

Appel à candidature  
Mission doctorale en « Milieux denses et Matériaux »  
Octobre 2025

---

Cloquage des revêtements et films minces : étude expérimentale et  
numérique du vieillissement de l'interface film/substrat

---

**Financement.** Allocation de recherche ministérielle MESR, 2200€ brut/mois, CDD de 3 ans  
*Possibilité de démarrage du projet dès le stage Master ou PFE-ingénieur, indemnité classique de stage, de 4 à 6 mois selon le profil.*

**Directeurs de thèse :**

COUPEAU Christophe (PR)                      Institut PPrime, Université de Poitiers  
PARRY Guillaume (MdC-HdR)              Laboratoire SIMAP, Université de Grenoble-Alpes

**Contact :** [christophe.coupeau@univ-poitiers.fr](mailto:christophe.coupeau@univ-poitiers.fr)

Envoi d'un CV et relevé de notes de Master (ou équivalent) avant le 30/03/2025

**Profil recherché :**

Compétences scientifiques en sciences des matériaux et mécanique de la rupture  
Savoir-faire en techniques de caractérisation et en simulations numériques par éléments finis  
Pratique de l'anglais usuel

**Contexte.** La qualité d'un revêtement destiné à un usage pratique est grandement influencée par son comportement mécanique et sa stabilité. Le niveau de contraintes, l'épaisseur et l'adhésion sont les principaux facteurs qui déterminent la stabilité du couple revêtement/substrat et par la suite sa durée de vie. Il est ainsi indispensable lors de l'utilisation industrielle de ces systèmes que la bonne tenue mécanique de l'ensemble soit, d'une part réalisée dès l'élaboration en évitant les décohésions spontanées du dépôt sur son substrat, et d'autre part préservée lors de sollicitations mécaniques ultérieures au cours de leur utilisation. L'origine des contraintes au sein d'un revêtement est diverse. A titre d'exemple, l'élaboration de films minces par voie PVD (physical vapor deposition), dorénavant largement utilisée dans le monde industriel, entraîne généralement l'apparition de très fortes contraintes internes au sein de ces matériaux. Les variations de température lors du processus d'élaboration ou en conditions de fonctionnement conduisent également à des contraintes, dites thermiques, parfois conséquentes. Si la nature du substrat n'entraîne que peu de modifications sur la valeur des contraintes internes, l'épaisseur du film y joue un rôle prépondérant. Les films minces et revêtements peuvent ainsi admettre des contraintes très largement supérieures à la limite élastique de ces mêmes matériaux à l'état massif ; des contraintes de plusieurs gigapascals (GPa) sont ainsi fréquemment obtenues. De tels niveaux de contrainte en compression sont alors à l'origine de décollements spontanés, observés parfois même dès la sortie des chambres de dépôt. Cet endommagement par cloquage aboutit généralement à la perte des propriétés fonctionnelles (mécanique, tribologique, optique, magnétique, électronique...) qui leur étaient

conférées. Le but de nos études depuis maintenant plus de 10 ans est ainsi de mieux comprendre ce phénomène de cloquage des films minces, en identifiant les paramètres pertinents permettant de le prévenir, le limiter, voire de le contrôler en vue de fonctionnalités spécifiques.

**Objectif.** Nos études ont concerné par le passé l'effet de l'élasticité et de la plasticité des substrats, l'observation de structures de cloquage spécifiques en fonction des propriétés mécaniques des films minces considérés, la question de la pression extérieure s'exerçant sur les structures de cloquage, la limite du cadre théorique élastique pour comprendre le flambage lorsque des plis plastiques sont observés, le cloquage de matériaux 2D tels (que le graphène) pour lesquels les structures cloquées sont discutables en raison de leur épaisseur ultime...

Nous souhaitons dorénavant focaliser notre attention sur les propriétés d'adhésion film/substrat, qui pilotent la propagation de la fissuration interfaciale, et *in fine* la croissance des structures de cloquage. De récentes observations expérimentales ont en effet mis en évidence des croissances de cloques à contraintes/chargement mécanique fixe, qui laissent supposer une variation significative de l'adhésion au cours du temps. A titre d'exemple est présentée ci-dessous en Figure 1 une cloque circulaire (Au d'épaisseur 60 nm sur wafer de Si) présentant de nombreux plis plastiques successifs, signature de sa cinétique de croissance. L'objectif à terme est ici de disposer d'une méthodologie expérimentale par caractérisation fine des structures de cloquage, qui puisse permettre de quantifier la ténacité de l'interface film/substrat.

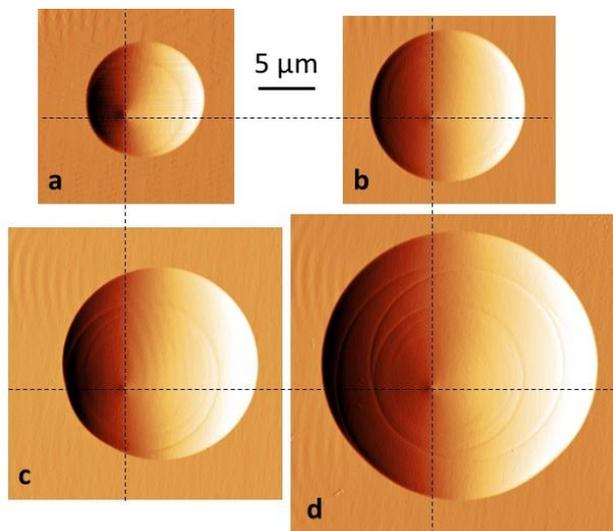


Figure 1 : Croissance successive d'une cloque circulaire observée par AFM sur un film d'Au d'épaisseur 60 nm déposé sur wafer de Si. (a) 3 jours, (b) 7 jours, (c) 14 jours et (d) 21 jours après dépôt.

**En pratique.** La mission doctorale présentera à la fois un volet expérimental et un volet numérique. L'Institut Pprime sera en charge de ce volet expérimental : il conviendra en particulier de caractériser l'évolution de structures de cloquage sous chargement mécanique et/ou thermique, sous environnement variable (taux d'humidité contrôlé, atmosphère chimiquement neutre...) et en fonction du temps. Le volet numérique sera porté par Guillaume Parry (MdC HdR, Université de Grenoble-Alpes), chercheur au sein du laboratoire SIMaP (Sciences et Ingénierie, Matériaux, Procédés), UMR 5266 CNRS, INC. Il comprendra en particulier la réalisation de simulations numériques par éléments finis (sous code Abaqus, tel qu'illustré en Figure 2) permettant de mieux appréhender les mécanismes mis en jeu

(intégration d'un modèle de zones cohésives, adhésion variable dans le temps, comportement élasto-plastique).

Deux types de films minces métalliques (quelques dizaines à centaines de nm d'épaisseur) seront à l'étude, présentant soit un comportement élasto-plastique (comme le cas de l'Au ci-dessus), soit un comportement purement élastique (Ni, W...).

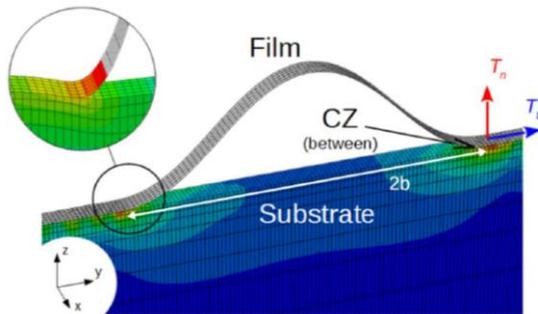


Figure 2 : Configuration FEM qu'il conviendra de mettre en œuvre : prise en compte du film et du substrat, loi d'endommagement élastique ou élasto-plastique pour le film, propagation de la fissure à l'interface dans le cadre d'un modèle de zones cohésives (CZ).

### Nos publications récentes dans ce domaine.

- K. Meng, G. Parry, M.A. Hurier, C. Tromas, C. Coupeau  
*Influence of elasto-plastic behavior of thin films on circular buckling structures*  
International Journal of Solids and Structures 304 (2024) 113032
- K. Meng, G. Parry, M. A. Hurier, N. Ben Dahmane, C. Coupeau  
*Elastic-plastic buckling of gold thin films into straight-sided blisters*  
Surface and Coatings Technology 482 (2024) 130642.
- C. Coupeau, J. Durinck, G. Parry  
*Buckling structures, a relevant signature of the mechanical properties of film/substrate systems*  
Journal of Materials and Polymer Science, 4 (2024) 1
- A. Zuber, G. Parry, C. Coupeau, P.O. Reanult, V. Gauthier-Brunet, S. Dubois  
*Alumina scale buckling during high temperature oxidation of Cr<sub>2</sub>AlC MAX Phase*  
Journal of European Ceramic Society 43 (2023) 7334.
- C. Chil, J. Durinck, C. Coupeau  
*Buckling of graphene under compressive strain: DFT calculations and second generation REBO potential*  
Extreme Mechanics Letters 56 (2022) 101845
- S.-J. Yu, G. Parry, C. Coupeau, L. Li  
*Pressure-induced transition from wavy circular to ring-shaped buckles*  
Int. J. of Solids and Struct. 225 (2021) 111053.
- F.-Z. Abbes, C. Coupeau, J. Durinck, M. Talea, Y. Ni and G. Parry  
*Effect of substrate elasticity on thin films buckles morphologies: a phase diagram*  
Surface and Coatings Technology 408 (2021) 126817.
- J. Durinck, G. Parry, S. Hamade, C. Coupeau, J. Colin  
*Influence of interface steps on the buckle delamination of thin films*  
JPMS 132 (2019) 103698
- C. Coupeau, R. Boijoux, Y. Ni, G. Parry  
*Interacting straight-sided buckles: An enhanced attraction by substrate elasticity*  
Journal of the Mechanics and Physics of Solids 124 (2019) 526.
- R. Boijoux, G. Parry, C. Coupeau  
*Buckle depression as a signature of young's modulus mismatch between a film and its substrate*  
Thin Solid Films 645, 041405 (2018)
- R. Boijoux, G. Parry, J. Y. Faou, C. Coupeau  
*How soft substrates affect the buckling delamination of thin films through crack front sink-in*  
Applied Physics Letters 110, 141602 (2017)