

## **Synthèse, Combustion et Cinétique réactionnelle de combustion des nanothermites**

Laurent Catoire, Professeur, UCP, ENSTA ParisTech

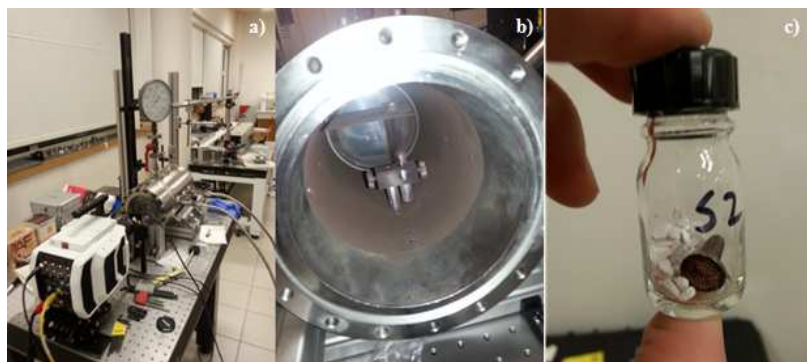
Nabiha Chaumeix, Directrice de recherche, ICARE, UPR 3021, CNRS

Jean-François Hochepped, Directeur de recherche, CdM, Mines ParisTech et UCP, ENSTA ParisTech

[laurent.catoire@ensta-paristech.fr](mailto:laurent.catoire@ensta-paristech.fr), [nabiha.chaumeix@cnrs-orleans.fr](mailto:nabiha.chaumeix@cnrs-orleans.fr),  
[jean-francois.hochepped@ensta-paristech.fr](mailto:jean-francois.hochepped@ensta-paristech.fr)

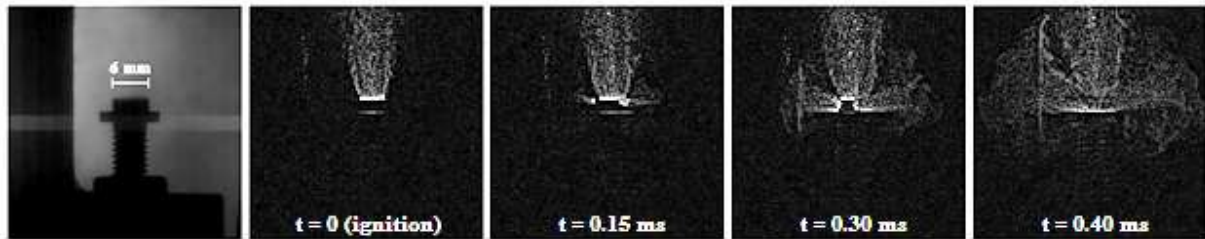
Les développements récents sur l'obtention et la caractérisation des matériaux ont permis la conception de nouveaux types de matériaux énergétiques contenant des nanoparticules de métaux et d'oxydes métalliques. Les enthalpies de combustion très élevées des métaux peuvent être maintenant libérées très rapidement du fait des surfaces spécifiques très importantes de ce type de matériaux à l'échelle nano. De ce fait ces matériaux, nanopoudres ou nanocomposites, semblent intéressants pour des applications énergétiques qui ne se satisfont pas des vitesses de libération d'énergie relativement faibles obtenues dans les formulations conventionnelles, c'est-à-dire mettant en œuvre des particules micrométriques. Du fait de l'extrême rapidité des réactions, il est difficile d'appréhender expérimentalement les détails de la chimie en phase gazeuse et en phase condensée et le recours aux mécanismes cinétiques détaillés peut permettre de pallier au moins partiellement à ces manques. Les études semblent montrer que la majorité de l'énergie est libérée par des réactions en phase condensée pour certains systèmes au moins. Un des constituants de beaucoup de nanothermites est l'aluminium. Une thèse, soutenue en 2014, a été conduite à l'UCP sur le mécanisme cinétique détaillé de surface lors de la combustion de l'aluminium en ambiance propergol. Cette étude a effectivement montré que plus la particule d'aluminium est petite plus la part des réactions de surface est importante dans la libération d'énergie. En ce qui concerne les systèmes d'intérêt ici métaux/oxydes de métaux, tout reste à faire tant du point de vue des mécanismes en phase gazeuse qu'en phase condensée. En termes de combustible, les métaux d'intérêt sont pour l'essentiel l'aluminium et les métalloïdes bore et silicium. Au niveau des oxydes, les plus intéressants à étudier sont probablement  $WO_3$  et  $Sb_2O_5$  mais les couples ou formulation à étudier pourront être définies ultérieurement. Des expériences récentes sur la réactivité de ces nanothermites (Al/CuO) menées à l'institut de Combustion ICARE du CNRS ont montré une réactivité accrue lorsque les particules étaient de l'ordre de 40 nm. Ces études ont été réalisées dans une chambre de combustion avec une inflammation laser de faible énergie. L'inflammation et la propagation de la zone réactionnelle ont été suivies au moyen d'une caméra à haute fréquence. Cette étude préliminaire a pu montrer le potentiel de ce type de matériaux énergétiques. La figure 1 présente le dispositif expérimental mis en œuvre à l'ICARE et

fonctionnel sans délai. La figure 2 présente quelques images issues d'une vidéo prise lors de l'inflammation et de la combustion du système Cu/AlO en milieu inerte (ici de l'Argon). Récemment, les avancées en synthèse de particules nanostructurées ont commencé à diffuser dans le milieu des nanothermites avec des bénéfices supplémentaires à ceux apportés par un simple mélange intime de nanopoudres. Le contrôle de l'interface métal-oxyde (au lieu de contacts aléatoires entre grains) et le contrôle de la porosité du composite métal-oxyde, éventuellement ordonnée ou multi-échelles, sont critiques pour faire émerger une nouvelle génération de nanothermites et à portée de nos moyens de synthèse et de caractérisation, notamment la microscopie électronique à balayage et la microscopie électronique en transmission à haute résolution, accessibles chez le partenaire CdM. Cette démarche de contrôle d'architecture en vue d'optimisation de propriétés d'usage a déjà été adoptée par le partenaire CdM dans d'autres matériaux multi-composants et multi-échelles comme des photocatalyseurs ou des céramiques pour pile à combustible. Les systèmes métal/sel pourront être aussi objet d'études. Les buts de la thèse seraient principalement d'établir les mécanismes et cinétiques associées pour tenter de comprendre ce qui amène certains couples à avoir des vitesses de détonation élevées, par exemple.



**Figure 1. Dispositif expérimental de l'étude de la combustion des nanothermites.**

**a) Vue d'ensemble du dispositif (laser + enceinte contenant l'échantillon + instrumentation) mis en œuvre pour l'étude de l'inflammation et de la combustion des nanothermites. b) Vue de l'intérieur de l'enceinte contenant la nanothermite. c) Nanothermites + support sur lequel repose la nanothermite d'intérêt.**



**Figure 2. Visualisation de l'inflammation et de la combustion de nanothermites constituées de pellet Al/CuO dans une atmosphère inerte (Argon)**

Le temps initial correspond à l'inflammation (apparition d'un phénomène lumineux). La combustion est filmée à l'aide d'une caméra rapide pendant le temps nécessaire jusqu'à l'extinction de la flamme.

Pour cette thèse, les matériaux seront synthétisés à l'UCP de l'ENSTA ParisTech et caractérisés quant à l'état de surface au CdM des Mines ParisTech. Les caractérisations quant aux propriétés de combustion seront faites à l'ICARE du CNRS. Les mécanismes cinétiques de combustion seront établis à l'UCP de l'ENSTA ParisTech.