

▶ Microscoop / Hors série

LE JOURNAL DU
EN DÉLÉGATION CENTRE-AUVERGNE-LIMOUSIN

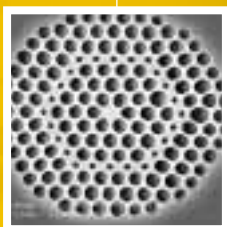
CNRS



> **La biodiversité dévoilée**
dans les forêts
du Panama



> **Les mouleds du Caire**
nuits de fêtes,
célébrations de saints



> **L'IRCOM**
Une place de leader
dans le domaine des
fibres optiques de
nouvelle génération



© Laurent Robin - CNRS

▶ **Fête**
de la science
octobre 2004

▶ INTERACTION PLASMA ISOLANT Du fondamental à l'applicatif

L'interaction entre un plasma et un isolant est utilisée dans de nombreux domaines : protection des réseaux électriques, lanceur électrothermique-chimique (ETC), revêtement spécifique, aérospatiale ... Afin de comprendre les mécanismes mis en jeu, les physiciens et électrotechniciens du Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques (LAEPT UMR 6069 CNRS / Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand) développent des méthodes de calcul et d'expérimentation dans le but de fournir une description physique et des données directement exploitées par les industriels.

▶ L'application industrielle : le lanceur électrothermique-chimique (ETC)

Depuis plusieurs années, les industries aéronautiques et d'armement développent des systèmes de propulsion et d'alumage utilisant les propriétés d'un plasma thermique. Plus particulière-

ment le LAEPT développe une étude théorique et expérimentale sur les lanceurs ETC en collaboration avec Giat Industries (Bourges). Les lanceurs classiques à poudre sont limités par l'énergie volumique de celle-ci (4MJ/kg). L'utilisation de plasma permet d'atteindre des vitesses de projectile supérieures (1800 m/s pour un projectile de 8 kg), d'utiliser des propergols de formule nouvelle et de mieux piloter les combustions. Un prototype de lanceur en 120 mm est actuellement évalué avec succès par la DGA. Les recherches actuelles sont focalisées sur le développement de la technologie ETC qui apparaît comme une solution technologique opéra-

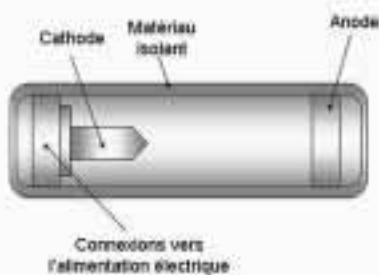
tionnelle et viable à court terme. Les études théoriques du LAEPT concernent principalement deux aspects :

- les phénomènes au niveau des parois isolantes ;
- la composition du plasma, les coefficients de transport.

▶ Dynamique moléculaire, composition et coefficients de transport

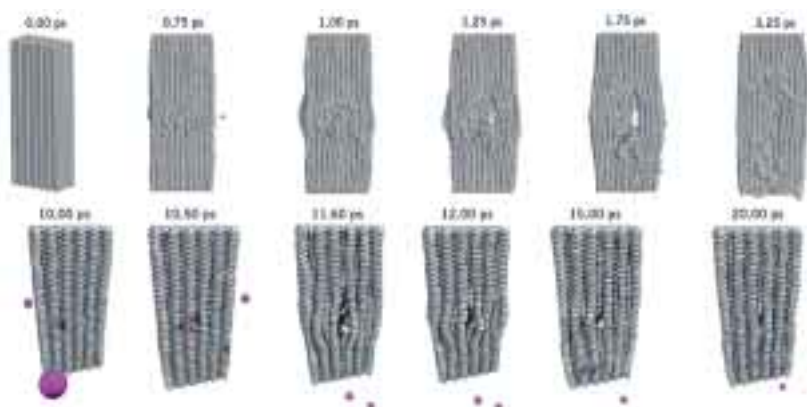
Au sein du LAEPT, les phénomènes sont initiés par décharge capacitive entre deux électrodes reliées par un fil métallique (cuivre, aluminium, fer, ...) au sein d'un polymère. Le plasma créé interagit avec ce polymère et provoque une ablation des parois qui modifie les propriétés du plasma. En raison du transfert d'énergie depuis le plasma vers le polymère, l'isolant est vaporisé en surface ; la pression augmente en fonction de l'énergie dissipée et du polymère. Deux approches théoriques complémentaires sont entièrement développées au LAEPT. **La première approche** consiste à évaluer la composition du plasma en considérant les hypothèses : densités initiales et proportion des deux matériaux (métal érodé des électrodes, isolant). Cette méthode s'appuie sur la minimisation de l'énergie libre d'Helmholtz (volume plasma et température constants), ou de l'enthalpie libre de Gibbs (pression plasma

Schéma de la maquette d'essai du LAEPT. L'apport d'énergie électrique par les électrodes est responsable de l'ablation de la paroi du matériau isolant. Le plasma initialement composé de vapeurs métalliques et de produits de décomposition de la paroi sont projetés radialement par les trous d'évent ou axialement. Il en résulte donc un plasma formé de vapeurs isolantes principalement qui impliquent une forte augmentation de la pression responsable de l'accélération du projectile.



Les expériences développées au sein du LAEPT reproduisent les demandes de fonctionnement réel. Elles sont adaptées pour mesurer les grandeurs électriques, la pression, la température, la densité électronique...





et température constantes). Ces calculs permettent de suivre sur un domaine de température les densités des espèces polyatomique, diatomique, monoatomique, neutre et ionisée, d'identifier les porteurs de charge majoritaires. Les densités électroniques calculées sont comparées avec les mesures pour déterminer les conditions initiales de densité et définir le paramètre qui doit être fixé (volume ou pression).

Deux exemples sont donnés pour un mélange initial 50% Cu et 50% polyéthylène haute densité (PEHD). Ces calculs montrent que le cuivre est successivement présent sous forme solide, liquide et gaz pour des températures précises. Le carbone est présent sous deux formes principalement, avec en particulier le graphite qui devient non négligeable dès 3550 K. Conducteur, le graphite influence la dissipation de l'énergie électrique contenue dans la source car sa présence augmente la conductivité électrique.

Le calcul des coefficients de transport donne une estimation des différents modes de dissipation de l'énergie. Dans le cas du lanceur ETC, la viscosité dynamique est directement reliée à la vitesse d'éjection des gaz au niveau des trous d'évent. Le calcul montre que cette viscosité est différente suivant le polymère et la température. Ce paramètre est très important puisque :

- durant l'allumage de la poudre, le gaz/plasma doit rester sur place afin de libérer l'énergie emmagasinée durant la décharge. En effet, la condensation du graphite sur la poudre augmente le transfert d'énergie ;

- au contraire, au niveau des trous d'évent, le plasma doit être le plus visqueux donc le plus chaud possible afin d'être distribué sur les différents trous d'évent simultanément.

Ce travail s'appuie notamment sur une collaboration avec le SPCTS (Laboratoire de Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface, UMR 6638 CNRS / Université de Limoges) pour le développement des coefficients de transport et des approches multi températures.

La seconde approche consiste à modéliser l'interaction élémentaire entre des particules incidentes et un matériau polymère. Une approche originale basée sur la résolution des équations de mouvement a été développée au LAEPT pour comprendre les phénomènes de transfert d'énergie à la paroi à l'échelle du grain de matière et les mécanismes de destruction du polymère lorsqu'il interagit avec un plasma.

Considérons le cas d'un cristal de polyéthylène constitué de 7 200 groupements (CH_2) soumis à l'impact d'une molécule neutre (N_2) issue de la dissociation de l'air. En fonction de l'énergie incidente (de quelques eV à plusieurs centaines d'eV), la température du cristal et l'ensemble des composantes du tenseur de pression sont évaluées au cours du temps. A partir de ces calculs les trajectoires des atomes sont évaluées sur l'ensemble de la simulation. Pour donner une description plus fidèle, cette modélisation du polymère est complétée en intégrant la dynamique des atomes d'hydrogène et les interactions coulombiennes pour étudier les collisions avec des particules chargées issues

des vapeurs métalliques du plasma. Dans les plasmas ETC les ions cuivre migrent vers la périphérie sous l'effet du caractère explosif de la décharge et interagissent avec la paroi polymère. Cette approche est en cours de développement afin de traiter d'autres aspects. Ces développements sont menés en collaboration avec le LTSP (Laboratoire de Thermodynamique des Solutions et des Polymères, UMR 6003 CNRS / Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand).

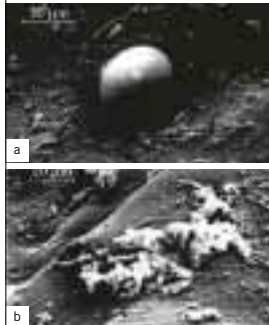
► Les outils expérimentaux

Le LAEPT développe ses propres systèmes pour reproduire les contraintes énergétiques des systèmes industriels. Il s'agit de relier l'énergie injectée dans le plasma avec la température, la densité électronique, la pression, la conductivité électrique ... Ces diagnostics sont basés en partie sur l'étude des propriétés radiatives du plasma. Pour cela le LAEPT dispose de plusieurs outils pour les domaines visible et ultraviolet (spectroscopie d'émission). Les mesures de pression et de conductibilité électrique du plasma sont comparées aux calculs. Ceci permet de suivre l'évolution de la densité totale du plasma et de définir les hypothèses de calcul des coefficients de transport. Lorsque la pression est trop forte (de l'ordre de 100 bars) le plasma devient optiquement épais. La température est alors déduite des deux mesures de la pression et de la conductivité électrique en prenant en compte l'évolution de la composition du plasma. Les mesures ainsi effectuées montrent une excellente corrélation avec les modèles thermochimiques du LAEPT. ■

Contacts : Pascal ANDRE (Composition et coefficients de transport) > pascal.andre@univ-bpclermont.fr, Emmanuel DUFFOUR (Dynamique moléculaire) > emmanuel.duffour@univ-bpclermont.fr, William BUSSIÈRE (Expérimentation physique et spectroscopie) > william.bussiere@univ-bpclermont.fr, Thierry LATCHIMY (Conception et réalisation) > thierry.latchimy@univ-bpclermont.fr, Luc BRUNET (Directeur Laboratoire Pyrotechnie Giat) > l.brunet@giat-industries.fr.

La dynamique moléculaire est le moyen théorique choisi pour donner une description moléculaire de l'interaction entre une molécule de N_2 et une surface de polyéthylène ($(\text{CH}_2)_n$). La diffusion de la molécule N_2 et son interaction au sein des chaînes de polymère est visualisée à différents instants ce qui permet d'observer la destruction partielle des chaînes.

Dans le cas de l'interaction avec une particule incidente chargée (Cu^+ dans ce cas avec des énergies cinétiques et des angles d'impact différents), certains ions métalliques pénètrent dans le cristal de polymère et impliquent une déformation des chaînes du matériau et d'autres sont piégés en surface.



Le cuivre issu des électrodes est visible après fonctionnement sous deux formes observées dans ce cas au MEB sur la face interne de la paroi isolante. (a) le cuivre est visible sous la forme de gouttelettes régulières, ce qui est généralement obtenu lors d'une décharge explosive, typiquement le début de la décharge. (b) le cuivre est visible sous la forme d'un agrégat de vapeurs condensées, qui témoigne donc du passage dans le plasma puis de la diffusion en direction des parois, typiquement le refroidissement en fin de décharge.