

# Apports des approches multi-physiques dans le développement spécifique d'un nouveau produit : générateur de vapeur par chauffage à induction

C. DELALEAU<sup>a</sup>, D. DEPEYRAS<sup>a</sup>, G. RAIGNE<sup>a</sup>

a. Ingeliance Technologies, 6 rue Nicolas Leblanc, ZA Saint Exupéry 2, 33700 MERIGNAC

## Résumé :

*La conception d'un système complexe comme un générateur de vapeur par chauffage à induction nécessite de prendre en compte tous les couplages de la physique. Tout d'abord, l'inducteur chauffe un tube en métal dans lequel l'eau se vaporise. Le couplage 2D électromagnétique/CFD est réalisé à partir de l'échange des résultats en température. L'optimisation du process est quant à elle obtenue par représentation de l'ensemble du système dans un unique modèle qui peut être mis à l'échelle afin de réaliser un prototype. Ceci est possible avec une approche 1D système. Le but est d'insérer les résultats 2D/3D dans ce modèle à partir d'abaques. L'objectif final s'inscrit dans une démarche « model-based-design » avec la construction d'un meta-modèle servant de support à la synthèse des lois de contrôle commande et à leurs intégrations sur plateforme d'essai temps réel. Ce meta-modèle permettra la spécification pour la mise en œuvre des plans d'expériences et la corrélation avec les futurs résultats expérimentaux.*

## Abstract :

*The conception of a complex system such as a steam generator by induction heat needs to take into account the coupling physics. First, the inductor heats a metal tube in which the water becomes steam. The 2D electromagnetics/CFD coupling is realized with thermal results exchange. The process optimization needs to represent all the system in only one model which can be downscaled in order to realize a prototype. This is possible with a 1D system approach. The deal is to insert the 2D/3D results in this model thanks to abacus. The final objective is taking place in a "model-based-design" approach with the build of a meta-model which is used for the control and the supervision laws and their integration on the real time experience platform, so as for the plan experience specification and the future experience results comparison.*

**Mots clefs :** électromagnétique, CFD, supervision

## 1 Introduction

La conception d'un système complexe comme un générateur de vapeur par chauffage à induction doit s'appuyer sur une démarche progressive afin de prendre en compte toutes les échelles de la Physique. Dans le cadre de cette démarche prudente et efficace, la simulation numérique prend place à chacune de ces étapes avec différents objectifs qui seront présentés.

Brièvement, le produit consiste à chauffer puis vaporiser un écoulement d'eau dans une structure tubulaire. Le chauffage est assuré par un système à induction soit au moyen d'un apport d'énergie électrique. La faisabilité est liée à l'encombrement du système et à l'obtention d'un titrage de vapeur élevé.

Cette présentation suit donc logiquement le parcours de création de ce nouveau concept de génération de vapeur :

- Preuve de faisabilité : il s'agit de prouver que le concept est réaliste en déterminant les premiers ordres de grandeur permettant le fonctionnement nominal du système,
- Supervision d'un prototype à échelle réduite et essais : il s'agit de concevoir le système à échelle réduite et montrer qu'il est représentatif du système à échelle réelle avec toutes les problématiques

de similitude que cela implique puis d'éprouver réellement les différentes fonctionnalités du système à travers son pilotage et son asservissement et ainsi justifier l'ensemble des éléments intégrés.

## 2 Preuve de faisabilité

Dans un premier temps, il est nécessaire de prouver la faisabilité du concept soumis à un certain nombre de contraintes (puissance nécessaire, crise d'ébullition, propriétés des matériaux en jeu,...). L'ensemble de cette étude a été réalisée exclusivement au moyen de la simulation numérique. L'objectif était ici de parvenir à une modélisation globale du système suffisamment fidèle dans un délai raisonnable (étude effectuée entre janvier et septembre 2011). De plus, les résultats de simulations numériques ont directement permis d'envisager l'architecture globale du système (différentes zones avec différentes fonctions) et même de quantifier par un premier ordre de grandeur l'encombrement et la qualité de vapeur pouvant être attendus par le concept.

Pour y parvenir, chacune des physiques entrant en jeu a dû être simulée ainsi que leurs interactions afin de montrer que l'ensemble du système est globalement cohérent et permet d'atteindre les exigences d'encombrement et de qualité de vapeur. Une des difficultés principales a été de connecter tous les phénomènes attendus dans le dispositif.

### 2.1 Exemple d'un couplage 2D/3D : prise en compte des échanges thermiques

Les modélisations électromagnétiques réalisées avec FLUX 2D/3D permettent de déterminer, à partir de la puissance d'alimentation de l'inducteur, l'énergie transmise au tube de façon à connaître le rendement du circuit d'induction. Afin d'augmenter ce rendement, les modélisations (cf. FIG. 1) ont permis de choisir les fréquences et intensités nominales du circuit, de montrer l'utilité d'un noyau ferromagnétique, de valider le système de refroidissement de l'inducteur,...

La modélisation de l'écoulement fluide avec son changement de phase a été une des problématiques majeures en raison de son importance vis-à-vis des objectifs attendus pour le système. En effet, les modèles proposés ne sont en général pertinents que pour un seul régime diphasique donné alors qu'au sein du générateur de vapeur, l'écoulement passe par l'ensemble des régimes diphasiques. En raison de l'importance de la crise d'ébullition qui risque d'endommager fortement le matériel, il a été choisi de consacrer les simulations numériques fluides à un modèle diphasique basé sur l'approche eulérienne (représentant chacune des phases séparément et avec leurs propres équations) et dédié à la prédiction du flux critique (cf. FIG. 1). Ce modèle local a la particularité de détailler l'ensemble des phénomènes intervenant à proximité des parois chauffées du tube (par induction). L'erreur maximale constatée entre les résultats de simulations et les résultats de la littérature est d'environ 10% ce qui nous permet d'évaluer si le fonctionnement nominal du générateur de vapeur se situe dans la fourchette d'erreur du flux critique estimé.

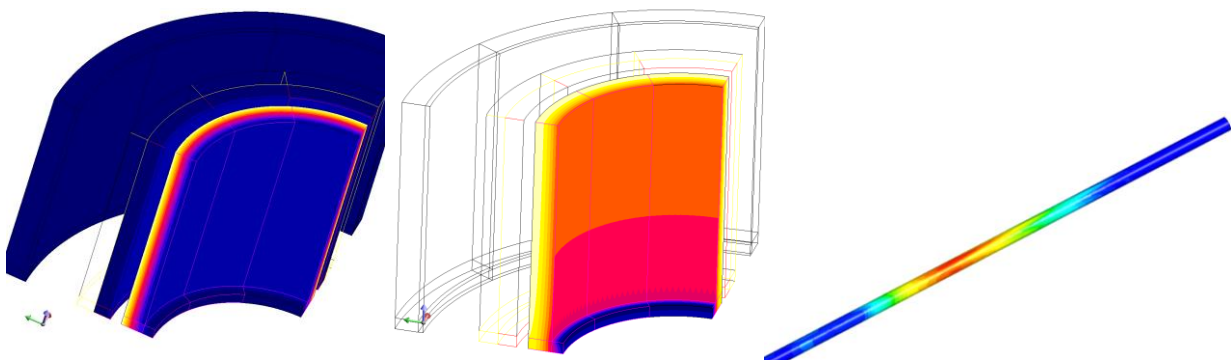


FIG. 1 – Résultats de densités de puissance (à gauche) et températures (au centre) obtenus avec une simulation électromagnétique et résultats de fraction volumique de vapeur obtenus avec une simulation CFD

Des couplages 2D/3D ont été mis en place permettant de gagner en précision locale des résultats (cf. FIG. 2). En particulier, les phénomènes thermiques ont une large part dans les couplages observés pour cette

problématique. Il est donc important que l'ensemble des modèles convergent vers une configuration thermique du tube similaire : c'est ce que permet le couplage 2D/3D.

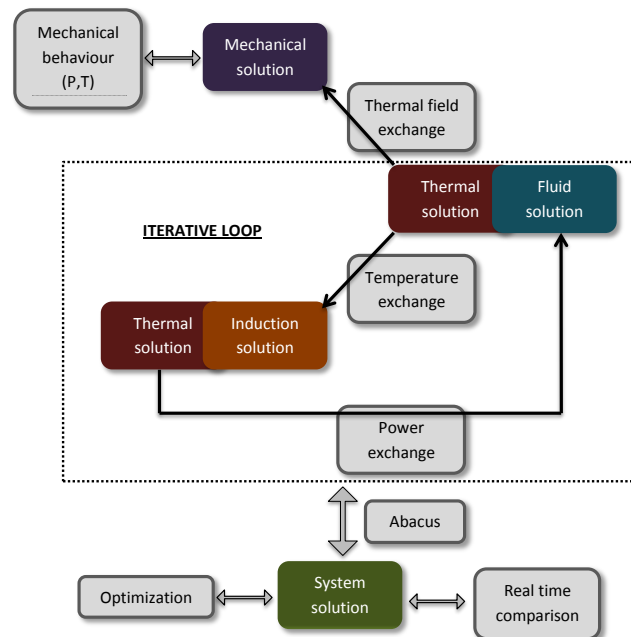


FIG. 2 – Couplage entre les physiques et variables d'échange

L'inducteur permet le chauffage du tube dans lequel circule l'eau à vaporiser. La modélisation électromagnétique permet de connaître la puissance délivrée dans le tube à partir des caractéristiques électriques du circuit à induction. Le coefficient de convection lié à la circulation du fluide dans le tube est alors constant et approximé. En parallèle, la modélisation CFD calcule le transfert d'énergie entre le tube et le fluide à partir de la puissance injectée dans l'épaisseur du tube.

Afin de mieux prédire la température du tube, les deux modèles stationnaires ont été utilisés dans une boucle itérative jusqu'à obtention du même champ de température dans le tube pour chacun des outils numériques. L'idée est de commencer par la résolution électromagnétique. La distribution de puissance est obtenue dans l'épaisseur du tube et est alors une donnée d'entrée pour la solution CFD. Ensuite, la solution fluide donne la répartition des températures dans le tube résultant des transferts vers le fluide. Cette boucle se poursuit jusqu'à obtention de la même solution pour chaque physique. Pour échanger les données, la difficulté principale réside dans la différence de maillage des deux logiciels : celui de CFD est plus fin que celui d'électromagnétisme. Une fonction utilisateur en langage C et un script en langage Python ont été développés afin de réaliser les interpolations nécessaires pour passer d'un maillage à l'autre.

## 2.2 Description de l'approche multiphysique 1D

Ensuite, la complexité des phénomènes a nécessité la construction d'une modélisation 1D par approche système. L'idée est ici d'observer le comportement global du système en considérant l'ensemble de ses éléments : hydrodynamiques avec changement de phase, électromagnétiques, thermiques, signal pour le contrôle du système (cf. FIG. 3). En effet, il serait très coûteux d'effectuer une telle analyse complète par une modélisation spatiale 3D.

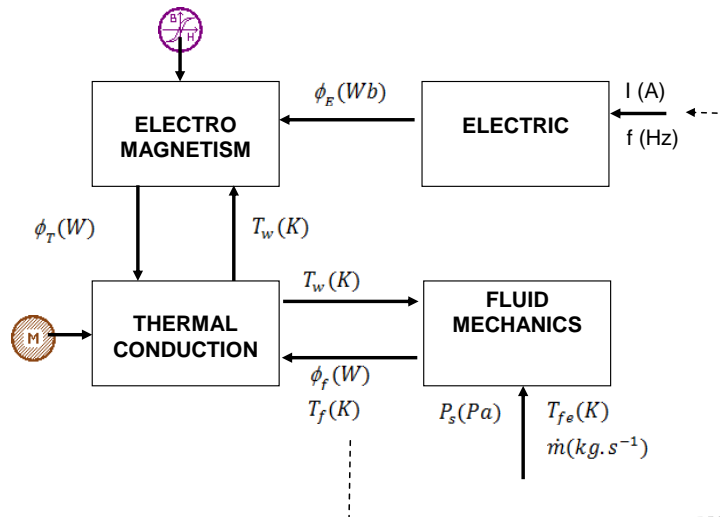


FIG. 3 – Schéma des couplages multiphysiques dans une approche 1D

Chaque composant élémentaire de l’approche 1D est issu des résultats des simulations 2D/3D obtenus avec une bonne qualité de résolution spatiale. Par exemple, afin d’éviter la crise d’ébullition, des intensificateurs d’échanges ont été insérés dans le tube (exemple en FIG. 4) ; le résultat du coefficient de convection du composant 1D a été adapté pour prendre en compte leurs effets sur le chauffage de l’eau et le changement de phase. Un autre exemple concerne la profondeur de peau du phénomène d’induction qui dépend de la perméabilité magnétique qui elle-même dépend de la température locale du tube. Pour ce phénomène, des abaques ont été construits à partir des résultats des simulations électromagnétiques 3D (cf. FIG. 5) et ont permis de calibrer les résultats de l’approche système.

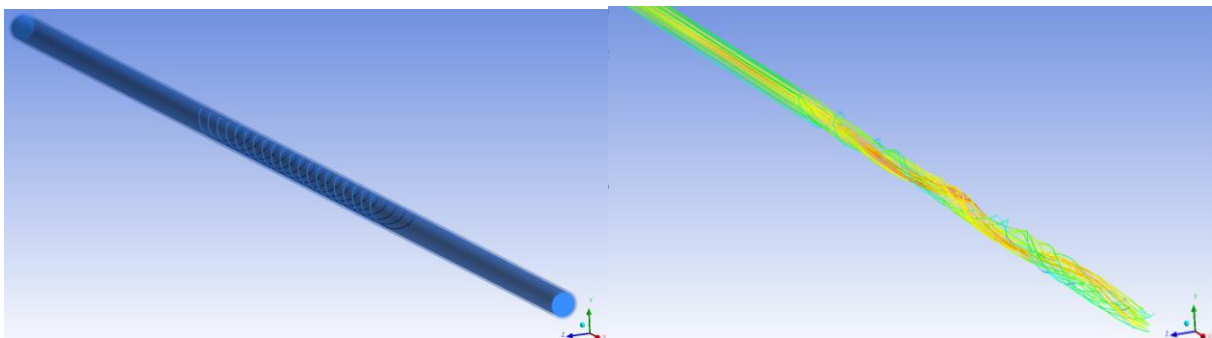


FIG. 4 – Géométrie (à gauche) et lignes de courant (à droite) pour un test d’intensification d’échanges en CFD

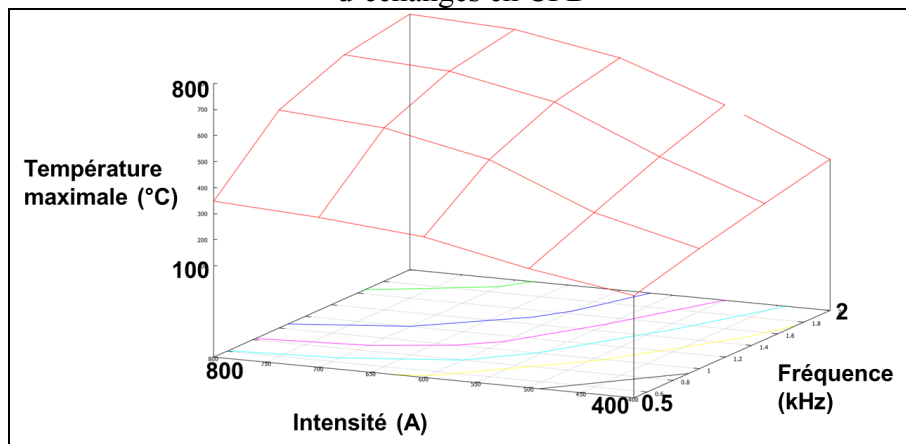


FIG. 5 – Exemple d’abaque pour faire le lien entre simulation électromagnétique 3D et approche système 1D

Finalement, le modèle complet a été utilisé pour définir les paramètres globaux de conception nécessaires pour atteindre les objectifs initiaux, observer la sensibilité du système, définir les situations transitoires comme le démarrage et l'arrêt du prototype.

L'objectif final est de construire un méta-modèle capable de calculer rapidement la réponse du système à n'importe quel jeu de paramètres de façon, dans un premier temps, à la comparer aux futurs résultats expérimentaux réalisés sur un prototype, puis dans un second temps, à assurer le pilotage de la machine.

### 3 Supervision d'un prototype à échelle réduite et essais

#### 3.1 Analyse de similitude

Pour réaliser les essais, un prototype à échelle réduite doit être construit. Le passage à une échelle dimensionnelle différente peut amener des modifications dans les phénomènes mis en jeu. Par exemple, un écoulement dans un modèle à échelle réduite est identique à l'écoulement à l'échelle 1 uniquement si les similitudes géométriques, cinématiques et dynamiques sont respectées.

Le système développé étant très complexe et mettant en jeu de nombreux phénomènes couplés, il nous a été impossible de réaliser un passage à échelle réduite qui respecte toutes les similitudes : énergétique, thermique, fluide, électromagnétique,...

Pour des raisons de contraintes d'alimentation électrique pour la réalisation future des essais, il a finalement été décidé de réaliser la mise à l'échelle en se calant sur 1/10 de la puissance nominale nécessaire pour le fonctionnement déterminé lors de la preuve de faisabilité. Pour rester cohérent du point de vue de la vaporisation, la même réduction d'échelle a été apportée au débit d'eau en entrée. Pour réaliser une similitude parfaite, il aurait également été nécessaire d'appliquer le même coefficient aux dimensions géométriques. Cependant, du point de vue de la conception du tube et de l'inducteur, cela n'aurait pas été réalisable et aurait même pu poser des problèmes de changement de topologie d'écoulement.

Même si la similitude parfaite n'est pas respectée, il est impératif de vérifier la représentativité du prototype par rapport au système à l'échelle 1 afin d'avoir la possibilité d'extrapoler les résultats d'essais obtenus avec le prototype sur la conception finale du générateur réel. Avec cet objectif, l'ensemble de l'étude numérique présentée au paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** a été réalisée de nouveau pour l'échelle réduite de façon à comparer quantitativement les effets sur les phénomènes physiques. Il a été montré en particulier que les phénomènes touchant au fluide étaient équivalents : régime de turbulence, convection et changement de phase, hauteur de flux critique pour l'apparition de la crise d'ébullition,...

Ce premier dimensionnement, réalisable uniquement grâce à la simulation numérique, nous a permis d'orienter rapidement la conception du prototype et ainsi de réaliser des essais réalistes dès la première campagne expérimentale.

#### 3.2 Supervision et contrôle commande

L'objectif actuel du projet est la réalisation des essais. Dans cette étape, il est également prévue une large part pour la simulation numérique, notamment par l'application d'une approche méthodologique « model based design ».

En effet, le pilotage du prototype en essai repose sur la mise en place d'un banc de test temps réel permettant la supervision complète des essais et intégrant directement une partie modèle « calculateur » sous forme de code compilé (lois de contrôle commande, traitement temps réel spécifique des voies de mesures) – cf. FIG. 6.

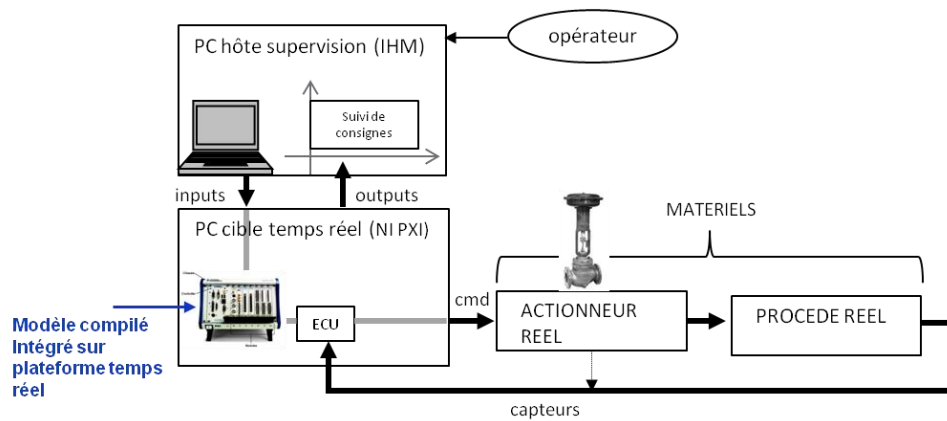


FIG. 6 – Architecture banc de test temps réel

Pour la mise en œuvre de ce dispositif, la construction d'un méta-modèle spécifique (issu du travail par approche système) est en cours de réalisation. Il s'agit d'un modèle représentatif de l'ensemble du prototype servant de support à la conception des lois de contrôle commande nécessaire au pilotage du système sous test et à la spécification de mise en œuvre des plans d'expériences (étape MIL : Model In the Loop).

La partie « calculateur » de ce modèle (asservissement, traitements spécifiques) est ensuite directement intégrée sur la plateforme temps réel pour la tenue des essais (étape prototypage rapide / HIL : Hardware In the Loop).

Les résultats d'essais vont permettre de recalibrer les modèles et d'améliorer les sensibilités à certains paramètres.

Pour notre application, la mise en place de la méthodologie « model based design » pour le pilotage du prototype permet ainsi la réduction des durées de développement entre phase de conception et phase d'essai, la possibilité d'itérer et d'intégrer des traitements spécifiques facilement, et ce en plus de la mise en place de fonctionnalités de supervision classiques (IHM, surveillance de voies de mesures, séquences de test automatiques, etc.).

## 4 Conclusions et perspectives

Ce projet montre une utilisation de la simulation numérique multiphysique tout au long du processus de développement d'une machine spécifique : depuis l'étape de preuve de faisabilité jusqu'à la validation par les essais sur un prototype à échelle réduite. En particulier, la flexibilité de la simulation par approche système permet de dimensionner un système multiphysique complexe en prenant en compte de nombreux paramètres et en étudiant leur sensibilité. Néanmoins, cette approche serait impossible sans l'apport de précision des résultats obtenus par la modélisation 3D des phénomènes spécifiques à une échelle locale (intensification d'échange, effet de profondeur de peau, ...). A partir des conclusions de cette première phase expérimentale sur un prototype à échelle réduite, l'objectif à long terme est d'optimiser le concept afin qu'il soit viable à l'échelle 1 et que l'on puisse envisager sa conception et sa validation en taille réelle.

## References

- [1] Borgnakke C., Sonntag R., Fundamentals of Thermodynamics, Wiley, VII Edition 2009
- [2] Collier J., Thome J., Convective Boiling and Condensation, Oxford, III Edition 1994
- [3] Holman J.P., Heat Transfer, McGraw-Hill, X Edition 2010
- [4] Sauvage E., Gagnoud A., Fautrelle Y., Flux-Fluent iterative coupling for a full 3D simulation of molten glass heated by direct induction, Flux Solutions & Mechatronic Products n° 57, January 2009