

# Métallisation du plastique dopé au germanium

G. HUSER - V. RECOULES - G. SALIN - D. GALMICHE / CEA – DAM Île-de-France

N. OZAKI - K. MIYANISHI - R. KODAMA / Graduate School of Engineering, Université d'Osaka, Japon

T. SANO - Y. SAKAWA / Institute of Laser Engineering, Université d'Osaka, Japon

Le plastique dopé au germanium est l'un des matériaux utilisés dans les capsules de fusion par confinement inertiel (FCI). Ses propriétés ont besoin d'être connues avec une grande précision pour obtenir des implosions performantes sur le Laser Mégajoule (LMJ). Par ailleurs, les plastiques dopés sont des mélanges complexes : leur description théorique dans une vaste gamme de conditions thermodynamiques nécessite une validation expérimentale. Au cours d'expériences menées en collaboration avec l'université d'Osaka, nous avons validé les modèles utilisés pour décrire la compressibilité de ces matériaux. En revanche, la métallisation prédite par les modèles courants est surestimée.

Atteindre l'allumage thermonucléaire requiert une grande précision sur la connaissance des modèles d'équation d'état et d'ionisation. Ces derniers influent directement sur la chronométrie des chocs, l'absorption du rayonnement d'attaque, ainsi que sur le développement des instabilités hydrodynamiques [1].

Le dimensionnement des capsules LMJ repose sur la validation expérimentale. Cette étape de validation se fait à plusieurs échelles : à l'échelle 10 kilojoules (installations LIL au CESTA, Omega à l'université de Rochester), sont menées des expé-

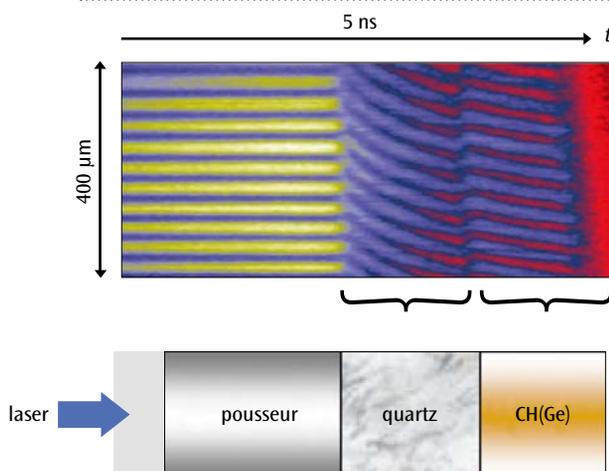
riences intégrées reproduisant certaines étapes du fonctionnement d'une capsule de FCI. À plus petite échelle, les installations délivrant des énergies de l'ordre du kilojoule (LULI 2000 à l'École polytechnique, Gekko XII à l'université d'Osaka...) permettent de valider des modèles de physique fondamentale utilisés comme données d'entrée dans les codes de simulation de la DAM. Au cours des expériences décrites ici, nous avons étudié des échantillons avec des taux de dopant représentatifs des capsules LMJ et des cibles d'études utilisées dans des expériences à échelle réduite (avec des taux respectivement de 2,5 % et 13 %).

Les ondes de choc générées par des lasers de forte puissance permettent de porter la matière à des pressions de l'ordre du mégabar et des températures de l'ordre de 10 000 K. Dans ces conditions, un isolant comme le plastique se métallise. Le front de choc qui s'y propage est alors réfléchissant. La réflexion d'un faisceau sonde sur le front de choc permet ainsi d'accéder à sa vitesse par mesure du décalage Doppler. L'effet Doppler observé provoque un déplacement des franges au sein d'un interféromètre (figure 1).

La mesure de la variation de la vitesse d'un choc transmis d'un matériau de référence (ici du quartz) vers nos échantillons permet de connaître les pressions et densités obtenues par choc. Ces états sont représentés par la courbe d'Hugoniot du matériau considéré. On a pu ainsi mesurer des vitesses de choc comprises entre 10 et 20 km/s, correspondant à des états atteignant jusqu'à 7 Mbar et trois fois la densité normale (figure 2).

Figure 1. Image VISAR.

Le choc créé par laser se propage dans un matériau pousseur avant d'être transmis dans une couche de quartz. Lorsque le choc est transmis du quartz au CH(Ge), la vitesse du choc est modifiée par désadaptation d'impédance et un décalage de franges se produit.



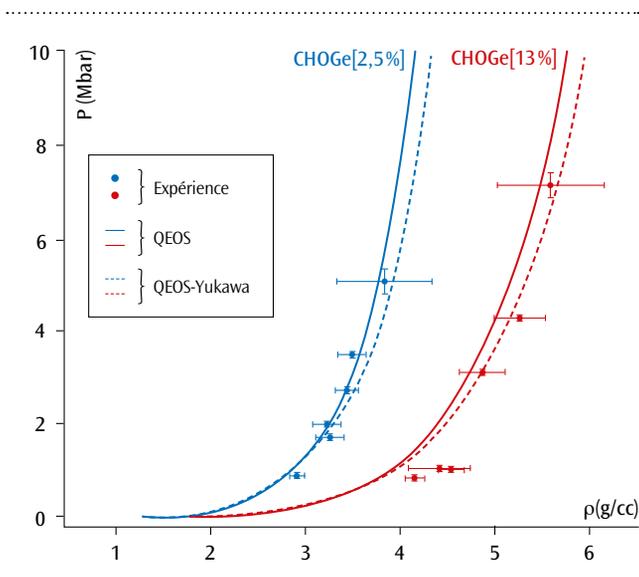


Figure 2. Courbes d'Hugoniot du plastique dopé au germanium à 2,5% (bleu) et 13% (rouge). Les points expérimentaux sont comparés aux modèles QEOS et QEOS-Yukawa [2].

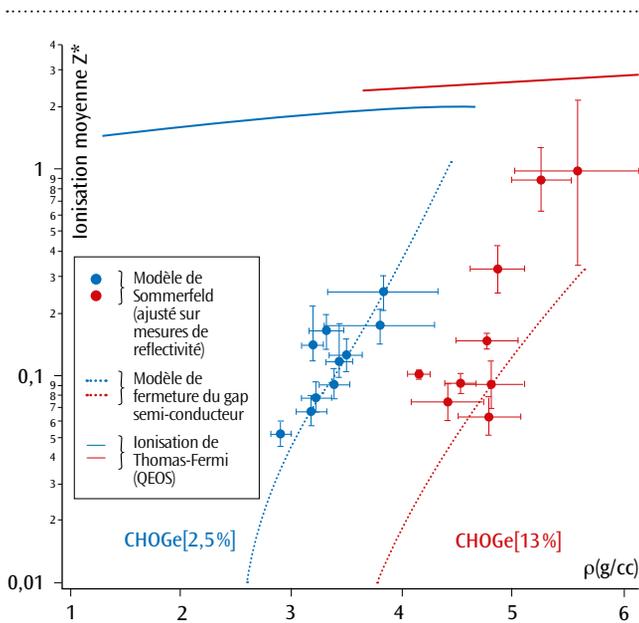


Figure 3. Ionisation moyenne du plastique dopé au germanium à 2,5% (bleu) et 13% (rouge), théorie QEOS (traits pleins), modèle de fermeture du gap semi-conducteur (pointillés) et modèle métallique de Sommerfeld ajusté sur les données expérimentales de réflectivité (points avec barres d'erreur).

Nous avons également mesuré la réflectivité des chocs, qui est ensuite décrite par un modèle de Drude dans lequel nous pouvons tester différents modèles d'ionisation. Le premier modèle que nous avons testé est le modèle de Thomas-Fermi, implémenté au sein du formalisme QEOS [3] largement utilisé pour construire des équations d'état de mélanges. Par ailleurs, nous avons testé un modèle métallique de Sommerfeld et un modèle de fermeture du gap semi-conducteur [4], pour lesquels les paramètres sont ajustés sur les données expérimentales (figure 3). Ces deux modèles semi-empiriques sont en bon accord l'un avec l'autre et prédisent des ionisations moyennes jusqu'à dix fois plus faibles que celles prédites par la théorie QEOS [5].

Ces écarts à la théorie QEOS se retrouvent également dans les mesures de température, obtenues par mesure pyrométrique de l'émission propre du front de choc. Il apparaît clairement que la théorie QEOS, si elle est capable de correctement prédire la compressibilité d'un mélange comprimé à quelques mégabars, surestime en revanche l'ionisation moyenne. Cela a notamment pour effet de surestimer la conduction thermique électronique du plastique métallisé. Ces résultats ne sont pas entièrement surprenants puisque la théorie de Thomas-Fermi et les modèles d'équations d'état tels que QEOS sont faits pour décrire des états très chauds (>100 000K) pour lesquels des descriptions statistiques sont en général assez pertinentes.

Le domaine exploré ici correspond à des états à la frontière des solides et des plasmas denses, parfois désigné par le terme « Warm Dense Matter » dont la description théorique est encore à ce jour en plein développement. L'étude de cette région du diagramme de phase est fondamentale car elle correspond aux états traversés pendant les 10 premières nanosecondes (sur un total de 15) de l'implosion d'une capsule de FCI.

## Références

- [1] D. CLARKE *et al.*, "Plastic ablator ignition capsule design for the National Ignition Facility", *Phys. Plasmas*, **17**, 052703 (2010).
- [2] D. GILLES *et al.*, "Yukawa Monte Carlo and Orbital Free Molecular Dynamics approaches for the equation of state and structural properties of hot dense matter", *High Energy Density Phys.*, **3**, p. 95-98 (2007).
- [3] R. M. MORE *et al.*, "A new quotidian equation of state (QEOS) for hot dense matter", *Phys. Fluids*, **31**, 3059 (1988).
- [4] D. HICKS *et al.*, "Shock-Induced Transformation of Al2O3 and LiF into Semiconducting Liquids", *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 035502 (2003).
- [5] G. HUSER *et al.*, "Hugoniot and mean ionization of laser-shocked Ge-doped plastic", *Phys. Plasmas*, **20**, 122703 (2013).