

## Prospectives S.MART Feuille de route 2018

### 1. Simulation Multi-physiques

#### 1.1. Positionnement thématique, objectifs, verrous scientifiques et technologiques

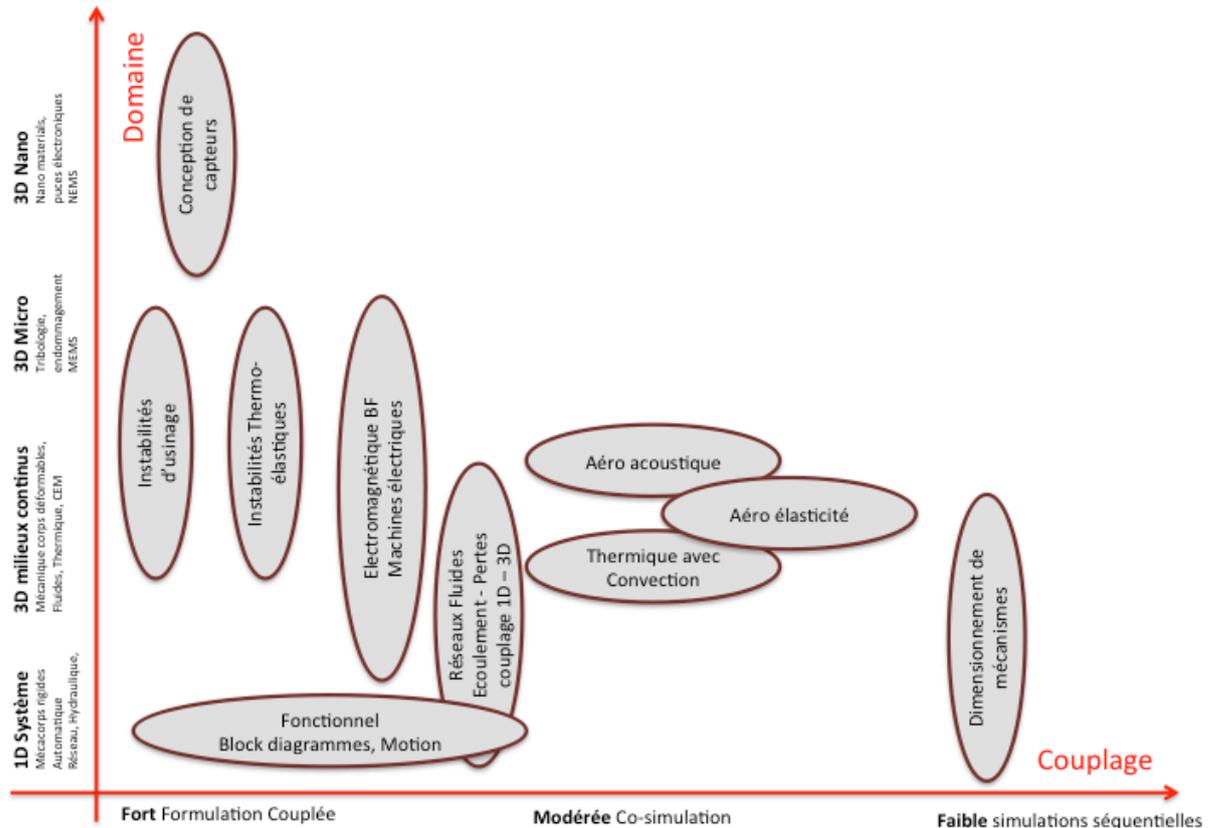
La conception d'un produit, d'un système, d'un moyen de production nécessite la réalisation des essais qualitatifs relatifs au respect des exigences de la norme et des exigences de performances émises par le cahier des charges. Ces essais qualitatifs peuvent relever de procédures expérimentales complexes. Citons, les essais de crash, de l'Euro NCAP [1] par exemple, qui valident les exigences de sécurité que doivent remplir les véhicules automobiles. Depuis les années 1990-2000, pour valider leur conception, les ingénieurs utilisent des outils de simulation de plus en plus réalistes et capables de reproduire virtuellement des essais d'une grande complexité, i.e. mécanique non-linéaire, comportement des matériaux très complexes avec couplages, dynamique rapide, prise en compte des procédés, optimisation, intégration du multi-échelle. Ce type d'utilisation de la simulation s'est aujourd'hui propagée à la réalisation d'essais virtuels dans des domaines tels que les essais climatiques, la simulation des impacts environnementaux, la mise au point de processus de production complexes tels que l'usinage à grande vitesse, la fabrication additive ou la manipulation de combustible nucléaire. Tous les secteurs d'activités sont ainsi concernés par la simulation, voir [2]. L'étude de produits ou de systèmes intégrant une électronique de commande, une partie opérative mécanique ou électromécanique fortement couplés, la réduction de masse de systèmes, l'augmentation de leur puissance conduit à des problèmes de dimensionnement couplant plusieurs physiques : Mécanique du Solide, Thermique, Mécanique des fluides, Electromagnétique. La demande croissante de confort conduit à des problèmes de dimensionnement couplant dynamique des structures, aérodynamique et acoustique. Le stockage énergétique, les processus de production des composants et de valorisation des déchets conduit à des problèmes de dimensionnement couplant la chimie, l'optique, la mécanique, etc. Les disciplines traditionnellement aux interfaces, tribologie par exemple, sont également fortement sollicitées pour la mise en place de modèles de couplages.

Historiquement, les problèmes multi-physiques étaient décomposés en sous-problèmes visant une validation de fonction élémentaire et se traduisant par des simulations « mono-physique ». Ces hypothèses de couplages faibles conduisent à considérer une organisation hiérarchique entre les physiques simulées. In fine, les résultats des simulations sont échangés entre chaque logiciel spécialiste d'une physique pour alimenter le cas de charge de l'autre physique. Ces simplifications relèvent d'hypothèses dont la pertinence n'est pas toujours avérée et vérifiée par les ingénieurs. Dans les problèmes linéaires, lorsque les longueurs caractéristiques et les constantes de temps d'évolution des résultats de simulation de deux physiques distinctes sont très différentes, les hypothèses sont généralement vérifiées. En revanche, de nombreux problèmes en science sont mieux simulés lorsqu'ils sont formulés simultanément, c'est à dire comme un ensemble de modèles interagissant mutuellement, voir [3]. Certaines physiques, par exemple la thermo-mécanique, la piezo-électricité ont été formulées mathématiquement et intégrées dans les codes de simulation depuis longtemps. Depuis le milieu des années 90, de nouveaux

environnements logiciels permettent l'écriture de formulations mathématiques traduisant les couplages « forts » entre différentes physiques et l'intégration numériques des équations par la méthodes des éléments finis ou par des méthodes concurrentes, voir par exemple COMSOL Multiphysics [4]. Plus récemment des solutions logicielles libres et développées en France ont vu le jour, voir par exemple FreeFEM++, [5] ou la plate forme SALOME [6]. Ces solutions logicielles sont plutôt dédiées à la simulation de systèmes ou de composants décrits avec un niveau de détail géométrique élevé pour lesquels les équations à résoudre sont des équations aux dérivées partielles (EDP). A cette échelle, la forme précise des composants est un paramètre de conception. Dans les phases de dimensionnement amont ou de conception architecturale, le paramétrage des modèles n'entre pas dans ce niveau de détail et la conception porte sur des dimensions plus macroscopiques ; les données d'entrée sont les flux d'énergie ou de puissance à travers le système. A cette échelle, faire cohabiter des modèles de différentes physiques est un exercice plus ancien. Les domaines de l'ingénierie tels que l'automatique ou la robotique ont développé des outils logiciels comme Simulink dès 1984, voir [7]. Plus récemment, des langages dédiés à la simulation multi-domaines et multi-physiques à l'échelle macroscopique ont émergés, citons les Graphes de Liaisons (Bond Graph) et surtout le langage Modelica, voir [8] et [9], depuis 1997.

Etant donné la richesse des résultats produits, la communauté scientifique cherche aujourd'hui à coupler la problématique de simulation multiphysique à celle de l'optimisation. Ces communautés sont donc étroitement liées. De même que la communauté calcul intensif, parallélisation et utilisation des GPU est étroitement impliquée dans les avancées techniques du domaine de la simulation multiphysique dans la mesure où les modèles générés sont souvent de grande taille, parfois numériquement difficile à résoudre parce non-linéaire et/ou transitoire.

Un aperçu forcément partiel et partial de la décomposition en domaine et niveau de couplage de différentes applications est présenté ci-dessous.



## 1.2. Etat des lieux national et international versus des expertises du réseau

Il est difficile de dresser un état des lieux très précis et quantifié des publications, communications, projets de recherche et formations centrées sur le thème « simulation multi-physique » tant le sujet est transversal du point de vue des différentes communautés scientifique. Il n'existe d'ailleurs pas une unique section du CNRS ou du Conseil National des Universités (CNU) fédérant les chercheurs et enseignants chercheurs du domaine. Dans ce document, seule la communauté scientifique constituant S.MART est ciblée. La communauté des mécaniciens ne possède pas à notre connaissance de Groupe Thématique Multiphysique au sein de l'Association Française de Mécanique (AFM). Certaines Sociétés savantes sont, par contre, organisatrices d'événements scientifiques intégralement dédiés aux communications sur la Simulation Multiphysique. Parmi les plus visibles, citons :

- *Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering* organisé par l'European Community on Computational Methods in Applied Sciences (ECCOMAS) tous les 2 ans depuis 10 ans.
- *European Conference on Multiphysics Simulation* organisé par l'International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community (NAFEMS) tous les ans.
- *Computational Structural Mechanics Association* organise tous les 2 ans le congrès national en Calcul des Structures où les aspects multi-physiques sont de plus en plus abordés (13ème congrès en mai 2017).

D'autres événements à spectre plus large organisent des sessions sur le thème multiphysique :

- IDMME, l'événement de l'S.mart, organise de telles sessions. Le thème « multi-domaine » est assez visible. Par contre l'occurrence du titre « multi-physique » dans les éditions anciennes du colloque est marginale. Par exemple, lors d'IDMME 2010, 1 session a été organisée contenant 3 communications, voir par exemple [10] ou [11].
- IDETC, l'événement de l'ASME, organise également de telles sessions dans sa conférence *Computers and Information in Engineering Conference* (CIE). Les communications relèvent plutôt de la formulation de problèmes couplés à l'échelle locale. En 2013, 4 communications ont été présentées, exemple [12].

Dans les deux cas, le nombre de communications spécifiques est faible mais le sujet constitue l'un des verrous scientifiques de nombreuses communications classées dans d'autres domaines thématiques. C'est la preuve que le sujet est en train de devenir transversal et ne fait plus l'objet de sessions spécifiques dans les congrès généralistes.

Les sujets des projets de recherche scientifique nationaux et européens couvrent un champ large autour de la problématique des simulations multi-physiques. Un échantillon non exhaustif des ces projets illustre le propos :

- En 2008, L'ANR lance un appel sur le programme Conception et Simulation. Parmi les projets financés, un projet Optimisation Multi-Disciplinaire (OMD2) porté par des établissements associés à l'S.mart IdF et l'INRIA ainsi que des partenaires industriels. Le projet vise la conception d'une plate forme pour les échanges de données de conception, le développement d'outils d'optimisation et l'amélioration de la chaîne numérique.
- Le projet COMMA, Couplages Multi-Physique et Multi-Echelles (ANR Blanc 2006), est un projet de recherche fondamentale en mathématiques appliquées qui propose des méthodes de décomposition de domaines en espace et en temps et des outils pour lier différentes méthodes, exemple : différences finies et méthodes particulières. Une boîte à outils de logiciels a été livrée à l'issue de ce projet.
- Le projet NanoRobust (ANR, Programme Nanotechnologies et Nanosystèmes 2011) traite de la caractérisation multiphysique de nano-objets et de la manipulation robotisée dans l'environnement d'un Microscope électronique à Balayage.
- Le projet MUJU : Jonctions multimatériaux Multiphysique (programme Matériaux et Procédés pour des Produits Performants 2011) traite des connexions mécaniques pour une meilleure continuité électrique et thermique.

Le Fonds Unique Interministériel finance également des projets parmi lesquels le projet O2M déposé par le pôle de compétitivité Moveo : Modeling and Design Tools for Mechatronics et son sous-projet AROME : Analyse de robustesse et optimisation multi-physique.

Récemment, l'Institut de Recherche Technologique SystemX [14] a déclenché deux projets intitulés « Réduction de modèles et Optimisation Multi-physiques (ROM) » et « Simulation et Ingénierie Multi-Disciplinaire (SIM) » ayant pour but d'améliorer tout le processus de conception dans un environnement multi-domaines, multi-physiques, multi-échelles depuis les modèles jusqu'à l'optimisation.

Certains acteurs récurrents de ces projets font partie du réseau S.mart : ENSMM, ENS CACHAN, ENSAM, Ecoles Centrales, Supméca, Universités Technologiques (Troyes, Compiègne, etc.). Les industriels régulièrement impliqués sont : Valéo, Renault, EADS, PSA,

SAGEM, Dassault Aviation, Dassault Systèmes, etc. Le retour de ces projets est assez peu visible pour la communauté scientifique puisque les publications ne font pas mention de l'appartenance au réseau S.mart et que les livrables de ces projets ne sont pas visibles « du monde extérieur au projet ».

Les établissements proposant des modules de formations sont nombreux, citons :

- ENS Cachan : Eléments finis : multi-physique et comportements non linéaires
- Supmeca, ENSIAME... : Simulation multi-physique
- Université de Rennes 1 : Modélisation multiphysique
- et bien d'autres ...

Les établissements proposant des formations complètes sont plus rares :

- ParisTech : Master MAGIS Modélisation algorithmique des problèmes multi-physiques.
- Polytechnique : Master Modélisation Multi-échelles et Multi-physique des Matériaux et des Structures (M4S).

Les hébergeurs de contenus de formation, ce qu'il est convenu d'appeler « MOOC », selon le terme à la mode, ne propose pas de formation complète sur le sujet précisément. Les périphériques sont évidemment abordés mais une ressource les centralisant pourrait être nécessaire.

### **1.3. Analyse SWOT sur la thématique concernée**

S.MART n'est pas un acteur de tout premier rang au niveau international. Au niveau national, les établissements faisant partie du réseau sont souvent impliqués dans des projets ou des formations mais la présence de l'S.mart n'est pas explicite. Ces établissements faisant apparaître des partenariats avec d'autres sociétés savantes ou les financeurs. Toutefois le réseau est constitué d'établissements qui présentent une forte communauté d'utilisateurs et de développeurs dans les domaines « simulation based design » et « multidisciplinary optimization ». Cette communauté devrait être mieux mise en valeur par l'S.mart, au travers par exemple de sessions spéciales dans les conférences organisées par le réseau.

Sur les projets de recherche, il pourrait être opportun de déposer un projet dont la rédaction serait centralisée par des membres du bureau du réseau S.mart pour le développement d'un outil de conception multi-physique : optimisation, interopérabilité, environnement de simulation pour les couplages forts.

L'état des lieux montre également que l'offre de formation est assez faible. C'est peut-être sur ce point que le réseau peut proposer des moyens de mutualisation. Un MOOC pourrait être développé par les membres du réseau et mis en ligne sur une plateforme mutualisée : UNIT par exemple.

### **1.4. Synthèse et conclusion**

En conclusion, il semble pertinent d'imaginer la création d'un groupe au sein de l'S.mart pour animer cette thématique présente dans les établissements du réseau mais non adossée explicitement au réseau. Ce groupe pourrait prendre en charge :

- l'animation de sessions lors des rassemblements organisés par le réseau,
- la rédaction de supports pédagogiques mutualisés

- la coordination de projets de recherche qui fasse collaborer différents établissements du réseau national en vue d’aboutir à des outils logiciels mieux intégrés sur les fonctions simulation, optimisation et partage des données.

### **1.5. Liste des contributeurs et remerciement aux acteurs mobilisés**

L’auteur remercie les collègues ayant acceptés d’être questionnés sur leurs pratiques en enseignement et en recherche. Milles excuses aux collègues qui participent à cette communauté et dont les travaux ne sont pas cités. Il m’était impossible d’analyser tous les travaux et de citer tout le monde dans le délai imparti pour effectuer cette prospective. Les travaux cités ici, ne le sont qu’à titre d’exemples et parce qu’ils illustrent l’activité autour de la thématique « conception multi-physique ».

### **1.6. Bibliographie et références**

- [1] « European New Car Assessment Programme », Euro NCAP, 2013.
- [2] A. Barbaux, « Multiphysics : how to model complex systems », *Usine Nouvelle*, n° 3325, 2013.
- [3] D. E. Keyes, L. C. McInnes, C. Woodward, W. Gropp, E. Myra, M. Pernice, J. Bell, J. Brown, A. Clo, J. Connors, E. Constantinescu, D. Estep, K. Evans, C. Farhat, A. Hakim, G. Hammond, G. Hansen, J. Hill, T. Isaac, X. Jiao, K. Jordan, D. Kaushik, E. Kaxiras, A. Koniges, K. Lee, A. Lott, Q. Lu, J. Magerlein, R. Maxwell, M. McCourt, M. Mehl, R. Pawlowski, A. P. Randles, D. Reynolds, B. Riviere, U. Rude, T. Scheibe, J. Shadid, B. Sheehan, M. Shephard, A. Siegel, B. Smith, X. Tang, C. Wilson, et B. Wohlmuth, « Multiphysics simulations: Challenges and opportunities », *Int. J. High Perform. Comput. Appl.*, vol. 27, n° 1, p. 4-83, févr. 2013.
- [4] « COMSOL Multiphysics® », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.comsol.com/>.
- [5] « Freefem++ », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.freefem.org/ff++/>.
- [6] « SALOME Platform », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.salome-platform.org/>.
- [7] « Simulink - Simulation et Model-Based Design - MathWorks France », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.mathworks.fr/products/simulink/>.
- [8] M. Tiller, *Introduction to physical modeling with Modelica*. Springer, 2001.
- [9] « Modelica and the Modelica Association — Modelica Association », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.modelica.org/>.
- [10] V. Dupé, R. Briand, X. Fischer, G. Terrasson, et others, « System level modelling of autonomous microsystem », *IDMME Virtual Concept 2010*, vol. 3, 2010.
- [11] L. Pierre, D. Teissandier, et J. P. Nadeau, « Qualification of turbine architectures in a multiphysical approach: application to a turboshaft engine », présenté à IDMME, Bordeaux, 2010.
- [12] J. Michopoulos, M. Young, et A. Iliopoulos, « Multiscale and Multifield Multiphysics of High Current Pulse Static Contact With Rough Surfaces », présenté à ASME IDETC, Portland (USA), 2013.
- [13] « Towards a breakthrough in Software for Advanced Computing Systems Towards a breakthrough in Software for Advanced Computing Systems », Workshop Horizon 2020, 2012.
- [14] <http://www.irt-systemx.fr/projets-rd/>