



LES PLASMAS POUSSIÉREUX : Synthèse, Structure et Dynamique d'un Nuage de Poussières dans un Plasma

Maxime Mikikian

► To cite this version:

Maxime Mikikian. LES PLASMAS POUSSIÉREUX : Synthèse, Structure et Dynamique d'un Nuage de Poussières dans un Plasma. Physique [physics]. Université d'Orléans, 2008. tel-00361650

HAL Id: tel-00361650

<https://theses.hal.science/tel-00361650>

Submitted on 16 Feb 2009

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.



Habilitation à Diriger les Recherches

Discipline : Physique

LES PLASMAS POUSSIÉREUX : Synthèse, Structure et Dynamique d'un Nuage de Poussières dans un Plasma

Maxime MIKIKIAN

Soutenue le 20 juin 2008 devant le jury :

Rapporteurs

Steven L. Girshick	Professeur, Université du Minnesota, Minneapolis (USA)
David B. Graves	Professeur, Université de Californie, Berkeley (USA)
Jean-Pierre Boeuf	Directeur de Recherche CNRS, LAPLACE, Toulouse (F)

Examineurs

Thierry Belmonte	Directeur de Recherche CNRS, LSGS, Nancy (F)
Alexei Ivlev	Chercheur, MPE, Garching (D)
Cécile Arnas	Chargée de Recherche CNRS, PIIM, Marseille (F)
Jean-Michel Pouvesle	Directeur de Recherche CNRS, GREMI, Orléans (F)
Laïfa Boufendi	Professeur, GREMI, Orléans (F)

*Avec de bons yeux, de bons microscopes et un peu de curiosité,
le moindre atome, un grain de poussière, un brin d'herbe
peuvent devenir des sources intarissables de merveilles.*

Charles BONNET

Remerciements

La recherche scientifique, du moins en physique, est une activité qui ne se pratique pas seul mais avec l'aide d'un grand nombre de personnes, chercheurs, enseignants, techniciens, administratifs, étudiants. Ce manuscrit est la concrétisation d'années de recherche marquées par des rencontres professionnelles, mais aussi personnelles, qui ont construit et orienté ma carrière scientifique et en partie ma vie. Le travail présenté contient ainsi l'apport de toutes les personnes qui m'ont accompagné jusqu'à aujourd'hui. Dresser une liste de tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à ce manuscrit est illusoire. Essayons quand même ...

Commençons tout d'abord par les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail. Merci donc aux rapporteurs, Jean-Pierre Boeuf, Steven Girshick et David Graves pour avoir lu et examiné ce manuscrit dans un temps imparti relativement court. Je remercie Alexei Ivlev et Thierry Belmonte pour avoir participé à ce jury et bien sûr les examinateurs qui me connaissent bien (les pauvres), Cécile Arnas, Laïfa Boufendi et Jean-Michel Pouvesle qui m'a fait le plaisir de présider ce jury.

Si l'on reprend maintenant le fil de ma carrière scientifique depuis les origines (encore proches), je vais évidemment commencer par remercier chaleureusement Cécile Arnas qui m'a remarquablement encadré durant ma thèse et qui m'a enseigné les bases indispensables du métier de chercheur. Ton "élève" continue son bout de chemin, en partie grâce à toi !

Alors que je m'apprêtais à signer un post-doc au CEA DAM, André Bouchoule et Laïfa Boufendi m'ont débauché pour venir faire des (et non pas "la") poussières en post-doc au GREMI. Je les en remercie vivement car le GREMI m'a depuis adopté et réciproquement. Cela va maintenant faire huit ans que j'évolue au sein de ce laboratoire et une longue (mais non exhaustive) liste de remerciements s'impose.

Je tiens à remercier tout particulièrement Jean-Michel Pouvesle pour son soutien et pour ses qualités de directeur de laboratoire qui font que l'ambiance qui règne au GREMI est excellente, et le laboratoire A+ (euh... non ce n'est pas fini).

Au GREMI, on est bien accueilli et ça commence dès la porte d'entrée franchie. Un immense merci aux secrétaires de choc, Evelyne Coudert, Sylvie Jauffrion, Christophe Dubois, qui assurent (ou ont assuré) cet accueil quotidien par un sourire et qui se démènent pour répondre à tous nos déboires administratifs.

L'essentiel du travail présenté dans ce manuscrit a été réalisé au sein de l'équipe Poudres du GREMI. Merci à Laïfa Boufendi pour m'avoir accueilli dans ce groupe et pour me permettre de réaliser ma recherche dans de bonnes conditions. Un super-gros merci aux thésards et post-docs qui se sont succédés dans l'équipe et avec qui il a vraiment fait bon vivre ces dernières années : Stéphanie Huet, mon premier colocataire de bureau Gregorio Viera qui a préféré retourner vivre à Barcelone (bizarre?), Marie-Christine Jouanny qui lui a succédé et qui m'a supporté pendant plus de trois ans, Khalid Radouane et nos crises de fou rire, Aziz Mezeghrane, et plus récemment Johannes Berndt, Eva Kovacevic, Gaëtan Wattieaux et Catherine Dupuis (mais oui la thèse c'est super!).

Mention spéciale à Lénéaïc Couëdel dont une partie de ce manuscrit lui est redevable, tu as fait du super boulot!

Et puis mention plus que spéciale à Marjorie Cavarroc, pour l'excellence de ta recherche qui participe de façon notable au contenu de ce manuscrit et puis bien entendu pour l'amitié sincère qui nous unie.

Enfin, tout ce travail ne serait pas possible sans le soutien technique hors pair de Yves Tessier et de ceux qui ne font pas partie de l'équipe mais qui nous prêtent main forte régulièrement, Philippe Lefaucheux, Bernard Dumax, Jacky Mathias, Guy Coudrat, Sébastien Dozias et Hervé Rabat. Et puis il ne faut pas les oublier, les stagiaires qui ont contribué à ce travail et plus particulièrement Gaëlle Perrier, Carolina Lopez Quesada et Carole Socquet-Clerc.

Merci à tous les permanents qui contribuent à ce que le GREMI soit un lieu agréable. Merci à ceux avec qui j'ai eu de nombreuses discussions (non professionnelles), notamment à mon voisin de bureau Nadjib Semmar, mes partenaires de RU ou de pause café, Jean-Michel, Yves, Hervé, Christophe Cachoncinlle, Dunpin Hong, Jean-Marc Bauchire, Eric Millon, Pascal Brault (les pauses cafés sont parfois scientifiquement productives!), ...

Un immense merci aux "non-permanents" dont j'ai partagé la situation précaire pendant longtemps et surtout à ceux qui me gratifient de leur amitié. Commençons par les "anciens", et honneur aux indispensables Jérôme Pons et Christophe Dutouquet (on se voit ce week-end?!), Marjorie (encore?!), mais aussi à ceux que je vois moins (mais à qui je pense!), Brice Metay, Moulay Idrissi, Vanessa Vial, Gregory Marcos, Hasnaa et Ouassima Sarroukh, Khalidus, Marie, Xavier Mellhaoui (et son pote le Yeti), Thomas Tillocher (en fait on se voit régulièrement!), Alexey Lazurenko, Stéphanie Guillot, Ratiba Benzerga, Clément Zaepffel, Pascale Plantin, Elise El-Ahmar, Lénéaïc (tu m'en veux pas je te mets dans la catégorie des anciens!)... Et bien sûr ceux toujours présents et avec qui la bonne humeur est toujours au rendez-vous, Laurianne Pichon, Corinne Duluard, Houcine Oubensaïd, Gaëtan, Jérémy Pereira, Catherine, Thierry Dufour, Alain Leufroy, Binjie Dong, Vincent Dolique, Sylvain Tricot, Amaël Caillard, Edward Romero *et al.* !!

Et puis bien sûr, un grand merci à mes parents pour leur soutien et leur amour inconditionnels et une énorme pensée pour ma grand-mère partie il y a trois ans.

Merci à tous.

Maxime

Table des matières

Préambule	11
I Introduction aux plasmas poussiéreux	17
I.1 Contexte	17
I.2 Quelques notions	19
I.2.a Création d'un plasma poussiéreux	19
I.2.b Phénomènes de charge	19
I.2.c Forces s'exerçant sur une poussière	20
II Dispositifs expérimentaux et diagnostics	21
II.1 Réacteur Silane	21
II.2 Réacteur PKE-Nefedov	22
II.3 Diagnostics	23
III Formation de poussières et structure du nuage	25
III.1 Mécanismes de formation	25
III.2 Suivi de la croissance des poussières	26
III.3 Contrôle de la croissance de nanocristaux	28
III.3.a Taille des nanoparticules	28
III.3.b Structure des nanoparticules	29
III.4 Forme du nuage de poussières	30
III.5 Générations successives de poussières	33
III.5.a Générations successives sur PKE-Nefedov	33
III.5.b Générations successives sur Silane	34
III.6 Conclusion du chapitre	37
IV Instabilités dans les plasmas poussiéreux	39
IV.1 Instabilités durant la formation de poussières	39
IV.1.a Chimie argon-silane	39
IV.1.a.i Pendant la 1 ^{ère} génération de poussières	39
IV.1.a.ii Pendant les générations successives	42

IV.1.b Pulvérisation	43
IV.2 L'instabilité <i>heartbeat</i>	46
IV.2.a Caractérisation électrique	46
IV.2.b Imagerie rapide	47
IV.3 Conclusion du chapitre	50
V Charge résiduelle des poussières	51
V.1 Mise en évidence de la charge résiduelle	51
V.2 Fonction de distribution des charges résiduelles	52
V.3 Modélisation des fonctions de distribution	53
V.4 Conclusion du chapitre	54
VI Conclusions et perspectives	57
Bibliographie	61
Liste des figures	65
Annexes	67
Curriculum Vitae	
Articles, Activités rédactionnelles et éditoriales	
Conférences, Communications	
Jury, Encadrements	
Publications relatives au manuscrit	

Préambule

Ce manuscrit d'Habilitation à Diriger les Recherches constitue un bilan du travail que j'ai réalisé depuis l'obtention de mon doctorat en 1999. Il traite d'un sujet que j'ai eu l'opportunité de découvrir il y a maintenant 12 ans. En effet, je me suis initié aux "plasmas poussiéreux" en 1996 dans le cadre du stage de DEA "Rayonnement et Plasmas" de l'Université de Provence. J'ai ainsi passé 4 mois au sein de l'Equipe Turbulence Plasma du laboratoire PIIM (Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires) de cette même université. Durant ce court séjour, mon objectif était de faire léviter des microballons de verre dans la région de gaine d'un disque métallique. Ce disque était placé au centre d'un plasma d'argon créé par une décharge continue à cathode chaude. A l'époque, les plasmas poussiéreux constituaient une thématique relativement récente, qui était étudiée activement par la communauté scientifique depuis le début des années 1990. Cette activité, nouvelle au laboratoire, avait démarré quelques mois avant mon arrivée. L'objectif de ce stage était alors de tester la faisabilité d'une telle recherche dans un type de décharge peu utilisé pour ces études. En effet, la grande majorité des travaux étaient réalisés dans des décharges capacitives radiofréquence. Comme souvent, les résultats concluants sont arrivés vers la fin du stage et pouvaient se résumer en une phrase : "On réussit à faire léviter des poussières dans notre réacteur!". Ce constat encourageant, et un bon classement en DEA, m'ont alors permis de commencer une thèse financée par le Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie (MENRT). J'ai ainsi poursuivi mon étude sur les plasmas poussiéreux au sein du même laboratoire, sous la direction scientifique de Fabrice Doveil et de Cécile Arnas qui avait été mon maître de stage.

C'est ainsi que mon aventure passagère avec les plasmas poussiéreux s'est finalement poursuivie pendant trois ans de thèse. Les résultats de mon stage étant plus que préliminaires, il s'agissait tout d'abord d'optimiser les conditions d'injection, de piégeage, d'observation et d'analyse des poussières. Ce travail s'accompagnait d'une caractérisation du plasma et de la région de gaine. Des études par sonde de Langmuir et par sondes différentielles ont ainsi permis de déterminer les différentes grandeurs du plasma et le profil de potentiel de la gaine. Cette longue phase préparatoire réalisée, les études plus précises pouvaient commencer. J'ai alors mené une étude fondamentale sur la charge électrique des poussières et sur les mécanismes d'interaction entre pous-

sières ou poussière-plasma. Tout d'abord, le cas d'une poussière isolée a été étudié. Sa charge électrique a été déduite expérimentalement à partir de sa hauteur de lévitation et ce résultat a été confirmé par l'étude de son oscillation résonante. Ce dernier aspect a été exploré en analysant l'oscillation naturelle de la poussière puis son oscillation forcée par un champ basse fréquence. Après l'étude d'une poussière, j'ai étudié ... deux poussières en interaction. L'objectif était de déterminer les caractéristiques du potentiel d'interaction considéré comme étant de la forme Coulombien écranté. Pour cela une expérience relativement délicate a consisté à étudier la collision de deux poussières et à utiliser la théorie classique des collisions élastiques binaires. Cela m'a tout d'abord permis de vérifier la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie, puis finalement de déterminer la valeur de la longueur d'écrantage. Après une puis deux poussières, le travail s'est logiquement orienté vers l'étude d'un nuage d'une dizaine de poussières. Une caractérisation géométrique (triangulation de Delaunay, diagramme de Voronoï) de ce nuage a mis en évidence sa structure cristalline. L'agitation thermique des poussières s'est traduite par des fonctions de distribution en vitesse Maxwelliennes. Les différents résultats de cette thèse ont été obtenus grâce à un important développement de programmes informatiques de traitement d'images.

Ce travail de thèse a donné lieu à trois publications parues vers la fin de (ou après) ma thèse. Cette parution tardive est la conséquence de l'important travail d'optimisation et de développement nécessaire à toute nouvelle thématique expérimentale qui démarre dans un laboratoire. J'ai soutenu ma thèse dans les temps impartis, premièrement car les meilleures choses ont une fin, et deuxièmement car la patrie avait besoin de moi. En effet, le service militaire obligatoire m'attendait. Début 2000 je partais donc faire mes classes dans la région parisienne. J'ai cependant eu l'opportunité et la chance de réaliser ma période sous les drapeaux en qualité de scientifique du contingent. Après 15 jours fort enrichissants en caserne, j'ai été affecté au CEA DAM Ile-de-France au Département de Physique Théorique et Appliquée sous la direction de Patrick Combis. J'ai alors fait quelques infidélités aux plasmas poussiéreux en travaillant sur l'interaction laser-matière et plus précisément sur le calcul des conductivités électrique et thermique dans les plasmas denses. Ce travail numérique consistait à optimiser un code d'atome moyen relativiste qui fournissait le taux d'ionisation moyen du plasma créé. Le milieu étant dense, l'organisation spatiale des centres diffuseurs (ions) doit être connue afin de déterminer la conductivité du milieu. Pour cela, le facteur de structure est calculé en injectant le taux d'ionisation moyen (définissant les potentiels d'interaction) dans un code de calcul basé sur les équations HNC (HyperNetted-Chain). Le nombre d'électrons libres et la structure du milieu ont été calculés pour différentes valeurs de température et de densité et ont permis de calculer les conductivités électrique et thermique de l'aluminium et du tantale dans une vaste gamme de paramètres. Malgré un sujet de prime abord fort éloigné des plasmas poussiéreux, des points communs reliaient ces deux domaines. En effet, le facteur de structure qui traduit l'organisation spatiale des ions est un outil

utilisé dans les plasmas poussiéreux pour caractériser l'organisation cristalline d'un nuage de poussières. Dans le cadre de ma thèse j'avais notamment mesuré expérimentalement la fonction de distribution radiale des poussières (aussi appelée fonction de corrélation de paires) dont la transformée de Fourier donne le facteur de structure du milieu. Mes connaissances en plasma poussiéreux se sont donc avérées utiles pendant mon séjour de huit mois au CEA. Ce stage militaire s'est concrétisé par la rédaction d'un rapport interne de taille conséquente et par une proposition de contrat post-doctoral. Cependant, mon goût prononcé pour la physique expérimentale m'a incité à accepter une autre proposition émanant d'André Bouchoule et de Laïfa Boufendi du GREMI (Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés) et qui me permettait de revenir à mes premières amours... les plasmas poussiéreux.

C'est ainsi que fin 2000 je suis arrivé à Orléans au sein du GREMI sur un contrat post-doctoral d'un an financé par le CNES. Les objectifs de ce projet étaient ambitieux et les délais à respecter relativement courts. En effet, il s'agissait de préparer une série d'expériences à réaliser à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS) en octobre 2001. Ces expériences devaient faire partie intégrante de la mission ANDROMEDE et être réalisées par la spationaute française Claudie Haigneré. Ce travail était réalisé dans le cadre du programme PKE (Plasma Kristall Experiment) initié par le MPE (Max-Planck Institut für extraterrestrische Physik) de Garching en collaboration avec l'IHED (Institute for High Energy Densities) de Moscou. Ces laboratoires étudiaient notamment les effets de l'apesanteur sur l'organisation cristalline des nuages de poussières micrométriques injectées artificiellement dans un plasma de décharge radiofréquence. L'apport du GREMI consistait à étudier la possibilité de former des poussières dans ce réacteur et d'étudier le comportement de l'éventuel nuage de poussières submicroniques obtenu. En effet, le GREMI est un des laboratoires pionniers pour les études concernant la formation de poussières, notamment dans le cadre des réacteurs industriels utilisant du silane. Ce gaz réactif, utilisé pour les dépôts de silicium, est à l'origine de nombreuses réactions de polymérisation donnant naissance à des poussières. Dans le cadre de mon contrat post-doctoral, il s'agissait de, très rapidement, trouver une méthode de formation de poussières appropriée pour cette mission spatiale, et de définir les expériences à réaliser à bord de l'ISS par Claudie Haigneré. Malgré ce programme de travail conséquent, j'ai également eu l'opportunité de collaborer avec un collègue post-doctorant sur la formation de nanoparticules en silane.

L'objectif principal de mon projet a finalement été atteint et la mission spatiale fut un succès. Le CNES a alors reconduit mon financement pour une année supplémentaire afin de dépouiller les résultats obtenus à bord de l'ISS et réaliser de nouvelles expériences au sol. Ce travail s'est donc poursuivi en 2002 et les financements du CNES (et d'autres sources) ont prolongé ma période post-doctorale jusqu'à fin 2004. En octobre 2004 je démarrai ma carrière au CNRS en qualité de Chargé de Recherche. J'ai alors continué mon aventure avec les plasmas poussiéreux en m'investissant de

plus en plus dans l'encadrement de stagiaires et d'étudiants en thèse. J'ai d'ailleurs fortement contribué à l'encadrement de deux thèses, une dans la continuité du projet PKE et une autre concernant la formation de poussières en silane.

Ce manuscrit[†], découpé en six chapitres, dresse un bilan des recherches sur les plasmas poussiéreux que j'ai réalisées ou conjointement encadrées au GREMI. Dans un but de clarté et de concision, les travaux réalisés au CEA ne sont pas abordés.

Les deux premiers chapitres sont relativement courts et présentent de manière succincte quelques éléments nécessaires à la bonne compréhension des études réalisées. Ainsi, le premier chapitre décrit le contexte dans lequel se situe mon activité de recherche et donne sommairement quelques notions élémentaires sur les plasmas poussiéreux. L'objectif n'est pas de décrire finement les mécanismes physiques régissant ces milieux mais plutôt d'évoquer de façon abordable les bases fondamentales pour leur étude. Le deuxième chapitre décrit les principales caractéristiques des deux dispositifs expérimentaux utilisés, les réacteurs PKE-Nefedov et Silane. Le réacteur PKE-Nefedov est celui sur lequel je travaille depuis mon arrivée au GREMI. Les résultats concernant ce réacteur et présentés dans la suite du manuscrit sont donc relatifs à mon activité principale de post-doctorant et de chargé de recherche. Ils concernent également le travail réalisé dans le cadre de mon activité de co-encadrement de la thèse de Lénaïc Couëdel dont la soutenance est prévue en septembre 2008. Les résultats obtenus sur le réacteur Silane portent, pour une part, sur le travail de collaboration que j'avais entamé durant mon post-doctorat. Pour l'essentiel, ils concernent mon activité de co-encadrement de la thèse de Marjorie Cavarroc soutenue en octobre 2007. Le fait d'avoir pu travailler sur ces deux réacteurs m'a permis d'avoir une vision plus large des phénomènes observés. Cela a également permis de comparer et d'adapter les expériences réalisées sur chacun des réacteurs afin de déceler les points communs et comprendre les différences. C'est avec cette philosophie que les deux chapitres suivants sont rédigés et englobent ainsi des résultats obtenus sur les deux réacteurs.

Le chapitre III est consacré à l'étude de la formation de poussières sur Silane et PKE-Nefedov. Cette formation est suivie grâce à l'utilisation de divers diagnostics. Ces diagnostics montrent que les résultats obtenus sur les deux réacteurs sont très semblables. Sur Silane, une méthode de contrôle de la synthèse de nanoparticules cristallines de silicium est proposée. Les générations successives de poussières sont étudiées par des recoupements entre PKE-Nefedov et Silane.

Le chapitre IV met en évidence que les plasmas poussiéreux sont des milieux fortement instables. Ces instabilités sont observées et analysées sur les deux réacteurs. Certains de ces phénomènes sont directement liés aux processus de formation des poussières. D'autres, apparaissent dans une région bien spécifique du nuage de poussières et sont caractérisées par des variations importantes des propriétés du plasma

[†]Conjointement à une bibliographie générale, les articles ayant servi à la rédaction des différentes rubriques de ce manuscrit sont indiqués en bas des pages correspondantes.

ainsi que par des mouvements complexes des poussières.

Le chapitre V concerne la problématique de la charge électrique des poussières et plus spécialement son devenir à l'arrêt du plasma. Ainsi, l'existence d'une charge résiduelle, une fois le plasma éteint, est mise en évidence. La fonction de distribution de cette charge est établie à la fois expérimentalement et numériquement. L'influence des mécanismes de diffusion des ions et des électrons est soulignée.

Un chapitre de conclusion dresse le bilan des activités de recherche détaillées dans ce manuscrit et expose les pistes de réflexion et les perspectives de recherches que j'envisage dans un avenir proche.

Chapitre I

Introduction aux plasmas poussiéreux

Ce chapitre n'a pas pour intention de décrire de façon exhaustive et détaillée la physique des plasmas poussiéreux. L'objectif est tout d'abord de présenter le contexte dans lequel sont réalisés les travaux présentés dans ce manuscrit. Les notions nécessaires à la bonne compréhension des chapitres suivants y sont abordées succinctement.

I.1 Contexte

L'état plasma de la matière est très répandu dans la nature et il est usuel de dire que 99% de l'Univers est sous forme de plasma. En effet, les étoiles qui constituent la majorité de l'Univers, connu à ce jour, sont des sphères de gaz ionisés. Plus près de nous, les plasmas se rencontrent à l'état naturel par exemple dans la haute atmosphère (ionosphère) et la foudre. Les plasmas créés artificiellement sont largement utilisés dans de nombreuses applications. Ils sont à la base de ce qui constituera certainement l'énergie de demain, la fusion thermonucléaire contrôlée. A cet effet, un vaste projet international a été lancé il y a quelques années autour du réacteur ITER en cours de construction. Dans l'industrie, les plasmas sont utilisés pour des applications liées à la microélectronique et aux nanotechnologies. Ils sont par exemple utilisés pour les dépôts de silicium, matériau à la base de la majorité des composants électroniques.

Tout comme les plasmas, la matière sous forme de poussières est présente dans de très nombreux environnements. Par le terme poussière nous décrivons tout objet solide dont la taille peut varier du nanomètre au centimètre. Les plasmas et les poussières ont donc de nombreuses occasions de se rencontrer et de donner naissance à ce que l'on appelle les plasmas poussiéreux [1, 2]. Ces milieux se rencontrent à l'état naturel dans l'espace [3–6], par exemple dans les nuages interstellaires, les anneaux et atmosphères planétaires ou les queues de comètes... L'industrie utilisatrice de plasmas se trouve également confrontée à ces milieux, pas toujours désirés. En effet, les plasmas poussiéreux ont commencé à être réellement étudiés vers la fin des années 1980 du

fait des problèmes industriels qu'ils engendraient. L'industrie de la microélectronique requiert des conditions de propreté extrêmes afin d'obtenir des couches minces ou des composants non pollués par des poussières pouvant altérer leurs propriétés. Pour cela, ces industries investissent des moyens financiers importants dans la construction de salles blanches à l'atmosphère contrôlée et débarrassée de toute poussière. Cependant, malgré ces précautions, des poussières étaient régulièrement présentes au cours des procédés. Les industriels se sont alors aperçus que ces poussières étaient formées durant les procédés et provenaient soit de la pulvérisation des surfaces exposées au plasma [7], soit des gaz utilisés [8]. En effet, les dépôts de silicium sont réalisés par des plasmas contenant un gaz réactif : le silane. Ce gaz, et d'autres gaz réactifs comme le méthane, ont la propriété, méconnue à l'époque, de donner naissance à des poussières par l'intermédiaire de nombreuses réactions de polymérisation. Une fois cette propriété découverte, de nombreux travaux ont alors débuté en laboratoire afin de mieux comprendre ce phénomène, l'éviter ou le contrôler [9–15].

Depuis une dizaine d'années et l'avènement des nanotechnologies, de nombreux scientifiques ont envisagé d'utiliser les plasmas poussiéreux dans la course à la miniaturisation. Cette idée vient d'un constat que l'on peut formuler simplement : plutôt que de réduire la taille des objets comme dans les techniques classiques actuelles (lithographie par exemple, approche "top-down"), pourquoi ne pas faire le contraire et partir de molécules que l'on ferait grossir jusqu'à atteindre la taille désirée (approche "bottom-up"). Les plasmas poussiéreux répondent parfaitement à cet objectif, le défi revenant à contrôler la phase de croissance des poussières depuis les premiers précurseurs moléculaires. Les plasmas poussiéreux sont ainsi devenus des milieux "utiles". On les utilise ainsi pour la formation de nanocristaux de silicium [16] dont l'incorporation dans des couches minces donne naissance à des couches nanostructurées aux propriétés remarquables. On peut citer par exemple les applications concernant les cellules solaires : les couches composées de silicium amorphe et de nanocristaux de silicium ont des propriétés opto-électroniques supérieures à la moyenne [17]. Ces nanocristaux peuvent également être utilisés pour les futures générations de transistors [18] et de mémoires [19] que l'on regroupe sous le terme de dispositifs à 1 électron. En effet, pour ces applications, la faible taille des nanocristaux (< 10 nm) permet de limiter le transport de l'information à un nombre très faible d'électrons (phénomène du blocage de Coulomb). Cela permet notamment de limiter la chaleur créée par le passage du courant et d'augmenter plus facilement la densité des composants. Les nanoparticules carbonées sont également d'un grand intérêt. Ainsi, des plasmas poussiéreux en méthane [20–22] ou en acétylène [20, 21, 23, 24] sont utilisés pour la fabrication de films DLC (Diamond-like Carbon) [25] ou de diamant nanocristallin [26] dont la dureté est extrême. Les études dans ces plasmas hydrocarbonés ont également un intérêt astrophysique pour l'étude de certaines atmosphères planétaires comme celle de Titan (satellite de Saturne) dont l'atmosphère, constituée d'azote et de méthane, contient une densité importante d'aérosols [27].

La fusion thermonucléaire est également concernée par les plasmas poussiéreux [28]. En effet, le plasma très chaud est confiné au centre du réacteur par des champs magnétiques intenses, mais de l'énergie se dépose malgré tout sur les parois internes du réacteur soit lors du fonctionnement normal soit lors de disruptions. Ceci entraîne la pulvérisation du matériau constituant la paroi et l'éjection de poussières ou de précurseurs moléculaires dans le réacteur [29]. Ces impuretés peuvent altérer sérieusement les performances du réacteur et posent de plus des problèmes liés à la radio-toxicité des poussières qui peuvent fixer le tritium radioactif à leur surface. Dans ce contexte, les poussières ont un impact néfaste.

I.2 Quelques notions

I.2.a Création d'un plasma poussiéreux

Afin d'étudier un plasma poussiéreux en laboratoire, il faut de toute évidence commencer par le créer. La recette est simple et comporte deux ingrédients majeurs : un plasma et des poussières. Le choix du plasma est relativement libre mais par mesure de simplicité on utilise le plus souvent un plasma froid basse pression qui peut être créé par une décharge continue ou radiofréquence dans un gaz. Il s'agit ensuite d'amener le second ingrédient et pour cela différentes techniques existent :

- l'injection artificielle de poussières directement dans le plasma [30–33]
- la formation de poussières par ajout d'un gaz réactif (SiH_4 [8–12, 34, 35], CH_4 [20, 21, 36], C_2H_2 [20, 21, 23, 24])
- la formation de poussières par pulvérisation d'une cible [7, 37–40]

La première méthode consiste généralement à injecter des poussières micrométriques dans le plasma avec un système d'introduction de type "salière". Nous verrons par la suite que dans cette gamme de taille, la force de gravité est non-négligeable et influence les phénomènes obtenus. Afin de s'affranchir de la contrainte gravitationnelle, certaines expériences sont réalisées en microgravité [41] et notamment dans l'ISS [42]. Les deux autres méthodes consistent à former des poussières à partir de précurseurs moléculaires qui peuvent provenir soit d'un gaz réactif, soit des surfaces exposées au plasma. Le plasma va favoriser les réactions chimiques qui vont permettre la croissance des poussières depuis les précurseurs moléculaires puis les macromolécules, les nanoparticules et enfin les poussières de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres peu sensibles à la gravité.

I.2.b Phénomènes de charge

Une poussière immergée dans un plasma va immédiatement être soumise au flux des différentes espèces chargées du plasma, généralement les électrons et les ions.

Cette poussière va donc se comporter comme une sonde de Langmuir et acquérir un potentiel communément appelé potentiel flottant qui correspond au potentiel pour lequel la somme des courants est nulle. Du fait de la plus grande mobilité des électrons ce potentiel est classiquement négatif par rapport au potentiel plasma [31, 43–47]. La poussière se charge donc négativement et, si l'on considère qu'elle est assimilable à une capacité sphérique, sa charge Q_d est donnée par :

$$Q_d = 4\pi\epsilon_0 r_d V_d \quad (\text{I.1})$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide, r_d le rayon de la poussière et V_d son potentiel de surface relativement au potentiel plasma (et donc négatif). Ainsi, la charge électrique d'une poussière est directement proportionnelle au rayon de celle-ci. Typiquement, une poussière de $1\mu\text{m}$ peut porter plus d'un millier d'électrons à sa surface. Cette dépendance est d'une grande importance pour comprendre et analyser les différents phénomènes observés dans les plasmas poussiéreux. En effet, cette charge va conditionner le rapport de certaines forces qui s'exercent sur la poussière.

I.2.c Forces s'exerçant sur une poussière

Les forces qui s'exercent sur une poussière dépendent toutes du rayon de celle-ci, soit directement, soit par l'intermédiaire de la charge électrique via l'équation I.1. Nous pouvons ainsi classer ces forces en deux catégories, celles indépendantes de la charge et celles déterminées par celle-ci. Les forces qui seront utilisées dans ce manuscrit peuvent ainsi être décrites de la façon suivante :

Dans la catégorie des forces indépendantes de la charge, les nominées sont :

- La force de gravité
- La force de friction ou d'entraînement (en cas de flux de gaz) des neutres
- La force de thermophorèse entraînant les poussières vers les zones froides

Dans la catégorie des forces dépendantes de la charge :

- La force électrique
- La force d'entraînement ionique [48–54]
- La force d'interaction entre poussières

Ainsi, que ce soit via la charge ou directement par le rayon, la taille des poussières va être déterminante pour leur dynamique. Les poussières seront donc confinées dans le plasma si les forces piégeantes l'emportent. Dans les expériences de laboratoire classiques, la principale force piégeante est la force électrique $\vec{F}_E = Q_p \vec{E}$ induite par le fort champ électrique présent dans les régions de gaine, et susceptible de compenser la gravité. A l'échelle submicrométrique, les forces ioniques et la thermophorèse auront un rôle de plus en plus déterminant dans le comportement des poussières. L'équilibre de ces différentes forces va ainsi définir la forme du nuage de poussières et la dynamique de celui-ci comme nous le verrons dans le chapitre III.

Chapitre II

Dispositifs expérimentaux et diagnostics

L'essentiel des résultats a été obtenu sur deux réacteurs différents : le réacteur Silane et le réacteur PKE-Nefedov. Les expériences réalisées dans ces deux réacteurs ont pour point commun un plasma d'argon basse pression créé par une décharge radiofréquence (13.56 MHz) à couplage capacitif. Les différences résident principalement dans la géométrie des réacteurs, les paramètres expérimentaux et la façon de former les poussières. Ce dernier point est la différence fondamentale entre ces réacteurs. Dans Silane, les poussières sont formées par ajout d'un faible pourcentage de silane dans l'argon. Dans PKE-Nefedov, les poussières sont formées par pulvérisation d'un matériau polymère préalablement déposé sur les électrodes. Les caractéristiques plus détaillées de ces réacteurs ainsi qu'une brève description des diagnostics utilisés sont données ci-dessous.

II.1 Réacteur Silane

Le plasma est créé dans une boîte à décharge (diamètre $\simeq 13$ cm, hauteur $\simeq 3.7$ cm) placée à l'intérieur d'une chambre cylindrique (diamètre $\simeq 40$ cm et hauteur $\simeq 30$ cm). Cet ensemble est décrit sur la figure II.1 et dans [11, 55]. La boîte à décharge est percée de 4 fentes verticales (largeur 0.2 cm, hauteur 4 cm) permettant un accès optique au plasma. Cette boîte ainsi que sa base (constituée d'une grille) sont reliées à la masse. L'électrode radiofréquence ferme le haut de la boîte. Sa structure en pomme de douche assure également l'introduction du mélange gazeux argon-silane. Les conditions typiques de décharge sont les suivantes :

- Pression $\simeq 0.12$ mbar
- Débits : Ar 20 sccm, SiH₄ 1.2 sccm
- Puissance $\simeq 10$ W

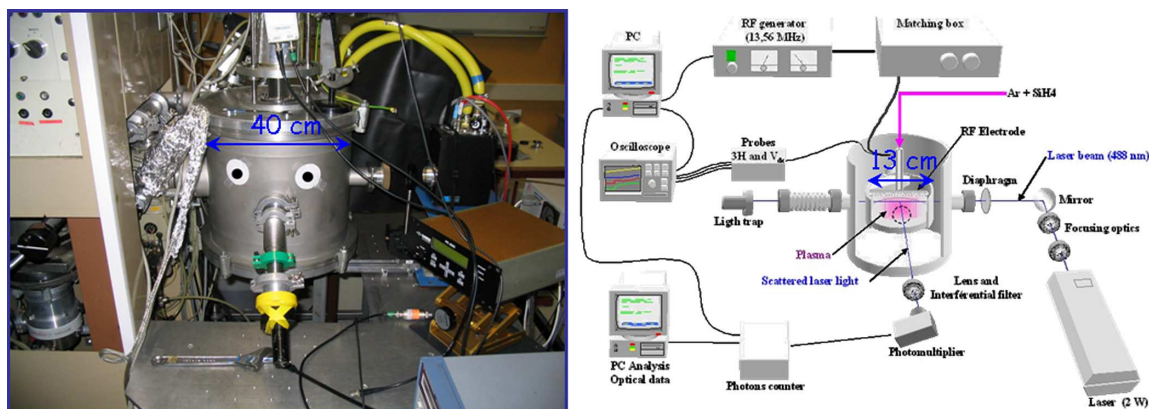


Figure II.1 Réacteur Silane, (a) vue du caisson extérieur, (b) schéma représentant la boîte à décharge ainsi que les principaux diagnostics [55]

Ce réacteur est surtout utilisé pour la synthèse de nanocristaux (< 10 nm) de silicium pour les applications industrielles. La majorité des études menées sur Silane a pour but de comprendre et de maîtriser la croissance de ces nanocristaux.

II.2 Réacteur PKE-Nefedov

Le réacteur PKE-Nefedov a été développé par le MPE et l'IHED avec le soutien technique de la société Kayser-Threde GmbH [42]. Il est de forme cubique ($10 \times 10 \times 5$ cm) et ses parois latérales sont entièrement en verre afin de permettre une observation optimale du nuage de poussières (voir figure II.2). Les électrodes, séparées de 3 cm, ont un diamètre d'environ 4 cm. Le plasma est ainsi peu confiné latéralement. Le champ radiofréquence est appliqué aux deux électrodes alternativement (mode "push-pull") afin d'assurer une plus grande homogénéité du plasma. L'introduction du gaz s'effectue par une ouverture placée sur la partie supérieure du cube. Les conditions typiques de décharge sont les suivantes :

- Pression $\simeq 1.5$ mbar statique (pas de débit)
- Puissance $\simeq 3$ W

Le réacteur PKE-Nefedov, de par ses caractéristiques techniques, est principalement dédié à l'étude du comportement et de l'organisation du nuage de poussières. Un introducteur de poussières inséré dans l'électrode supérieure permet d'injecter des poussières de mélamine formaldéhyde calibrées si nécessaire (le dépôt polymère est constitué par ces poussières). Les principaux résultats ont été obtenus pour des poussières formées dont la taille est de quelques centaines de nanomètres. Ainsi, les expériences menées sur PKE-Nefedov se distinguent notamment de celles menées sur

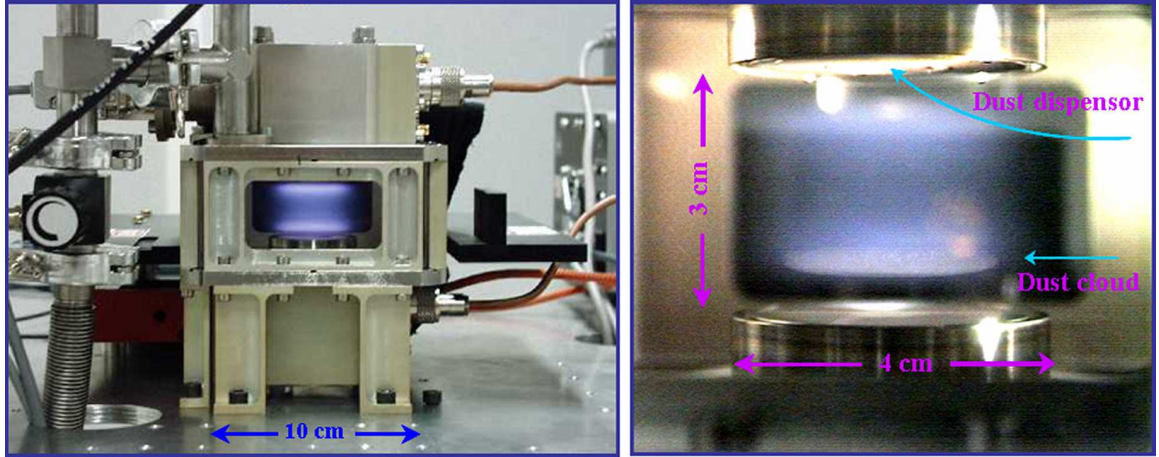


Figure II.2 Réacteur PKE : (a) vue générale, (b) vue de l'espace interélectrode avec un nuage de poussières en suspension au voisinage de la gaine inférieure.

Silane par la taille des poussières étudiées. La complémentarité entre ces deux réacteurs est par conséquent un réel atout pour mieux comprendre la physique des plasmas poussiéreux.

II.3 Diagnostics

Afin de caractériser les plasmas poussiéreux créés dans ces réacteurs, différents diagnostics ont été utilisés.

Les diagnostics les plus faciles à mettre en oeuvre et qui nous servent de référence sont basés sur les caractéristiques électriques de la décharge. Ainsi, des informations sur le plasma et les poussières sont déduites des mesures des 1^{ère} (1H) ou 3^{ème} (3H) harmoniques du courant de décharge [34] ou de la tension d'auto-polarisation (V_{dc}). En effet, les poussières attachant les électrons libres du plasma (cf. section I.2.b), les caractéristiques de ce dernier sont modifiées. Nous verrons plus précisément dans le chapitre III comment ces diagnostics permettent de suivre la croissance des poussières au sein du plasma.

Des diagnostics optiques sont également utilisés comme par exemple la spectroscopie d'émission optique afin d'identifier les différentes espèces chimiques présentes dans le plasma et de suivre leur évolution au cours de la croissance des poussières. Afin d'observer l'influence globale des poussières sur le plasma, l'imagerie de celui-ci est réalisée par caméra CCD standard ou rapide (notamment pour les phénomènes instables). Ces mêmes caméras sont également utilisées pour visualiser le nuage de poussières. Pour cela, un faisceau (sur Silane) ou une nappe laser (sur PKE-Nefedov)

	1H	3H	V_{dc}	Spectroscopie d'émission	Fibres optiques	Imagerie CCD	Imagerie Rapide	MEB	HRTEM
Silane	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PKE	X			X	X	X	X	X	

Tableau II.1 Diagnostics utilisés sur les réacteurs Silane et PKE-Nefedov

est utilisé pour éclairer les poussières. La diffusion de la lumière laser (LLS : Laser Light Scattering) par ces poussières est alors détectée par les caméras. Les informations provenant des caméras et concernant le plasma ou les poussières, sont corrélées à des résultats obtenus par des fibres optiques couplées à des photomultiplicateurs.

Les poussières formées ont également été analysées ex-situ par des techniques de microscopie. Pour cela, les poussières sont déposées sur des substrats placés sur l'électrode inférieure. La taille et la densité de poussières peuvent ainsi être déduites par microscopie électronique à balayage (MEB) et leur structure par microscopie électronique en transmission à haute résolution (HRTEM).

Ces diagnostics ont été utilisés soit sur Silane soit sur PKE-Nefedov. Afin de comparer les résultats obtenus, la grande majorité des diagnostics a été testée sur les deux réacteurs comme résumé dans le tableau II.1.

Chapitre III

Formation de poussières et structure du nuage

Dans ce chapitre les différents résultats concernant la formation et la caractérisation des poussières seront abordés. Cependant, les instabilités liées à ce processus de formation seront détaillées dans le chapitre IV car elles constituent un domaine d'étude à part entière.

III.1 Mécanismes de formation

Dans les deux expériences utilisées dans ce manuscrit, la formation des poussières a globalement la même origine. En effet, que ce soit par l'utilisation d'un gaz réactif comme le silane ou par pulvérisation d'un matériau polymère, la première étape est la création des précurseurs moléculaires à l'origine du processus de croissance. Cette étape ainsi que les suivantes ont été étudiées de façon précise dans le cas du silane [12, 15]. Le schéma le plus couramment admis est le suivant : les précurseurs moléculaires vont, par le biais de différentes réactions chimiques, donner naissance à des macromolécules puis à des nanoparticules. Ces nanoparticules vont s'accumuler dans le plasma jusqu'à atteindre une densité critique qui déclenchera le processus d'agglomération (ou d'agrégation). Ce processus se poursuivra jusqu'à ce que les poussières atteignent une taille de quelques dizaines de nanomètres à partir de laquelle la croissance est essentiellement assurée par le dépôt de radicaux à la surface des poussières. Ce schéma de croissance est résumé sur la figure III.1 [55].

Bien que le processus de croissance sur PKE-Nefedov ne soit pas bien connu, nous pouvons considérer qu'il suit globalement les étapes décrites ci-dessus. La cinétique de croissance et les précurseurs moléculaires étant évidemment différents.

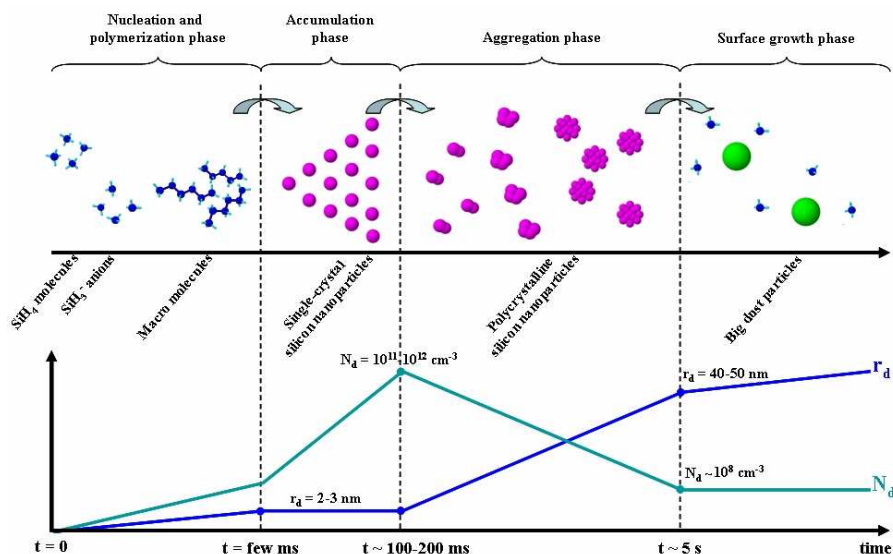


Figure III.1 Étapes de la croissance des poussières en chimie SiH_4 [55]

III.2 Suivi de la croissance des poussières[†]

Comme nous l'avons vu dans la section I.2.b, les poussières acquièrent une charge électrique en capturant les électrons libres du plasma. Ces électrons perdus ne participent donc plus au courant de décharge. Les diagnostics basés sur les caractéristiques électriques de la décharge (section II.3) vont ainsi être de précieux indicateurs de ce phénomène. Le nombre d'électrons perdus étant proportionnel à la taille des poussières, ces diagnostics peuvent révéler les différentes étapes de formation. La figure III.2 donne un exemple de l'identification de ces phases à partir de la mesure de l'amplitude de $3H$. La décroissance générale de cette courbe traduit la perte d'électrons libres du plasma capturés par les poussières en croissance. Nous avons notamment mis en évidence qu'une instabilité permet de caractériser la transition entre la phase d'accumulation des nanoparticules et la phase d'agrégation. La preuve sera apportée en section III.3.a et une étude de l'instabilité sera présentée en section IV.1.a.i. L'attachement électronique sur les poussières est un phénomène relativement universel dans les plasmas poussiéreux. En effet, nous avons obtenu des résultats similaires sur PKE-Nefedov comme le montre la comparaison présentée figure III.3. Sur la figure III.3(b) on constate la différence entre une expérience en argon pur et une ex-

[†]M. Cavarroc, M. Mikikian, G. Perrier, L. Boufendi, *Single-crystal silicon nanoparticles : An instability to check their synthesis*, Appl. Phys. Lett. **89**, 013107 (2006)

M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, H.M. Thomas, G.E. Morfill, A.P. Nefedov, V.E. Fortov and the PKE-Nefedov team, *Formation and Behavior of Dust Particle Clouds in a Radio-Frequency Discharge : Results in the Laboratory and under Microgravity Conditions*, New J. Phys. **5**, 19 (2003)

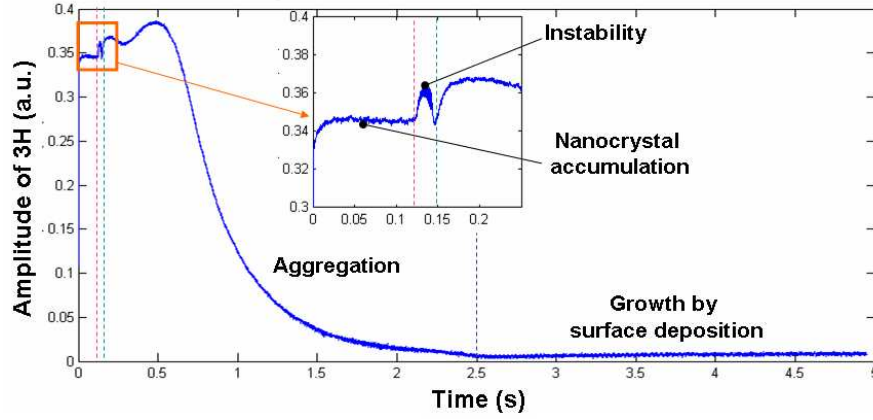


Figure III.2 Évolution temporelle de l'amplitude de 3H sur l'expérience Silane [16]

périence avec ajout de silane. En argon pur, le plasma est stable alors que les pertes électroniques interviennent lors de l'ajout de silane et donc lors de la formation de poussières. Cet effet est identique sur PKE-Nefedov. La décroissance de l'amplitude de 1H (figure III.3(a)) est identique à celle de l'expérience Silane bien que la cinétique de croissance sur PKE-Nefedov soit beaucoup plus lente. Afin de mettre en évidence que cette chute de l'amplitude de 1H est bien due à la croissance des poussières, l'amplitude du signal de diffusion laser recueilli par une caméra CCD a été superposée (figure III.3(a)). Nous constatons immédiatement que les signaux optiques (reliés à la croissance des poussières) et les signaux électriques (reliés à la perte d'électrons libres) sont clairement corrélés. Une bonne maîtrise de ces diagnostics électriques peut ainsi permettre de connaître en temps réel la phase de croissance des poussières. Cela revêt notamment une grande importance pour les premiers instants de la croissance pendant lesquels les poussières ont une taille nanométrique. En effet, de nouvelles applications potentielles des nanoparticules ne cessent d'émerger en microélectronique ou en nanotechnologie. Dans la section suivante nous verrons comment ce diagnostic électrique nous a permis de maîtriser la formation (et le dépôt) de nanoparticules cristallines (nanocristaux) de silicium.

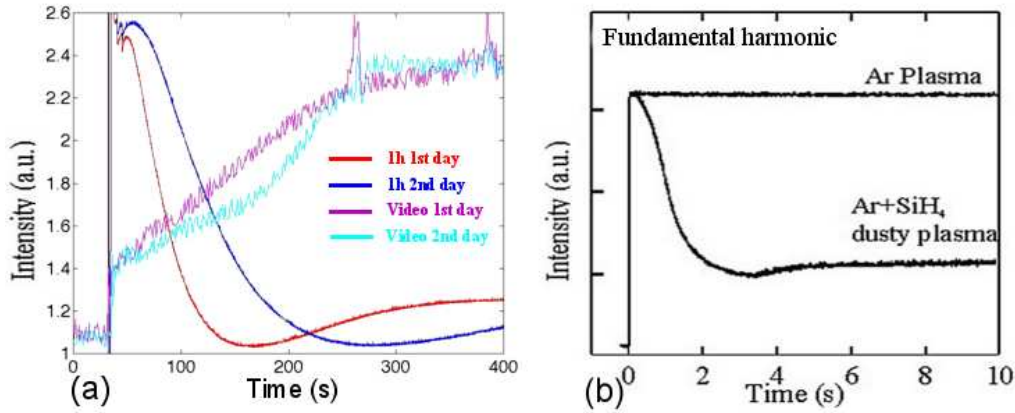


Figure III.3 Évolution de l'amplitude de 1H, (a) sur PKE-Nefedov à bord de l'ISS (corrélée au signal de diffusion laser), (b) sur Silane avec et sans gaz réactif [40].

III.3 Contrôle de la croissance de nanocristaux

Pour les applications industrielles nécessitant l'utilisation de nanoparticules de taille bien définie, une bonne connaissance de la cinétique de croissance des poussières est impérative. Nous avons mis en évidence que l'instabilité présentée figure III.2 peut être utilisée comme indicateur de l'instant idéal pour le dépôt de nanocristaux de silicium de 2 à 3 nm de diamètre. Pour cela, nous avons réalisé des dépôts à différents instants, avant, pendant et après l'instabilité. Une des difficultés de cette procédure est liée à la très courte durée de l'instabilité. Cependant, les résultats obtenus sont très concluants comme le montrent les clichés MEB présentés figure III.4.

III.3.a Taille des nanoparticules[†]

La figure III.4(a) montre qu'avant l'instabilité, seules des nanoparticules de 2 à 3 nm sont déposées. Pendant l'instabilité (figure III.4(b)) deux populations peuvent être distinguées : des nanoparticules indépendantes de 2 à 3 nm, mais également des poussières plus grosses qui correspondent à l'agglomération de deux nanoparticules. Après l'instabilité, la quasi-totalité des nanoparticules de 2 à 3 nm a disparu et ne résident que des agglomérats. Ce résultat permet de conclure que l'instabilité apparaît au moment précis où la phase d'agglomération débute. Cette instabilité sera décrite plus précisément à la section IV.1.a.i mais nous pouvons déjà décrire schématiquement les phénomènes responsables de son origine. En effet, une instabilité sur les caractéristiques électriques du plasma signifie que la densité électronique est perturbée. L'agglomération des premières nanoparticules représente en effet un changement

[†]M. Cavarroc, M. Mikikian, G. Perrier, L. Boufendi, *Single-crystal silicon nanoparticles : An instability to check their synthesis*, Appl. Phys. Lett. **89**, 013107 (2006)

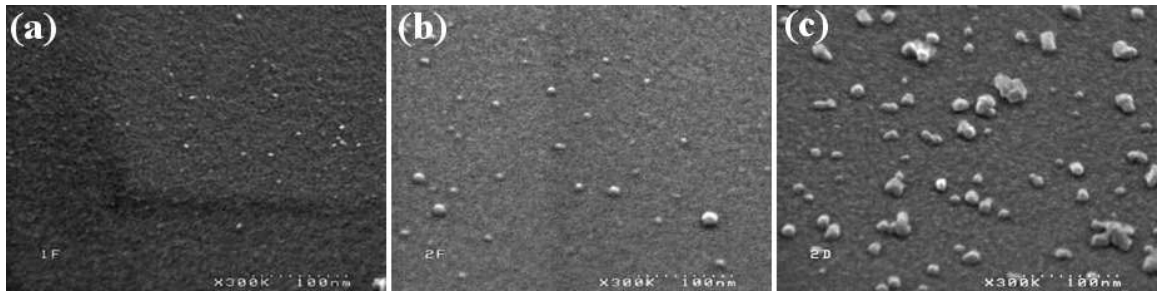


Figure III.4 Clichés MEB de nanoparticules déposées (a) avant, (b) pendant, (c) après, l'instabilité [16].

drastique pour la densité électronique. Avec une taille de 2 à 3 nm les nanoparticules sont chargées de façon stochastique et ne peuvent porter au maximum qu'un électron. Lors de l'agglomération, la taille des poussières change de façon significative et les processus de charge sont donc fortement modifiés entraînant l'apparition de l'instabilité. Ainsi, le diagnostic électrique nous permet, par la localisation de cette instabilité, de connaître exactement l'instant auquel est atteinte la densité maximale de nanoparticules de 2 à 3 nm de diamètre. L'expérience peut alors être stoppée à cet instant afin de déposer ces nanoparticules. Le nombre de nanoparticules déposées peut être augmenté en répétant l'expérience ou en pulsant la décharge.

III.3.b Structure des nanoparticules[†]

Nous savons maintenant comment obtenir des nanoparticules de silicium mais nous ne connaissons pas leur structure. La première étape consiste tout d'abord à savoir si ces nanoparticules sont cristallines ou amorphes. Pour cela, une analyse par microscopie électronique en transmission à haute résolution a été réalisée. La figure III.5 met clairement en évidence que les nanoparticules sont cristallines. En effet, les plans cristallins sont nettement visibles. Afin de caractériser cette structure nous avons utilisé deux méthodes. La première consiste à générer numériquement des réseaux cristallins tridimensionnels modèles et à les projeter sur les images HRTEM afin de tester la correspondance. Nous avons testé notamment les structures diamant et cfc (cubique face centrée). Cette technique ne nous a pas permis de conclure de façon catégorique sur la structure cristalline des nanoparticules. Une corrélation avec

[†]G. Viera, M. Mikikian, E. Bertran, P. Roca i Cabarrocas, L. Boufendi, *Atomic structure of the nanocrystalline Si particles appearing in nanostructured Si thin films produced in low-temperature radiofrequency plasmas*, J. Appl. Phys. **92**, 4684 (2002)

G. Viera, S. Huet, M. Mikikian, L. Boufendi, *Electron diffraction and high-resolution transmission microscopy studies of nanostructured Si thin films deposited by radiofrequency dusty plasmas*, Thin Solid Films **403-404**, 467 (2002)

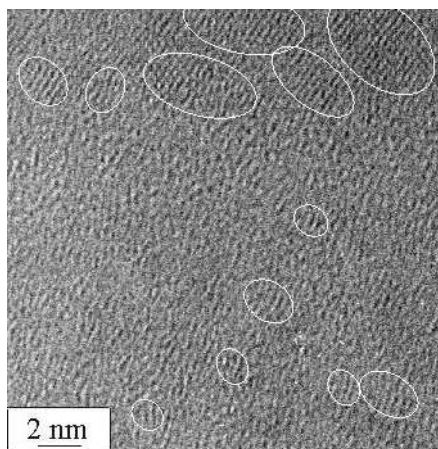


Figure III.5 Cliché HRTEM montrant la structure cristalline des nanoparticules de silicium [56, 57].

des résultats de SAED (Selected Area Electron Diffraction) a permis d'établir que les nanoparticules de 2 à 3 nm ont une structure cristalline de type cfc. Cette structure est instable pour des poussières plus grosses mais les effets de taille jouent un rôle prépondérant dans la stabilisation de cette structure à l'échelle nanométrique. Pour des tailles supérieures, la structure diamant, habituelle pour le silicium, est obtenue.

III.4 Forme du nuage de poussières[†]

Nous venons de voir ci-dessus la formation de nanoparticules de silicium. Dans cette section, nous allons aborder plus précisément la notion de nuage de poussières et notamment sa structure géométrique. Pour cela nous allons considérer les résultats obtenus sur le réacteur PKE-Nefedov qui permet une observation aisée du nuage de poussières. Lorsque le nuage est constitué d'une forte densité de nanoparticules, celui-ci est difficilement observable par les techniques usuelles de diffusion de la lumière laser. Sur PKE-Nefedov, les expériences sont le plus souvent réalisées avec des poussières formées dont la taille est suffisamment grande pour permettre leur observation. Pour cela, le nuage de poussières est éclairé par une nappe laser et la lumière diffusée est recueillie par des caméras CCD standards.

Nous avons vu à la section I.2.c que diverses forces s'exercent sur les poussières. Le bilan des forces en présence détermine alors la structure du nuage. Quelques exemples de nuages de poussières obtenus sur PKE-Nefedov sont présentés sur la figure III.6.

[†]M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, H.M. Thomas, G.E. Morfill, A.P. Nefedov, V.E. Fortov and the PKE-Nefedov team, *Formation and Behavior of Dust Particle Clouds in a Radio-Frequency Discharge : Results in the Laboratory and under Microgravity Conditions*, New J. Phys. **5**, 19 (2003)

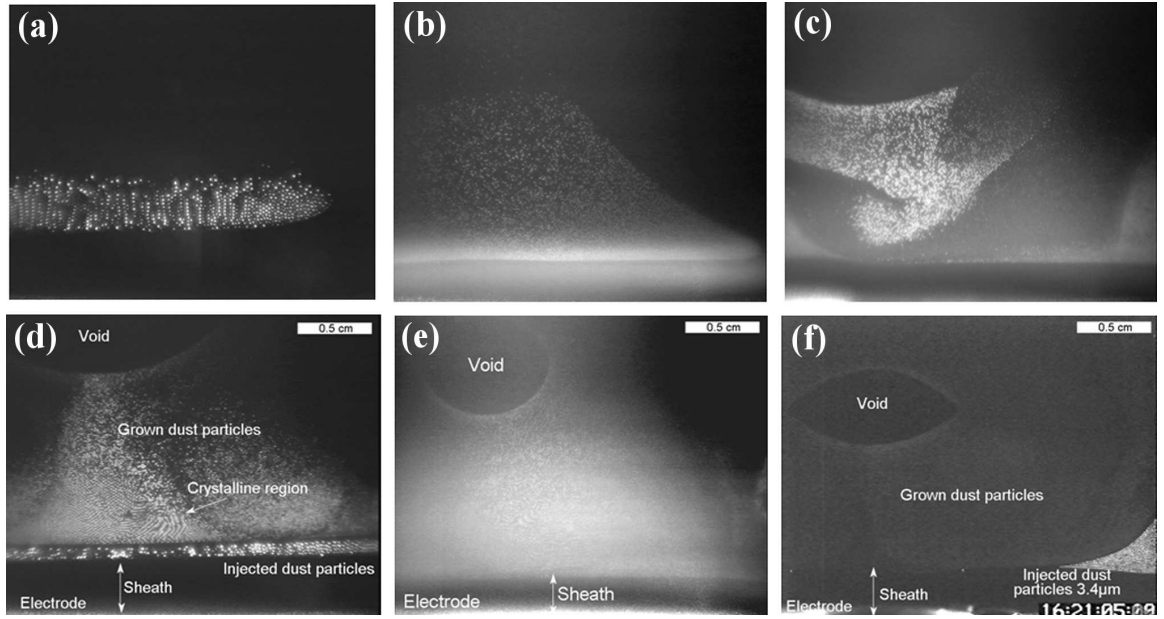


Figure III.6 Nuages de poussières obtenus sur PKE [40] : (a) quelques couches de poussières injectées ($3.4 \mu\text{m}$), (b) dôme de poussières formées, (c) poussières formées de différentes tailles sous l'influence d'une inhomogénéité sur l'électrode inférieure, (d) poussières injectées et formées avec apparition de régions cristallines et d'un void, (e) nuage dense de poussières formées avec un void, (f) expérience en microgravité avec des poussières injectées et formées et présence du void.

Ces images sont prises à un angle de 90° par rapport à la nappe laser. Sur la figure III.6(e) sont clairement visibles l'électrode inférieure et la gaine. La caméra n'est pas centrée sur le réacteur et le centre géométrique de la décharge se situe alors au voisinage du centre de la zone sombre appelée "void" que nous décrirons par la suite.

Sur la figure III.6(a), un nuage de poussières injectées de $3.4 \mu\text{m}$ est en suspension au voisinage de la gaine inférieure où réside un champ électrique permettant de compenser la gravité. En effet, cette expérience a été réalisée en laboratoire avec, par conséquent, une force de gravité importante pour ces poussières micrométriques. On constate que le nuage est constitué de quelques couches superposées et on dénote une certaine organisation du nuage. En effet, les poussières chargées négativement (voir section I.2.b) interagissent fortement et forment alors une structure appelée cristal Coulombien. En laboratoire les cristaux Coulombiens subissent une forte contrainte gravitationnelle et se limitent le plus souvent à quelques couches de poussières. Ainsi les effets tridimensionnels ne peuvent être étudiés rigoureusement que dans des conditions de microgravité [41, 42].

La figure III.6(b) montre un nuage de poussières formées, en forme de dôme. Les poussières formées sont plus petites que les poussières injectées et peuvent ainsi occuper un volume plus important. L'importance de la gravité est mise en évidence sur la figure III.6(d) où il y a coexistence de poussières submicrométriques formées et de poussières micrométriques injectées. Du fait de la gravité, les poussières les plus grosses occupent logiquement les couches les plus basses. Leur position d'équilibre est atteinte plus près de l'électrode car le champ électrique y est plus fort.

Les poussières sont fortement chargées et sont par conséquent très sensibles aux champs électriques. De légères perturbations de ce champ peuvent induire des mouvements complexes des poussières. Étant donné qu'elles interagissent également entre elles, elles vont se comporter comme un fluide comme le montre par exemple la figure III.6(c). Sur cette image, une fine plaquette d'inox a été placée sur l'électrode inférieure pour prélever des poussières. Cette plaquette induit sur ses bords une variation locale du champ électrique (marche de potentiel entre le bord de la plaquette et l'électrode). Cet effet se traduit par la formation d'un enroulement de poussières juste au-dessus du bord de la plaquette.

Les figures III.6(e) et (f) mettent en évidence la formation au sein du nuage de poussières, d'une zone dépourvue de poussières et appelée void [39–41, 51, 53, 58–70]. Cette zone apparaît à proximité de la région centrale du plasma. Elle est le siège de très nombreux phénomènes dont l'étude constitue une part importante de ce manuscrit. La théorie généralement admise pour expliquer l'existence de cette zone est basée sur l'équilibre entre deux forces liées notamment à la charge des poussières. Une force électrique dirigée vers le centre du plasma (due à la différence de potentiel entre le plasma contenu dans le void et celui contenant le nuage de poussières) et une force ionique dirigée vers l'extérieur (due aux ions chassant les poussières de cette zone centrale) [59]. L'équilibre entre ces deux forces est obtenu à la frontière du void. Ce void est également observé en microgravité comme le montre la figure III.6(f) obtenue à bord de l'ISS. En comparant les figures III.6(e) et (f), on remarque qu'en laboratoire le void est légèrement décalé vers le haut du réacteur. Cet effet est certainement dû à une faible composante gravitationnelle qui entraîne les poussières vers le bas et donc le void vers le haut. Les deux forces à l'origine du void sont d'autant plus fortes que la taille des poussières est grande. Lorsque celle-ci est plus faible que sur la figure III.6(e), on peut observer des situations sans void. Un exemple est donné sur la figure III.7 où la caméra forme un angle faible par rapport à la direction du laser afin de mieux détecter les poussières de petite taille. La taille du void s'avère être fortement dépendante de la puissance radiofréquence injectée. Plus celle-ci est grande, plus la taille du void augmente. Récemment le void a été fermé avec des poussières micrométriques lors d'expériences en microgravité en diminuant la puissance injectée jusqu'à atteindre des valeurs proches de l'extinction du plasma [71].

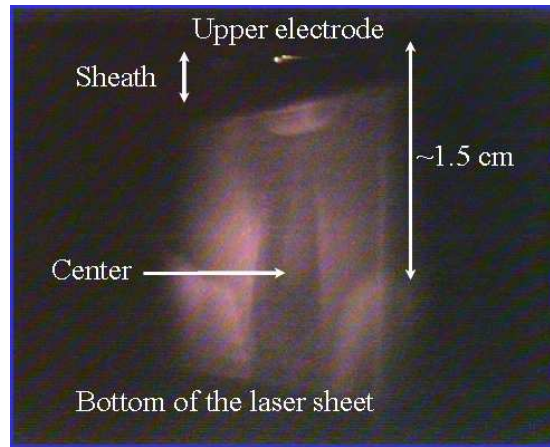


Figure III.7 Nuage de poussières formées sans void obtenu sur PKE-Nefedov en laboratoire. La caméra forme un angle faible par rapport à la direction du laser.

III.5 Générations successives de poussières

Dans les sections ci-dessus, nous avons vu comment la première génération de poussières se formait et quelle était la structure du nuage de poussières obtenu. Si les précurseurs à l'origine du processus de formation sont régulièrement amenés au sein de la décharge, de nouvelles générations de poussières peuvent apparaître. Pour cela, les conditions de formation doivent être à nouveau réunies. La structure du nuage de poussières se révèle relativement importante dans ce processus comme nous allons le voir ci-dessous.

III.5.a Générations successives sur PKE-Nefedov[†]

Nous avons observé sur PKE-Nefedov que le void est le siège de la formation de la nouvelle génération de poussières. Celle-ci va remplir le void, puis un nouveau void va émerger et ainsi de suite. Nous avons ainsi obtenu des générations successives de poussières comme le montre la figure III.8. Sur cette figure sont clairement visibles trois générations de poussières qui sont apparues les unes après les autres depuis la région de void. On observe également un nouveau void au milieu de la 3^{ème} génération.

[†]M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, H.M. Thomas, G.E. Morfill, A.P. Nefedov, V.E. Fortov and the PKE-Nefedov team, *Formation and Behavior of Dust Particle Clouds in a Radio-Frequency Discharge : Results in the Laboratory and under Microgravity Conditions*, New J. Phys. **5**, 19 (2003)

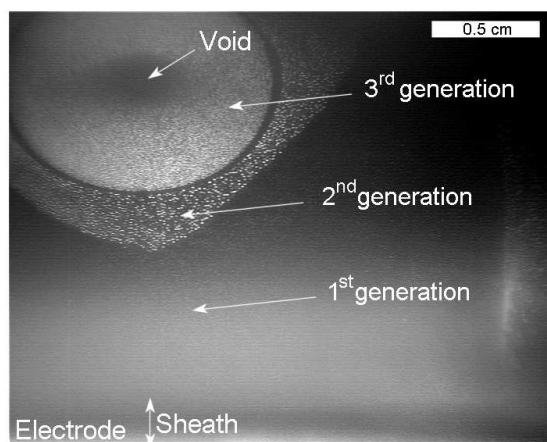


Figure III.8 Générations successives de poussières sur PKE-Nefedov [40].

III.5.b Générations successives sur Silane[†]

Nous avons voulu vérifier si le phénomène de générations successives de poussières à partir de la région de void était identique sur Silane. Cependant, ce réacteur ne permet pas une visualisation directe du nuage de poussières. Pour contourner cette limitation, nous avons développé une procédure indirecte pour mettre en évidence ce phénomène. Deux preuves devaient être apportées. La première était de prouver l'existence d'un void dans un plasma poussiéreux créé à partir de silane, et la seconde était de montrer qu'une nouvelle génération naissait à partir de ce void. Le fait que des générations successives de poussières apparaissent était déjà connu mais l'existence d'un void et son implication dans ce processus n'avaient jamais été formellement prouvées. En effet, les générations successives apparaissent clairement sur les caractéristiques électriques de la décharge comme le montre la figure III.9. Afin de replacer cette figure dans le contexte de la formation de poussières en silane, nous avons ajouté en encart la figure III.2 et indiqué la période qu'elle recouvre. Les générations successives sont alors indiquées par des oscillations basse fréquence dont la période est de l'ordre de 1 minute.

L'existence du void et la formation de nouvelles générations de poussières à l'intérieur de celui-ci ont été mises en évidence en corrélant différents diagnostics : 3H, la spectroscopie d'émission et la diffusion laser (figure III.10). La spectroscopie consiste à suivre l'évolution temporelle de l'émission de la raie 750.38 nm de l'argon au centre du plasma. La diffusion laser est réalisée en utilisant un laser à argon de 2 W couplé à un photomultiplicateur refroidi à eau (haute sensibilité) et recueillant le signal de diffusion provenant du centre de la décharge.

[†]M. Cavarroc, M. Mikikian, Y. Tessier, L. Boufendi, *Successive Generations of Dust in Complex Plasmas : A Cyclic Phenomenon in the Void Region*, Phys. Rev. Lett. **100**, 045001 (2008)

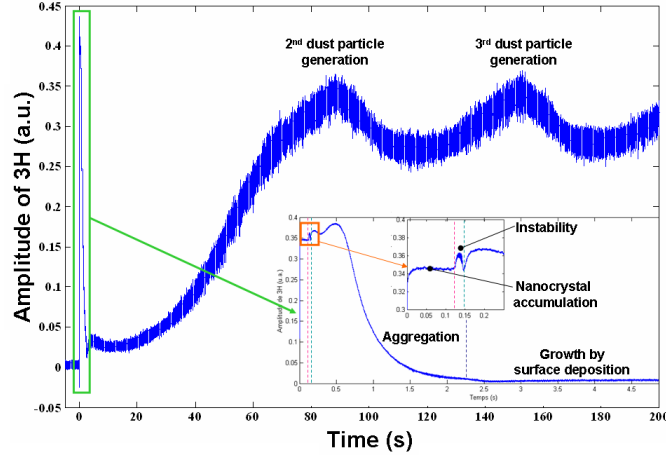


Figure III.9 Amplitude de 3H montrant l'apparition de générations successives en silane [70].

La corrélation entre ces diagnostics est délicate et afin d'expliquer les évolutions observées sur la figure III.10 nous avons notamment utilisé les acquis provenant de PKE-Nefedov. De plus, pour prouver l'existence du void nous allons commencer par émettre l'hypothèse de sa présence et montrer que les résultats de la figure III.10 sont cohérents avec cette hypothèse. Les évolutions des trois courbes de la figure III.10 peuvent être décrites schématiquement avec le raisonnement suivant :

- 3H augmente si de plus en plus d'électrons libres sont présents dans le plasma c'est à dire si la capture électronique par les poussières devient faible. Pour cela, deux possibilités existent, la présence d'une faible densité de grosses poussières ou d'une forte densité de petites poussières. En effet, la charge globale représentée par le nuage de poussières est globalement identique dans les deux cas. L'interprétation des variations de 3H doit alors prendre en compte cette équivalence.
- $I_{750.38}$ au centre du plasma augmente si un void se forme et donc si les poussières sont chassées du centre du plasma.
- Le signal de LLS au centre du plasma augmente si le nombre ou la taille des poussières augmente. Il augmente donc si des poussières se forment dans le void.

A partir de ces dépendances, la figure III.10 met clairement en évidence qu'après la formation de la première génération, un void s'ouvre (3H et $I_{750.38}$ augmentent) et chasse les grosses poussières de première génération. Ensuite des poussières commencent à se former à l'intérieur du void (3H se stabilise puis décroît, $I_{750.38}$ chute et le signal de LLS augmente). Le processus recommence alors avec l'ouverture d'un nouveau void ($I_{750.38}$ augmente, le signal de LLS disparaît). A cet instant 3H varie faiblement car les pertes de grosses poussières fortement chargées sont partiellement

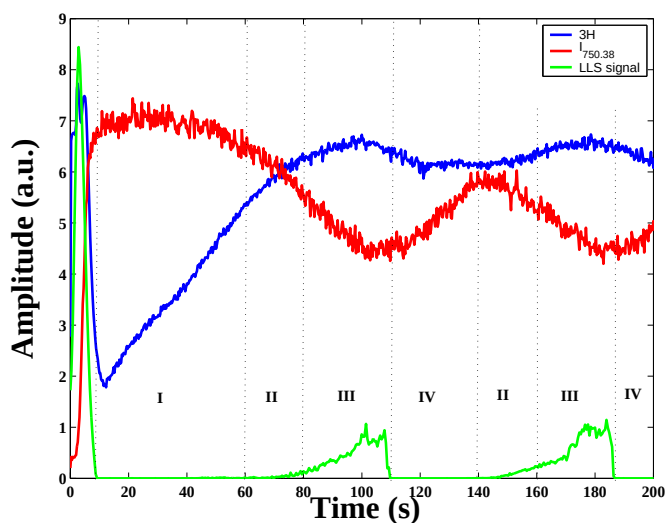


Figure III.10 Mise en évidence de l'existence d'un void sur Silane : corrélation entre 3H, l'intensité d'une raie d'argon et la diffusion laser [70].

compensées par l'apparition d'une forte densité de petites poussières faiblement chargées.

Afin de confirmer ces résultats nous avons effectué un dépôt de poussières à un instant où coexistent au moins deux générations. Pour cela nous avons placé des substrats à différents endroits sur l'électrode inférieure. Nous avons ensuite effectué une analyse par MEB afin de vérifier la répartition spatiale des populations de poussières. Ces résultats se sont avérés parfaitement concordants avec l'hypothèse de la formation des nouvelles générations de poussières dans le void. En effet, nous avons observé la présence d'une grande quantité de petites poussières sur le substrat placé au centre du réacteur. Ces petites poussières sont de moins en moins nombreuses au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. A l'inverse les grosses poussières sont majoritaires sur les substrats placés au bord de l'électrode et minoritaires au centre. La figure III.11 schématise la façon dont ont été réalisés les dépôts et propose un modèle de la structure du nuage de poussières constitué de générations successives de poussières (trois dans l'exemple donné).

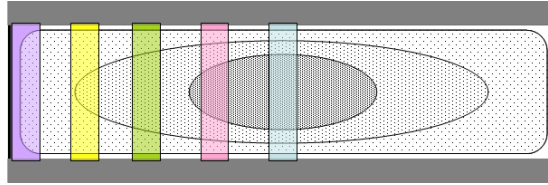


Figure III.11 Modèle du void sur Silane. Les zones en pointillés représentent différentes générations de poussières (les plus grosses à l'extérieur). Les barres verticales représentent le volume de poussières que les différents substrats ont recueilli [70].

III.6 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons vu les méthodes qui nous ont permis de suivre et de contrôler la formation et la croissance des poussières dans les deux réacteurs étudiés. Nous avons mis en évidence que les caractéristiques électriques de la décharge évoluent de façon similaire dans les deux réacteurs. Cela souligne l'universalité du phénomène d'attachement électronique.

Les mesures électriques laissent apparaître des phénomènes instables qui sont liés au démarrage de la phase d'agrégation des nanoparticules de silicium. En utilisant cette instabilité nous avons développé une technique permettant de contrôler le dépôt de nanocristaux de silicium de taille définie. Cette maîtrise est d'un grand intérêt pour les applications industrielles nécessitant le dépôt de nanocristaux de silicium. On citera par exemple les couches nanostructurées (silicium polymorphe) pour les cellules solaires ou les nouvelles générations de transistors utilisant les nanocristaux pour le contrôle du passage du courant. Dans ce cas, les nanocristaux sont déposés dans la couche d'oxyde entre la source et le drain.

Nous avons aussi montré que les générations successives de poussières naissent à partir du void. Cette déduction a été faite en corrélant les résultats des deux réacteurs et en développant une technique indirecte pour mettre en évidence ce phénomène sur Silane. Ce point soulève le problème du dépôt de poussières lorsqu'une nouvelle génération a commencé à se former. En effet, à cet instant la structure du nuage est complexe et inhomogène, avec un maximum de petites poussières au centre et de grosses sur les bords. La formation du void est primordiale dans ce phénomène. La diffusion de la lumière laser est souvent utilisée pour la détection des poussières dans les réacteurs. Si cette observation est réalisée au centre du plasma, la présence du void peut induire l'expérimentateur en erreur. En effet, l'absence de signal de diffusion au centre ne signifie pas que le plasma ne contient pas de poussières.

Chapitre IV

Instabilités dans les plasmas poussiéreux

Lorsque la densité de poussières présentes dans un plasma devient relativement importante, le plasma peut être fortement perturbé. En effet, nous avons vu que les poussières capturent les électrons libres du plasma. Lorsque cette perte d'électrons devient non-négligeable, la stabilité du plasma est affectée et des phénomènes instables apparaissent. Une part importante de mon activité de recherche a été dédiée à l'étude de ces instabilités qui se rencontrent dans de nombreuses conditions expérimentales et qui peuvent prendre des formes très diverses. Par conséquent, un effort constant a été apporté à la corrélation et à la comparaison des résultats afin de mettre en évidence le caractère universel de ces phénomènes.

IV.1 Instabilités durant la formation de poussières

Nous avons vu brièvement dans la section III.2, que des instabilités peuvent apparaître pendant la formation de poussières. Ci-dessous les instabilités liées à la formation de poussières sont étudiées sur les réacteurs Silane et PKE-Nefedov.

IV.1.a Chimie argon-silane

IV.1.a.i Pendant la 1^{ère} génération de poussières[†]

Dans le réacteur Silane, la transition entre la phase d'accumulation des nanocristaux et la phase d'agrégation est marquée par l'apparition d'une instabilité. En effet,

[†]M. Cavarroc, M. Jouanny, K. Radouane, M. Mikikian, L. Boufendi, *Self-excited instability occurring during the nanoparticle formation in an Ar-SiH₄ low pressure radio frequency plasma*, J. Appl. Phys. **99**, 064301 (2006)

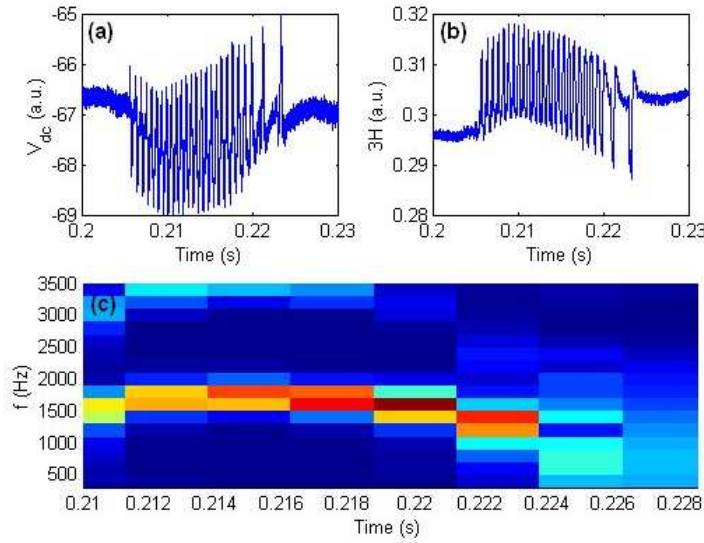


Figure IV.1 Instabilité d'agrégation sur Silane observée sur (a) V_{dc} , (b) $3H$, (c) spectrogramme (FFT) de $3H$ [35].

ce changement rapide de la taille des poussières (et donc de la charge électrique portée par leur surface) va fortement perturber l'équilibre du plasma. Cette instabilité (que nous appellerons par la suite instabilité d'agrégation) est visible sur l'ensemble des diagnostics et notamment sur les diagnostics électriques. Les figures IV.1(a) et (b) sont caractéristiques de ce que nous observons sur $3H$ et V_{dc} . La transition entre ces phases de la croissance des poussières, et donc l'instabilité, a lieu très rapidement après l'allumage du plasma (entre 100 et 200 ms). Sa durée est relativement courte et ne dépasse pas quelques dizaines de ms. Ces deux aspects rendent l'étude de l'instabilité relativement complexe. Cependant, nous avons réussi à analyser quelques propriétés essentielles de ce phénomène. Tout d'abord, le paramètre le plus logique à étudier est sa fréquence. Étant donné que celle-ci évolue dans le temps (figure IV.1), nous avons réalisé des spectrogrammes afin de mettre en évidence l'évolution temporelle de la fréquence. Un spectrogramme est en fait une transformée de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) avec une fenêtre glissante. On obtient ainsi l'évolution temporelle des fréquences caractéristiques du signal. Un exemple est donné figure IV.1(c). On remarque que la fréquence principale est d'environ 1500 Hz et qu'elle suit une courbe en cloche. La répétitivité de cette évolution nous a permis de conclure que la première phase d'augmentation de la fréquence est liée à l'établissement de l'instabilité alors que la phase de décroissance est liée à son arrêt progressif par ralentissement.

L'ordre de grandeur de la fréquence est en accord avec la fréquence plasma "poussiéreuse" définie par $f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Q_d^2 n_d}{\epsilon_0 m_d}}$ et fonction de la charge Q_d , de la densité de

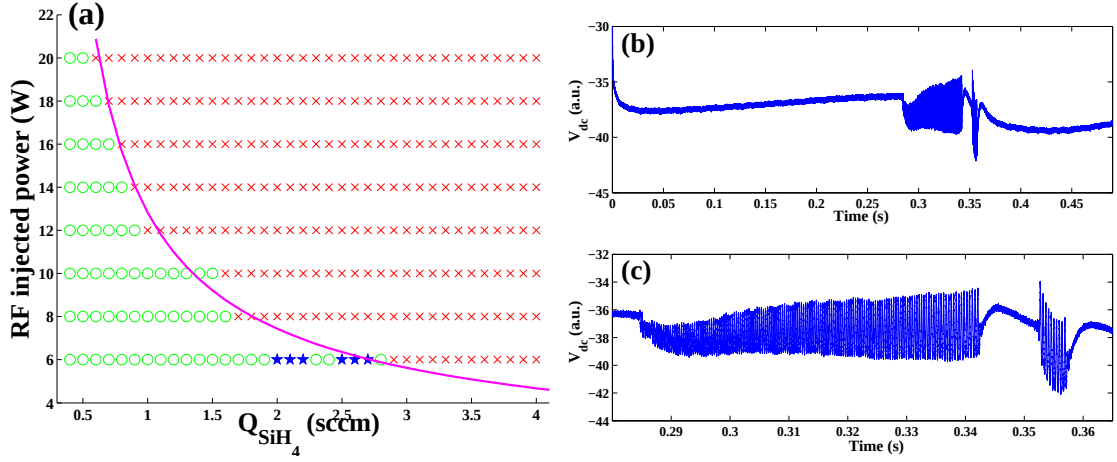


Figure IV.2 (a) Diagramme d'existence de l'instabilité d'agrégation en fonction de la puissance radiofréquence et du débit de SiH₄ (o : instabilité, x : pas d'instabilité, * : cas particulier) [55]. (b) Cas particulier de l'instabilité près du seuil d'existence, (c) zoom de (b) [35].

poussières n_d et de leur masse m_d . De plus, cette fréquence décroît avec la taille des poussières. Ceci explique la décroissance de la fréquence à la fin de l'instabilité lorsque les nanocristaux se sont agglomérés.

Une étude paramétrique de cette instabilité a été menée en fonction de la puissance radiofréquence injectée, du débit de SiH₄ et de la température du gaz [35]. Pour chacun de ces paramètres, nous avons établi la variation de la fréquence, de la durée et de l'instant d'apparition de l'instabilité. Nous avons notamment mis en évidence que ces caractéristiques sont en accord avec les modifications de la cinétique de croissance des poussières (par exemple sous l'effet de la température du gaz [72, 73]).

Cette étude paramétrique nous a également permis de définir le diagramme d'existence de l'instabilité. En effet, pour certains jeux de paramètres, cette instabilité disparaît ou du moins elle n'est plus détectable du fait de sa très faible amplitude. La figure IV.2(a) présente ainsi le domaine d'existence de l'instabilité d'agrégation en fonction de la puissance radiofréquence et du débit de silane. On constate que deux zones se distinguent nettement de part et d'autre d'une ligne $P_{rf} \propto Q_{SiH_4}^{-3/4}$. L'instabilité apparaît donc préférentiellement pour des couples basse puissance-bas débit. On remarque également la présence de points particuliers au voisinage de cette courbe pour des puissances faibles. Ces points correspondent à des situations traduisant l'effet de seuil de l'instabilité. En effet, dans ce cas l'instabilité a la forme présentée figures IV.2(b) et (c). Au cours de son développement, l'instabilité marque un temps d'arrêt puis repart. Ce résultat souligne la forte sensibilité de l'instabilité aux conditions expérimentales.

Afin de comprendre l'origine de cette instabilité, nous l'avons comparé à une

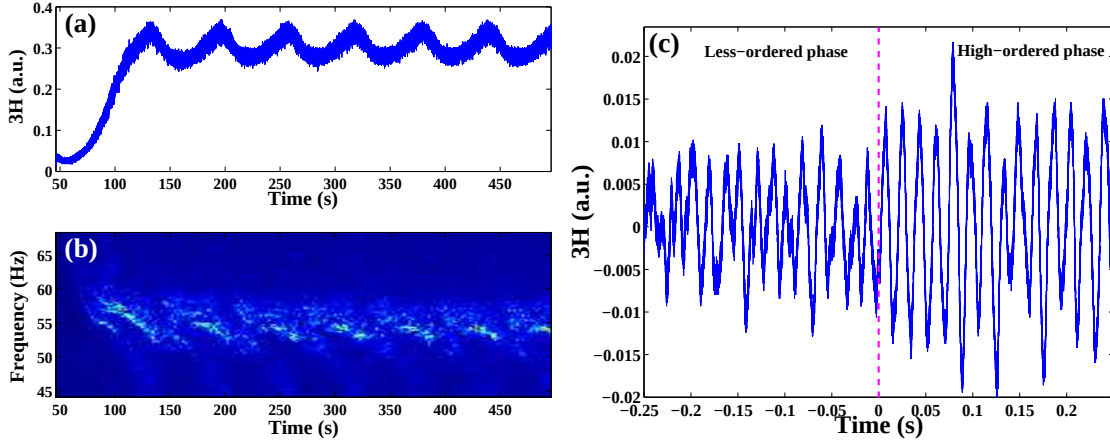


Figure IV.3 (a) 3H lors des générations successives, (b) spectrogramme de 3H, (c) transition entre une phase ordonnée et une phase peu ordonnée sur 3H [55, 76].

instabilité apparaissant dans les plasmas électronégatifs [74]. En effet, nous pouvons considérer que les poussières se comportent comme des ions négatifs massifs. Ainsi, un lien pourrait exister entre l'instabilité que nous observons et une instabilité liée à l'attachement dissociatif dans les plasmas électronégatifs [75].

IV.1.a.ii Pendant les générations successives[†]

D'autres instabilités liées à la formation des poussières ont été observées en chimie argon-silane. En effet, nous avons vu à la section III.5 que la formation de poussières est un phénomène cyclique qui prend son origine dans la région du void. Nous avons vu que les diagnostics électriques traduisent ces nouvelles générations par des oscillations dont la période est de l'ordre de la minute. Ce phénomène est représenté à nouveau sur la figure IV.3(a). Une analyse minutieuse de cette courbe montre qu'une instabilité, dont la fréquence peut varier de 30 à 90 Hz, se superpose au signal. Cet effet est mis en évidence en utilisant à nouveau la représentation sous forme de spectrogramme (figure IV.3(b)). Nous remarquons également une alternance de phases ordonnées et de phases moins ordonnées, ces dernières ayant une fréquence moyenne plus élevée. Ceci est confirmé en regardant précisément le signal électrique à la transition entre ces deux phases (figure IV.3(c)). En corrélant ces observations au modèle de formation des générations successives (section III.5) nous avons mis en évidence que la phase ordonnée correspond à la croissance de la nouvelle génération de poussières alors que la phase peu ordonnée semble être liée à l'expulsion des plus grosses poussières.

[†]M. Cavarroc, M. Mikikian, Y. Tessier and L. Boufendi, *Instabilities during successive generation dust growth in a silane-based plasma*, Soumis à Phys. Plasmas (2008)

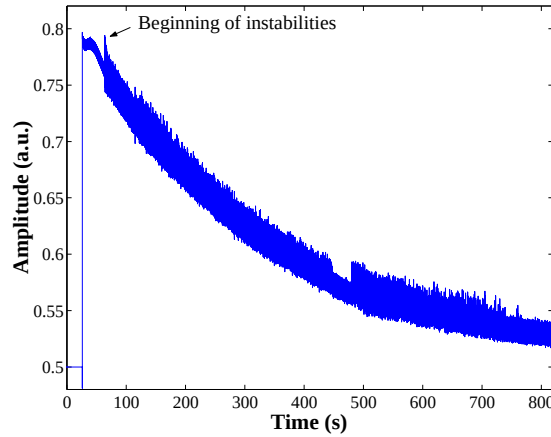


Figure IV.4 Évolution de l'amplitude de 1H au cours de la formation de poussières sur PKE-Nefedov. Les instabilités apparaissent environ 40 s après l'allumage du plasma [77].

IV.1.b Pulvérisation[†]

Nous venons de voir dans la section précédente que la formation de poussières dans un plasma d'argon-silane peut engendrer des instabilités. Ces phénomènes instables semblent être liés à l'attachement électronique sur les poussières. Ce phénomène étant universel dans les plasmas poussiéreux usuels, les phénomènes instables induits doivent donc se retrouver dans des plasmas poussiéreux autres que les plasmas argon-silane. En effet, nous avons également observé des instabilités sur PKE-Nefedov où la formation des poussières est obtenue par pulvérisation d'un matériau polymère. Ces instabilités ont des caractéristiques (fréquence, durée, instant de démarrage, forme) différentes de celles observées sur Silane. Une étude des instabilités liées à la formation de poussières sur PKE-Nefedov est présentée ci-dessous.

Nous avons vu à la section III.2 que les évolutions des caractéristiques électriques (notamment 1H) sur Silane et PKE-Nefedov sont semblables. L'amplitude de 1H décroît du fait de l'attachement électronique à la surface des poussières. Dans certaines conditions, nous observons sur PKE-Nefedov qu'une instabilité se superpose à cette décroissance. Ce phénomène est mis en évidence sur la figure IV.4.

Afin de mieux caractériser cette instabilité de faible amplitude, nous avons reproduit l'expérience en ne conservant que la partie alternative du signal. Nous avons alors clairement observé que l'instabilité est décrite par une succession de régimes distincts (figure IV.5(a)). L'acquisition d'un grand nombre de signaux nous a permis d'établir la gamme de variation des caractéristiques de l'instabilité et de contrôler

[†]M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, L. Boufendi, *Low Frequency Instabilities during Dust Particle Growth in a Radio-frequency Plasma*, Phys. Plasmas **13**, 092103 (2006)

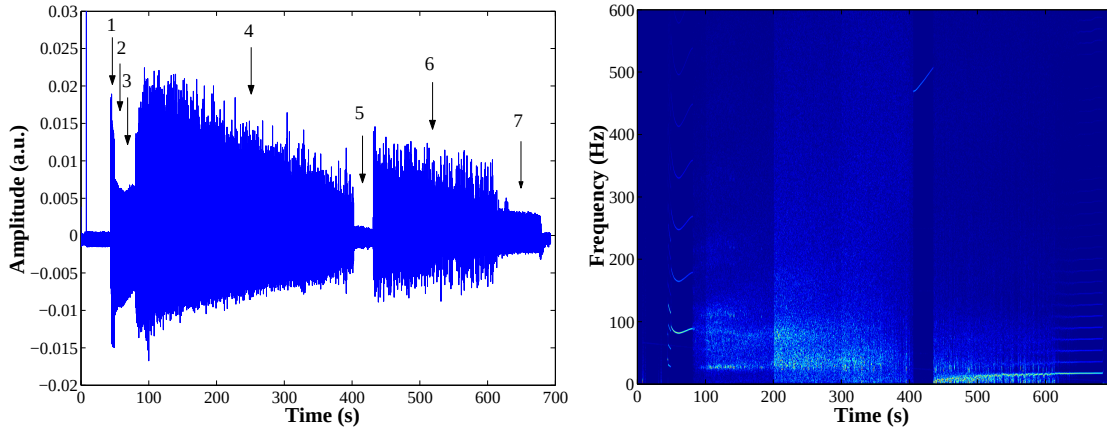


Figure IV.5 (a) Évolution de l'amplitude de 1H (composante alternative) au cours de la formation de poussières sur PKE-Nefedov. Les instabilités apparaissent environ 40 s après l'allumage du plasma. Les différents régimes sont numérotés de 1 à 7. (b) Spectrogramme du signal présenté en (a) [77].

la robustesse des différents régimes. En effet, la figure IV.5(a) met en évidence sept régimes distincts. Cependant, ces sept régimes ne sont pas obtenus systématiquement et cela nous a permis de définir un degré de robustesse pour chaque régime. Nous pouvons alors observer un raccourcissement de certains régimes, voire leur disparition. Cependant, à de rares exceptions près, l'ordre des régimes est conservé.

Pour faciliter l'étude de ces régimes, nous avons utilisé à nouveau la technique des spectrogrammes. Le spectrogramme correspondant à la figure IV.5(a) est présenté figure IV.5(b). Cette méthode fait plus clairement ressortir les sept différents régimes :

- 3 régimes organisés (P1, P2, P3) de $\simeq 40$ à $\simeq 80$ s
- 1 régime chaotique P4 de $\simeq 80$ à $\simeq 405$ s
- 1 régime haute fréquence P5 de $\simeq 405$ à $\simeq 435$ s
- 1 régime chaotique qui devient de plus en plus organisé P6 de $\simeq 435$ à $\simeq 600$ s
- 1 régime organisé P7 de $\simeq 600$ à $\simeq 680$ s

Nous nous sommes tout spécialement intéressé aux quatre premiers régimes et notamment aux transitions entre les régimes organisés. La figure IV.6(a) donne un exemple de l'évolution du signal électrique lors des transitions P1-P2 et P2-P3. Afin de mettre en évidence ces transitions, le cas présenté se distingue par une phase P2 extrêmement courte. Nous remarquons que le passage de la phase P1 à la phase P3 s'effectue par l'apparition progressive de pics intermédiaires caractéristiques de la phase P2. L'apparition de ces pics entraîne tout d'abord une légère baisse de la fréquence (P2) du fait d'une augmentation de l'écartement entre les pics principaux. Ensuite, l'intensité des deux pics intermédiaires augmentant, la fréquence triple quasiment de valeur (P3). Ces comportements sont particulièrement bien mis en évidence

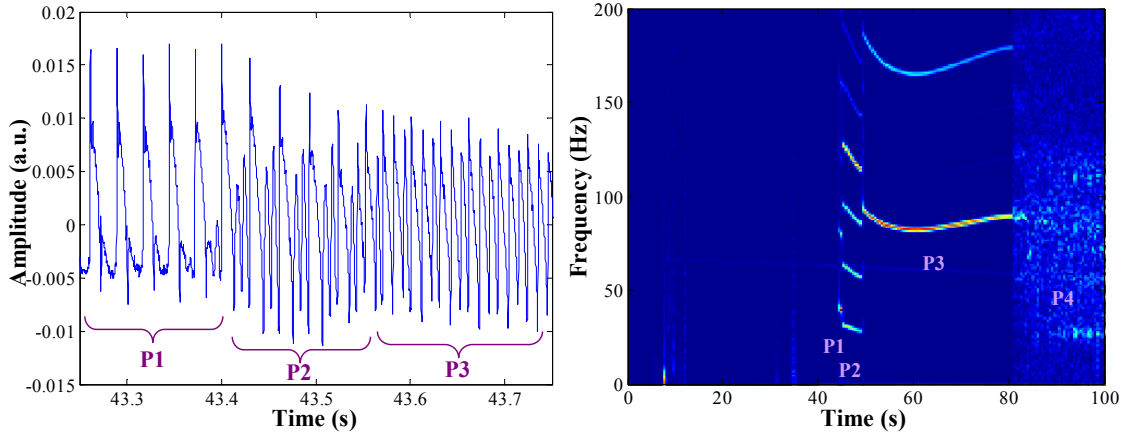


Figure IV.6 (a) Transitions entre les trois premiers régimes organisés. (b) Zoom de la figure IV.5 sur les quatre premiers régimes [77].

sur la figure IV.6(b) qui est un zoom de la figure IV.5(b). Afin de faciliter l'analyse, le cas présenté sur cette dernière figure comporte une phase P2 plus longue que dans le cas de la figure IV.6(a). La figure IV.6(b) met également en évidence la transition avec le premier régime chaotique qui se caractérise par un signal qui oscille de façon irrégulière. Une étude approfondie de ces régimes est présentée dans la référence [77].

Afin d'éliminer tout artefact électrique, nous avons également enregistré l'évolution de la luminosité du plasma pendant l'instabilité. Pour cela, un système équipé de plusieurs fibres optiques a été mis au point afin de récolter la luminosité du plasma en plusieurs endroits de la décharge. Ces fibres ont été connectées à un réseau de photomultiplicateurs. Les résultats obtenus ont montré une grande cohérence avec les mesures électriques. Quelques différences ont grandement attiré notre attention. Nous avons notamment observé pour le troisième régime organisé (P3) une fréquence d'oscillation trois fois plus faible que sur les mesures électriques. Une campagne de mesure par caméra rapide a mis en évidence que ce régime est caractérisé par l'apparition et la disparition régulière d'une zone plasma de forte émission. Cette zone apparaît alternativement à différents endroits de la décharge de façon cyclique. Ce cycle permet d'expliquer la différence entre les résultats optiques et électriques. En effet, la mesure électrique est intégrée sur l'ensemble du volume plasma alors que la mesure optique relève la luminosité du plasma à un endroit précis. Cet aspect souligne la précaution avec laquelle certaines données expérimentales doivent être analysées. Nous avons ici un bon exemple des précautions qui doivent être prises dans l'interprétation d'une mesure intégrée en volume (diagnostic électrique).

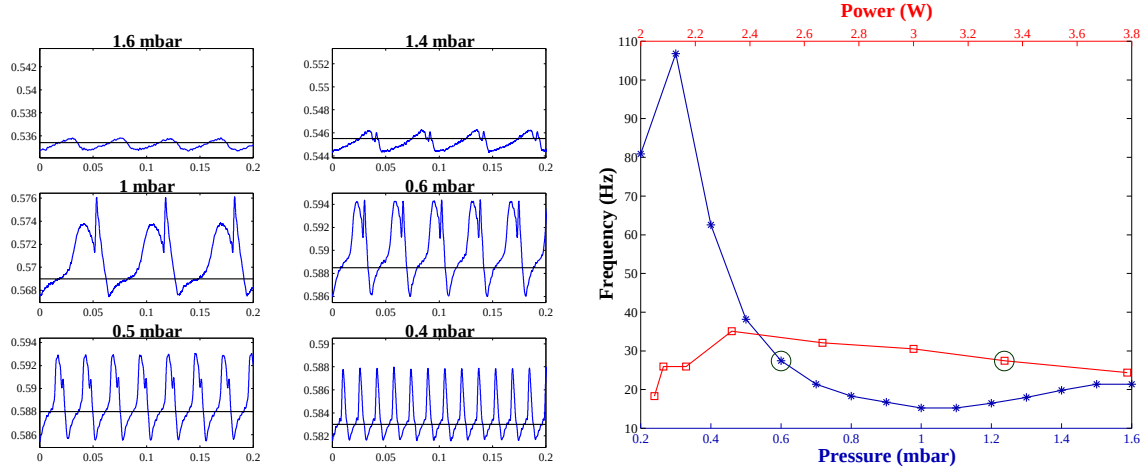


Figure IV.7 (a) Signature du heartbeat sur les mesures électriques pour différentes pressions. (b) Fréquence du heartbeat en fonction de la pression et de la puissance radiofréquence [79].

IV.2 L'instabilité *heartbeat*

Nous venons de voir dans les sections ci-dessus des instabilités liées au processus de formation des poussières. Des instabilités, non-liées à ce processus, peuvent également apparaître dans les plasmas poussiéreux. Nous présentons dans cette section l'analyse d'une instabilité apparaissant sur PKE-Nefedov et prenant son origine dans la région du void, région que nous avons déjà étudiée dans les sections III.4 et III.5. Dans certaines conditions, la zone de void est le siège de phénomènes instables. C'est notamment le cas d'une instabilité, dénommée "heartbeat", et consistant en une succession de contractions et d'expansions de la taille du void [59, 67, 69, 78–80]. Cette instabilité doit son nom au mouvement apparent qui en résulte et qui suggère le battement d'un cœur. Ces phénomènes de contraction et d'expansion du void se révèlent cependant plus complexes qu'attendu.

IV.2.a Caractérisation électrique[†]

Sur les mesures électriques, cette instabilité se traduit par une forme bien particulière, plus complexe qu'une simple oscillation. La figure IV.7(a) montre ainsi la variation du signal électrique durant l'instabilité pour différentes pressions. Nous remarquons le changement de fréquence et de forme de l'instabilité. Le signal a notamment une forme très caractéristique à 1 mbar avec la présence d'un pic étroit à droite

[†]M. Mikikian and L. Boufendi, *Experimental investigations of void dynamics in a dusty discharge*, Phys. Plasmas **11**, 3733 (2004)

du motif principal. L'amplitude de ce pic varie de façon conséquente avec la pression. Les mesures électriques ne permettent pas de conclure de façon claire sur l'origine de ce pic, mais elles permettent néanmoins de déduire la fréquence caractéristique de cette instabilité. Une étude paramétrique nous a permis de mesurer cette fréquence en fonction de la pression et de la puissance. Ces résultats sont résumés sur la figure IV.7(b). Nous constatons que globalement la fréquence augmente lorsque la puissance baisse. La dépendance en pression est plus complexe, avec tout d'abord une légère décroissance de la fréquence lorsque la pression diminue. Autour de 1 mbar, nous constatons un comportement inverse avec une augmentation de plus en plus rapide de la fréquence lorsque la pression d'argon diminue. Ainsi, la baisse de puissance et de pression (supposée correspondre à une baisse de la densité ionique) entraîne une augmentation de la fréquence de l'instabilité.

Un autre aspect important est le comportement aux très basses puissance et pression. Dans ces conditions, la figure IV.7(b) montre une chute brutale de la fréquence. Ces conditions expérimentales sont en effet les seuils au-dessous desquels l'instabilité disparaît. L'intervalle entre les pics augmente alors fortement (la fréquence chute) avant de tendre vers l'infini, c'est à dire vers l'arrêt de l'instabilité. Cet aspect fait actuellement l'objet d'une attention particulière car il semble similaire à ce que l'on rencontre dans certains systèmes dynamiques comme les systèmes neuronaux ou les réactions chimiques oscillantes [80].

IV.2.b Imagerie rapide[†]

Afin de mieux comprendre la structure complexe des mesures électriques, nous avons réalisé une campagne de mesures par caméra rapide. Avec cette caméra nous avons pu acquérir des images précises de la région du void durant l'instabilité heartbeat. Cette instabilité ayant une fréquence typique de l'ordre de quelques dizaines de Hertz, nous avons obtenu des résultats probants avec une vitesse d'acquisition d'environ 1800 images par seconde. Ainsi, le mouvement du nuage de poussières (caméra équipée d'un filtre interférentiel centré sur la longueur d'onde du laser) ainsi que la luminosité du plasma (caméra sans filtre interférentiel, sans nappe laser) ont été enregistrés durant l'instabilité. La figure IV.8(a) montre le mouvement du void durant une séquence contraction-expansion. Les nombres indiqués dans le coin supérieur droit correspondent au numéro de l'image. L'image 135 correspond à la situation initiale, c'est à dire au void stable dont la taille et la position sont indiquées par une ellipse. On observe ensuite la contraction de cette zone qui atteint sa taille minimale à l'image 155. On remarque aussi que le void ne se ferme jamais complètement. Le phénomène d'expansion commence alors, laissant apparaître un mouvement plus

[†]M. Mikikian, L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi, *Self-excited void instability in dusty plasmas : plasma and dust cloud dynamics during the heartbeat instability*, New J. Phys. **9**, 268 (2007)

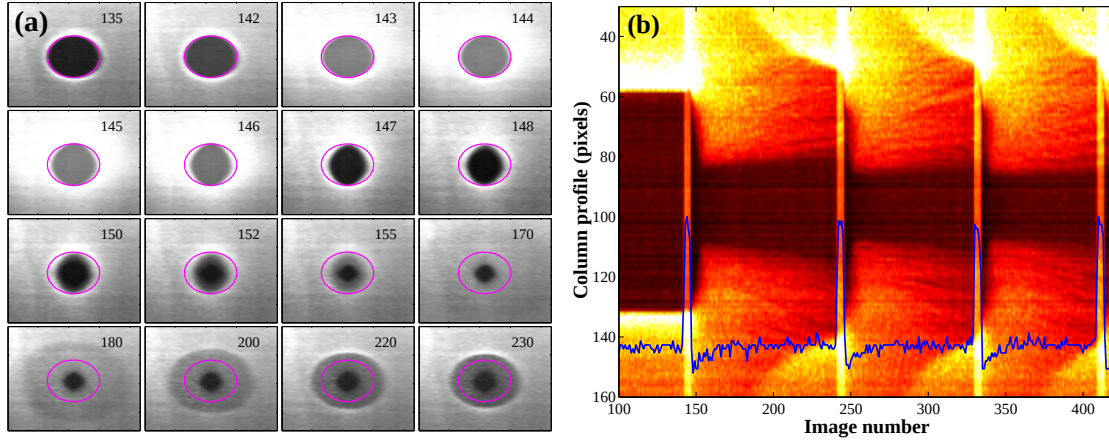


Figure IV.8 (a) Mouvement du void pendant une séquence contraction-expansion. (b) Reconstruction de 3 séquences contraction-expansion à partir des colonnes centrales des images [69].

complexe qu’une simple réouverture du void. En effet, on distingue notamment une zone intermédiaire entre le void et la partie principale du nuage de poussières (par exemple à l’image 200) et qui correspond à des poussières ayant une vitesse faible. Le dépouillement des résultats s’avère rapidement difficile du fait du nombre important d’images. Pour simplifier cette procédure et afin de caractériser plus précisément le mouvement du void, nous avons utilisé la technique d’analyse suivante. Sur chaque image, la colonne passant par le centre du void (et donc la plus représentative) est extraite. Ces colonnes sont ensuite accolées les unes aux autres afin de construire la figure IV.8(b). La cinétique du void peut ainsi être résumée en une seule image, les images originales de la figure IV.8(a) permettant de s’assurer que l’essentiel de l’information est conservé. La figure IV.8(b) (en fausses couleurs) met en évidence la première contraction à partir du void stable puis la réouverture progressive de celui-ci. La séquence contraction-expansion se reproduit ensuite de façon régulière.

Malgré le filtre interférentiel, la luminosité du plasma est partiellement visible sur la figure IV.8(a). Sa variation pendant l’instabilité se retrouve sur la figure IV.8(b) sous la forme d’une bande lumineuse. Cela s’est avéré être un avantage car nous avons pu ainsi corréler la contraction du void avec l’augmentation de luminosité du plasma. Nous avons également observé que la contraction se poursuit après l’augmentation de luminosité sans doute à cause de l’inertie des poussières. Sur la figure IV.8(b) nous avons superposé la courbe correspondant à la luminosité au centre du plasma.

Afin de mieux caractériser l’évolution du plasma durant l’instabilité, nous avons ensuite enregistré seulement la luminosité du plasma en éteignant le laser et en déplaçant la caméra. En effet, pour obtenir les résultats présentés sur la figure IV.8, l’angle entre la caméra et la direction du laser était faible afin d’avoir une meilleure

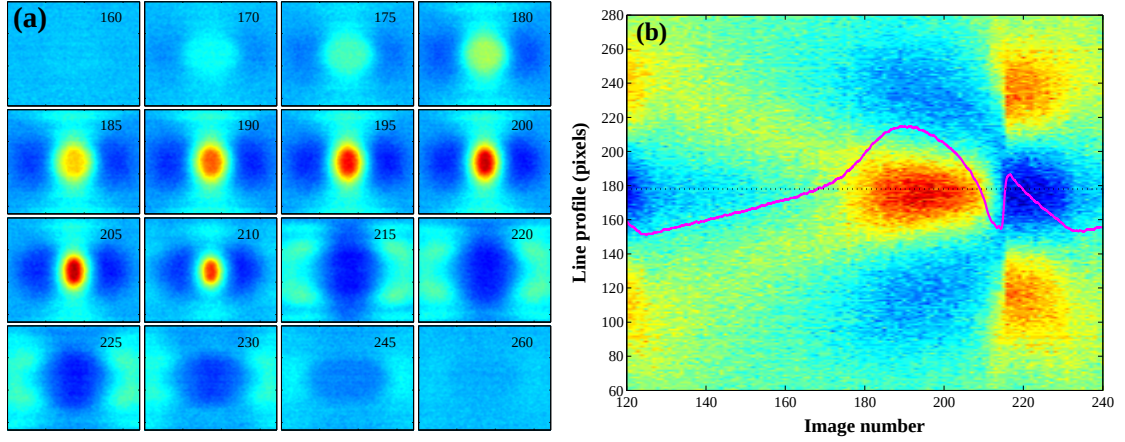


Figure IV.9 (a) Évolution de la luminosité du plasma pendant une séquence contraction-expansion (fausses couleurs). (b) Reconstruction d'une séquence à partir des lignes centrales des images et superposition du signal électrique [69].

sensibilité (angle de vue similaire à la figure III.7). Cette disposition fait cependant perdre de l'information horizontalement du fait de la faible profondeur de champ de l'objectif de la caméra. Pour l'enregistrement de la luminosité du plasma nous avons donc positionné la caméra de façon à ce qu'elle observe le plasma en totalité (angle de vue similaire à la figure II.2(b)). L'objectif de la caméra est réglé de sorte à ce que tout l'espace interélectrode soit visible. Nous avons alors reproduit l'expérience et les images obtenues sont présentées sur la figure IV.9(a). Afin d'améliorer le contraste nous avons soustrait une image de référence (prise pendant la phase de l'instabilité où le plasma est globalement homogène) et utilisé des fausses couleurs (du bleu au rouge). On observe ainsi clairement l'augmentation de luminosité au centre du plasma puis une transition où le centre devient soudainement plus sombre que les bords de la décharge. Cette évolution est particulièrement bien observée en effectuant une reconstruction similaire à la figure IV.8(b) mais à partir des lignes centrales au lieu des colonnes (figure IV.9(b)). En effet, nous avons remarqué que des modifications importantes ont lieu suivant l'axe horizontal. La luminosité du plasma étant globalement liée au courant, nous avons corrélié ces résultats d'imagerie aux mesures électriques comme celles présentées figure IV.7(a). La mesure électrique correspondante a été superposée sur la figure IV.9(b). Nous constatons une très bonne corrélation. Cela nous permet également de comprendre l'origine du pic qui apparaît sur les mesures électriques. Ce pic est en effet dû à l'augmentation de luminosité au bord du plasma alors que le reste du signal est principalement lié aux modifications centrales.

Une autre instabilité concernant le void a également été observée sur PKE-Nefedov. Elle consiste en une oscillation à très basse fréquence (< 10 Hz) de la taille du void lorsqu'une nouvelle génération de poussières se forme dans le void. Elle se distingue

du heartbeat par une fréquence plus faible, une variation de la taille du void plus importante et une durée plus courte. De plus, dans certaines conditions, mal identifiées, elle s'accompagne d'une rotation du void autour de l'axe de symétrie vertical du réacteur. Cette instabilité regroupe différentes caractéristiques des instabilités que nous venons de décrire dans ce chapitre : elle est liée à la formation de poussières dans le void. Son lien avec les autres instabilités est en cours d'investigation.

IV.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence que les plasmas poussiéreux sont des milieux fortement instables. Du fait de la taille des poussières (relativement aux autres espèces chargées du plasma) les instabilités que nous avons observées ont une fréquence faible (de quelques Hz à quelques 10^3 Hz). Plus généralement, l'observation d'instabilités basse fréquence dans un plasma doit alerter l'expérimentateur sur la probable présence dans le réacteur d'une forte densité de poussières.

Nous avons vu que la formation de la première génération de poussières est la source de fortes perturbations du fait de modifications importantes de la densité des électrons libres. Ces instabilités prennent des formes diverses et montrent une évolution temporelle complexe de leur fréquence caractéristique. La forme, la fréquence, l'instant de démarrage et la durée des instabilités varient d'un réacteur à l'autre. Ceci provient certainement des différences de conditions expérimentales (voir chapitre II) et de la densité de poussières formées. En effet, ces instabilités ne sont observées sur PKE-Nefedov que si la densité de poussières formées est forte. Sur ce réacteur nous avons notamment mis en évidence un enchaînement bien précis de régimes distincts. Sur les deux réacteurs, nous avons observé que ces instabilités sont caractérisées par des effets de seuil drastiques qui délimitent la gamme de paramètres favorables à leur observation. L'instabilité d'agrégation observée sur Silane est également d'un grand intérêt pour la synthèse de nanocristaux de silicium (section III.3.a).

Les générations successives de poussières sont également caractérisées par des instabilités qui se manifestent durant quasiment toute la durée du plasma. Les variations de leurs caractéristiques sont en corrélation avec les phases d'expulsion des grosses poussières et celles de formation des nouvelles poussières. L'origine exacte de ces instabilités n'a pas encore été attestée formellement. Cependant, leur relation avec le void et certaines similitudes avec l'instabilité heartbeat observée sur PKE-Nefedov, laissent envisager une origine similaire.

L'instabilité heartbeat qui affecte la région de void a été étudiée en détails en corrélant de nombreux diagnostics. Il ressort de ces analyses que ce phénomène se traduit par des variations des propriétés du plasma et des mouvements de poussières complexes. La corrélation entre les modifications du plasma et ces mouvements ouvre des perspectives pour l'étude des mécanismes à l'origine de l'existence du void.

Chapitre V

Charge résiduelle des poussières

Comme nous l'avons vu à la section I.2.b, les poussières se chargent négativement au sein du plasma. Ce phénomène bien connu est étudié depuis de nombreuses années. Traditionnellement, la communauté scientifique considérait qu'à l'arrêt de la décharge, les poussières perdaient leur charge électrique par recombinaison des électrons de surface avec les ions du plasma. Des expériences en microgravité réalisées par le MPE sur le réacteur PKE-Nefedov ont montré que les poussières pouvaient en fait garder une charge résiduelle [81]. Des expériences ont alors été réalisées au GREMI afin de reproduire et d'étudier précisément ce phénomène.

V.1 Mise en évidence de la charge résiduelle[†]

Pour maintenir les poussières en suspension à l'arrêt de la décharge, une force thermique (thermophorèse, voir section I.2.c) a été ajoutée pour compenser la gravité et "imiter" les conditions d'apesanteur. Cette technique a permis de maintenir les poussières en suspension pendant près d'une minute après l'arrêt de la décharge. Afin de vérifier que les poussières conservent une charge résiduelle, un potentiel basse fréquence est appliqué à l'électrode inférieure. Si les poussières sont chargées, elles vont osciller dans ce champ électrique sinusoïdal. Les trajectoires des poussières sont alors reconstruites en superposant les images obtenues. Un exemple de reconstruction est donné sur la figure V.1(a). L'analyse des différentes trajectoires nous a permis de suivre l'oscillation de quelques poussières comme le montre la figure V.1(b).

En considérant les forces en présence, l'équation du mouvement d'une poussière nous permet de déduire sa charge par $Q_{dres} = \frac{Am_d\omega}{E_0} \sqrt{\omega^2 + \frac{4\gamma^2}{m_d^2}}$ où $\omega = 2\pi f$ avec f la fréquence du champ appliqué (typiquement 1 Hz), E_0 l'amplitude de celui-ci à la hauteur de lévitation, γ un terme d'amortissement lié à la friction avec le gaz et A

[†]L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi, A.A. Samarian, *Residual dust charges in discharge afterglow*, Phys. Rev. E **74**, 026403 (2006)

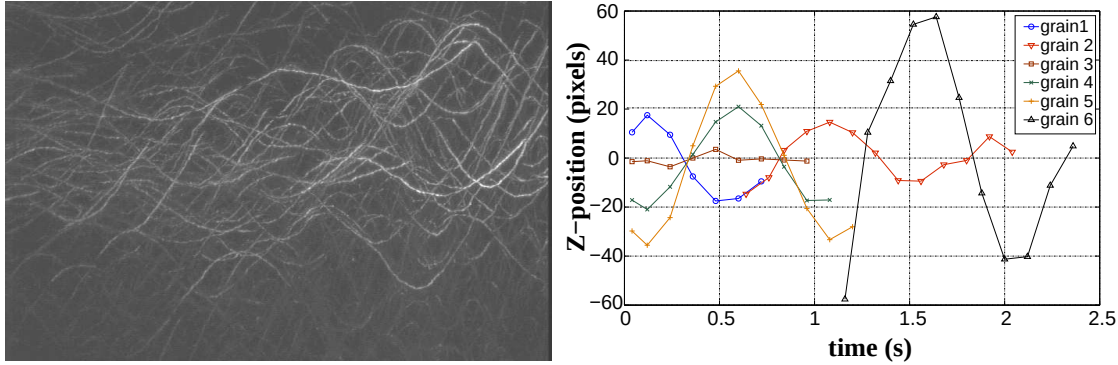


Figure V.1 (a) Reconstruction des trajectoires des poussières après l'arrêt de la décharge. (b) Analyse des trajectoires [47].

l'amplitude de l'oscillation des poussières. La masse de la poussière m_d est donnée par l'équilibre entre la force de gravité et la thermophorèse. Nous avons ainsi mesuré des charges résiduelles de l'ordre de quelques électrons, c'est à dire environ cent fois plus petites que les charges en phase plasma. De plus, la figure V.1(b) met en évidence que certaines poussières sont très peu chargées (faible amplitude d'oscillation, par exemple le grain n°3) et que d'autres sont chargées positivement (grains 1 et 2). Ce dernier point est relativement important. En effet, dans des conditions classiques de laboratoire, les poussières sont chargées négativement en phase plasma (voir section I.2.b). Une décroissance (en valeur absolue) de cette charge à l'extinction du plasma est logique mais le changement de signe suppose que l'équilibre des courants électronique et ionique est fortement perturbé.

V.2 Fonction de distribution des charges résiduelles[†]

L'observation que la charge résiduelle peut différer d'une poussière à l'autre nous a incité à mesurer ce paramètre de façon statistique. Pour cela, un grand nombre de poussières a été suivi et l'analyse de leur trajectoire a alors permis la construction de la fonction de distribution des charges résiduelles. Ces analyses ont été réalisées pour deux valeurs de pression différentes. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure V.2. Nous avons superposé le résultat de l'ajustement par une fonction Gaussienne. Nous constatons que ces fonctions de distribution confirment les premiers résultats de la figure V.1(b) : la charge résiduelle moyenne est de l'ordre de quelques électrons et des poussières chargées positivement existent.

[†]L. Couëdel, A.A. Samarian, M. Mikikian and L. Boufendi, *Influence of the ambipolar-to-free diffusion transition on dust particle charge in a complex plasma afterglow*, Phys. Plasmas **15**, 063705 (2008)

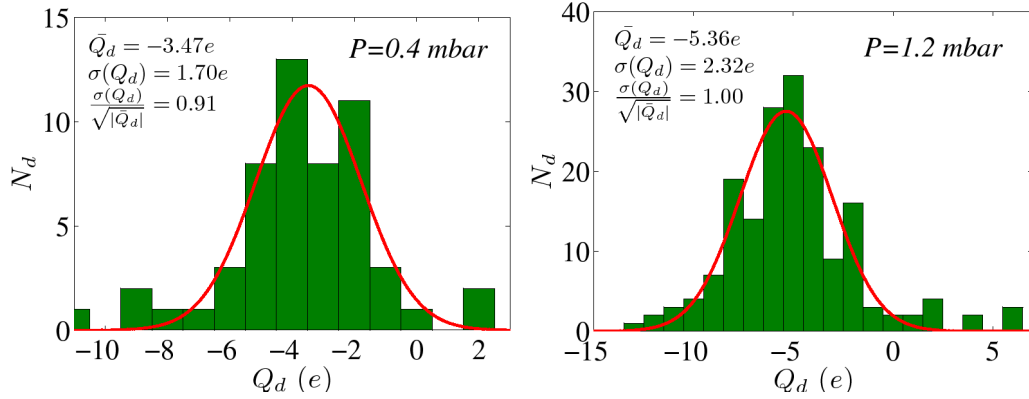


Figure V.2 Fonction de distribution des charges résiduelles (a) à 0.4 mbar, (b) à 1.2 mbar [82].

V.3 Modélisation des fonctions de distribution[†]

Afin de mieux comprendre les résultats expérimentaux obtenus, un important travail de modélisation a été mené. Pour cela, la fonction de distribution en phase plasma a été estimée en prenant en considération l'aspect stochastique des phénomènes de charge. En effet, une approche continue de la charge à partir des expressions des courants électronique et ionique ne permet pas d'obtenir les fluctuations de charge provenant de la nature discrète des électrons et des ions. Pour cela une équation de type Fokker-Planck est utilisée et permet d'obtenir la fonction de distribution présentée figure V.3 à $t = 0$ s (instant de l'arrêt de la décharge). En utilisant le même procédé, la fonction de distribution est calculée à différents instants après l'arrêt du plasma. Ces calculs prennent en compte les différents processus physiques intervenant à l'extinction du plasma. La relaxation rapide de la température électronique, qui passe de quelques eV à la température ambiante, a notamment une grande influence sur la charge moyenne des poussières. Cette chute est notamment visible sur la fonction de distribution à $t = 250 \mu\text{s}$. Ensuite ce sont les processus de pertes des ions et des électrons par diffusion qui interviennent. Afin de modéliser correctement cette perte, une attention particulière a été portée à la transition entre la diffusion ambipolaire et la diffusion libre [83, 84]. En effet, c'est au passage à la diffusion libre que la différence de densité entre ions et électrons augmente fortement et affecte ainsi la charge des poussières. La fonction de distribution finale obtenue est présentée à $t = 110$ ms. On constate qu'elle est très semblable à la fonction obtenue expérimentalement à 1.2 mbar (figure V.2(b)).

La largeur de la fonction de distribution est fortement dépendante de l'instant

[†]L. Couëdel, A.A. Samarian, M. Mikikian and L. Boufendi, *Dust charge distribution in complex plasma afterglow*, soumis à Phys. Rev. Lett. (2008)

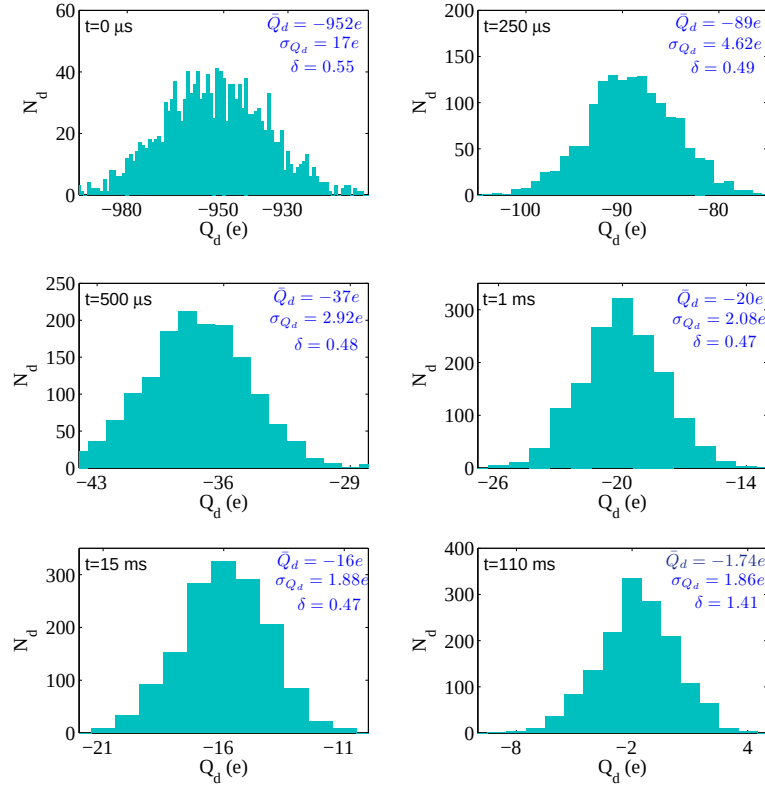


Figure V.3 Évolution de la fonction de distribution de charge simulée durant l’extinction du plasma [85].

auquel a lieu la transition entre la diffusion ambipolaire et la diffusion libre des ions et des électrons. Les simulations montrent que la probabilité d’avoir des charges résiduelles positives est d’autant plus grande que cette transition se produit tôt durant l’extinction du plasma. En effet, dès lors que les ions et les électrons diffusent indépendamment, les poussières sont immergées dans un milieu où les ions sont majoritaires et peuvent ainsi acquérir une charge positive. D’autres phénomènes pouvant également intervenir n’ont cependant pas été pris en compte dans le modèle développé. En effet, les réactions entre métastables peuvent induire une modification de la densité et de la température des électrons durant la phase d’extinction [47, 82, 86, 87]. Ces aspects seront prochainement étudiés.

V.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence l’existence d’une charge résiduelle à la surface des poussières après l’extinction du plasma. Nous avons mesuré expéri-

mentalement cette charge en développant une méthode pour garder les poussières en suspension après l'arrêt du plasma. Une charge de quelques électrons a été estimée. Ce premier résultat étant concluant, nous avons poussé l'analyse à l'étude statistique de cette charge en mesurant sa fonction de distribution. Ceci a fait notamment ressortir l'existence de charges positives. Des simulations ont pu reproduire les résultats expérimentaux et ont mis en évidence l'importance du mécanisme de diffusion des électrons et des ions sur la fonction de distribution de charge finale.

L'existence d'une charge résiduelle peut revêtir une importance capitale pour les applications liées au dépôt de nanoparticules. En effet, si les poussières conservent une charge lors de leur dépôt, des dysfonctionnements pourraient survenir, par exemple dans la perspective des transistors ou mémoires utilisant des nanocristaux de silicium. Cependant, cette charge résiduelle peut également devenir une opportunité pour développer des techniques électrostatiques d'élimination des poussières en post-décharge. Cet aspect peut concerner les procédés microélectroniques nécessitant des conditions de propreté extrêmes, mais également les réacteurs de fusion thermonucléaire comme ITER pour la collecte des poussières issues de la pulvérisation des parois.

Chapitre VI

Conclusions et perspectives

Le travail présenté dans ce manuscrit résume l'activité de recherche que j'ai menée depuis la fin de ma thèse. Le fil conducteur de ce travail est l'étude des plasmas poussiéreux. J'ai eu l'opportunité d'aborder de nombreux aspects de ces milieux et mes travaux ont concerné l'ensemble des étapes de la "vie" des poussières. En effet, j'ai étudié leur formation, leur croissance, leur comportement et finalement leur dépôt. Ce travail s'est surtout articulé autour de quatre thèmes principaux : la formation des poussières, les instabilités, la structure du nuage et enfin les phénomènes de charge.

La formation des poussières a été étudiée sur deux réacteurs (Silane et PKE-Nefedov) avec des processus de formation distincts (gaz réactif, pulvérisation). La cinétique de formation a été suivie par des mesures électriques qui ont de plus permis de maîtriser la formation et le dépôt de nanocristaux de silicium. Nous avons également étudié la formation des générations successives de poussières et nous avons montré que ce phénomène prenait son origine dans la région du void.

Nous avons mis en évidence que de nombreuses instabilités apparaissaient dans les plasmas poussiéreux. Ces phénomènes instables ont été étudiés sur les réacteurs Silane et PKE-Nefedov. Nous avons établi que certaines instabilités étaient directement liées à la formation de la première génération de poussières. Nous avons également montré que la formation des générations successives de poussières était affectée par des oscillations basse fréquence.

La structure du nuage de poussières est marquée par la présence en son centre d'une zone vide de poussières dénommée void. L'équilibre assurant l'existence de cette zone est parfois rompu. Cela donne naissance à l'instabilité heartbeat qui consiste en une succession de contractions et d'expansions du void. Nous avons caractérisé cette instabilité par des mesures électriques et par imagerie rapide. Ceci nous a permis de relier le mouvement des poussières aux modifications de la luminosité du plasma.

La majorité des phénomènes gouvernant la physique des plasmas poussiéreux est liée à la charge électrique des poussières. Nous avons étudié le devenir de cette charge lorsque le plasma est éteint. Nous avons montré que les poussières gardaient une

charge résiduelle et nous avons mesuré la fonction de distribution correspondante. Nous avons développé un modèle prenant en compte la diffusion des espèces chargées du plasma et nous en avons déduit la fonction de distribution de charge à chaque instant de la phase d'extinction. Ces résultats se sont avérés très proches des résultats expérimentaux.

Durant cette période, la grande majorité de mes travaux de recherche a été réalisée avec un souci constant de cohérence et de synthèse. En effet, malgré la diversité apparente des aspects abordés, tous sont en fait fortement liés les uns aux autres. La formation de poussières est à la fois liée aux instabilités et à la structure du nuage (void), les instabilités sont liées aux phénomènes de charge et affectent également le void. De plus, les travaux ont été réalisés sur deux réacteurs différents et avec des processus de formation distincts. Des corrélations et des comparaisons ont ainsi pu être réalisées et les connaissances acquises sur un des réacteurs ont servi à l'autre.

C'est dans cette optique que je souhaite poursuivre mes travaux de recherche en essayant d'avoir une vision d'ensemble des aspects étudiés. En effet, de nombreux phénomènes apparaissant dans les plasmas poussiéreux semblent avoir un caractère universel. Ce n'est qu'en échangeant, corrélant et comparant les connaissances acquises sur des dispositifs expérimentaux différents que ce caractère universel pourra se révéler. Ainsi, sur les différents aspects présentés dans ce manuscrit, j'envisage d'explorer notamment les points suivants :

- Sur la formation des poussières : amélioration de la connaissance des mécanismes de formation dans différentes chimies et dans un nouveau réacteur de décharge continue.
- Sur le void : caractérisation de l'influence de la masse des ions sur sa taille et étude de son interface avec le nuage de poussières environnant. Recherche d'une signature nette de la présence d'un void lorsque son observation directe est impossible.
- Sur les instabilités : corrélation précise entre les caractéristiques des instabilités (forme, fréquence) et celles des poussières (taille, densité). Description du heartbeat par des techniques de physique non-linéaire.
- Sur la charge résiduelle : étude des interactions entre poussières de charges opposées. Amélioration des modèles de post-décharge.

J'envisage également de consacrer une partie de mon travail à la recherche de passerelles interdisciplinaires pour améliorer la connaissance des plasmas poussiéreux. En effet, de nombreux phénomènes similaires à ceux obtenus dans les plasmas poussiéreux sont observés dans d'autres domaines : plasmas électronégatifs, milieux granulaires, physique des aérosols ... L'utilisation des connaissances acquises dans ces domaines et les comparaisons qui en découleront, permettront d'envisager de nouvelles approches. Très récemment, l'instabilité heartbeat a manifesté, dans certaines conditions, un

comportement similaire à celui rencontré dans les systèmes neuronaux et les réactions chimiques oscillantes[†] [80]. Une comparaison approfondie pourra apporter un éclairage nouveau à son étude. Dans ces domaines, des méthodes de physique non-linéaire ont été utilisées afin de caractériser les phénomènes observés. L'utilisation de techniques similaires dans les plasmas poussiéreux semble ouvrir des perspectives de recherche prometteuses.

[†]M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, Y. Tessier, L. Boufendi, *Mixed-Mode Oscillations in Complex Plasma Instabilities*, Phys. Rev. Lett. **100**, 225005 (2008)

Bibliographie

- [1] A. Bouchoule. *Dusty Plasmas : Physics, Chemistry and Technological impacts in Plasma Processing*. Wiley, New York (1999).
- [2] P. K. Shukla and A. A. Mamun. *Introduction to Dusty Plasma Physics*. IOP Publishing, Bristol (2002).
- [3] E. C. Whipple. *Rep. Prog. Phys.* **44**, 1197 (1981).
- [4] N. Meyer-Vernet. *Astron. Astrophys.* **105**, 98 (1982).
- [5] C. K. Goertz. *Rev. Geophys.* **27**, 271 (1989).
- [6] U. De Angelis. *Phys. Scr.* **45**, 465 (1992).
- [7] G. S. Selwyn, J. S. McKillop, K. L. Haller, and J. J. Wu. *J. Vac. Sci. Technol. A* **8**, 1726 (1990).
- [8] R. M. Roth, K. G. Spears, G. D. Stein, and G. Wong. *Appl. Phys. Lett.* **46**, 253 (1985).
- [9] Y. Watanabe, M. Shiratani, Y. Kubo, I. Ogawa, and S. Ogi. *Appl. Phys. Lett.* **53**, 1263 (1988).
- [10] A.A. Howling, Ch. Hollenstein, and P. J. Paris. *Appl. Phys. Lett.* **59**, 1409 (1991).
- [11] A. Bouchoule, A. Plain, L. Boufendi, J.-Ph. Blondeau, and C. Laure. *J. Appl. Phys.* **70**, 1991 (1991).
- [12] A. Bouchoule, L. Boufendi, J. Hermann, A. Plain, T. Hbid, G. Kroesen, and W. W. Stoffels. *Pure Appl. Chem.* **68**, 1121 (1996).
- [13] J.-P. Boeuf and Ph. Belenguer. *J. Appl. Phys.* **71**, 4751 (1992).
- [14] Ph. Belenguer, J.Ph. Blondeau, L. Boufendi, M. Toogood, A. Plain, A. Bouchoule, C. Laure, and J.-P. Boeuf. *Phys. Rev. A* **46**, 7923 (1992).
- [15] U.V. Bhandarkar, M.T. Swihart, S.L. Girshick, and U.R. Kortshagen. *J. Phys. D : Appl. Phys.* **33**, 2731 (2000).
- [16] M. Cavarroc, M. Mikikian, G. Perrier, and L. Boufendi. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 013107 (2006).
- [17] P. Roca i Cabarrocas, P. Gay, and A. Hadjadj. *J. Vac. Sci. Technol. A* **14**, 655 (1996).
- [18] A. Dutta, S. P. Lee, Y. Hayafune, S. Hatatani, and S. Oda. *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 264 (2000).
- [19] A. Dutta, Y. Hayafune, and S. Oda. *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L855 (2000).

-
- [20] Ch. Deschenaux, A. Affolter, D. Magni, Ch. Hollenstein, and P. Fayet. *J. Phys. D : Appl. Phys.* **32**, 1876 (1999).
 - [21] S. Hong, J. Berndt, and J. Winter. *Plasma Sources Sci. Technol.* **12**, 46 (2003).
 - [22] J. Pereira, V. Massereau-Guilbaud, I. Géraud-Grenier, and A. Plain. *J. Appl. Phys.* **103**, 033301 (2008).
 - [23] I. Stefanović, E. Kovačević, J. Berndt, and J. Winter. *New. J. Phys.* **5**, 39 (2003).
 - [24] K. De Bleecker, A. Bogaerts, and W. Goedheer. *Phys. Rev. E* **73**, 026405 (2006).
 - [25] J. Robertson. *Mater. Sci. Eng. R* **37**, 129 (2002).
 - [26] D. Zhou, T. G. McCauley, L. C. Qin, A. R. Krauss, and D. M. Gruen. *J. Appl. Phys.* **83**, 540 (1998).
 - [27] C. Szopa, G. Cernogora, L. Boufendi, J. J. Correia, and P. Coll. *Planet. Space Sci.* **54**, 394 (2006).
 - [28] J. Winter. *Plasma Phys. Control. Fusion* **40**, 1201 (1998).
 - [29] C. Arnas, C. Dominique, P. Roubin, C. Martin, C. Brosset, and B. Pégourié. *J. Nucl. Mater.* **353**, 80 (2006).
 - [30] H. Thomas, G.E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher, and D. Möhlmann. *Phys. Rev. Lett.* **73**, 652 (1994).
 - [31] A. Melzer, T. Trottenberg, and A. Piel. *Phys. Lett. A* **191**, 301 (1994).
 - [32] J.H. Chu and Lin I. *Phys. Rev. Lett.* **72**, 4009 (1994).
 - [33] Y. Hayashi and K. Tachibana. *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, L804 (1994).
 - [34] L. Boufendi, J. Gaudin, S. Huet, G. Viera, and M. Dudemaine. *Appl. Phys. Lett.* **79**, 4301 (2001).
 - [35] M. Cavarroc, M. C. Jouanny, K. Radouane, M. Mikikian, and L. Boufendi. *J. Appl. Phys.* **99**, 064301 (2006).
 - [36] J. Pereira, I. Géraud-Grenier, V. Massereau-Guilbaud, and A. Plain. *Thin Solid Films* **482**, 226 (2005).
 - [37] G.M. Jellum and D.B. Graves. *J. Appl. Phys.* **67**, 6490 (1990).
 - [38] B. Ganguly, A. Garscadden, J. Williams, and P. Haaland. *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, 1119 (1993).
 - [39] G. Praburam and J. Goree. *Phys. Plasmas* **3**, 1212 (1996).
 - [40] M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, H. M. Thomas, G. E. Morfill, A. P. Nefedov, V. E. Fortov, and the PKE-Nefedov Team. *New J. Phys.* **5**, 19 (2003).
 - [41] G. E. Morfill, H. M. Thomas, U. Konopka, H. Rothermel, M. Zuzic, A. Ivlev, and J. Goree. *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1598 (1999).
 - [42] A. P. Nefedov, G. E. Morfill, V. E. Fortov, H. M. Thomas, H. Rothermel, T. Hagl, A. Ivlev, M. Zuzic, B. A. Klumov, A. M. Lipaev, V. I. Molotkov, O. F. Petrov, Y. P. Gidzenko, S. K. Krikalev, W. Shepherd, A. I. Ivanov, M. Roth, H. Binnenbruck, J. Goree, and Y. P. Semenov. *New J. Phys.* **5**, 33 (2003).

-
- [43] B. Walch, M. Horanyi, and S. Robertson. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **22**, 97 (1994).
- [44] C. Arnas, M. Mikikian, and F. Doveil. *Phys. Rev. E* **60**, 7420 (1999).
- [45] A. A. Samarian and S. V. Vladimirov. *Phys. Rev. E* **67**, 066404 (2003).
- [46] S. Ratynskaia, S. Khrapak, A. Zobnin, M. H. Thoma, M. Kretschmer, A. Usachev, V. Yaroshenko, R. A. Quinn, G. E. Morfill, O. Petrov, and V. Fortov. *Phys. Rev. Lett.* **93**, 085001 (2004).
- [47] L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi, and A. A. Samarian. *Phys. Rev. E* **74**, 026403 (2006).
- [48] M.S. Barnes, J.H. Keller, J.C. Forster, J.A. O'Neill, and D.K. Coultas. *Phys. Rev. Lett.* **68**, 313 (1992).
- [49] M.D. Kilgore, J.E. Daugherty, R.K. Porteous, and D.B. Graves. *J. Appl. Phys.* **73**, 7195 (1993).
- [50] S.A. Khrapak, A.V. Ivlev, G.E. Morfill, and H.M. Thomas. *Phys. Rev. E* **66**, 046414 (2002).
- [51] C. Zafiu, A. Melzer, and A. Piel. *Phys. Plasmas* **10**, 1278 (2003).
- [52] A.V. Ivlev, S.A. Khrapak, S.K. Zhdanov, G.E. Morfill, and G. Joyce. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 205007 (2004).
- [53] M. Kretschmer, S. A. Khrapak, S. K. Zhdanov, H. M. Thomas, G. E. Morfill, V. E. Fortov, A. M. Lipaev, V. I. Molotkov, A. I. Ivanov, and M. V. Turin. *Phys. Rev. E* **71**, 056401 (2005).
- [54] V. Land and W. J. Goedheer. *New J. Phys.* **8**, 8 (2006).
- [55] Marjorie Cavarroc. *Nucléation, croissance et comportement de poussières dans les plasmas réactifs radiofréquence basse pression : Des nanocristaux aux grains submicroniques polycristallins*. Thèse Université d'Orléans (2007). <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00274266/fr>.
- [56] G. Viera, M. Mikikian, E. Bertran, P. Roca i Cabarrocas, and L. Boufendi. *J. Appl. Phys.* **92**, 4684 (2002).
- [57] G. Viera, S. Huet, M. Mikikian, and L. Boufendi. *Thin Solid Films* **403-404**, 467 (2002).
- [58] J. L. Dorier, Ch. Hollenstein, and A. Howling. *J. Vac. Sci. Technol. A* **13**, 918 (1995).
- [59] J. Goree, G. E. Morfill, V. N. Tsytovich, and S. V. Vladimirov. *Phys. Rev. E* **59**, 7055 (1999).
- [60] D. Samsonov and J. Goree. *Phys. Rev. E* **59**, 1047 (1999).
- [61] M. R. Akdim and W. J. Goedheer. *Phys. Rev. E* **65**, 015401 (2001).
- [62] D. Jovanović and P. K. Shukla. *Phys. Lett. A* **308**, 369 (2003).
- [63] G. Gozadinos, A. V. Ivlev, and J.-P. Boeuf. *New J. Phys.* **5**, 32 (2003).
- [64] K. Avinash, A. Bhattacharjee, and S. Hu. *Phys. Rev. Lett.* **90**, 075001 (2003).
- [65] V. N. Tsytovich, G. Morfill, U. Konopka, and H. Thomas. *New J. Phys.* **5**, 66 (2003).

- [66] J.-C. Schauer, S. Hong, and J. Winter. *Plasma Sources Sci. Technol.* **13**, 636 (2004).
- [67] S. V. Vladimirov, V. N. Tsytovich, and G. E. Morfill. *Phys. Plasmas* **12**, 052117 (2005).
- [68] V. Land and W. J. Goedheer. *New J. Phys.* **9**, 246 (2007).
- [69] M. Mikikian, L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, and L. Boufendi. *New J. Phys.* **9**, 268 (2007).
- [70] M. Cavarroc, M. Mikikian, Y. Tessier, and L. Boufendi. *Phys. Rev. Lett.* **100**, 045001 (2008).
- [71] A.M. Lipaev, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov, G.E. Morfill, V.E. Fortov, A.V. Ivlev, H.M. Thomas, A.G. Khrapak, V.N. Naumkin, A.I. Ivanov, S.E. Tretschkev, and G.I. Padalka. *Phys. Rev. Lett.* **98**, 265006 (2007).
- [72] L. Boufendi, J. Hermann, A. Bouchoule, B. Dubreuil, E. Stoffels, W.W. Stoffels, and M.L. de Giorgi. *J. Appl. Phys.* **76**, 148 (1994).
- [73] U.V. Bhandarkar, U.R. Kortshagen, and S.L. Girshick. *J. Phys. D : Appl. Phys.* **36**, 1399 (2003).
- [74] A. Descoeudres, L. Sansonnens, and Ch. Hollenstein. *Plasma Sources Sci. Technol.* **12**, 152 (2003).
- [75] W.L. Nighan and W.J. Wiegand. *Phys. Rev. A* **10**, 922 (1974).
- [76] M. Cavarroc, M. Mikikian, Y. Tessier, and L. Boufendi. *Soumis à Phys. Plasmas* (2008).
- [77] M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, and L. Boufendi. *Phys. Plasmas* **13**, 092103 (2006).
- [78] J. Goree, R. A. Quinn, G. E. Morfill, H. M. Thomas, T. Hagl, U. Konopka, H. Rothermel, and M. Zuzic. In *Proceedings of the 4th Microgravity Fluid Physics and Transport Phenomena Conference*, Cleveland (1998).
- [79] M. Mikikian and L. Boufendi. *Phys. Plasmas* **11**, 3733 (2004).
- [80] M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, Y. Tessier, and L. Boufendi. *Phys. Rev. Lett.* **100**, 225005 (2008).
- [81] A.V. Ivlev, M. Kretschmer, M. Zuzic, G.E. Morfill, H. Rothermel, H.M. Thomas, V.E. Fortov, V.I. Molotkov, A.P. Nefedov, A.M. Lipaev, O.F. Petrov, Yu.M. Baturin, A.I. Ivanov, and J. Goree. *Phys. Rev. Lett.* **90**, 055003 (2003).
- [82] L. Couëdel, A.A. Samarian, M. Mikikian, and L. Boufendi. *Phys. Plasmas* **15**, 063705 (2008).
- [83] R.J. Freiberg and L.A. Weaver. *Phys. Rev.* **170**, 336 (1968).
- [84] R.A. Gerber and J.B. Gerardo. *Phys. Rev. A* **7**, 781 (1973).
- [85] L. Couëdel, A.A. Samarian, M. Mikikian, and L. Boufendi. *Soumis à Phys. Rev. Lett.* (2008).
- [86] L.J. Overzet and J. Kleber. *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 512 (1998).
- [87] G. Wenig, M. Schulze, P. Awakowicz, and A. von Keudell. *Plasma Sources Sci. Technol.* **15**, S35 (2006).

Table des figures

II.1 Réacteur Silane, (a) vue du caisson extérieur, (b) schéma représentant la boîte à décharge ainsi que les principaux diagnostics [55]	22
II.2 Réacteur PKE : (a) vue générale, (b) vue de l'espace interélectrode avec un nuage de poussières en suspension au voisinage de la gaine inférieure.	23
III.1 Étapes de la croissance des poussières en chimie SiH_4 [55]	26
III.2 Évolution temporelle de l'amplitude de 3H sur l'expérience Silane [16] . . .	27
III.3 Évolution de l'amplitude de 1H, (a) sur PKE-Nefedov à bord de l'ISS (corrélée au signal de diffusion laser), (b) sur Silane avec et sans gaz réactif [40]. . . .	28
III.4 Clichés MEB de nanoparticules déposées (a) avant, (b) pendant, (c) après, l'instabilité [16].	29
III.5 Cliché HRTEM montrant la structure cristalline des nanoparticules de silicium [56,57].	30
III.6 Nuages de poussières obtenus sur PKE [40] : (a) quelques couches de poussières injectées ($3.4 \mu\text{m}$), (b) dôme de poussières formées, (c) poussières formées de différentes tailles sous l'influence d'une inhomogénéité sur l'électrode inférieure, (d) poussières injectées et formées avec apparition de régions cristallines et d'un void, (e) nuage dense de poussières formées avec un void, (f) expérience en microgravité avec des poussières injectées et formées et présence du void.	31
III.7 Nuage de poussières formées sans void obtenu sur PKE-Nefedov en laboratoire. La caméra forme un angle faible par rapport à la direction du laser. .	33
III.8 Générations successives de poussières sur PKE-Nefedov [40].	34
III.9 Amplitude de 3H montrant l'apparition de générations successives en silane [70].	35
III.10 Mise en évidence de l'existence d'un void sur Silane : corrélation entre 3H, l'intensité d'une raie d'argon et la diffusion laser [70].	36
III.11 Modèle du void sur Silane. Les zones en pointillés représentent différentes générations de poussières (les plus grosses à l'extérieur). Les barres verticales représentent le volume de poussières que les différents substrats ont recueilli [70].	37

IV.1	Instabilité d'agrégation sur Silane observée sur (a) V_{dc} , (b) 3H, (c) spectrogramme (FFT) de 3H [35].	40
IV.2	(a) Diagramme d'existence de l'instabilité d'agrégation en fonction de la puissance radiofréquence et du débit de SiH_4 (o : instabilité, x : pas d'instabilité, $\star$: cas particulier) [55]. (b) Cas particulier de l'instabilité près du seuil d'existence, (c) zoom de (b) [35].	41
IV.3	(a) 3H lors des générations successives, (b) spectrogramme de 3H, (c) transition entre une phase ordonnée et une phase peu ordonnée sur 3H [55, 76]. . .	42
IV.4	Évolution de l'amplitude de 1H au cours de la formation de poussières sur PKE-Nefedov. Les instabilités apparaissent environ 40 s après l'allumage du plasma [77].	43
IV.5	(a) Évolution de l'amplitude de 1H (composante alternative) au cours de la formation de poussières sur PKE-Nefedov. Les instabilités apparaissent environ 40 s après l'allumage du plasma. Les différents régimes sont numérotés de 1 à 7. (b) Spectrogramme du signal présenté en (a) [77].	44
IV.6	(a) Transitions entre les trois premiers régimes organisés. (b) Zoom de la figure IV.5 sur les quatre premiers régimes [77].	45
IV.7	(a) Signature du heartbeat sur les mesures électriques pour différentes pressions. (b) Fréquence du heartbeat en fonction de la pression et de la puissance radiofréquence [79].	46
IV.8	(a) Mouvement du void pendant une séquence contraction-expansion. (b) Reconstruction de 3 séquences contraction-expansion à partir des colonnes centrales des images [69].	48
IV.9	(a) Évolution de la luminosité du plasma pendant une séquence contraction-expansion (fausses couleurs). (b) Reconstruction d'une séquence à partir des lignes centrales des images et superposition du signal électrique [69].	49
V.1	(a) Reconstruction des trajectoires des poussières après l'arrêt de la décharge. (b) Analyse des trajectoires [47].	52
V.2	Fonction de distribution des charges résiduelles (a) à 0.4 mbar, (b) à 1.2 mbar [82].	53
V.3	Évolution de la fonction de distribution de charge simulée durant l'extinction du plasma [85].	54

Annexes

Curriculum Vitae

Articles, Activités rédactionnelles et éditoriales

Conférences, Communications

Jury, Encadrements

Publications relatives au manuscrit

- *Influence of the ambipolar-to-free diffusion transition on dust particle charge in a complex plasma afterglow*
L. Couëdel, A.A. Samarian, **M. Mikikian**, L. Boufendi
Phys. Plasmas **15**, 063705 (2008)
- *Mixed-Mode Oscillations in Complex Plasma Instabilities*
M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, Y. Tessier, L. Boufendi
Phys. Rev. Lett. **100**, 225005 (2008)
- *Successive Generations of Dust in Complex Plasmas : A Cyclic Phenomenon in the Void Region*
M. Cavarroc, **M. Mikikian**, Y. Tessier, L. Boufendi
Phys. Rev. Lett. **100**, 045001 (2008)
- *Self-excited void instability in dusty plasmas : plasma and dust cloud dynamics during the heartbeat instability*
M. Mikikian, L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi
New J. Phys. **9**, 268 (2007)
- *Low Frequency Instabilities during Dust Particle Growth in a Radio-frequency Plasma*
M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, L. Boufendi
Phys. Plasmas **13**, 092103 (2006)
- *Residual dust charges in discharge afterglow*
L. Couëdel, **M. Mikikian**, L. Boufendi, A.A. Samarian
Phys. Rev. E **74**, 026403 (2006)

-
- *Single-crystal silicon nanoparticles : An instability to check their synthesis*
M. Cavarroc, **M. Mikikian**, G. Perrier, L. Boufendi
Appl. Phys. Lett. **89**, 013107 (2006)
 - *Self-excited instability occurring during the nanoparticle formation in an Ar-SiH₄ low pressure radio frequency plasma*
M. Cavarroc, M. Jouanny, K. Radouane, **M. Mikikian**, L. Boufendi
J. Appl. Phys. **99**, 064301 (2006)
 - *Experimental investigations of void dynamics in a dusty discharge*
M. Mikikian and L. Boufendi
Phys. Plasmas **11**, 3733 (2004)
 - *Formation and Behavior of Dust Particle Clouds in a Radio-Frequency Discharge : Results in the Laboratory and under Microgravity Conditions*
M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, H.M. Thomas, G.E. Morfill, A.P. Nefedov, V.E. Fortov and the PKE-Nefedov team
New J. Phys. **5**, 19 (2003)
 - *Atomic structure of the nanocrystalline Si particles appearing in nanostructured Si thin films produced in low-temperature radiofrequency plasmas*
G. Viera, **M. Mikikian**, E. Bertran, P. Roca i Cabarrocas, L. Boufendi
J. Appl. Phys. **92**, 4684 (2002)
 - *Electron diffraction and high-resolution transmission microscopy studies of nanostructured Si thin films deposited by radiofrequency dusty plasmas*
G. Viera, S. Huet, **M. Mikikian**, L. Boufendi
Thin Solid Films **403-404**, 467 (2002)

Maxime MIKIKIAN

GREMI, 14 rue d'Issoudun, BP6744
45067 ORLEANS Cedex 2, FRANCE
tel: +33 (0)2 38 49 48 81 (bureau)
Courriel: maxime.mikikian@univ-orleans.fr



34 ans, Nationalité française

Chargé de Recherche CNRS (CR2)

Depuis 10/2004, Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés, GREMI
UMR 6606, CNRS/Université d'Orléans

EXPERIENCE

12/2000-09/2004 CONTRAT POST-DOCTORAL

Etude de la formation et du comportement de poussières dans un plasma en microgravité
GREMI, Financement CNES

02/2000-11/2000 SCIENTIFIQUE DU CONTINGENT

Calcul des conductivités électrique et thermique dans les plasmas denses par la méthode de Ziman généralisée
CEA/DAM Ile de France, Département de Physique Théorique et Appliquée (DPTA)

1996-1999 DOCTORAT RAYONNEMENT ET PLASMAS

Piégeage de poussières dans la gaine d'un plasma de décharge continue
Mention Très honorable avec Félicitations du Jury
Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM), UMR 6633, CNRS/Université de Provence (Aix-Marseille I)
Financement du Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie (MENRT)

1996 STAGE DE DEA (4 mois)

Contamination par des poussières d'un plasma d'argon produit par une décharge à cathodes chaudes
PIIM

1995 STAGE DE MAÎTRISE (5 semaines)

Photométrie stellaire, dépouillement informatique
Observatoire de Marseille

FORMATION

1996	DEA RAYONNEMENT ET PLASMAS <i>Mention Bien</i> Université de Provence
1995	MAÎTRISE DE PHYSIQUE Université de Provence
1994	LICENCE DE PHYSIQUE Université de Provence
1993	DEUG SCIENCES ET STRUCTURE DE LA MATIERE (SSM) Université de Provence

COMPETENCES

Recherche:	Formation et comportement de poussières dans les plasmas: mécanismes de croissance, phénomènes de charge, instabilités, interactions entre poussières et poussières-plasma (GREMI, PIIM) Conductivités électrique et thermique dans les plasmas denses (CEA)
Dispositifs:	Techniques du vide Décharges continue et radio-fréquence
Diagnostics:	Sonde de Langmuir, Sonde émissive, Sondes différentielles Fluorescence Induite par Laser (LIF), Spectroscopie d'émission optique (OES), Diffusion de la lumière laser (LLS) Imagerie vidéo (caméra CCD, imagerie rapide, acquisition et traitement d'images)
Publications:	20 articles parus ou à paraître dans des revues internationales à comité de lecture 2 actes de conférence à comité de lecture 1 recueil d'actes en tant que co-éditeur (AIP Conference Proceedings) 7 séminaires Conférences internationales: 32 actes de conférence 2 conférences invitées, 9 en tant que co-auteur 5 présentations orales, 20 en tant que co-auteur 10 posters, 25 en tant que co-auteur Colloques: 6 présentations orales, 6 en tant que co-auteur 1 poster, 6 en tant que co-auteur

Informatique: Windows, UNIX
LaTeX, MS Office
Matlab, Fortran, Turbo Pascal
HTML

Qualifications: Qualification "Maître de conférences" en 2001 (CNU 30^{ème} section)

Responsabilités: Membre élu du conseil de laboratoire (GREMI)
Membre du conseil scientifique (GREMI)
Membre de 2 jurys de thèse en 2007 (examinateur)
Coorganisateur, secrétaire de conférence et co-éditeur du recueil d'actes de la 4th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (ICPDP4), 13-17 juin 2005 Orléans, France
Rapporteur pour les revues:
New Journal of Physics (IOP)
Plasma Physics and Controlled Fusion (IOP)
Plasma Sources Science and Technology (IOP)
Responsable du site internet du GREMI
Sauveteur Secouriste du Travail (SST)

Encadrement: Co-encadrant de 2 étudiants en thèse:
M. Cavarroc (thèse soutenue en octobre 2007)
L. Couëdel (soutenance prévue en septembre 2008)
Encadrement de stages et projets:
2 stages de Master 2
1 stage de Master 1
2 stages 4^{ème} année d'école d'ingénieurs
2 projets 5^{ème} année d'école d'ingénieurs
6 projets 4^{ème} année d'école d'ingénieurs

Projets: Participation à des projets et contrats:
6th PCRDT: H-alpha solar
CNES: mission ANDROMEDE, Aide à la recherche
Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS
Programme FAST (France-Australie)
Collaborations internationales:
France: LPICM
Allemagne: PKE, Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics
Russie: PKE, Intitute for High Energy Densities
Australie: Université de Sydney, Complex Plasma Laboratory

Langues: Anglais, Espagnol: courant

Articles, Activités rédactionnelles et éditoriales

ARTICLES DANS DES REVUES A COMITE DE LECTURE

- [A20] Charge électrique résiduelle sur des poudres à l'extinction d'un plasma poussiéreux**
L. Couëdel, A. Mezeghrane, **M. Mikikian**, Y. Tessier, A.A. Samarian, C. Cuthbert, L. Boufendi
A paraître dans J. Electrostat. (2008), Facteur d'impact 2006: FI2006=0.467
- [A19] Plasma Emission Modifications and Instabilities Induced by the Presence of Growing Dust Particles**
M. Mikikian, L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi
IEEE Trans. Plasma Sci. **36**, 1012 (2008), FI2006=1.144
- [A18] Nanostructured Silicon Thin Films Deposited Under Dusty Plasma Conditions**
M. Cavarroc, **M. Mikikian**, Y. Tessier, L. Boufendi
IEEE Trans. Plasma Sci. **36**, 1016 (2008), FI2006=1.144
- [A17] Dust Cloud Dynamics in a Complex Plasma Afterglow**
L. Couëdel, A.A. Samarian, **M. Mikikian**, L. Boufendi
IEEE Trans. Plasma Sci. **36**, 1014 (2008), FI2006=1.144
- [A16] Dust density effect on complex plasma decay**
L. Couëdel, A.A. Samarian, **M. Mikikian**, L. Boufendi
Phys. Lett. A **372**, 5336 (2008), FI2006=1.460
- [A15] Influence of the ambipolar-to-free diffusion transition on dust particle charge in a complex plasma afterglow**
L. Couëdel, A.A. Samarian, **M. Mikikian** and L. Boufendi
Phys. Plasmas **15**, 063705 (2008), FI2006=2.258
- [A14] Mixed-Mode Oscillations in Complex Plasma Instabilities**
M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, Y. Tessier, L. Boufendi
Phys. Rev. Lett. **100**, 225005 (2008), FI2006=7.072
- [A13] Successive Generations of Dust in Complex Plasmas: A Cyclic Phenomenon in the Void Region**
M. Cavarroc, **M. Mikikian**, Y. Tessier, L. Boufendi
Phys. Rev. Lett. **100**, 045001 (2008), FI2006=7.072

- [A12] *Self-excited void instability in dusty plasmas: plasma and dust cloud dynamics during the heartbeat instability*
M. Mikikian, L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi
New J. Phys. **9**, 268 (2007), FI2006=3.754
- [A11] *Low Frequency Instabilities during Dust Particle Growth in a Radio-frequency Plasma*
M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, L. Boufendi
Phys. Plasmas **13**, 092103 (2006), FI2006=2.258
- [A10] *Residual dust charges in discharge afterglow*
L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi, A.A. Samarian
Phys. Rev. E **74**, 026403 (2006), FI2006=2.438
- [A9] *Single-crystal silicon nanoparticles: An instability to check their synthesis*
M. Cavarroc, M. Mikikian, G. Perrier, L. Boufendi
Appl. Phys. Lett. **89**, 013107 (2006), FI2006=3.977
- [A8] *Self-excited instability occurring during the nanoparticle formation in an Ar-SiH₄ low pressure radio frequency plasma*
M. Cavarroc, M. Jouanny, K. Radouane, M. Mikikian, L. Boufendi
J. Appl. Phys. **99**, 064301 (2006), FI2006=2.316
- [A7] *Experimental investigations of void dynamics in a dusty discharge*
M. Mikikian and L. Boufendi
Phys. Plasmas **11**, 3733 (2004), FI2006=2.258
- [A6] *Formation and Behavior of Dust Particle Clouds in a Radio-Frequency Discharge: Results in the Laboratory and under Microgravity Conditions*
M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, H.M. Thomas, G.E. Morfill, A.P. Nefedov, V.E. Fortov and the PKE-Nefedov team
New J. Phys. **5**, 19 (2003), FI2006=3.754
- [A5] *Atomic structure of the nanocrystalline Si particles appearing in nanostructured Si thin films produced in low-temperature radiofrequency plasmas*
G. Viera, M. Mikikian, E. Bertran, P. Roca i Cabarrocas, L. Boufendi
J. Appl. Phys. **92**, 4684 (2002), FI2006=2.316
- [A4] *Electron diffraction and high-resolution transmission microscopy studies of nanostructured Si thin films deposited by radiofrequency dusty plasmas*
G. Viera, S. Huet, M. Mikikian, L. Boufendi
Thin Solid Films **403-404**, 467 (2002), FI2006=1.666
- [A3] *Micro-sphere levitation in a sheath of a low pressure continuous discharge*
C. Arnas, M. Mikikian, F. Doveil
Physica Scripta **T89**, 163 (2001), FI2006=1.161
- [A2] *Sheath modification in the presence of dust particles*
C. Arnas, M. Mikikian, G. Bachet, F. Doveil
Phys. Plasmas **7**, 4418 (2000), FI2006=2.258

[A1] *High negative charge of a dust particle in a hot cathode discharge*

C. Arnas, [M. Mikikian](#), F. Doveil
Phys. Rev. E **60**, 7420 (1999), FI2006=2.438

PROCEEDINGS AVEC COMITE DE LECTURE

[PR2] *Dust growth instabilities in silane-based plasmas*

[M. Cavarroc](#), [M. Mikikian](#), Y. Tessier, L. Boufendi
WDS'06 Proceedings of Contributed Papers: Part II - Physics of Plasmas and Ionized Media, ed. J. Safrankova and J. Pavlu, Prague, Matfyzpress, p. 59-64, 2006
http://www.mff.cuni.cz/win/en/veda/konference/wds/contents/pdf06/WDS06_210_f2_Cavarroc.pdf

[PR1] *Formation, growth and behavior of dust particles in a sputtering discharge*

L. Couëdel, [M. Cavarroc](#), Y. Tessier, [M. Mikikian](#), L. Boufendi, A.A. Samarian
WDS'06 Proceedings of Contributed Papers: Part II - Physics of Plasmas and Ionized Media, ed. J. Safrankova and J. Pavlu, Prague, Matfyzpress, p. 42-47, 2006
http://www.mff.cuni.cz/win/en/veda/konference/wds/contents/pdf06/WDS06_207_f2_Cavarroc+Couedel.pdf

PROCEEDINGS

[P32] *Self-excited instabilities in plasmas containing dust particles (dusty or complex plasmas)*

[M. Mikikian](#), [M. Cavarroc](#), L. Couëdel, Y. Tessier, L. Boufendi
Chaos, Complexity and Transport: Theory and Applications, Proceedings of the CCT'07, Marseille (France), 4-8 June 2007, ed. C. Chandre, X. Leoncini, G. Zaslavsky, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (Singapore), p. 217 (2008)

[P31] *Dusty plasma dynamics during a void instability: the heartbeat instability*

[M. Mikikian](#), L. Couëdel, [M. Cavarroc](#), Y. Tessier, L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007, ECA Vol. **31F**, P-5.053 (2007), http://epsppd.epfl.ch/Warsaw/pdf/P5_053.pdf

[P30] *Dust cloud dynamics during particle successive generations*

[M. Cavarroc](#), [M. Mikikian](#), Y. Tessier, L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007, ECA Vol. **31F**, P-5.045 (2007), http://epsppd.epfl.ch/Warsaw/pdf/P5_045.pdf

[P29] *Dependence of dust residual charge on plasma parameters*

L. Couëdel, [M. Mikikian](#), A.A. Samarian and L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007, ECA Vol. **31F**, O-5.008 (2007), http://epsppd.epfl.ch/Warsaw/pdf/O5_008.pdf

[P28] Complex plasma afterglow

L. Couëdel, A. Mezeghrane, M. Mikikian, A.A. Samarian, M. Cavarroc, Y. Tessier and L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007, ECA Vol. **31F**, P-2.122 (2007), http://epsppd.epfl.ch/Warsaw/pdf/P2_122.pdf

[P27] Plasma decays in dusty afterglow

L. Couëdel, A. Mezeghrane, B.W. James, M. Mikikian, A.A. Samarian, M. Cavarroc, Y. Tessier and L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007, ECA Vol. **31F**, P-2.068 (2007), http://epsppd.epfl.ch/Warsaw/pdf/P2_068.pdf

[P26] Study of hydrocarbon dust particle formation in Ar-CH₄ radiofrequency low pressure discharge

A. Mezeghrane, L. Couëdel, G. Wattieaux, M. Mikikian, O. Lamrous, Y. Tessier, L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007, ECA Vol. **31F**, P-5.047 (2007), http://epsppd.epfl.ch/Warsaw/pdf/P5_047.pdf

[P25] Dust particle synthesis in N₂-CH₄ gas mixture capacitively coupled radiofrequency discharge

A. Mezeghrane, L. Couëdel, G. Wattieaux, M. Mikikian, O. Lamrous, Y. Tessier, L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007, ECA Vol. **31F**, O-3.006 (2007), http://epsppd.epfl.ch/Warsaw/pdf/O3_006.pdf

[P24] Dust Charge in Complex Plasma Afterglow

L. Couëdel, A.A. Samarian, M. Mikikian, L. Boufendi, C. Cuthbert
Australian Institute of Physics 17th National Congress, Brisbane (Australie), 3-8 décembre 2006, Paper 0080

[P23] Charge électrique résiduelle sur des poudres à l'extinction d'un plasma poussiéreux

L. Couëdel, M. Mikikian, Y. Tessier, L. Boufendi, A. A. Samarian
5^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique, p. 114, Grenoble, 30-31 août 2006

[P22] Residual electric charges on dust grains at plasma extinction

L. Couëdel, M. Mikikian, Y. Tessier, L. Boufendi, A.A. Samarian
33rd EPS Conference on Plasma Physics, Rome (Italie), 19-23 juin 2006, ECA Vol. **30I**, P-4.042 (2006), http://epsppd.epfl.ch/Roma/pdf/P4_042.pdf

[P21] Formation of single-crystal silicon nanoparticles at very low gas temperature in a rf silane-based discharge

M. Cavarroc, M. Mikikian, L. Couëdel, L. Boufendi
33rd EPS Conference on Plasma Physics, Rome (Italie), 19-23 juin 2006, ECA Vol. **30I**, P-4.043 (2006), http://epsppd.epfl.ch/Roma/pdf/P4_043.pdf

[P20] Residual dust charges in an afterglow plasma

L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi and A.A. Samarian
13th International Congress on Plasma Physics, Kiev (Ukraine), mai 22-26, 2006

- [P19] *Experimental study of nanocrystallite formation and growth in an Ar/SiH₄ radiofrequency plasma at temperatures below 0°C*
M. Cavarroc, M. Mikikian and L. Boufendi
6th International Conference on Reactive Plasmas and 23rd Symposium on Plasma Processing, Matsushima/Sendai (Japon), 24-27 janvier 2006
- [P18] *New Insights on the Earlier Phase of Nucleation and Growth of Nanoparticles in Argon-Silane Radiofrequency Plasmas*
M. Cavarroc, M. Mikikian and L. Boufendi
6th International Conference on Reactive Plasmas and 23rd Symposium on Plasma Processing, Matsushima/Sendai (Japon), 24-27 janvier 2006
- [P17] *Electrical diagnostic and control of dust particle forming radio-frequency plasma*
M. Ch. Jouanny, L. Boufendi, M. Cavarroc and M. Mikikian
17th International Symposium on Plasma Chemistry, Toronto (Canada), 7-12 août 2005
- [P16] *Dust Growth Instabilities in a Dense Cloud of Particles*
M. Mikikian, M. Cavarroc and L. Boufendi
New Vistas in Dusty Plasmas: 4th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Orléans (France), 13-17 juin 2005, ed. L. Boufendi, M. Mikikian and P.K. Shukla, AIP Conference Proceedings **799**, p. 319 (2005)
- [P15] *Instabilities of the Void Region in a Dense Cloud of Grown Dust Particles*
M. Mikikian, M. Cavarroc, N. Chaumeix and L. Boufendi
New Vistas in Dusty Plasmas: 4th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Orléans (France), 13-17 juin 2005, ed. L. Boufendi, M. Mikikian and P.K. Shukla, AIP Conference Proceedings **799**, p. 323 (2005)
- [P14] *Experimental Investigation of an Instability during the Nanocrystallite Formation in an Ar/SiH₄ Radiofrequency Plasma*
M. Cavarroc, M. Mikikian and L. Boufendi
New Vistas in Dusty Plasmas: 4th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Orléans (France), 13-17 juin 2005, ed. L. Boufendi, M. Mikikian and P.K. Shukla, AIP Conference Proceedings **799**, p. 315 (2005)
- [P13] *Experimental study of non-linear effects in the radiofrequency sheath of rare gas/silane plasmas*
M. Cavarroc, P. Belenguer, M. Mikikian and L. Boufendi
6th Frontiers in Low-Temperature Plasma Diagnostics, 17-21 avril 2005, Les Houches (France)
- [P12] *Instabilities in a dense cloud of grown dust particles*
M. Mikikian, M. Cavarroc, N. Chaumeix and L. Boufendi
31st EPS Conference on Plasma Physics, Londres, 28 juin-2 juillet 2004, ECA Vol. **28G**, O-2.13, http://epsppd.epfl.ch/London/pdf/O2_13.pdf
- [P11] *Electrical characterization of dust forming plasma in different chemistries*
A. Mezeghrane, M. Jouanny, M. Cavarroc, M. Mikikian and L. Boufendi
31st EPS Conference on Plasma Physics, Londres, 28 juin-2 juillet 2004, ECA Vol. **28G**, O-1.09, http://epsppd.epfl.ch/London/pdf/O1_09.pdf

- [P10] *Nucleation and Growth of nanosized dust particles in radio-frequency low pressure discharges and applications***
L. Boufendi, M.C. Jouanny, K. Radouane and M. Mikikian
 XXVIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG), Greifswald (Allemagne) 15-20 juillet 2003
- [P9] *Spectroscopic Analysis and Instabilities Observation during Dust Particle Growth***
M. Mikikian, L. Boufendi and A. Bouchoule
 30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St Petersburg (Russie) 7-11 juillet 2003, ECA Vol. **27A**, O-3.1B
http://epsppd.epfl.ch/StPetersburg/PDF/O3_001B.PDF
- [P8] *Expérience sur la croissance d'un nuage de poussières dans un plasma à bord de la station spatiale ISS***
M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule
 8^{ème} Congrès de la Division Plasma de la Société Française de Physique, p. 25, Cadarache, 5-7 mai 2003
- [P7] *Silicon Nanocrystallites Growth in Argon Silane Low Pressure Radio Frequency Plasmas and Applications***
M.C. Jouanny, V. Bertagna, K. Radouane, M. Mikikian and L. Boufendi
 16th ESCAMPIG and 5th ICRP Joint Conference, Grenoble, 14-18 juillet 2002
- [P6] *Dust Particles Growth and Behavior under Microgravity Conditions***
M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, G.E. Morfill, H.M. Thomas, H. Rothermel, T. Hagl, A.P. Nefedov, V.E. Fortov, V.I. Molotkov, O. Petrov, A. Lipaev, Yu.P. Semenov, A.I. Ivanov, V. Afanas'ev, C. Haignere and K. Kozev
 29th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Montreux (Suisse), 17-21 juin 2002, ECA Vol. **26B**, O-4.34, http://epsppd.epfl.ch/Montreux/pdf/O4_34.pdf
- [P5] *Dust Particles Growth and Behavior under Microgravity Conditions***
M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, G.E. Morfill, H.M. Thomas, H. Rothermel, T. Hagl, A.P. Nefedov, V.E. Fortov, V.I. Molotkov, O. Petrov, A. Lipaev, Yu.P. Semenov, A.I. Ivanov, V. Afanas'ev, C. Haignere and K. Kozev
 Dusty Plasmas in the New Millennium : 3rd International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Durban (Afrique du Sud), 20-24 mai 2002, ed. R. Bharuthram, M.A. Hellberg, P.K. Shukla and F. Verheest, AIP Conference Proceedings **649**, p. 135
- [P4] *Plasma Grown Particles : from Injected Gases to Nanoparticles and Nanomaterials, from Injected Particles to Dust Clouds in the PKE Experiment***
 P. Roca i Cabarrocas, A. Fontcuberta i Morral, A.V. Kharchenko, S. Lebib, L. Boufendi, S. Huet, M. Mikikian, M. Jouanny and A. Bouchoule
 Dusty Plasmas in the New Millennium : 3rd International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Durban (Afrique du Sud), 20-24 mai 2002, ed. R. Bharuthram, M.A. Hellberg, P.K. Shukla and F. Verheest, AIP Conference Proceedings **649**, p. 45

- [P3] *Caractéristiques physiques de base des plasmas poussiéreux de laboratoire***
 C. Arnas, M. Mikikian
 7^{ème} Congrès de la Division Plasma de la Société Française de Physique, Piriac-sur-mer,
 28-30 mars 2001
- [P2] *Dust particles influence on the sheath of a thermoionic discharge***
 M. Mikikian, C. Arnas, K. Quotb, F. Doveil
 Frontiers in dusty plasmas: Proceedings of the 2nd International Conference on the Physics
 of Dusty Plasmas (ICPDP), Hakone (Japon), 24-28 mai 1999, ed. Y. Nakamura, T.
 Yokota, P.K. Shukla, p. 207, Elsevier Science (2000)
- [P1] *Dust particle levitation in a hot cathode discharge at low argon pressure***
 C. Arnas, M. Mikikian, K. Quotb, F. Doveil
 1998 International Congress on Plasma Physics & 25th EPS Conference on Controlled
 Fusion and Plasma Physics, Prague (République Tchèque), 29 juin-3 juillet 1998, ECA
 Vol. 22C, p. 2493, http://epsppd.epfl.ch/Praha/WEB/98ICPP_W/J001PR.PDF

RAPPORTS INTERNES

- [R1] *Calcul des conductivités électrique et thermique dans les plasmas denses par la méthode de Ziman généralisée***
 M. Mikikian
 Rapport CEA/DIF/DPTA/SPPE N° 00-97/DO (2000)

ARTICLES PEDAGOGIQUES

- [AP1] *Orléans à bord de la Station Spatiale Internationale : Des plasmas poussiéreux dans l'espace***
 Microscop (journal de la délégation Centre-Auvergne-Limousin du CNRS) **40**, 16 (2002)

ACTIVITES EDITORIALES

- [L1] *New Vistas in Dusty Plasmas***, 4th International Conference on the Physics of Dusty
 Plasmas, Orléans, 13-17 juin 2005, edited by L. Boufendi, M. Mikikian and P.K. Shukla,
 AIP Conference Proceedings **799** (2005)

RAPPORTEUR DE REVUES

Plasma Physics and Controlled Fusion (IOP): 3
New Journal of Physics (IOP): 2

Conférences, Communications

CONFERENCES INVITEES

Auteur présentant

[CI2] Particular Threshold Behavior of Dusty Plasma Instabilities

[M. Mikikian](#), M. Cavarroc, L. Couëdel, Y. Tessier, L. Boufendi

5th International Conference on the Physics of Dusty Plasma (ICDP5), Ponta Delgada (Azores), 18-23 mai 2008

[CI1] Expérience sur la croissance d'un nuage de poussières dans un plasma à bord de la station spatiale ISS

[M. Mikikian](#), L. Boufendi, A. Bouchoule

8^{ème} Congrès de la Division Plasma de la Société Française de Physique, Cadarache, 5-7 mai 2003

Co-auteur

[CCI9] Particle growth and detection in low temperature plasmas

[L. Boufendi](#), C. Dupuis, G. Wattiaux, Y. Tessier and [M. Mikikian](#)

35th EPS Plasma Physics Conference, Hersonissos, Crete, (Grèce), 9-13 juin 2008

[CCI8] Characterization of the Different Instabilities Occurring in a Dusty Plasma

[L. Boufendi](#), M. Cavarroc, [M. Mikikian](#) and [L. Couëdel](#)

14th Gaseous Electronics Meeting, Workshop on Dynamics and Statistics of Complex Multi-Component Systems in Ionized Gases, Murramarang NSW (Australie), 5-9 février 2006

[CCI7] New Insights on the Earlier Phase of Nucleation and Growth of Nanoparticles in Argon-Silane Radiofrequency Plasmas

M. Cavarroc, [M. Mikikian](#) and [L. Boufendi](#)

6th International Conference on Reactive Plasmas and 23rd Symposium on Plasma Processing, Matsushima/Sendai (Japon), 24-27 janvier 2006

[CCI6] Electrical diagnostic and control of dust particle forming radio-frequency plasma

M. Ch. Jouanny, [L. Boufendi](#), M. Cavarroc and [M. Mikikian](#)

17th International Symposium on Plasma Chemistry, Toronto (Canada), 7-12 août 2005

[CCI5] Dusty plasmas: nucleation, growth and behavior of dense dust particle clouds and industrial impacts

L. Boufendi, M.C. Jouanny, K. Radouane and M. Mikikian

IV International Conference Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk (Biélorussie)
15-19 septembre 2003

[CCI4] Nucleation and Growth of nanosized dust particles in radio-frequency low pressure discharges and applications

L. Boufendi, M.C. Jouanny, K. Radouane and M. Mikikian

XXVIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG), Greifswald (Allemagne) 15-20 juillet 2003

[CCI3] Plasma Grown Particles : from Injected Gases to Nanoparticles and Nanomaterials, from Injected Particles to Dust Clouds in the PKE Experiment

P. Roca i Cabarrocas, A. Fontcuberta i Morral, A.V. Kharchenko, S. Lebib, L. Boufendi, S. Huet, M. Mikikian, M. Jouanny and A. Bouchoule

3rd International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Durban (Afrique du Sud),
20-24 mai 2002

[CCI2] Caractéristiques physiques de base des plasmas poussiéreux de laboratoire

C. Arnas, M. Mikikian

7^{ème} Congrès de la Division Plasma de la Société Française de Physique, Piriac-sur-mer,
28-30 mars 2001

[CCI1] Micro-sphere levitation in a sheath of a low pressure continuous discharge

C. Arnas, M. Mikikian, F. Doveil

International Topical Conference on Plasma Physics : Colloidal Plasma, Trieste (Italie),
3-7 juillet 2000

PRESENTATIONS ORALES

Auteur présentant

[CO5] Self-excited instabilities in plasmas containing dust particles (dusty plasmas)

M. Mikikian, M. Cavarroc, L. Couëdel, Y. Tessier, L. Boufendi

Chaos, Complexity and Transport: Theory and Applications (CCT07), marseille (France),
4-8 juin 2007

[CO4] Charge Related Phenomena in Dusty Plasmas: Instabilities and Residual Charges

M. Mikikian, L. Couëdel, M. Cavarroc and L. Boufendi

14th Gaseous Electronics Meeting, Workshop on Dynamics and Statistics of Complex
Multi-Component Systems in Ionized Gases, Murramarang NSW (Australie), 5-9 février 2006

[CO3] Instabilities in a dense cloud of grown dust particles

M. Mikikian, M. Cavarroc, N. Chaumeix and L. Boufendi

31st EPS Conference on Plasma Physics, Londres, 28 juin-2 juillet 2004

[CO2]Spectroscopic Analysis and Instabilities Observation during Dust Particle Growth

M. Mikikian, L. Boufendi and A. Bouchoule

30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St Petersburg (Russie)
7-11 juillet 2003

[CO1]Dust Particles Growth and Behavior under Microgravity Conditions

M. Mikikian, L. Boufendi, A. Bouchoule, G.E. Morfill, H.M. Thomas, H. Rothermel, T. Hagl, A.P. Nefedov, V.E. Fortov, V.I. Molotkov, O. Petrov, A. Lipaev, Yu.P. Semenov, A.I. Ivanov, V. Afanas'ev, C. Haignere and K. Kozev

29th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Montreux (Suisse) 17-21 juin 2002

Co-auteur

[CCO20] Afterglow dynamics of a dust cloud

B. Layden, L. Couëdel, A. Samarian, M. Mikikian, S.V. Vladimirov, L. Boufendi
35th EPS Plasma Physics Conference, Hersonissos, Crete, (Grèce), 9-13 juin 2008

[CCO19] Diffusion in complex (dusty) plasma afterglow

L. Couëdel, A.A. Samarian, M. Mikikian and L. Boufendi

15th Gaseous Electronics Meeting, Murramarang NSW (Australie), 3-6 février 2008

[CCO18] Carbon dust particles growth in low pressure Ar-CH₄ cold plasma

A. Mezeghrane, L. Couëdel, M. Mikikian, O. Lamrous, Y. Tessier, L. Boufendi

1st Workshop on the "Dust in Fusion Plasmas", Satellite Meeting of the 34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 8-10, 2007

[CCO17] Dependence of dust residual charge on plasma parameters

L. Couëdel, M. Mikikian, A.A. Samarian and L. Boufendi

34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007

[CCO16] Dust particle synthesis in N₂-CH₄ gas mixture capacitively coupled radiofrequency discharge

A. Mezeghrane, L. Couëdel, G. Wattiaux, M. Mikikian, O. Lamrous, Y. Tessier, L. Boufendi

34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007

[CCO15] Tailoring of silicon nanoparticles in a RF silane-based discharge using very low gas temperatures

M. Cavarroc, M. Mikikian, Y. Tessier, L. Boufendi

16th International Colloquium on Plasma Processes (CIP), Toulouse (France), juin 4-8, 2007

[CCO14]Complex Plasma Afterglow

L. Couëdel, A.A. Samarian, M. Mikikian, L. Boufendi

7th Workshop on Fine Particle Plasmas, Toki (Japon), 15-16 décembre 2006

[CCO13]Dust Charge in Complex Plasma Afterglow

L. Couëdel, A.A. Samarian, M. Mikikian, L. Boufendi, C. Cuthbert

Australian Institute of Physics 17th National Congress, Brisbane (Australie), 3-8 décembre 2006

- [CCO12] *Charge électrique résiduelle sur des poudres à l'extinction d'un plasma poussiéreux***
L. Couëdel, M. Mikikian, Y. Tessier, L. Boufendi, A. A. Samarian
 5^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique, Grenoble, 30-31 août 2006
- [CCO11] *Dust growth instabilities in silane-based plasmas***
M. Cavarroc, M. Mikikian, Y. Tessier, L. Boufendi
 15th Annual Student Conference, Week of Doctoral Students, Prague (République Tchèque), 6-9 juin 2006
- [CCO10] *Formation, growth and behavior of dust particles in a sputtering discharge***
 L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, M. Mikikian, L. Boufendi, A.A. Samarian
 15th Annual Student Conference, Week of Doctoral Students, Prague (République Tchèque), 6-9 juin 2006
- [CCO9] *Electrical Characterization of a radiofrequency dust forming plasma***
L. Boufendi, M. Cavarroc, L. Couëdel and M. Mikikian
 14th Gaseous Electronics Meeting, Workshop on Dynamics and Statistics of Complex Multi-Component Systems in Ionized Gases, Murramarang NSW (Australie), 5-9 février 2006
- [CCO8] *Experimental study of nanocrystallite formation and growth in an Ar/SiH₄ radiofrequency plasma at temperatures below 0°C***
M. Cavarroc, M. Mikikian and L. Boufendi
 6th International Conference on Reactive Plasmas and 23rd Symposium on Plasma Processing, Matsushima/Sendai (Japon), 24-27 janvier 2006
- [CCO7] *Electrical diagnostic of radio-frequency silane based plasmas***
 M. Jouanny, L. Boufendi, M. Cavarroc, and M. Mikikian
 6th Frontiers in Low-Temperature Plasma Diagnostics, Les Houches, 17-21 avril 2005,
- [CCO6] *Electrical characterization of dust forming plasma in different chemistries***
 A. Mezeghrane, M. Jouanny, M. Cavarroc, M. Mikikian and L. Boufendi
 31st EPS Conference on Plasma Physics, Londres, 28 juin-2 juillet 2004
- [CCO5] *Les Dusty Plasmas : Physique et Applications***
L. Boufendi, M. Jouanny, M. Mikikian, A. Mezeghrane
 3^{ème} Conférence Internationale sur la Physique et ses Applications, Oran (Algérie), 8-10 décembre 2003
- [CCO4] *Electrical resistivity of dense metal plasmas***
P. Renaudin, C. Blancard, P. Combis, P. Dallot, G. Faussurier, M. Mikikian, P. Noiret, G. Zérah
 10th International Workshop on Radiative Properties of Hot Dense Matter, St Malo 16-20 septembre 2002
- [CCO3] *Control of the Nucleation and Growth of Nanocrystallites in RF Low Pressure Silane Plasmas***
 M.C. Jouanny, K. Radouane, M. Mikikian, M. Dudemaine, L. Boufendi
 29th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Montreux (Suisse) 17-21 juin 2002

[CCO2] *Dust Particles Growth and Behavior under Microgravity Conditions*

[M. Mikikian](#), [L. Boufendi](#), A. Bouchoule, G.E. Morfill, H.M. Thomas, H. Rothermel, T. Hagl, A.P. Nefedov, V.E. Fortov, V.I. Molotkov, O. Petrov, A. Lipaev, Yu.P. Semenov, A.I. Ivanov, V. Afanas'ev, C. Haignere and K. Kozev
3rd International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Durban (Afrique du Sud), 20-24 mai 2002

[CCO1] *Dust particles influence on the sheath of a thermoionic discharge*

[M. Mikikian](#), [C. Arnas](#), K. Quotb, F. Doveil
2nd International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (ICPDP), Hakone (Japon), 24-28 mai 1999

POSTERS

Auteur présentant

[CP10] *Dust Successive Generations in Ar/SiH₄: Dust Cloud dynamics*

M. Cavarroc, [M. Mikikian](#), Y. Tessier, L. Boufendi
5th International Conference on the Physics of Dusty Plasma (ICPDP5), Ponta Delgada (Azores), 18-23 mai 2008

[CP9] *Dusty plasma dynamics during a void instability: the heartbeat instability*

[M. Mikikian](#), L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007

[CP8] *Dust cloud dynamics during particle successive generations*

M. Cavarroc, [M. Mikikian](#), Y. Tessier, L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007

[CP7] *Instabilités dans les Plasmas: Formation de Poussières*

[M. Mikikian](#), M. Cavarroc, L. Couëdel, Y. Tessier, L. Boufendi
9^{ème} Congrès de la Division Plasmas de la Société Française de Physique, Pont-à-Mousson, 2-5 mai 2006

[CP6] *Dust Growth Instabilities in a Dense Cloud of Particles*

[M. Mikikian](#), M. Cavarroc and L. Boufendi
4th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Orléans (France), 13-17 juin 2005

[CP5] *Instabilities of the Void Region in a Dense Cloud of Grown Dust Particles*

[M. Mikikian](#), M. Cavarroc, N. Chaumeix and L. Boufendi
4th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Orléans (France), 13-17 juin 2005

[CP4] *Dust Particles Growth and Behavior in the PKE Experiment*

[M. Mikikian](#), L. Boufendi, A. Bouchoule
5th European Workshop on Dusty and Colloidal Plasmas, Potsdam (Allemagne), 23-25 août 2001

[CP3] *First Results on Dust Formation for the PKE Experiment on ISS*

[M. Mikikian](#), L. Boufendi, A. Bouchoule
9th Workshop on the Physics of Dusty Plasmas, Iowa City (Etats-Unis), 21-23 mai 2001

[CP2] *Lévitiation de poussières dans une décharge continue à basse pression*

[M. Mikikian](#), C. Arnas, K. Quotb, F. Doveil
6^{ème} Congrès de la Division Plasmas de la Société Française de Physique, Orléans, 7-9 avril 1999

[CP1] *Observation of dust levitation in a thermoionic low pressure discharge*

C. Arnas, [M. Mikikian](#), F. Doveil
XXIII ICPIG (International Conference on Phenomena in Ionized Gases), Toulouse, 17-22 juillet 1997

Co-auteur

[CCP25] *Dust Particles in Discharge Afterglow*

L. Couëdel, [A.A. Samarian](#), [M. Mikikian](#), L. Boufendi
35th EPS Plasma Physics Conference, Hersonissos, Crete, (Grèce), 9-13 juin 2008

[CCP24] *Influence of Plasma Diffusion Losses on Dust Charge Relaxation in Discharge Afterglow*

[L. Couëdel](#), [A.A. Samarian](#), [M. Mikikian](#), L. Boufendi
5th International Conference on the Physics of Dusty Plasma (ICPDP5), Ponta Delgada (Azores), 18-23 mai 2008

[CCP23] *Dust Density Influence on Complex Plasma Decay*

[L. Couëdel](#), [A.A. Samarian](#), [M. Mikikian](#), L. Boufendi
5th International Conference on the Physics of Dusty Plasma (ICPDP5), Ponta Delgada (Azores), 18-23 mai 2008

[CCP22] *Dust Growth in RF Sputtering Discharges*

B. Churton, [L. Couëdel](#), [A.A. Samarian](#), [M. Mikikian](#), L. Boufendi
5th International Conference on the Physics of Dusty Plasma (ICPDP5), Ponta Delgada (Azores), 18-23 mai 2008

[CCP21] *Dust Cloud Dynamics in Complex Plasma Afterglow*

B. Layden, [L. Couëdel](#), [A.A. Samarian](#), [M. Mikikian](#), S.V. Vladimirov, L. Boufendi
5th International Conference on the Physics of Dusty Plasma (ICPDP5), Ponta Delgada (Azores), 18-23 mai 2008

[CCP20] *On-Ground Measurement of Dust Residual Charge in a Dusty Plasma Afterglow Using Thermophoretic Gravity Compensation*

L. Couëdel, A. Mezeghrane, M. Mikikian, A.A. Samarian, L. Boufendi
9th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS 2007), Cairns (Australie), août 5-10, 2007

[CCP19] *Dynamique du nuage de poudres dans un plasma : Void et Instabilités*

M. Cavarroc, M. Mikikian, L. Couëdel, Y. Tessier, L. Boufendi
Congrès Général de la Société Française de Physique, Grenoble (France), 9-13 juillet 2007

[CCP18] *Complex plasma afterglow*

L. Couëdel, A. Mezeghrane, M. Mikikian, A.A. Samarian, M. Cavarroc, Y. Tessier and L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007

[CCP17] *Plasma decays in dusty afterglow*

L. Couëdel, A. Mezeghrane, B.W. James, M. Mikikian, A.A. Samarian, M. Cavarroc, Y. Tessier and L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007

[CCP16] *Study of hydrocarbon dust particle formation in Ar-CH₄ radiofrequency low pressure discharge*

A. Mezeghrane, L. Couëdel, G. Wattieaux, M. Mikikian, O. Lamrous, Y. Tessier, L. Boufendi
34th EPS Conference on Plasma Physics, Warsaw (Pologne), juillet 2-6, 2007

[CCP15] *Dust cloud dynamics during silicon particle deposition*

M. Cavarroc, M. Mikikian, Y. Tessier, L. Boufendi
16th International Colloquium on Plasma Processes (CIP), Toulouse (France), juin 4-8, 2007

[CCP14] *Complex Plasma Afterglow*

A. Samarian, S. Vladimirov, L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi
Australian Institute of Physics 17th National Congress, Brisbane (Australie), 3-8 décembre 2006

[CCP13] *Dynamics of Dust with Residual Charges*

A. Samarian, S. Vladimirov, L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi
8th Asia-Pacific Conference on Plasma Science and Technology and 19th Symposium on Plasma Science for Materials, Cairns (Australie), juillet 2-5, 2006

[CCP12] *Residual electric charges on dust grains at plasma extinction*

L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi, A.A. Samarian
33rd EPS Conference on Plasma Physics, Rome (Italie), 19-23 juin 2006

[CCP11] *Formation of single-crystal silicon nanoparticles at very low gas temperature in a rf silane-based discharge*

M. Cavarroc, M. Mikikian, L. Couëdel, L. Boufendi
33rd EPS Conference on Plasma Physics, Rome (Italie), 19-23 juin 2006

- [CCP10] *Residual dust charges in an afterglow plasma***
L. Couédel, [M. Mikikian](#), L. Boufendi and [A.A. Samarian](#)
13th International Congress on Plasma Physics, Kiev (Ukraine), mai 22-26, 2006
- [CCP9] *Croissance de Nanocristaux de Silicium par PECVD à Très Basses Températures***
[M. Cavarroc](#), [M. Mikikian](#), Y. Tessier, L. Boufendi
9^{ème} Congrès de la Division Plasmas de la Société Française de Physique, Pont-à-Mousson, 2-5 mai 2006
- [CCP8] *Charges Résiduelles Sur Des Poudres A L'extinction D'un Plasma***
L. Couédel, [M. Mikikian](#), Y. Tessier, L. Boufendi, A.A. Samarian
9^{ème} Congrès de la Division Plasmas de la Société Française de Physique, Pont-à-Mousson, 2-5 mai 2006
- [CCP7] *Caractérisation Electrique d'un Plasma Azote / Méthane et Synthèse de Poudres***
[A. Mezeghrane](#), M. Cavarroc, [M. Mikikian](#), L. Boufendi, O. Lamrous
9^{ème} Congrès de la Division Plasmas de la Société Française de Physique, Pont-à-Mousson, 2-5 mai 2006
- [CCP6] *Experimental Investigation of an Instability during the Nanocrystallite Formation in an Ar/SiH₄ Radiofrequency Plasma***
[M. Cavarroc](#), [M. Mikikian](#) and L. Boufendi
4th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Orléans (France), 13-17 juin 2005
- [CCP5] *Experimental study of non-linear effects in the radiofrequency sheath of rare gas/silane plasmas***
[M. Cavarroc](#), P. Belenguer, [M. Mikikian](#) and L. Boufendi
6th Frontiers in Low-Temperature Plasma Diagnostics, 17-21 avril 2005, Les Houches (France)
- [CCP4] *Nanocrystallite synthesis in radio-frequency low pressure silane plasmas***
[M. Jouanny](#), [M. Mikikian](#) and L. Boufendi
Gordon Research Conference: Plasma Processing Science, Plymouth (Etats-Unis), 15-20 août 2004
- [CCP3] *Silicon Nanocrystallites Growth in Argon Silane Low Pressure Radio Frequency Plasmas and Applications***
[M.C. Jouanny](#), V. Bertagna, K. Radouane, [M. Mikikian](#) and L. Boufendi
16th ESCAMPIG and 5th ICRP Joint Conference, Grenoble, 14-18 juillet 2002
- [CCP2] *Electron diffraction and high-resolution transmission microscopy studies of nanostructured Si thin films deposited by radiofrequency dusty plasmas***
G. Viera, [S. Huet](#), [M. Mikikian](#), L. Boufendi
E-MRS 2001 Spring Meeting, Strasbourg, 5-8 juin 2001
- [CCP1] *Dust particle levitation in a hot cathode discharge at low argon pressure***
[C. Arnas](#), [M. Mikikian](#), K. Quoth, F. Doveil
ICPP & 25th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Prague (République Tchèque), 29 juin-3 juillet 1998

COLLOQUES: PRESENTATIONS ORALES

Auteur présentant

[cO6] *Instabilités dans les plasmas poussiéreux*

[M. Mikikian](#), L. Couëdel, M. Cavarroc, Y. Tessier, L. Boufendi
GDR Micropesanteur Fondamentale et Appliquée, Fréjus (France), 4-6 décembre 2006

[cO5] *Séance vidéo sur les poudres dans les plasmas*

[M. Mikikian](#)
Réseau Plasmas Froids, Atelier Synthèse et Traitement de Nanoparticules par Plasmas Basse Pression, 20-22 novembre 2005, Gif sur Yvette (France)

[cO4] *Intérêt de la Microgravité pour le Domaine des Plasmas Poussiéreux*

[M. Mikikian](#), L. Boufendi, A. Bouchoule, M. Cavarroc, L. Couëdel, Y. Tessier
GDR Micropesanteur Fondamentale et Appliquée, Carry le Rouet (France), 17-19 octobre 2005

[cO3] *Formation and behavior of dust particle clouds in a plasma: On ground and microgravity experiments*

[M. Mikikian](#), L. Boufendi and A. Bouchoule
2^{ème} réunion de l'Equipe-Projet: Plasmas Froids pour l'Elaboration de Micro et Nanostructures, RTP 27 Nanominiaturisation (STIC), Col de Porte, 4-6 février 2004

[cO2] *Formation de poudres par pulvérisation : Expériences en laboratoire et en microgravité*

[M. Mikikian](#), L. Boufendi, A. Bouchoule
Journées thématiques du MRCT, Nucléation, croissance et transport de nano-microparticules dans un plasma, Gif-sur-Yvette, 7-8 janvier 2003

[cO1] *Latest Measurements (Particle Growth)*

[M. Mikikian](#), L. Boufendi and A. Bouchoule
2nd PKE-Nefedov Symposium, Garching (Allemagne), 14-15 octobre 2002

Co-auteur

[CcO6] *Charges électriques résiduelles sur des poudres à l'extinction d'un plasma poussiéreux*

L. Couëdel, [M. Mikikian](#), L. Boufendi, A.A. Samarian
GDR Micropesanteur Fondamentale et Appliquée, Fréjus (France), 4-6 décembre 2006

[CcO5] *Nanocrystallite synthesis in radio-frequency low pressure silane plasmas and nanostructured silicon thin layer growth*

[M. Jouanny](#), [M. Mikikian](#) and L. Boufendi
2^{ème} réunion de l'Equipe-Projet : Plasmas Froids pour l'Elaboration de Micro et Nanostructures, RTP 27 Nanominiaturisation (STIC), Col de Porte, 4-6 février 2004

[CcO4] Croissance de nanocristaux de silicium par voie plasma

M.C. Jouanny, K. Radouane, [M. Mikikian](#), L. Boufendi, A. Fontcuberta i Morral, A.V. Kharchenko, N. Châabane, V. Suendo, H. Vach, [P. Roca i Cabarrocas](#)
Réunion du RTP 27 Nanominiaturisation (STIC), Lille, 15-16 septembre 2003

[CcO3] Control of the nucleation and growth of nanocrystallites in RF low pressure silane plasmas

M.C. Jouanny, K. Radouane, [M. Mikikian](#), M. Dudemaine, [L. Boufendi](#), T. Baron, V. Bertagna
1^{ère} réunion de l'Equipe-Projet : Plasmas Froids pour l'Elaboration de Micro et Nanostructures, RTP 27 Nanominiaturisation (STIC), Col de Porte, 6-7 février 2003

[CcO2] Dust particle influence on sheath in the conditions of continuous discharge

[C. Arnas](#), [M. Mikikian](#), F. Doveil
3rd European Workshop on Dusty and Colloidal Plasmas, Col de Porte (France), 20-22 janvier 1999

[CcO1] Dust particle levitation in a continuous hot cathode discharge

[C. Arnas](#), [M. Mikikian](#), F. Doveil
Nonlinearities and instabilities in dispersive media, Briançon, mars 1999

COLLOQUES: POSTERS

Auteur présentant

[cP1] Calcul de la conductivité électrique dans les liquides et les plasmas denses par la méthode de Ziman généralisée

[M. Mikikian](#), P. Combis, G. Faussurier, C. Blancard
Journée Jeunes Chercheurs du DPTA, CEA/DAM Ile de France, 20 avril 2000

Co-auteur

[CcP6] Utilisation d'un Plasma d'³He Haute Densité pour l'Etude des Modifications Induites dans du Tungstène par des ions He⁺ de basse énergie (300 eV)

[T. Belhabib](#), A.L. Thomann, P. Brault, Y. Tessier, [M. Mikikian](#), M.-F. Barthe, T. Sauvage, P.E. Lhuillier, P. Desgardins
Colloque du programme interdisciplinaire Energie du CNRS, Poitiers, 6-8 février 2008

[CcP5] Elaboration de couches minces de silicium polymorphe pour cellules solaires a haut rendement photovoltaïque stable et synthese de nanocristaux par plasma basse pression

[L. Boufendi](#), [M. Mikikian](#), M. Cavarroc, L. Couédel, Y. Tessier
Colloque Energie, Orléans (France), 13 octobre 2005

- [CcP4] *Experimental investigation of dust particle formation and growth in an Ar/SiH₄ radiofrequency plasma at low temperatures***
M. Cavarroc, M. Mikikian, L. Boufendi
 European Summer School Low Temperature Plasma Physics: Basics and Applications
 & Master Class: Microplasmas, Badhonnef (Allemagne), 8-16 octobre 2005
- [CcP3] *Instabilities and charge phenomena in a dusty plasma: the PKE-Nefedov experiment***
L. Couëdel, M. Cavarroc, M. Mikikian and L. Boufendi,
 European Summer School Low Temperature Plasma Physics: Basics and Applications
 & Master Class: Microplasmas, Badhonnef (Allemagne), 8-16 octobre 2005
- [CcP2] *Instabilités et phénomènes de charge dans les plasmas poudreux: l'expérience PKE***
L. Couëdel, M. Mikikian, L. Boufendi
 Sciences en Sologne, Orléans (France), 1-2 juin 2005
- [CcP1] *Etude de la nucléation et de la croissance de poudres dans un plasma radio-fréquence d'argon-silane***
G. Perrier, M. Cavarroc, M. Mikikian, L. Boufendi
 Sciences en Sologne, Orléans (France), 1-2 juin 2005

SEMINAIRES

- [S7] *Self-excited instabilities in plasmas containing dust particles (dusty or complex plasmas)***
M. Mikikian, School of Physics, University of Sydney (Australie), 31 octobre 2007
- [S6] *Des poussières dans un plasma***
M. Mikikian, Laboratoire PIIM, Marseille, 1^{er} juin 2007
- [S5] *Results on dust particle growth in the PKE-Nefedov reactor***
M. Mikikian, Max-Planck Institute of Extraterrestrial Physics, Garching (Allemagne), 7 mars 2006
- [S4] *Croissance de poussières, structure et dynamique des nuages de poussières en microgravité***
M. Mikikian, Résultats obtenus en microgravité, CNES, Toulouse, 1^{er} mars 2002
- [S3] *Dust Formation in the PKE Experiment***
M. Mikikian, Résultats obtenus au laboratoire, CNES, Toulouse, 26 juin 2001
- [S2] *First Results on Dust Formation for the PKE Experiment on ISS***
M. Mikikian, Réunion de travail du projet IMPF, Iowa City, 24 mai 2001
- [S1] *Etudes des plasmas poussiéreux et de la conductivité des plasmas denses***
M. Mikikian, Laboratoire PIIM, Marseille, 2 mai 2001

MANIFESTATIONS PEDAGOGIQUES

Des poussières dans un plasma ?

Présentations régulières lors de la *Fête de la Science* et des *Portes Ouvertes de l'Université*

Animation du stand du CNRS

Salon du lycéen et de l'étudiant, Orléans 2008

PARTICIPATIONS SANS PRESENTATION

6^{èmes} Journées du réseau Plasmas Froids, Bonascre (France), 2-5 octobre 2007

5^{èmes} Journées du réseau Plasmas Froids, Bonascre (France), 3-6 octobre 2006

4^{èmes} Journées du réseau Plasmas Froids, Bonascre (France), 9-12 octobre 2005

2^{èmes} Journées du réseau Plasmas Froids, Bonascre (France), 12-15 octobre 2003

Summer school, Ecole thématique du CNRS : Systèmes dynamiques: du cristal au chaos, Luminy (marseille), 29 juin - 4 juillet 1998

Doctoriales Val de Durance, Château de Cadarache, 28 septembre-3 octobre 1997

4^{ème} école d'été du GdR SPARCH : Problèmes de couches limites, Phénomènes de charges d'espaces et applications, Saint Pierre d'Oléron, 15-20 septembre 1997

Ecole de printemps, Semaine Plasmas chauds, CEA Cadarache, 7-11 avril 1997

Jurys, Encadrements

JURYS DE THESE

- [Th2]** *Aspects critiques des fluctuations d'un plasma magnétisé. Proposition de théorie cinétique stochastique*
Guillaume Attuel, Ecole Polytechnique, 30 novembre 2007
Examineur
- [Th1]** *Analyses et comportements des particules créées dans un plasma radiofréquence basse pression en mélange méthane azote*
Jérémy Pereira, Université d'Orléans, 7 novembre 2007
Examineur

ENCADREMENT

THESES

- [Th2]** *Nanoparticle formation and dynamics in a complex (dusty) plasma: from the plasma ignition to the afterglow*
L. Couëdel, 10/2005-10/2008
Co-encadrant
- [Th1]** *Nucleation, growth and behavior of dust particles in reactive low pressure radio-frequency plasmas: from nanocrystals to submicron polycrystalline grains*
M. Cavarroc, 11/2004-10/2007
Co-encadrant

STAGES MASTER 2

- [SM2]** *Formation, thermodynamique et transport de nuages denses de « poussières » dans un plasma froid basse pression*
G. Oyharçabal, avril-septembre 2008
Encadrant
- [SM1]** *Instabilités et phénomènes de charge dans les plasmas poudreux: l'expérience PKE*
L. Couëdel, mars-juin 2005
Co-encadrant

STAGES MASTER 1

[Sm1] *Etude spectroscopique des espèces chimiques produites par pulvérisation dans le réacteur PKE*

Carolina Lopez Quesada, juillet-septembre 2003

Co-encadrant

PROJETS INDUSTRIELS 5^{EME} ANNEE POLYTECH ORLEANS

[P2] *Caractérisation d'un plasma de décharge continue: étude des instabilités et spectroscopie d'émission*

Christophe Boge, Yvan Sacovy, janvier-février 2008

Encadrant

[P1] *Caractérisation des instabilités d'un nuage de poudres piégé dans un plasma RF basse pression*

Marjorie Cavarroc, janvier-février 2004

Co-encadrant

STAGES 4^{EME} ANNEE POLYTECH ORLEANS

[PS2] *Croissance de poudres de carbone dans le réacteur PK4*

Julie Dürr, juin-juillet 2007

Encadrant

[PS1] *Formation et comportement de poussières dans un plasma*

Céline Tarby, juin-juillet 2007

Encadrant

PROJETS SYSTEME 4^{EME} ANNEE POLYTECH ORLEANS

[PS3] *Optimisation du fonctionnement du réacteur PK4*

Julie Dürr, Céline Tarby, mai 2007

Encadrant

[PS2] *Récupération des données d'un boîtier de mesure de pression des gaz: Application aux plasmas poussiéreux*

Laurent Pezard, Yvan Sacovy, mai 2007

Encadrant

[PS1] *Caractérisation de la composition d'un plasma poussiéreux par spectroscopie d'émission optique*

Carole Socquet-Clerc

Co-encadrant

PROJETS INFORMATIQUES 4^{EME} ANNEE POLYTECH ORLEANS

[PI3] *Traitement d'images et détection d'objets pour les expériences "plasmas poussiéreux"*

Elodie Bruneau, Antoine Lejars, novembre-décembre 2006

Tuteur scientifique et informatique

[PI2] *Propagation dans une fibre optique à saut d'indice*

Anthony Meunier, Audrey Merigault, novembre-décembre 2006

Tuteur informatique

[PI1] *ElectrostatiqueScope*

Jérôme Desouches, Souhayl Haydadi, novembre-décembre 2006

Tuteur informatique

