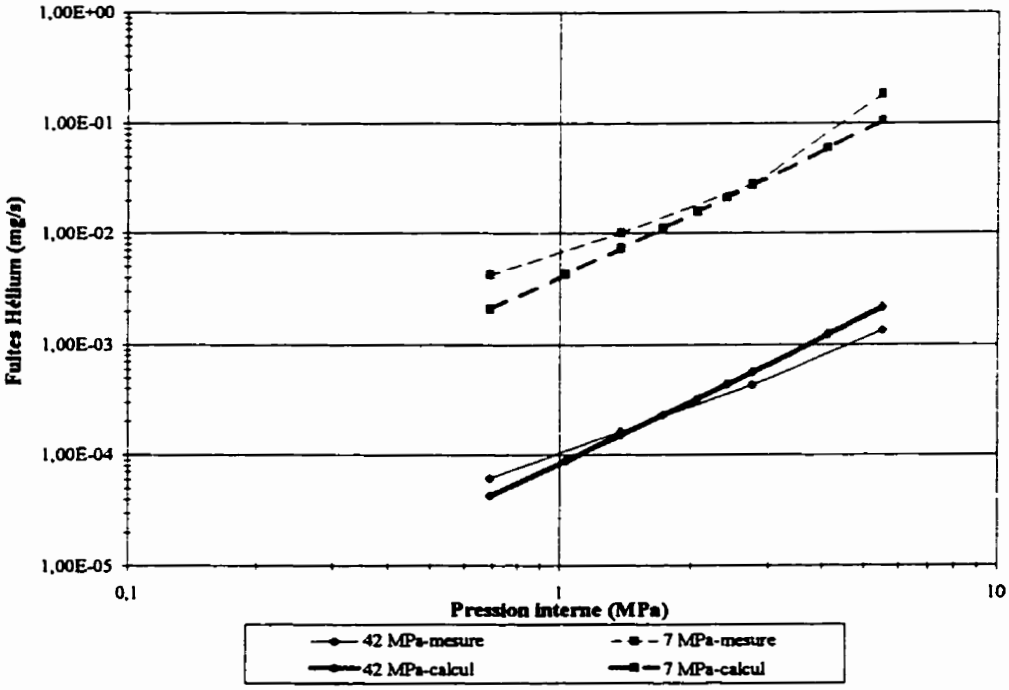


Figure A14.12 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a, Gs_2 et de Tp avec les fuites mesurées - Formulation actuelle - Joint type A9 - Partie B2

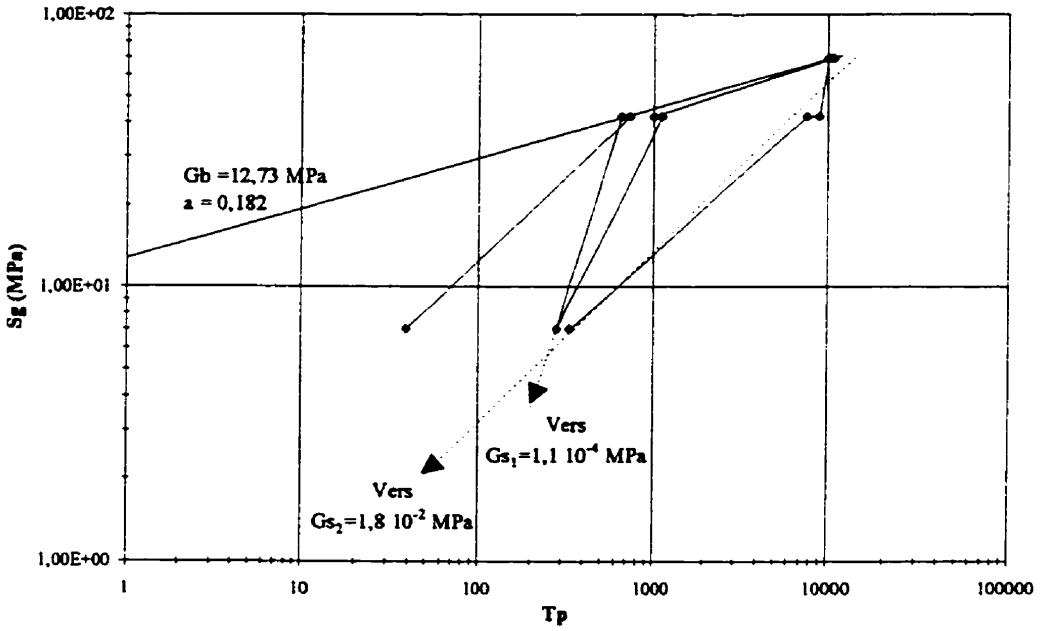


Figure A14.13 : Courbe liant le Tp à la contrainte sur le joint - Nouvelle formulation proposée - Joint type A9

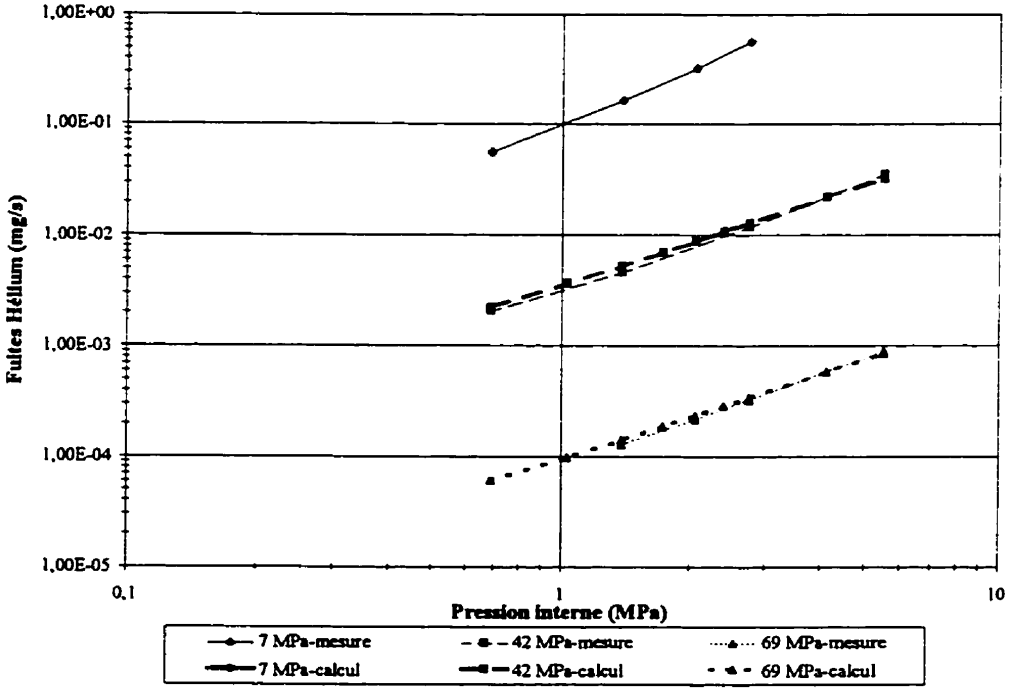


Figure A14.14 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a et de Tp avec les fuites mesurées - Nouvelle formulation proposée - Joint type A9 - Partie A

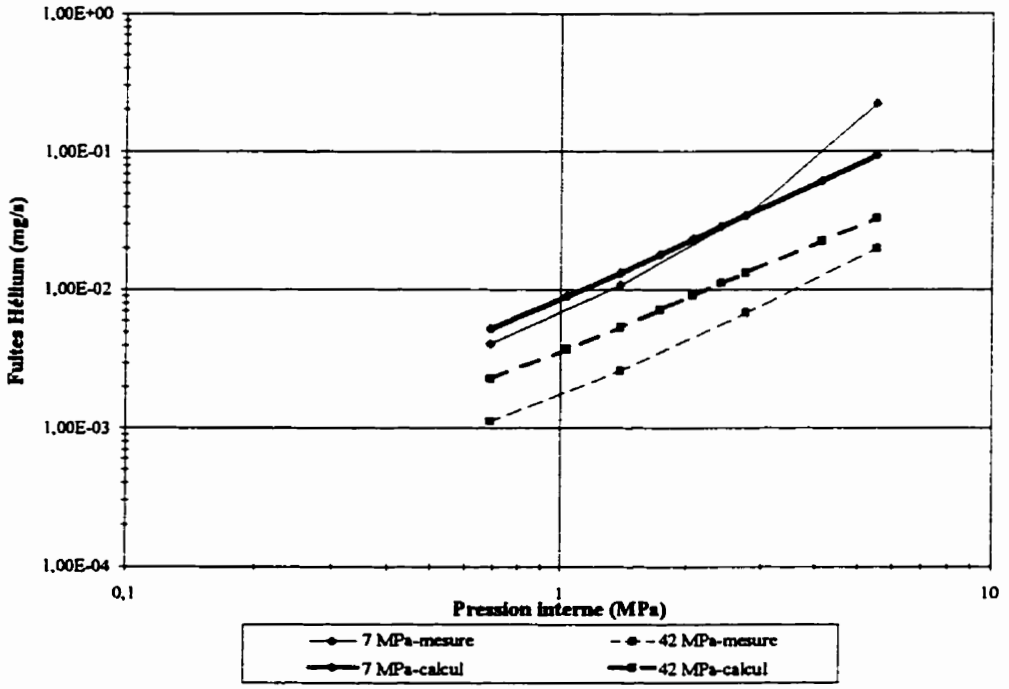


Figure A14.15 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a, Gs_1 et de Tp avec les fuites mesurées - Nouvelle formulation proposée - Joint type A9 - Partie B1

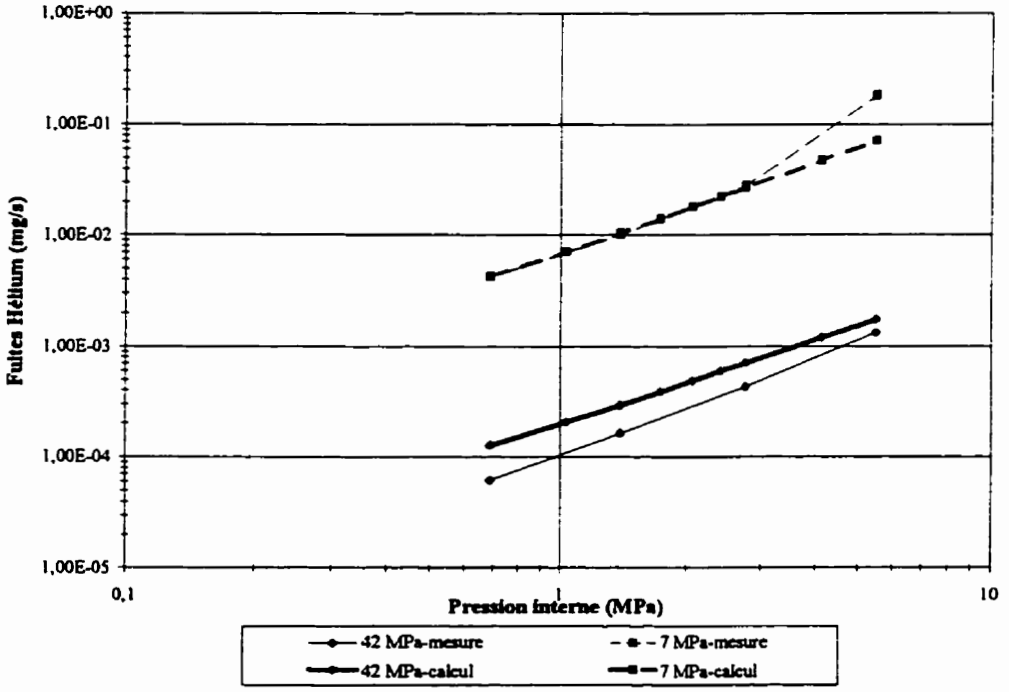


Figure A14.16 : Comparaison des fuites calculées à l'aide de Gb, a, Gs_2 et de Tp avec les fuites mesurées - Nouvelle formulation proposée - Joint type A9 - Partie B2

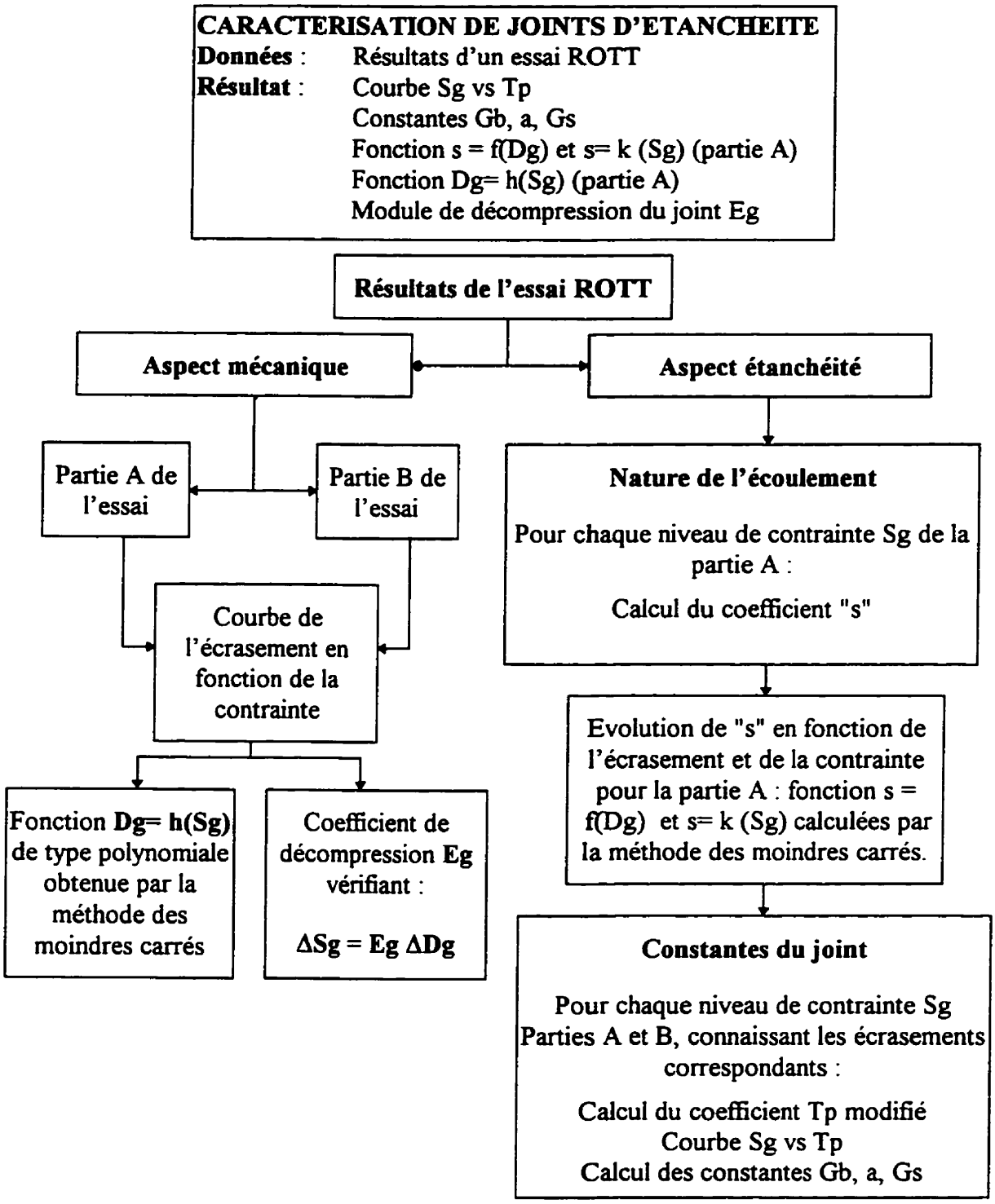


Figure A14.17 : Procédure de caractérisation de joints utilisant la nouvelle formulation du paramètre Tp

CONCEPTION D'UN SYSTEME ETANCHE

Données : Pression de service Ps avec un gaz quelconque
Fuite maximale admissible Lmax
Constantes Gb, a, Gs,
Fonctions s = f(Dg), s = k(Sg) et Dg = h(Sg)
Module de décompression du joint Eg

Objectif : Contrainte à appliquer sur le joint lors du serrage Sy

Estimation de la fuite équivalente hélium L_{maxHe} : corrélation basée sur le mode de calcul laminaire

Estimation du Tpmin :

Calcul de la contrainte de serrage initiale sans effet de fond S_{gl} (partie A) :

$$S_{gl} = G_b \frac{P_s}{P^*}\left(\frac{1}{L_{maxHe}}\right)^{\left[a\,k\left(S_{gl}\right)\right]}$$

Calcul du Tp correspondant :

$$S_{gl} = G_b Tp_{mm}^{a}$$

Procédure classique de calcul

A partir du graphe Sg vs Tp et des constantes Gb, a, Gs, calcul de la contrainte à appliquer sur le joint pour que le Tp final Tpf après déchargement soit tel que : Tpf > Tpmin

Résultat : Contrainte de serrage initial Sy
Contrainte résultante après déchargement du joint Sm

Validation du calcul

Calcul de l'écrasement du joint lors de la mise en service :
Connaissant Sy, Sm, Eg et la fonction Dg = h (Sg), calcul de l'écrasement final du joint Dgf

Calcul du coefficient s correspondant : s = f (Dgf)

Calcul de la fuite Hélium associée :

$$L_{rmHef} = \left(\frac{P^* Tpf}{P_s}\right)^{-\frac{1}{s}}$$

Calcul exact de la fuite du gaz cible :
A l'aide de la valeur de s, choix entre le mode de calcul laminaire, intermédiaire et moléculaire et calcul de Lrmf du gaz cible

Lrmf > Lmax

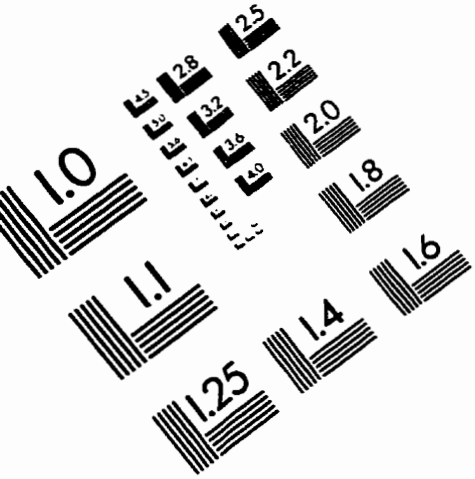
Nouvelle itération : Choix de Sy2 > Sy

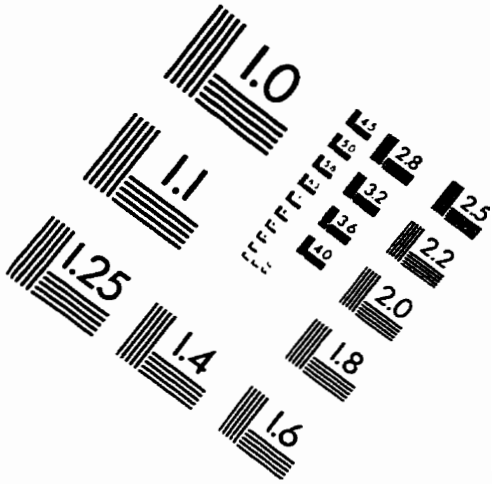
Lrmf < Lmax

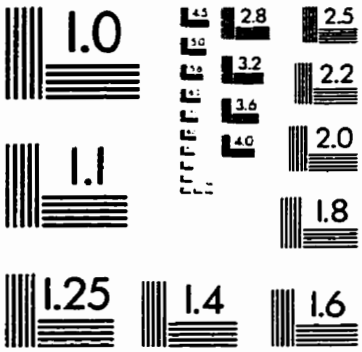
Calcul correct : Calcul de l'effort de serrage a partir de la contrainte Sy

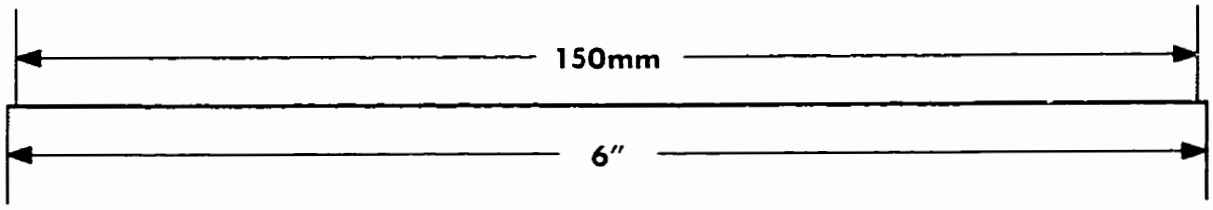
Figure A14.18 : Procédure de conception - Nouvelle procédure proposée

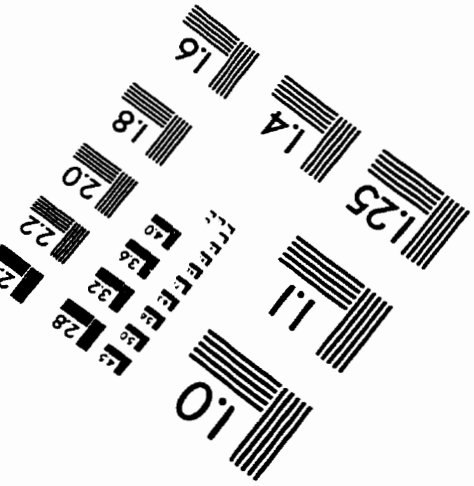
IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

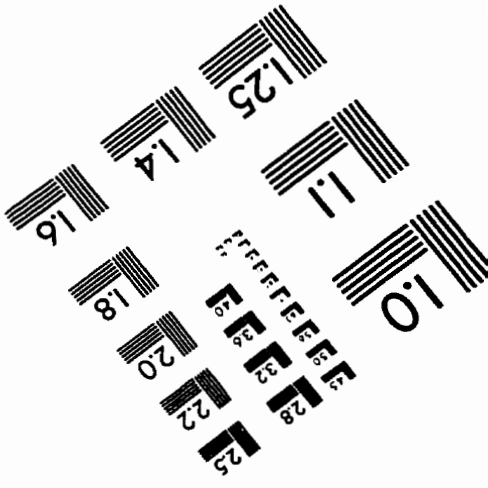










APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved