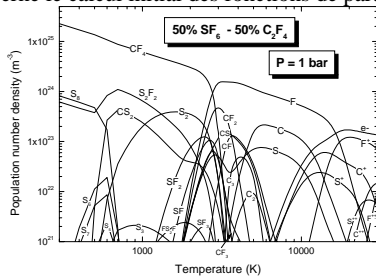


## Calcul des propriétés des plasmas en équilibre thermique

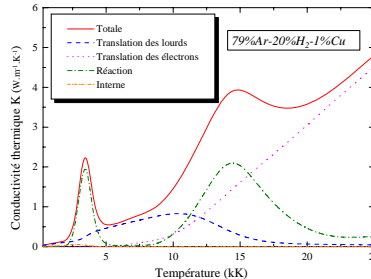
### Composition d'équilibre et propriétés thermodynamiques

Ces calculs sont fondés sur les lois de l'équilibre thermodynamique et permettent par des méthodes classiques (loi d'action de masse, minimisation de la fonction de Gibbs) de calculer les fonctions thermodynamiques et les densités de particules dans le plasma, pour tout type de gaz ou de mélanges et dans des gammes étendues de pression et de température. La difficulté la plus importante concerne le calcul initial des fonctions de partition.



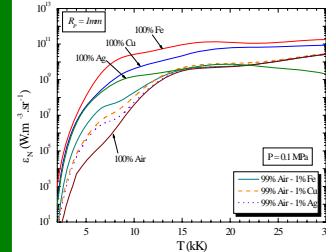
### Coefficients de transport

Ces coefficients (conductivités électrique et thermique, viscosité) sont calculés par la méthode de Chapman-Enskog bien adaptée aux plasmas thermiques. La difficulté essentielle consiste à déterminer les sections efficaces ou les potentiels d'interaction pour toutes les collisions binaires dans le milieu, sachant que pour des mélanges complexes, plusieurs dizaines d'espèces peuvent être présentes. Les développements actuels concernent le calcul des coefficients de diffusion.



### Rayonnement thermique

Le rayonnement thermique joue un rôle très important dans les plasmas d'arc qu'il faut quantifier dans les modèles. Nous développons depuis plus de vingt ans des travaux qui concernent deux aspects: le calcul du spectre de base tenant compte de tous les mécanismes d'émission et d'absorption incluant les profils des raies et certains spectres moléculaires; le calcul de données utiles pour des méthodes de transfert radiatif dans un plasma en équilibre thermodynamique local (coefficient d'émission nette, moyennes de coefficients d'absorption).

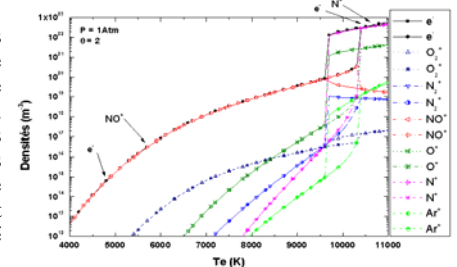


Exemple de coefficient d'émission nette

## Calcul des propriétés en présence d'écart à l'équilibre

Dans certaines conditions les plasmas considérés comme thermiques, peuvent présenter certains écarts à l'équilibre qui se manifestent de deux façons: déséquilibre thermique qui conduit à des plasmas « à deux températures » dans lesquels la température des électrons est supérieure à celle des particules lourdes car le transfert d'énergie par collisions élastiques entre ces deux catégories manque d'efficacité; déséquilibre chimique dû soit à la présence de réactions non réversibles (transitions radiatives en particulier), soit à des effets de trempe, soit à l'existence de réactions qui mettent en jeu les électrons dans un sens mais pas dans l'autre sens. La partie la plus importante dans cette activité concerne le calcul de la composition du plasma en fonction de paramètres tels que les températures des particules et la pression alors que la densité électronique peut être calculée ou être utilisée comme paramètre comme c'est le cas dans un modèle collisionnel-radiatif (CR). Deux approches sont utilisées. L'une, simple mais critiquable quant à ses bases physiques, est fondée sur l'utilisation de lois d'équilibre généralisées à deux températures qui ont un domaine limité d'utilisation et qui font appel à des températures d'excitation souvent fixées a priori ce qui influence fortement les résultats.

L'autre plus générale mais beaucoup plus exigeante en terme de travail à effectuer, consiste à résoudre les équations de conservation des espèces (voire des niveaux d'excitation dans les modèles CR) ce qui nécessite un calcul préalable de très nombreux taux de réactions. Une activité plus récente de notre équipe porte sur le calcul des propriétés thermodynamiques et des coefficients de transport dans des plasmas à deux températures, une fois que la composition a été obtenue par une des méthodes précédentes. Le calcul des fonctions thermodynamiques s'appuie d'abord sur celui des fonctions de partition et sur la généralisation des expressions à l'équilibre, pour des milieux à deux températures. Le calcul des coefficients de transport est une généralisation de la méthode de Chapman-Enskog à partir de travaux récents proposés dans la littérature et d'une analyse particulière des réactions inélastiques qui entrent dans l'expression de la conductivité thermique.



## Etudes spécifiques sur plasmas d'arcs stabilisés

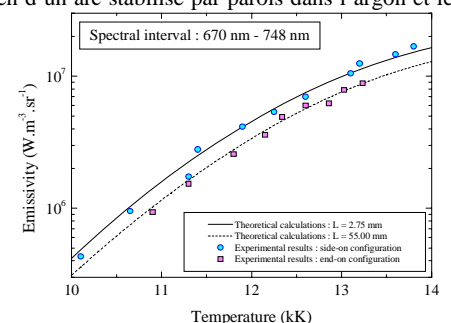
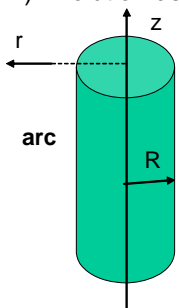
### 1) Nouvelle méthode de mesure de température et validations expérimentales avec un arc stabilisé

La grandeur la plus caractéristique d'un plasma thermique est en général sa température. Elle est souvent mesurée par spectroscopie d'émission qui nécessite des systèmes de dispersion de la lumière de résolution relativement bonne. Or il est possible de déduire la température d'une mesure de l'intensité totale sur un large intervalle spectral (de l'ordre 10 nm par exemple) ou, encore mieux car cela n'exige pas de calibration, du rapport d'intensités émises suivant deux larges intervalles. Dans ces conditions la mesure initiale peut être réalisée avec un appareil très peu dispersif ou même avec une caméra « 3 couleurs », commercialisée, qui permet d'acquérir simultanément une image dans 4 régions du spectre visible (bleu, vert, rouge).

Nous avons mis au point cette méthode en calculant le rayonnement émis par différents intervalles spectraux, en tenant compte de l'auto-absorption éventuelle des raies (cf. figure ci-dessous à droite). Nous avons également validé la méthode par des mesures au moyen d'un arc stabilisé par parois dans l'argon et les mélanges argon-hydrogène. L'étude d'autres gaz ou mélanges de gaz est en cours.

### 2) Evolution de la conductance d'un arc stabilisé en extinction

La résolution de l'équation de conservation de l'énergie couplée à la conservation de la masse, dans un plasma cylindrique correspondant à la colonne positive d'un arc stabilisé (schéma figure de gauche), est un outil simple, fondé sur la connaissance des propriétés du plasma, qui permet de calculer l'évolution de la température et de la conductance du plasma durant l'extinction de l'arc. Cette dernière grandeur, très utile pour l'étude des disjoncteurs à gaz, permet d'estimer le pouvoir de coupure d'un gaz ou d'un mélange de gaz, c'est-à-dire sa capacité à transiter rapidement lors de son extinction, entre un milieu relativement bon conducteur (le plasma à haute température) et un milieu relativement diélectrique (le gaz froid).



Comparison between experimental and theoretical results on the emissivity of the (670 - 748 nm) interval, in argon