



**HAL**  
open science

# Plasmas basse-température en physique atomique et moléculaire. Applications technologiques

Stéphane Pellerin

► **To cite this version:**

Stéphane Pellerin. Plasmas basse-température en physique atomique et moléculaire. Applications technologiques. Génie des procédés. Université d'Orléans, 2004. tel-00458801

**HAL Id: tel-00458801**

**<https://theses.hal.science/tel-00458801>**

Submitted on 22 Feb 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

## U.F.R. Sciences - Centre Universitaire de Bourges

IAS<sub>FP</sub> Laboratoire d'Analyse Spectroscopique et d'Énergétique des Plasmas IAS<sub>FP</sub>

Numéro : xxxx

### HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

#### Discipline : Physique des Plasmas

Présentée et soutenue publiquement

par

Stéphane PELLERIN

le 6 février 2004

---

### Plasmas basse-température en physique atomique et moléculaire Applications technologiques

---

#### JURY :

Charles DE IZARRA	Professeur à l'Université d'Orléans (France), Directeur de recherche
Bruno CHÉRON	Professeur à l'Université de Rouen (France), Rapporteur
Pierre FAUCHAIS	Professeur à l'Université de Limoges (France), Rapporteur
Karol MUSIOL	Professeur à l'Université Jagellonne de Cracovie (Pologne), Rapporteur
Joseph CHAPELLE	Professeur à l'Université d'Orléans (France), Examineur
Jean-Marie CORMIER	Professeur à l'Université d'Orléans (France), Examineur
Bernard HELD	Professeur à l'Université de Pau (France), Examineur
Olivier VALLÉE	Professeur à l'Université d'Orléans (France), Examineur



*à Nadia,  
à Monique,  
A la mémoire de Stephen.*





## Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à M. le Professeur Joseph CHAPELLE, qui a assuré le suivi scientifique de mes travaux depuis maintenant près de quinze ans, m'apportant toujours tout son soutien dans les moments difficiles et les instants d'incertitude. Qu'il soit remercié pour m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury.

J'associe également à ces remerciements le Professeur Charles DE IZARRA, avec lequel j'ai débuté dans les sous-sols du GREMI : son enthousiasme pour la recherche, sa flamme et sa motivation m'ont certainement donné le goût de l'expérimentation, et le désir d'aller plus loin dans le domaine des arcs électriques.

Ma profonde gratitude s'adresse tout particulièrement à mon ami Karol MUSIOL pour son aide précieuse et efficace, sa disponibilité et son enthousiasme constant.

Je lui dois énormément, spécialement pour l'intérêt constant et l'implication scientifique dont il a fait preuve à l'égard de mon travail. Je suis particulièrement sensible au temps qu'il a bien voulu consacrer à de fréquentes et toujours fructueuses discussions... et bien souvent au-delà du cadre du travail.

Je tiens à remercier Messieurs Charles DE IZARRA et Olivier VALLÉE pour m'avoir accueilli, il y a maintenant presque quatre ans, au sein de leur équipe. Leurs conseils complémentaires, leurs rigueurs scientifiques ainsi que leurs idées m'ont été précieux pour mener à bien ces années de recherche.

J'exprime également mes vifs remerciements à Messieurs les Professeur Bruno CHÉRON et Pierre FAUCHAIS pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, et à messieurs les Professeurs Bernard HELD et Jean-Marie CORMIER qui m'ont fait l'honneur de se joindre au jury.

De façon plus générale, l'ensemble des travaux présentés ici n'aurait pu être mené à bien sans l'aide, les conseils et l'efficacité de mes amis de Cracovie : Krzysztof DZIERZEGA, Bartholomej POKRZYWKA, Lucasz BRATASCZ, Sylwia ZIELINSKA, et tous les autres....

Je les remercie pour leur si chaleureux accueil ; qu'ils sachent que notre porte leur est toujours grande ouverte.

Messieurs Gilles CHARLES et Jean-Luc THÉBAULT, techniciens à l'Antenne Universitaire de Bourges, mais aussi mes anciens collègues du GREMI, ont également leur part dans ces études. Sans vouloir être exhaustif, je pense tout spécialement à MM. Jean-Marie CORMIER, Olivier MOTRET, Philippe LEFAUCHEUX et André BONNET . . . , pour les discussions que nous avons pu avoir, les conseils qu'ils ont su me donner et leur soutien technique.

Je leur adresse donc à tous mes sincères remerciements.

Je salue également tous les membres de l'antenne universitaire de Bourges : leur sympathie et leur attention ont rendu ces dernières années à Bourges très agréables.

Je tiens à les assurer de ma reconnaissance, ainsi qu'à tous ceux qui, un jour ou l'autre, de près ou de loin, m'ont rendu la vie plus facile...

Enfin (et surtout !), je m'excuse auprès des membres de ma petite famille, qui ont dû supporter mon humeur vagabonde et ma trop fréquente absence durant ces dernières années. Malgré tout, sans eux, rien ne serait : qu'ils reçoivent ici l'expression de ma plus profonde gratitude...



# Table des matières

<b>Chapitre 1. Introduction</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre 2. L'arc électrique - Phénomènes aux électrodes</b>	<b>11</b>
2.1 Zone cathodique d'un arc électrique	11
2.1.1 Situation du sujet	11
2.1.2 Diagnostic par spectroscopie optique d'émission	11
2.1.3 Phénomènes à la cathode	12
2.1.4 Modélisation de la colonne	13
2.1.5 Conclusion	15
2.2 Phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG	15
2.2.1 Situation du sujet	15
2.2.2 Influence du gaz utilisé sur la forme d'un arc de soudage	16
2.2.3 Analyse structurale de l'anode fusible	17
2.2.4 Diagnostic du plasma de soudage	17
2.3 Electro-érosion	19
<b>Chapitre 3. Milieux hors d'équilibre</b>	<b>21</b>
3.1 Plasmas réactifs	21
3.1.1 Situation du sujet	21
3.1.2 Fonctionnement et Caractérisation d'un arc glissant (GLIDARC)	21
3.1.3 Décharge supersonique. Application à la dépollution	22
3.1.4 Génération de radicaux hydrogène à l'aide d'un arc glissant	23
3.2 Filament de plasma à haute pression dans l'argon.	25
<b>Chapitre 4. Métrologie des plasmas et Spectroscopie</b>	<b>27</b>
4.1 Exploitation des spectres atomiques	27
4.1.1 Métrologie spectroscopique	27
4.1.2 Diagnostic d'un plasma RF en mélange argon-hydrogène	28
4.2 Spectroscopie moléculaire	30
4.2.1 Situation du sujet	30
4.2.2 Détermination des températures rotationnelle et vibrationnelle	30
4.2.3 Résultats	30
4.3 Spectroscopie par mélange quatre ondes dégénéré	32
4.3.1 Description théorique du Mélange 4 Ondes Dégénéré	33
4.3.2 Diagnostic du plasma par PC-DFWM	33
4.3.3 Comparaison du PC-DFWM avec la SOE	38
4.3.4 Détermination des paramètres Stark aux faibles intensités laser	39
4.3.5 Conclusions	41
<b>Chapitre 5. Perspectives</b>	<b>43</b>
<b>Annexe</b>	<b>45</b>

<b>Annexe A. Curriculum Vitae</b>	<b>45</b>
<b>Annexe B. Collaborations</b>	<b>47</b>
B.1 Collaborations nationales . . . . .	47
B.2 Collaborations internationales . . . . .	47
B.3 Encadrement de travaux de recherche . . . . .	48
<b>Annexe C. Diffusion de la culture scientifique</b>	<b>49</b>
C.1 Organisation de rencontres scientifiques ; FRAPOL . . . . .	49
C.2 Promotion des sciences . . . . .	49
<b>Annexe D. Activités d'enseignement</b>	<b>51</b>
D.1 1992-1994 : ATER (62 <sup>o</sup> section) . . . . .	51
D.2 1995-1998 : Vacataire de l'Université d'Orléans . . . . .	51
D.3 Depuis 1999 : Maître de Conférences (62 <sup>o</sup> section) . . . . .	52
D.3.1 Charges administratives . . . . .	52
D.3.2 Enseignements . . . . .	52
<b>Annexe E. Travaux et Publications</b>	<b>55</b>
E.1 Publications . . . . .	56
E.1.1 Publications originales . . . . .	56
E.1.2 Publications suite à une conférence, un séminaire... . . . .	57
E.2 Brevet . . . . .	58
E.3 Actes de conférences . . . . .	59
E.3.1 Avec comité de lecture . . . . .	59
E.3.2 Sans comité de lecture . . . . .	60
E.4 Rapports . . . . .	64
E.5 Autres publications . . . . .	66
E.5.1 Ouvrages . . . . .	66
E.5.2 Publications sans Referee . . . . .	66
E.5.3 Polycopiés pour l'enseignement . . . . .	66
E.6 Encadrements de travaux de recherche . . . . .	67
E.6.1 Stage Post-Doctoral . . . . .	67
E.6.2 Stage Doctoral . . . . .	67
E.6.3 Stage de DEA, DESS . . . . .	67
E.6.4 Stage de Maitrise, IUT... . . . .	67
E.7 Communications orales, Séminaires . . . . .	68

# Chapitre 1

## Introduction

J'ai effectué des études universitaires de physique à l'Université d'Orléans, en m'orientant, lors de mon 3<sup>o</sup> cycle, vers une formation de Plasmicien et de Spectroscopiste. Durant ma thèse, sous la direction de M. le Professeur J.CHAPELLE, j'ai eu la chance de travailler en collaboration avec l'équipe "Photonic" de l'Institut de Physique de l'Université Jagellonne, à Cracovie (Pologne), où j'ai pu bénéficier des qualités humaines exceptionnelles et de la très grande compétence de M. le Professeur K.MUSIOL.

La convergence des thèmes de recherche abordés dans l'Equipe de Cracovie et au Laboratoire d'Analyse Spectroscopique et d'Energétique des Plasmas (LASEP) de Bourges a favorisé le rapprochement de nos activités sur l'interaction arc-électrode. Les études entreprises sur ce sujet prolongent les thèmes que j'ai abordés durant ma thèse, avec une ouverture vers les décharges à pression atmosphérique. Elles couvrent

- Les sources de plasma de type arc électrique [Cf. Section 2, page 11], avec l'étude de la zone cathodique d'un plasma d'arc éclatant dans l'argon à pression atmosphérique [Cf. Section 2.1], des phénomènes liés aux effets anodiques (et cathodiques) en soudage MIG-MAG [Cf. Section 2.2] et des processus mis en jeu dans les plasmas d'électro-érosion [Cf. Section 2.3];
- L'étude de décharges froides hors d'équilibre à pression atmosphérique [Cf. Section 3, page 21], qu'elles soient
  - *glissantes* [Cf. Section 3.1.2] avec leurs éventuelles applications à la destruction des COV [Section 3.1.3] ou à la génération de radicaux hydrogène [Section 3.1.4];
  - *fixes* entre deux pointes [Cf. Section 3.2] pour l'étude des ondes d'ionisation.
- La mise en oeuvre et l'élaboration de nouvelles méthodes de diagnostic de ces sources [Cf. Section 4, page 27], par spectroscopie atomique [Section 4.1] et moléculaire [Section 4.2], en émission ou laser [Section 4.3], et leur application à la métrologie fine.

Elles se situent à l'interface de la recherche fondamentale (développement de méthode de diagnostic laser de milieux plasmagènes et application à la détermination des constantes spectroscopiques fondamentales nécessaires à l'étude des milieux plasmagènes complexes), et de la recherche appliquée (contrôle en ligne des milieux hors d'équilibre utilisés en dépollution, et des plasmas thermiques pour la soudure ou la découpe).

Les lignes qui suivent montrent à quel point la spectroscopie en constitue certainement le trait d'union principal, tant il est vrai que le diagnostic spectroscopique se révèle essentiel pour l'étude des différents milieux plasmagènes développés au laboratoire.

Certains travaux présentés dans ce mémoire n'ont pu être publiés essentiellement pour des raisons de confidentialité : soudage MIG-MAG (Contrat AIR LIQUIDE WELDING - Section 2.2), étude d'une décharge supersonique et de son application à la destruction des COV (Contrat EDF LES

RENARDIÈRES - Section 3.1.3), génération de radicaux hydrogène par décharge glissante (Contrat ELF-ATOCHEM - Section 3.1.4).

Quant aux autres, ils sont répertoriés en Annexe E [page 55] à laquelle renvoient les références données en début de chaque section. J'ai tenté de les illustrer plus particulièrement par un choix limité d'articles identifiés en **gras** et présentés dans la seconde partie de ce mémoire.

## Chapitre 2

# L'arc électrique - Phénomènes aux électrodes

Les études spectroscopiques sont certainement les mieux adaptées au diagnostic des plasmas d'arcs électriques. Le diagnostic détaillé permet en effet de remonter de façon non-intrusive à divers paramètres (composition chimique, températures, vitesses, pressions...) caractérisant ou résultant de différents effets dans l'arc. Les techniques modernes de l'imagerie et de la spectroscopie ont permis de redynamiser ce type de recherche en donnant accès, notamment, aux variations temporelles rapides des grandeurs mesurées. Il devient ainsi possible de suivre l'évolution de l'arc en continu sur de très courtes périodes.

### 2.1 Zone cathodique d'un arc électrique

Bibliographie [pp.56-58] : P01, P02, P05, **P17**; P<sub>c</sub>01, P<sub>c</sub>05, P<sub>c</sub>19.

#### 2.1.1 Situation du sujet

L'utilisation industrielle des arcs électriques est souvent limitée en puissance par la tenue des électrodes, et notamment par la résistance des cathodes, qui doivent supporter des densités de courant et des flux thermiques très importants.

Dans le cas d'un arc électrique éclatant dans l'argon, les températures de la zone cathodique dépassent souvent  $T=25000\text{K}$ , et les densités électroniques peuvent atteindre  $N_e=2\times 10^{23}\text{m}^{-3}$ ; cette zone, caractérisée par de très forts gradients, joue un rôle essentiel dans la modélisation d'un certain nombre de dispositif à arc (torche à plasma, disjoncteurs, arcs de soudure) présentant un intérêt industriel.

#### 2.1.2 Diagnostic par spectroscopie optique d'émission

Le diagnostic de la zone cathodique d'un arc électrique est complexe, compte-tenu de ses faibles dimensions géométriques (quelques millimètres) et de la présence de violents phénomènes de transport. La spectroscopie résolue spatialement, mettant à profit à la fois les raies d'ArI et d'ArII, ces dernières étant très intenses dès que la température dépasse  $T=16000\text{K}$ , est pratiquement la seule voie possible pour explorer cette région qui joue un rôle critique dans l'interaction arc-électrode.

Le diagnostic du plasma a été réalisé par plusieurs méthodes indépendantes, et notamment par l'utilisation des diagrammes de Olsen-Richter (O.-R.) construits respectivement à partir des coefficients d'émission des couples de raies (696.5nm de ArI, 480.6nm de ArII) et (480.6nm de ArII,



320.6nm de ArIII) [Cf. Figure 2.1].

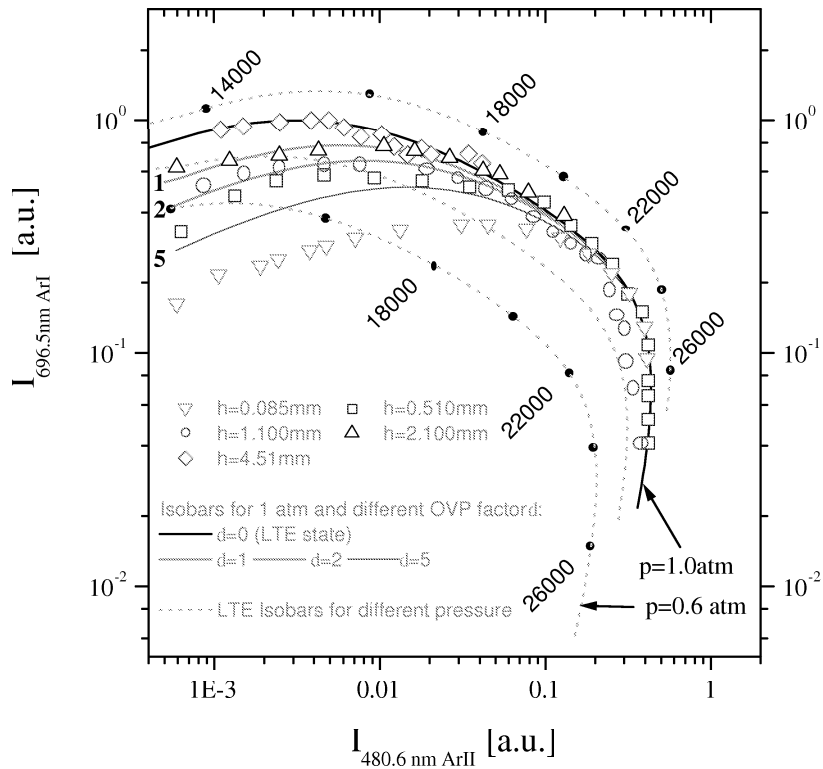
L'ensemble des résultats ainsi obtenus indique clairement que le plasma est en équilibre thermodynamique local (ETL) à la pression atmosphérique dans les régions à haute température ( $T > 18000\text{K}$ ) voisines de l'axe de l'arc, alors que des écarts importants par rapport à l'ETL apparaissent dans les zones à plus basse température, où la densité est encore élevée [ $N_e > 10^{23}\text{m}^{-3}$ ].

### 2.1.3 Phénomènes à la cathode

Bibliographie [pp.56-58] : P08 ; P<sub>c</sub>04, P<sub>c</sub>09.

Cette étude de la zone cathodique d'un arc électrique a été prolongée par une étude de l'interaction plasma-surface, et plus particulièrement par l'étude des phénomènes au voisinage de la cathode en tungstène thorié d'un arc électrique ( $I_{arc}=100$  à  $300\text{A}$ ) éclatant à pression atmosphérique dans de l'argon pur (Débit  $D_g=2$  à  $8\text{l/min}$ ). L'utilisation d'une caméra DTC avec un temps d'exposition  $t_{exp}=60\mu\text{s}$ , nous a permis de mettre en évidence :

- L'existence d'une zone sombre entre la colonne de plasma et la cathode, émettant fortement dans l'UV, et ayant une température estimée à  $T \approx 29000\text{K}$  sur l'axe ;
- L'existence de fluctuations lumineuses à basse fréquence liées aux modifications de la pointe cathodique, mais sans influence dans la partie supérieure de la colonne d'arc ( $h \leq 0.3\text{mm}$ ) ;



**Fig. 2.1** : Diagramme de Olsen-Richter pour la raie 696.5nm d'ArI et la raie 480.6nm d'ArII en fonction de la distance  $h$  à la pointe cathodique

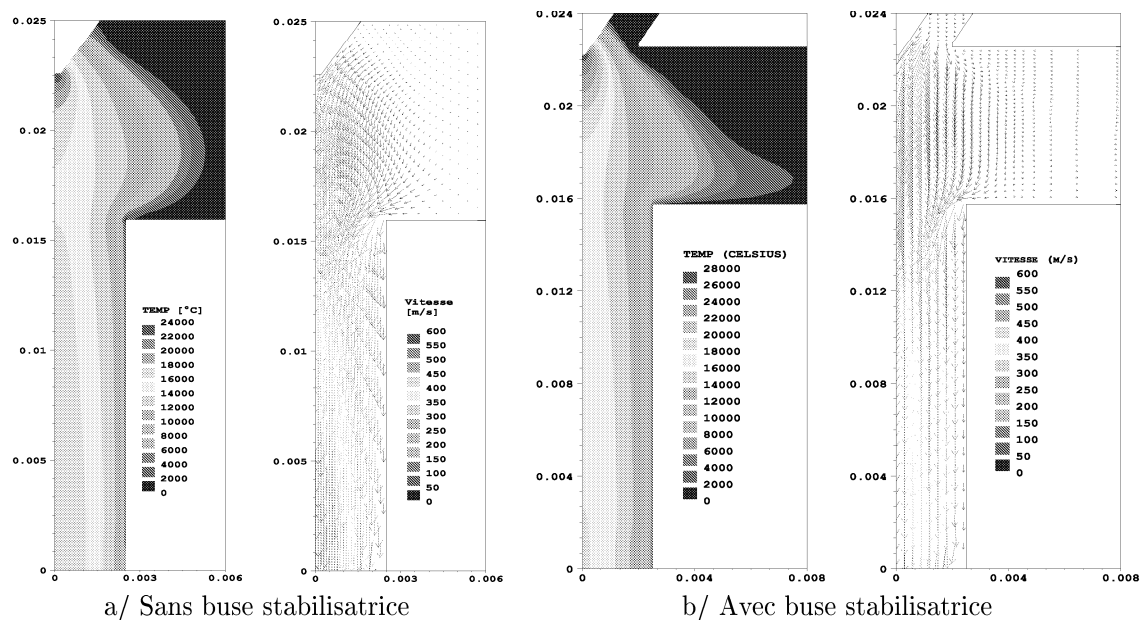
- Des modifications structurales de la surface cathodique ;
- L'existence simultanée de plusieurs spots à haute température sur la surface de la cathode ;
- D'apparents déplacements de ces spots sur la surface de la cathode, qui pourraient s'expliquer par l'"ouverture" de nouveaux canaux en des sites plus favorables à l'émission thermoionique sur la cathode. Cette explication a été confirmée par des résultats d'analyses microstructurales par microscopie électronique à balayage sur la cathode.

### 2.1.4 Modélisation de la colonne

Bibliographie [p.57] : P<sub>c</sub>23.

Ces différents résultats semblent indiquer qu'il faut revoir et améliorer l'approche théorique (y compris la modélisation) de ce problème. En effet, la zone cathodique, qui est le siège de transferts thermiques intenses, doit obligatoirement être prise en compte dans la modélisation des arcs, en laissant libre l'ensemble des paramètres utilisés afin de bien rendre compte des mouvements hydrodynamiques du plasma. D'autre part, une attention particulière doit être accordée à la validation de tels modèles, particulièrement lorsque le paramètre de contrôle est la température électronique, cette dernière étant plutôt insensible aux effets et phénomènes précédemment rapportés.

Une modélisation de la région cathodique d'un arc électrique éclatant dans l'argon sous pression atmosphérique a donc été entreprise afin de décrire les paramètres du plasma et de rendre compte des deux principaux résultats obtenus lors nos travaux expérimentaux : une température qui peut atteindre 30000K et d'importants écarts à l'ETL au voisinage de la cathode malgré l'existence d'une densité électronique élevée.



**Fig. 2.2** : Modélisation d'un arc de  $I_{arc}=200A$  éclatant dans l'argon à pression atmosphérique (Débit de gaz :  $D_g=4l/mn$ )

Dans un premier temps, différents calculs ont été menés en adaptant le code magnétohydrodynamique (MHD) en ETL développé par le Laboratoire National d'Hydraulique de Chatoux (code MÉLODIE), afin d'étudier l'influence du maillage et des conditions de travail de la cathode sur la simulation. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Les différentes expressions disponibles pour les propriétés thermodynamiques et les coefficients de transport, mais aussi la forme de la cathode et la structure de maille employée dans le modèle, ont une influence visible sur les répartitions de vitesses et de températures dans la colonne de plasma, mais ne permettent pas d'obtenir la température maximale de 29500K mesurée expérimentalement.
- La présence de la buse de stabilisation autour de la pointe cathodique, et la vitesse d'injection du gaz plus importante, d'une part modifient la forme du plasma, reproduisant qualitativement bien les observations expérimentales, et d'autre part produisent une augmentation de la température maximale. Néanmoins, celle-ci reste toujours largement inférieure aux valeurs observées.
- La seule possibilité pour atteindre des températures supérieures à 29000K, est d'introduire un flux de chaleur de la cathode en tungstène thorié vers sa base en cuivre énergétiquement refroidie par circulation d'eau. D'autre part, en imposant conformément aux observations expérimentales, que le passage du courant se fasse non plus par l'ensemble de la cathode, mais par un spot cathodique de dimension limitée, une température maximale de l'ordre de 32000K peut être obtenue.
- Pour un courant de 200A, l'isotherme 18000K est presque insensible aux conditions sur la tache cathodique, à la forme de la cathode et au mode de travail de l'arc (coupelle stabilisatrice). Par contre, au voisinage de la cathode, la répartition de température dépend très fortement des conditions limites.

Ainsi, le flux thermique intense du plasma vers la cathode (où l'émissivité est gouvernée par la pointe en tungstène thorié) est le principal effet responsable de la hausse considérable de la température maximale atteinte dans l'arc, par rapport à un arc libre typique.

Néanmoins, le modèle MHD en ETL précédent (donnant les profils de températures et de vitesses dans le plasma), ne pouvait pas, par définition, donner d'informations sur l'état de déséquilibre du plasma au voisinage de la cathode. Nous avons donc cherché à le coupler avec un modèle collisionnel-radiatif à quatre niveaux pour l'ArI.

En désignant par  $n_q^S$ , la densité du niveau atomique  $q$ , lorsque l'équilibre est réalisé entre ce niveau et le niveau fondamental de l'état d'ionisation supérieur, la surpopulation  $\delta_q$  de l'état  $q$ , par rapport à l'équilibre de Saha, peut être décrite en mettant la population réelle du niveau atomique  $q$  sous la forme

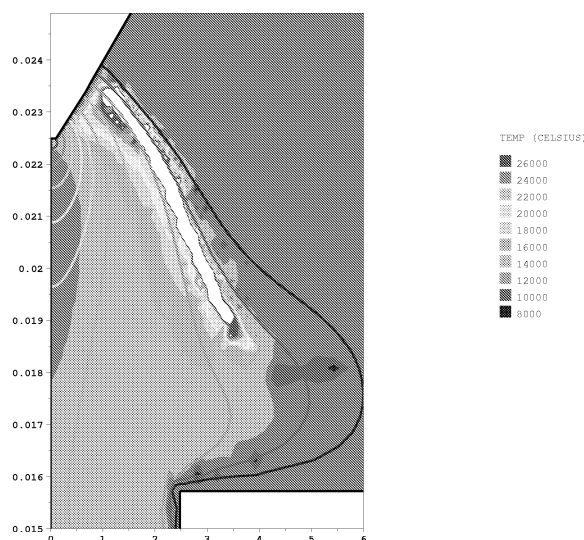
$$n_q = (1 + \delta_q) n_q^S . \quad (2.1)$$

Sous cette hypothèse, nous avons montré que les facteurs de surpopulation  $\delta_q$  des états excités ( $q > 1$ ), sont de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  : ils restent négligeables, comparés aux valeurs du facteur de surpopulation du fondamental  $\delta_1$ . L'effet prédominant est donc la surpopulation du fondamental d'ArI induite par le transport des atomes dans leur état fondamental vers l'intérieur du plasma. Pour illustrer l'influence du facteur de surpopulation  $\delta_1$  sur l'allure des isobares dans le diagramme de O.-R., nous avons tracé sur la Figure 2.1, les isobares correspondant à une pression  $p=1\text{atm}$  dans le cas d'un plasma en ETL partiel pour différentes valeurs de  $\delta_1$  (1, 2 et 5) : on peut vérifier que le modèle proposé permet d'expliquer convenablement le comportement de la distribution d'intensité des raies d'ArI dans les zones périphériques de la colonne de plasma.

Ces résultats corroborent nos observations expérimentales, et permettent d'envisager un couplage complet du modèle MHD en ETL partiel avec la modèle collisionnel-radiatif pour les niveaux d'argon. Néanmoins, les valeurs de  $\delta_1$  calculées [Cf. Figure 2.3] semblent toujours sous-estimées. Ces différences qui existent peuvent s'expliquer par :

- la simplification du modèle magnétohydrodynamique qui est basé sur une hypothèse d'ETL manifestement fautive ;
- les incertitudes existant sur les taux de réaction qui interviennent dans le modèle collisionnel-radiatif.

Le modèle final nécessite la détermination des sections efficaces de l'ArII, ainsi qu'une meilleure estimation des coefficients de transport, d'enthalpie et de chaleur spécifique pris en compte dans le modèle. Ce travail a été quasiment mené à son terme par le Dr B.POKRZYWKA, de Cracovie, et fera l'objet de son mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches<sup>1</sup>.



**Fig. 2.3** : Champs de surpopulation et isothermes dans la colonne de plasma d'argon à pression atmosphérique [ $I_{arc}=200A$  ;  $D_g=4l/mn$ ]

### 2.1.5 Conclusion

Les résultats obtenus dans la zone cathodique d'un arc électrique éclatant dans l'argon, peuvent avoir un impact important sur la modélisation des arcs et des interactions arc-électrodes. Il serait intéressant de les tester de façon plus précise en faisant varier les paramètres de fonctionnement de l'arc, mais aussi d'étudier l'effet du gaz plasmagène sur les écarts observés à l'ETL. Pour cela, nous avons enregistré les données nécessaires au diagnostic du plasma fonctionnant dans le xénon et le krypton à pression atmosphérique.

Néanmoins, l'étude de la zone cathodique de l'arc électrique peut désormais être considérée comme achevée, même si nous disposons d'une source de plasma à haute température ( $10000K \lesssim T \lesssim 30000K$ ) que nous continuerons à utiliser, spécialement pour la métrologie spectroscopique [Cf. Section 4.1, page 27].

## 2.2 Phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG

### 2.2.1 Situation du sujet

Dans le procédé de soudure MIG-MAG ("Metal Inert Gas" l'atmosphère de protection est inerte - "Metal Active Gas" l'atmosphère de protection est active ou activée), l'arc de plasma se

<sup>1</sup> "Collisional population decay rates of the upper and lower level for the 696.54 nm ArI line in arc plasma", B.POKRZYWKA (Mt.Suhora Observatory of Cracow Pedagogical University)

forme entre un fil - électrode fusible (habituellement l'anode) et une plaque métallique (d'habitude la cathode). Le procédé MIG-MAG s'applique au soudage des métaux ferreux et non ferreux avec différents mélanges de gaz : argon ou/et l'hélium en soudage MIG ; dioxyde de carbone ou mélange argon-dioxyde de carbone en soudage MAG.

Le mode de transfert du métal fondu dans l'arc dépend principalement de la nature du gaz utilisé, des dimensions géométriques et de la composition de l'électrode, et de la densité du courant de soudage. Selon la valeur du courant d'arc et du type des mélanges de gaz utilisés, la fusion du fil, ou plus exactement le transfert du métal, peut se faire de trois manières : le régime de transfert par court-circuits ("short-arc"), le régime globulaire ("globular transfer"), ou le régime de pulvérisation axiale ("spray-arc").

Un bon détachement des gouttes formées à l'extrémité de l'anode fusible, et leur transfert correct sur la cathode, est un enjeu important pour la qualité du soudage et de la soudure. Le principal phénomène mis en jeu est la distribution de la densité de courant dans le fil fondu, qui dépend des propriétés et de la composition du plasma autour de l'électrode. L'influence de la force de Lorentz a également une importance fondamentale pour le comportement des gouttes : sa composante axiale est la principale force de détachement, et elle influence directement la valeur du courant de transition entre les régimes de soudage. Quant à la force de gravitation, elle est importante pour la formation des grosses gouttes, mais a peu d'influence en mode de pulvérisation axiale où prédominent les forces électromagnétiques.

### 2.2.2 Influence du gaz utilisé sur la forme d'un arc de soudage

Le type de gaz de protection utilisé a une forte influence sur la qualité du procédé de soudage MIG. En particulier, plus la proportion de dioxyde de carbone dans l'argon augmente, plus on recule la limite d'apparition du régime de pulvérisation axiale. Pour tenter d'expliquer ce phénomène, nous avons cherché à observer la forme des lignes de courants dans un arc de soudage MIG-MAG, pour différentes proportions  $\text{CO}_2$  dans le gaz de protection.

L'importante intensité lumineuse de l'arc empêche, en observation directe, une analyse précise de sa répartition spatiale. L'utilisation d'un filtre interférentiel à bande passante étroite centrée sur 468.8nm devant l'objectif d'une caméra rapide permet, d'une part d'éliminer une grande partie de cette lumière, mais surtout d'isoler le rayonnement du continuum du plasma d'arc [Cf. Section 4.1, page 27], lequel est proportionnel au carré  $N_e^2$  de la densité électronique  $N_e$ . Il est alors possible de visualiser la zone de passage du courant en fonction du type de gaz et des caractéristiques de fonctionnement utilisées.

Les observations réalisées pour une même valeur moyenne de l'intensité du courant de soudage (324A), démontrent de façon très claire que le type de gaz utilisé a une influence importante sur la forme de l'arc et le transfert de métal :

- Dans le cas de l'argon pur sous un courant moyen de 324A, la colonne d'arc prend une forme semblable à celle observée dans le cas du régime pulvérisation axiale. La situation n'est pas modifiée en présence d'un faible pourcentage de dioxyde de carbone (jusqu'à 5% en volume) dans le gaz protecteur. L'arc est alors très stable, garantissant ainsi une grande efficacité de soudage et une bonne qualité de soudure. L'extrémité du fil, visiblement effilée, est complètement entourée par l'arc, conformément à la description de ce mode de transfert de métal liquide présentée dans différents articles <sup>2, 3</sup>.
- La forme de l'arc est radicalement modifiée lorsque le pourcentage de  $\text{CO}_2$  dépasse 5% en volume : plus long et plus diffus, il devient également moins stable. Des séquences d'images effectuées avec 25% de  $\text{CO}_2$ , montrent l'existence d'une fluctuation de la longueur de

<sup>2</sup> L.A.Jones, T.W.Eagar & H.J.Lang, *Welding Journal* **77** (1998) 135s-140s

<sup>3</sup> Y.S.Kim & T.W.Eagar, *Welding Journal* **72** (1993) 269s-278s

l'arc. Le mode de transfert de métal liquide change complètement : de grosses gouttes se forment à l'extrémité de l'électrode, résultant de la transition vers un mode irrégulier de transfert globulaire. Les projections de métal liquide et la production de fumées deviennent alors beaucoup plus importantes, et le fonctionnement en mode pulvérisation axiale devient impossible.

### 2.2.3 Analyse structurelle de l'anode fusible

Si le comportement du plasma doit influencer directement sur le procédé de soudage, il en est de même avec les transformations physico-chimiques dans l'électrode fusible. Son analyse (par microscopie électronique à balayage couplée à une microsonde de Castaing) en fonction des conditions de fonctionnement, a été entreprise. Les premiers résultats obtenus font apparaître que

- **Sous argon pur** [Cf. Figure 2.4-a], le fil-électrode se recouvre d'une fine couche (de 10 à 15 $\mu\text{m}$  d'épaisseur) présentant un très fort enrichissement en oxygène atomique, au détriment du fer et du carbone.

La zone intérieure n'est pas oxydée; deux cas ont pu être observés, selon la présence ou non d'une goutte de métal fondu à l'extrémité du fil-électrode lors de l'interruption du processus de soudage :

- Dans le premier cas, alors que la proportion des autres éléments constitutifs du métal (Mn, Si, Cr ...) reste quasiment constante, il existe une légère augmentation de la proportion de carbone de l'intérieur ( $\approx 7.4\%$  atomique) vers l'extérieur ( $\approx 11.7\%$  atomique) de la goutte, corrélée à une diminution du fer atomique (respectivement de  $\approx 90\%$  à  $85\%$ ), qui est vaporisé dans le milieu plasmagène.
- En absence de goutte, la composition dans le fil-électrode reste quasiment constante.
- **Sous mélange 60%Ar-40%CO<sub>2</sub>** [Cf. Figure 2.4-b], la goutte solidifiée à l'extrémité du fil-électrode ne contient plus que du carbone et du fer.

Par contre, elle est recouverte d'une couche très riche en oxygène ( $\gtrsim 50\%$ ), au détriment du fer atomique qui en est quasiment absent (presque 10 fois moins que dans la zone de référence!). Également appauvrie en carbone, cette couche contient par contre tous les additifs à l'acier initial en très grandes proportions : ceux-ci ont migré dans la zone liquide pour se concentrer en périphérie de la goutte, où ils forment une enveloppe d'oxydes réfractaires d'environ  $\approx 30\mu\text{m}$  d'épaisseur à l'extrémité du fil.

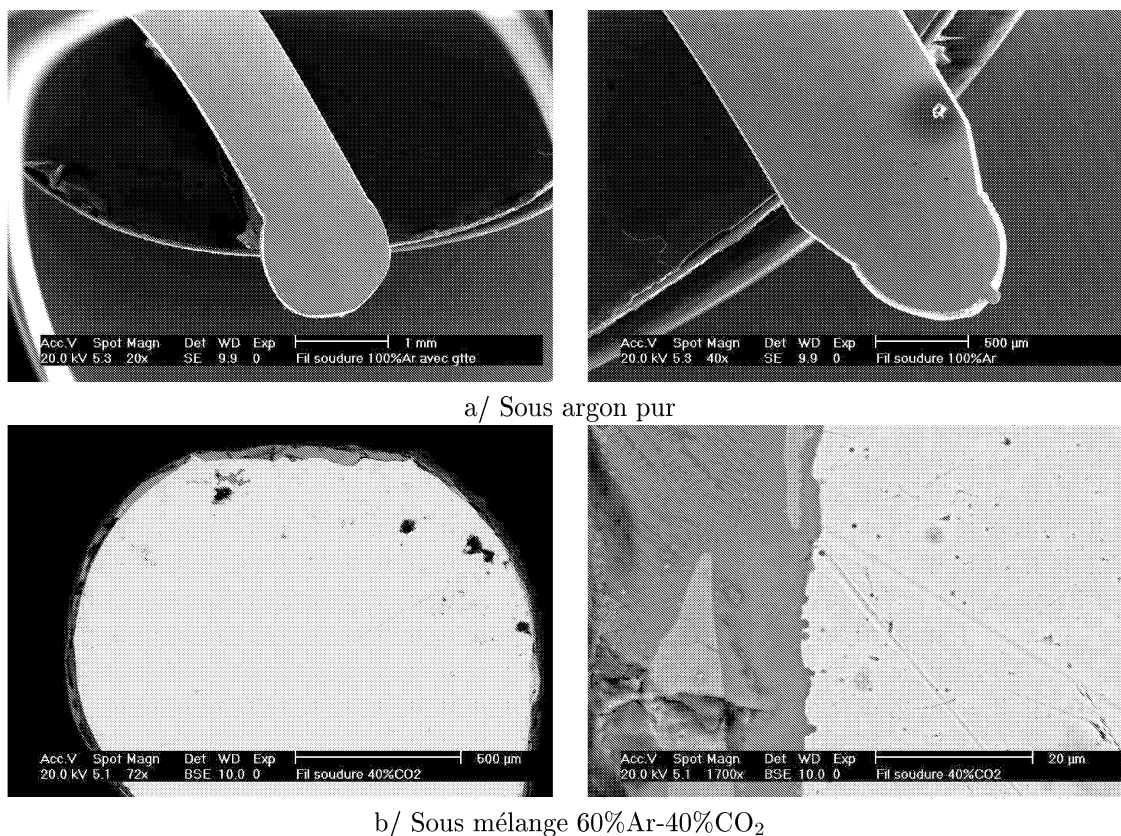
Ces observations pourraient permettre d'expliquer pourquoi, sous forte concentration de dioxyde de carbone, il est difficile d'obtenir un régime de fonctionnement stable sans projections trop importantes ni formations de grosses gouttes : la zone réfractaire forme une 'gangué' qui, d'une part empêche le détachement du métal liquide, et d'autre part force le passage du courant dans sa partie supérieure où elle est, sinon inexistante, du moins plus fine. Il s'ensuit une modification de la forme de l'arc et de son accrochage sur l'électrode. L'augmentation du courant d'arc permettrait alors de vaporiser en partie cette 'barrière' au bon fonctionnement du procédé de soudage, et favoriserait le passage en mode de pulvérisation axiale.

Ces hypothèses doivent désormais être validées par une analyse systématique en fonction des conditions de soudage, à la fois du fil-électrode, mais également des projections récupérées autour du cordon de soudure.

### 2.2.4 Diagnostic du plasma de soudage

Les premières acquisitions des spectres d'émission de l'arc de soudage en fonction des conditions de fonctionnement, ont montré la possibilité de développer le diagnostic de l'arc de soudage par spectroscopie d'émission.

Ainsi, les élargissements Stark des raies d'argon (notamment la raie 696.543nm d'ArI étudiée par ailleurs - Cf. Section 4.1) et du Fer permettent de déterminer les répartitions radiales de densité



**Fig. 2.4 :** Aspect de l'extrémité du fil-électrode en soudage MIG-MAG

électronique dans le plasma. Par ailleurs, les distributions de températures électronique peuvent être déterminées en appliquant la méthode du graphe de Boltzmann aux raies de FeI, puis validées en utilisant la forte dépendance en température des paramètres Stark de la raie 538.337nm de FeI<sup>4</sup>.

Les premiers résultats donnent des répartitions de températures relativement plates, avec une transition brutale entre un coeur chaud ( $T \approx 11000\text{K}$ ,  $N_e \gtrsim 1.3 \times 10^{23}\text{m}^{-3}$ ) très riche en fer et de dimensions comparables à celles de la zone la plus lumineuse du plasma, et la zone périphérique de la colonne.

<sup>4</sup> A.Lesage, J.L.Lebrun & J.Richou, *Astrophys. Journal* **360** (1990) 737

## 2.3 Electro-érosion

Bibliographie [p.57] : P<sub>c</sub>13, P<sub>c</sub>21, P<sub>c</sub>24.

L'électro-érosion [*Electrical Discharge Machining : EDM*] est un procédé dans lequel une décharge électrique dans un milieu diélectrique liquide, produit l'érosion des électrodes du dispositif. Généralement, l'érosion de l'une des électrodes utilisées est beaucoup plus rapide que l'autre. La durée des impulsions de courant varie de la microseconde à la milliseconde, et génère une décharge qui évolue d'une étincelle vers une décharge d'arc, à condition que la durée de l'impulsion soit suffisante. Sous certaines conditions, la superposition d'une fluctuation du courant sur les impulsions, permet d'augmenter fortement l'efficacité du procédé d'électro-érosion (jusqu'à 400%, dans le cas d'alliages W-C-Co!) et pourrait fournir un moyen de contrôle simple.

Le matériau constitutif des électrodes traitées est présent dans le plasma ainsi créé, comme l'atteste l'observation des raies spectrales émises par le milieu plasmagène. La température sur l'axe, mesurée par la méthode de Boltzmann 'modifiée' appliquée aux raies 411.854nm et 413.206nm du FeI, est comprise entre 8000 et 10000K, et décroît lentement au cours du temps.

Le procédé d'électro-érosion génère plusieurs phénomènes qui peuvent modifier les propriétés du matériau traité : apparition d'une 'porosité' sous la surface, fracturation, accroissement de la taille de grain, modification de la composition et la structure...

En marge des travaux précédents, et pour avoir une meilleure idée des processus mis en jeu dans les plasmas d'érosion, incluant les transformations physico-chimiques dans les électrodes, il est important de connaître les propriétés des matériaux érodés. Leur observation et leur étude par des techniques usuelles de caractérisation des matériaux, a été entreprise. En particulier, les résidus d'expérience (matériaux éjectés des électrodes pendant l'expérience et retrouvés dans le bain diélectrique) ont été analysés, et nous nous sommes intéressés à leur évolution en composition sous l'action du processus d'électro-érosion (microsonde de Castaing, microscopie électronique à balayage), ainsi qu'à la nature et à la structure des phases qui recristallisent dans le bain diélectrique (diffraction des RX, analyse chimique quantitative).

Le carbone, qui vient enrichir la surface de la cathode sur environ 20 $\mu$ m, pourrait jouer un rôle moteur dans l'érosion de celle-ci, en modifiant la tension de surface du métal fondu en cours de traitement.

Ces études, menées conjointement avec l'équipe PHOTONIC de l'Institut de Physique de l'Université Jagellonne de Cracovie (Pologne), et N.PELLERIN du Centre de Recherches sur les Matériaux à Haute Température (CNRS - Orléans), doivent être complétées et pourraient avoir des prolongements intéressants dans l'étude du soudage MIG-MAG.



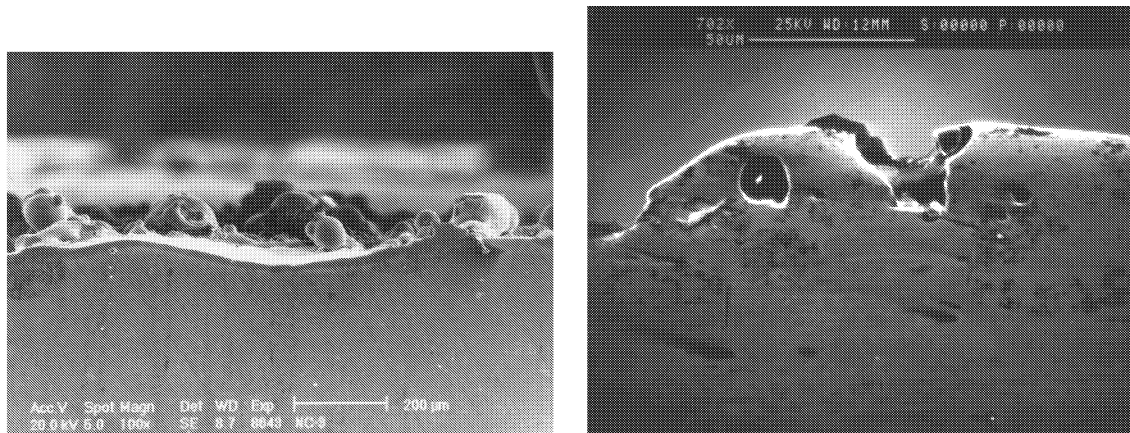


Fig. 2.5 : Aspect d'une électrode traitée par électro-érosion

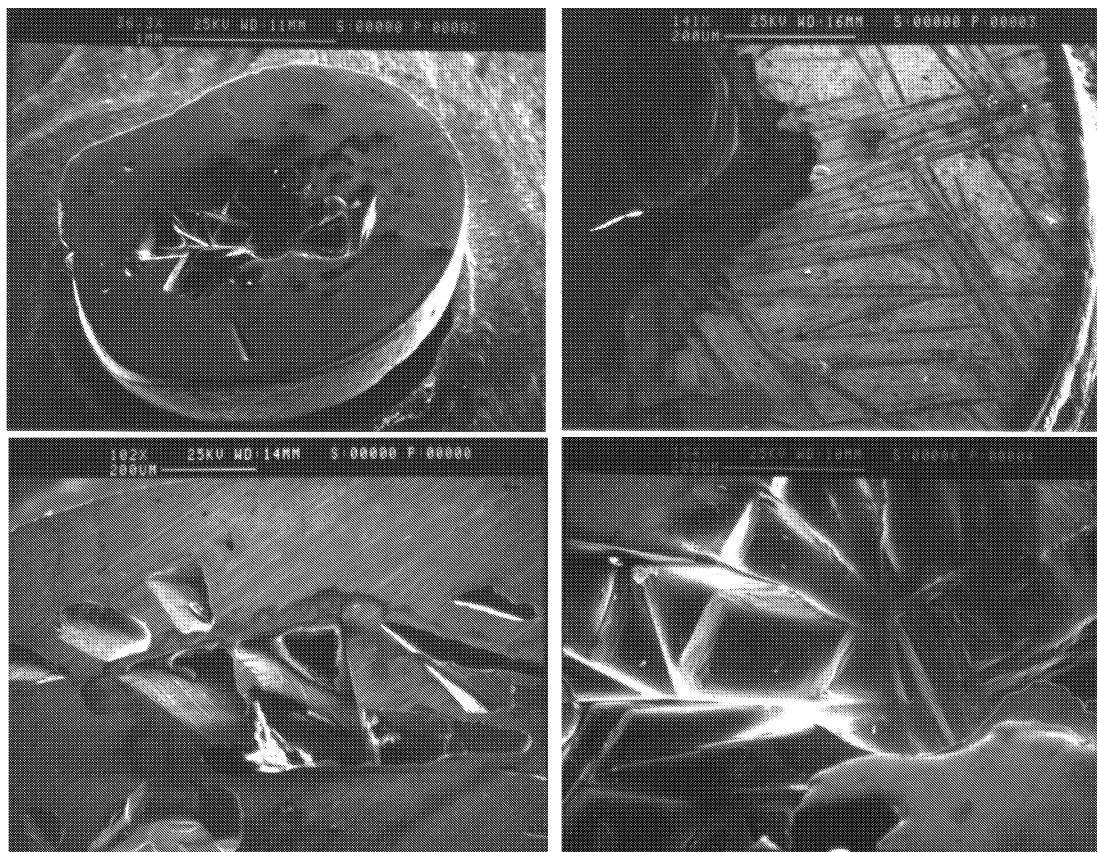


Fig. 2.6 : Aspect d'un résidu d'électro-érosion

# Chapitre 3

## Milieus hors d'équilibre

### 3.1 Plasmas réactifs

#### 3.1.1 Situation du sujet

Les procédés faisant appel à des plasmas atmosphériques non-thermiques, obtenus par Décharges à Barrière Diélectrique ou par Décharges Glissantes, sont en fort développement, particulièrement dans le cadre du traitement des effluents gazeux. Ces plasmas présentent une très grande efficacité énergétique, notamment en raison d'un faible chauffage du gaz, et permettent de traiter de grands volumes de gaz à des pressions atmosphériques ou supérieures. Ils sont aptes à produire de larges quantités de radicaux libres fortement réactifs, capables de détruire des espèces polluantes très stables.

#### 3.1.2 Fonctionnement et Caractérisation d'un arc glissant (Glidarc)

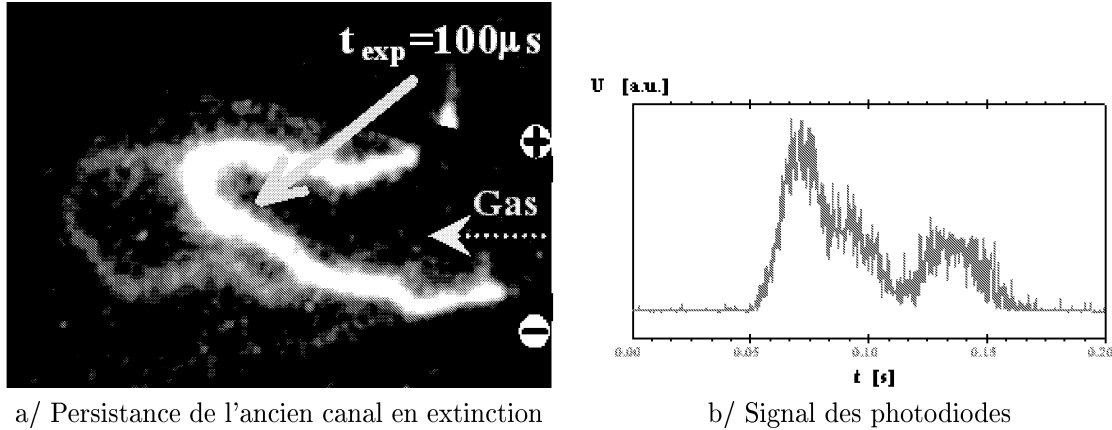
Bibliographie [pp.56-58] : P03, P18, **P21** ; P<sub>c</sub>10, P<sub>c</sub>11, P<sub>c</sub>14, P<sub>c</sub>15, P<sub>c</sub>25.

L'étude concerne la caractérisation et le fonctionnement des arcs glissants. Un arc se développe entre deux électrodes profilées : il s'amorce là où la distance inter-électrodes est la plus faible, puis se déplace le long des électrodes en s'allongeant sous l'effet d'un flux de gaz transversal. L'arc peut être décrit comme un fin cordon de plasma chaud (diamètre  $\approx 2\text{mm}$ ), entraîné par le courant de gaz avec une vitesse de glissement relativement faible (10m/s), et dont les extrémités se déplacent le long des électrodes (Sauts à la cathode, 'Glissement' à l'anode). Dans ces conditions, le volume de gaz réellement balayé par la décharge dans l'unité de temps reste bien inférieur au débit volumique du gaz [volume balayé par unité de temps/débit volumique de gaz à traiter  $\approx 1\%$ ].

L'arc suit un cycle périodique amorçage-élongation-extinction. L'élongation de la colonne se fait à champ électrique constant. La tension aux bornes de l'arc augmente progressivement jusqu'à atteindre la tension disruptive au col des électrodes ; un nouvel arc se forme alors, court-circuitant le premier qui s'éteint au sommet du réacteur. La tension chute alors brutalement jusqu'à une valeur de quelques volts, sans que le courant s'annule. Nous distinguons donc deux phénomènes principaux : un phénomène correspondant aux variations brutales de tension, superposé à une évolution moyenne correspondant à l'allongement progressif de l'arc.

Des perturbations de tension de faibles amplitudes apparaissent, dans la phase d'allongement de l'arc : elles sont dues au raccourcissement de la colonne de plasma par claquage soit sur l'électrode (apparition d'un nouveau site émissif plus favorable), soit sur elle-même ("rétro-claquage"). Quant à la partie en extinction, elle est soufflée par le gaz plasmagène, formant un panache en arrière de l'arc, qui peut atteindre plusieurs centimètres de longueur. Le bruit généré par le plasma est directement corrélé à l'existence de ces fluctuations. Les déplacements d'un arc dit 'glissant' se

font donc par sauts successifs, et devraient favoriser une augmentation du volume de gaz balayé par le plasma.



**Fig. 3.1** : Phénomène de *rétro-claquages*

La décharge joue un rôle déterminant pour la destruction des espèces polluantes contenues dans le gaz. Les processus physico-chimiques qui interviennent ne sont pas encore clairement identifiés. Néanmoins, pour la plupart des applications de chimie et de dépollution où la création d'espèces moléculaires excitées semble jouer un rôle important, il convient de préserver au maximum le caractère 'décharge électrique' (température du gaz faible, température électronique élevée) de l'arc glissant ; on peut en effet éviter à la pression atmosphérique le passage spontané du régime de décharge au régime d'arc, d'une part en limitant le courant de fonctionnement et d'autre part en augmentant le débit de gaz qui permet d'accroître la vitesse de déplacement des pieds d'arc sur les électrodes et de réduire ainsi l'émission thermoélectronique.

### 3.1.3 Décharge supersonique. Application à la dépollution

Bibliographie [pp.56-58] : P16 ; P<sub>c</sub>03 + Dépôt d'un Brevet européen [B.01, p.58].

Malheureusement, l'utilisation du GLIDARC avec l'air comme gaz porteur est caractérisée par l'émission d'importantes quantités d'oxydes d'azotes  $\text{NO}_x$  [500 à 2000ppm] essentiellement d'origine thermique et sensiblement proportionnelle au diamètre de la partie centrale à haute température de la décharge. Pour diminuer la concentration des  $\text{NO}_x$  dans les gaz de sortie du réacteur, on a donc intérêt à :

- Réduire le diamètre de l'arc en accroissant la vitesse relative gaz-arc (pour un débit donné, diminution de la section de sortie de l'injecteur) ;
- Travailler à faible courant en augmentant la tension de fonctionnement (accroissement de la distance au col des électrodes) ;
- Détruire les  $\text{NO}_x$  en sortie du réacteur, en utilisant une cheminée de lavage ;
- Chercher à diminuer au maximum la température de décharge.

Cette dernière voie a été exploitée, par la mise au point d'un réacteur fonctionnant en régime supersonique : lorsqu'un gaz s'écoule dans une tuyère convergente-divergente (tuyère de Laval), un régime sonique entraînant une diminution importante de la pression et de la température de l'écoulement peut s'établir pour un débit de gaz suffisant. Le passage de la région à basse pression à la pression atmosphérique se fait à travers une onde de choc qui s'accroche à l'intérieur de la tuyère. En y plaçant une électrode centrale, il est alors possible d'amorcer un arc glissant dans le dispositif.

Dans ces conditions, l'utilisation des tuyères convergentes-divergentes fonctionnant en régime supersonique offre la possibilité d'obtenir, à partir de la pression atmosphérique (ou de pressions légèrement plus élevées) et avec de forts débits de gaz, d'authentiques plasmas froids intéressants pour différentes applications industrielles (destruction des COV sans formation de  $\text{NO}_x$ ). En outre, la région de l'onde de choc, très turbulente, peut présenter un grand intérêt pour le mélange et l'interaction des espèces réactives formées dans l'écoulement amont.

### 3.1.4 Génération de radicaux hydrogène à l'aide d'un arc glissant

Bibliographie [p.56] : P23.

Les radicaux hydrogène jouent un rôle important dans diverses applications (élimination des molécules toxiques dans les milieux plasmagènes de traitement des déchets industriels, réalisation de dépôt de diamant à partir de plasmas de méthane, craquage des hydrocarbures où ils favorisent la cicatrization des liaisons pendantes des chaînes coupées...), avec notamment la possibilité de limiter la production de molécules toxiques ( $\text{COCl}$ ,  $\text{COCl}_2$ ,  $\text{COF}$ ,  $\text{COF}_2$ ) dans les milieux plasmagènes chloro-fluoro-carbonés de traitement des déchets et effluents industriels. On les produit généralement à haute température dans des arcs ou décharges électriques éclatant dans l'hydrogène. Mais ils sont difficiles à utiliser en raison de leur durée de vie relativement faible à la pression atmosphérique.

En collaboration avec EDF et ELF-ATOCHEM, nous avons conçu un avant projet de GLIDARC à deux électrodes fonctionnant dans l'hydrogène, dans un domaine de pressions comprises entre 1 et 2atm, avec des débits d'hydrogène pouvant varier entre 5 à 15Nl/mn, avec les caractéristiques de fonctionnement suivantes :

- Température maximale d'entrée des gaz :  $T \leq 200^\circ\text{C}$
- Température des gaz de sortie :  $20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$
- Alimentation électrique : Haute-tension sinusoïdale [ $P=1\text{kW}$ ];

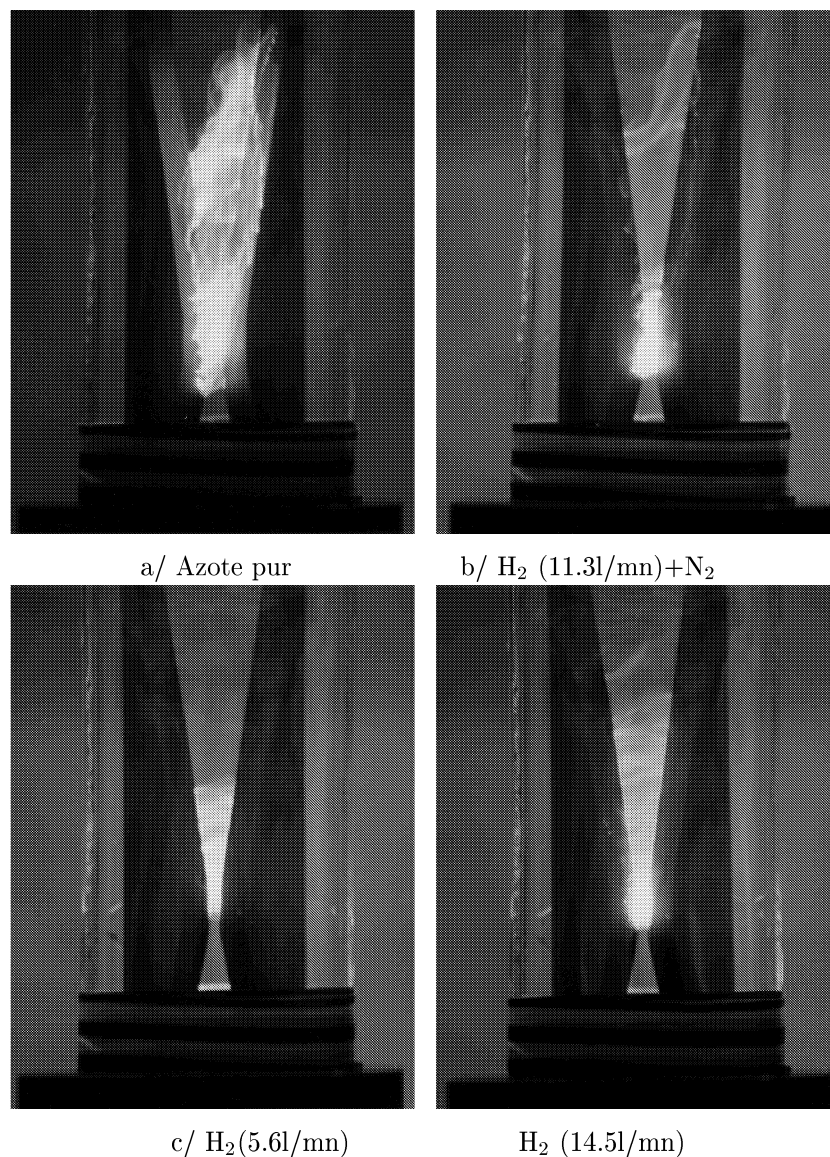
Les conditions de pression et température précédentes, ont nécessité la mise au point de passages des câbles électriques assurant l'étanchéité aux gaz et l'isolation électrique. D'autre part, le raccordement du réacteur devait se faire en T (à angle droit) ou en Y, sur une conduite de diamètre extérieur 17.6mm.

Le dispositif devant être facilement implantable sur un site industriel, nous avons opté pour une alimentation haute-tension 10kV-50Hz (AUPEM-SEFLI) qui permet d'obtenir les tensions nécessaires à l'amorçage (quelques kV) et à l'entretien de la décharge (quelques centaines de Volts).

Mettant à profit notre précédente étude sur les arcs glissants, les différents problèmes liés à l'utilisation de l'hydrogène (inflammabilité, accrochage de l'arc au col des électrodes, faible déplacement de l'arc, important échauffement du réacteur...) ont pu être levés, ce qui a permis de réaliser l'étude des caractéristiques électriques d'un GLIDARC fonctionnant en alternatif, et notamment de mettre en évidence les différentes causes d'extinction de l'arc (tension de claquage au col, passage par le zéro de courant, limitations dues au générateur).

Par ailleurs, des mesures spectroscopiques ont permis de détecter la présence d'atomes d'hydrogène excités au voisinage du cordon de plasma.

Néanmoins, parallèlement à ces travaux, nous avons montré que les radicaux hydrogène formés dans ce type de décharge, ont une durée de vie à pression atmosphérique qui ne permet pas de les transporter suffisamment loin de la zone de décharge pour les utiliser par exemple dans le craquage des hydrocarbures. Par contre, une légère chute de pression (de 1atm à  $\frac{1}{3}$ atm) permet de multiplier leur durée de vie par 10.



**Fig. 3.2** : Aspect d'une décharge glissante dans l'hydrogène -  $d_{elec}=1.5\text{mm}$

Nous avons donc cherché à adapter la tuyère supersonique développée précédemment [Cf. Section 3.1.3], pour générer des radicaux hydrogène à longue durée de vie à partir d'un mélange d'argon et d'hydrogène. Le dispositif réalisé répond aux caractéristiques d'écoulement recherchées (régime supersonique avec onde de choc, amorçage de la décharge en amont du choc). Nous avons également pu mettre indirectement en évidence la formation de radicaux à basse pression, ce qui leur confèrent une durée de vie supérieure à ceux produits à pression atmosphérique. Par la suite, il est envisagé d'évaluer par actinométrie, la quantité de radicaux produits.

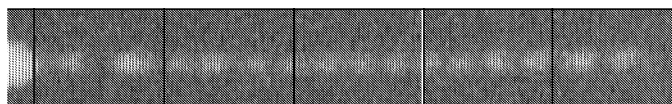
## 3.2 Filament de plasma à haute pression dans l'argon.

Bibliographie [p.57] : P<sub>c</sub>12.

Les arcs électriques à forte puissance ont été et sont encore beaucoup étudiés ; en revanche les décharges dites *filamentaires*, obtenues à très faible intensité ( $I < 1\text{A}$ ) et à haute pression (pression atmosphérique et pressions supérieures), qui se situent entre la décharge dite *luminescente* et l'arc électrique, sont beaucoup moins connues.

Les premières expériences qui ont été réalisées dans l'argon, montrent que ces décharges ont les caractéristiques suivantes :

- Très faible diamètre (quelques dixièmes de millimètre).
- Chute de tension aux électrodes ( $V > 100$  Volts) et champ électrique ( $E \approx 10$  kV/m) élevés.
- Différence de température importante entre les électrons et les particules lourdes.
- Existence d'**ondes d'ionisation** (perles lumineuses) qui se propagent de l'anode vers la cathode avec une vitesse de quelques dizaines de mètres par seconde, selon l'intensité du courant dans l'arc, la nature du gaz utilisé et la pression.



**Fig. 3.3** : Aspect d'une décharge filamentaire dans l'argon

Ce phénomène d'ondes d'ionisation, que nous avons pu observer dans différents gaz rares (krypton, xénon) alors qu'il n'apparaît pas avec l'hélium ou des gaz moléculaires ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) et est très sensible à la présence d'impuretés, n'a jamais été mentionné dans la littérature pour les conditions expérimentales qui sont les nôtres.

L'étude des principaux mécanismes de création et de disparition des électrons mis en oeuvre dans la décharge filamentaire réalisée dans l'argon à la pression atmosphérique et à faible intensité, a mis en évidence :

- L'importance de la formation des ions moléculaires  $\text{A}_2^+$  et de leur recombinaison dissociative pour la disparition des électrons.
- L'importance des états métastables des niveaux  $N=2$  et  $N=3$  dont l'ionisation par choc électronique est la principale source de création des électrons.

Par ailleurs, nous avons montré que les processus importants à retenir pour le calcul des populations des niveaux  $N=2$  et  $N=3$  de l'argon, sont :

- Pour le processus de peuplement, l'excitation par choc électronique à partir du fondamental, la recombinaison à trois corps étant négligeable ;
- Pour le processus de dépeuplement, l'ionisation par choc électronique, qui est le principal processus de dépeuplement, mais aussi la désexcitation par choc électronique.

Dans ces conditions, nous avons développé un modèle à 3 niveaux d'énergie qui permet de déterminer correctement les principales caractéristiques du plasma.

A partir de la température des atomes, déduite des bandes de rotation du radical OH [Cf. Section 4.2, page 30] , et du coefficient de recombinaison radiative  $\beta$  proposé par RAIZER<sup>1</sup>, nous avons pu déterminer la valeur du coefficient  $k_c$  de formation des ions moléculaires. La mesure d'un autre paramètre de la décharge (température électronique  $T_e$ , densité électronique  $N_e$ ) devrait permettre d'obtenir d'une manière indépendante les valeurs de  $k_c$  et  $\beta$ .

<sup>1</sup> Y.Raizer, *Gas Discharge Physics*, ed.Springer (1997)

La vitesse et la fréquence des ondes d'ionisation observées sur les décharges capillaires à la pression atmosphérique dans l'argon et les autres gaz rares (néon, krypton, xénon) sont fonctions des coefficients d'ionisation du niveau fondamental et des niveaux métastables. Elles permettent de déterminer expérimentalement ces paramètres et de les comparer ensuite aux valeurs théoriques difficilement calculables, compte tenu de la structure électronique des atomes des gaz rares.

Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes non seulement sur le plan fondamental, mais également pour les applications, notamment pour le calcul des caractéristiques des plasmas de xénon qui sont actuellement utilisés pour la propulsion des satellites.

# Chapitre 4

## Méetrologie des plasmas et Spectroscopie

### 4.1 Exploitation des spectres atomiques

#### 4.1.1 Méetrologie spectroscopique

Bibliographie [pp.56-57] : P05, P10, P11, P12, **P19** ; P<sub>c</sub>22.

Les températures élevées atteintes dans la zone cathodique d'un arc électrique, permettent de déterminer dans de bonnes conditions les probabilité de transitions et les paramètres d'élargissement Stark encore inconnus d'un grand nombre de raies de l'argon une ou deux fois ionisés (ArII et ArIII, respectivement), et d'étudier l'émission de recombinaison de ArIII. Il a ainsi été possible de déterminer les probabilités de transitions relatives de 92 raies d'ArII, et la largeur Stark à mi-hauteur  $\Delta\lambda_S$  de 80 de ces raies.

Nous avons également utilisé l'ensemble de nos données pour étudier l'évolution de la raie  $\lambda=696.543\text{nm}$  d'ArI dans une large gamme de températures [ $13500\text{K} \leq T_e \leq 24000\text{K}$ ] et de densités électroniques [ $1.2 \times 10^{23}\text{m}^{-3} \leq N_e \leq 2.0 \times 10^{23}\text{m}^{-3}$ ], et proposer une nouvelle valeur de sa largeur totale à mi-hauteur normalisée à  $N_e^n=10^{23}\text{m}^{-3}$  et  $T_e^n=13000\text{K}$  :

$$\Delta\lambda_S^n = 0.0814\text{nm} \quad \text{à } 5\% \quad (4.1)$$

Par ailleurs, mettant à profit le diagnostic précis de la zone cathodique de l'arc électrique fonctionnant dans l'argon, nous avons mesuré l'émission continue à  $\lambda=468.8\text{nm}$  d'un plasma d'argon à haute température [ $T_e \leq 27500\text{K}$ ]. Le facteur de Biberman global  $\xi^{ArIII}$  pour l'interaction des électrons libres avec l'argon deux fois ionisé a été déterminé dans la gamme de températures 24000K-27500K. Il peut être correctement approximé par la formule suivante :

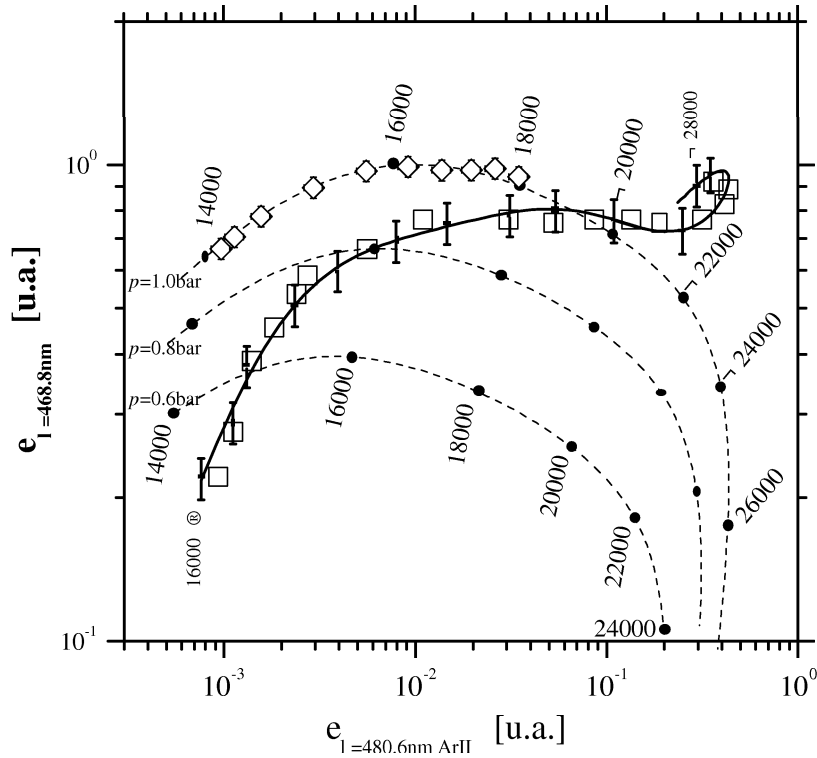
$$\xi^{ArIII} = 1.85 - 0.77 \times 10^{-4} \cdot (T_e - 25000) \quad (4.2)$$

dans laquelle la température  $T_e$  est exprimée en K.

Les températures élevées de la zone cathodique devraient également permettre de déterminer dans de bonnes conditions les caractéristiques spectroscopiques encore inconnues d'éléments d'intérêt expérimental, astrophysique ou technologique.

D'ores et déjà, l'étude systématique par spectroscopie optique d'émission des raies d'argon III, mais aussi du krypton et du xénon, dont la connaissance est particulièrement importantes pour la caractérisation des propulseurs ioniques développés dans le cadre du GDR sur la propulsion spatiale, est entreprise.





**Fig. 4.1 :** Diagramme de Olsen-Richter pour l'émission continue à  $\lambda=468.8\text{nm}$  et la raie  $480.6\text{nm}$  d'ArII en fonction de la distance  $h$  à la pointe cathodique  
 [Points expérimentaux :  $\square$   $h=0.51\text{mm}$  ,  $\diamond$   $h=4.5\text{mm}$ ]  
 [(—) Isobares en ETL, par pas de  $0.2\text{atm}$ , pour  $\epsilon^{ArII}$ ]  
 [(—) Courbe calculée en utilisant le diagnostic en ETL partiel et nos résultats pour  $\xi^{ArIII}$ ]

#### 4.1.2 Diagnostic d'un plasma RF en mélange argon-hydrogène

Bibliographie [p.56] : P24, P25.

L'intérêt de l'incorporation d'hydrogène lors de l'élaboration d'un dépôt de silicium de qualité photovoltaïque est largement évoqué dans le cas du silicium amorphe et dans le cas du silicium cristallin au laboratoire. Il contribue à l'élimination des défauts cristallins durant la croissance du cristal.

Pour bien comprendre les mécanismes d'hydrogénation du silicium dans les procédés de fusion par plasma, il est nécessaire de corréliser les états excités de l'hydrogène atomique avec son isotope contenu dans le silicium. Le but de l'étude entreprise était de caractériser un plasma inductif Argon-Hydrogène à pression atmosphérique afin de mettre en évidence les états excités présents entre  $5000\text{K}$  et  $12000\text{K}$  dans le champs électromagnétique des spires et dans le jet.

Le jet de plasma est généré par un générateur radio-fréquence travaillant à  $4\text{MHz}$ , opérant à une puissance modulable entre  $5$  et  $10\text{kW}$ . Le rendement de couplage du générateur avec le gaz est estimé à environ  $40\%$ .

La torche plasma monoflux est composée d'un tube de quartz ( $d_{int}=30\text{mm}$ ,  $l=300\text{mm}$ ) placé au

centre de quatre spires inductives (section : 3mm, diamètre : 44mm, pas de 7mm) refroidies à l'eau. Le tube de quartz est alimenté par un mélange gazeux argon-hydrogène introduit en vortex dans la partie métallique servant de support au tube. Les débits du mélange plasmagène sont contrôlés à l'aide de débitmètres massiques (Ar : 29.4 - 30 l.min<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub> : 0.6 - 0 l.min<sup>-1</sup>). Le temps moyen de résidence des espèces gazeuses dans le plasma est d'environ 5ms sur l'axe.

De nombreuses raies d'argon atomiques, mais également les raies de la série de Balmer de l'hydrogène atomique (jusqu'à  $n=8$ ), ont été observées transversalement (*side-on*) et utilisées pour diagnostiquer le plasma.

Une première estimation de la valeur maximale de la densité électronique  $N_e$  dans les plasmas hydrogénés, peut-être faite à partir de la relation d'Inglis et Teller donnant l'état de l'hydrogène atomique de plus haute excitation observable en fonction de la densité électronique du milieu plasmagène :

$$\log N_e = 23.26 - 7.5 \log n_{max} \quad (4.3)$$

où  $N_e$  est exprimée en [cm<sup>-3</sup>] et  $n_{max}$  est le nombre quantique principal maximal observable. Dans notre cas, on détecte les raies de la série de Balmer jusqu'à  $n=8$ , ce qui donne une densité électronique de l'ordre de  $N_e \approx 3 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$  dans la zone d'induction.

Les mesures de densité électronique effectuées à partir de l'élargissement Stark des raies spectrales, nous fournissent une cartographie axiale de la concentration en électrons libres du plasma en dehors de toute hypothèse sur l'état d'équilibre du milieu. Il apparaît que la zone d'induction est la plus réactive du plasma ( $N_e \approx 4.2 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$ ). D'où l'intérêt lors du traitement de particules de leur faire traverser la zone des spires inductives afin d'améliorer leur purification.

La température électronique mesurée par deux techniques différentes (graphique de Boltzmann et rapport de l'intensité d'une raie au fond continu adjacent) décroît de 11500K au centre des spires inductives à 10000K dans le panache du plasma pour une puissance 6.3kW. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par calcul en modélisation numérique, et conduisent à des densités électroniques calculées dans l'hypothèse d'ETL, comparables à celles déterminées à partir de l'élargissement des raies. L'ajout d'hydrogène au plasma ne modifie pas la distribution axiale de température qui semble être directement proportionnelle à la puissance injectée dans le plasma.

La validité de l'hypothèse d'ETL a été vérifiée et l'écart de températures entre les particules lourdes et les électrons a été estimé à 430K sur l'axe, ce qui est faible comparé à la valeur de la température électronique du plasma qui est de l'ordre de 10000 à 11500K.

Par la suite, nous souhaiterions, d'une part, utiliser les bandes de Fülcher de l'hydrogène moléculaire pour estimer la distribution de température rotationnelle dans le jet, et d'autre part tenter de déterminer les répartitions radiales de température et densité électronique dans la torche.

## 4.2 Spectroscopie moléculaire

Bibliographie [pp.56-58] : P04, P07, **P09**, P13, P15, P20, P22 ; P<sub>c</sub>06, P<sub>c</sub>07, P<sub>c</sub>08, P<sub>c</sub>16, P<sub>c</sub>17.

### 4.2.1 Situation du sujet

La température des gaz plasmagènes est un paramètre indispensable pour mieux comprendre les processus physico-chimiques qui caractérisent le comportement de ces milieux complexes, et en particulier leur aptitude du plasma à dégrader ou à transformer les espèces initialement présentes. Mais dans les zones actives de ce type de plasma, la densité électronique et les températures sont faibles, et il est difficile (voire impossible!) d'utiliser la spectroscopie d'émission atomique pour diagnostiquer le milieu. Néanmoins, différentes bandes moléculaires, relativement bien isolées, apparaissent naturellement dans ces types de décharges, et peuvent servir de 'thermomètres' pour estimer les températures rotationnelle (proche de celle du gaz) et vibrationnelle du milieu. C'est le cas, en particulier, de la bande OH( $A^2\Sigma^+, \nu'=0$ ) $\rightarrow$ OH( $X^2\Pi, \nu''=0$ ) à 306-357nm, de la bande de Swan C<sub>2</sub>( $d^3\Pi_g, \nu'=0$ ) $\rightarrow$ C<sub>2</sub>( $a^3\Pi_u, \nu''=0$ ) à 516-611nm, du système CH( $A^2 \Delta, \nu'$ ) $\rightarrow$ CH( $X^2 \Pi, \nu''$ ) autour de 431.5nm et du spectre infra-rouge du monoxyde de carbone CO entre 2.3 $\mu$ m et 2.4 $\mu$ m.

Les systèmes N<sub>2</sub><sup>+</sup>(B<sup>2</sup>  $\Sigma_u^+$ -X<sup>2</sup>  $\Sigma_g^+$ ) et N<sub>2</sub>(C<sup>3</sup>  $\Pi_u^+$ -B<sup>3</sup>  $\Pi_g^+$ ) entre 380nm et 400nm, sont également fréquemment observés simultanément dans les plasmas contenant de l'azote. Les intensités relatives de ces bandes sont très sensibles aux variations du rapport  $\alpha=[N_2]/[N_2^+]$  et aux températures rotationnelle et vibrationnelle du milieu.

### 4.2.2 Détermination des températures rotationnelle et vibrationnelle

Toutes ces bandes, qui sont observables dans des conditions expérimentales variées, peuvent être aisément isolées pour donner rapidement des informations utiles sur la température du milieu. En particulier, leur aspect varie notablement lorsque la température évolue, et l'on peut utiliser l'évolution théorique du rapport de deux raies bien déterminées de la bande (ce que l'on appellera "fonction test") pour obtenir rapidement une estimation de la température. De la même façon, même si la fonction d'appareil du système est inconnue, ces bandes bruitées et spectralement mal résolues, peuvent être employées pour évaluer les températures rotationnelle et vibrationnelle dans différents générateurs de plasma, dans une gamme étendue de température (jusqu'à 10000K).

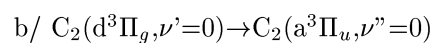
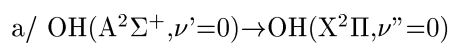
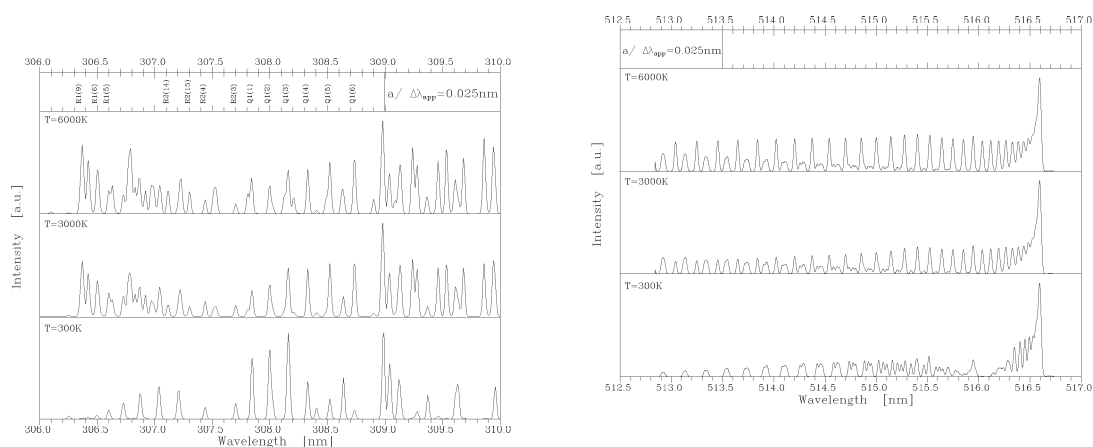
La méthode utilisée est basée sur la comparaison des données expérimentales avec un spectre théorique, la procédure numérique étant initiée à l'aide d'une évaluation de la fonction d'appareil réalisée à partir d'une raie du spectre moléculaire, et d'une première estimation de la température obtenue à partir d'un graphe de Boltzmann, ou en utilisant une "fonction test" prédéterminée. Il faut noter qu'une attention particulière doit être faite pour distinguer un éventuel écart à l'équilibre thermodynamique local des éventuelles erreurs de traitement des données...

### 4.2.3 Résultats

Divers types de plasmas ont ainsi pu être diagnostiqués : dispositif à arc glissant, décharge barrière fonctionnant dans l'argon ou dans un mélange CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>, jet de plasma d'argon et de mélange Ar/CF<sub>4</sub>, plasma d'hydrocarbures dans un arc de type Maecker, Surfatron, décharge lumineuse à pression atmosphérique, plasmas raréfiés N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> et Ar/CH<sub>4</sub> ...

La méthode de diagnostic proposée a également été utilisée pour mesurer et évaluer le rapport  $\alpha$  de concentrations de  $[N_2]/[N_2^+]$  et les températures rotationnelle et vibrationnelle dans différentes sources de plasmas d'azote (GLIDARC, décharge entre pointes, arc électriques ...).

Actuellement, nous cherchons à étendre cette méthode à d'autres spectres moléculaires (CN, NH, H<sub>2</sub>, voire CO<sub>2</sub>) couramment observés d'une part dans les dispositifs utilisés en dépollution, et d'autre part dans les plasmas de rentrée atmosphérique d'une sonde spatiale (atmosphères de



**Fig. 4.2** : Bandes moléculaires de OH et de C<sub>2</sub> en fonction de  $T_r$  [ $\Delta\lambda_{app}=0.025\text{nm}$ ]

Mars, de Titan...). Nous espérons ainsi fournir un ensemble de "fonctions tests" facilement identifiables et utilisables pour obtenir une première approximation des températures rotationnelle (proche de celle du gaz) et vibrationnelle du milieu...

### 4.3 Spectroscopie par mélange quatre ondes dégénéré

Bibliographie [pp.56-57] : P14, P26 ; P<sub>c</sub>18.

La spectroscopie optique d'émission (SOE) est couramment utilisée comme outil de base dans l'étude des plasmas de laboratoire. Ses principaux avantages consistent en l'utilisation d'un dispositif expérimental relativement simple qui permet des mesures non-intrusives. Particulièrement bien adaptée aux milieux homogènes et stables, la spectroscopie d'émission devient moins utilisable lorsqu'on a affaire à des milieux asymétriques dont les caractéristiques (densité, température) présentent de forts gradients. C'est le cas, par exemple, des plasmas d'arc, spécialement dans la région cathodique où la symétrie de la colonne de plasma dépend fortement de la position de la tache cathodique. Les méthodes de type SOE sont alors essentiellement limitées par le fait qu'elles intègrent toujours l'information sur la ligne de visée optique [Cf. Schéma Figure 4.3] et nécessitent donc l'utilisation d'une inversion d'Abel pour déterminer la répartition radiale des paramètres du plasma.

Le **Mélange 4 Ondes Dégénéré** (*DFWM : Degenerate Four-Wave Mixing*) est une méthode locale et non-intrusive de diagnostic laser non-linéaire du troisième ordre [Cf. Schéma de principe sur la Figure 4.3]. Ses principaux avantages résident essentiellement dans :

- une résolution spatiale (limitée par le diamètre de convergence des faisceaux laser) et temporelle ( $\approx 10$ ns), permettant de sonder un faible volume de plasma ;
- la proportionnalité directe du signal mesuré avec la différence de population des niveaux atomiques ;
- un traitement des données relativement simple et rapide ;
- son utilisation possible pour le diagnostic des sources de plasma asymétriques ;
- la possibilité de réaliser un diagnostic bi-dimensionnel de l'ensemble du plasma en une seule impulsion laser (à condition de disposer d'un laser suffisamment intense et d'une matrice de photodiodes pour la détection).

Cette méthode, qui nécessite des dispositifs expérimentaux plus complexes que ceux de la spectroscopie optique d'émission, a été appliquée pour la première fois, par nos équipes, à l'étude de l'équilibre thermodynamique local (ETL) dans un plasma d'arc éclatant dans l'argon à pression atmosphérique.

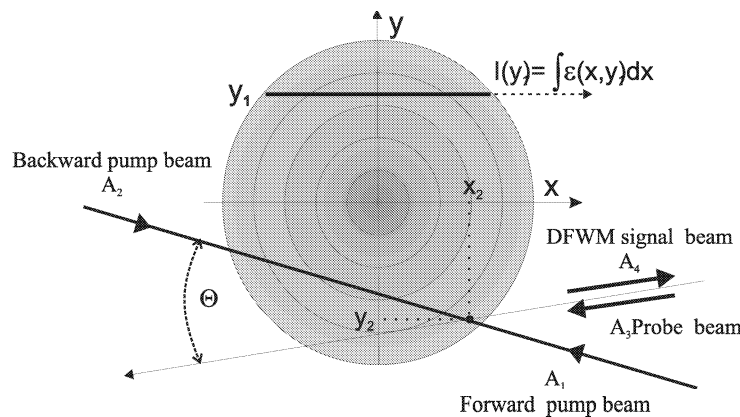


Fig. 4.3 : Principes de la SOE et de la spectroscopie par PC-DFWM

### 4.3.1 Description théorique du Mélange 4 Ondes Dégénéré

Le Mélange 4 Ondes Dégénéré est un procédé optique non-linéaire impliquant trois faisceaux laser de fréquence  $\omega$  identiques, qui interagissent à travers la non-linéarité d'un milieu pour générer un quatrième faisceau signal, à la même fréquence. Le faisceau signal, conjugué de phase d'un des faisceaux laser incident, est hautement collimaté et peut être aisément distingué du rayonnement du plasma.

Un modèle du Mélange Quatre Ondes Dégénéré à Conjugaison de Phase (*PC-DFWM : Phase-Conjugate Degenerate Four-Wave Mixing*) a été élaboré, notamment par l'équipe du Professeur K.MUSIOL, pour un système à deux niveaux homogènement élargis dans un milieu dominé par les collisions et où uniquement un réseau induit électromagnétiquement, est présent. Les autres réseaux sont supposés être détruits sous l'effet du mouvement des atomes. Sous ces hypothèses, une expression analytique a été obtenue pour le signal  $I_4$  de Mélange 4 Ondes produit par des faisceaux laser d'intensité arbitraire, sans absorption ni affaiblissement significatifs. En particulier, aux faibles intensités laser avec des faisceaux d'égales intensités  $I$ , le modèle est équivalent à celui de la théorie proposée par ABRAMS et LIND <sup>1</sup>.

Par ailleurs, nous avons étudié deux cas correspondants à une intensité du faisceau arrière soit égale, soit très inférieure aux intensités des deux autres faisceaux laser. Une différence significative dans les spectres obtenus par PC-DFWM a été observée : dans le premier cas, un creux au centre de la raie apparaît à des intensités comparables à l'intensité de saturation, tandis que dans le second cas, un effet similaire peut être obtenu, mais aux intensités beaucoup plus élevées.

Le modèle prédit également la diminution du signal de PC-DFWM pour des intensité du faisceau pompe dépassant l'intensité de saturation [Cf. Figure 4.4].

L'ensemble des effets décrits a été confirmé qualitativement par des résultats expérimentaux obtenus sur la transition  $4s[3/2]^0-4p'[1/2]$  à 696.5nm d'ArI dans un plasma en équilibre thermodynamique local [Cf. par exemple Figure 4.4].

Le décalage observé entre les résultats expérimentaux et théoriques peut être, dans une large mesure, attribué à l'influence de la forme spatiale et temporelle de l'impulsion laser sur les signaux : par exemple, l'intensité du signal de PC-DFWM induit par des impulsions gaussiennes décroît beaucoup plus lentement que dans le cas d'un laser continu ou d'impulsions rectangulaires [Cf. Figure 4.4].

Bien que les profils spatial et temporel du faisceau laser puissent être mesurés et introduits dans le modèle, le résultat serait de peu d'utilité pour les applications expérimentales.

Par contre, en nous basant sur le comportement asymptotique du signal de PC-DFWM dans le cas des fortes intensités laser et en ajustant l'expression obtenue aux données expérimentales, nous pouvons finalement écrire :

$$I_4 \propto (\Delta N_0)^2 \Gamma^{1.48} \gamma^{-0.52} I^{-0.48} \quad (4.4)$$

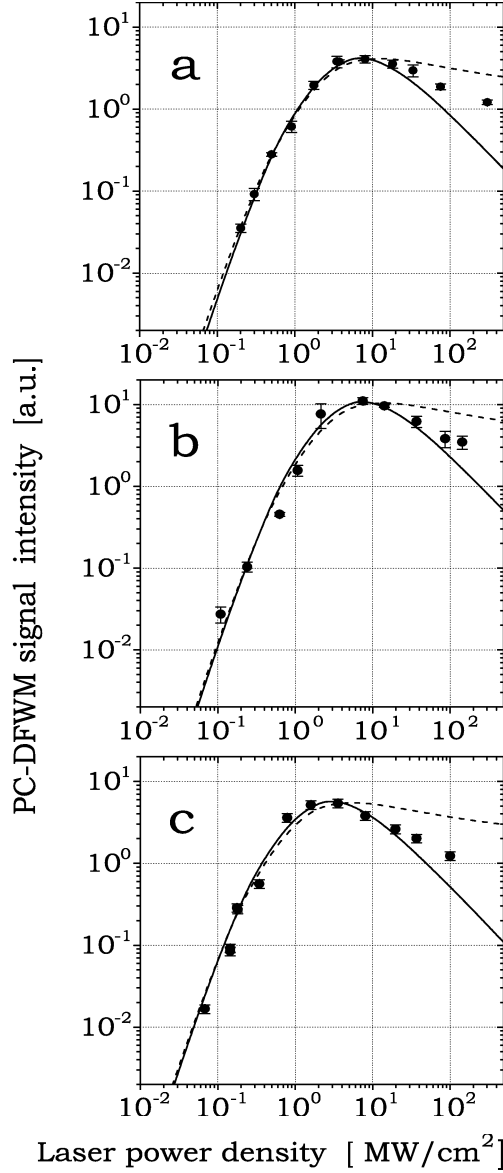
Ainsi, le signal de PC-DFWM à forte intensité laser, est essentiellement sensible à la différence de population  $\Delta N_0$  des niveaux sondés, au taux de décohérence totale,  $\gamma$ , et au taux moyen de dépopulation,  $\Gamma$ .

Cette expression est de grande importance pour l'application du PC-DFWM au diagnostic et à l'étude des plasmas, comme nous allons le voir maintenant.

### 4.3.2 Diagnostic du plasma par PC-DFWM

Dans le cas de notre plasma haute-pression, les procédés de relaxation sont dominés par des collisions électroniques. Dans ces conditions, les taux de décohérence et de dépopulation sont

<sup>1</sup> R.L.Abrams & R.C.Lind, Degenerate four-wave mixing in absorbing media, *Opt.Lett.* **2** (1978) 94-96  
Degenerate four-wave mixing in absorbing media : errata, *Opt.Lett.* **3** (1978) 205



**Fig. 4.4** : Signal de PC-DFWM en fonction de la densité de puissance laser sur le faisceau direct  
 [Résultats du modèle : (-) Impulsion rectangulaire; (...) Impulsion gaussienne]  
 [● Valeurs expérimentales : (a)  $h=2.0$  mm; (b)  $h=4.0$  mm; (c)  $h=7.0$  mm]  
 [ $\delta = 0$  - Valeurs normalisées au maximum du signal]

donnés par

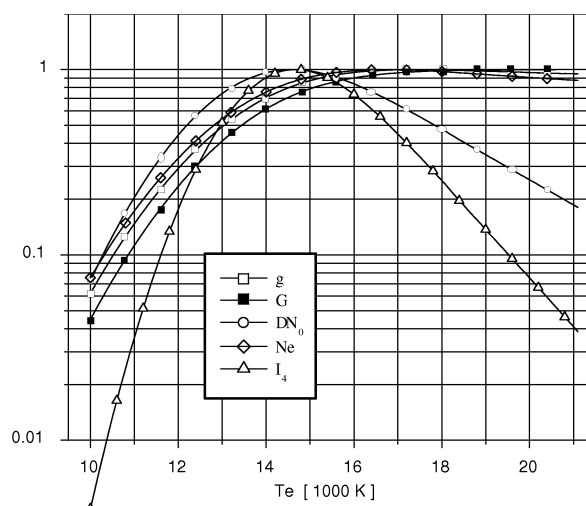
$$\gamma = N_e (k_1(T_e) + k_2(T_e) + k_{el}(T_e)) = N_e k(T_e) \quad (4.5)$$

$$\Gamma = N_e \frac{k_1(T_e) k_2(T_e)}{k_1(T_e) + k_2(T_e)} = N_e K(T_e) . \quad (4.6)$$

où  $N_e$  est la densité électronique. Les taux  $k_n(T_e)$  et  $k_{el}(T_e)$ , qui dépendent de la température  $T_e$ , correspondent aux sections efficaces moyennées sur les vitesses électroniques, de dépopulation du niveau  $n$  et de collisions électroniques inélastiques, respectivement.

Les valeurs relatives des taux  $K(T_e)$  et  $k_n(T_e)$ , calculés par le Dr. B. POKRZYWKA de Cracovie, sont tracées Figure 4.5 en fonction de la température  $T_e$ , avec les valeurs de la différence de population  $\Delta N_0$  et de la densité électronique,  $N_e$ , calculées dans l'hypothèse d'ETL.

- La différence de population  $\Delta N_0$  est caractérisée par un maximum distinct et de fortes variations avec la température  $T_e$  du plasma.
- Une dépendance similaire existe pour la densité électronique  $N_e$  lorsque la température  $T_e$  est inférieure à 16200K.
- Les maxima de la différence de population et de la densité électronique sont atteints pour  $\Delta N_0 = 1.02 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  et  $N_e = 2.00 \times 10^{23} \text{m}^{-3}$  à 15190K et 17510K, respectivement.
- La dépendance en température de l'intensité  $I_4$  du signal de PC-DFWM, calculée en utilisant l'Equation (4.4), est caractérisée par un maximum local pour une température de plasma  $T_e$  de l'ordre de 14700K.



**Fig. 4.5 :** Dépendance en température des paramètres atomiques du plasma  
[Plasma d'argon en ETL à pression atmosphérique - Valeurs normalisées à leur maximum]

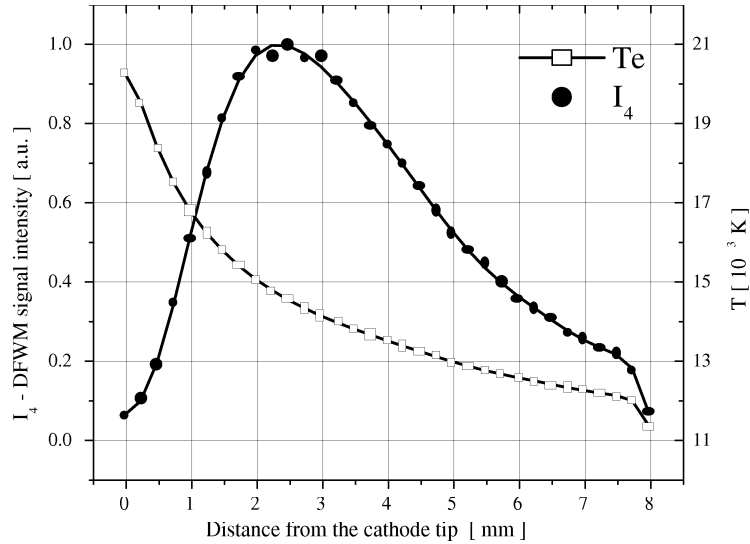
La spectroscopie de PC-DFWM à haute intensité laser, a été utilisée pour réaliser le diagnostic du plasma d'arc dans l'argon. Plusieurs raisons justifient de se placer à forte intensité laser, plutôt qu'à faible intensité laser :

1. Le signal de PC-DFWM est plus intense, et donc la sensibilité de la méthode est plus élevée,
2. La dépendance de signal en fonction de l'intensité de laser est beaucoup plus faible ce qui réduit les incertitudes liées à d'éventuelles fluctuations du laser,
3. En raison de l'important élargissement de puissance (plus large que le déplacement attendu pour la raie!), les signaux de PC-DFWM mesurés à une fréquence laser donnée et dans différentes zones du plasma, peuvent être comparés directement sans corrections pour le déplacement Stark de la raie spectrale.



L'évolution du signal de PC-DFWM  $I_4$  en fonction de la température  $T_e$ , obtenue en substituant les Equations (4.5) et (4.6) dans l'Eq.(4.4), est également représentée Figure 4.5.

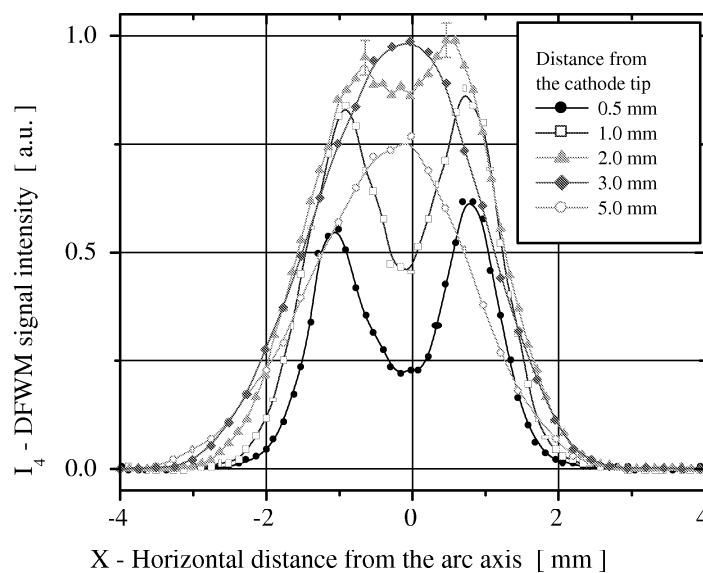
Le *signal normatif*  $I_{4,n}$ , défini comme la valeur maximum de  $I_4$  dans un plasma en ETL à pression atmosphérique, est atteint pour la température spécifique  $T_n=15190\text{K}$ , dite *température normative*. Si cette température est atteinte en un point du milieu plasmagène, et que la valeur correspondante de l'intensité  $I_{4,n}$  y est connue, la répartition de température dans le plasma peut être déterminée en mesurant  $I_4$  relativement au signal normatif et en utilisant la dépendance en température du signal de PC-DFWM : c'est le fondement de la méthode de détermination de la température dans le plasma par la méthode de Larentz-Fowler-Milne, qui a été également utilisée pour le diagnostic par SOE [Cf. Section 2.1.2, page 11].



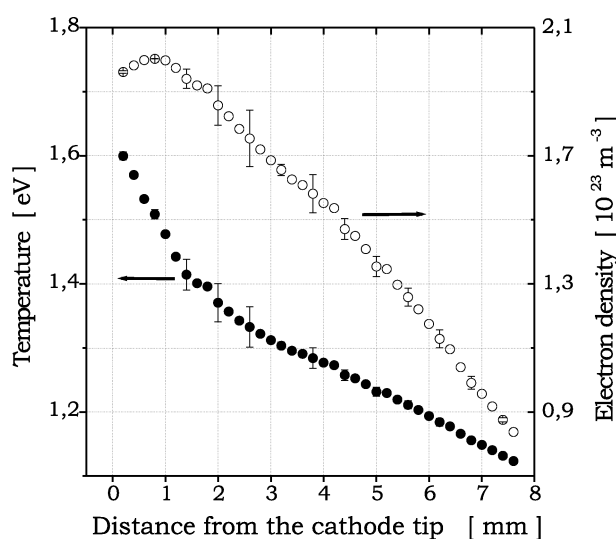
**Fig. 4.6 :** Distributions axiales du signal  $I_4$  de PC-DFWM et de la température électronique  $T_e$  [Plasma d'argon en ETL à pression atmosphérique -  $I_{arc}=100\text{A}$  ;  $D_g=4\text{l/mn}$ ]

Les mesures ont été réalisées avec une densité de puissance laser d'environ  $100\text{ MW/cm}^2$ , choisie pour satisfaire la condition des fortes intensités laser (supérieure à l'intensité de saturation  $I_{Sat}$ ) dans la totalité du volume de plasma étudié. La Figure 4.6 montre la distribution de l'intensité  $I_4$  du signal de PC-DFWM sur l'axe de la colonne de plasma, en fonction de la distance à la pointe de la cathode : elle passe clairement par un maximum à environ 2.5mm de la cathode que nous considérerons comme le signal normatif pour un plasma d'argon en ETL à pression atmosphérique [Cf. Figure 4.5]. En supposant que l'ETL est atteint en tout point de l'axe de la colonne de plasma, la distribution axiale de températures peut être facilement déterminée : elle varie d'environ 12000K à l'anode jusqu'à 19500K au voisinage de la pointe cathodique [Cf. Figure 4.6].

Des mesures similaires de distributions de l'intensité du signal de PC-DFWM et de la température ont été réalisées dans la direction perpendiculaire à l'axe, à différentes distances de la pointe de la cathode [Cf. Figure 4.7]. Ces profils font apparaître des maxima hors-axe au voisinage de la



**Fig. 4.7** : Distributions radiales du signal  $I_4$  de PC-DFWM à différentes distances de la cathode [Plasma d'argon en ETL à pression atmosphérique -  $I_{arc}=100A$  ;  $D_g=4l/mn$ ]



**Fig. 4.8** : Distributions axiales obtenues par la méthode du PC-DFWM :  $\bullet T_e(r)$  ;  $\circ N_e(r)$  [Plasma d'argon en ETL à pression atmosphérique -  $I_{arc}=100A$  ;  $D_g=4l/mn$ ]

cathode. Cependant, les valeurs de ces maxima sont plus faibles que ceux prédits par le modèle théorique dans l'hypothèse d'ETL. On retrouve l'effet observé par SOE, lié à l'existence d'un écart à l'ETL dans les zones correspondantes du plasma étudiés [Cf. Section 2.1.2, page 11]. Dans les zones périphériques de la colonne de plasma (à environ 2mm de l'axe), l'intensité du signal de

PC-DFWM décroît d'un facteur 10 relativement à sa valeur maximum : elle correspond alors à une température du plasma proche de 11500K, comme on peut le vérifier sur la Figure 4.5.

Toujours dans l'hypothèse d'un plasma en ETL, ces différents résultats permettent de calculer la répartition de densité électronique dans la colonne de plasma : elle varie de  $8 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$  à  $20 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$ , respectivement [Cf. Figure 4.8]. Les barres d'erreurs incluent les incertitudes dues aux fluctuations d'intensité du laser et du plasma, mais ne prennent pas en compte l'incertitude systématique résultant du calcul des valeurs relatives des taux de décohérences et de dépopulation.

### 4.3.3 Comparaison du PC-DFWM avec la SOE

Une expérience indépendante a été réalisée pour comparer les résultats du diagnostic du plasma obtenus avec PC-DFWM et SOE.

Pour cela, la colonne de plasma est observée transversalement (*side-on*) par SOE à différentes distances de la pointe cathodique. Le profil des raies d'argon et l'émission continue du plasma ont été enregistrés pour pouvoir appliquer une inversion d'Abel et remonter ainsi aux distributions radiales d'intensités. Le diagnostic du plasma a alors été réalisé par diverses méthodes appliquées aux raies d'ArI, ArII et ArIII en supposant le plasma en ETL [Cf. Section 2.1.2, page 11].

La comparaison des distributions radiales d'intensité  $I_4$  du signal de PC-DFWM et de la population  $N_2$  du niveau de départ de la transition obtenue par SOE, mesurée à  $z=0.75\text{mm}$  de la pointe de la cathode dans un arc éclatant dans l'argon (4l/mn) à pression atmosphérique sous un courant de 90A, est donnée Figure 4.9. Il faut noter que la bonne symétrie observée par SOE est uniquement due à l'inversion d'Abel qui impose une symétrisation forcée. Néanmoins, et même si la méthode utilisant le PC-DFWM souligne une asymétrie réelle de la colonne de plasma, les distributions de températures obtenues par les deux méthodes sont tout à fait semblables (dans la limite des incertitudes!) [Cf. Figure 4.10]. Le décalage observé peut être attribué à la résolution spatiale limitée de la spectroscopie optique d'émission appliquée de la même façon qu'à un milieu homogène et symétrique.

Par ailleurs, de façon tout à fait comparable aux résultats obtenus par SOE, nous avons observé que l'intensité du maximum hors-axe pour les raies d'argon neutre, variait avec la distance à la pointe cathodique, mais restait constante pour des distances supérieures à approximativement  $z=2.5\text{mm}$ , confirmant une nouvelle fois nos conclusions sur l'existence d'une dépendance radiale de l'état d'équilibre du plasma au voisinage de la pointe cathodique [Cf. Section 2.1, page 11].

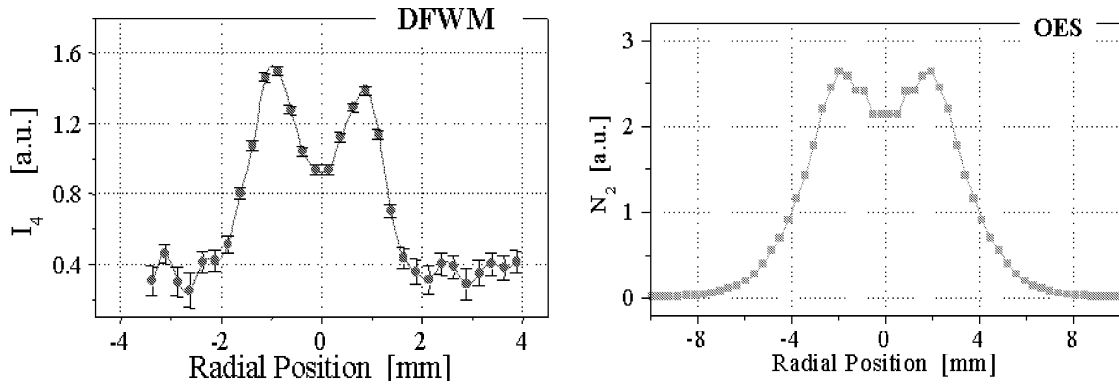


Fig. 4.9 : Distributions radiales de  $\Delta N_0$  et  $N_2$  obtenues par PC-DFWM et SOE.  
 $[I_{arc}=90\text{A}; D_g=4\text{l/mn}; h=0.75\text{mm}]$

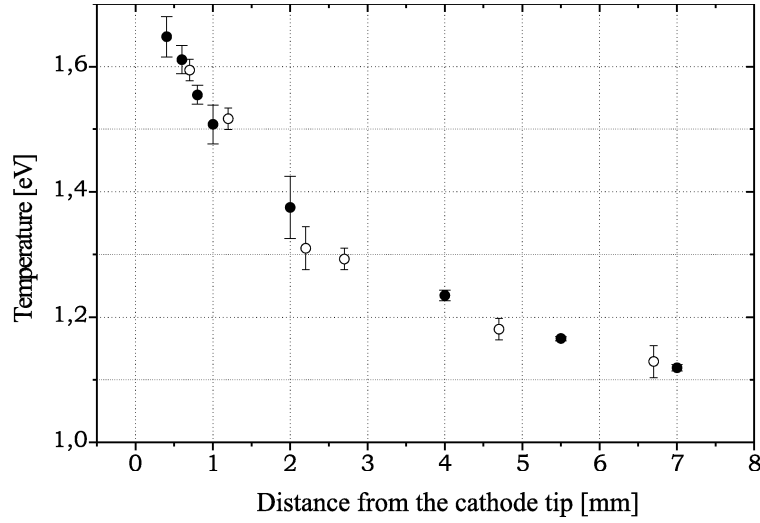


Fig. 4.10 : Distributions axiales de températures obtenues par PC-DFWM (●) et SOE (○).

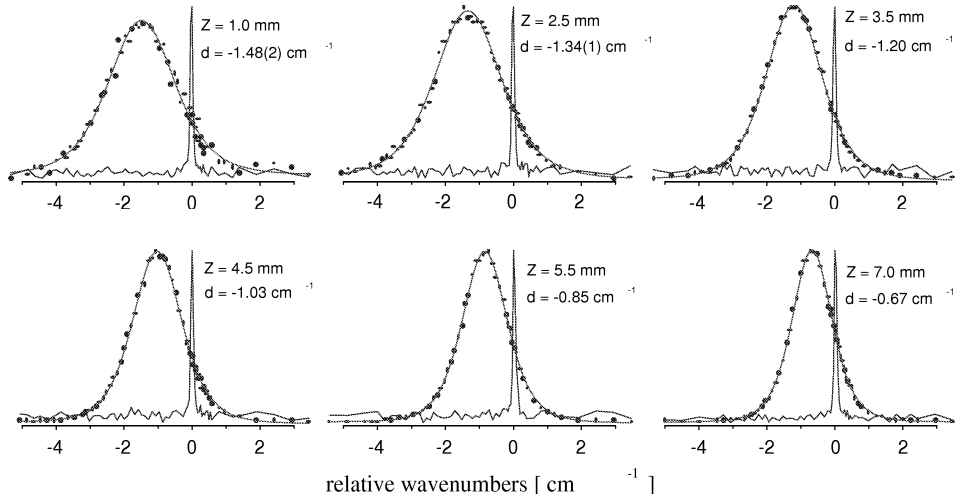
#### 4.3.4 Détermination des paramètres Stark aux faibles intensités laser

L'élargissement et le déplacement Stark des raies spectrales fournissent des outils très utiles pour les études en physique des plasmas et en astrophysique, spécialement car cette méthode est complètement indépendante de l'état d'équilibre du plasma. Il existe un très grand nombre de publications dédiées aux mesures des élargissements Stark de divers éléments dans des états d'ionisation différents, basées sur l'utilisation de différentes sources de plasma. Les résultats expérimentaux sont presque exclusivement basés sur la spectroscopie optique d'émission, méthode qui a prouvé son utilité spécialement dans le cas de plasmas homogènes et à symétrie axiale, mais qui présente de gros problèmes d'analyse des données si ces conditions ne sont plus vérifiées.

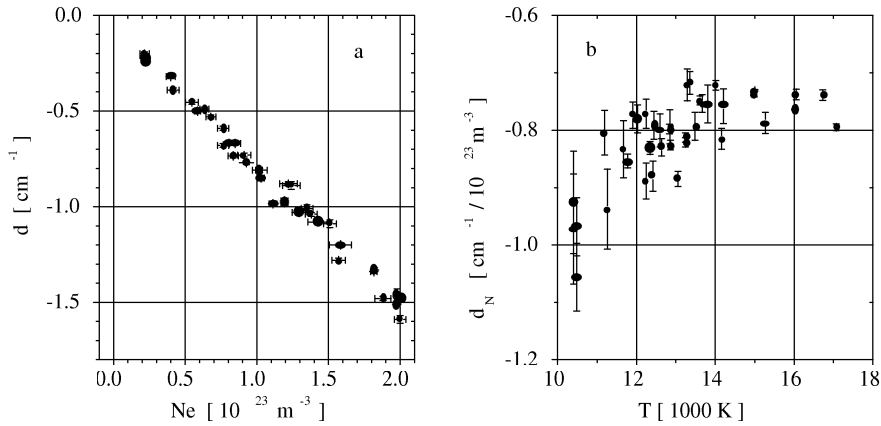
La spectroscopie laser de type PC-DFWM est une méthode parfaitement adaptée à l'étude des profils de raie : nous l'avons appliquée à la mesure des paramètres Stark de la transition  $4s[3/2]^0 - 4p'[1/2]$  d'ArI à 696.543 nm, dans un plasma d'arc électrique éclatant dans l'argon à pression atmosphérique.

Pour cela, l'élargissement et le déplacement de la raie sont déterminés à partir des signaux de PC-DFWM enregistrés aux basses intensités laser (pour minimiser un éventuel effet d'élargissement de puissance), alors que le diagnostic du plasma est réalisé simultanément par PC-DFWM à forte intensité laser [Cf. Sections précédentes].

Le spectre de PC-DFWM à basse intensité laser, est enregistré simultanément avec celui de la cathode creuse à différentes distances  $h$  de la pointe cathodique, puis ajusté à un profil lorentzien élevé au cube, conformément à la théorie [Cf. Figure 4.11]. Le déplacement Stark  $d$  de la raie est ainsi déterminé avec une incertitude inférieure à  $0.01\text{cm}^{-1}$ , comme l'écart entre la fréquence de résonance  $\nu_0$  de la raie et la fréquence  $\nu_{HC}$  correspondant au maximum du signal de la cathode creuse. La Figure 4.12a montre les valeurs de  $d$  déterminées dans différentes régions de la colonne de plasma comme une fonction de la densité électronique, tandis que la Figure 4.12b présente ces mêmes déplacements  $d_n$  normalisés à  $N_e^0 = 10^{23}\text{m}^{-3}$  en fonction de la température. Toutes les données en dessous de 12000K correspondent à la région périphérique du plasma (à au moins 1.5mm de l'axe de la colonne!) où l'état d'ETL du plasma peut s'avérer douteux, de sorte que le changement significatif de  $d_n$  y est très certainement uniquement lié à une sous-estimation des densités électroniques.



**Fig. 4.11** : Profils spectraux du signal de PC-DFWM enregistrés à basse intensité laser sur l'axe de la colonne, mesurés à différentes distances  $h$  de la pointe cathodique [ • Points expérimentaux et ajustage numérique (Cf texte) ; ligne : Signal de la cathode creuse ]



**Fig. 4.12** : Déplacement Stark  $d$  en fonction de la densité électronique  $N_e$  (a) et déplacement Stark  $d_n$  normalisés à  $N_e^0 = 10^{23} \text{m}^{-3}$  en fonction de la température  $T_e$  (b)

À la différence des déplacements Stark, les élargissements des raies sont sensibles à l'intensité du laser (même si elle reste faible!), et leur détermination nécessite tout d'abord de réaliser quelques mesures à différentes intensités laser, de façon à obtenir la largeur Stark non perturbée par extrapolation des résultats expérimentaux à intensité laser nulle.

La principale incertitude de la méthode proposée, est liée aux résultats du diagnostics du plasma, tandis que la dispersion relativement importante de nos paramètres Stark est certainement liée aux fluctuations spatiale et temporelle du plasma, qui ne peuvent pas être observées par la Spectroscopie Optique d'Emission classique. Notamment, nous obtenons des paramètres Stark généralement plus élevés que ceux obtenus dans d'autres expériences.

### 4.3.5 Conclusions

La **spectroscopie par Mélange 4 Ondes Dégénéré avec Conjugaison de Phase** (PC-DFWM) a été employée d'une part pour diagnostiquer un plasma d'argon en équilibre thermodynamique local [Cf. Section Cf. Section 4.3.2, page 33], mais aussi pour y étudier l'élargissement et le déplacement Stark de la raie à 696.543nm d'ArI [Cf. Section 4.3.4, page 39]. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus SOE, montre que, dans la limite des incertitudes, les deux méthodes donnent des résultats similaires.

Il en résulte que

- Le modèle semi-empirique du PC-DFWM qui a été développé, est parfaitement applicable aux plasmas thermiques, et a été validé expérimentalement ;
- Les écarts à l'ETL observés par spectroscopie optique d'émission au voisinage de la pointe cathodique et dans les régions périphériques d'un arc électrique éclatant dans l'argon, ont été confirmés indépendamment en utilisant la méthode de PC-DFWM ;
- La méthode expérimentale de diagnostic des milieux plasmagènes par PC-DFWM s'est révélée très puissante, notamment du fait de l'importante résolution spatiale et temporelle que l'on peut atteindre ;
- Le PC-DFWM comme méthode (quasi-)insensible à l'effet Doppler, semble un outil idéal pour étudier les profils de raies dans les milieux plasmagènes.

En fin de compte, il est clair que la méthode de PC-DFWM, est un excellent outil pour l'étude des plasmas.



# Chapitre 5

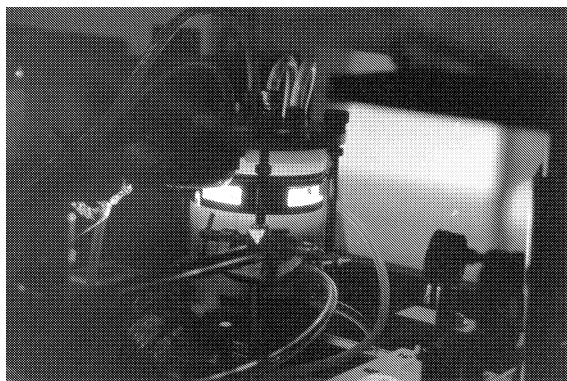
## Perspectives

La plupart des travaux présentés dans ce mémoire résulte d'une longue et fructueuse collaboration avec l'équipe PHOTONIC de Cracovie (Pologne). Celle-ci devrait se prolonger encore de nombreuses années, eu égard aux travaux en cours, et qu'il reste à 'achever'...

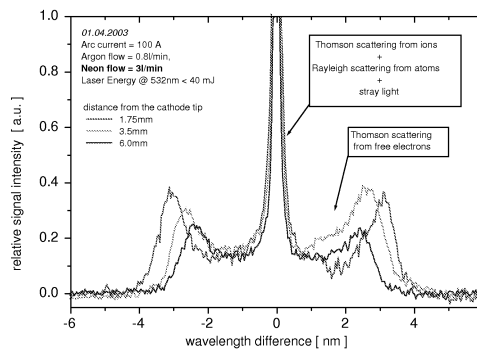
1. La **spectroscopie par Mélange 4 Ondes Dégénéré avec Conjugaison de Phase (PC-DFWM)** est un excellent outil pour l'étude des plasmas, particulièrement intéressant pour la détermination des paramètres Stark des raies spectrales, notamment pour les éléments présentant un important élargissement Doppler. Cependant, il est nécessaire de la coupler à une méthode expérimentale indépendante du modèle de plasma pour pouvoir corrélérer les élargissements et déplacements Stark aux paramètres du plasma (température et densité électroniques).

Pour cela, nous avons initié une nouvelle expérience dans laquelle le PC-DFWM serait employé pour déterminer le profil des raies spectrales, tandis que la diffusion Thomson serait utilisée pour déterminer directement les valeurs de température et la densité électronique dans le plasma. A ce jour, le dispositif expérimental a été adapté à l'enregistrement simultanée du PC-DFWM et de la diffusion Thomson, puis testé avec succès dans divers gaz (Argon, Néon, Hélium...) [Cf. Figure 5.1].

Ces résultats préliminaires permettent d'envisager un certains nombres de perspectives à plus ou moins long terme :



Fonctionnement de l'arc en Néon pur



Premiers résultats

**Fig. 5.1** : Diffusion Thomson



- L'étude de l'asymétrie des raies spectrales (notamment celle de la raie 430.001nm d'ArI, sujet 'historique!'). Dans cette optique, de nouveaux contacts ont été établis avec l'équipe de physique atomique théorique de Opole (Pologne), qui pourra nous apporter ses connaissances en ce domaine.
  - L'étude des fluctuations spatio-temporelles et/ou de l'asymétrie des colonnes de plasma, notamment au voisinage de la pointe cathodique de l'arc électrique, qui pourrait par ailleurs apporter d'intéressantes informations sur le comportement des plasmas de soudage.
  - Le diagnostic des filaments de plasma à haute pression obtenus par décharge continue à faible intensité dans les gaz rares (argon, néon, krypton, xénon), notamment pour déterminer les coefficients d'ionisation du niveau fondamental et des niveaux métastables [Cf. Section 3.2, page 25]. Ces données sont nécessaires pour la validation de modèle collisionnel-radiatif développé par exemple pour l'étude des propulseurs ioniques. Une collaboration avec M. K.KATSONIS du LPGP (Orsay) est envisagée sur ce thème.
  - La détermination des valeurs locales de températures et de densités reste une étape nécessaire pour améliorer l'efficacité des dispositifs de type GLIDARC. Or, actuellement, leur diagnostic a été réalisé uniquement par les méthodes d'émission. A terme, nous souhaiterions appliquer la technique du PC-DFWM couplée à la diffusion Thomson au diagnostic de ce type de plasma, en particulier par utilisation des bandes moléculaires (OH, N<sub>2</sub>, ....) dans l'UV (entre 300 et 400nm).
2. En parallèle, le travail sur les **procédés de soudage** doit être prolongé, notamment afin de valoriser notre collaboration avec AIR LIQUIDE WELDING [Cf. Section 2.2, page 15] : la question posée sur l'impossibilité de passer en mode de pulvérisation axiale dans un mélange de gaz avec une forte proportion de dioxyde de carbone semble sur le point d'être résolue, même si la solution technologique qui pourra y être apportée n'est pas triviale. Néanmoins, les résultats que nous avons obtenus devraient permettre d'étendre l'étude à l'utilisation de fils fourrés, afin de comprendre les mécanismes déterminants pour le choix des éléments à utiliser.

Restent quelques questions en suspend, notamment sur l'amorçage de l'arc ou sur la possibilité d'appliquer les outils de l'analyse de signal à la détection des défauts du procédé.

3. Les plasmas de type Arc Glissant, à la fois fortement hors d'équilibre, instationnaires et asymétriques, ont montré toutes leur potentialité pour le traitement des rejets gazeux, mais aussi pour la formation de radicaux spécifiques, utiles notamment dans l'industrie pétrolière. Leur étude, et plus généralement celle des **décharges à pression atmosphérique** n'est pas une thématique prioritaire du LASP, et sera mise en sommeil, notamment quant à son application aux problèmes de traitements des effluents gazeux.

Néanmoins, dans le cadre de **collaborations internationales**, nous tentons actuellement de développer un système de d'allumage de gaz par plasma pour moteur automobile. Ce programme est déjà bien engagé avec l'Université technique de Iasi (Roumanie), mettant à profit nos connaissances complémentaires en diagnostic des plasmas et en électrotechnique ;

# Annexe A

## Curriculum Vitae

**Nom :** PELLERIN  
**Prénoms :** Stéphane, René, Auguste  
**Date et Lieu de naissance :** 05 mai 1964, Paris XIV<sup>o</sup>  
**Situation familiale :** Marié, 3 enfants  
**Service national :** Effectué du 01/12/1989 au 30/11/1990  
**Adresse :** 15 allée des Mésanges, F18220 Rians  
**Fonction :** Maître de conférences (62<sup>o</sup> section de CNU)  
**Etablissement :** Université d'Orléans  
Centre Universitaire de Bourges, IAS<sub>EP</sub>  
Rue Gaston Berger, BP 4043  
F18028 Bourges cedex (France)  
Tél : 02 48 27 27 46 Fax : 02 48 70 75 41  
Email : stephane.pellerin@univ-orleans.fr

### Formation

- 1994** Doctorat de Physique, à Orléans  
Etude de la région cathodique d'un arc soufflé. Déterminations des probabilités de transition et élargissements Stark de raies d'argon II  
sous la direction de M. le Prof.J.CHAPELLE
- 1988** DEA de Physique des Gaz et des Plasmas, à Orléans  
Diagnostic d'un plasma d'arc transféré et Introduction à l'étude de la raie 4300.10A d'Al  
sous la direction de M. le Prof.J.CHAPELLE
- 1987** Maîtrise de Physique, à Orléans  
**1985** Licence de Physique, à Orléans  
**1884** DEUG A - option Physique-Chimie à Orléans  
**1982** Baccalauréat série C, à Dreux

### Fonctions dans l'enseignement

- Février 1999** Maître de Conférences (62<sup>o</sup> Section)  
à l'antenne de Bourges de l'Université d'Orléans
- 1995-1998** Vacataire de l'Université d'Orléans  
(Licence et Maîtrise de Physique, IUT GIM Chartres)
- 10/93-08/94** Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (62<sup>o</sup> Section)  
à l'antenne de Bourges de l'Université d'Orléans



## Annexe B

# Collaborations

### B.1 Collaborations nationales

Je dois à M. le Professeur J. CHAPELLE de m'avoir mis en contact avec de nombreux enseignants-chercheurs et industriels, entre la fin de ma thèse et mon recrutement comme maître de conférences à Bourges. C'est ainsi que j'ai travaillé sur plusieurs contrats avec EDF-RENARDIÈRES, EDF-CHATOUX, ELF-ATOCHEM et la SAGEM.

Aujourd'hui, je gère un contrat de trois ans avec AIR LIQUIDE WELDING, sur les effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG, et qui a donné lieu à la thèse en cotutelle de Melle S. ZIELINSKA (Université Jagellonne de Cracovie, Pologne).

J'ai également pu nouer des collaborations

- Avec l'équipe du Professeur M. DUDECK, du laboratoire d'Aérodynamique (CNRS, Orléans), sur le diagnostic par spectroscopie moléculaire des plasmas de rentrée atmosphérique ;
- Avec l'équipe du Professeur D. MORVAN, de l'ENSCP, sur le diagnostic d'une torche RF pour l'hydrogénation du silicium, dans le cadre du travail de thèse de M. F. BOURG ;
- Avec K. KATSONIS, du LPGP (Orsay), sur le diagnostic d'un propulseur SPT-50 fonctionnant dans l'argon, au Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas (Ecole Polytechnique, Palaiseau). Nous espérons que ce travail, qui devrait être réalisé en coopération avec K. DZIERZEGA de Cracovie, sera soutenu par un PAI POLONIUM.

Enfin, au cours de ces dernières années, j'ai pu participer :

- au club *"Arc électrique"* de EDF ;
- à l'ARC-CNRS-Ecodev *"Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets et au recyclage"*, sur la destruction des molécules de type CFC dans un arc transféré (application au  $CF_4$  et au  $CF_2Cl_2$ ).
- aux Journées d'études sur les *"Fluctuations des arcs électriques dans les plasmatrons"* : Les fluctuations dans les sources de plasmas peuvent être d'origines variées (piéd d'arc, turbulences...), et apportent toujours une contrainte supplémentaire aux expérimentateurs. Leur étude est nécessaire pour acquérir une compréhension des phénomènes mis en jeu. L'objectif de ces journées d'études est de favoriser une connaissance réciproque des diverses études engagées, et de permettre des échanges scientifiques et une réflexion pour une démarche plus globale.

### B.2 Collaborations internationales

La collaboration que nous avons établie avec le groupe PHOTONIC de l'Université Jagellonne de Cracovie (Pologne), et qui a été concrétisée récemment par les signatures d'un accord bi-

latéral ERASMUS-SOCRATES entre les Universités d'Orléans et de Cracovie, et d'un Accord de Coopération entre nos deux équipes, mais également par démarrage d'une thèse en cotutelle, nous a permis d'obtenir 3 Projets d'Actions Intégrés PAI POLONIUM (1999, 2000-2001 et 2003), ainsi qu'un soutien de la Région Centre qui a attribué une bourse post-doctorale à un chercheur de Cracovie.

D'autres collaborations, plus ponctuelles, existent également avec J.KOULIDIATI de la Faculté de Sciences et Techniques de Ouagadougou (Burkina Faso) et avec H.NASSAR (FSP - Université Libanaise), respectivement sur l'application des décharges à pression atmosphérique de type GLIDARC et sur la spectroscopie moléculaire.

Depuis 2002, un nouvel axe de collaboration a été mis en place, avec M. B.HNATIUC de l'Université Technique "Asachi" de Iasi (Roumanie). Il est soutenu par un Projet d'Action Intégrée PAI BRANCUSI. Par ailleurs, nous avons obtenu, pour cette collaboration, une bourse post-doctorale de 10 mois par l'Agence Universitaire pour la Francophonie.

### B.3 Encadrement de travaux de recherche

Une grande partie des résultats présentés dans ce manuscrit, a été obtenue au travers de divers stages de recherche [Cf. Annexe E.6, page 67]. Ainsi, depuis ma nomination à Bourges, j'ai pu encadrer deux stages post-doctoraux, deux stages de DEA/DESS et huit stages de maîtrises (Physique(Orléans), Technologie Mécanique ou Sciences de la Production Industrielle (Bourges)) ou d'école d'Ingénieur (ENSI Bourges).

Depuis le 01/10/2002, je suis titulaire du contrat d'encadrement doctoral, et, avec l'autorisation du Président de l'Université d'Orléans, je co-encadre deux thèses :

- l'une en co-tutelle avec l'Université Jagellonne, portant sur les *Phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG*, financée par AIR LIQUIDE WELDING [S.ZIELINSKA ; Directeurs de Thèse : CH. DE IZARRA & S.PELLERIN - K.MUSIOL]
- l'autre sur l'*Etude de filaments de plasma à haute pression dans les gaz rares* [E.SAVIGNON ; Directeurs de Thèse : M. PENNANEAC'H & S.PELLERIN]

J'ai également assisté M. L.BRATASZ lors de stages qu'il a passés à Bourges pour achever sa thèse : *"Application de la méthode de Mélange 4 Ondes au diagnostic des plasmas d'arc"*, soutenue le 22/05/02 à l'Université Jagellonne de Cracovie (Pologne).

Actuellement, ce travail se poursuit par une nouvelle thèse encadrée par le Prof. K.MUSIOL : *"Mise en oeuvre simultanée de techniques de Mélange 4 Ondes Dégénéré et de Diffusion Thomson pour le diagnostic de milieux plasmagènes complexes"*, par W.ZAWADZKI, en stage à Bourges du 15 septembre au 31 octobre 2003, puis pour 2 mois en 2004 sur une bourse du Conseil Scientifique de l'Université d'Orléans.

## Annexe C

# Diffusion de la culture scientifique

### C.1 Organisation de rencontres scientifiques ; FraPol

Avec l'équipe PHOTONIC de Cracovie, nous nous sommes fortement investis dans l'organisation des «*Séminaires Franco-Polonais sur les plasmas thermiques dans l'espace et en laboratoire*» dont les objectifs sont les suivants : effectuer un bilan des coopérations existantes entre la France et la Pologne dans le cadre très général des plasmas froids, et présenter les résultats essentiels ; présenter des coopérations structurées dans ce domaine ; promouvoir une connaissance réciproque des domaines de compétence ; et examiner le champ de nouvelles coopérations et les différents cadres possibles (CNRS, KBN, Ambassade de France, Programmes Intercommunautaires...). Ces séminaires thématiques de 3 jours, doivent permettre d'accroître les échanges scientifiques entre la France et la Pologne dans le domaine des plasmas froids, allant de la physique fondamentale aux applications technologiques, et d'examiner les perspectives.

Après avoir co-organisé le second Séminaire (**FraPol02**) à Cracovie, du 19 au 22 juillet 1999, et aidé à l'organisation de **FraPol03** à Varsovie les 24-27 septembre 2001, j'ai pris en charge l'organisation de **FraPol04** à Bourges, du 16 au 19 juin 2003 : à cette occasion, nous avons accueilli plus de 60 participants, dont à peu près la moitié de collègues polonais.

J'ai également fait partie du Comité d'Organisation du congrès '**PAMO-JSM 2002**' de la Société Française de Physique, à Bourges (France), du 01 au 04 juillet 2002

### C.2 Promotion des sciences

Parallèlement à mes différentes activités d'enseignement et de recherche, depuis mon recrutement à la Faculté des Sciences-Site de Bourges (en février 1999), sous l'impulsion du Prof. Charles DE IZARRA, nous nous investissons dans la diffusion de la culture scientifique et la promotion de la Physique-Chimie, notamment en milieu scolaire, pour lutter à notre niveau contre la désaffection des (plus) jeunes pour les Sciences :

- Intervention en milieu scolaire (Maternelle à Lycée) pour la promotion des Sciences ;
- Aide à la réalisations de TPE et TIPE en Premières, Terminales et Classes Préparatoires ;
- Participations aux Fêtes de la Sciences (en France et en Pologne) et à différents Forum et expositions ;

Cette activité est très stimulante, et implique une constante remise en question : je souhaite la faire perdurer, notamment en pérennisant les échanges avec Cracovie aux moments des Fêtes de la Science respectives, en France et en Pologne.



## Annexe D

# Activités d'enseignement

### D.1 1992-1994 : ATER (62° section)

Mon statut durant ma thèse (d'Octobre 1988 à Octobre 1994) ne m'a pas permis d'être Moniteur. En effet, devant effectuer mon Service National (01/12/1989-30/11/1990), je n'ai pu bénéficier d'une allocation de recherche, et ai dû financer mes premières années de thèse par divers travaux occasionnels.

D'octobre 1992 à août 1994, j'ai obtenu un poste d'ATER (62° Section) à l'antenne de Bourges de l'Université d'Orléans. J'étais chargé de Travaux Pratiques et Travaux Dirigés de Physique et d'Electronique en DEUG A1, ainsi que des Travaux Pratique de Licence (Mécanique et Electronique) de Technologie Mécanique. A ce titre, j'ai participé à l'élaboration et à la mise en place de nouveaux postes de TP (DEUG et Licence), et ai rédigé deux polycopiés, destinés à la préparation des travaux dirigés et des **travaux pratiques d'électronique et d'électrotechnique** dont j'avais la charge.

Outre ces TD et TP d'électronique de DEUG et de Licence, j'avais à encadrer deux groupes d'une vingtaine d'étudiants de **DEUG A1**, dans le cadre de **Travaux Pratiques de Physique Générale**, et l'ensemble des étudiants de **Licence de Technologie Mécanique**, dans le cadre de **TP de Mécanique Lagrangienne**.

### D.2 1995-1998 : Vacataire de l'Université d'Orléans

Durant la période suivante, alors que j'étais rémunéré par des contrats industriels, j'ai assuré des **TP d'Electronique en Licence de Physique**, à l'Université d'Orléans, ainsi que des **TP d'Expérimentations en Maîtrise de Physique** : il s'agissait d'accueillir des étudiants au laboratoire, pour les initier à la recherche en les faisant manipuler sur les torches à plasma et les dispositifs de diagnostic optiques, acquérir puis dépouiller des données expérimentales.

J'ai également assuré des **TP/TD d'Electronique et Electrotechnique en licence de Technologie Mécanique**, à l'antenne de Bourges de l'Université d'Orléans, et des **TP de Thermodynamique**, en 2<sup>ème</sup> année d'IUT 'Génie Industriel et Maintenance' (Chartres) après avoir participé à leur élaboration.

Durant cette période, j'ai co-encadré quelques stagiaires de la Maîtrise de Physique et d'IUT, ainsi qu'un stage du DEA "Energétique" d'Orléans [*"Caractérisation expérimentale de plasmas hors équilibre par spectroscopie d'émission"*, T.RENAULT, Février-Septembre 1998].

Enfin, j'ai également donné quelques séminaires de vulgarisation sur les plasmas et leurs utilisations en chimie dans le cadre du club STERRAD FRANCE.



Le STERRAD, de JOHNSON & JOHNSON MÉDICAL, est un dispositif de stérilisation médicale utilisant un plasma R.F. basse-pression de  $H_2O_2$ . Ce dispositif est utilisé dans de nombreux hôpitaux, par des techniciens qui n'ont aucune connaissance sur les plasmas. Il m'a donc été demandé d'assurer une mission de vulgarisation scientifique sur les plasmas, leur utilisation et les processus mis en jeu dans le STERRAD, auprès des utilisateurs du STERRAD.

Suite à ces séminaires, j'ai été contacté par une revue médicale [*Décision Santé*] pour écrire deux articles de vulgarisation sur ce même sujet.

### D.3 Depuis 1999 : Maître de Conférences (62<sup>o</sup> section)

J'ai été recruté en février 1999 sur un poste de Maître de Conférences en 62<sup>o</sup> section, à la Faculté des Sciences-Site de Bourges de l'Université d'Orléans, avec rattachement au LASEP, puis titularisé le 01 février 2000.

#### D.3.1 Charges administratives

Je me suis impliqué dans les charges administratives au Centre Universitaire de Bourges :

- Président de Jury des Maîtrises TM & SPI;
- Chargé des Emplois du Temps des Licences et Maîtrises TM & SPI;
- Chargé de l'organisation des Séminaires, pour les Maîtrises TM & SPI (chaque semaine entre janvier et mars);
- Chargé de TP des Licences TM & SPI (Mécanique et Electronique), et des Maîtrises TM & SPI (Ondes et Vibrations, Thermodynamique, Capteurs et Mesure);
- Chargé de la gestion du Site WEB de la Faculté des Sciences-Site de Bourges, et de celui du Laboratoire associé (le LASEP);

Profitant des relations que j'ai pu établir avec la Pologne, et tout spécialement avec Cracovie, j'ai participé à l'extension des coopérations existantes aux enseignants, étudiants et techniciens, dans le cadre des **programmes d'échanges ERASMUS/SOCRATES**. A cet égard, plusieurs étudiants de Bourges ont pu aller effectuer stage ou formation à Cracovie, et un Accord de Coopération entre l'Université Jagellonne et l'Université d'Orléans vient d'être signé, avec une reconnaissance automatique des niveaux européens.

Par ailleurs, dans le cadre du **XI<sup>ème</sup> plan**, j'ai pris en partie en charge les appels d'offres, d'une part pour le renouvellement des équipements existants en Physique et Chimie de premier cycle, et d'autre part pour l'achat du matériel nécessaire à la mise en place des TP de physico-chimie du second cycle "Sciences de la Production Industrielle" (*Parc informatique, Equipement de Métrologie Electronique, Mécanique vibratoire et Mécanique des fluides, Thermiques, Acoustique, Mesures Physiques, EEA, Informatique industrielle, Physico-chimie, Laser YAG/Colorant et équipement...*)

Actuellement, dans le cadre des nouvelles demandes d'habilitations à la Faculté des Sciences-Site de Bourges de l'Université d'Orléans, et du passage au LMD, nous avons pris en charge, avec Mme Nadia PELLERIN, la **responsabilité de la mention "Physique (Centre Universitaire de Bourges)"**, avec ses trois spécialités : "*Technologie Mécanique*" (TM), "*Sciences de la Production Industrielle*" (SPI) et "*Physique Appliquée au Milieu de Vie et à l'Habitat*" (PMVH).

#### D.3.2 Enseignements

Depuis février 1999, j'ai assuré divers enseignements :

- **Cours/TD d'Optique Physique (DEUG 2 - SM & MIAS)**;
- **TD de Mécanique (DEUG 1 - SM & MIAS)**;

- **TD de Mécanique (DEUG 2 - SM & MIAS)** ;
- **TD Mécanique vibratoire (Licences-Maîtrises TM & SPI)** ;
- **TP Propagation d'ondes (Licences-Maîtrises TM & SPI)** ;
- **Cours/TD/TP d'Electronique-Electrotechnique (Licences TM & SPI)**, pour lequel j'ai rédigé un **polycopié de cours et TD** ;
- **TP-Projet d'Informatique Industrielle (Maîtrises TM & SPI)** ;

ainsi qu'un des thèmes de l'enseignement d'**Energétique (Plasmas et applications industrielles)** pour les **Maîtrises TM & SPI**.

J'assure également le **Stage d'Intégration de 2 semaines**, correspondant à 60 Heures équivalent TD, qui est organisé à l'entrée des **Licences** à la Faculté des Sciences-Site de Bourges. Au cours de ce stage, sont revues les notions nécessaires pour assimiler sans difficultés le programme académique des Licences-Maîtrises TM & SPI.

Durant l'été 2000, dans le cadre du XI<sup>ème</sup> et de l'ouverture du second cycle "Sciences de la Production Industrielle", j'ai **mis en place un certain nombre de travaux pratiques** dans diverses disciplines, **avec rédaction des polycopiés de TP/Cours** correspondants : *Equation d'état des gaz parfaits, Viscosimètre tournant et Viscosimètre à chute de bille, Portance et Traînée, Vitesse de groupe et vitesse de phase des ultrasons dans les liquides, Spectroscopie Infra-Rouge à Transformée de Fourier, Etude du transformateur monophasé, Logiques combinatoire et séquentielle, Compteur numérique, Filtrage numérique, Régulation de vitesse/Carte d'interfaçage PC-Mes2, Interface IEEE, Environnement de programmation graphique LabView, Conductivités électrique et thermique des métaux, Effets thermoélectriques....*



## Annexe E

# Travaux et Publications

- Co-auteur de 51 articles : 26 originaux et 25 faisant suite à une conférence ;
- Co-auteur de 58 actes de conférences, dont 18 avec comité de lecture ;
- 61 communications orales et séminaires, dont 29 dans des rencontres internationales ;
- Auteur de 2 articles de vulgarisation scientifique ;
- Auteur de deux ouvrages (Thèse et rapport de DEA) ;
- Auteur de plusieurs photocopiés pour l'enseignement ;
- Co-auteur de 22 rapports et/ou bilans ;
- Co-inventeur d'un brevet européen ;
  
- Referee pour les journaux suivants :
  - Canadian Journal of Physic ;
  - Journal of Physics D : Applied Physics ;
  - High Temperature Material Processes : an International Journal ;

La liste de Travaux et Publications suivante<sup>1</sup>, est classée par ordre anti-chronologique.

Les Travaux qui apparaissent plusieurs fois ne sont pas numérotés, mais une flèche (↑) indique leur première classification.

La classification est faite comme suit :

- P Publication dans un journal avec rapporteur(s) ;
- Pc Publication avec rapporteur(s) faisant suite à une conférence  
et publiée sur un support différent des actes de la conférence ;
- Cc,C Actes de conférence respectivement avec ou sans rapporteur(s) ;
- A Article dans une revue sans rapporteur ;
- B Brevet ;
- R Rapport ;
- O Ouvrage ;
- E Enseignement ;
- Es Encadrement de stage ;
- S Communication orale ou séminaire sur mes travaux ;

7 publications sont jointes à ce manuscrit : elles sont repérées par le symbole ⊗.

---

<sup>1</sup> Version du 11/01/2004

## E.1 Publications

### E.1.1 Publications originales

P.26 ⊗	Stark width and shift measurements for the 696.543nm ArI line using degenerate four-wave mixing (DFWM) spectroscopy K.Dzierzêga, L.Bratasz, S.Pellerin, B.Pokrzywka & K.Musiol <i>Physica Scripta</i> <b>67</b> -1 (2003) 52-58
P.25 ⊗	Spectroscopic diagnostic of an argon-hydrogen RF inductive thermal plasma torch at atmospheric pressure used for silicon hydrogenation F.Bourg, S.Pellerin, D.Morvan, J.Amouroux & J.Chapelle <i>J.Phys.D</i> <b>35</b> -18 (2002) 2281-2290
P.24	Study of an argon-hydrogen RF inductive thermal plasma torch used for silicon deposition by optical emission spectroscopy F.Bourg, S.Pellerin, D.Morvan, J.Amouroux & J.Chapelle <i>Solar Energy Mat. &amp; Solar Cells</i> <b>72</b> -1,4 (2002) 361-371
P.23	Atomic recombination and energy balance in a decaying column of hot hydrogen gas J.Stevelfelt, S.Pellerin & J.Chapelle <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>5</b> -4 (2001) 501-515
P.22	Entry conditions in planetary atmospheres : Emission spectroscopy of molecular plasma arc-jets V.Lago, A.Lebéhot, S.Pellerin, T.Renault, P.Etchegut & M.Dudeck <i>J.Thermophysics and Heat Transfert</i> <b>15</b> -2 (2001) 168-175
P.21 ⊗	Heat string model of bi-dimensional DC Glidarc S.Pellerin, F.Richard, J.Chapelle, J.-M.Cormier & K.Musiol <i>J.Phys.D</i> <b>33</b> -19 (2000) 2407-2419
P.20	Rotational temperature measurements in atmospheric pulsed D.B.D. - Gas temperature and molecular fraction effects. O.Motret, C.Hibert, S.Pellerin & J.-M.Pouvesle <i>J.Phys.D</i> <b>33</b> -12 (2000) 1493-1498
P.19 ⊗	Experimental determination of the Ar III contribution to the continuum emission of argon at $\lambda=468.8\text{nm}$ B.Pokrzywka, S.Pellerin, K.Musiol & J.Chapelle <i>J.Phys.D</i> <b>32</b> -14 (1999) 1665-1670
P.18	Determination of electrical parameters of bi-dimensional DC Glidarc S.Pellerin, J.-M.Cormier, F.Richard, K.Musiol & J.Chapelle <i>J.Phys.D</i> <b>32</b> -8 (1999) 891-897
P.17 ⊗	Etude de la zone cathodique d'une d'un arc électrique B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, E.Pawelec, J.-M.Cormier & J.Chapelle <i>C.-R. Acad.Sci.Paris</i> <b>t.327</b> Série II.b (1999) 391-398
P.16	H <sub>2</sub> S destruction in 50Hz and 25 kHz gliding arc reactors V.Dalaine, J.-M.Cormier, S.Pellerin & P.Lefauchaux <i>J.App.Phys.</i> <b>84</b> -3 (1998) 1215-1221
P.15	Temperature determination using molecular spectra simulation S.Pellerin, J.Koulidiati, O.Motret, K.Musiol, M. de Graaf, B.Pokrzywka & J.Chapelle <i>High Temp.Mat.Proc.</i> <b>1</b> -4 (1997) 493-509
P.14 ⊗	Degenerate four-wave mixing in equilibrium argon arc plasma K.Musiol, K.Dzierzega, E.Pawelec, B.Pokrzywka, S.Pellerin & S.Labuz <i>J.Phys.D</i> ( <b>30</b> )- <b>24</b> (1997) 3346-3352
P.13	Spectroscopic characterization of CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub> plasmas excited by DBD at atmospheric pressure O.Motret, S.Pellerin, M.Nikravec, V.Massereau & J.-M.Pouvesle <i>Plasma Chem. Plasma Proc.</i> <b>17</b> -4 (1997) 393-407
P.12	Measurement of atomic parameters of many singly ionized argon lines - III. Stark broadening parameters S.Pellerin, K.Musiol & J.Chapelle <i>J.Q.S.R.T.</i> <b>57</b> -3 (1997) 377-393
P.11	Measurement of atomic parameters of many singly ionized argon lines - II. Transition probabilities S.Pellerin, K.Musiol, K.Dzierzega & J.Chapelle <i>J.Q.S.R.T.</i> <b>57</b> -3 (1997) 359-376
P.10	Measurement of atomic parameters of many singly ionized argon lines - I. Experimental process S.Pellerin, K.Musiol & J.Chapelle <i>J.Q.S.R.T.</i> <b>57</b> -3 (1997) 349-357
P.09 ⊗	Application of the (0,0) Swan band spectrum for temperature measurements S.Pellerin, K.Musiol, O.Motret, B.Pokrzywka & J.Chapelle <i>J.Phys.D</i> <b>29</b> -11 (1996) 2850-2865
P.08	Observations of electric arc cathode region B.Pokrzywka, S.Pellerin, K.Musiol, F.Richard & J.Chapelle <i>J.Phys.D</i> <b>29</b> -11 (1996) 2841-2849
P.07	Génération du radical hydroxyl par D.B.D. T.H.T. - Etude spectroscopique O.Motret, C.Hibert, S.Pellerin, M.Nikravec & J.-M.Pouvesle <i>C.-R. Acad.Sci.Paris</i> <b>t.323</b> , Série II.b (1996) 529-535

P.05	Spectroscopic investigation of equilibrium state in electric arc cathode region B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, E.Pawelec & J.Chapelle <i>J.Phys.D</i> <b>29</b> -10 (1996) 2644-2649
P.05	Stark width of the 696.5nm argon I S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka & J.Chapelle <i>J.Phys.B</i> <b>29</b> -17 (1996) 3911-3924
P.04	Spectroscopic diagnostic method using the OH band spectrum S.Pellerin, J.-M.Cormier, F.Richard, K.Musiol & J.Chapelle <i>J.Phys.D</i> <b>29</b> -3 (1996) 726-739
P.03	Physical study of gliding arc discharge F.Richard, J.-M.Cormier, S.Pellerin & J.Chapelle <i>J.App.Phys.</i> <b>79</b> -5 (1996) 2245-2250
P.02	Study of the cathodic zone of an electric arc S.Pellerin, B.Pokrzywka, K.Musiol & J.Chapelle <i>J.Phys.III France</i> <b>5</b> -12 (1995) 2029-2042
P.01	Investigation of a cathode region of an electric arc S.Pellerin, B.Pokrzywka, K.Musiol & J.Chapelle <i>J.Phys.D</i> <b>27</b> -3 (1994) 522-528

### E.1.2 Publications suite à une conférence, un séminaire...

Pc.25	Study of non-thermal ac arc A.Kaminska, J.-M.Cormier, S.Pellerin & O.Martinie, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>5</b> -3 (2001) 403-416
Pc.24	Analysis of some electrical discharge machining mechanisms N.Pellerin, S.Pellerin, L.Bratasz, K.Musiol, A.Miernikiewicz & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>5</b> -3 (2001) 423-438
Pc.23	Modelisation of an argon transferred arc with orifice anode E.Pawelec, B.Pokrzywka, C.Delalondre, S.Pellerin & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>5</b> -2 (2001) 229-242
Pc.22	Argon spectroscopic metrology S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, K.Dzierzega & J.Chapelle, <i>J.Technical Physics</i> <b>XL</b> -2 (1999) 73-82
Pc.21	Elements of analysis of electrical erosion mechanism N.Pellerin, S.Pellerin, A.Miernikiewicz, L.Bratasz, K.Musiol & J.Chapelle, <i>J.Technical Physics</i> <b>XL</b> -2 (1999) 83-88
Pc.20	Working and characterization of a gliding arc (Glidarc) S.Pellerin, J.-M.Cormier, K.Musiol, B.Pokrzywka & J.Chapelle, <i>J.Technical Physics</i> <b>XL</b> -2 (1999) 61-71
Pc.19	Study of the cathodic zone of an electric arc B.Pokrzywka, S.Pellerin, K.Musiol, K.Dzierzega, E.Pawelec & J.Chapelle, <i>J.Technical Physics</i> <b>XL</b> -2 (1999) 51-59
Pc.18	Thermal plasma diagnostics using degenerate four-wave mixing K.Musiol, K.Dzierzega, E.Pawelec, B.Pokrzywka, S.Pellerin & S.Labuz, <i>J.Technical Physics</i> <b>XL</b> -2 (1999) 89-96
Pc.17	Non equilibrium plasma diagnostic by molecular spectroscopy S.Pellerin, J.Koulidiati, V.Lago, M. de Graaf, Musiol, Pokrzywka, Cormier, Dudeck & Chapelle, <i>J.Technical Physics</i> <b>XL</b> -2 (1999) 103-112
Pc.16	Infra-red and visible optical emission spectroscopy in a CO <sub>2</sub> plasma flow T.Renault, S.Pellerin, V.Lago, W.Röck, J.Koulidiati, J.-M.Cormier, J.Chapelle & M.Dudeck, <i>"Rarefied Gas Dynamics - Vol.2"</i> Cepadues Ed., Toulouse, (1999) 425-432
Pc.15	Experimental investigation of breakdowns in gliding arc system A.Kaminska, S.Pellerin, B.Pokrzywka, J.-M.Cormier, O.Martinie & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>3</b> -2&3 (1999) 181-192
Pc.14	Back-breakdown phenomenon in low current discharge at atm. pressure in transversal flow S.Pellerin, O.Martinie, J.-M.Cormier, J.Chapelle & P.Lefauchaux, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>3</b> -2&3 (1999) 167-180
Pc.13	New interesting results on the electro-discharge machining A.Miernikiewicz, L.Bratasz, S.Pellerin, N.Pellerin, K.Musiol & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>3</b> -2&3 (1999) 193-211
Pc.12	Periodic light perturbation in an argon discharge at atmospheric pressure F.Richard, J.-M.Cormier, S.Pellerin, V.Dalaine & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>2</b> -1 (1998) 15-24

Pc.11	Spatial fluctuations of 'Gliding' arc S.Pellerin, J.-M.Cormier, K.Musiol, B.Pokrzywka, J.Koulidiati, F.Richard & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>2-1</b> (1998) 49-68
Pc.10	Gliding arcs fluctuations and arc root displacement F.Richard, J.-M.Cormier, S.Pellerin & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>1-2</b> (1997) 239-248
Pc.09	Description of some phenomena in electric arc cathode region S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, E.Pawelec, F.Richard, J.-M.Cormier & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>1-2</b> (1997) 249-261
Pc.08	Thermal condition control of an arc plasma CF <sub>4</sub> reactor : Swan band spectrum for temperature measurement S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, J.-M.Cormier & J.Chapelle, <i>J.High Temp.Mat.Proc.</i> <b>1-2</b> (1997) 273-285
Pc.07	(0,0) C <sub>2</sub> Swan band spectrum for temperature measurements S.Pellerin, K.Musiol, O.Motret, B.Pokrzywka & J.Chapelle, « <i>Progress in Plasma Processing of Materials 1997</i> » <i>Proc. of the 1vth ITPP Conf.</i> Ed. P.Fauchais, Begell House, Inc. (1997) 219-227
Pc.06	UV OH band spectrum for temperature measurements of non equilibrium plasmas S.Pellerin, K.Musiol, J.-M.Cormier, F.Richard & J.Chapelle, « <i>Progress in Plasma Processing of Materials 1997</i> » <i>Proc. of the 1vth ITPP Conf.</i> Ed. P.Fauchais, Begell House, Inc. (1997) 201-210
Pc.05	Spectroscopic investigation of equilibrium state in electric arc cathode region B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, E.Pawelec & J.Chapelle, « <i>Progress in Plasma Processing of Materials 1997</i> » <i>Proc. of the 1vth ITPP Conf.</i> Ed. P.Fauchais, Begell House, Inc. (1997) 273-280
Pc.04	Observations of the arc spot on the electric arc cathode surface B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, J.-M.Cormier & J.Chapelle, « <i>Progress in Plasma Processing of Materials 1997</i> » <i>Proc. of the 1vth ITPP Conf.</i> Ed. P.Fauchais, Begell House, Inc. (1997) 25-31
Pc.03	NO production in gliding arc discharge F.Richard, J.-M.Cormier, S.Pellerin, V.Dalaine & J.Chapelle, « <i>Progress in Plasma Processing of Materials 1997</i> » <i>Proc. of the 1vth ITPP Conf.</i> Ed. P.Fauchais, Begell House, Inc. (1997) 343-351
Pc.02	Mesure de la temp. Rotationelle de OH par spectroscopie UV dans une DBD THT impulsionnelle O.Motret, C.Hibert, M.Nikravech, S.Pellerin, R.Viladrosa & J.-M.Pouvesle, <i>An.Phys. Col.C1 S1/2-22</i> (1997) 129-130
Pc.01	Study of an electric arc in the vicinity of the cathode S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, J.Chapelle & A.Czernichowski, <i>J.High Temp.Chem.Proc.</i> <b>S3-1</b> (1992) 487-494

## E.2 Brevet

B.01	Procédé et dispositif de traitement par décharge électrique d'effluents organiques volatils gazeux S.Pellerin, J.Chapelle, F.Kassabji & al EDF Service National - Brevet Européen n°01949514.2-2113 - Déposé le 25 juin 2001
------	--

## E.3 Actes de conférences

### E.3.1 Avec comité de lecture

Cc.18	Influence of the applied gas on the arc shape in MIG-MAG welding S.Zielinska, S.Pellerin, K.Musiol, Ch. de Izarra & F.Briand 16th International Symposium on Plasma Chemistry Taormina (Italie) - 22/27 juin 2003 [Poster]
Cc.17	Optical emission spectroscopy and phase-conjugate degenerate four-wave mixing spectroscopy in investigation of thermal plasma K.Dzierzega, S.Zielinska, S.Pellerin, K.Musiol & Ch. de Izarra 16th International Symposium on Plasma Chemistry Taormina (Italie) - 22/27 juin 2003 [Poster]
Cc.16	Stark broadening and shift measurements in thermal arc plasma using DFWM method L.Bratasz, K.Dzierzega, K.Musiol & S.Pellerin Plasma'01 - International Symposium on Plasma Research and Applications Warsaw (Pologne) - 19/21 septembre 2001
Cc.15	Optical spectroscopic diagnostic of an Ar-H <sub>2</sub> RF inductive thermal plasma torch used for hydrogenation of silicon F.Bourg, D.Morvan, J.Amouroux, S.Pellerin & J.Chapelle 15th International Symposium on Plasma Chemistry Orléans (France) - 09/13 juillet 2001
Cc.14	Determination of working parameters of bi-dimensional DC Glidarc S.Pellerin, J.-M.Cormier, F.Richard, J.Chapelle, K.Musiol, C.de Izarra & F.Kassabji 14th International Symposium on Plasma Chemistry Prague (Czech Republic) - 02/06 août 1999 [Pe14 - Vol.II, pp.1009-1014]
Cc.13	The influence of butane on the production of NO <sub>x</sub> in an atmospheric plasma O.Martinie, J.-M.Cormier, S.Pellerin & P.Lefaucheux 24th International Conference on Phenomena in Ionized Gases Warsaw (Poland) - 11/16 juillet 1999 (Session 18)
Cc.12	OH(A) rotational temperature measurements in pulsed DBD : Influence of gas temperature and molecular ratio O.Motret, C.Hibert, S.Pellerin, I.Gaurand, M.Nikravetch, R.Viladrosa & J.-M.Pouvesle 24th International Conference on Phenomena in Ionized Gases Warsaw (Poland) - 11/16 juillet 1999 (Session 18)
Cc.11	Optical emission spectroscopic analysis of spacecraft plasma simulation in ground test facilities V.Lago, A.Lebéhot, S.Pellerin & M.Dudeck 3 <sup>o</sup> European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles Noordwijk (Pays Bas) - 24/26 novembre 1998
Cc.10	Destruction of NO by Atmospheric Low Current Discharge in N <sub>2</sub> - NO mixture O.Martinie, J.M.Cormier, S.Pellerin, V.Dalaine & J.Chapelle 5 <sup>o</sup> European Conference on Thermal Plasma Processes St Petersburg (Russie) - 13/16 Juillet 1998
Cc.09	Study and modelling of a 50Hz gliding discharge V.Dalaine, J.-M.Cormier, S.Pellerin & E.Hniatuc Optim'98 - 6th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments Brasov (Roumanie) - 14/15 mai 1998 [Vol.I, pp.161-166]
Cc.08	Investigation and modelling of a cold arc discharge. Chemistry applications S.Pellerin, J.-M.Cormier, J.Chapelle & F.Kassabji 13 <sup>o</sup> International Symposium on Plasma Chemistry Beijing (China) - 18/22 août 1997 [Vol.II, pp.813-818]
Cc.07	Phenomena in the electric arc cathode region B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, E.Pawelec, J.-M.Cormier & J.Chapelle 23rd International Conference on Phenomena in Ionized Gases Toulouse (France) - 17/22 juillet 1997 [Vol.II, pp.122-123]
Cc.06	Non-thermal plasma diagnostics by phase-conjugate degenerate four-wave mixing L.Bratasz, K.Dzierzega, K.Musiol, E.Pawelec, S.Pellerin & B.Pokrzywka 29th EGAS Conference Berlin (Allemagne) - 15/18 juillet 1997 [21C, pp.208-209]
Cc.05	Measurement of Biberman's x factor for ArIII at $\lambda=468.6\text{nm}$ B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin & J.Chapelle Plasma'97 - International Symposium on Plasma Research and Application Jarnoltowek (Pologne) - 10/12 juin 1997 [Vol.I, pp.461-464]
Cc.04	Plasma diagnostics by phase-conjugate degenerate four-wave mixing L.Bratasz, K.Dzierzega, K.Musiol, E.Pawelec, S.Pellerin & B.Pokrzywka Plasma'97 - International Symposium on Plasma Research and Application Jarnoltowek (Pologne) - 10/12 juin 1997 [Vol.I, pp.187-190]
Cc.03	OH production in a very high voltage dielectric barrier discharge O.Motret, C.Hibert, M.Nikravetch, S.Pellerin & J.-M.Pouvesle World Environmental Congress 1995 London (Canada) - 18/22 septembre 1995 [p.333]



Cc.02	Spectroscopic investigation of the near cathode region of an electric Arc S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka & J.Chapelle 2d International Conference on Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and their Applications Xi'an (Chine) - 25/29 mai 1993 [Vol.I, pp.96-100]
Cc.01	Investigation of a cathode region of an electric arc S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka & J.Chapelle X° International Conference on Gas Discharges and their applications (GD92) Swansea (England) - 13/18 septembre 1992 [Vol.I, pp.192-195]
↑ Pc.16	Infra-red and visible optical emission spectroscopy in a CO <sub>2</sub> plasma flow T.Renault, S.Pellerin, V.Lago, W.Röck, J.Koulidiati, J.-M.Cormier, J.Chapelle & M.Dudeck 21° International Symposium on Rarefied Gas Dynamics Marseille (France) - 26/31 Juillet 1998
↑ Pc.07	(0,0) C <sub>2</sub> Swan band spectrum for temperature measurements S.Pellerin, K.Musiol, O.Motret, B.Pokrzywka & J.Chapelle 4° European Conference on Thermal Plasma Processes Athènes (Grèce) - 15/17 Juillet 1996 [p.72]
↑ Pc.06	UV OH band spectrum for temperature measurement of non equilibrium plasmas S.Pellerin, K.Musiol, J.M.Cormier, F.Richard & J.Chapelle 4° European Conference on Thermal Plasma Processes - Athènes (Grèce) - 15/17 Juillet 1996 [p.70]
↑ Pc.05	Spectroscopic study of electric arc cathode region B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, E.Pawelec & J.Chapelle 4° European Conference on Thermal Plasma Processes Athènes (Grèce) - 15/17 Juillet 1996 [p.83]
↑ Pc.04	Observations of the arc spot on the electric arc cathode surface B.Pokrzywka, K.Musiol, S.Pellerin, J.-M.Cormier & J.Chapelle 4° European Conference on Thermal Plasma Processes Athènes (Grèce) - 15/17 Juillet 1996 [p.26]
↑ Pc.03	NO <sub>x</sub> production in gliding arc discharge F.Richard, J.M.Cormier, S.Pellerin & J.Chapelle 4° European Conference on Thermal Plasma Processes Athènes (Grèce) - 15/17 Juillet 1996 [p.41]
↑ Pc.01	Study of an electric arc in the vicinity of the cathode S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, J.Chapelle & A.Czernichowski 2d European Congress on Thermal Plasma Processes Gif-sur-Yvette/Paris (France) - 7/9 septembre 1992

### E.3.2 Sans comité de lecture

C.40	Collisional-Radiative type modeling and application in plasma diagnostics K.Katsonis, K.Dzierzega, S.Pellerin 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges, 16/19 juin 2003 [Conférence invitée]
C.39	Influence du gaz sur la forme de l'arc en soudage MIG-MAG S.Zielinska, K.Dzierzega, K.Musiol, S.Pellerin, C.De Izarra, F.Briand 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges, 16/19 juin 2003 [Communication orale]
C.38	Application of degenerate four-wave mixing (DFWM) laser spectroscopy in investigations of low-temperature plasmas K.Dzierzega, L.Bratasz, K.Musiol, S.Pellerin, J.Chapelle, B.Pokrzywka 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges, 16/19 juin 2003 [Communication orale]
C.37	Modélisation et diagnostic optiques des plasmas d'Argon et de Xénon dans un prototype SPT-50 A.Siskos, K.Katsonis, K.Dzierzega, S.Pellerin M.Tanguy 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges, 16/19 juin 2003 [Poster]
C.36	Système d'allumage par plasma pour moteur d'automobile B.Hnatiuc, S.Pellerin, J.Chapelle 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges, 16/19 juin 2003 [Poster]
C.35	Etude d'un filament de plasma à haute pression dans l'argon. Application à la détermination des coefficients d'ionisation du niveau fondamental et des niveaux métastables des atomes des gaz rares. E.Savignon, S.Pellerin, J.Chapelle, M.Pennaneac'h 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges, 16/19 juin 2003 [Poster]

C.34	Application of degenerate four-wave mixing (DFWM) laser spectroscopy in investigations of low-temperature plasma K.Dzierzega, S.Pellerin, B.Pokrzywka & K.Musiol Workshop on Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics V Villagio Cardigliano, Specchia (Italie), 3-7 April 2003
C.33	Etude d'un filament de plasma à haute pression dans l'argon. Application à la détermination des coefficients d'ionisation du niveau fondamental et des niveaux métastables des atomes des gaz rares E.Savignon, S.Pellerin & J.Chapelle Congrès 'PAMO-JSM 2002' de la Société Française de Physique Bourges (France), 01/04 juillet 2002 [p.118]
C.32	Mélange 4 ondes dégénéré à conjugaison de phase (PC-DFWM) dans un système à deux niveaux élargis, avec un réseau à une population dominante K.Dzierzega, L.Bratasz, S.Pellerin & K.Musiol Congrès 'PAMO-JSM 2002' de la Société Française de Physique Bourges (France), 01/04 juillet 2002 [p.117]
C.31	Mesures de l'élargissement et du déplacement Stark dans un plasma thermique, par mélange 4 ondes dégénéré (degenerate four wave mixing : DFWM) L.Bratasz, K.Dzierzega, S.Pellerin, B.Pokrzywka & K.Musiol Congrès 'PAMO-JSM 2002' de la Société Française de Physique Bourges (France), 01/04 juillet 2002 [p.116]
C.30	Application des spectres moléculaires superposés de $N_2$ et $N_2^+$ à la détermination des températures rotationnelle et vibrationnelle et du rapport $N_2^+/N_2$ S.Pellerin, H.Nassar, K.Musiol, O.Martinie & J.-M.Cormier Congrès 'PAMO-JSM 2002' de la Société Française de Physique Bourges (France), 01/04 juillet 2002 [p.115]
C.29	Phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG - MAG S.Zielinska, S.Pellerin, C. de Izarra, K.Musiol & F.Briand 3rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 24/27 septembre 2001 [p.27]
C.28	Application des spectres moléculaires superposés de $N_2$ et $N_2^+$ à la détermination des températures rotationnelle et vibrationnelle et du rapport $N_2^+/N_2$ S.Pellerin, H.Nassar, K.Musiol, O.Martinie & J.-M.Cormier 3rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 24/27 septembre 2001 [p.28]
C.27	Mesures des élargissements et déplacements Stark dans un plasma thermique en utilisant une méthode de Mélange Quatre Ondes Dégénérées (M4OD) L.Bratasz, K.Dzierzega, K.Musiol, B.Pokrzywka & S.Pellerin 3rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 24/27 septembre 2001 [p.16]
C.26	Diagnostic spectroscopique d'un plasma RF en mélange argon-hydrogène, utilisé pour l'hydrogénation du silicium F.Bourg, D.Morvan, J.Amouroux, S.Pellerin & J.Chapelle 3rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 24/27 septembre 2001 [p.34]
C.25	Arc glissant et Applications J.Chapelle & S.Pellerin 'La foudre en bouteille au service de l'électrotechnique', Journées Electrotechnique 2001 Toulouse (France), 15/16 mars 2001
C.24	Spectroscopie d'émission et diagnostic laser de type mélange quatre ondes; Application au diagnostic des plasmas d'arc K.Dzierzega, S.Pellerin & K.Musiol Congrès 'PAMO 2000' de la Société Française de Physique Lyon-Villeurbanne (France), 10/13 juillet 2000 [p.O31]
C.23	Experimental study of a gliding discharge at 33kHz and 50Hz J.-M.Cormier, P.Lefauchaux, S.Pellerin, O.Martinie & E.Hnatiuc Int.Conf.on Electrical Power and Engineering (E.P.E.'99) Technical university GH ASACHI, Iasi (Romania) - 4/6 Nov. 1999
C.22	Paramètres de fonctionnement d'un réacteur à arcs glissants S.Pellerin, F.Richard, J.-M.Cormier, J.Chapelle & K.Musiol 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [p.73]
C.21	Diagnostic de la région cathodique d'un arc électrique éclatant dans l'argon par spectroscopie d'émission et mélange quatre ondes M.Lukomski, K.Dzierzega, K.Musiol, B.Pokrzywka & S.Pellerin 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [p.53]
C.20	Spectroscopie d'émission et diagnostic laser de type mélange quatre ondes - Application au diagnostic des plasmas d'arc K.Dzierzega & S.Pellerin 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [p.43]
C.19	Décharge glissante dans différents gaz : Interaction avec le circuit d'alimentation A.Kaminska, S.Pellerin, B.Pokrzywka, J.-M.Cormier & J.Chapelle 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [p.31]

C.18	Propriétés du plasma se formant autour d'une sonde spatiale traversant l'atmosphère de mars V.Lago, A.Lebehot, A.Schönemann, M.Dudeck & S.Pellerin VI <sup>e</sup> Congrès 'Plasmas' de la Société Française de Physique Orléans (France) - 7/9 avril 1999 [p.105]
C.17	Diagnostic d'un plasma d'argon par spectroscopie d'émission et Mélange quatre ondes L.Bratasz, K.Dzierzega, K.Musiol, E.Pawelec, S.Pellerin, B.Pokrzywka & J.Chapelle VI <sup>e</sup> Congrès 'Plasmas' de la Société Française de Physique Orléans (France) - 7/9 avril 1999 [p.68]
C.16	Erosion par plasma : Effets sur les électrodes N.Pellerin, L.Bratasz, A.Miernikiewicz, K.Musiol, S.Pellerin & J.Chapelle VI <sup>e</sup> Congrès 'Plasmas' de la Société Française de Physique Orléans (France) - 7/9 avril 1999 [p.48]
C.15	Influence des paramètres expérimentaux sur la temp. rotationnelle du radical hydroxyl dans un plasma froid C.Hibert, O.Motret, S.Pellerin, I.Gaurand, M.Nikravetch, R.Viladrosa & J.-M.Pouvesle VI <sup>e</sup> Congrès 'Plasmas' de la Société Française de Physique - Orléans (France) - 7/9 avril 1999 [p.38]
C.14	Etude et Utilisation d'arc glissant pour la dépollution S.Pellerin, J.-M.Cormier, P.Lefauchaux & O.Martinie Festival de la Chimie 1998 Orléans (France) - 19 novembre 1998 [Poster]
C.13	Electro-Erosion L.Bratasz, K.Musiol, S.Pellerin, N.Pellerin, B.Pokrzywka, A.Miernikiewicz et J.Chapelle Journées d'étude SEE Val de Loire : Electronique de puissance & App. ind. des déch. élect. Orléans - 02 juillet 1998 [Poster]
C.12	Etude physique d'une décharge glissante S.Pellerin, J.-M.Cormier, J.Chapelle, K.Musiol et B.Pokrzywka Journées d'étude SEE Val de Loire : Electronique de puissance & App. ind. des déch. élect. Orléans - 02 juillet 1998 [Poster]
C.11	Erosion Plasma L.Bratasz, A.Miernikiewicz, K.Musiol, N.Pellerin & S.Pellerin FAMO (Fizyka Atomowa, Molekularna i Optyka) Torun (Pologne) - 26 février 1998 [p.23]
C.10	Argon Arc Plasma Diagnostics by Emission and Four-Wave Mixing Spectroscopy L.Bratasz, K.Dzierzega, K.Musiol, E.Pawelec, S.Pellerin & B.Pokrzywka FAMO (Fizyka Atomowa, Molekularna i Optyka) - Torun (Pologne) - 26 février 1998 [p.22]
C.09	Application of the (0,0) Swan band spectrum for temperature determination S.Pellerin, B.Pokrzywka, K.Musiol & J.Chapelle International Astronomy Union General Assembly Kyoto (Japon) - 18/28 aout 1997
C.08	Stark Widht of $4p'[1/2]-4s[3/2]^o$ ArI Transition (696.5 nm) S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka & J.Chapelle Joint Polish-German Conf. Modern Optics Ustron (Pologne) - 23-28 Septembre 1996
C.07	Molecular band spectrum for temperature measurements S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, O.Motret, J.-M.Cormier & J.Chapelle 4 <sup>e</sup> Colloque sur la Dynamique des Ions, des Atomes et des Molécules Bourges (France) - 16/18 Juillet 1996 [Vol.I, p.P89]
C.06	Study of electric arc cathode region S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, E.Pawelec & J.Chapelle 4 <sup>e</sup> Colloque sur la Dynamique des Ions, des Atomes et des Molécules Bourges (France) - 16/18 Juillet 1996 [Vol.I, p.P91]
C.05	Détermination des probabilités de transition de l'Argon II S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, C.de Izarra & J.Chapelle 2 <sup>e</sup> Colloque sur la Dynamique des ions, des Atomes et des Molécules Bourges (France) - 1/3 septembre 1993 [pp.275-276]
C.04	Etude de la région cathodique d'un arc électrique S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka & J.Chapelle 2 <sup>e</sup> Colloque sur la Dynamique des ions, des Atomes et des Molécules Bourges (France) - 1/3 septembre 1993 [pp.273-274]
C.03	Détermination expérimentale des probabilités de transition de l'ArII S.Pellerin, K.Musiol, A.Czernichowski & J.Chapelle Collisions et Rayonnement Orléans (France) - 6/8 septembre 1989 [post.32]
C.02	Calcul des forces d'oscillateur de quelques raies d'ArII C.de Izarra, S.Pellerin, J.Chapelle & N.Tran Minh Collisions et Rayonnement Orléans (France) - 6/8 septembre 1989 [post.42]
C.01	Etude expérimentale du profil de la raie 430.01nm de l'Argon neutre C.de Izarra, S.Pellerin, J.Chapelle & N.Tran Minh Collisions et Rayonnement Orléans (France) - 6/8 septembre 1989 [post.54]

↑ Pc.25	Modèle hors d'équilibre de la région cathodique d'un arc électrique dans l'argon E.Pawelec, B.Pokrzywka, C.Delalandre, S.Pellerin & J.Chapelle 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [p.81]
↑ Pc.24	Etude d'un arc en courant alternatif hors-équilibre - Comparaison avec un arc thermique A.Kaminska, J.-M.Cormier, O.Martinie & S.Pellerin 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [p.77]
↑ Pc.23	Eléments d'analyse des mécanismes de l'Electro-Erosion N.Pellerin, A.Miernikiewicz, K.Musiol, L.Bratacz, S.Pellerin & J.Chapelle 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [p.33]
↑ Pc.22	Méetrologie spectroscopique de l'Argon S.Pellerin, J.Chapelle, K.Musiol, K.Dzierzega & B.Pokrzywka First French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997
↑ Pc.21	Elements d'analyse des mécanismes de l'Electro-Erosion N.Pellerin, A.Miernikiewicz, K.Musiol, S.Pellerin & J.Chapelle First French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997
↑ Pc.20	Fonctionnement et Caractérisation d'un Glidarc S.Pellerin, J.-M.Cormier, J.Chapelle, K.Musiol, B.Pokrzywka & J.Koulidiati First French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997
↑ Pc.19	Etude de la zone cathodique d'un arc électrique B.Pokrzywka, K.Musiol, K.Dzierzega, E.Pawelec, S.Pellerin & J.Chapelle First French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997
↑ Pc.18	Diagnostic des milieux hors d'équilibre - II. Mélange quatre ondes K.Musiol, K.Dzierzega, E.Pawelec, B.Pokrzywka, S.Pellerin & J.Chapelle First French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997
↑ Pc.17	Diagnostic des milieux hors d'équilibre - I. spectroscopie moléculaire Pellerin, Cormier, Chapelle, Koulidiati, Lago, de Graaf, Rock, Dudeck, Musiol & Pokrzywka First French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997
↑ C.07	Molecular band spectrum for temperature measurements S.Pellerin, K.Musiol, B.Pokrzywka, O.Motret, J.-M. Cormier & J.Chapelle 2° Journées de Spectroscopie Moléculaire Bourges (France) - 15/16 Juillet 1996 [Vol.I, p.P61]
↑ Pc.02	Mesure de temp. Rotationnelle de OH par spectroscopie UV dans une D.B.D. T.H.T. impulsionnelle O.Motret, C.Hibert, M.Nikravec, S.Pellerin, R.Viladrosa & J.-M.Pouvesle 3° Colloque UVX Mont Saint-Odile - Strasbourg (France) - 20/23 mai 1996

## E.4 Rapports

R.22	Phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG S.Zielinska, S.Pellerin, Ch. de Izarra & K.Musiol Rapport final, Contrat LASEP-Air Liquide Welding, Décembre 2003
R.21	Etude et Caractérisation d'une décharge supersonique. Application à la dépollution S.Pellerin, J.-L.Thébault & J.Chapelle Rapport final, Contrat LASEP-EDF, Janvier 2002 (Rap. intermédiaire : Avril 2001)
R.20	Phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG S.Zielinska, S.Pellerin, Ch. de Izarra & K.Musiol Rapport final, Contrat LASEP-Air Liquide Welding, Février 2001 (Rap. intermédiaire : Août 2000)
R.19	Radicaux hydrogène à longue durée de vie pour le traitement des déchets et effluents industriels J.Chapelle, S.Pellerin & J.Stevelfelt ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Rapport d'activité 2000 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques»
R.18	Rapport d'activité 1997-1999 - PROGRAMME ECODEV-EDF-ADEME J.Chapelle, S.Pellerin, J.Stevelfelt & J.-M.Cormier ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Rapport d'activité 1997-1999 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques»
R.17	Radicaux hydrogène à longue durée de vie pour le traitement des déchets et effluents industriels J.Chapelle, S.Pellerin & J.Stevelfelt ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Rapport d'activité 1999 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques»
R.16	Etude et Caractérisation d'une décharge supersonique. Application à la dépollution S.Pellerin & J.Chapelle Rapport final, Contrat GREMI-EDF N°B62641/AEE 2598, Octobre 1999 (Février 1999)
R.15	Utilisation d'une décharge supersonique pour la production de radicaux hydrogène J.Chapelle, S.Pellerin & J.Stevelfelt ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Bilan ARC - ENSCP - Journée de 30 septembre 1999 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques», pp.63-68
R.14	Recombinaison et durée de vie des atomes d'hydrogène Dans une colonne de plasma faiblement ionisé J.Chapelle, S.Pellerin, J.Stevelfelt & al. ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Bilan ARC - ENSCP - Journée de 11 mars 1999 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques», pp.15-17
R.13	Diagnostic des plasmas thermiques pour le traitement des effluents industriels. Utilisation des bandes moléculaire IR de CO J.Chapelle, S.Pellerin, J.-M.Cormier & T.Renault & al. ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Rapport d'activité 1998 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques»
R.12	Validation du code de calcul des bandes moléculaires IR de CO S.Pellerin, J.Chapelle & al. ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Bilan ARC - ENSCP - Journée de 08 octobre 1998 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques», pp.28-36
R.11	Dispositifs utilisés pour l'observation des bandes de CO et CO <sub>2</sub> dans l'infrarouge S.Pellerin, J.Chapelle & al. ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Bilan ARC - ENSCP - Journée de 26 mars 1998 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques», pp.82-87
R.10	Utilisation d'un arc glissant pour la production de radicaux hydrogène S.Pellerin, J.-M.Cormier & J.Chapelle Rapport final, Contrat GREMI-Atochem, Janvier 1998 (Rap. intermédiaire : Septembre 1997)
R.09	Diag. des plasmas therm. Pour le traitt des effluents industriels - Utilisation des bandes moléculaire IR de CO S.Pellerin, J.Chapelle & al. ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Bilan ARC - ENSCP - Journée de 28 novembre 1997 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques», pp.88-91
R.08	Fonctionnement et Caractérisation d'un arc glissant (Glidarc) J.Chapelle & S.Pellerin Rapport final, Contrat GREMI-EDF N°7E8058/AEE 2115, Septembre 1997 (06/1996 & 12/1996)
R.07	Analyse spectroscopique des plasmas de rentrée V.Lago, M.de Graaf, W.Röck, S.Pellerin, J.Betsch & M.Dudeck Rapport final, Contrat Aérothermique-DRET N°95/2596A, août 1997
R.06	Rapport d'activité 1997-1999 - PROGRAMME ECODEV-EDF-ADEME J.Chapelle, S.Pellerin, J.Stevelfelt & J.-M.Cormier ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe 1997/2001 - Rapport d'activité 1997-1999 Thème : «Traitement des déchets et des effluents industriels - ARC Plasmas thermiques»
R.05	Mesure des températures à l'aide des bandes (0,0), (1,1) et (2,2) du système A <sup>2</sup> Δ → X <sup>2</sup> Π de CH S.Pellerin, J.Kouliadiati, J.Chapelle & al. ARC-CNRS-Ecotech 1992/1996 - Bilan ARC - ENSCP - Journée de 15 décembre 1996 Thème : «Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets et au recyclage», pp.39-42
R.04	Mesure des température rotationnelles à l'aide de la bande OH(A <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup> , ν'=0)→OH(X <sup>2</sup> Π, ν'=0) à 306.357nm S.Pellerin, J.Chapelle & al. ARC-CNRS-Ecotech 1992/1996 - Bilan ARC - ENSCP - Journée de 28 mars 1996 Thème : «Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets et au recyclage», pp.46-49

R.03	Destruction des gaz toxiques dans un arc transféré - Application au CF <sub>4</sub> J.Chapelle, S.Pellerin, N.Nikravetch & al. Rapport d'activité du programme ARC-CNRS-Ecotech (1995) Thème : «Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets et au recyclage»
R.02	Mesure de la température d'un plasma Ar/CF <sub>4</sub> à partir des bandes de Swan de C <sub>2</sub> S.Pellerin, J.Chapelle & al. ARC-CNRS-Ecotech 1992/1996 - Bilan ARC - ENSCP - Journée de 15 novembre 1995 Thème : «Procédés plasmas thermiques appliqués au trait <sup>t</sup> des rejets et au recyclage», pp.112-127
R.01	Etude d'un arc dans l'argon au voisinage de la cathode S.Pellerin & J.Chapelle Rapport final, Contrat EDF, juin/décembre 1995

## E.5 Autres publications

### E.5.1 Ouvrages

O.02	Etude de la région cathodique d'un arc soufflé. Déterminations des probabilités de transition et élargissements Stark de raies d'argon II Mémoire de Thèse de l'Université d'Orléans - 25 Octobre 1994
O.01	Diagnostic d'un plasma d'arc transféré. Introduction à l'étude de la raie 4300.1A d'Al Rapport de DEA Physique des Gaz et des Plasmas - Septembre 1988

### E.5.2 Publications sans Referee

A.04	Diagnostic des Plasmas : Arcs électriques et Décharges hors d'équilibre S.Pellerin, J.Chapelle, Ch de Izarra, O.Vallée, K.Musiol, K.Dzierzega, S.Zielinska & B.Pokrzywka, Microscop [CNRS Centre-Auvergne-Limousin] 42 (Janvier 2003)
A.03	Diagnostic des Plasmas : Arcs électriques et Décharges hors d'équilibre S.Pellerin, J.-M.Cormier, J.Chapelle, K.Musiol, K.Dzierzega, E.Pawelec & B.Pokrzywka, Bull.Amb.de France à Varsovie
A.02	Du solide au plasma... Voyage dans la matière ! S.Pellerin, Sterralliance [Bulletin de liaison du club STERRAD ALLIANCE] 3 (Avril 1997)
A.01	Qu'est-ce que le plasma ? S.Pellerin, Sterralliance [Bulletin de liaison du club STERRAD ALLIANCE] 2 (Juillet 1996)

### E.5.3 Polycopiés pour l'enseignement

E.06	Electronique et Electrotechnique : Cours, TD et TP de Licences TM & SPI S.Pellerin - Années 2002/2003 & 2003/2004 - Université d'Orléans (Antenne de Bourges)
E.05	Electronique et Electrotechnique : Travaux Pratiques de Licences TM & SPI S.Pellerin, Polycopié de travaux pratiques Années 1999 à 2001 - Université d'Orléans (Antenne de Bourges)
E.04	Travaux Pratiques de Maîtrise - Option 'Plasmas' : Initiation à la recherche S.Pellerin, Polycopié de travaux pratiques Années 1997/1998, 1998/1999 & 1999/2000 - Université d'Orléans
E.03	Travaux pratiques de Thermodynamique J.-P.Blondeau, C.Vivien et S.Pellerin - TP de 2 <sup>e</sup> année - Dépt de Génie Ind. et Maintenance Années 1998/1999 & 1999/2000 - IUT de Chartres
E.02	Electronique et Electrotechnique : Travaux Pratiques de Licence S.Pellerin, Polycopié de travaux pratiques Année 1993/1994 - Université d'Orléans (Antenne de Bourges)
E.01	Electronique - Deug A1 : Travaux Dirigés et Travaux Pratiques S.Pellerin, Polycopié de travaux pratiques Année 1993/1994 - Université d'Orléans (Antenne de Bourges)

## E.6 Encadrements de travaux de recherche

### E.6.1 Stage Post-Doctoral

Es4.03	Système d'allumage par plasma pour moteur automobile B.Hniatiuc, Stage Post-Doctoral LASEP-AUF, Octobre 2003-Juillet 2004 B.Hniatiuc, Stage Post-Doctoral LASEP, Mai-Juin 2002 / Juin-Août 2003
Es4.02	Application du Mélange 4 Ondes aux diagnostics de milieux plasmagènes complexes K.Dzierzega, Stage Post-Doctoral LASEP-Région Centre, Avril 2002-Mars 2003
Es4.01	Contribution à la spectroscopie infrarouge des molécules CO-CO <sub>2</sub> J.Kouliadiati, Stage Post-Doctoral, Laboratoire d'Aérothermique, RS 97-7, Novembre 1997

### E.6.2 Stage Doctoral

Es3.03	Etude de filaments de plasma à haute pression dans les gaz rares E.Savignon, Stage Doctoral - Université d'Orléans, Octobre 2002-...
Es3.02	Mise en oeuvre simultanée de techniques de Mélange 4 Ondes Dégénérées et de Diffusion Thomson pour le diagnostic de milieux plasmagènes complexes W.Zawadzki, Stage Doctoral - Université Jagellonne (Cracovie), Sept-Octobre 2003
Es3.01	Phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG S.Zielinska, Stages Doctoraux - Université d'Orléans, Mars 2002-Décembre 2003 S.Zielinska, Stage Doctoral - Université d'Orléans, Mars-Décembre 2000

### E.6.3 Stage de DEA, DESS

Es2.03	Etude spectroscopique des constituants d'un gaz de laser Helium-Néon P.Maso, Stage DESS Lasers, Matériaux et Milieux biologiques - Paris 7, Mars-Août 2003
Es2.02	Etude de décharges filamentaires dans les gaz rares E.Savignon, Stage DEA Energétique - Université d'Orléans, Février-Septembre 2002
Es2.01	Caractérisation expérimentale de plasmas hors d'équilibre par spectroscopie d'émission T.Renault, Stage DEA Energétique - Université d'Orléans, Février-Septembre 1998

### E.6.4 Stage de Maîtrise, IUT...

Es1.12	Application des outils de l'analyse spectrales à la détection des défauts de soudage D.Groslier, Maîtrise de Sciences de la Production Industrielle, Université d'Orléans, Avril-Juin 2003
Es1.11	Réalisation de mini-moteurs Stirling A.Rharouaby & S.Elkahaiati, Maîtrise de Technologie Mécanique, Univ. d'Orléans, Avril-Juin 2003
Es1.10	Système d'allumage par plasma pour moteur automobile M.Brossard, Stage Ingénieur ENSIB, Juin-Juillet 2002
Es1.09	Développement et Mise en place de travaux pratiques pour l'enseignement S.Gayoux, Maîtrise de Sciences de la Production Industrielle, Université d'Orléans, Avril-Juin 2002
Es1.08	Etude de décharges filamentaires dans les gaz rares E.Savignon, Maîtrise de Physique, Université d'Orléans, Mai-Juillet 2001
Es1.07	Production de radicaux hydrogène dans une tuyère supersonique S. de Oliveira, Maîtrise de Sciences de la Production Industrielle, Univ. d'Orléans, Avril-Juin 2000
Es1.06	Application d'une tuyère supersonique à la destruction des COV M.Burry, Maîtrise de Sciences de la Production Industrielle, Université d'Orléans, Avril-Juin 2000
Es1.05	Caractérisation aérodynamique d'une tuyère supersonique V.Bénetton, Maîtrise de Physique, Université d'Orléans, Mai-Juillet 1999
Es1.04	Réalisation d'une source de calibration secondaire dans le domaine 140nm-330nm Stage IUT GMP Evry, Laboratoire d'Aérothermique, 1998
Es1.03	Contribution à la détermination des caractéristiques spectrales de raies d'Argon III A.Ramanitra, Maîtrise de Physique, Université d'Orléans, Mai-Juin 1998
Es1.02	Mes. Des temp. de milieux plasmagènes hors d'équilibre par spectro. moléculaire (OH, C <sub>2</sub> , CH...) J.Pons, Maîtrise de Physique, Université d'Orléans, Mai-Août 1997
Es1.01	Réacteur à arcs glissants : caractérisation aérodynamique J.Lacheny, Maîtrise de Physique, Université d'Orléans, Mai-Juin 1996



## E.7 Communications orales, Séminaires

S.61	Détermination des températures dans les différents plasmas Journée d'Etude du Réseau Plasmas froids "Traitements de surface par plasmas à la pression atm." Aspet (France), 01/02 décembre 2003 [Conf.invitée]	
S.60	Collisional-Radiative type modeling and application in plasma diagnostics 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges (France), 16/19 juin 2003 [Conf.invitée]	↑ C.41
S.59	Influence du gaz sur la forme de l'arc en soudage MIG-MAG 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges (France), 16/19 juin 2003	↑ C.40
S.58	Application of degenerate four-wave mixing (DFWM) laser spectroscopy in investigations of low-temperature plasmas 4rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories (FraPol04) Bourges (France), 16/19 juin 2003	↑ C.39
S.57	Les Plasmas : Applications Industrielles et Technologiques Séminaire de la Faculté des Sciences-Site de Bourges Bourges (France) - 31 janvier 2002, 9 janvier 2003 & 8 janvier 2004	
S.56	Stark broadening and shift measurements in thermal arc plasma using DFWM method Plasma'01 - Int.Symp.on Plasma Research and Applications Warsaw (Pologne) - 19/21 septembre 2001	↑ C.30
S.55	Phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG - MAG 3rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 24/27 septembre 2001	↑ C.29
S.54	Application des spectres moléculaires superposés de N <sub>2</sub> et N <sub>2</sub> <sup>+</sup> à la détermination des températures rotationnelle et vibrationnelle et du rapport N <sub>2</sub> <sup>+</sup> /N <sub>2</sub> 3rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 24/27 septembre 2001	↑ C.28
S.53	Mesures des élargissements et déplacements Stark dans un plasma thermique en utilisant une méthode de Mélange Quatre Ondes Dégénérées (M4OD) 3rd French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 24/27 septembre 2001	↑ C.27
S.52	Stark broadening and shift measurements in thermal arc plasma using DFWM method Plasma'01 - Int.Symp.on Plasma Research and Applications Warsaw (Pologne) - 19/21 septembre 2001	↑ Cc.16
S.51	Optical spectroscopic diagnostic of an Argon-Hydrogen RF inductive thermal plasma torch used for hydro-generation of silicon 15th International Symposium on Plasma Chemistry Orléans (France) - 09/13 juillet 2001	↑ Cc.15
S.50	Arc glissant et Applications 'La foudre en bouteille au service de l'électrotechnique', Journées Electrotechnique 2001 Toulouse (France), 15/16 mars 2001	↑ C.25
S.47	Spectroscopie d'émission et diagnostic laser de type mélange quatre ondes ; Application au diagnostic des plasmas d'arc Congrès 'PAMO 2000' de la Société Française de Physique Lyon-Villeurbanne (France), 10/13 juillet 2000 [Conf.invitée]	↑ C.24
S.48	Mesure des températures de rotation et de vibration des milieux plasmagènes complexes Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe Campus Curie - Paris (France) - 11 mars 2000	
S.49	Utilisation d'une tuyère supersonique pour la production de radicaux hydrogène Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe (Bilan 1997/1999) Campus Curie - Paris (France) - 30 septembre 1999	↑ R.14
S.46	Etude d'un arc en courant alternatif hors-équilibre - Comparaison avec un arc thermique 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [Conf.invitée]	↑ Pc.25
S.45	Eléments d'analyse des mécanismes de l'Electro-Erosion 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999	↑ Pc.24
S.44	Modèle hors d'équilibre de la région cathodique d'un arc électrique dans l'argon 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999	↑ Pc.23
S.43	Spectroscopie d'émission et diagnostic laser de type mélange quatre ondes - Application au diagnostic des plasmas d'arc 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999 [Conf.invitée]	↑ C.20
S.42	Décharge glissante dans différents gaz : Interaction avec le circuit d'alimentation 2d French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Cracovie (Pologne) - 19/22 juillet 1999	↑ C.19

S.41	Diag. des plasmas par mélange 4 ondes : résultats et perspectives pour l'étude des fluctuations Fluctuations des arcs dans les plasmatrone - 4ème Journées d'étude Limoges (France) - 27 mai 1999	
S.40	Recombinaison et durée de vie des atomes d'hydrogène dans une colonne de plasma faiblement ionisé Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe Campus Curie - Paris (France) - 11 mars 1999	↑ R.13
S.39	Optical emission spectroscopic analysis of spacecraft plasma simulation in ground test facilities 3° Eur. Symp. On Aerothermodynamics for Space Vehicles Noordwijk (Pays Bas) - 24/26 novembre 1998	↑ Cc.11
S.38	Validation du code de calcul des bandes moléculaires IR de CO Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe Campus Curie - Paris (France) - 08 octobre 1998	↑ R.11
S.37	Infra-red and visible optical emission spectroscopy in a CO2 plasma flow 21° International Symposium on Rarefied Gas Dynamics Marseille (France) - 26/31 Juillet 1998	↑ Pc.16
S.36	Etude expérimentale des types de claquages des décharges glissantes dans différents gaz Fluctuations des arcs dans les plasmatrone - 3ème Journées d'étude Bourges (France) - 27/28 avril 1998	↑ Pc.15
S.35	Rétro-claquage des arcs glissants Fluctuations des arcs dans les plasmatrone - 3ème Journées d'étude Bourges (France) - 27/28 avril 1998	↑ Pc.14
S.34	Electro-Erosion - Part.I : Effet des impulsions de courant Fluctuations des arcs dans les plasmatrone - 3ème Journées d'étude Bourges (France) - 27/28 avril 1998	↑ Pc.13
S.33	Electro-Erosion - Part.II : Eléments d'analyse des mécanismes mis en jeu Fluctuations des arcs dans les plasmatrone - 3ème Journées d'étude Bourges (France) - 27/28 avril 1998	
S.32	Influence des paramètres du circuit électrique [...] sur les fluctuations d'un Glidarc Fluctuations des arcs dans les plasmatrone - 3ème Journées d'étude Bourges (France) - 27/28 avril 1998	
S.31	Dispositifs utilisés pour l'observation des bandes de CO et CO2 dans l'infrarouge Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe Campus Curie - Paris (France) - 25 mars 1998	↑ R.10
S.30	Météorologie spectroscopique de l'Argon 1° French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997	↑ Pc.22
S.29	Elements d'analyse des mécanismes de l'Electro-Erosion 1° French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997	↑ Pc.21
S.28	Fonctionnement et Caractérisation d'un Glidarc 1° French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997	↑ Pc.20
S.27	Etude de la zone cathodique d'un arc électrique 1° French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997	Pc.19
S.26	Diagnostic des milieux hors d'équilibre - II. Mélange quatre ondes 1° French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997	↑ Pc.18
S.25	Diagnostic des milieux hors d'équilibre - I. spectroscopie moléculaire 1° French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratories Varsovie (Pologne) - 08/10 décembre 1997	↑ Pc.17
S.24	Utilisation des bandes moléculaires IR de CO pour le diag. de plasmas complexes de type CFC Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS Ecodev-EDF-Ademe Campus Curie - Paris (France) - 28 novembre 1997	↑ R.08
S.23	Diagnostic spectroscopique des plasmas complexes réactifs Comité de laboratoire - GREMI Orléans (France) - 02 octobre 1997	
S.22	Investigation and modelling of a cold arc discharge. Chemistry applications 13° Int. Symp. on Plasma Chemistry Beijing (China) - 18/22 août 1997	↑ Cc.08
S.21	Non-thermal plasma diagnostics by phase-conjugate degenerate four-wave mixing 29th EGAS Conference Berlin (Allemagne) - 15/18 juillet 1997	↑ Cc.06
S.20	Diagnostic des plasmas complexes Coll.11 : Diagnostic et Caractérisation des fluides réactifs et plasmas 4° Congrès de la Société Française de Physique Paris (France) - 7/10 juillet 1997 [Conf.invitée (C.Fleurier)]	

S.19	Mesure de température à partir des bandes de OH dans une torche RF Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS-Ecotech Campus Curie - Paris (France) - 22 mai 1997	
S.18	Fluctuations lumineuses dans une décharge électrique aux faibles intensités de courant Fluctuations des arcs dans les plasmatrions - 2des Journées d'étude Rouen (France) - 12/13 mars 1997	↑ Pc.12
S.17	Fluctuations spatiales d'un arc 'glissant' Fluctuations des arcs dans les plasmatrions - 2des Journées d'étude Rouen (France) - 12/13 mars 1997	↑ Pc.11
S.16	Mesure des températures à l'aide des bandes (0,0), (1,1) et (2,2) du système $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS-Ecotech Maison de la Chimie - Paris (France) - 15 décembre 1996	↑ R.05
S.15	Applications techniques et industrielles des plasmas Réunion du club STERRAD ALLIANCE Paris (France) - 15 novembre 1996	↑ A.03
S.14	Molecular Spectra for Temperature Measurement Joint Polish-German Conf. Modern Optics Ustron (Pologne) - 23-28 Septembre 1996 [ <i>Conf. invitée (K.Musiol)</i> ]	
S.13	UV OH band spectrum for temperature measurement of non equilibrium plasmas 4° Eur. Conf. on Thermal Plasma Processes Athènes (Grèce) - 15/17 Juillet 1996	↑ Pc.06
S.12	Observations of the arc spot on the electric arc cathode surface 4° Eur. Conf. on Thermal Plasma Processes Athènes (Grèce) - 15/17 Juillet 1996	↑ Pc.04
S.11	Caractérisation d'un arc électrique à proximité d'une cathode en tungstène thorié Rayonnement et écoulements dans les arcs Journée d'étude de la S.E.E. - Clamart (France) - 19 juin 1996	
S.10	Décomposition de CF <sub>4</sub> dans un arc transféré - Mesure de temp. à l'aide des bandes de OH Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS-Ecotech - Campus Curie Paris (France) - 28 mars 1996	↑ R.04
S.09	Qu'est-ce que le plasma ? Réunion du club STERRAD ALLIANCE Le Mesnil Amelot (France) - 28 mars 1996	↑ A.01
S.08	Observations de la région cathodique d'un arc électrique Fluctuations des arcs dans les plasmatrions - 1ères Journées d'étude Orléans (France) - 4/5 décembre 1995	↑ Pc.09
S.07	Décomposition de CF <sub>4</sub> dans un arc transféré - Mesure de temp. à l'aide des bandes de Swan Plasma et Destruction de toxiques - Procédés plasmas thermiques appliqués au traitement des rejets Réunion du club ARC-CNRS-Ecotech Palaiseau (France) - 15 novembre 1995	↑ R.02
S.06	Physique de la décharge Glidarc Comité de laboratoire - GREMI Orléans (France) - 23 mars 1995	
S.05	Etude de la région cathodique d'un arc soufflé Réunion du club EDF Arc électrique Clamart (France) - 15 mars 1995	
S.04	Etude du comportement d'un arc électrique au voisinage de la cathode Interactions Arc-Electrode - Journée d'étude de la S.E.E. Toulouse (France) - 17 juin 1993	
S.03	Spectroscopic investigation of the near cathode region of an electric arc 2d Int. Conf. on Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and their Applications Xi'an (Chine) - 25/29 mai 1993	↑ Cc.02
S.02	Investigation of a cathode region of an electric arc X° Int. Conf. on Gas Discharges and their applications (GD92) Swansea (England) - 13/18 septembre 1992	↑ Cc.01
S.01	Study of an electric arc in the vicinity of the cathode 2d European Congress on Thermal Plasma Processes Gif-sur-Yvette/Paris (France) - 7/9 septembre 1992	↑ Pc.01



---

**DISCIPLINE : PHYSIQUE DES PLASMAS**

---

**TITLE**

Plasmas basse-température en physique atomique et moléculaire ; Applications technologiques

---

**RÉSUMÉ**

Ce rapport présente l'ensemble d'activités de recherche menées au LASEP, à Bourges, entre le 01/04/2002 et le 31/03/2004, dans le cadre d'un stage post-doctoral financé par la Région Centre.

La spectroscopie non-intrusive de type Mélange 4 ondes dégénéré (DFWM) en géométrie de conjugaison de phase (PC) avec faisceaux opposés, a été utilisée pour l'étude des plasma basse-températures générés dans un arc libre éclatant dans l'argon pur à pression atmosphérique. Un modèle semi-empirique qui relie le signal de DFWM aux paramètres du plasma, a été établi et appliqué au diagnostic du milieu et à la détermination des paramètres Stark des raies spectrales d'argon.

Parallèlement, des contributions aux travaux de recherche sur le soudage par plasma et le diagnostic d'un propulseur ionique fonctionnant dans l'argon, sont présentées.

Le sujet de cette étude correspond aux besoins en ....

Le travail a consisté dans une première partie, à ....

L'approche spectroscopique fait l'objet de la deuxième partie de l'étude. Après avoir défini les différentes hypothèses de travail, modèles et dispositifs expérimentaux nécessaires au diagnostic du plasma, nous donnons ....

La troisième partie traite de ...

---

**MOTS-CLÉS**

Mélange 4 ondes dégénéré, Spectroscopie Optique d'Emission, Diagnostic, Paramètres Stark, Soudage

---

**TITLE**

Low-temperature plasmas in atomic and molecular physic - Technological applications

---

**ABSTRACT**

This report presents the totality of research led to the laboratory LASEP in Bourges, from 04-01-2002 to 03-31-2003, in the frame of a post-doctoral finacement by the Région Centers.

The non-intrusive degenerate Four Wave Mixing (DFWM) laser spectroscopy in phase-conjugate geometry (PC), was used for the low-temperature plasma studies generated in a free argon arc at atmospheric pressure. A semi-empirical model that connects the PC-DFWM signal to plasma parameters, has been established and applied on the diagnostic of the plasma column and to the determination of Stark parameters of argon spectral lines.

Similarly, contributions to research works on the welding arc and the diagnostic of an ionic motorworking in argon, are presented.

This work was carried out of ...

In a first part, the ... are discussed.

In a second part, optical emission spectroscopy is used to obtain plasma parameters (temperature, electron density and pressure). In order to understand the device running, diagnostic apparatus, models and hypothesis are detailed. ...

In the third part, ... are dicussed.

---

**KEYWORDS**

Degenerate Four Wave Mixing, Optical Emission Spectroscopie, Diagnostic, Stark parameters, Welding