Ecole thématique dans le cadre du CFM 2025

29 et 30 Août 2025 - Metz

Une école thématique est proposée durant les deux journées qui suivent le CFM 2025 à Metz. Il s'agit du **Vendredi 29 et du Samedi 30 Aout 2025**. Des cours, des travaux dirigés, des ateliers et des découvertes des équipements scientifiques associés seront proposés sur certaines thématiques de recherche en mécanique du laboratoires LEM3, organisateur du congrès. Le programme scientifique de cette école thématique est conçu pour des **doctorants, post-doctorants et jeunes chercheurs** souhaitant découvrir ou approfondir leurs connaissances dans ces thématiques de recherche. Le programme contient des sessions parallèles sur les sujets suivants :

- **Thème 1** : Utilisation de **l'intelligence artificielle** en mécanique des structures et des matériaux,
- **Thème 2** : Modélisation **multi-échelles** du **comportement non linéaire** des matériaux et **techniques expérimentales** :
  - Approches **micro-mécaniques multi-échelles**, avec prise en compte de **mécanismes physiques microstructuraux**, pour la modélisation du **comportement non linéaire** des matériaux et la prédiction des **instabilités plastiques**,
  - Méthodes et techniques **expérimentales avancées** de **caractérisation** des mécanismes physiques à l'échelle de la **microstructure**,
- **Thème 3 :** Modélisation et caractérisation du comportement des matériaux sous **chargements ultrarapides** :
  - Théorie et **propagation des ondes élastiques** lors d'un impact / Lois de comportement en dynamique,
  - **Barres de Hopkinson** en compression et cisaillement dynamique : Théorie et instrumentation,
  - Méthodologie d'identification des **lois de comportement thermoviscoplastique** en dynamique : effets de la température et de la vitesse de déformation.
  - Techniques de mesures rapides et corrélation d'images en dynamique **(DIC).**

Ces deux journées de l'école thématique favoriseront les échanges et les discussions scientifiques sur les différents sujets proposés permettant de faire émerger des projets de recherche collaboratifs. Si des thématiques proposées vous intéressent n'hésitez pas à vous **inscrire pour ces deux journées lors de votre enregistrement au CFM 2025**.

Le programme est le suivant avec trois sessions parallèles :

	Vendredi 29/08/25				**Samedi 30/08/2025**				
	14h00 – 15h45	Pause	16h15 – 18h00		08h00 – 9h45	Pause	10h15 – 11h30	Pause	11h45 – 13h
Thème 1	S1-1		S1-2		S1-3		S1-4		S1-5
Thème 2	S2-1		S2-2		S2-3		S2-4		S2-5
Thème 3	S3-1		S3-2		S3-3		S3-4		S3-5

UNIVERSITÉ DE LORRAINE — LEM3 Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux — lemta Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée — Arts et Métiers Sciences et Technologies — cnrs

Pour vous inscrire à l'une des sessions proposées, merci d'envoyer un mail à **cfm2025-ecolethematique@sciencesconf.org**, en indiquant comme objet : « **École Thématique CFM 2025** », et **en précisant la session qui vous intéresse** dans le corps du message. Il n'y a pas de frais d'inscription supplémentaires par rapport à ceux du CFM.

Il y aura 12 places par thème. L'inscription sera clôturée dès que le nombre maximal est atteint pour un thème.

Thème 1 « Intelligence Artificielle appliquée à la mécanique »

Objectifs :

Cette formation est destinée aux doctorants, post-doctorants et jeunes chercheurs et enseignants-chercheurs qui souhaitent s'initier aux outils d'**Intelligence Artificielle (IA)** et explorer l'intégration de ces outils dans leurs activités de recherche. L'objectif est de proposer une initiation aux concepts fondamentaux de l'IA et de sensibiliser les participants aux applications potentielles de l'IA en mécanique, en particulier pour la résolution et l'optimisation des calculs numériques. Un accent particulier sera mis sur le paradigme de l'apprentissage automatique informé par la physique (Physics-Informed Machine Learning) et ses applications à la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP).

Programme détaillé :

- Vendredi 29/08/2025 : Cours théoriques
  - **S1-1** (14h00 - 15h45) : Introduction à l'IA
    - Concepts fondamentaux
    - Algorithmes d'apprentissage automatique (arbres de décision, SVM, réseaux de neurones, etc.)
    - Entrainement des modèles (préparation/sélection/partitionnement des données, sous/sur apprentissage, optimisation des hyperparamètres)
  - **S1-2** (16h15 - 18h00) : Apprentissage informé par la physique
    - Méthodologies
    - Réseaux de neurones informés par la physique (PINNs)
    - Panorama d'applications en mécaniques
- Samedi 30/08/2025 : Travaux pratiques
  - **S1-3** (8h00 - 9h45) :
    - Présentation des librairies IA en Python
    - Entrainement d'un réseau de neurones simple avec PyTorch
  - **S1-4** (10h15 - 11h30) :
    - Implémentation d'un PINN sur des problèmes de mécanique
    - Entrainement et exploitation des résultats
  - **S1-5** (11h45 - 13h) : Session de discussion

Prérequis :

Pour garantir une participation optimale à cette formation, il est recommandé d'avoir des connaissances de base en mécanique des milieux continus (MMC) ; en calculs numériques ; et en programmation avec Python.

Infos pratiques :

- Les travaux pratiques peuvent être exécutés sur Google Colab. L'installation du Python et des librairies n'est pas nécessaire.

Thème 2 « Analyse des paramètres microstructuraux sur le comportement non linéaire des matériaux : Modélisation multi-échelles du comportement et des instabilités plastiques et Techniques expérimentales avancées de caractérisation des microstructures »

S2-1 et S2-2 – Vendredi 29/08/2025 (14h à 18h) :

Approches micro-mécaniques multi-échelles, avec pise en compte de mécanismes physiques microstructuraux, pour la modélisation du comportement non linéaire des matériaux et la prédiction des instabilités plastiques :

Ce module pédagogique offre une présentation approfondie des approches micro-mécaniques multi-échelles appliquées à la modélisation du comportement des matériaux métalliques polycristallins et à l'étude et l'analyse des instabilités plastiques et leur application à la prédiction des limites de formabilité des tôles minces. La 1ère séquence sera dédiée à la modélisation du comportement monocristallin en grandes déformations élasto-(visco)-plastiques. Nous présenterons ensuite les méthodes et schémas d'intégration numérique permettant d'implanter efficacement ces modèles constitutifs. Les principaux avantages de ces approches par rapport aux modèles phénoménologiques seront mis en évidence.

La deuxième séquence portera sur les schémas de transition d'échelles développés pour modéliser le comportement des agrégats polycristallins à partir des propriétés de leurs monocristaux constitutifs. Ces schémas peuvent être classifiés en deux grandes familles : les approches à champ moyen (tels que le modèle de Taylor ou les méthodes auto-cohérentes) et les approches à champ complet, notamment la méthode des éléments finis en plasticité cristalline (CPFEM) et les techniques basées sur les transformées de Fourier (FFT). Les avantages, limitations et domaines d'application de ces différentes approches seront discutés, avec une attention particulière portée à leur mise en œuvre numérique.

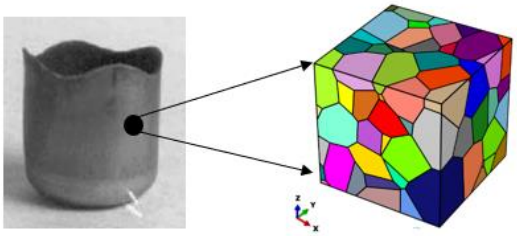


Fig. 1

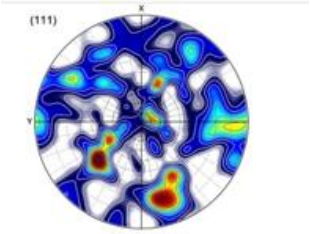


Fig. 2

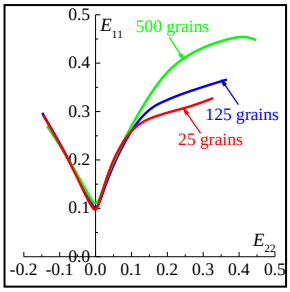


Fig. 3

Enfin, la 3ème séquence sera consacrée au couplage de ces approches micro-mécaniques avec des critères de détection d'instabilités plastiques (e.g., théorie de bifurcation de Rice, méthode d'imperfection initiale de Marciniak-Kuczynski) et à leurs applications pour la prédiction des limites de formabilité des tôles métalliques (cf. Fig. 3). Nous montrerons notamment la pertinence de ces approches multi-échelles dans l'analyse de l'influence des paramètres physiques microstructuraux (e.g., morphologie, orientation, taille de grains (Figs. 1-2), création/annihilation des dislocations) sur les réponses rhéologiques et les limites de ductilité des matériaux, permettant d'établir des liens microstructure-comportement-ductilité.

Mots clés : plasticité cristalline, approches micro-mécaniques multi-échelles, matériaux polycristallins, modélisation numérique, instabilités plastiques, limites de formabilité des tôles, microstructure.

S2-3, S2-4 et S2-5 – Samedi 30/08/2025 (8h à 13h) :

Méthodes et techniques expérimentales avancées de caractérisation des mécanismes physiques à l'échelle de la microstructure :

Ce module pédagogique présente les dernières avancées en microscopie électronique et en diffraction de rayons X pour une caractérisation fine des microstructures et des textures ainsi que l'analyse des mécanismes de déformation actifs lors d'une sollicitation mécanique. L'objectif est de dégager des paramètres microstructuraux impactant l'anisotropie du comportement mécanique des matériaux pour d'une part les intégrer dans les données d'entrées de modèles micromécaniques et d'autre part se doter de moyens pour valider les effets de la microstructure prise en compte dans la modélisation.

La 1ère séquence sera dédiée aux approches expérimentales pour la caractérisation des microstructures et des textures. Nous détaillerons les notions d'orientation cristallographique et texture cristallographique puis nous présenterons les techniques de diffraction électronique (en particulier la technique EBSD) et de rayons X pour la caractérisation des microstructures multi-échelles.

La deuxième séquence propose une démonstration du logiciel ATEX (http://www.atex-software.eu/) développé au LEM3 par Benoit Beausir et Jean Jacques Fundenberger. On présente deux exemples : (1) l'analyse des textures macroscopiques à partir de données de DRX ou d'EBSD, (2) l'analyse des densités de dislocations à partir de cartographie EBSD – apport de l'EBSD en Haute Résolution angulaire.

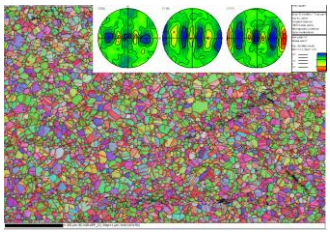


Fig. 1

Fig. 2

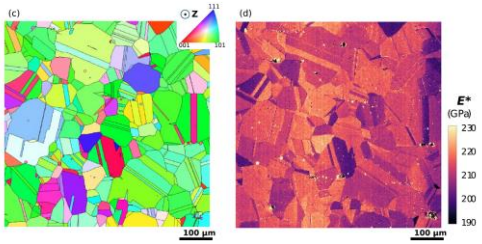


Fig. 3

Enfin, la 3ème séquence sera consacrée à des caractérisations mécaniques à une échelle plus locale. En particulier, on présentera l'essai de nano-indentation instrumentée et l'apport de son couplage avec des analyses EBSD préalables au travers de deux exemples : (1) caractérisation du durcissement induit par les dislocations et prise en compte dans un modèle micromécanique, (2) estimation des constantes élastiques monocristallines par inférence bayésienne.

Mots clés : Microstructure, texture, EBSD, diffraction RX, essai in-situ, anisotropie cristalline, mécanisme de déformation.

Thème 3 « Modélisation et caractérisation du comportement thermoviscoplastique des matériaux sous chargements ultrarapides »

S3-1 et S3-2 – Vendredi 29/08/2025 (14h à 18h) / Lieu : Ile du Saulcy

Théorie et propagation des ondes élastiques lors d'un impact/Lois de comportement en dynamique/Barres de Hopkinson en compression et cisaillement dynamique : Théorie et instrumentation :

Ce premier module pose les bases indispensables à la compréhension des sollicitations ultrarapides, en s'appuyant sur les concepts fondamentaux de la théorie des ondes élastiques. Il introduit de manière rigoureuse les équations de conservation de la mécanique des milieux continus en contexte dynamique et leur résolution dans le cas de la propagation d'ondes planes.

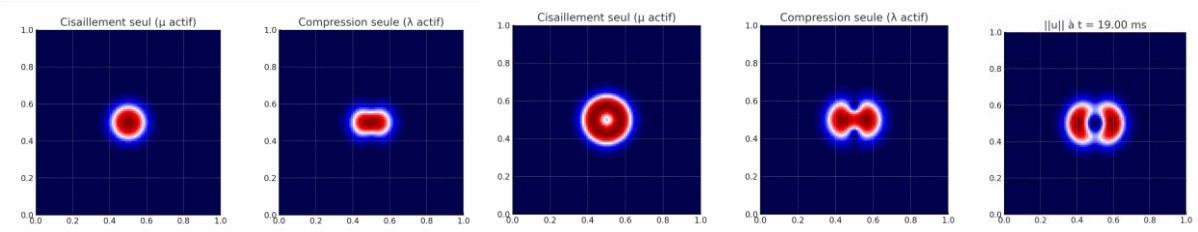
Les différentes natures d'ondes mécaniques (ondes de compression P, ondes de cisaillement S, et ondes de surface) seront présentées, avec un accent particulier sur leur interaction, leur vitesse de propagation et leur influence sur la réponse des matériaux. Des exemples de superposition des ondes P et S illustreront les phénomènes observés lors d'un impact.

La deuxième partie du module portera sur les Barres de Hopkinson (SHPB), en compression et cisaillement. Après une introduction à la théorie sous-jacente (équation des ondes, hypothèses de linéarité, conditions aux limites), une attention particulière sera portée à l'instrumentation, aux mesures expérimentales (jauges de déformation, acquisition des signaux) et aux techniques de réduction des données.

Les concepts seront illustrés à l'aide de simulations numériques, d'extraits expérimentaux et d'un décryptage des figures présentées (voir Figure 1), montrant la propagation d'ondes P et S dans un barreau soumis à un impact.

Ce module est destiné à des chercheurs désireux de maîtriser les aspects fondamentaux et pratiques de la dynamique rapide, dans le but d'analyser ou de modéliser des essais de caractérisation dynamique sous choc ou impact.

Mots clés : Théorie des ondes élastiques, onde P, onde S, superposition, équation des ondes, impact, SHPB, cisaillement dynamique, instrumentation, propagation élastique.



(a) (b) (c)

Figure 1 : Propagation des ondes de compression (P) et de cisaillement (S) lors d'un impact d'un projectile a) t = 5 ms, b) t = 19 ms. c) combinaison de l'onde de compression et de cisaillement (t = 19ms).

S3-3, S3-4 et S3-5 – Samedi 30/08/2025 (8h à 13h) / Lieu : CIRAM LEM3 Metz Technopole

Méthodologie d'identification des lois de comportement thermoviscoplastique en dynamique (effets de la température et de la vitesse de déformation).

Techniques de mesures rapides et corrélation d'images en dynamique (DIC)

Ce module s'articule autour des méthodologies expérimentales avancées permettant de caractériser le comportement des matériaux soumis à des sollicitations dynamiques à haute vitesse de déformation. Il met en lumière les effets couplés de la température, de la vitesse de déformation et des contraintes dynamiques sur le comportement thermoviscoplastique.

Séquence 1 – Approches expérimentales de caractérisation dynamique
Une première partie sera consacrée à la présentation des protocoles expérimentaux de caractérisation du comportement des matériaux à hautes vitesses de sollicitation. Seront abordés les principes de mesure, la mise en œuvre des essais, les effets de la température, la gestion des incertitudes, ainsi que les conditions limites spécifiques aux sollicitations ultrarapides.

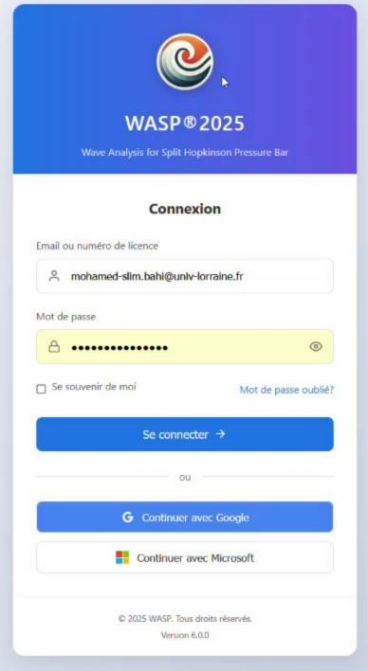


Figure 2:logiciel de traitement des signaux des barres de Hopkinson WASP2025

Séquence 2 – Démonstration d'un essai sur barres de Hopkinson et traitement des signaux

Cette seconde séquence proposera une démonstration en temps réel d'un essai de compression dynamique sur barres de Hopkinson. L'analyse des données issues des jauges de déformation positionnées sur les barres incidente et transmise sera réalisée à l'aide du logiciel WASP2025 (https://wasp2025.netlify.app/login), développé au LEM3 par Dr. Ing. Slim Bahi et Pr. Alexis Rusinek.

Les différentes étapes du traitement incluront :

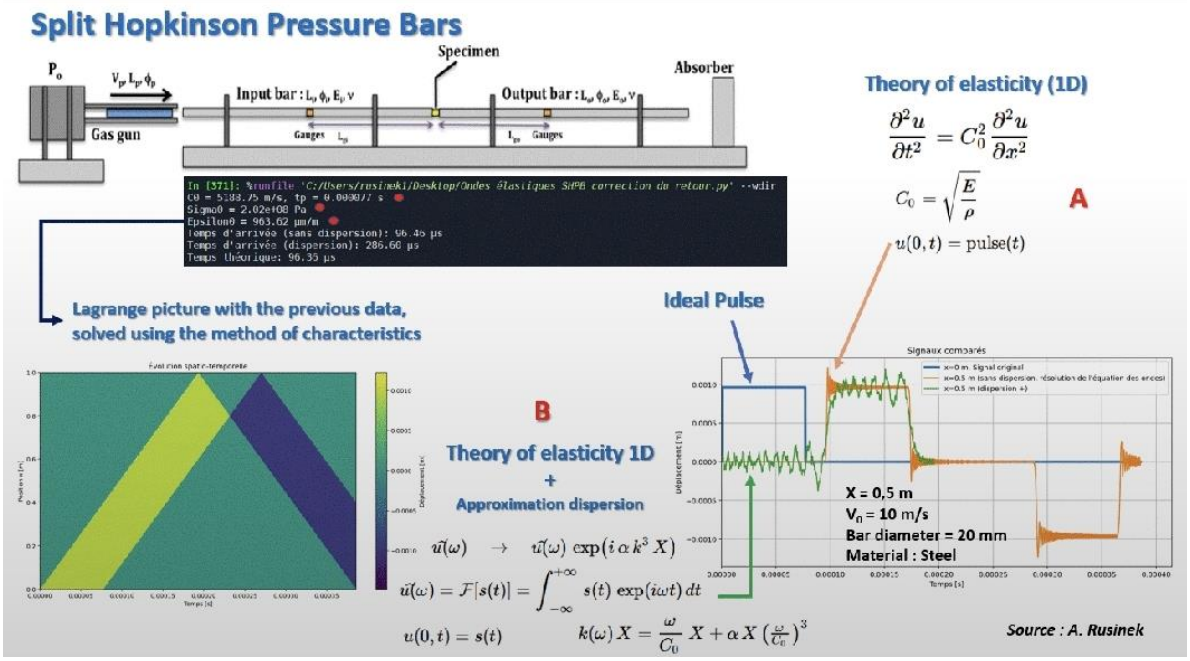
1. L'analyse et la séparation des signaux issus des ondes élastiques (incidente, réfléchie, transmise) ;
2. Le traitement des signaux et leur filtrage fréquentiel ;
3. L'identification expérimentale de la courbe contrainte-déformation $\sigma = f(\varepsilon)$;
4. Le calcul de la vitesse de déformation en temps réel.

Séquence 3 – Corrélation d'images appliquée au cisaillement dynamique

Enfin, une dernière partie portera sur l'application des techniques de corrélation d'images numériques (DIC) dans le contexte du cisaillement dynamique :

1. Préparation des éprouvettes spécifiques pour les essais dynamiques ;
2. Acquisition rapide et synchronisation avec les signaux ;
3. Traitement spatio-temporel des images pour extraire les champs de déplacements et de vitesses ;
4. Estimation des champs de déformations locales, de la vitesse de déformation, et du coefficient de Poisson en conditions dynamiques.

26e Congrès Français de Mécanique Metz 2025
25 au 29 août
CFM 2025
AFM ASSOCIATION FRANÇAISE DE MÉCANIQUE



Mots clés : SPHB, Comportement thermoviscoplastique, jauges de déformation, corrélation d'images, techniques de mesures rapides des champs de déplacements en dynamique.