

# **Transfert de chaleur au travers d'une couche d'hélium d'un support cible dans le cadre de la recherche pour la fusion**

Ing. Th. WAUTELET  
Dr Ph. MERTENS  
Dr B. SCHWEER  
Ir C. CHARLIER  
GRAMME – Liège

*La régulation de la température des échantillons est un des principaux défis technologiques restant dans le générateur linéaire de plasma PSI-2, utilisé au Forschungszentrum Jülich pour étudier les interactions plasma-surface dans le cadre de la recherche pour la fusion. L'utilisation d'une couche d'hélium sous les conditions particulières des gaz raréfiés pourrait apporter une solution.*

*Mots-clefs: Fusion, interaction plasma-surface, transfert de chaleur, gaz raréfié, hélium.*

*The regulation of the samples temperature is one of the main technological challenges remaining in the linear plasma generator PSI-2, operating in Forschungszentrum Jülich for the investigation of plasma-surface interactions in fusion research. The use of a helium gas layer under the specific conditions of rarefied gases could deliver a solution.*

*Keywords: Fusion, plasma-wall interaction, heat transfer, rarefied gases, helium.*

## 1. Introduction

Alors que la GIEC<sup>1</sup> a présenté fin septembre 2013 des conclusions assez inquiétantes quant au réchauffement climatique, la communauté internationale doit également faire face à une demande globale en énergie toujours aussi grandissante, qui est supposée quasi doubler d'ici 2030. Pour répondre à ses besoins en énergie primaire, notre société consomme chaque année une quantité équivalente à 12 milliards de tonnes de pétrole. Parmi cette énergie primaire, trois quarts proviennent des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), qui dégagent tous du dioxyde de carbone par combustion. Malgré une évolution de l'utilisation des énergies renouvelables ces dernières années, le rendement général ou leur développement risque d'être insuffisant pour combler la diminution des réserves de combustibles fossiles.

Une solution pouvant répondre à ce challenge est fondée sur l'utilisation de la réaction de fusion thermonucléaire, qui pourrait devenir une source d'énergie potentiellement "propre", sûre et quasi inépuisable. Jusqu'à ce jour, la principale technologie capable de réaliser la fusion de manière efficace est basée sur le principe du Tokamak, un réacteur expérimental développé dans l'ancienne URSS en 1968. L'idée est de confiner un plasma d'hydrogène dans un champ magnétique à des températures très élevées de telle sorte que l'énergie thermique soit suffisante pour vaincre la répulsion coulombienne des noyaux et ainsi permettre des réactions de fusion.

Les prédictions initiales concernant la réussite de cette technologie étaient de loin trop optimistes, et la fusion ne fut pas réalisée en l'espace de dix années comme prévu. Aujourd'hui en 2013, la communauté internationale concentre ses efforts de recherche sur l'International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) dont le but est de fournir d'ici 2020 une preuve que la fusion peut être utilisée comme source d'énergie.

Dans le cadre de la recherche pour la fusion thermonucléaire, les interactions plasma-paroi jouent un rôle primordial dans la durabilité et

---

<sup>1</sup> Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié le 27 septembre 2013 le premier volet de son 5<sup>ème</sup> rapport d'évaluation *Changements climatiques 2014*.

donc l'économie d'un tokamak. L'Institut de la Physique des Plasmas au Forschungszentrum Jülich, où ce travail fut réalisé, est activement investi dans l'étude des interactions plasma-paroi. Le générateur de plasma linéaire PSI-2, opérationnel depuis 2011, est notamment capable de reproduire des conditions comparables à celles attendues dans ITER, comme des flux de chaleur de l'ordre d'un MW/m<sup>2</sup>. Cependant, un des principaux défis technologiques restants est la régulation de la température des échantillons, en particulier en présence de flux élevés de chaleur (0,1 - 1 MW/m<sup>2</sup>). Il s'avère que l'utilisation d'une couche d'hélium sous les conditions particulières des gaz *raréfiés* pourrait apporter une solution à ce problème du fait de la dépendance de la conductivité thermique en fonction de la pression.

Par conséquent, le but principal de ce travail a été d'étudier l'efficacité de cette solution avec de l'hélium, choisi en raison de sa grande conductivité thermique par comparaison avec les autres gaz. Une étude théorique du transfert de chaleur à travers un gaz raréfié a été effectuée en parallèle avec la conception et l'installation d'un dispositif expérimental. Enfin, afin de mieux comprendre le contexte dans lequel ce travail a été réalisé, le paragraphe suivant présente les concepts de base de la fusion thermonucléaire et décrit plus en détails le problème rencontré sur PSI-2.

## 2. Fusion thermonucléaire

### 2.1 Réaction de fusion nucléaire et sa source d'énergie

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la fusion n'est pas un "phénomène" nouveau et constitue la source d'énergie la plus importante dans l'univers. Ce processus, au cours duquel des noyaux atomiques "*légers*"<sup>2</sup> fusionnent ensemble pour former des noyaux plus "*lourds*", se produit dans les étoiles, telles que le Soleil, et libère son énergie au travers des chaînes de réactions de fusion. Chaque seconde, le Soleil fusionne environ 600 millions de tonnes d'hydrogène pour former de l'hélium,

---

<sup>2</sup> Dans ce contexte, le qualificatif *léger* signifie que le nombre de masse A (protons + neutrons) est faible. Inversement, un noyau atomique *lourd* possède un nombre de masse élevé.

libérant une large quantité d'énergie dont seulement une infime partie atteint la Terre ( $\sim 1\text{kW/m}^2$  à la surface de la Terre comparé aux plusieurs  $\text{TW/m}^2$  produits dans le cœur du Soleil).

Les réactions nucléaires se différencient des réactions chimiques principalement par le fait qu'elles impliquent les protons et les neutrons du noyau atomique, au lieu des électrons orbitant autour de celui-ci. De plus, il est reconnu que l'énergie du noyau atomique peut être exploitée de deux manières: soit en séparant (de manière naturelle ou par bombardement neutronique) des *gros* noyaux atomiques en plus *petits* (fission) soit en combinant des *petits* noyaux en plus *gros* (fusion). Malgré que ces deux processus semblent être opposés, la fusion et la fission peuvent libérer de l'énergie et l'explication de ces phénomènes est illustrée par la Figure 2-1.

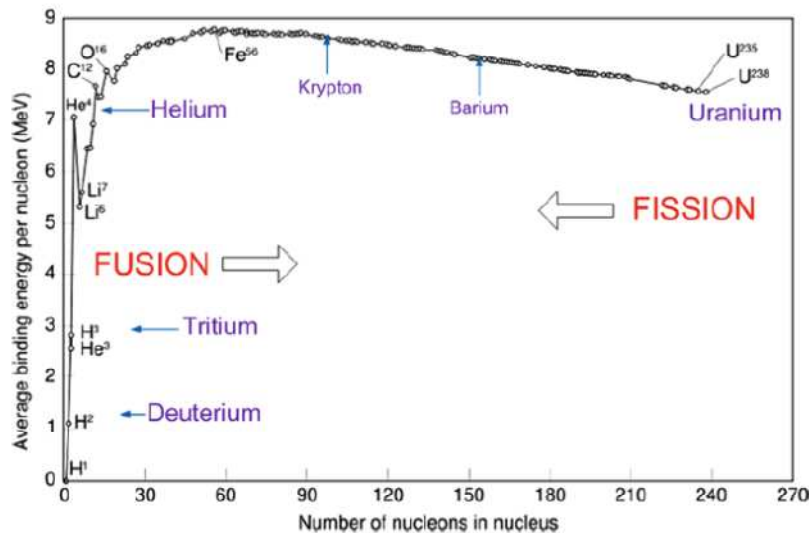
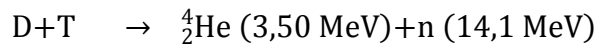


Figure 2-1: Énergie de liaison moyenne par nucléon en fonction du nombre de nucléons dans le noyau.

L'énergie libérée provient de la différence entre les énergies de liaison nucléaire des composants initiaux et finaux. Selon la célèbre équation d'Albert Einstein décrivant l'équivalence entre masse et énergie ( $E = m.c^2$ , où  $c$ , la vitesse de la lumière, est égal à  $2,997 \cdot 10^8$  m/s), la différence de masse entre les réactifs et les produits est libérée sous forme d'énergie. L'équation d'Einstein permet ainsi d'expliquer comment des petits

changements de masse dans les combustibles nucléaires peuvent libérer une grande quantité d'énergie, principalement sous forme d'énergie cinétique.

A l'heure actuelle, la réaction de fusion la plus efficace et réalisable en laboratoire sur Terre est la réaction entre le deutérium (D) et le tritium (T), qui sont tous deux des isotopes de l'hydrogène. En fait, il s'agit de la réaction de fusion qui permet d'obtenir le gain énergétique le plus élevé aux températures les plus "basses". La réaction D-T est illustrée par l'équation ci-dessous<sup>3</sup>.



Afin de mettre en évidence l'intérêt énergétique des réactions de fusion, une comparaison avec une réaction chimique typique est présentée dans le tableau ci-dessous.

	<b>Chimie</b>	<b>Fusion sur Terre</b>
<b>Réaction</b>	C + O <sub>2</sub> => CO <sub>2</sub>	D + T => <sup>4</sup> He + n
<b>Energie libérée/réaction</b>	ΔE ~ 1 eV	ΔE ~ 17,6 MeV
<b>Centrale électrique (1000 MW)</b>	2,7x10 <sup>6</sup> T de charbon / année	100 kg de D et 150 kg de T /année

En plus de sa capacité à dégager beaucoup d'énergie à partir de faibles quantités de combustibles, la réaction de fusion ne produit pas de gaz à effet de serre tel que le CO<sub>2</sub>. Il s'avère également que les combustibles de la réaction D-T sont relativement abondants sur Terre ! D'une part, le deutérium se trouve en petites quantités dans l'eau de mer (33g/m<sup>3</sup>) et est couramment extrait par électrolyse. D'autre part, le tritium, malgré une présence rare dans la nature<sup>4</sup>, peut être facilement obtenu via le bombardement neutronique d'un isotope de lithium, qui est abondamment disponible sur Terre (réserves estimées à répondre à la demande mondiale

<sup>3</sup> Les nombres entre parenthèses représentent la quantité d'énergie de la réaction exothermique transportée par chaque composant sous forme d'énergie cinétique et sont exprimés en électron-volt (eV). Cette unité est souvent utilisée en physique nucléaire (1eV=1,602x10<sup>-19</sup> J).

<sup>4</sup> Une faible quantité de tritium est produite continuellement dans la haute atmosphère par interaction entre l'azote et le rayonnement cosmique, selon la réaction suivante : <sup>14</sup>N + n => <sup>12</sup>C + T. Mais cette quantité n'est pas suffisante pour pouvoir l'exploiter.

pendant au moins 1000 ans). Bien que la réaction D-T produit une faible quantité de déchets radioactifs, celle-ci sera limitée dans les réacteurs à fusion et leur durée de demi-vie ne dépasse pas 100 ans contre plusieurs milliers d'années pour les réacteurs à fission nucléaire. Enfin, la fusion est intrinsèquement un processus plus sûr par comparaison à la fission, du fait qu'il n'est pas basé sur une masse critique et une réaction en chaîne.

Même si les chiffres pour les futures centrales à fusion nucléaire ne sont que des prévisions, les caractéristiques spécifiques à la réaction D-T permettent d'expliquer l'intérêt grandissant au cours de ces 20 dernières années dans la recherche pour la fusion. En raison de ses avantages-clés, la fusion représente une solution d'énergie durable à haut potentiel pour l'avenir de l'humanité.

## **2.2 Les conditions de fusion et les progrès technologiques**

L'obtention des conditions adéquates de fusion constitue un véritable challenge technologique ! D'une part, comme les réactions de fusion sont des interactions entre noyaux atomiques, la première condition de fusion consiste à obtenir un plasma. Souvent identifiés comme un quatrième état de la matière, les plasmas sont des gaz complètement ionisés et caractérisés par la présence de porteurs de charge libres, ions et électrons, interagissant entre eux et produisant des champs électriques microscopiques, malgré une neutralité globale. Du fait des propriétés intrinsèques particulières des plasmas, leurs mécanismes d'interaction avec la matière sont relativement complexes et sont toujours activement étudiés à l'heure actuelle.

D'autre part, les noyaux atomiques doivent être suffisamment proches l'un de l'autre pour fusionner. Cependant, comme ces noyaux sont positivement chargés, ils ont naturellement tendance à se repousser. Par conséquent, afin de réaliser une réaction de fusion entre ces noyaux atomiques, il est nécessaire de vaincre cette force de répulsion coulombienne. Une solution consiste à chauffer un volume confiné de combustibles à des températures très élevées, de manière à procurer aux particules une énergie cinétique suffisante pour vaincre la barrière de Coulomb.

Cependant, la réaction de fusion la plus efficace en laboratoire, la réaction D-T, requiert des températures d'environ 100 millions de degrés, afin

d'obtenir un taux de réactions suffisant ! A de telles températures, les atomes sont totalement ionisés et forment un plasma, ce qui remplit la première condition évoquée ci-dessus.

Vu les hautes températures nécessaires pour réaliser des réactions de fusion, les scientifiques se sont orientés vers des solutions de confinement permettant d'éviter tout contact trop rapproché entre le plasma et les parois intérieures du réacteur. A l'heure actuelle, comme précisé ci-dessus, la solution technologique la plus prometteuse est le confinement magnétique du plasma. Cette configuration permet en effet d'obtenir des niveaux de température et des temps de confinement du plasma qui ne peuvent être atteints par les autres technologies actuelles, comme par exemple le confinement inertiel.

Le confinement magnétique du plasma est possible parce que les particules chargées (ions et électrons) constituant le plasma peuvent être contrôlées via la force de Laplace dans un champ magnétique. Les réacteurs actuels basés sur le confinement magnétique portent le nom de *Tokamak*, qui n'est autre que le nom donné au premier prototype russe en 1968. Le concept de ce réacteur en forme de tore, illustré par la Figure 2-2, est basé sur le fonctionnement d'un transformateur électrique, dont le circuit secondaire est assimilé au plasma.

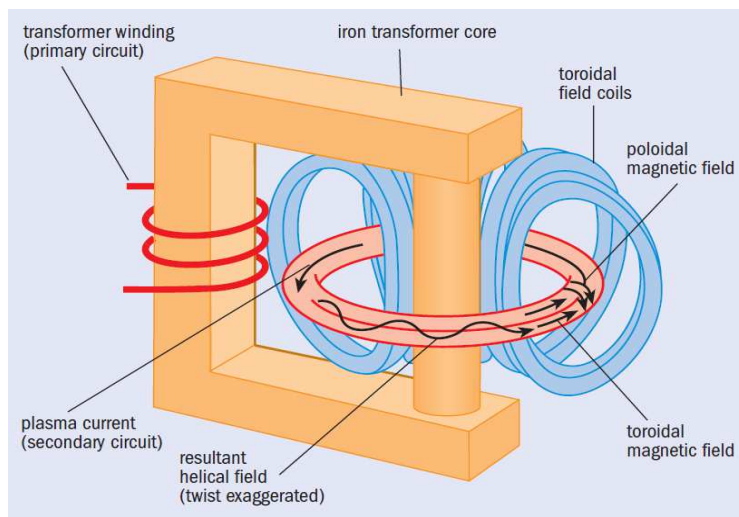


Figure 2-2: Schématisation du fonctionnement d'un tokamak.

Un potentiel variable est appliqué à la bobine du circuit primaire (cf. Figure 2-2) et induit un courant important au sein du plasma qui va générer à son tour un champ magnétique poloïdal. D'autre part, les bobines externes entourant l'enceinte produisent un champ magnétique toroïdal qui force les particules chargées du plasma à se déplacer en spirale le long des lignes de champ magnétique. Au final, les champs toroïdaux et poloïdaux s'ajoutent mutuellement et il en résulte une structure magnétique torsadée ou hélicoïdale, qui permet une grande stabilité du plasma. Cependant, à cause de l'utilisation d'un transformateur, le tokamak ne peut fonctionner qu'en mode pulsé, ce qui est un inconvénient pour une production continue.

Comme expliqué ci-dessus, pour obtenir des réactions de fusion, il faut chauffer les particules du plasma à très haute température (~ 100 millions de degrés pour la réaction D-T). Plusieurs techniques sont donc utilisées simultanément: *le chauffage ohmique* qui résulte du passage du courant induit à travers le plasma, *l'injection de particules neutres* à haute énergie cinétique qui permet de transférer de l'énergie aux particules du plasma par collisions et *les ondes électromagnétiques à haute fréquence*.

Alors que les premières expériences de fusion furent réalisées dans les années trente, c'est seulement après la percée majeure réalisée par les Russes en 1968 grâce au Tokamak que l'idée de produire de l'énergie à partir de la réaction de fusion est devenue une préoccupation majeure de la communauté internationale.

A l'heure actuelle, la recherche en fusion thermonucléaire concentre ses efforts sur ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Ce projet, regroupant notamment l'UE, les USA, la Russie, le Japon, l'Inde et la Corée du Sud, a débuté en 2005 et la phase de construction du tokamak, a été entamée à Cadarache (sud de la France) en 2007. Sa mise en fonctionnement est prévue pour 2020. Malgré des débats politiques sur le gigantesque coût de ce projet (estimé à 10 milliards d'euros pour les phases de construction et de fonctionnement) et les problèmes technologiques rencontrés, ITER représente actuellement le plus grand espoir pour démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'utilisation de la fusion comme source d'énergie !



### 2.3 Recherche sur la fusion au Forschungszentrum Jülich

Le Forschungszentrum Jülich est un centre de recherche situé en Allemagne entre Aix-la-Chapelle et Düsseldorf. Comme précisé, ce travail a été réalisé à l'Institut de la Physique des Plasmas qui est activement impliqué dans la recherche pour la fusion thermonucléaire et en particulier dans l'étude des interactions plasma-paroi. Pour mener ses recherches dans ce domaine, cet institut dispose de deux installations: le tokamak TEXTOR et le générateur linéaire de plasma PSI-2.

Les interactions plasma-paroi jouent un rôle décisif dans la durabilité et donc dans l'économie d'un réacteur à fusion thermonucléaire à cause de leur impact sur la durée de vie de la paroi (érosion) ainsi que sur la sécurité (rétention en tritium). De plus, ces processus d'interaction sont indispensables pour récupérer l'énergie dégagée par les réactions de fusion et évacuer l'hélium du plasma car une fois produit, il devient un "*déchet*" diminuant le taux de réactions de fusion.

L'étude des interactions plasma-paroi peut être réalisée soit dans des tokamaks soit dans des générateurs linéaires de plasma. Ces derniers ont été spécialement développés de manière à pouvoir effectuer des expériences sous des conditions non réalisables dans des tokamaks. Grâce à leur mode de fonctionnement continu par opposition au mode pulsé caractérisant les tokamaks, les générateurs linéaires de plasma permettent notamment d'étudier des échantillons de paroi sous des flux de particules ou des flux de chaleur semblables à ceux attendus dans ITER.

Le générateur linéaire de plasma PSI-2, illustré par la Figure 2-3, est opérationnel depuis janvier 2011 au Forschungszentrum Jülich. Le plasma est produit par une décharge électrique stationnaire à travers un gaz et est confiné dans la chambre à vide cylindrique au moyen d'un champ magnétique linéaire généré par des bobines colinéaires. Les particules du plasma sont guidées à travers la chambre vide par les lignes du champ magnétique et entrent en collision avec les échantillons (principalement des alliages de tungstène) placés sur la tête d'un bras linéaire. Ce manipulateur linéaire permet entre autres d'exposer les échantillons sous différentes conditions et de les positionner dans la chambre TEAC (Target Exchange and Analysis Chamber) pour effectuer les différentes mesures *in-situ*.

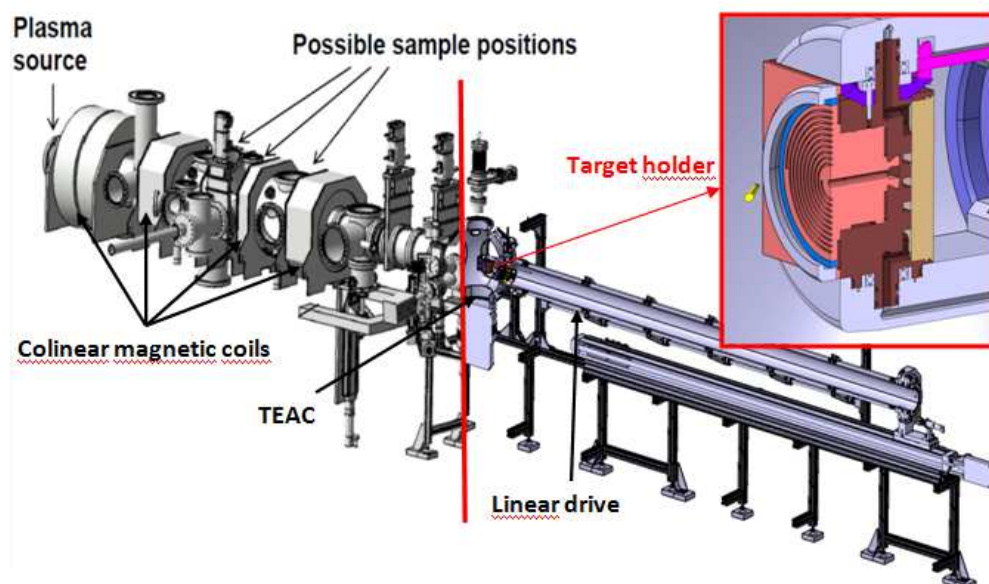


Figure 2-3: Design du générateur linéaire de plasma PSI-2.

Un des problèmes, auquel les chercheurs de l'Institut de la Physique des Plasmas sont pour le moment confrontés, est la régulation de la température des échantillons dans le cas de flux de chaleur élevés ( $0,1-1 \text{ MW/m}^2$ ), proches de ceux prévus dans ITER. En fait, le régime de températures ( $800-1000^\circ\text{C}$ ), sous lequel les chercheurs veulent étudier le comportement des échantillons, ne peut être atteint parce que le système de refroidissement est très efficace ( $T_{\text{eau}} \sim 20^\circ\text{C}$ ).

Une vue détaillée du support de la cible est illustrée par la Figure 2-4. Aucune variation du débit d'eau n'est autorisée à cause de la présence de joints en *Viton*<sup>5</sup> et également pour éviter toute dégradation trop brusque du coefficient de transfert de chaleur par apparition de bulles de vapeur. Dans cette configuration, la régulation de la température est donc très limitée. Cependant, la possibilité de pouvoir modifier la conductivité thermique de la partie de contact pendant les expériences pourrait résoudre ce problème.

<sup>5</sup> Au-delà d'une température de  $200^\circ\text{C}$ , les joints en *Viton* se dégradent et risquent de ne plus assurer l'étanchéité.

Une solution consisterait alors à insérer une couche de gaz à très basse pression entre le support des échantillons et le canal de refroidissement, de manière à découpler thermiquement ces deux composants et ainsi autoriser une régulation plus efficace du transfert de chaleur.

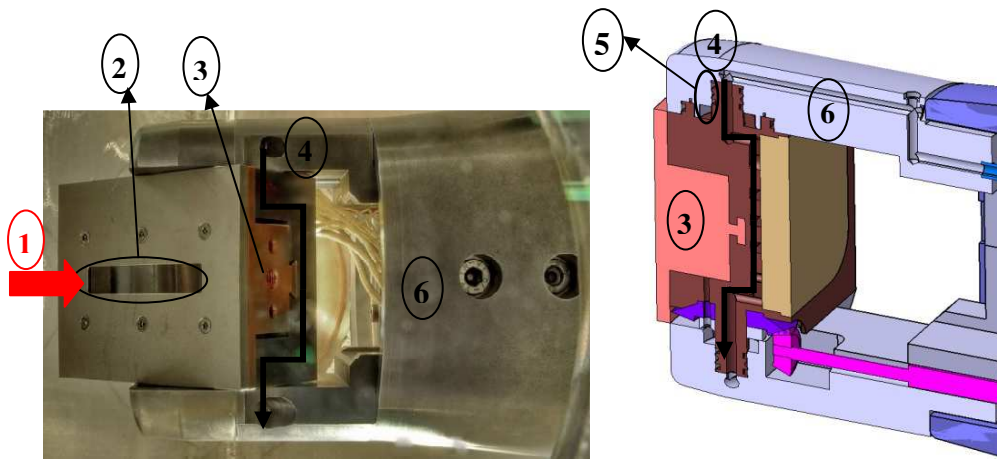


Figure 2-4: Vue détaillée du support de la cible de PSI-2. (Légende :(1)plasma (2)échantillons, (3) partie de contact, (4) canal de refroidissement, (5) joints en Viton (6) tête du bras linéaire)

### 3. Transfert de chaleur dans les gaz "raréfiés"

#### 3.1 Le transfert de chaleur par conduction à travers un gaz

De manière générale, le transfert de chaleur à travers un gaz est dû aux collisions et à la diffusion des molécules durant leur mouvement aléatoire. Dans le cas particulier de deux surfaces séparées par un gaz et maintenues à deux températures différentes, le transfert de chaleur par conduction peut être étudié selon deux régimes distincts qui dépendent du rapport entre le libre parcours moyen des molécules gazeuses  $\lambda$  et de la distance  $L$  entre les deux surfaces.

Dans le régime "visqueux" ( $\lambda \ll L$ ), appelé également régime *continu*, le transfert de chaleur par conduction au travers d'un gaz idéal est indépendant de la pression, comme démontré par la théorie cinétique (cf. [1]). Pour un

gradient de température donné, le flux de chaleur est donc inversement proportionnel à la distance  $L$ . En diminuant la pression du gaz, le régime "*molécule libre*", ou régime *non-continu*, est atteint lorsque  $\lambda \gg L$ . Dans cette configuration, les molécules se déplacent de la surface *chaude* à la surface *froide* sans entrer en collision entre elles. Le transfert de chaleur dans ce régime devient alors proportionnel à la pression du gaz et indépendant de la distance  $L$ . Dans de telles conditions, on parle également de *gaz raréfié*.

La dépendance du flux de chaleur par rapport à la pression du gaz dans le régime "*molécule libre*" représente une caractéristique très intéressante qui pourrait apporter une solution à la problématique du contrôle de la température des échantillons, rencontrée dans PSI-2. Par conséquent, une étude préalable a été réalisée afin de déterminer les conditions expérimentales requises pour atteindre le régime de *gaz raréfié*. En parallèle, une recherche dans la littérature a été menée pour acquérir des données fiables sur les propriétés thermodynamiques de l'hélium sous forme gazeuse ainsi que des corrélations théoriques cohérentes décrivant le transfert de chaleur en régime *non-continu*.

### 3.2 Détermination des conditions expérimentales

Comme expliqué ci-dessus, les gaz manifestent des effets *non-continu* lorsque la longueur caractéristique du système,  $L$ , est de l'ordre de grandeur du libre parcours moyen des molécules,  $\lambda$ . Le libre parcours moyen ("*mean free path*") peut être défini comme étant la distance moyenne parcourue par une molécule de gaz entre chaque collision. Selon [2], la relation 3-1 peut être utilisée pour déterminer  $\lambda$  à partir de données expérimentales pour la viscosité dynamique  $\eta$ .

$$\lambda = \frac{32}{5\pi} \frac{\eta}{\rho \bar{c}} \quad (3-1)$$

où  $\eta$  and  $\rho$  sont la viscosité dynamique et la masse volumique du gaz,  $\bar{c} = (8k_B T / \pi m)^{1/2} = (8\bar{R}T / \pi \bar{M})^{1/2}$  est la vitesse moyenne moléculaire,  $T$  est la température locale,  $\bar{R}$  est la constante universelle des gaz, et  $\bar{M}$  est la masse moléculaire.

Le libre parcours moyen dépend de deux variables<sup>6</sup>, la pression et la température, qui jouent donc un rôle important dans la détermination des conditions expérimentales. De plus, pour la conception du dispositif expérimental, une distance entre les surfaces *chaude* et *froide*,  $L$ , de l'ordre du mm a été choisie. Par conséquent, pour atteindre les conditions de "gaz raréfié", c-à-d  $\lambda \gg L$ , il faudra travailler avec des pressions de l'ordre de  $10^{-2}$  mbar, comme illustré sur la Figure 3-1. Dans le but de maîtriser le comportement du gaz dans les différents régimes, des expériences ont été menées sous différentes pressions de  $10^{-2}$  à  $10$  mbar, ce qui est illustré par la figure suivante.

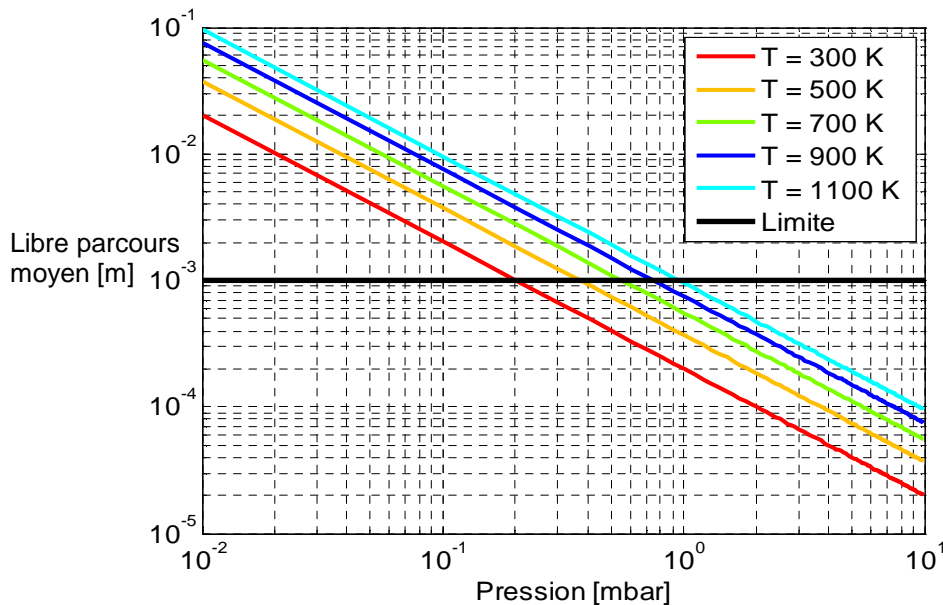


Figure 3-1: Le libre parcours moyen des molécules de gaz d'hélium en fonction de la pression.

### 3.3 Prédictions théoriques

Le transfert de chaleur au travers des "gaz raréfiés" fait toujours l'objet de recherches intensives. Les références [2, 3] présentent notamment un résumé condensé des analyses théoriques réalisées jusqu'à présent. Il s'avère

<sup>6</sup> La masse volumique d'un gaz parfait est linéairement proportionnel à la pression.

que le transfert de chaleur en régime *non-continu* dépend fortement de l'interaction gaz-surface qui, en l'absence de modèle théorique détaillé, est souvent introduit par un paramètre empirique, à savoir le coefficient d'accommodation thermique.

Pour le cas simple de deux surfaces parallèles distantes de  $L$  et maintenues à des températures différentes, le transfert de chaleur par conduction à travers un gaz peut être décrit par l'interpolation de Sherman (cf. [3]). Utilisée pour le calcul du flux total de chaleur  $\dot{q}$ , cette interpolation considère une contribution des flux de chaleur en régime *continu* ( $\dot{q}_C$ ) et *molécule libre* ( $\dot{q}_{FM}$ ) et est décrite par l'équation 3-2:

$$\frac{1}{\dot{q}} = \frac{1}{\dot{q}_{FM}} + \frac{1}{\dot{q}_C} \quad (3-2)$$

Afin de pouvoir comparer les résultats expérimentaux avec des valeurs théoriques, l'interpolation de Sherman a été utilisée. La Figure 3-2 illustre l'évolution du flux de chaleur en fonction de la pression et permet de mettre en évidence la possibilité de moduler le transfert de chaleur en fonction de la pression du gaz.

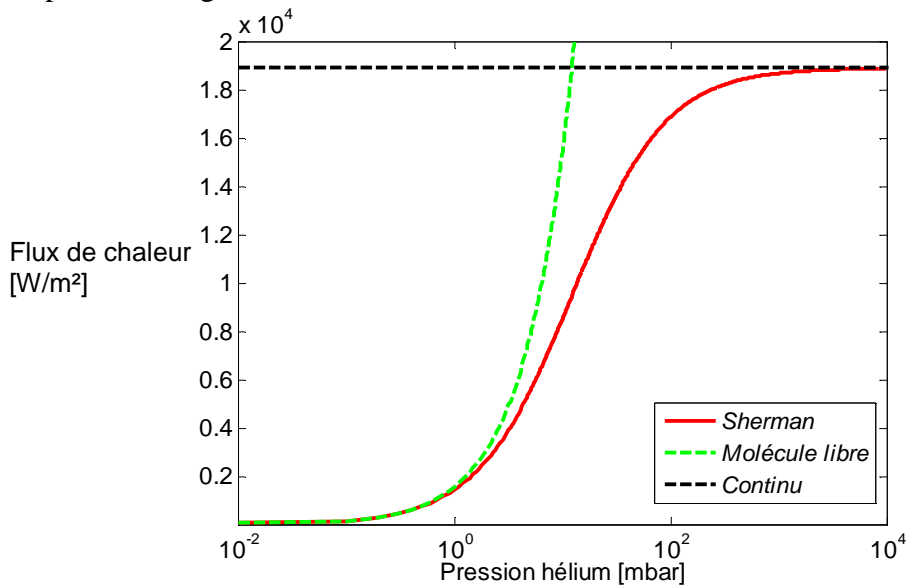


Figure 3-2: Evolution du flux de chaleur par conduction à travers l'hélium en fonction de la pression. ( $\Delta T = 40^\circ\text{C}$  et  $L = 0,5\text{mm}$  entre plaques)

#### 4. Le dispositif expérimental

En vue d'étudier le transfert de chaleur à travers de l'hélium dans un régime de *gaz raréfié*, un set-up expérimental a été conçu et designé de manière à reproduire des conditions similaires à celles dans PSI-2 (flux de chaleur de 0,1 à 1 MW/m<sup>2</sup> et T<sub>eau</sub> ~ 20°C). Le design expérimental est basé sur le concept suivant: étudier l'effet de l'hélium, injecté dans une enceinte, sur le transfert de chaleur d'un disque chauffé vers un disque refroidi par un circuit d'eau. Ces deux disques simulent respectivement le flux de chaleur imposé aux échantillons et le canal de refroidissement installé à l'arrière du support d'échantillons dans PSI-2.

Dans le but de minimiser les pertes de chaleur radiales, les expériences ont été menées dans une chambre à vide ( $p \sim 10^{-6}$  mbar). A très basse pression, seule la radiation apparaît mais ce mécanisme de transfert de chaleur est moins efficace que la conduction et la convection si les températures sont faibles. De plus, la chambre à vide joue un rôle dans le contrôle de l'étanchéité de l'enceinte remplie d'hélium. Si une fuite apparaît, elle sera facilement détectée via les appareils de mesures du vide.

La figure 4-1 donne une vue d'ensemble du set-up expérimental qui comprend trois éléments importants: le disque "*chauffé*" (1), une bague entretoise (2), un disque "*refroidi*" (3). L'enceinte remplie d'hélium est formée entre les deux disques au moyen d'une bague entretoise et d'un joint O-ring en *Viton* (4). Elle est relié à un système de pompes à vide ainsi qu'une alimentation en hélium, permettant d'obtenir des pressions allant de 10<sup>-2</sup> mbar à 10 mbar. Ce système avec une bague entretoise permet de réaliser des expériences avec différentes distances  $L$  entre les surfaces chaude et froide (0.1 à 0.5 mm, en fonction de la largeur de la bague entretoise).

Des flux de chaleur similaires à ceux obtenus dans PSI-2 sont maintenus grâce à un câble *thermocoax* (5), qui est relié à un générateur de puissance et est inséré dans une spirale afin d'augmenter sa surface de contact et donc l'efficacité du chauffage. Cependant, à cause de l'utilisation d'un O-ring en *Viton* pour assurer l'étanchéité de l'enceinte, un canal de refroidissement circulaire (6) a dû être prévu au niveau de la zone de contact du joint avec le

disque "chauffé". De plus, afin de tenter de minimaliser le flux de chaleur radial, l'épaisseur de la partie centrale du disque a été réduite à 1 mm, une dimension plus faible n'étant pas possible pour éviter toute déformation mécanique lors de la phase d'usinage.

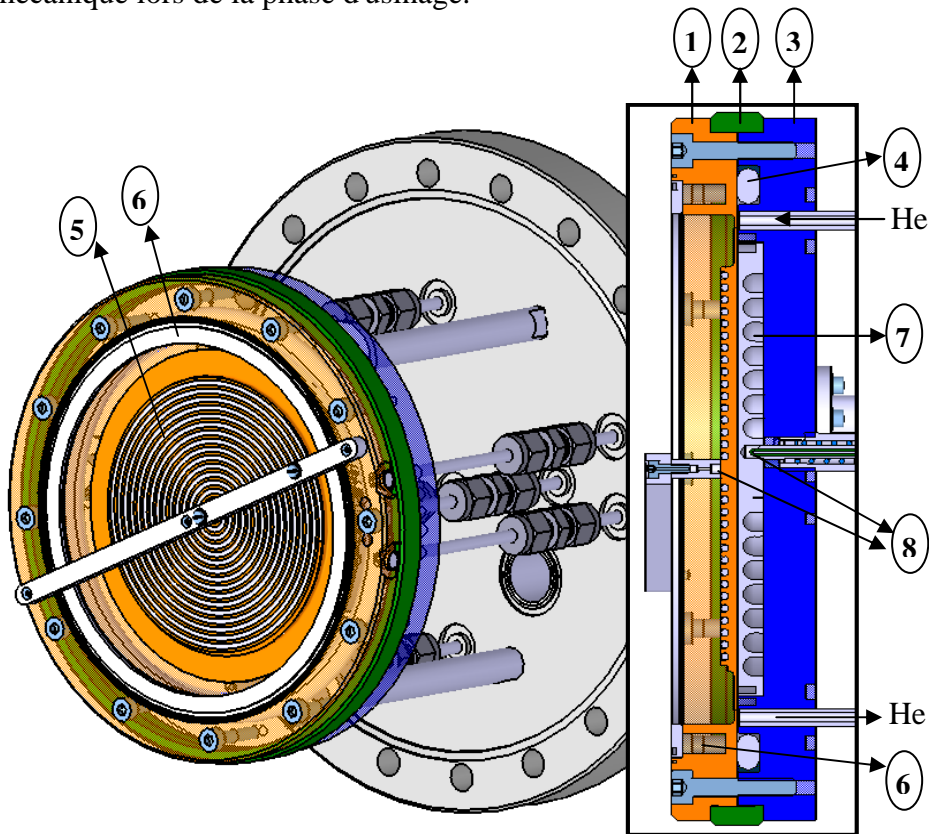


Figure 4-1: Vue d'ensemble du set-up expérimental (modèle dans CATIA).

Le circuit de refroidissement est constitué d'un disque support (3) dans lequel vient se loger un second disque avec un canal en spirale (7), les deux disques étant brasés ensemble. Un design en spirale a été retenu afin de maximaliser l'efficacité du refroidissement. Le canal en spirale est alors raccordé à un système *Neslab* qui permet de maintenir un débit volumique d'eau constant avec une température de 20°C.



Enfin, afin de pouvoir évaluer l'effet de la pression d'hélium sur le transfert de chaleur, deux thermocouples *Chromel-Alumel* (8) ont été insérés dans le dispositif expérimental à des positions aussi proches que possible de la surface interne de l'enceinte.

## 5. Résultats expérimentaux et interprétations

Une partie des résultats expérimentaux est présentée dans ce paragraphe et est regroupée dans le tableau ci-dessous. Les expériences ont été réalisées pour une distance entre les surfaces "*chaude*" et "*froide*"  $L=0,5$  mm, sous des conditions de vide dans l'enceinte (pas d'hélium injecté) et avec une température de refroidissement (en entrée)  $T_{\text{eau}}=20^{\circ}\text{C}$ . Pour chaque puissance électrique ( $P_{el}$ ) fournie au *thermocoax*, les températures de la surface "*chaude*" ( $T_h$ ) et de la surface "*froide*" ( $T_c$ ) ont été relevées via les thermocouples (voir Figure 5-1).

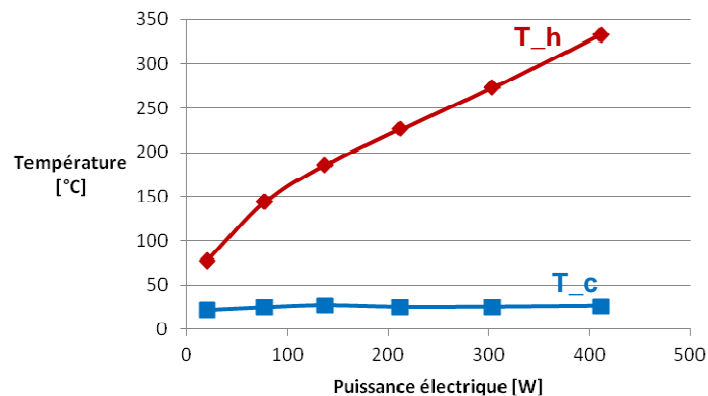


Figure 5-1: Evolution de la température des surfaces chaude ( $T_h$ ) et froide ( $T_c$ ) en fonction de la puissance électrique.

La première observation est que les différentes valeurs de la température de la surface "*froide*" restent assez stables et proches de la température de l'eau malgré des puissances de chauffage croissantes. Par conséquent, on peut considérer que le canal de refroidissement est très efficace et qu'il permet d'évacuer quasi toute la chaleur fournie au système.

Afin d'interpréter ces résultats expérimentaux, quatre flux de chaleur ont été calculés pour  $P_{el} = 412 \text{ W}$  et sont représentés sur le schéma suivant (cf. Figure 5-2): Le flux de chaleur total produit par le *thermocoax* ( $Q_{tot} \sim P_{el}$ ), le flux de chaleur radiatif entre les surfaces "chaude" et "froide" de l'enceinte ( $Q_{rad}$ ), les pertes de chaleur par radiation vers la chambre à vide ( $Q_{pertes}$ ).

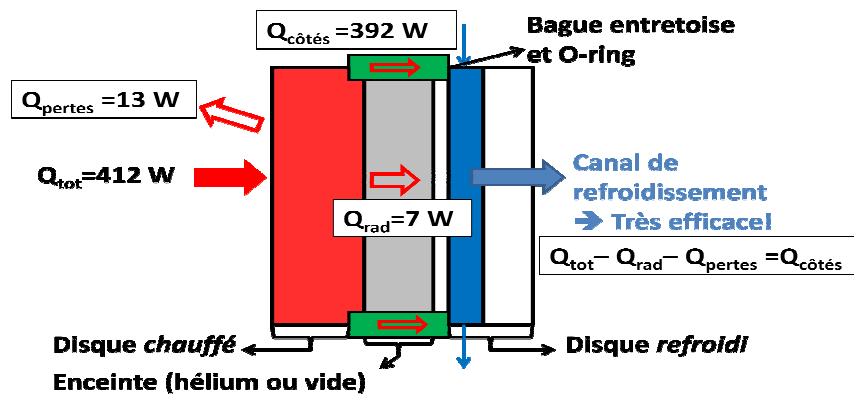


Figure 5-2: Schéma du dispositif expérimental.

Cependant, étant donné que le système de refroidissement a évacué la majorité de la chaleur, ces calculs montrent que, pour répondre aux conditions d'équilibre, la majorité de la chaleur est transférée via les extrémités de l'enceinte ayant un contact direct entre les deux disques, c-à-d via le joint O-ring et la bague entretoise (ce qui est mentionné par  $Q_{côtés}$ ).

En parallèle aux expériences, une étude théorique du transfert de chaleur a été menée de manière à obtenir des prédictions sur la distribution des températures et sur l'évolution des flux de chaleur en fonction de la pression d'hélium. Pour ce faire, un algorithme basé sur la résolution du transfert de chaleur par éléments finis a été développé sur *MatLab*.

Le graphique suivant (voir Figure 5-3) montre l'évolution de la température du disque "chauffé" en fonction de la pression d'hélium pour deux cas différents : le premier où le transfert est considéré complètement linéaire à travers l'enceinte et le second où une résistance thermique a été ajoutée en parallèle dans l'élément représentant l'enceinte pour tenir compte des pertes via l'O-ring et de la bague entretoise.

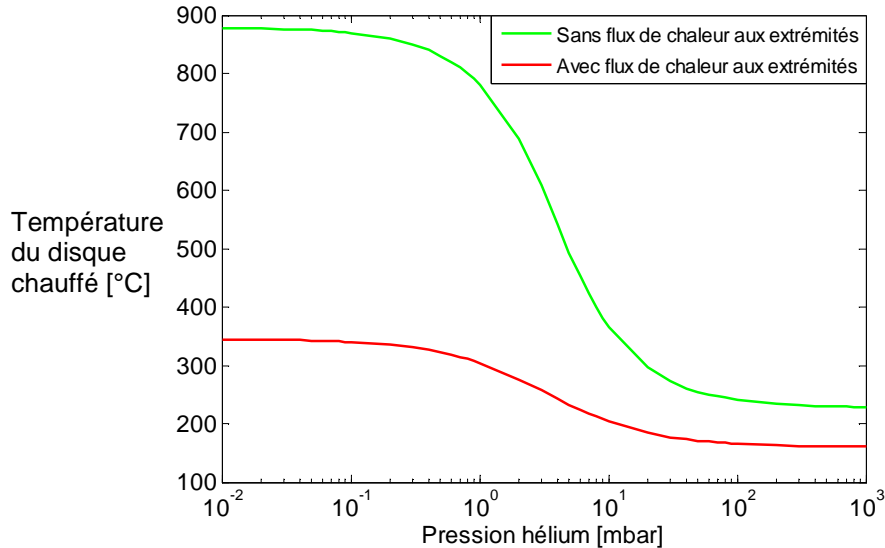


Figure 5-3: Evolution de la température du disque "chauffé" en fonction de la pression d'hélium ( $P_{el}=420W$  et  $L=0,5mm$ ).

La première observation est que ces prédictions théoriques restent en accord avec les interprétations des résultats expérimentaux: lorsqu'une résistance thermique additionnelle est considérée pour tenir compte de l'O-ring et la bague entretoise, les températures du disque "chauffé" obtenues par l'algorithme sont proches de celles mesurées expérimentalement. D'autre part, ces résultats montrent surtout qu'il est possible de réguler la température du disque "chauffé" en fonction de la pression d'hélium.

## 6. Conclusion

L'Institut de la Physique des Plasmas au Forschungszentrum Jülich est particulièrement impliqué dans l'étude des interactions plasma-paroi pour la recherche en fusion thermonucléaire, avec son tokamak Textor et son générateur linéaire de plasma PSI-2. Cependant, les chercheurs sont pour le moment confrontés à un problème sur PSI-2 qui les empêche d'atteindre des conditions d'expérience attendues. Une solution pourrait venir de l'utilisation d'une couche de gaz à très basse pression qui serait insérée entre le support d'échantillons et le canal de refroidissement.

Ce travail a eu pour but d'étudier le transfert de chaleur à travers de l'hélium dans des conditions de *gaz raréfiés*. Une étude théorique a été menée avec le développement d'un algorithme pour obtenir des prédictions théoriques et en parallèle, un set-up expérimental a été conçu et réalisé. Après avoir interprété les résultats expérimentaux obtenus, des conclusions intéressantes ont pu être dressées : les prédictions théoriques montrent la possibilité de moduler le flux de chaleur en fonction de la pression du gaz alors que les résultats expérimentaux ont mis en évidence des flux de chaleur importants aux extrémités de l'enceinte.

Afin de réaliser des études ultérieures, des améliorations devront être apportées au set-up expérimental. Celles-ci ont pour principal but de réduire le transfert de chaleur aux extrémités de l'enceinte, notamment par l'utilisation d'une bague entretoise en céramique. Ainsi, des températures élevées pourront être atteintes au niveau du disque "*chauffé*" et l'effet de la pression d'hélium sur le transfert de chaleur pourra être étudié de manière pertinente. En effet, dans la configuration actuelle, une augmentation de la pression d'hélium ne fera que modifier la répartition du transfert de chaleur entre les extrémités et l'enceinte, mais n'aura pas d'impact suffisamment effectif sur le flux de chaleur.

Au travers des recherches dans la littérature sur le transfert de chaleur dans des *gaz raréfiés*, ce travail a montré que la solution d'une couche de gaz peut résoudre le problème rencontré sur le générateur linéaire de plasma PSI-2. En effet, les prédictions théoriques obtenues par l'algorithme développé sur *MatLab* ont prouvé que le flux de chaleur peut être régulé en fonction de la pression d'hélium.

Cette solution permettrait donc à l'Institut de la Physique des Plasmas de continuer ses recherches sur PSI-2 dans le domaine des interactions plasma-paroi.

## 7. Sources

[1] ANDERS K., FROHN A et ROTH N., *Heat Transfer and Momentum Flux in Rarefied Gases*, VDI Heat Atlas (Second Edition), Berlin, Springer, 2010, pp. 1375-1390.

[2] CHEN F. F., *An Indispensable Truth - How Fusion Power Can Save the Planet*, New York: Springer, 2011.

[3] MERTENS P., ONGENA J. et VAN OOST G., *La fusion thermonucléaire, une chance pour l'humanité*, Trilateral Euregio Cluster (TEC), 1999.

[4] SALINGER G. L. et SEARS F. W., *Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics* (3rd Edition), Addison-Wesley Pub. Co., 1975.

[5] SHERMAN F. S., *A survey of experimental results and methods for the transition regime of rarefied gas dynamics*, Rarefied gas dynamics (vol. 2), New York, Academic Press, 1963, pp. 228-260.

[6] SPRINGER G. S., *Heat Transfer in Rarefied Gases*, Advances in Heat Transfer, New York, T.F. Irvine and J.P. Hartnett, eds., Academic Press, 1971, pp. 163-218.