



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE

Groupe « Mesures en Thermique et Techniques Inverses »

Journée thématique organisée par :
Fabrice Rigollet (IUSTI), Jean-Luc Battaglia (I2M), Denis Maillet (LEMTA),

Jeudi 8 juin 2023

Accueil à partir de 9h30 à
FIAP, 30 rue Cabanis, Paris 14 - Métro Glacière

Inversion de données faisant appel à un modèle en thermique, quels apports de l'intelligence artificielle ?

Le développement de méthodes d'identification de modèles à partir de mesures, ou de réduction de modèles analytiques ou numériques détaillés, correspondent à des préoccupations très actuelles en thermique. Ces modèles sont indispensables en caractérisation thermique ou radiative de matériaux ou systèmes ou pour l'estimation de conditions aux limites en des endroits non instrumentés de ces derniers (inversion). La prévision, ou la simulation pour la conception optimale (procédés, matériaux, systèmes) constitue une autre classe d'application. En parallèle les outils de l'intelligence artificielle (IA), et en particulier de l'apprentissage supervisé, se développent très rapidement dans de nombreux domaines. Ils reposent sur une régression qui intègre une base d'apprentissage (modèle ou mesures) disponible au préalable. L'objectif de la journée est donc de voir si et comment ces techniques peuvent aider l'inverseur en thermique dans sa démarche évoquée plus haut, en particulier dans le cas où l'on traite des données quantitatives de grande taille (big data), ou de problèmes inverses mal-posés. Par exemple, si le modèle entrée/sortie utilisé a la structure d'un réseau neuronal, est-il possible d'intégrer la physique dans son calibrage (cas d'un PINN = Physically Informed Neural Network) ? De même, quel est le lien entre ces PINN et les méthodes bayésiennes où une information a priori est prise en compte dans l'estimation des grandeurs recherchées ? La journée s'articulera autour de présentations de ces outils dans des applications variées (thermique instationnaire, rayonnement de surface, rayonnement en milieux participatifs, mécanique des fluides, mécanique).

Contacts : fabrice.rigollet@univ-amu.fr, jean-luc.battaglia@u-bordeaux.fr, denis.maillet@univ-lorraine.fr)

BULLETIN D'INSCRIPTION à envoyer impérativement par mail à : sft-contact@asso.univ-lorraine.fr

Aucune réservation ne sera faite sans retour de ce document.

L'inscription est considérée comme acquise et comme due dès lors du renvoi de ce bulletin.

Nom : Prénom :

Organisme :

Adresse

Courriel :

Désire s'inscrire à la **journée d'étude SFT du 8 juin 2023** en tant que : (cocher la case correspondante)

- Conférencier : 50 €
- Membre SFT à titre individuel : 85 €
- Membre adhérent à la SFT par l'appartenance à une société adhérente : 140 €
(Cachet de la société adhérente) :

Non-membre de la SFT : 180 €
(Le prix signalé inclut le repas de midi qui est organisé sur place, les pauses et l'accès aux documents)

Avec le mode de règlement suivant : (cocher la case correspondante)

Par chèque à l'ordre " Société Française de Thermique" à envoyer à :
Secrétariat SFT - ENSEM - BP 90161 – 54505 Vandoeuvre Cedex
(Une facture acquittée sera retournée par mail à l'adresse mentionnée sur ce bulletin d'inscription)

Par bon de commande qui vous sera adressé par ma société (**uniquement par mail**) sachant que le présent bulletin d'inscription vaut devis.

Date : Signature :

NOTA : Le repas ne peut être garanti qu'aux personnes s'inscrivant au moins 21 jours avant la rencontre

Programme – Sauf mention particulière, une présentation est composée de 15 minutes d'exposé et 10 minutes de questions (voir les résumés pages suivantes).

09:30 Accueil

10:00 F. Rigollet, D. Maillet, J. L. Battaglia, Introduction de la journée, 15 min

10:15 E. Abisset-Chavanne (I2M, Bordeaux) - Quel apport de l'IA dans l'obtention et le traitement des données expérimentales ? 15+10 min

10:40 J.-L. Battaglia (I2M, Bordeaux) - Identification de systèmes thermiques linéaires et non linéaires par des structures mathématiques d'intégration d'ordre non entier (15+10 min)

11:05 Café (30 min)

11:35 F. André (CETHIL, Lyon) – Combinaison de modèles physiques et d'outils d'apprentissage statistique pour l'approximation des propriétés radiatives d'atmosphères non-uniformes. Partie 1 : Principe et fondements théoriques, 15+10 min

12:00 C. Delage (CETHIL, Lyon) – Partie 2 : Ajustement des paramètres du modèle sur des données d'apprentissage - cas de la bande A de l'oxygène (EPS-SG 3MI), 10+5 min

12:15 M.-H. Aumeunier (CEA, Cadarache) – Réseaux neuronaux convolutifs pour la thermographie quantitative en environnement complexe, 15+10 min

12:40 Repas (1h40)

14:20 H. Orlando (COPPE, Rio de Janeiro) – Metamodel based on evolutionary neural networks for the solution of inverse problems within the Bayesian framework of statistics, 15+10 min

14:45 B. Gaume, Y. Rouizi, F. Joly, O. Quéméner (LMEE, Evry Val d'Essone) - Apport des modèles réduits pour la mesure thermique indirecte en temps réel dans un four rayonnant, 15+10 min

15:10 O. Farges (LEMTA, Nancy) – Modélisation du transfert radiatif dans des milieux participants, par réseaux de neurones bayésiens et méthode de Monte Carlo, 15+10 min

15:35 Y. Cheny (LEMTA, Nancy) – Reconstruction de courants de gravité par réseaux de neurones informés par la physique (PINNs), 15+10 min

16:00 D. Maillet, B. Rémy, A. Barthélemy (LEMTA, Nancy) – Construction de modèles convolutifs transitoires ou paramétriques (ARX) pour une utilisation ultérieure directe ou inverse en thermique, 15+10 min

16:25 M. Montemurro (I2M Bordeaux) – A general metamodeling strategy based on non-uniform rational basis spline hyper-surfaces, 15+10 min

16:50 Conclusion, 10 min

17:00 Fin

- **Fabrice Rigollet (IUSTI, Marseille), Jean-Luc Battaglia (I2M, Bordeaux), Denis Maillet (LEMTA, Nancy) - Introduction de la journée.**
- **Emmanuelle Abisset-Chavanne (I2M, Bordeaux) - Quel apport de l'IA dans l'obtention et le traitement des données expérimentales ?**
Résumé : Dans cet exposé, sera tout d'abord abordé la question de la génération de données massives que ce soit dans les laboratoires de recherche ou dans l'industrie. Une illustration sera proposée via la tomographie multi-spectrale développée pour obtenir une cartographie des matériaux présents dans les pièces et les systèmes. Puis, un rapide retour sur l'IA, ses définitions et surtout ses spécificités dans son utilisation sera proposé. Différents exemples d'utilisation de l'IA pour le traitement de ces données massives seront ensuite présentés dans le cas de l'identification inverse de propriétés ou de la détection de défauts, permettant d'aborder la question de la pertinence de ces outils comparés aux méthodes plus « physiques ». Dans un second temps, l'apport de l'IA dans la génération des données pertinentes sera abordé, non pas par les algorithmes d'automatisation et/ou d'apprentissage, mais par l'approche « finalité ». Ainsi, une réflexion autour du pilotage de la mesure par la finalité sera proposée pour alléger les contraintes de stockage et de traitement.
- **Jean-Luc Battaglia (I2M, Bordeaux) - Identification de systèmes thermiques linéaires et non linéaires par des structures mathématiques d'intégration d'ordre non entier.**
Résumé : La présentation va consister à montrer l'intérêt d'identifier des modèles thermiques de systèmes complexes, linéaires et non-linéaires, en se basant sur des structures mathématiques faisant appel à l'opérateur d'intégration d'ordre non entier et des mesures réalisées sur des bancs expérimentaux permettant de contrôler et mesurer les grandeurs d'entrées et de sortie du modèle. L'application à la résolution de problèmes inverses est particulièrement intéressant et sera aussi montré dans la présentation.
- **Frédéric André (Partie 1) et Cindy Delage (partie 2) (CETHIL, Lyon) – Combinaison de modèles physiques et d'outils d'apprentissage statistique pour l'approximation des propriétés radiatives d'atmosphères non-uniformes**
Résumé : Partie 1. La théorie des modèles de bande, utilisée pour le transfert radiatif dans les atmosphères gazeuses, repose en grande partie sur des représentations statistiques des spectres d'absorption des gaz. Des travaux récents ont permis d'établir une formulation exacte des propriétés radiatives d'atmosphères non-uniformes sous la forme de copules en grandes dimensions. Sous certaines hypothèses physiques réalistes, cette copule peut être écrite sous une forme analytique. La forme fonctionnelle obtenue peut être interprétée comme un réseau récurrent, ouvrant la voie à l'exploitation d'outils issus de l'apprentissage statistique (combinaison de statistique et de machine learning) afin d'extraire les paramètres inconnus du modèle de jeux de données "exactes" issus de l'approche dite raie-par-raie.
Partie 2. Ajustement des paramètres du modèle sur des données d'apprentissage - cas de la bande A de l'oxygène (EPS-SG 3MI)
- **Marie-Hélène Aumeunier (CEA, Cadarache) – Réseaux neuronaux convolutifs pour la thermographie quantitative en environnement complexe.**
Résumé : La thermographie infrarouge est un diagnostic essentiel dans les centrales de fusion nucléaire pour contrôler la température des composants face au plasma soumis à d'importants flux de chaleur (de 10 à 20 MW/m²). Cependant la mesure de température de surface reste problématique dans un environnement tout métallique et chaud (i.e. entièrement réfléchissant et rayonnant). Nous présentons ici une méthode d'inversion pour retrouver les températures de surface à partir des images de caméra (en radiance W/m²/sr), capable de résoudre la contribution du flux réfléchi et les incertitudes sur les propriétés optiques des matériaux. Cette méthode se base sur la construction d'un réseau neuronal convolutif, appris sur une base de données d'images synthétiques très réalistes. Des premiers résultats très encourageants ont été obtenus à partir d'un prototype numérique avec des erreurs inférieures à 10% sur les températures. Le prochain défi est le passage aux images expérimentales à partir de ce même type de réseau.

- **Helcio Orlando (COPPE, Rio de Janeiro) – Metamodel based on evolutionary neural networks for the solution of inverse problems within the Bayesian framework of statistics**
Abstract : This presentation is aimed at the reduction of the computational time of the inverse problem solution with the Markov Chain Monte Carlo method, by using the Evolutionary Neural Network Algorithm (EvoNN). EvoNN attempts to simultaneously optimize the accuracy and complexity of the neural network metamodel. Modelling errors are formally accounted for with the Approximation Error Model (AEM) Approach. The method is illustrated on a fluid dynamics problem.

- **B. Gaume, Y. Rouizi, F. Joly, O. Quéméner (LMEE, Evry Val d'Essone) - Apport des modèles réduits pour la mesure thermique indirecte en temps réel dans un four rayonnant**
Résumé : Nous proposons ici d'utiliser une méthode de modélisation par modèle réduit modal (AROMM), afin d'identifier une source radiative variable dans le temps à partir de quelques points de mesures et de reconstruire la scène thermique complète. L'exemple traité ici porte sur un four industriel dans lequel une pièce en titane est chauffée par deux tubes radiants ayant une température variable dans le temps comprise entre 293 et 1173K.
L'utilisation de ce type de modèle permet une reconstruction en ligne du champ de température complet de la scène thermique, avec une erreur moyenne de 0.1% (<1°C) et une erreur maximum de l'ordre de 3% (~25K sur une échelle de 880°C).

- **Olivier Farges (LEMTA, Nancy) – Modélisation du transfert radiatif dans des milieux participants, par réseaux de neurones bayésiens et méthode de Monte Carlo.**
Résumé : La capacité prédictive des réseaux neuronaux artificiels Feedforward (FANN) est utilisée pour estimer la divergence du flux radiatif dans un cas de chambre de combustion académique utilisée comme cas de référence. Des bases de données d'entraînement et de validation ont été construites grâce à un algorithme de Monte Carlo à collision nulle utilisant un modèle SNB-CK pour représenter les propriétés des gaz. L'objectif principal de ce travail est de combiner les avantages des modèles spectraux en termes de précision et l'efficacité de calcul des réseaux neuronaux afin de rendre possible la modélisation précise du transfert de chaleur radiatif. En conséquence, les réseaux neuronaux sont capables de modéliser la divergence du flux radiatif sur la base de données d'entraînement.

- **Yoann Cheny (LEMTA, Nancy) – Reconstruction de courants de gravité par réseaux de neurones informés par la physique (PINNs)**
Résumé : Ce travail porte sur la reconstruction de courants de gravité instationnaires par réseaux neuronaux informés par la physique (PINNs). Les champs d'intérêt sont reconstruits par entraînement d'un réseau de neurones dont la fonction objectif : (i) pénalise l'écart entre les prédictions du réseau et les données d'observation, et (ii) intègre les équations sous-jacentes en utilisant la différentiation automatique. Notre approche est éprouvée sur le cas test de lock-exchange à partir de données synthétiques obtenues par méthode spectrale. Cela nous permet d'évaluer quantitativement les erreurs de reconstruction pour différentes bases de données d'entraînement conçues pour imiter les techniques de mesure expérimentale pour mesurer la densité et/ou la vitesse. En outre, nous présentons des résultats récents obtenus à partir de mesures expérimentales réalisées au laboratoire.

- **Denis Maillet, Benjamin Rémy, Adrien Barthélemy (LEMETA, Nancy) – Construction de modèles convolutifs transitoires ou paramétriques (ARX) pour une utilisation ultérieure directe ou inverse en thermique**

Résumé : Les modèles dynamiques à structure temporelle convolutive continue, basés sur la notion de réponse impulsionnelle en un point du domaine étudié, et liant excitation thermique transitoire unique séparable temps/espace (une variation de puissance thermique, d'un flux de chaleur ou d'une température), et sa réponse en variation de température en ce point (un modèle « SISO »), ont une structure aussi exacte que les modèles détaillés basés sur la résolution analytique ou numérique de l'équation de la chaleur munie de ses conditions aux limites spatiales. Ceci est rigoureusement exact si ces dernières sont linéaires à coefficients invariants en temps (« LTI » PDE models) et si le régime thermique initial, avant imposition de l'excitation à l'instant initial, est permanent, sans être nécessairement uniforme. Nous montrons ici que la version échantillonnée (en sortie) et paramétrée en fonction temporelle constante par morceaux (pour l'entrée et pour la réponse impulsionnelle) de ces modèles peut être écrite à l'aide d'une matrice de sensibilité faisant intervenir des matrices de Toeplitz triangulaires inférieures et des vecteurs des doses de ces 2 dernières fonctions, et non de leurs seules valeurs échantillonnées. Le problème principal de l'identification expérimentale (calibration) d'un tel modèle SISO par moindres carrés ordinaires, à partir de mesures de l'entrée et de la sortie intégrant toutes deux un bruit d'écart type connu, est de déterminer le support temporel fini de la réponse impulsionnelle, ici une impédance ou une transmittance. Enfin, on montre que les modèles ARX (Autorégressifs à Variable exogène) sont liés à la version paramétrée du modèle convolutif correspondant, par la prise en compte simultanée de la source (entrée originale) et d'une multiplicité de « pseudo-sources ».

- **Marco Montemurro (I2M Bordeaux) – A general metamodelling strategy based on non-uniform rational basis spline hyper-surfaces**

Abstract: This study deals with an original metamodelling technique based on Non-Uniform Rational Basis Spline (NURBS) hyper-surfaces. The proposed approach is able to fit general non-convex sets of target points (TPs) by extending the NURBS formalism to the N-dimensional (N-D) case. The shape of the hyper-surface depends on multiple parameters: the number of control points (CPs), their coordinates and the related weights, the degree of the Bernstein's polynomials and the knot-vector components defined along each direction. The goal of the proposed strategy is to automatically determine (i.e., without the user's intervention) the full set of parameters defining the NURBS hyper-surface approximating a given set of TPs, without considering simplifying hypotheses. To this end, the problem is formulated as a constrained nonlinear programming problem (CNLPP) wherein the optimization variables are all the parameters tuning the shape of the NURBS hyper-surface. Nevertheless, when the number of CPs and the degrees of the Bernstein's polynomials are included among the design variables, the resulting problem is defined over a space of changing dimension. This problem is solved by means of an original genetic algorithm able to determine, simultaneously, the optimum value of both the design space size (related to the integer variables of the NURBS hyper-surface) and the NURBS hyper-surface continuous parameters. The effectiveness of the proposed approach is shown on meaningful benchmark taken from the literature and on complex real-world engineering problems as well.