

Cinétique chimique et relaxation de plasmas d'air hors équilibre générés par des photons et électrons énergétiques

M. RIBIÈRE - M. MAULOIS / CEA – Gramat

O. EICHWALD - M. YOUSFI / Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE), UMR 5213 CNRS – Université Paul-Sabatier - INP Toulouse

La cinétique chimique d'un plasma d'air produit par un flux de rayonnement X impulsionnel intense a été modélisée selon un schéma prenant en compte 39 espèces intervenant dans 265 réactions. Les évolutions temporelles des espèces sont calculées de façon couplée avec la densité d'énergie des électrons. Les termes sources intervenant dans le calcul de la densité d'énergie des électrons et conduisant à l'activation des réactions chimiques ont été calculés à partir du flux du rayonnement X incident considéré. Les évolutions temporelles des densités obtenues ont été utilisées comme paramètres d'entrée d'un calcul de transport d'une onde électromagnétique dans le plasma d'air. Ces résultats ont été comparés à des mesures d'absorption d'ondes électromagnétiques dans le domaine du gigahertz, effectuées par irradiation d'un volume d'air contenu dans un guide d'onde avec le générateur de rayonnement X impulsionnel ASTERIX du CEA – Gramat.

La physique de l'interaction entre un flux d'électrons énergétiques et un gaz, ainsi que la cinétique chimique du plasma produit constituent une problématique rencontrée dans différents domaines d'application, comme le transport de faisceaux d'électrons [1], les perturbations électromagnétiques induites par rayonnement X impulsionnel intense, ou effets SGEMP (System Generated ElectroMagnetic Pulse) [2], ou encore la radiographie éclair [3]. Le plasma produit peut, si sa conductivité électrique est supérieure à 10^{-4} - 10^{-3} S/m, modifier la propagation des champs électromagnétiques associés au faisceau d'électrons incident, modifiant ainsi les propriétés énergétiques et directionnelles de ce dernier.

De façon à quantifier avec précision la génération et la propagation des champs électromagnétiques dans l'air ionisé, une modélisation de la cinétique chimique induite par l'interaction entre un rayonnement X impulsionnel et l'air ambiant a été mise en œuvre. L'objectif est de quantifier les perturbations électromagnétiques produites par le générateur ASTERIX implanté au CEA – Gramat [4]. Le rayonnement X produit par ASTERIX possède une énergie moyenne de 1 MeV et produit deux populations d'électrons primaires en interagissant avec l'air: une population d'électrons primaires non relativistes et une population relativiste. Cette dernière produira des électrons secondaires de plus faibles énergies

par ionisation collisionnelle avec les molécules constitutives de l'air irradié (N_2 , O_2 , H_2O).

Grâce au modèle, et pour une fluence photonique incidente égale à 10^{13} cm^{-2} , l'évolution temporelle de la densité des électrons ainsi que de leur énergie moyenne a été calculée, et est représentée sur la **figure 1**. L'énergie moyenne des électrons augmente très rapidement (avec un temps caractéristique de l'ordre de 10 ns) et atteint un maximum d'environ 4,5 eV à 60 ns. La densité des électrons, quant à elle, augmente plus lentement et atteint un maximum d'environ $1,1 \times 10^{13}$ cm^{-3} à 60 ns.

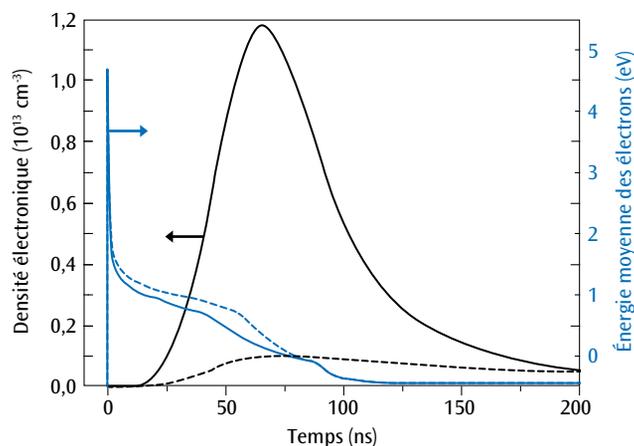


Figure 1. Évolution temporelle calculée de la densité et de l'énergie moyenne des électrons, issue du calcul de cinétique chimique. Les courbes en trait continu représentent les calculs tenant compte des électrons primaires relativistes et non relativistes, les courbes en trait discontinu représentent les calculs tenant compte des électrons primaires non relativistes uniquement.

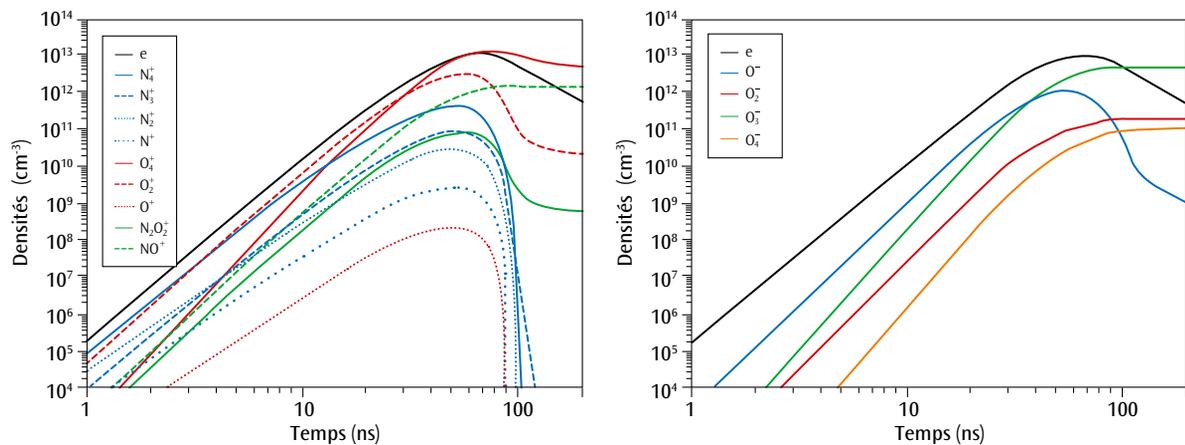


Figure 2. Évolutions temporelles calculées des densités des ions majoritaires positifs (à gauche) et négatifs (à droite). Les ions majoritaires sont : O^- , O_3^- , O_2^+ , NO^+ et O_4^+ .

téristique de l'ordre de la nanoseconde) du fait de la forte densité d'énergie apportée par le flux d'électrons Compton d'une part, et de la faible densité électronique aux premiers instants d'autre part. Puis, l'action conjointe de la rapide augmentation de la densité électronique par ionisation collisionnelle induite par les électrons primaires, et de la diminution de la densité d'énergie des électrons, du fait notamment de l'excitation vibrationnelle de N_2 , conduit à une diminution rapide de l'énergie moyenne en dessous des seuils d'ionisation, situés autour de 1 eV.

La figure 2 représente les évolutions temporelles des ions majoritaires positifs (à gauche) et négatifs (à droite). Les calculs montrent, d'une part, que le plasma possède un degré d'ionisation très faible ($\sim 10^{-7}$), et d'autre part que les ions majoritaires sont : O^- , O_3^- , O_2^+ , NO^+ et O_4^+ .

Une première validation du modèle a été effectuée grâce à des mesures d'absorption d'ondes électromagnétiques se propageant dans un guide d'onde rempli d'air [5]. La connaissance de l'évolution temporelle de la densité électronique ainsi que celle de l'énergie moyenne permettent de calculer l'évolution temporelle du coefficient d'absorption du plasma en imposant comme paramètres d'entrée : la fréquence de l'onde électromagnétique incidente, la fraction massique de vapeur d'eau et le profil spatial de la fluence photonique selon la direction de propagation de l'onde. Cette première validation du modèle, basée sur la comparaison entre les calculs et les mesures de la densité électronique, présente des écarts attribués à la modélisation de la propagation de l'onde dans le guide contenant le plasma d'air. Une deuxième étape de validation mettant en œuvre des simulations numériques

haute performance avec le code Maxwell-Vlasov SOPHIE du CEA – DAM [6] est en cours et permettra la détermination précise de la conductivité électrique radio-induite de plasmas d'air, pour un flux de rayonnement X et une pression donnés.

Ces données physiques permettront de modéliser la cinétique chimique de l'air dans les codes de calcul électromagnétique haute performance pour l'étude de la vulnérabilité de systèmes électroniques complexes sous irradiation.

Références

- [1] D. R. WELCH *et al.*, "Transport of a relativistic electron beam in gas and plasma-filled focusing cells for X-ray radiography", *Phys. Plasmas*, **11**, p. 751 (2004).
- [2] M. RIBIÈRE *et al.*, "Investigating the electron density of multi-MeV X-ray-induced air plasmas at low pressures based on electromagnetic resonant cavity analysis", *Phys. Plasmas*, **23**, 122106 (2016).
- [3] N. BENNETT *et al.*, "The impact of plasma dynamics on the self-magnetic-pinch diode impedance", *Phys. Plasmas*, **22**, 033113 (2015).
- [4] M. RIBIÈRE *et al.*, "Contribution of electromagnetic perturbation to the transient response of an electronic circuit exposed to a high multi-MeV X-ray flux", *Trans. Nucl. Sci.*, **62**, p. 1383 (2015).
- [5] M. MAULOIS *et al.*, "Experimental and numerical investigations of air plasmas induced by multi-MeV pulsed X-ray from low to atmospheric pressures", *J. Appl. Phys.*, **120**, 123302 (2016).
- [6] O. CESSNAT, "Sophie, un code de calcul haute performance pour la propagation des ondes et particules chargées", *chocs*, **44**, p. 25 (2013).