

Construction de modèles de substitution multi-fidélité Application à la simulation thermique

Matthias De Lozzo (Matthias.De_Lozzo@onera.fr)
ONERA-DTIM, Toulouse
INSA, Toulouse

Thèse encadrée par Béatrice Laurent (Institut de Mathématiques de Toulouse), Patricia Klotz (ONERA-DTIM Toulouse) et Nicolas Dolin (EPSILON Ingénierie)

Résumé *L'utilisation de modèles de simulation numérique précis est souvent coûteuse en temps de calcul. Une alternative consiste à leur préférer des modèles de substitution à temps de réponse rapide, dont les paramètres sont obtenus à partir d'échantillons « entrées-sorties » du système physique, observés ou simulés, de différentes fidélités.*

A. CONTEXTE

Les **modèles de simulation numérique** $\mathcal{M}_{m.n.}$ (différences finies, éléments finis,...) permettent de représenter avec une grande précision les systèmes physiques, tant d'un point de vue statique que dynamique. Cependant ils ont le défaut d'être coûteux en temps de calcul et dans certaines applications, on leur préfère des **modèles de substitution** $\mathcal{M}_{m.s.}$ **à temps de réponse rapide**. En particulier dans le cas de l'optimisation, des problèmes inverses ou de la propagation d'incertitudes, des domaines où le modèle est sollicité un grand nombre de fois, ces substitutions sont d'une réelle nécessité.

Les modèles de substitution, aussi appelés modèles réduits ou métamodèles, sont de **basse fidélité** et possèdent une **forme analytique paramétrée** à partir de l'interpolation ou de la régression d'échantillons « entrées-sorties » de haute fidélité. Ces derniers proviennent de modèles de simulation numérique ou de résultats expérimentaux. Les métamodèles les plus utilisés sont les approximations polynomiales, les processus gaussiens ou encore les réseaux de neurones artificiels. On les qualifie souvent de **boîtes grises ou noires** car leur formulation n'a pas, ou peu, d'interprétation physique.

Le domaine sous-jacent à la construction de ces modèles réduits est l'**apprentissage statistique**[HF08]; ceci consiste à modéliser et généraliser un phénomène, observé ou simulé pour des jeux d'entrées issus de **plans d'expériences**.

B. APPLICATIONS THERMIQUE

L'une des applications de l'entreprise EPSILON Ingénierie est l'**analyse thermique des composants électroniques d'un avion**, qui vise à vérifier leur dimensionnement en déterminant la température des points chauds. Les simulations numériques impliquées sont très coûteuses car elles tiennent compte de différentes échelles : l'avion, les équipements qu'il comporte et les composants électriques présents dans ces derniers, ainsi que les interactions entre ces entités et leur environnement (air convecté notamment). Une approche alternative consiste à construire des modèles réduits de ces équipements de niveaux différents et de les introduire dans le processus de simulation. On parle alors de **modèles de substitution multi-échelles**.

Les échantillons proviennent de simulations thermofluidiques ou de résultats expérimentaux, mais aussi de modèles réduits thermiques qui sont des simplifications physiques du modèle numérique haute fidélité. Basés sur une **approche nodale**[Las08] et sur l'**analogie thermoélectrique**¹, ces modèles sont composés d'un nombre très réduit de nœuds couplés entre eux et décrivant les différents chemins thermiques pouvant exister dans le système étudié. La figure 1 présente l'exemple d'une barre métallique composée de quatre matériaux différents et maintenue à une température constante à son extrémité droite; on s'intéresse à l'évolution de la température à l'extrémité gauche de la barre. D'un point de vue schéma numérique, les matériaux possédant des réponses temporelles qui leur sont propres, on peut leur associer des maillages différents. D'un point de vue approche nodale, chaque

¹En électricité (resp. thermique), dans le cadre de deux surfaces S_1 et S_2 à isopotentiels V_1 et V_2 (resp. à isothermes T_1 et T_2) constituant les extrémités d'un tube de courant, on a la relation $(U_1 - U_2) = R_{e1}I$ (resp. $(T_1 - T_2) = R_{th}\Phi$) où I (resp. Φ) est le flux de courant (resp. flux thermique) allant de S_1 à S_2 . R_{th} est la résistance thermique; elle joue dans le transfert de chaleur un rôle analogue à la résistance électrique R_{e1} .

matériau est représenté par un réseau RC différent, qui, mis en série avec les autres, forme un circuit de Foster. (R_1, C_1) est un couplage thermique.

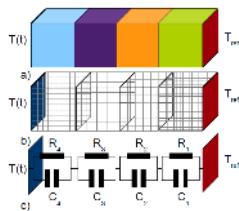


Fig. 1 – Barre chauffée à une extrémité. a) Modèle physique - b) Modèle numérique - c) Modèle réduit thermique (dit circuit de Foster)

C. PROBLÉMATIQUE TEMPORELLE

L’un des enjeux est que ces modèles de substitution soient fonctionnels non seulement en régime permanent, mais aussi en **régime transitoire**. Deux approches essayent d’y répondre. La première consiste à approximer la solution par une **combinaison paramétrique finie de composantes issues d’une base temporelle**, souvent orthogonale (approche du type POD, ondelettes,...). La deuxième se propose de **rendre paramétriques les couplages de la méthode nodale**, en les écrivant comme des fonctions des entrées du système physique.

Dans la première approche, les coefficients des composantes peuvent être modélisés par des métamodèles alors que dans la deuxième, ce sont les couplage qui peuvent l’être.

D. OBJECTIFS

On cherche dans cette thèse une **methodologie pour la construction de modèles de substitution à temps de réponse rapide, valide en régimes permanent et transitoire**. Les bases d’apprentissage sont composées d’échantillons de fidélités différentes [KO00] : simulations numériques,

modèles réduits thermiques ou résultats expérimentaux, comportant plus ou moins d’incertitude sur les paramètres en entrée et les mesures en sortie.

On étudiera aussi l’interaction entre plusieurs métamodèles, en vue de représenter un système dynamique multi-échelle.

Pour y parvenir, différentes thématiques de recherche seront abordées, comme l’enrichissement de plans d’expériences ([BK08] par exemple), le recalage de métamodèles et les mélanges d’experts.

E. DÉMARCHE

Le temps d’obtention d’un échantillon via un modèle numérique $\mathcal{M}_{m.n.}$ étant prohibitif, on s’intéressera tout d’abord à la construction d’un modèle de substitution $\mathcal{M}_{m.s.}$ à partir de données de fidélité moindre (modèles numériques à maillage grossier ou modèles réduits thermiques). De telles données étant facilement obtenables, on en choisira un nombre assez important via des techniques appropriées de planification d’expériences sur l’espace des entrées et on construira un premier métamodèle.

Par la suite, le plan d’expériences sera enrichi progressivement de façon parcimonieuse (*i.e.* en ajoutant des points là où le modèle de substitution est le plus mal défini) et le modèle réduit sera reconstruit après chaque ajout. Une approche complémentaire consiste à recalibrer le modèle, c’est-à-dire à le mettre à jour grâce aux nouveaux points de la base d’apprentissage plutôt que de le reconstruire via l’apprentissage de l’ensemble de cette base. Une telle technique peut notamment être mise en place dès lors que l’erreur de généralisation du métamodèle est suffisamment faible ; les données d’apprentissage proviennent alors de modèles de plus haute fidélité. En procédant de la sorte, le modèle de substitution effectue l’apprentissage de données multifidélités ; il sera alors intéressant d’associer à chaque source de données une mesure de fidélité différente. Le modèle pourrait ainsi être quasiment interpolant pour les données de haute fidélité, et plus ou moins régressant pour les autres.

RÉFÉRENCES

- [BK08] Beers and Kleijnen. Customized sequential designs for random simulation experiments : Kriging metamodeling and bootstrapping. *Elsevier*, 2008.
- [HF08] Tibshirani Hastie and Friedman. *The Elements of Statistical Learning (2nd edition)*. Springer-Verlag, 2008.
- [KO00] Kennedy and O’Hagan. Predicting the output from a complex computer code when fast approximations are available. *Biometrika*, 2000.
- [Las08] Lasance. Ten years of boundary-condition-independent compact thermal modeling of electronic parts : A review. *Heat transfer engineering*, 2008.

À PROPOS DU DOCTORANT

Matthias De Lozzo est en première année de thèse CIFRE avec l’entreprise de thermique EPSILON Ingénierie. Cette thèse est encadrée par l’ONERA, également laboratoire d’accueil, et l’Institut de Mathématiques de Toulouse. Le sujet porte sur la construction de modèles de substitution multifidélité avec des applications en thermique ; il s’inscrit dans la suite de travaux liés aux plans d’expériences adaptatifs et au recalage de réseaux de neurones.