



**HAL**  
open science

## DM2S - Département de modélisation des systèmes et des structures

Rapport Hcéres

► **To cite this version:**

Rapport d'évaluation d'une entité de recherche. DM2S - Département de modélisation des systèmes et des structures. 2014, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - CEA. hceres-02033036

**HAL Id: hceres-02033036**

**<https://hal-hceres.archives-ouvertes.fr/hceres-02033036>**

Submitted on 20 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



agence d'évaluation de la recherche  
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

Évaluation de l'AERES sur l'unité :  
Département de Modélisation des Systèmes et  
Structures  
DM2S  
sous tutelle des  
établissements et organismes :  
Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies  
Alternatives



Janvier 2014



agence d'évaluation de la recherche  
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

*Pour l'AERES, en vertu du décret du 3  
novembre 2006<sup>1</sup>,*

- M. Didier HOUSSIN, président
- M. Pierre GLAUDES, directeur de la section  
des unités de recherche

*Au nom du comité d'experts,*

- M. Raphael ASSEDO, président du  
comité

---

<sup>1</sup> Le président de l'AERES « signe [...], les rapports d'évaluation, [...] contresignés pour chaque section par le directeur concerné » (Article 9, alinéa 3 du décret n°2006-1334 du 3 novembre 2006, modifié).



# Rapport d'évaluation

Ce rapport est le résultat de l'évaluation du comité d'experts dont la composition est précisée ci-dessous.

Les appréciations qu'il contient sont l'expression de la délibération indépendante et collégiale de ce comité.

Nom de l'unité : Département de Modélisation des Systèmes et Structures

Acronyme de l'unité : DM2S

Label demandé :

N° actuel :

Nom du directeur  
(2013-2014) : M. Christian CAVATA

Nom du porteur de projet  
(2015-2019) : M. Christian CAVATA

## Membres du comité d'experts

Président : M. Raphael ASSEDO, retraité

Experts : M. Walter AMBROSINI, Université de Pise, Italie

M. François AXISA, retraité

M. Philippe BISCH, EGIS

M. Giovanni BRUNA, IRSN

M. Serguey GAVRILYUK, IUSTI, Marseille

M. Bernard GUESDON, AREVA

M. Jean-Louis FRANCOIS LACOUTURE, UNAM, Mexique

M. Olivier SIMONIN, INP Toulouse

Délégué scientifique représentant de l'AERES :

M. Christophe GOURDON



## Représentant(s) des établissements et organismes tutelles de l'unité :

M. Bernard BONIN, DEN-CEA

M. Sylvestre PIVET, DANS-CEA

M<sup>me</sup> Diane DE PRUNELE, DEN-CEA



## 1 • Introduction

### Historique et localisation géographique de l'unité

Le Département de Modélisation des Systèmes et des Structures (DM2S) est une unité de recherche appliquée de la Direction de L'Énergie Nucléaire du CEA (DEN) rattachée à la Direction déléguée aux Activités Nucléaires de Saclay (DANS). Créé en 2000 au moment de la création de la DEN, il a été construit à partir de plusieurs unités préexistantes (services ou départements) de la DRN (Direction des Réacteurs Nucléaires) et de la DCC (Direction du Cycle du Combustible). En 2011, fait marquant, le DM2S est devenu le lieu de regroupement de la modélisation en thermohydraulique de la DEN par intégration de l'équipe du Centre de Grenoble. Désormais, le DM2S rassemble et développe des compétences en modélisation dans trois disciplines : la thermomécanique des structures et des solides, la mécanique des fluides et la thermohydraulique, la neutronique et le transport des rayonnements, ainsi que dans les domaines d'interaction entre celles-ci, notamment en physique des coeurs de réacteurs nucléaires. Ces savoir-faire sont complétés par des compétences transverses en mathématiques appliquées, analyse numérique, informatique et génie logiciel.

Les missions assignées au DM2S visent principalement au développement, à la capitalisation et au transfert des connaissances dans ces disciplines de base et en physique des réacteurs nucléaires, ceci sous forme d'outils mis à disposition des ingénieurs-chercheurs, concepteurs, exploitants et évaluateurs de systèmes nucléaires, toutes filières confondues.

Le DM2S est hébergé sur le site de Saclay.

### Équipe de direction

Le chef de département est M. Christian CAVATA. Le département est structuré en trois services qui correspondent aux trois disciplines (ou thématiques) couvertes par le département :

- le SEMT : Service d'Études Mécaniques et Thermiques, dont le responsable est M. Xavier AVERTY ;
- le SERMA : Service d'Études des Réacteurs et de Mathématiques Appliquées, dont le responsable est M. Patrick BLANC-TRANCHANT ;
- le STMF : Service de Thermohydraulique et de Mécanique des Fluides, dont le responsable est M. Bernard FAYDIDE.

### Nomenclature AERES

ST5 (Sciences Pour l'Ingénieur, SPI).



Effectifs de l'unité

Effectifs de l'unité	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
<b>N1</b> : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés		
<b>N2</b> : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés	280	280
<b>N3</b> : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)	38	38
<b>N4</b> : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
<b>N5</b> : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.)		
<b>N6</b> : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)		
<b>TOTAL N1 à N6</b>	<b>318</b>	<b>318</b>

Effectifs de l'unité	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
Doctorants	39	
Thèses soutenues	51	
Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité *	1	
Nombre d'HDR soutenues	5	
Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	14	



## 2 • Appréciation sur l'unité

### Avis global sur l'unité

Le DM2S met en œuvre une recherche scientifique et technologique de haut niveau dans les domaines principaux relevant de sa responsabilité. Globalement, les différentes thématiques concernées sont à l'état de l'art international, avec des niches d'excellence reconnues.

Cette compétence est reconnue sur le plan hexagonal où le département contribue de manière substantielle aux missions générales du CEA dans le domaine du nucléaire civil, au sein de la DEN : recherches pour ses besoins propres, en support aux besoins des partenaires industriels (EDF, AREVA, ...), de sûreté (IRSN, ...), et également au titre de son expertise auprès des pouvoirs publics, sans oublier les collaborations avec le monde de la recherche académique et scientifique.

A l'international, la notoriété du DM2S est reconnue mais gagnerait à être encore renforcée dans quelques secteurs d'intérêt en faisant mieux valoir les atouts dont le département dispose pour favoriser quelques coopérations bien ciblées avec des partenaires en pointe, tout en veillant à des échanges et retours équilibrés (par exemple dans le domaine sismique).

La physique des réacteurs (neutronique, thermohydraulique du cœur, thermique, thermohydraulique système...) est l'un des cœurs de métier historique du CEA/DEN, au service de ses besoins propres de conception, d'exploitation de ses réacteurs expérimentaux et d'irradiation, et d'expertise vis-à-vis de ses tutelles ainsi que pour la satisfaction des besoins de ses partenaires de R&D en France, concepteurs, organismes de recherche en sûreté, exploitants ... Le DM2S y joue un rôle fondamental en matière de modélisation physique et simulation numérique, la partie expérimentation et qualification des données de base neutroniques étant de la responsabilité d'un autre département du Centre de Cadarache. L'interaction complémentaire entre ces deux entités est la garantie d'une cohérence d'ensemble.

Le CEA, seul développeur en France de ces outils de base (à quelques exceptions près) depuis le début du nucléaire civil, doit en rester le garant en assurant leur pérennité. La « culture APOLLO-TRIPOLI », intégrant les aspects neutroniques à la fois déterministes et probabilistes, est largement répandue au sein des acteurs du nucléaire en France. Il en est de même pour la « culture CATHARE » en matière de thermohydraulique accidentelle et de sûreté. Un grand nombre d'ingénieurs et d'experts a été formé à l'école CATHARE en conception et en sûreté. Il y a lieu de noter aussi que des versions « temps réel » du code CATHARE ont été implantées sur des simulateurs d'étude et de fonctionnement de réacteurs ou d'enseignement, par exemple les simulateurs dédiés à l'entraînement des ingénieurs de conduite des réacteurs du parc EDF. Depuis le transfert de l'activité thermohydraulique à Saclay, le DM2S couvre l'ensemble des développements de modélisation physique et simulation numérique en physique des réacteurs. Au-delà des questions de gestion du transfert de savoir-faire à assurer entre Grenoble et Saclay, la localisation au sein d'une même entité de l'ensemble des briques du domaine, procède d'une cohérence certaine et constitue une opportunité d'optimisation et de progrès pour l'élaboration de plates-formes multiphysiques et multiéchelles (couplages physiques, incertitudes ...).

Le DM2S a ainsi la lourde tâche, dans un contexte budgétaire plus contraint qu'auparavant, de maintenir les acquis précédemment décrits, tout en restant dans une dynamique raisonnable de progrès et en exploitant les synergies internes et externes dans le domaine de la physique des réacteurs, où il doit demeurer un acteur incontournable.



Le domaine de la mécanique est par essence très vaste. Le DM2S développe, entretient et fait évoluer le système de calcul aux éléments finis CAST3M, outil polyvalent, qui traite des principales disciplines de la mécanique et de la thermique, et des outils basés sur le code TRIO\_U dédiés à la CFD. A la différence des outils de procédé, dont il a été question en physique des réacteurs, de très nombreux outils généraux de mécanique des structures et de mécanique des fluides existent sur le marché et sont adaptés par (ou pour) les utilisateurs en fonction de leurs propres besoins. Par exemple, EDF a développé le code ASTER et AREVA le code SYSTUS (qu'il a externalisé il y a quelques années), utilisés pour leurs besoins industriels respectifs. Le périmètre de coopération entre le CEA et les deux partenaires précités concerne alors les méthodologies et les applications, chacun ensuite enrichissant son propre outil. Le logiciel CAST3M, dans lequel le DM2S a intégré toute l'expérience et la connaissance en mécanique de la R&D accumulée depuis le début des années 70, profite depuis les années 1990-2000 du retour d'expérience (REX) du fonctionnement des réacteurs, en s'ouvrant vers des aspects plus industriels. Le DM2S cible de plus en plus l'effort sur les problématiques pointues rencontrées en conception ou en fonctionnement, telles que : interaction fluide-structure et vibrations de faisceaux tubulaires de générateurs de vapeur, comportement dynamique et transitoire des structures et composants, intégrité et phénomènes de dégradation, soudage, codification et séismes ...

Le DM2S dispose dans ce domaine de la mécanique, de connaissances larges, de compétences de bon niveau avec des experts reconnus. Le domaine est vaste, les phénomènes rencontrés sur les réacteurs nucléaires sont complexes et il reste, bien entendu, à progresser et explorer certaines problématiques.

On peut citer deux exemples :

- le comportement vibratoire des faisceaux de tubes. Les expérimentations sur maquettes, les mesures en réacteur et les calculs constituent un acquis énorme, bâti depuis plus de 30 ans. Les phénomènes certes sont complexes, non linéaires, mais il faudrait aller au bout de l'objectif en élaborant un outil prédictif du comportement en vibration, puis usure, de ce type de composant. Cela passe inévitablement, entre autres, par une meilleure appréciation des sources d'excitation du fluide. Disposer d'un tel outil serait un atout incomparable en absolu pour traiter les problématiques industrielles non encore pleinement maîtrisées ;
- le domaine du comportement des structures et composants en séisme, pour lequel le DM2S possède des atouts solides grâce d'une part à ses capacités de modélisation et à son arsenal unique de moyens expérimentaux d'autre part.

Il existe d'un autre côté des opportunités certaines à la fois dans l'hexagone et à l'international. En effet, il est inutile d'insister sur la place importante qu'a pris le domaine du séisme depuis quelques années au plan mondial. Le DM2S se doit d'y jouer un rôle primordial.

### Points forts et possibilités liées au contexte

- recherche scientifique et technologique de haut niveau ;
- reconnaissances nationale et internationale, industrielle et académique ;
- bien ancré dans son cœur de métier, à savoir la physique des réacteurs ;
- grande cohérence des travaux neutroniques de par l'interaction complémentaire entre Cadarache (expérimentation) et Saclay (modélisation/simulation), offrant des synergies potentielles ;
- couverture de l'ensemble des développements de modélisation physique et de simulation numérique en physique des réacteurs au sein du Département, depuis le transfert à Saclay des activités de thermohydraulique et de mécanique des fluides ;
- compétences et développement d'outils uniques, en France, et à l'état de l'art international ;
- bénéfice du REX de fonctionnement des réacteurs pour la progression des outils de modélisation/simulation ;
- opportunités de progrès potentiel : d'une part en interne, en particulier dans le domaine du comportement vibratoire des faisceaux de tubes (par exemple vers un outil prédictif du comportement en vibration, puis usure, de ce type de composant), d'autre part en externe en particulier dans le domaine du séisme (vers un élargissement des collaborations externes via l'Institut du Séisme et l'Institut de R&D tripartite, Japon, ...).



### Points faibles et risques liés au contexte

- transfert de l'activité thermohydraulique du centre de Grenoble sur le site de Saclay avec risques de perte de compétences, d'où la priorité absolue d'une « reconstitution rapide » d'une partie de l'expertise. La compétence de haut niveau reconnue internationalement en mécanique des fluides mono - et diphasique et en thermohydraulique accidentelle (programme CATHARE, modélisation et validation expérimentale) doit demeurer ;
- impact des contraintes budgétaires ;
- reconnaissance externe et valorisation de résultats pour certains secteurs d'intérêt à développer (ex : domaine sismique).

### Recommandations

- Sur le plan organisationnel, le DM2S a à faire face au transfert de l'activité thermohydraulique, auparavant sur le centre de Grenoble, à présent sur le site de Saclay. La difficulté n'est pas de nature budgétaire puisque la DEN, au-delà du budget des programmes thermohydrauliques proprement dits, a attribué un budget supplémentaire pour traiter la question du transfert de connaissances et de compétences de Grenoble vers Saclay, l'enveloppe pluriannuelle allouée semblant bien dimensionnée (relative au surcoût). Cependant, les responsables au sein du DM2S devront s'impliquer fortement pour limiter les risques inhérents à un tel transfert et créer une dynamique visible afin d'attirer un maximum de chercheurs confirmés, mais aussi et surtout des jeunes de bon niveau avec l'objectif d'assurer le transfert d'expertise nécessaire, « au plus vite », d'autant que plusieurs départs en retraite d'experts clés sont prévus à court ou moyen termes. Cette « reconstitution rapide » d'une partie de l'expertise en thermohydraulique devrait être la priorité du DM2S dans les cinq années à venir. Pour l'heure, force est de constater que les interlocuteurs rencontrés ont clairement intégré les enjeux et sont pleinement impliqués dans la réussite de l'opération.

Enfin, la DEN et le DM2S ont rappelé aux partenaires de R&D du CEA sur le programme CATHARE-2 »(AREVA, EDF, IRSN), qu'en tant que porteur des développements en thermohydraulique (diphasique) accidentelle, le CEA mettrait tout en œuvre pour garantir la pérennité de la compétence et de l'expertise françaises en cette matière, à la fois nécessaires pour les études de conception et pour les analyses de sûreté du parc en exploitation. Cette compétence de haut niveau reconnue internationalement, doit le demeurer.

- La gestion et le renouvellement de l'expertise, déjà développée pour la thermohydraulique, concerne naturellement aussi les disciplines de neutronique et mécanique, et devront être traités avec soin. En particulier, on veillera à accroître le nombre d'experts de stature internationale dans ces thématiques.
- Sur le plan de la recherche, d'une manière générale, il est recommandé d'opérer une plus grande sélectivité dans le choix des programmes avec des réexamens périodiques des priorités, tant pour la R&D propre que pour celle en partenariat. En amont, la nécessité de disposer de plans de développement pluriannuels sur les programmes, domaines ou thématiques importants, tant sur les aspects propres que coopératifs, s'impose encore plus.
- Au niveau des programmes propres :

L'impact des contraintes budgétaires ne doit pas affecter trop lourdement les programmes de recherche propre à caractère scientifique, amont, de base ou innovant ... Il faut s'efforcer, dans la mesure du possible, de les maintenir à un niveau « convenable » car ils sont porteurs de progrès et formateurs de « jeunes futurs experts ».

C'est en particulier grâce à de tels programmes que les progrès en matière de modélisation et de simulation peuvent être effectués, le recours à la simulation fine devenant incontournable. En outre et parallèlement aux développements plus opérationnels, aller vers des modélisations physiques et simulations numériques avancées compense partiellement le défaut de grands programmes expérimentaux et aide à la préparation du futur.

- Au niveau des collaborations :
- En France, profiter de la création de l'Institut de R&D pour :

Elaborer avec les partenaires de R&D un outil de planification et de programmation efficace de la R&D d'anticipation, en soutien au REX du parc de réacteurs sous la forme d'un document explicitant clairement les problématiques à traiter et les priorités associées.



Pour le plus long terme, établir les grandes lignes nécessaires à l'évolution de la modélisation physique et des méthodologies de calcul avancées. Reboucler avec les programmes propres et effectuer des propositions aux partenaires pour les amener à se positionner sur l'orientation des thèmes à privilégier. Ceci concerne en particulier la « neutronique APOLLO 3 » au sens large (à la fois déterministe et probabiliste), pour laquelle les ambitions de ces dernières années ont été fortement réduites ou différées, faute de budget suffisant et de soutien minimum des partenaires, suite à leurs arbitrages internes. Revisiter ces perspectives en y consacrant un minimum de financement serait profitable, en contribuant à la fois au maintien de l'excellence du métier (et non à sa décroissance) et à la formation des futures compétences.

Que ce soit, sur les problématiques d'anticipation des questions réacteurs (aspect R&D de base) ou sur les évolutions en modélisation et méthodes des logiciels (incrémental ou en rupture), une action au niveau de la DEN est recommandée pour convaincre les partenaires de l'Institut de R&D à y contribuer financièrement de façon raisonnable, afin de préserver un minimum dévolu à l'innovation et sortir du schéma récurrent de soutien quasi exclusif des programmes de court terme.

– A l'international :

Lancer des actions ponctuelles avec des organismes internationaux en pointe sur des sujets d'intérêt dans le domaine de la qualification expérimentale sur maquettes et boucles d'essai, afin de partager les coûts ou de pallier le manque de certaines installations en France (ex. : thermohydraulique diphasique ...).

Collaborer avec le Japon en matière de données sismiques, les Japonais possédant une base de données très importante.

### 3 • Appréciations détaillées

#### Remarque liminaire

Les six critères à renseigner ont souvent des intersections, ce qui naturellement conduit à un certain nombre de redites lorsqu'elles sont nécessaires à l'illustration du propos. Par ailleurs, ces critères ont été volontairement développés, et de façon substantielle, dans le paragraphe 4 dédié aux thématiques examinées au sein de chacun des services concernés. En conséquence, le comité s'est efforcé ici de faire ressortir certaines spécificités importantes, les aspects de transversalité, les atouts et attraits avec les voies de progrès potentielles, afin de dégager dans la mesure du possible l'image la plus cohérente qui soit du DM2S dans son ensemble.

#### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

Globalement, les travaux conduits au DM2S dans le domaine de la physique des réacteurs et de la mécanique, tant pour la modélisation physique et la simulation numérique que pour l'aspect expérimental, sont tout à fait à l'état de l'art, aux niveaux national et international.

Peuvent être cités principalement les progrès et innovations, parfois de rupture, accomplis en neutronique ces dix dernières années, les avancées fondamentales en thermohydraulique diphasique et en mécanique des fluides, l'enrichissement dans le domaine de l'intégrité mécanique des structures au sens large par la prise en compte du retour d'expérience et de l'évolution de la codification, l'élaboration de méthodes numériques performantes, le traitement des couplages inter-disciplines entre les codes de calcul concernés.

La mise en œuvre de ces codes et méthodes validés est très large : besoins propres du CEA, préparation du futur et études de nouveaux concepts de réacteur, soutien aux partenaires industriels, participation à diverses instances, par exemple le forum international Génération IV, ...

Ces outils utilisés dans les démonstrations de sûreté des installations nucléaires sont reconnus par l'Autorité de Sûreté et permettent au CEA d'être un acteur incontournable du domaine.

La production scientifique du DM2S, importante et diversifiée, se concrétise enfin par un nombre conséquent de rapports techniques (de 1 à 2/an/ETP selon les services), souvent soumis à confidentialité, ainsi que par les articles publiés dans des revues internationalement renommées (414 dans la période évaluée), et par des communications dans des conférences (496 dans la période évaluée).

Le niveau de plimétrie du département, rapporté au nombre de chercheurs qui produisent, est globalement satisfaisant (de l'ordre de 0,6 contribution/an/ETP, en tenant compte des revues et des conférences, hors rapports techniques), et ce en dépit des aspects de confidentialité relatifs aux travaux opérationnels, en propre au CEA, pour la Défense ou pour les partenaires industriels qui sont naturellement limitants. Ce taux de production scientifique pourrait être néanmoins amélioré par l'accroissement des publications dans les revues à comité de lecture.

#### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Le DM2S capitalise des connaissances importantes dans les disciplines de base du nucléaire et dispose de nombreux chercheurs et experts de différents niveaux et de diverses spécialités, permettant au département d'être un acteur important de la diffusion de la connaissance en physique des réacteurs et en mécanique. Il s'implique de façon notable dans l'enseignement supérieur, la publication d'ouvrages à caractère pédagogique et dans la formation par la recherche avec l'accueil de nombreux stagiaires et doctorants d'horizons variés, ainsi que dans des partenariats avec les laboratoires académiques.

En France, le DM2S a un rôle majeur dans le développement, la maintenance et la diffusion de grands codes de calcul utilisés en conception ou sûreté dans le domaine nucléaire. Les installations et maquettes expérimentales dédiées à la thermohydraulique diphasique et à la mécanique des fluides sont connues aux niveaux national et international et utilisées pour la validation des codes de calcul associés. Pour la mécanique, de nombreuses installations, maquettes et bancs d'essai sont de la même façon au service de la validation des outils de calcul de la discipline.



Le DM2S participe aux congrès, conférences ou séminaires considérés comme majeurs dans les thématiques concernées et en est également, pour certains, l'organisateur. Le département est présent dans certains grands projets européens, voire internationaux. De façon générale, la reconnaissance scientifique et académique aux niveaux national et international du département est incontestable, mais apparaît comme un peu inégale selon les disciplines.

En effet, la thermohydraulique et la mécanique des fluides sont traditionnellement d'une ouverture plus large que les autres, dans la mesure où certains outils et applications (amont, mathématiques appliquées, Ecole CATHARE, etc.) sont plus aisément diffusables, alors que les activités dans les domaines de la neutronique et de la mécanique, effectuées le plus souvent dans le cadre de partenariats industriels, concernent respectivement les aspects conception - performances ou intégrité - durée de vie des composants, et, à ce titre, sont de fait caractérisées par des diffusions plus restreintes.

Cependant, la notoriété en expertise neutronique du DM2S, déjà bonne et reconnue au sein du monde académique et scientifique n'est pas à la hauteur de ce qu'elle devrait être, compte tenu de l'excellence des travaux effectués. Pour progresser, il serait bon de consolider la participation à des jurys de thèse en France et de l'amplifier à l'étranger, d'accroître la diffusion au niveau international de certains outils neutroniques, comme TRIPOLI ou APOLLO, de renforcer dans les manifestations internationales renommées la présence d'experts, futurs pivots scientifiques et leaders dans leur spécialité, afin, bien entendu, de les former pour remplacer à terme les chercheurs de stature internationale, proches de la retraite.

Pour la mécanique, la notoriété de l'expertise du département dans le monde académique et scientifique au niveau national et à l'international devrait être développée et amplifiée par une participation accrue et active des chercheurs aux manifestations majeures. Etablir par exemple une coopération dans le domaine du séisme avec des partenaires japonais constituerait une voie de progrès possible en ce sens et favoriserait la visibilité des experts. En particulier, le nombre de chercheurs mécaniciens de stature internationale mériterait d'être augmenté au sein du département.

### Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

De par son expérience, son savoir-faire et son expertise de haut niveau, le DM2S est bien intégré dans son environnement socio-économique et culturel. Il s'implique de façon notable dans des projets nationaux (avec le CNRS, AREVA, EDF, SNCF, RATP, ...), européens, internationaux, OCDE, ... Le département a un rôle essentiel de développeur d'outils et méthodes, de fournisseur de prestations diverses, en soutien à ses partenaires industriels. On peut citer en particulier les plateformes logicielles multiphysiques et multi-échelles, intégrant de nombreux codes de base comme APOLLO 2, TRIPOLI 4, FLICA 4, CATHARE 2 pour la physique des réacteurs, les outils CRISTAL, TRIPOLI 4, CAST3M et EUROPLEXUS pour la sûreté ou l'intégrité mécanique.

L'ensemble des moyens expérimentaux du département, comme TAMARIS, RESEDA et les nombreuses maquettes thermohydrauliques sont appréciés bien au-delà du secteur nucléaire.

Comme déjà évoqué par ailleurs, l'ouverture à des clients internationaux existe, mais se trouve limitée par les contraintes de propriété intellectuelle existant dans les partenariats industriels qui représentent un poids conséquent dans l'activité du DM2S.

Le rôle du département en matière de codification est important. Le DM2S pilote le code de conception des réacteurs rapides, celui des réacteurs de recherche et de fusion et participe au développement du code relatif aux règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des réacteurs à eau pressurisée.

L'enseignement en masters, en écoles d'ingénieur, l'accueil de stagiaires, l'organisation de séminaires spécialisés ont contribué de façon notable et contribuent toujours à la diffusion de la culture neutronique, thermohydraulique et mécanique chez bon nombre d'ingénieurs et de chercheurs du milieu nucléaire en France, voire à l'étranger.

La future Université Paris-Saclay constitue une opportunité certaine pour la consolidation et la valorisation de l'expertise du DM2S, mais il y aura lieu de veiller à maintenir le degré d'implication du département dans les réseaux transverses auxquels il participe actuellement pour renforcer encore son positionnement dans les coopérations avec les partenaires scientifiques et industriels.



Finalement, le maintien d'une activité expérimentale suffisante, la poursuite des progrès en modélisation physique et simulation numérique avancées, le travail sur la recherche amont, la compréhension des phénomènes rencontrés dans le retour d'expérience industriel et la caractérisation des mécanismes qui les régissent sont essentiels pour la pérennisation des compétences du département et son maintien au meilleur niveau, sans oublier bien sûr la nécessaire transmission des connaissances et la gestion et le renouvellement de l'expertise.

### Appréciation sur l'organisation et la vie de l'unité

Les moyens mis à disposition des personnels sont appropriés et la diversité des activités constitue un véritable atout pour le département.

Le climat semble satisfaisant, même si le DM2S a à gérer les questions prioritaires liées à la réorganisation de l'activité thermohydraulique, déjà précisément évoquées par ailleurs dans le rapport.

La mise en place de moyens de diffusion verticale et transverse de l'information au sein du département doit se poursuivre et être encore améliorée. Il est à noter que ce travail en équipes pluridisciplinaires paraît, à présent, bien organisé pour le couplage de codes en physique des réacteurs. Ceci pourrait servir d'exemple à d'autres transversalités qu'il serait utile de renforcer au sein du DM2S, par exemple le partage de compétences en outils numériques.

De même, les interfaces, la complémentarité et les synergies avec le centre de compétence en neutronique du Centre de Cadarache gagneraient à être optimisées.

La pyramide des âges est relativement déséquilibrée, la plupart des ingénieurs-chercheurs et techniciens ont dépassé 40 ans. Le recrutement et la formation de jeunes chercheurs, leur mise en valeur en interne, et dans le monde scientifique et partenarial, constituent clairement une des préoccupations principales du département. Il s'agit en effet d'un sujet difficile, mais très important pour la pérennité des équipes et des compétences, qui nécessitera d'être soigneusement traité.

### Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

Depuis des décennies, le département accueille régulièrement des stagiaires et des doctorants, français et étrangers. Les thèses sont de bonne qualité et leur quantité est tout à fait honorable.

Aux dires des étudiants rencontrés, les conditions d'accueil sont bonnes et le niveau global de satisfaction bon également.

L'avenir est à l'élaboration d'outils multiphysiques avancés permettant de réaliser des couplages de plus en plus performants et l'apport de la recherche amont par le biais des doctorants est évidemment précieux. Lors des échanges avec le comité, des interactions de nature académique ont paru déjà bien établies entre certains des doctorants. Cette dimension transverse mériterait d'être consolidée et étendue à l'ensemble du département pour les doctorants des disciplines concernées.

Il est souhaitable que les doctorants soient incités à publier davantage, notamment dans les revues à comité de lecture, et ce préalablement au soutien de leur thèse.

Une augmentation raisonnable du nombre d'habilités à diriger la recherche serait certainement profitable.

De même, le recrutement de quelques post-doctorants, y compris étrangers, serait à consolider utilement.

En résumé, l'implication du DM2S dans la formation par la recherche est très convenable et l'attractivité du département pour les étudiants en masters et en doctorat est bien réelle.

### Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Pour le projet à moyen terme, les spécificités des thèmes ou disciplines font que l'appréciation par thématique est la plus appropriée pour traiter le sujet, tout en considérant bien entendu les modes communs entre les différentes disciplines.



En ce qui concerne la mécanique, les orientations retenues pour les aspects de modélisation sont généralement bien définies et correspondent principalement aux besoins récurrents de justification en fonctionnement d'équipements ou composants en réacteur, avec validation des modèles correspondants en fatigue, en mécanique de la rupture et en interaction fluide-structure sous l'aspect local. La réflexion sur les capacités des grandes maquettes, en étroite corrélation avec les besoins de modélisation, a été engagée de façon satisfaisante au sein du DM2S, comme en témoignent la mise en place de la plateforme RESEDA relative à l'intégrité mécanique ou l'élaboration du projet d'extension de l'installation TAMARIS. Cependant, la programmation moyen - long termes proprement dite a été jusqu'alors rendue difficile de par l'hésitation des partenaires industriels à participer financièrement aux investissements, lourds par nature. Pour TAMARIS, l'institut du séisme récemment créé constitue une réelle opportunité pour avancer en la matière. Dans une période d'optimisation des moyens, un effort accru pour une meilleure gestion des ressources et une priorisation rigoureuse des actions de recherche est souhaitable afin de privilégier encore plus les problématiques utiles ou d'importance telles que rencontrées dans le retour d'expérience de fonctionnement des réacteurs (par exemple : la modélisation physique des mécanismes de vibrations - usure), ou d'enrichir des bases de données sismiques par le biais d'un partenariat scientifique et technologique avec les organisations japonaises.

En ce qui concerne la neutronique, la perspective d'élaboration d'une plateforme multifilières, de nouvelle génération, de calcul en physique des réacteurs et en lien avec les plateformes multiphysiques 'métier' constitue indéniablement une démarche ambitieuse avec des voies de progrès et d'innovation bien explicitées. La mise en œuvre s'avère cependant plus difficile que prévu, car une partie notable du programme, à caractère amont ou scientifique, nécessaire à la préparation du long terme, se trouve sans cesse différée au sein du partenariat avec les industriels. Une importance, sans doute excessive, est donnée à la satisfaction des besoins prioritaires de court et moyen termes, fort importants certes, mais, et c'est là le problème, très rarement anticipés lors de l'expression des besoins des partenaires et de la programmation pluriannuelle associée. Cette influence constante des partenaires sur le choix quasi-unidirectionnel des orientations pénalise donc assez fortement l'activité générale en recherche de base, vitale pour la préparation du futur. Le DM2S, pris entre deux feux, celui du soutien au nucléaire industriel, priorité première et naturelle de ses partenaires et aussi bien sûr de la DEN, et celui d'une vision ambitieuse de développement d'outils de calcul avancés, est pleinement conscient de cette situation et des difficultés résultantes. Mais sa marge de manœuvre est relativement réduite du fait de la contrainte budgétaire interne et de la baisse globale de financement en provenance de ses partenaires traditionnels. Comme déjà évoqué, l'approche devrait consister à trouver un consensus avec les partenaires industriels, d'une part en hiérarchisant rigoureusement les priorités relatives aux actions liées à la résolution des problèmes de retour d'exploitation des réacteurs, et d'autre part en amenant les partenaires à s'engager pour le soutien pluriannuel d'un volant raisonnable d'actions de fond. En parallèle et à des fins de consolidation, il serait bon d'arriver à dégager, après priorisation là aussi, un montant également raisonnable de ressources dédié à l'innovation. Sous l'angle des moyens expérimentaux, et à côté de la réflexion en cours au niveau de la DEN sur le devenir des installations de criticité, l'évaluation intrinsèque des besoins nécessaires à l'évolution et à la validation des codes de calcul de base et des bibliothèques de données nucléaires, indépendamment de leur programmation éventuelle et en interaction avec le centre de Cadarache, mériterait d'être plus largement explicitée. Une vision exhaustive et long terme permettrait en effet de disposer d'un état précis des besoins complémentaires ou à venir en matière de validation, et d'un outil efficace de priorisation tant pour les projets réalisés au sein du CEA que pour ceux organisés en coopération avec des partenaires européens ou internationaux, en particulier ceux disposant également de grandes installations expérimentales dans le domaine neutronique. Bien entendu, cette approche devrait être effectuée en pleine cohérence avec la réflexion menée par la DEN sur le devenir des réacteurs critiques expérimentaux.

En ce qui concerne la thermohydraulique et la mécanique des fluides, la nécessité de progresser en modélisation physique et en simulation numérique, tout en maintenant ou adaptant le potentiel de maquettes expérimentales de validation, est essentielle. Cette ambition est bien ancrée au sein du DM2S. Cependant, et comme évoqué à plusieurs reprises dans le rapport, suite au regroupement des activités thermohydrauliques sur le centre de Saclay, le remplacement d'un nombre important de chercheurs et d'experts doit être effectué. Cette préoccupation est la priorité première du chef du Département, qui a clairement pris la mesure de cette opération, évidemment loin d'être simple, même si le budget alloué à ce transfert semble approprié. Même si ce dernier aspect ne constitue pas une condition suffisante, il est une condition nécessaire, essentielle et incontournable du processus, et illustre ainsi la volonté de réussite du Département sur cette très importante question. Mener à bien ce processus demandera de la détermination et du temps, qu'il y aura lieu de maîtriser en organisant de façon rigoureuse le transfert de connaissance et la formation, tant au niveau de la modélisation que de l'expérimentation. L'objectif à moyen terme sera donc de renouveler au plus tôt l'expertise afin de pérenniser la stratégie d'excellence, existant de longue date, de développement d'outils avancés de mécanique des fluides et de thermohydraulique au service, principalement mais non exclusivement, du fonctionnement des réacteurs et de leur sûreté.



De façon générale, le partenariat académique avec l'Université Paris-Saclay constitue une opportunité de progrès et de valorisation pour le DM2S en permettant une forte interaction avec les acteurs locaux. Le Département devra cependant veiller à conserver son implication dans les projets avec ses partenaires académiques actuels.

Modulo les remarques ou recommandations effectuées plus haut, le constat est que le projet à cinq ans du DM2S est globalement cadré. Pour conclure, les principales actions pouvant être retenues :

- prioriser les programmes pluriannuels ;
- gérer le transfert de connaissance et le renouvellement de l'expertise ;
- former plus d'experts de stature internationale ;
- renforcer le travail de fond en neutronique ;
- progresser sur la compréhension phénoménologique et la modélisation des problèmes industriels non encore résolus dans le domaine de la mécanique ;
- conserver le statut d'excellence en thermohydraulique et mécanique des fluides ;
- sécuriser au mieux les installations expérimentales indispensables à la validation des codes de calcul, y compris celles utilisées avec d'autres partenaires ;
- consolider les partenariats académiques ;
- hiérarchiser et planifier, dans le cadre de l'Institut tripartite, la R&D d'anticipation relative au REX de fonctionnement du parc ;
- ouvrir les partenariats industriels à un minimum d'innovation ;
- développer des coopérations internationales bien ciblées.



## 4 • Analyse thème par thème

**Thème 1 :** Mécanique

**Nom du responsable :** M. Xavier AVERTY

**Effectifs**

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	73	
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	21	
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	1	
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	15	
<b>TOTAL</b>	<b>110</b>	

### • Appréciations détaillées

Au sein du DM2S, la thématique "Mécanique" est portée par le SEMT (Service d'Études Mécaniques et Thermiques) qui rassemble et développe des compétences théoriques et expérimentales en mécanique des structures. Elle couvre la conception et la réalisation des moyens expérimentaux, le développement de grands logiciels de calcul ainsi que la codification des règles de construction mécanique des réacteurs nucléaires.

Les missions de recherche du SEMT visent à mieux comprendre la physique des phénomènes thermomécaniques se produisant dans les structures solides, à développer leur simulation numérique ainsi qu'à établir et valider des méthodes de calcul et des règles de dimensionnement en conditions nominales et accidentelles.

On peut distinguer trois grands domaines d'activité :

1. Mécanique et thermomécanique des structures, métalliques et en béton, mécanique des sols (divers géomatériaux).
2. Tenue des structures sous sollicitation dynamique : vibrations et impacts violents.
3. Analyse du risque sismique.



Le CEA dispose aussi de compétences en mécanique dans plusieurs autres départements à Cadarache. Ces derniers mettent en œuvre de grands moyens expérimentaux qui sont complémentaires de ceux du SEMT, car davantage orientés sur la qualification de gros composants, tels les générateurs de vapeur et les assemblages combustibles. Ils sont également en charge de la modélisation du comportement de ces composants.

La production scientifique, au sens large, du SEMT est considérable de par sa diversité : réalisation de dispositifs expérimentaux, modèles de calcul, logiciels de simulation, codification et études pour des industriels. Elle est décrite ci-après thème par thème :

– Mécanique et thermomécanique des structures

Développement d'un grand outil de simulation numérique. Le logiciel CAST3M est un code de calcul aux éléments finis, dédié à la modélisation en thermique, mécanique des solides et des fluides ainsi qu'au couplage fluide/structure impliquant des petits mouvements. Il comporte aussi des modules multi-physiques. La grande qualité scientifique de ce logiciel est attestée en particulier par une très bonne visibilité au sein du CEA et dans divers secteurs industriels nucléaire et hors nucléaire (SNCF, RATP, etc.), notamment au travers de nombreux développements spécifiques et "applicatifs métiers". Il est aussi très utilisé dans le monde académique, à des fins d'enseignement et de recherche multiples. Les modules de CAST3M sont bien validés mais ne sont pas écrits dans un formalisme permettant des adaptations aisées par les industriels : il est difficile de les modifier si l'on n'est pas spécialiste du langage de programmation. Les interfaces de CAST3M sont conçues plutôt pour la recherche que pour des applications en ingénierie.

Modélisation physique, études expérimentales et numériques des phénomènes d'endommagement ou de vieillissement. Les phénomènes analysés sont la fatigue thermique, la corrosion, le fluage, la rupture et la fragilisation sous flux neutronique. Ce domaine de compétence s'étend aussi à la modélisation des géomatériaux, en relation avec les besoins de stockage des déchets nucléaires. Les présentations orales sur cet axe ont porté sur les mécanismes physiques de la rupture fragile des aciers, de la fatigue bi-axiale, de la déchirure ductile et des contraintes résiduelles dans les liaisons bimétalliques ferritiques/austénitiques, en relation avec l'intégrité du circuit primaire des réacteurs à eau pressurisée. L'importance scientifique de l'ensemble de ces travaux est attestée par huit publications dans des journaux internationaux à comité de lecture ainsi que par une dizaine de thèses déjà soutenues et quatre en cours.

Simulation du comportement des enceintes de confinement. Le problème potentiel est celui de la perte progressive d'étanchéité due à la dégradation du béton. Cet axe de recherche, dont l'enjeu est crucial pour la durée de vie des centrales électronucléaires, a fait l'objet d'une présentation orale. Il constitue le sujet du programme international " BARCOM " qui réunit treize participants. Il s'agit de confronter les simulations numériques des divers participants aux données fournies par une maquette d'enceinte de confinement indienne (échelle 1/4). Le défi scientifique réside dans la modélisation multi-physique et multi-échelle depuis les microfissures millimétriques de corrosion des armatures jusqu'au comportement à l'échelle décimétrique de l'enceinte en béton. Les travaux menés au DM2S sur le sujet ont donné lieu à deux thèses et une étude de post-doctorat ainsi que trois publications dans des journaux à comité de lecture.

– Dynamique rapide et vibrations des structures

Développement d'un grand outil de simulation en dynamique rapide. Le logiciel EUROPLEXUS est dédié aux problèmes de mécanique et de thermomécanique qui impliquent de grands mouvements de structure et/ou de fluide traités dans le formalisme Euler-Lagrange arbitraire. Il est la copropriété du CEA et de la Commission Européenne et son développement se fait dans le cadre d'un consortium qui implique également EDF et l'ONERA en tant que Partenaires Majeurs, l'INRIA étant lui-même impliqué plus ponctuellement. Sa fonction principale est la simulation du comportement des structures sous chargements transitoires violents. Sur la période d'évaluation, plusieurs applications ont été faites en partenariat avec EDF R&D et EDF SEPTEN. Dans le cadre du projet européen « RAILPROTECT », ce logiciel a été appliqué à la simulation d'explosions dans les moyens de transport. Ces travaux ont donné lieu à cinq publications dans des revues à comité de lecture.



Vibrations sous écoulement des tubes de générateur de vapeur. Ces recherches sont essentielles pour la conception des échangeurs de chaleur à faisceau tubulaire. En effet, des vibrations excessives induites par l'écoulement externe d'un des fluides caloporteurs peuvent dans certains cas conduire très rapidement à la ruine du composant. En fonctionnement normal, la durée de vie du faisceau peut être affectée par une usure progressive de la paroi des tubes, au niveau des appuis. Malgré l'abondante moisson de résultats sur le sujet, dont ceux obtenus au DM2S dès les années 1970, et qui font référence dans le domaine, les mécanismes physiques mis en jeu demeurent insuffisamment maîtrisés. Ils ont trait à l'excitation des tubes par l'écoulement, à la réponse vibratoire des tubes en présence d'impacts et/ou de frottements et à l'usure en régime vibratoire, dans l'environnement physicochimique du composant. Les travaux menés au DM2S sur la période 2008-2013 comportent plusieurs campagnes d'essai conduites sur les boucles diphasiques eau/air de la plateforme d'essais RESEDA, dans le but d'identifier les facteurs d'échelle pertinents permettant la mise sous forme adimensionnelle des forces qui excitent les tubes du faisceau.

Une autre campagne d'essais a porté sur l'identification des forces de couplage responsables de l'instabilité vibratoire des tubes ainsi que la réponse non-linéaire à ces forces, en présence de chocs sur une butée. Les résultats contribuent à valider l'outil de calcul d'estimation des amplitudes vibratoires, GERBOISE, code développé avec AREVA en tant qu'applicatif de CAST3M. Les travaux se font dans le cadre d'un projet ANR BARESAFE et leur qualité scientifique est attestée par 7 publications dans des revues à comité de lecture. Ces travaux sont associés à deux thèses, l'une soutenue, l'autre en cours.

Comportement vibratoire des machines tournantes. L'expertise du SEMT date des années 1980 avec divers travaux sur le comportement dynamique de rotors immergés. Les travaux plus récents ont été centrés sur l'élaboration d'un outil de calcul développé en tant qu'applicatif CAST3M. Il permet une modélisation filaire (en poutres), en coques et en 3D de certains sous-composants. Ce travail a suscité une thèse soutenue en 2008 et une seconde a démarré en 2012.

#### – Vulnérabilité sismique

La plateforme expérimentale TAMARIS regroupe un ensemble, unique en Europe, de tables et de moyens d'analyse des risques sismiques. Elle est promise à une extension future dans le cadre du projet EXTAM destiné à combler le retard de l'Europe dans le domaine parasismique, par rapport au Japon en particulier. La production scientifique associée au thème de la vulnérabilité sismique concerne tout le chemin de chargement au niveau du sol, puis des fondations, des structures principales et des équipements qu'elles contiennent. Les effets physiques concernés sont multiples et plusieurs d'entre eux ont fait l'objet d'un travail de thèse ou postdoctoral dans la période 2008-2013.

Interaction sol-structure. Une thèse a démarré en 2010 sur l'effet de l'incohérence spatiale sismique sur l'interaction sol-structure. Elle est associée au programme KARISMA de l'IAEA sur les marges sismiques.

Interaction fluide-structure. Une thèse a été soutenue en 2010 sur l'interaction entre un fluide et une structure oscillante et une autre en 2012 sur une méthode d'homogénéisation pour modéliser le comportement sismique d'un faisceau tubulaire immergé dans un fluide.

Traitement des non linéarités géométriques et matérielles. Plusieurs thèses ont été lancées sur cette thématique : l'une, démarrée en 2012, porte sur le comportement des structures élancées glissantes et basculantes, deux autres concernent le comportement dynamique du béton armé (effet de l'amortissement 2009-2012, dégradation sous chargement cyclique 2013-2016). Un travail postdoctoral sur l'étude de la génération des signaux sismiques et l'influence sur la probabilité de défaillance des structures non linéaires et un autre sur le comportement sismique des ponts roulants, sont également à mentionner.

Isolation sismique et contrôle structural. Les travaux ont fait l'objet d'une présentation orale. Trois thèses ont été soutenues : la première sur l'isolation sismique par des isolateurs passifs combinés à des dispositifs semi-actifs (2010), la seconde sur le contrôle actif et semi-actif des structures sous sollicitations sismiques (2012) et la troisième sur la vulnérabilité et les spectres de plancher des structures sismiquement isolées (2013).

Techniques expérimentales avancées. Le SEMT a développé le contrôle des vérins et des essais hybrides en temps réel dans le cadre d'actions collaboratives avec EDF et de projets européens EFAST (2008-2011) et SERIES (2009-2013), donnant lieu à une thèse démarrée en 2010. Le principe général de la méthode, dans sa version la plus simple, est de modéliser la structure réelle en la décomposant d'une part en une sous-structure dont le comportement est établi expérimentalement et d'autre part en une sous-structure modélisée numériquement. L'intérêt réside dans la simplification de la maquette d'essai qui en résulte. Actuellement cet axe de recherche fait l'objet de la soumission de deux projets de recherche ANR : RUBIS et projet IDEX : SYNEDYN impliquant CEA, ECP, ENS Cachan, SUPELEC, GDS.



Réponse dynamique stochastique des structures et évaluation probabiliste du risque. Cette thématique a été présentée lors de la visite. Cet axe de développement en mathématiques appliquées structure plusieurs actions collaboratives : projets ANR CISSI (2007-2010), SINAPS (2014-2019), CHORUS (2014-2018), actions avec des partenaires industriels (EDF et AREVA) et académiques (Universités du Texas, de Nice et de Clermont-Ferrand). Un premier volet des actions menées au DM2S concerne le développement d'une méthodologie d'évaluation des courbes de fragilité sismique basée sur Monte Carlo qui soit applicable en contexte industriel. Il donne lieu à une thèse, démarrée en 2011, qui porte sur la construction de courbes de fragilité sismique par représentation de Karhunen-Loève. Le second volet a trait au développement d'une méthode d'expertise alternative à Monte Carlo, permettant une évaluation simplifiée d'une courbe de fragilité. Les travaux en cours qui ont été présentés concernent la réponse d'un système à un seul degré de liberté non linéaire : l'oscillateur élasto-plastique parfait.

Si la diversité de la production scientifique est large, le nombre de publications par an dans les revues à comité de lecture reste par contre relativement modeste : il varie de 15 à 28 selon les années sur la période 2008-2012. Il est vrai de ce point de vue, comme pour celui des travaux de thèse effectués au SEMT, qu'il y a un net progrès par rapport au passé. On peut légitimement espérer une nette accélération de cette tendance en concomitance non seulement avec une plus grande perméabilité au monde académique mais aussi avec une relève générationnelle dans les équipes du SEMT. Le DM2S doit mieux faire connaître ses compétences y compris à ses partenaires de l'énergie qui peuvent n'en avoir qu'une vision partielle.

Sur le plan du rayonnement et de l'attractivité académiques, avec un effectif ayant un niveau élevé de compétence et une forte présence d'experts de différents niveaux, le SEMT est un acteur important en France du développement et de la diffusion des connaissances dans le domaine de la mécanique, apprécié en particulier pour ses compétences dans le domaine de la thermomécanique, du comportement mécanique des géomatériaux, des problèmes d'interaction fluide-structure, de vibrations sous écoulement et d'analyse du risque sismique. Ceci se concrétise en particulier par :

1. Un grand effort dans l'enseignement de ces disciplines dans les formations à connotation nucléaire, ou non, de l'enseignement supérieur : ENSTA Paris, École Polytechnique, ENS Cachan, INSTN.
2. La publication d'ouvrages, principalement en français, à caractère pédagogique.
3. Un engagement fort dans la formation par la recherche (doctorants et partenariats avec des laboratoires à vocation académique).

Toutefois, la notoriété du SEMT au sein du monde scientifique et académique international reste inférieure à celle qu'elle pourrait être. La visibilité internationale des résultats de ses travaux ainsi que celle de ses ingénieurs-chercheurs est limitée, sauf à quelques exceptions. Une raison majeure en est que les activités du SEMT se réalisent, pour l'essentiel, dans le cadre d'accords coopératifs qui pénalisent parfois une large diffusion des résultats des travaux, et qu'une grande part des activités opérationnelles, des travaux pour les partenaires industriels, ou pour la Défense, n'ont pas vocation à déboucher naturellement sur des publications. En conséquence les ingénieurs chercheurs du SEMT sont, dans les faits, peu incités à publier dans des revues scientifiques à comité de lecture, bien qu'à cet égard une nette tendance à l'amélioration se fasse sentir depuis quelques années.

Rapporté au nombre de chercheurs, le niveau de publimétrie reste honorable mais avec de fortes disparités selon les thèmes et les équipes. Toutefois, la visibilité du SEMT à l'international profiterait d'une amélioration au niveau des publications (publier davantage dans des revues de comité de lecture, et accroître le nombre d'ingénieurs-chercheurs impliqués) ainsi qu'au niveau de la participation de ses chercheurs, en tant que leaders scientifiques, dans des manifestations internationales. Trop peu de chercheurs du SEMT ont une stature internationale, et quelques-uns d'entre eux sont bien proches de la retraite. Il est souhaitable qu'en cette matière, le CEA favorise la mise en visibilité des experts en mécanique à l'international.

Sur le plan de l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel, le SEMT est un acteur reconnu dans son environnement scientifique aux niveaux national et international. Il a plusieurs collaborations avec les laboratoires français, il fournit des présentations à ses partenaires du nucléaire EDF et AREVA et à de nombreuses autres industries (SNCF, RATP) et il participe à de nombreux projets européens. Le SEMT développe des logiciels et des moyens expérimentaux utilisés dans un périmètre qui dépasse notablement celui de l'industrie nucléaire :



Les plateformes logicielles CAST3M, EUROPLEXUS.

Les plateformes TAMARIS pour le séisme et RESEDA pour l'analyse du comportement thermomécanique des structures.

Le DM2S a la capacité de jouer un rôle unique, celui de mieux caractériser les mécanismes à l'origine des problèmes rencontrés par l'industrie nucléaire et de mener la recherche en collaboration avec les industriels jusqu'à la fourniture d'outils et de méthodes.

Plusieurs exposés ont illustré l'importance dans la recherche amont des aspects multi-échelles et multi-physiques. Certains problèmes industriels commencent à être abordés de cette façon : études sur les mécanismes de décohésion des grains en fluage, modélisation fine de la couche limite pour les écoulements dans les zones de mélange... Le DM2S peut aider les industriels à construire les modèles aux différentes échelles et à valider ces approches.

Il faut souligner aussi la participation importante du SEMT dans la codification : il pilote le code de conception des réacteurs rapides, celui des réacteurs de recherche et de Fusion (RCC-MRx) et participe au développement du code RSE-M qui rassemble les règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des réacteurs à eau pressurisée. Le travail sur les courbes de fragilité sismique devrait être poursuivi dans cette direction : savoir produire des abaques de fragilité sismique en fonction de la nature des sols et des types de bâtiments. On peut aussi suggérer de prolonger les acquis sur la liaison acier-béton par des formulations simplifiées à usage d'ingénierie courante.

L'opportunité de la future Université de Paris-Saclay est certaine : c'est un moyen d'accroître la visibilité nationale et internationale du DM2S. Cependant, les compétences ne se regroupent pas par régions, il est important de continuer l'implication dans les réseaux transverses. Le SEMT contribue à de nombreux projets collaboratifs nationaux et internationaux, il est indispensable qu'il se maintienne à ce niveau.

En ce qui concerne l'organisation et la vie du service, la pyramide des âges est fortement déséquilibrée au sein du SEMT: la plupart des collaborateurs ont plus de 40 ans. De plus l'expertise y est très concentrée sur les plus anciens. Le SEMT a un effectif global suffisant (73) comprenant 30 experts, et il y a un bon ratio ingénieurs-chercheurs/techniciens (75%/25%). Une des raisons de ce déséquilibre est naturellement que la durée pour acquérir un bon niveau d'expertise est longue, de l'ordre de 10 ans. De plus, il y a un risque de moindre attractivité des étudiants vers le nucléaire. Il faut donc le compenser par une meilleure mise en valeur du travail scientifique ou une plus grande association ou implication des experts dans les décisions stratégiques et une perméabilité accrue au monde académique.

En ce qui concerne l'implication dans la formation par la recherche, le SEMT accueille régulièrement des stagiaires et des thésards. Les thèses proposées sont de bonne ou très bonne qualité. Les conditions d'accueil des thésards sont satisfaisantes au dire de ces derniers. Les doctorants devraient être encouragés à publier plus, notamment dans des revues à comité de lecture. Par ailleurs, il y a encore un effort à faire pour augmenter le nombre d'enseignants chercheurs habilités à diriger des thèses.

Sur le plan du projet à 5 ans, pour le DM2S se pose une question cruciale quant à ses capacités d'essai sur maquettes de grandes dimensions. La simulation doit permettre d'assurer la transférabilité des modèles sous réserve que ceux-ci aient été testés à différentes échelles. Le DM2S est conscient de l'importance de cette question comme en témoignent la mise en place de la plateforme RESEDA pour les analyses d'intégrité de structure et le projet d'extension de Tamaris en séisme.

Les hésitations des partenaires industriels à participer à ces investissements freinent cet élan et rendent difficile l'établissement d'orientations à moyen et long terme en particulier pour l'extension de TAMARIS. Ces investissements impliquent également les moyens humains correspondants. Le travail expérimental au niveau de la recherche se distingue du travail expérimental de qualification. Il faut, dans ce dernier cas aussi, que soient impliqués des Ingénieurs-Chercheurs de bon niveau et le SEMT doit intégrer cette question dès la mise en place de grands équipements.

En revanche dans le domaine de la modélisation, les axes sont en général établis plus solidement car ils correspondent à des besoins récurrents et à des actions assez facilement segmentables : en témoignent les travaux de validation en mécanique de la rupture et fatigue, la mise en place d'une approche locale en interaction-fluide structure, les modélisations multi-échelles des enceintes de confinement.



Cependant, la stratégie du laboratoire LTA sur le soudage mérite clarification. En effet ce laboratoire qui effectue des études de soudabilité et construit un outil de simulation des procédés de soudage à l'arc (W-Process, application de CAST3M), n'a présenté que des simulations Thermo-Métallurgique-Mécanique (TMM) des contraintes résiduelles et un traitement au Laser pour éviter la traction en peau interne. De tels calculs sont maîtrisés depuis plus de dix ans, par exemple par la société ESI qui distribue le logiciel SYSWELD. Le LTA utilisait SYSWELD mais a décidé de reprendre dans CAST3M la simulation TMM. C'est sans doute pour pouvoir librement entrer des caractérisations de nouveaux matériaux. Mais l'apport en innovation est faible sur cet aspect alors que sur la simulation des procédés de soudage le LTA fait partie des laboratoires les plus avancés pour cette thématique et que les progrès à faire sont importants : la simulation du bain fondu n'est encore limitée qu'au dépôt d'un seul cordon.

De façon plus générale, dans un contexte de réduction de moyens, le DM2S devrait adapter ses procédures de gestion de la R&D et introduire plus de souplesse dans les procédures d'établissement des priorités.

## Conclusion

### ▪ *Avis global sur le thème :*

Le SEMT a acquis au fil de plus d'un demi-siècle d'efforts aussi soutenus que fructueux un savoir-faire scientifique et industriel reconnu internationalement. Il a établi des nombreux partenariats académiques et participe à de nombreux projets collaboratifs nationaux et européens. Il joue aussi un rôle important dans le tissu industriel français, mais devrait accroître son rayonnement et sa capacité à traiter les problèmes depuis le fondamental jusqu'aux applications quasi-industrielles.

### ▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

Le SEMT a acquis un ensemble de compétences difficilement remplaçable, voire unique au niveau national, en statique et dynamique des solides ainsi qu'en modélisation de l'endommagement des structures. Le SEMT dispose de moyens expérimentaux importants et très diversifiés pour construire et valider les modèles pour des applications industrielles.

Le développement au sein du DM2S de logiciels en mécanique des solides et des fluides offre des opportunités de modélisation de couplages existant dans les équipements des centrales nucléaires, tels les internes de cuve de réacteur ou les assemblages de combustible.

Le SEMT dispose de compétences dans des domaines clés de la mécanique qui concernent de nombreux secteurs industriels : critères de résistance au séisme, analyse d'intégrité, modélisation du comportement vibratoire en interaction fluide-structure, dynamique d'impact. De plus, le SEMT a aussi un savoir-faire unique dans les domaines liés à la durée de vie des centrales nucléaires du parc français et au développement de nouveaux réacteurs. On peut citer le développement de logiciels dédiés, tels ceux modélisant le comportement du faisceau de tubes de générateur de vapeur, les risques de dégradation des enceintes de confinement ou des aéroréfrigérants.

### ▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

Les présentations du DM2S en mécanique témoignent de l'étendue des compétences dans ce domaine et de la très grande qualité de la plupart des travaux présentés.

Cependant la préservation de ce savoir-faire n'est pas garantie pour trois raisons :

- Déplacement du centre de gravité des développements de l'industrie nucléaire hors des USA et d'Europe. Il y a un risque de réduction du financement des programmes par les industriels.
- Le manque de stabilité de la politique énergétique, nettement visible en Europe, favorise l'élaboration de programmes dictés par des besoins à court terme. Ceci induit un appauvrissement de la recherche amont et donc une moindre capacité à anticiper les problèmes et à nourrir une véritable innovation.
- La pyramide des âges est fortement déséquilibrée au SEMT.

Même si dans certains projets les départements coopèrent, par exemple le programme CIMETAL commun au DM2S et au DPC, les actions transverses devraient être encore développées et rendues plus visibles.



▪ *Recommandations :*

Il est illusoire de vouloir réduire fortement l'aspect expérimental en le compensant par le numérique, même si cela peut s'avérer intéressant en termes de coûts. Le SEMT envisage pour sa part de faire évoluer ses grandes installations d'essais mécaniques. La recommandation est que les compétences associées doivent être d'autant renforcées, pas uniquement dans le domaine purement expérimental, mais également pour la modélisation des dispositifs d'essais et d'instrumentation.

Une plus grande ouverture sur le monde académique (enseignement, publications, encadrement de thèses, programmes de recherches « amont »), serait de bon aloi.

Le SEMT doit améliorer son rayonnement, par une meilleure planification des publications scientifiques, une incitation de ses chercheurs à participer à l'organisation de conférences et à la formation de pilotes de projets de R&D internationaux. Ces activités sont des moyens réels de valorisation des compétences et moyens du DM2S. De plus, elles peuvent donner lieu à des contrats d'étude ou attirer des partenaires pour cofinancer certains des projets.

Il ne faut pas négliger pour autant les offres ou la valorisation d'actions en direction des partenaires privilégiés du CEA. Les travaux d'anticipation des problèmes dans le domaine du nucléaire sont parfois négligés par les industriels : le rôle du CEA est de les alerter sur ces difficultés potentielles et de leur proposer des programmes de gestion des risques en soutien à l'exploitation des centrales.



**Thème 2 :** Neutronique

**Nom du responsable :** M. Patrick BLANC-TRANCHANT

**Effectifs**

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	74	
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	3	
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité		
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	9	
<b>TOTAL</b>	<b>86</b>	

### • Appréciations détaillées

Au sein du DM2S la thématique "Neutronique" est portée par le SERMA (Service d'Études des Réacteurs et de Mathématiques Appliquées), qui rassemble et développe des compétences en théorie et codes de calcul pour les réacteurs nucléaires, la sûreté-criticité et la radioprotection.

Les études de physique du cœur et de physique des réacteurs mettent en jeu les aspects neutroniques, pour caractériser la répartition spatiale de la puissance générée par les fissions, et les aspects thermo-hydrauliques liés à l'évacuation de cette puissance par un caloporteur. Le DM2S dispose donc avec le SERMA et le STMF (Service de Thermo-hydraulique et de Mécanique des Fluides) d'équipes de développement dans ces deux disciplines, intervenant de façon complémentaire pour réaliser des couplages entre codes de calcul neutroniques et thermo-hydrauliques, et la liaison entre les échelles locale, cœur et système.

Par ailleurs il est à noter que le SERMA n'est pas le seul centre de compétence neutronique de la DEN ; un autre service, le SPRC, situé à Cadarache, intervient principalement sur les aspects expérimentation et validation.



Les travaux conduits par le SERMA dans des domaines majeurs de la théorie du transport des neutrons, tant avec une approche déterministe que probabiliste, et de leur mise en œuvre dans des codes de calcul intégrant des méthodes numériques performantes, et des possibilités de couplage avec des codes d'autres disciplines (par exemple en thermo-hydraulique), sont tout à fait à l'état de l'art. La contribution apportée au progrès de la connaissance des phénomènes neutroniques, et aux applications à la construction de modèles pour l'analyse de réacteurs nucléaires est d'importance internationale, au meilleur niveau. Dans certains cas, les théories et méthodologies développées par le SERMA représentent une rupture théorique, par exemple le traitement de "l'upscattering résonnant", et contribuent ainsi à de réels progrès dans la qualité de la simulation des phénomènes qui se produisent dans le cœur des réacteurs, notamment dans ceux des réacteurs à eau.

Les codes et schémas de calcul développés par le SERMA sont utilisés dans de nombreuses simulations en support aux démonstrations de sûreté d'installations nucléaires très diverses. Ceci atteste de leur qualité qui est reconnue par l'Autorité de sûreté. Les études et expertises réalisées au SERMA, tant en soutien aux installations du CEA que dans le cadre de travaux de définition ou d'exploration de nouveaux concepts de réacteur, conduisent à utiliser ces schémas de calcul pour des configurations innovantes avec souvent des conditions complexes en fonctionnement normal ou en situations accidentelles ; ceci met à l'épreuve la capacité concrète de mise en œuvre de ces schémas de calcul et met en évidence de nouveaux besoins de progression, par exemple l'évaluation de la propagation des incertitudes.

En retour, ces activités permettent au SERMA d'y gagner une bonne maîtrise des enjeux, une meilleure prise de conscience de la force et de l'importance de ses apports et de son positionnement national et international. Elles contribuent notablement à ce que le CEA soit un acteur incontournable dans l'hexagone et à l'international, en permettant à la France de tenir son rôle dans différentes instances, par exemple le Forum international "Generation IV".

Rapporté au nombre de chercheurs qui produisent, le niveau de publimétrie reste globalement satisfaisant. Sur la période d'évaluation, on compte un peu moins de 70 articles dans des revues internationales de très bon rang comme Nuclear Science and Engineering, Nuclear Technology ou Annals of Nuclear Energy et près de 120 communications dans diverses conférences. Toutefois, la visibilité du SERMA à l'international profiterait d'une amélioration au niveau des publications (publier davantage dans des revues à comité de lecture, et accroître le nombre d'ingénieurs-chercheurs impliqués) ainsi qu'au niveau de la participation de ses chercheurs, en tant que leaders scientifiques, dans des manifestations internationales. Peu de chercheurs du SERMA ont une stature internationale, et quelques-uns d'entre eux sont bien proches de la retraite, il serait bon d'inciter plus de jeunes à commencer à se former pour cela.

Sur le plan du rayonnement et de l'attractivité académiques, le SERMA, avec son effectif à haut niveau de connaissances et avec une forte présence d'experts de différents niveaux, est un acteur majeur du développement et de la diffusion des connaissances dans le domaine de la neutronique, ceci se concrétisant en particulier par :

1. une grande implication dans l'enseignement de cette discipline dans les formations à connotation nucléaire de l'enseignement supérieur,
2. la publication d'ouvrages, principalement en français, à caractère pédagogique,
3. un engagement fort dans la formation par la recherche (nombreux doctorants et partenariats).

Toutefois, comme cela a été dit plus haut, la notoriété du SERMA au sein du monde scientifique et académique à l'international, n'est pas tout à fait celle qu'elle devrait être, en regard du haut niveau des travaux effectués. La visibilité internationale des résultats de ces travaux ainsi que celle des ingénieurs-chercheurs, à quelques exceptions près, est relativement limitée. On peut par exemple noter que, dans la période de référence de l'évaluation, des membres du SERMA ont participé à 30 jurys de thèse dont deux seulement à l'étranger.

En ce qui concerne les codes de calcul, leur qualité est reconnue par le microcosme nucléaire international, par exemple le formulaire CRISTAL qui capitalise les connaissances dans le domaine de la sûreté-criticité et qui permet au CEA, à l'IRSN et à AREVA de détenir une position de leadership reconnue mondialement. Cependant les principaux codes de calcul développés au SERMA n'ont pas encore la diffusion de certains codes étrangers utilisés dans des domaines homologues, comme TRIPOLI vs MCNP ou APOLLO vs CASMO.

Il est vrai qu'une partie des activités du SERMA se réalise dans le cadre d'accords coopératifs qui limitent une plus large diffusion des résultats de ses travaux. De plus, une grande part des travaux opérationnels pour la Défense, ou pour les partenaires industriels, n'ont pas vocation à déboucher naturellement sur des publications.

Le SERMA est bien intégré dans son environnement socio-économique aux niveaux national et international ; en témoignent la richesse des échanges et le niveau élevé d'implication dans les projets OCDE et européens, ainsi que ses fournitures et prestations en support de l'industrie, par exemple :

- le code TRIPOLI-4 est utilisé pour les calculs de référence dans le suivi de l'irradiation des cuves de réacteur, élément essentiel pour le maintien en exploitation du parc nucléaire français,
- le code APOLLO-2 est mis en œuvre par les grands acteurs du nucléaire français pour le traitement multigroupe de l'équation du transport et la génération des sections efficaces pour tous les calculs de cœur ; à l'international, AREVA utilise le code APOLLO-2 pour des études réalisées pour des clients étrangers (Chine, Belgique, Suède...) et en fait la base de sa nouvelle chaîne de calcul neutronique qui sera déployée au niveau mondial.

Néanmoins, comme cela a déjà été identifié par le SERMA dans son analyse "SWOT", l'ampleur prise par le partenariat avec les industriels impose des contraintes en matière de propriété intellectuelle qui freinent la possibilité de l'ouverture vers d'autres clients internationaux.

Le choix d'utiliser une plateforme d'intégration en "open source" pour la simulation numérique multi-physique est un gage d'ouverture et est à même de favoriser un élargissement des coopérations ou partenariats.

Il ne faut pas oublier non plus l'implication forte du SERMA dans la construction et le pilotage d'enseignements, essentiellement au niveau Master et en dernière année d'école d'ingénieur, ainsi que l'accueil chaque année de nombreux stagiaires. Tout ceci a d'ailleurs une influence notable sur la culture neutronique de nombreux cadres du milieu nucléaire français et même au-delà.

Il y a au SERMA des chercheurs de grande qualité, motivés et faisant preuve d'un fort niveau d'engagement. La prise de conscience de la nécessité de pérenniser les compétences critiques a conduit à mettre en place des moyens de transmission (binôme, tutorat), en cohérence avec la politique d'identification et de gestion des compétences critiques de la DEN, notamment par le biais de la filière expert.

Le climat social semble bon, même si le Département dont le SERMA fait partie doit gérer les questions liées à la restructuration et le déplacement des activités en thermohydraulique.

L'intégration d'activités complémentaires est un atout pour le SERMA : activités de développement de méthodes et outils de simulation numérique débouchant sur leur mise en œuvre dans le cadre d'études complexes pour les réacteurs, les installations du cycle, voire la fusion; il en est de même pour la liaison avec les autres disciplines de physique du cœur que sont la thermo-hydraulique et la thermique du combustible.

Toutefois, les présentations techniques sont restées assez sectorielles, ce qui ne permet pas de faire émerger clairement les aspects transverses. Même si on devine que de nombreuses activités transverses se réalisent et se développent, l'existence de synergies structurées n'est pas clairement affichée ; l'interface et la complémentarité avec le pôle neutronique de Cadarache demanderaient à être mieux explicités et valorisés.

Le SERMA contribue de façon tout à fait convenable à la formation par la recherche avec l'attribution de thèses en quantité et qualité, dont il tire d'ailleurs un profit certain. D'après l'information reçue et l'entretien avec les doctorants, les conditions d'accueil semblent satisfaire ces derniers. Les activités académiques transverses apparaissent bien établies entre les doctorants du SERMA, en revanche cette transversalité ne semble pas être vraiment étendue à l'ensemble des doctorants du DM2S, alors même que les problématiques multi-physiques sont un des axes majeurs des développements en cours ou futurs. Il pourrait aussi être bon que tous les élèves de doctorat soient plus fortement incités à publier, ou au moins à proposer une publication (un article dans une revue à comité de lecture) basée sur leur travail doctoral, avant de soutenir leur thèse. Par ailleurs, un effort de recrutement de post-doctorants, y compris de candidats étrangers, serait à considérer, au regard de l'importance et de l'intérêt des développements dans lesquels ce service est impliqué et des sujets potentiellement proposables.

En ce qui concerne la stratégie et le projet à cinq ans, une vision ambitieuse est proposée sur ce que pourrait être la plateforme multi-filière de la nouvelle génération des outils de calcul de la Physique des réacteurs nucléaires et de ses liaisons avec une plateforme métier multi-physique. On retrouve aussi cette perspective dans l'élaboration du système français de sûreté-criticité. Les objectifs généraux, les axes de travail et la démarche à mettre en œuvre pour progresser semblent bien identifiés. Cependant la forte influence des partenaires industriels dans l'orientation des travaux, en particulier ceux concernant les codes de calcul utilisés pour les réacteurs à eau industriels, conduit à donner une importance, sans doute excessive, au traitement des besoins court terme, souvent non anticipés, ce qui pénalise l'engagement du travail de fond nécessaire à l'élaboration ou à l'achèvement des plateformes indispensables aux nécessités de progrès sur le long terme.



En conséquence, la maîtrise de l'échelle de temps n'est pas certaine, ni même clairement affichée ; la nécessité de positionner l'échéancier des résultats de la recherche par rapport aux jalons des exigences de la conception, de l'évolution et de l'exploitation des réacteurs avec les capacités ou possibilités de validation associées, n'apparaît pas toujours de façon explicite.

Au regard de l'élaboration d'une vision sur la stratégie de développement des moyens de simulation, on perçoit moins le volet expérimental qui permettrait d'orienter les développements et de venir en support à la validation des codes de calcul de base. Les besoins d'expériences, leur programmation et à tout le moins l'intention de leur mise en œuvre en interaction avec le Département en charge à Cadarache, ne sont pas clairement explicités. Certes, des réflexions sont en cours sur le devenir des installations de criticité, mais elles ne doivent cependant pas empêcher les évaluations de besoins intrinsèques d'expériences, ou de maquettes orientées vers l'amélioration et la validation des codes de calcul de base, notamment APOLLO-3 et TRIPOLI-5 et de leurs bibliothèques de données nucléaires, moyennant leur traitement avec le système GALILEE.

Si elles ont bien été identifiées dans les objectifs généraux, les méthodologies d'optimisation multicritères (méthodes méta-heuristiques d'optimisation et d'aide à la prise de décision) ne semblent plus faire partie des axes de travail privilégiés ; or ces développements prennent de plus en plus d'intérêt dans des applications industrielles et plus seulement dans la recherche. Le SERMA a déjà développé un logiciel basé sur les Algorithmes Génétiques et pourrait poursuivre en explorant d'autres méthodes d'optimisation combinatoire qui commencent à poindre au niveau mondial. Par ailleurs, on ne voit pas vraiment la recherche de synergies structurées entre les différents acteurs travaillant sur ces thématiques, or cela pourrait être un atout car la recherche se nourrit aussi d'échanges transverses.

D'après les éléments de contexte apportés par le Chef du Département, on ressent que la réduction des moyens, conséquence des réorientations budgétaires, est subie et répercutée sur les programmes par des réductions, voire des glissements, sans qu'apparaisse clairement le véritable questionnement sous-jacent à la recherche de priorisation.

## Conclusion

### ▪ *Avis global sur le thème :*

On trouve au SERMA un effectif ayant de fortes compétences, une bonne compréhension des enjeux principaux, une conscience de la force et de l'importance du service et de son positionnement national et international et un engagement fort dans la formation par la recherche (effort notable dans l'enseignement et dans les partenariats). Tout ceci fait du SERMA, et donc du DM2S, un acteur majeur dans le domaine de la Neutronique et de ses applications, tant au niveau national qu'international.

### ▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

Classiquement, les études de physique des réacteurs comprennent des aspects neutroniques fournissant la répartition spatiale de la puissance générée par fission, et des aspects thermo-hydrauliques liés à l'évacuation de cette puissance par un caloporteur. Le développement au sein du DM2S des principaux logiciels de calcul dans ces deux disciplines est un atout certain pour la réalisation des couplages multi-physiques prenant en compte les liaisons entre ces deux disciplines ainsi que celles entre les différentes échelles de modélisation : local, cœur et système.

Le SERMA mène une recherche de haut niveau et d'importance internationale ; il se trouve clairement à l'état de l'art dans le domaine de la physique des réacteurs. Sa production scientifique (codes de calcul, méthodologies, études, applications industrielles) résulte de plusieurs décennies d'un travail soutenu et cohérent. Le projet scientifique à moyen et long terme, bien identifié, doit assurer une continuation du travail à un haut niveau et de bonne qualité.

Le SERMA semble entretenir de bonnes relations avec ses partenaires industriels et leur assure une bonne qualité de produits offerts (codes de calcul et études).

Vu le haut niveau de son activité scientifique et technologique, le SERMA a véritablement un potentiel important à exploiter, moyennant une redéfinition périodique des objectifs détaillés en fonction de l'évolution du contexte, et cela autant dans la sphère scientifique ("leadership mondial") que dans le monde industriel (nouveaux partenaires).



La transition générationnelle est bien gérée vu la pyramide des âges des ingénieurs-chercheurs du service.

▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

Si le SERMA est en mesure d'explicitier les perspectives qu'il envisage pour les évolutions des schémas de calcul et les plateformes multi-physiques, il souffre, dans ces domaines, d'une absence de véritable vision stratégique de la part de ses partenaires industriels. Or ces derniers ont une forte influence sur l'orientation et la priorisation des travaux. Le SERMA risque en particulier de voir son travail de R&D théorique amont être altéré, compte tenu des contraintes budgétaires conduisant à privilégier les applications, et des aléas de la politique énergétique (réduction envisagée de la part nucléaire dans la génération électrique, soutien accru aux énergies renouvelables).

Les risques que font peser les difficultés de financement des grands programmes expérimentaux sur le maintien des réacteurs de recherche et des installations spécifiques à la criticité, sont préoccupants. Le SERMA n'est pas la seule partie prenante, mais l'éventualité de l'absence de rénovation, voire de l'abandon, de ces grands moyens expérimentaux pourrait mettre en difficulté la validation des avancées théoriques ou les progrès dans les modélisations et pénaliser également la capitalisation et le transfert des connaissances

Face à ces risques, le SERMA pourrait avoir intérêt à améliorer son impact au sein du monde scientifique et académique international, en mettant plus en visibilité la nature de ses activités en général, et la haute qualité de ses ingénieurs-chercheurs en particulier. Il y a une opportunité d'amélioration au niveau des publications (publier davantage dans des revues à comité de lecture) et de la participation des chercheurs, en tant que leaders scientifiques, dans des manifestations internationales. Cela pourrait être un atout pour faciliter le support de partenaires industriels internationaux, notamment par le biais des plateformes.

▪ *Recommandations :*

Le SERMA gagnerait à améliorer sa production scientifique sous forme de publications et à renforcer le poids de sa présence dans des manifestations internationales. Ceci pourrait contribuer à conférer une reconnaissance plus notable au niveau international à ses principaux logiciels d'étude des réacteurs, à ouvrir des possibilités de collaboration avec d'autres clients internationaux en élargissant ainsi la communauté des utilisateurs, et ceci lui permettrait de pallier, au moins en partie, une réduction des budgets propres de développement ; ce d'autant que les ressources du SERMA dépendront de plus en plus des retours obtenus de la "vente" de son expertise.

Une plus grande sensibilisation des partenaires industriels s'avère indispensable pour asseoir une vision long terme qui permettrait un équilibre entre les travaux orientés par les besoins opérationnels et ceux relevant d'une démarche de progrès continu. A ce sujet, on suggère que soit explicitée une liste de "points sensibles" sur lesquels il serait bon d'anticiper des développements, éventuellement de longue haleine, pour contribuer à faire progresser la simulation, en support à un objectif de fonctionnement sûr (au sens sûreté et sécurité) du parc nucléaire français ; par exemple vis-à-vis de la problématique "fluence de cuve", pourquoi ne pas évoluer vers des méthodes plus modernes, notamment utilisant les données DPA (déplacements par atome) ? Ceci placerait plus explicitement les partenaires devant leur responsabilité en matière d'anticipation dans la planification des actions et permettrait peut-être d'éviter des situations "de crise" comme celle que l'on a connue sur le traitement de "l'upscattering résonnant".

Il serait enfin utile d'exprimer plus précisément les attentes en matière de qualification expérimentale, de les faire mieux connaître pour ensuite les partager avec les entités spécialisées de Cadarache en matière d'expérimentation. Ceci permettrait au moins de disposer d'une vision cohérente des besoins et perspectives de qualification au service du progrès de la modélisation ainsi que des possibilités d'utilisation des installations expérimentales du CEA, ou autres, disponibles sur le moyen ou le long terme.



**Thème 3 :** Mécanique des Fluides et Thermohydraulique

**Nom du responsable :** M. Bernard FAYDIDE

**Effectifs**

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	124,5	
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	14	
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité		
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	14	
<b>TOTAL</b>	<b>152,5</b>	

### • Appréciations détaillées

Au sein du DM2S, la thématique "Thermo-hydraulique" est portée par le STMF (Service de Thermohydraulique et de Mécanique des Fluides), dont les compétences portent sur la modélisation des phénomènes physiques et des écoulements générés dans les installations nucléaires (principalement dans les réacteurs nucléaires en situations normales, incidentelles et accidentelles pour des systèmes fluides mono et diphasiques) ainsi que sur les mathématiques appliquées avec une composante génie logiciel pour la simulation. La spécificité du service est de couvrir par une approche multi-échelle l'ensemble des phénomènes intervenant de la méso-échelle jusqu'à l'échelle système. Rappelons que le DM2S dispose donc avec le STMF et le SERMA d'équipes de développement intervenant de façon complémentaire pour réaliser des couplages entre codes de calcul neutronique et thermo-hydraulique, et la liaison entre les échelles locale, cœur et système. Par ailleurs il faut garder en mémoire que le STMF est appelé à regrouper d'ici 2016 sur le centre de Saclay l'ensemble des compétences en thermo-hydraulique, actuellement réparties à Saclay et à Grenoble.



En ce qui concerne la qualité de la production scientifique, le service est à la pointe d'avancées fondamentales dans le domaine de la thermo-hydraulique appliquée au fonctionnement et à la sûreté des réacteurs nucléaires, et ce à différentes échelles considérées comme importantes et désormais tout à fait accessibles. L'analyse bibliométrique indique une bonne production scientifique, si l'on tient compte de la nature du service et de ses missions qui se situent davantage au niveau de la recherche précompétitive qu'à celui de la recherche académique, au service des applications industrielles au plan national et européen. La production scientifique inclut non seulement des articles dans des revues internationales renommées (plus de 180) ou des conférences internationales (en nombre équivalent) mais aussi des rapports techniques internes soumis à confidentialité (plus de 400). Les efforts consentis dans le passé ont conduit au développement de modèles de simulation qui peuvent être aisément qualifiés de premier rang et d'installations expérimentales qui par la suite ont connu un essaimage à l'échelle internationale. Il faut souligner que le niveau de qualité de la production scientifique et technique est naturellement le fait d'un travail de long terme, donc d'ingénieurs-chercheurs seniors mais aussi pour une bonne part de plus jeunes récemment recrutés.

Le rayonnement scientifique du service se traduit par des participations régulières aux congrès majeurs de la discipline (NURETH, ICHS, FVCA, CFD4NRS, INTERPORE, ICONNE) et aux grands projets nationaux (10 projets ANR), internationaux (15 projets européens, 7ème PCRD ; Agence pour l'Énergie Nucléaire, OCDE ; ITER). Nul doute que l'excellence des travaux menés en thermo-hydraulique et en CFD est bien reconnue aux niveaux national et international. L'attractivité du domaine de la thermo-hydraulique nucléaire reste intacte : les problèmes physiques extrêmement importants comme la turbulence dans les écoulements, la transition de phase, les écoulements diphasiques, les interactions fluide-structure attirent toujours les meilleurs spécialistes en mécanique des fluides et des solides. Le nombre important de stages (une quinzaine de stagiaires par an) et de thèses (en moyenne 14 ETP) qui sont dirigés par les membres du service démontre l'attractivité de cette thématique pour les étudiants. Les résultats de recherche sont régulièrement présentés dans des congrès scientifiques et publiés dans des revues internationales de qualité.

Comme on l'a déjà souligné, le STMF entretient des relations étroites avec les organisations nationales et internationales dans le cadre de grands projets collaboratifs et à la demande de donneurs d'ordre industriels. Les recherches développées pour les réacteurs de Génération 2, 3 et 4 confèrent au service une position de prééminence, assurant ainsi à la France le leadership dans ce domaine en Europe. En conséquence, il y a peu de doutes quant à l'impact des recherches poursuivies au sein du STMF au plan national, européen et international. En particulier, le service a un rôle de leader dans le développement, la maintenance et la diffusion d'une famille de codes système (CATHARE) pour l'analyse de sûreté des réacteurs, reconnu par les agences de sûreté nucléaire en France et à l'étranger. Cette famille de codes est tout à fait compétitive par rapport à des modèles similaires à l'international, et ne souffre pas de la comparaison avec ceux-là dans les applications BEPU (Best Estimate Plus Uncertainty). Dans le contexte de l'approche milieux poreux ou de l'approche CFD (DNS, LES et RANS), le STMF développe ou co-développe un ensemble de codes, FLICA, TRIO\_U, NEPTUNE-CFD, CAST3M (et ses applicatifs tels que TONUS), qui permettent de couvrir tous les besoins inhérents aux analyses de sûreté. La compétence du STMF sur l'utilisation d'environnements de codification, de langages informatiques orientés-objet et de méthodes numériques avancées est bien reconnue au niveau national. La démarche systématique mise en place de validation et de vérification (V&V process) des outils développés est le garant de la qualité des produits logiciels. Plus récemment, une démarche multi-échelle numérique associant les différents niveaux de modélisation (DNS vers CFD, CFD vers milieux poreux) a été mise en place et a conduit à des résultats très pertinents.

Les activités expérimentales relèvent d'une longue et permanente tradition au sein du STMF, qui dispose d'installations de grande taille uniques sur les sites de Saclay et de Grenoble. Ces supports expérimentaux ont contribué et contribuent encore à l'amélioration de la connaissance des phénomènes physiques et au développement et à la validation des lois de fermeture implantées dans des codes industriels (CATHARE). L'évaluation des modèles mathématiques, intégrés dans les codes numériques, a porté sur des écoulements diphasiques non structurés et sur les changements de topologie (écoulements à bulles, à bouchons, stratifiés...), cas rarement traités en modélisation. C'est un atout incontournable de ce service. Pour toutes ces réalisations, le rôle des partenaires industriels (AREVA, EDF) a été considérable dans le passé et reste important de nos jours, ce qui témoigne à la fois de l'intérêt de ces outils et de la considération accordée par ces partenaires à la coopération avec le CEA, et en particulier avec le STMF. Toute cette panoplie de modèles, validés par des programmes de recherche menés sur le long terme, mobilisant d'importantes ressources humaines et financières, constitue pour le DM2S une richesse considérable qui peut être déployée et est déployée actuellement en aide à l'analyse de la sûreté des installations nucléaires en France et à l'étranger. De par l'importance de l'impact sociétal d'une telle question, cruciale à l'heure actuelle, ce savoir-faire peut être considéré comme unique, et, à la date, représente ce qu'il y a de mieux de disponible. Le résultat mérite bien l'effort consenti. Ce savoir-faire doit être préservé et enrichi.



L'impact socio-économique et culturel des modèles thermo-hydrauliques développés ces dernières années ne fait aucun doute. Le maintien de ce niveau de connaissance constitue néanmoins un point critique, notamment au moment du transfert de compétences du site de Grenoble au site de Saclay. Il y a là un risque certain, qui a déjà été évoqué. Il ne faut pas que l'interaction "théorie-expérience" soit perdue pendant la transition Grenoble - Saclay, ce qui suppose de maintenir un volant suffisamment important d'activités expérimentales. Il en va de même pour la démarche multi-échelle numérique engagée plus récemment. Par ailleurs, la dynamique imposée pour le transfert des personnels risque d'être beaucoup plus brutale que celle induite par l'évolution naturelle liée à la pyramide des âges. Une question cruciale concerne également l'exploitation des installations expérimentales qui risque d'être fortement impactée.

En ce qui concerne l'organisation et la vie du service, les moyens mis à disposition des personnels semblent en général appropriés et satisfaisants. Le couplage en modélisation physique (thermo-hydraulique diphasique, couplage neutronique-thermo-hydraulique, fluide-structure) impose un travail en équipe pluridisciplinaire. L'expérience montre que les spécialistes issus de domaines scientifiques différents ont parfois du mal à se comprendre. Ici, il semble que les approches multidisciplinaires ont pu être menées à bien et que donc « l'esprit d'équipe » a bien prévalu. On peut cependant relever que certaines « transversalités » pourraient encore être améliorées (en moyens de diffusion de l'information intra-service et inter-services au sein du département, et aussi pour le partage de compétences transversales en outils numériques).

Pour ce qui relève de l'implication dans la formation par la recherche, le STMF a une longue tradition d'accueil d'étudiants de Masters et de doctorants, français et étrangers, sur les deux sites, Saclay et Grenoble. Cette tradition semble préservée actuellement et le niveau de satisfaction des étudiants rencontrés est grand. Les opportunités professionnelles offertes aux étudiants sont importantes. En particulier, le CEA-INSTN fait partie et est d'ailleurs membre fondateur du réseau appelé European Nuclear Education Network ; cela contribue à impliquer naturellement le service dans les actions de formation à l'échelle européenne ; notamment les étudiants étrangers inscrits en Masters peuvent voir leur stage validé par une certification européenne, the European Master of Science in Nuclear Engineering (EMSNE), attribuée par l'Association ENEN (European Nuclear Education Network), d'où une réelle attractivité des étudiants de Masters. L'attractivité est tout aussi bonne pour les doctorants.

La stratégie à cinq ans du STMF s'inscrit naturellement dans la continuité des développements réalisés les années passées : il s'agit d'une stratégie d'excellence au service du développement d'outils multiphysiques de simulation des écoulements de fluides complexes et du couplage permettant de traiter les aspects multi-échelle et les problèmes d'interaction fluide-structure, neutronique - thermo-hydraulique. La pertinence de l'approche proposée, multi-échelle numérique de la thermo-hydraulique des réacteurs, est étroitement liée au choix et à la maîtrise des modèles mathématiques qui sont ensuite implantés dans les codes numériques. Parallèlement, des modèles mathématiques de nouvelle génération devront être évalués pour être introduits progressivement dans les codes existants ou dans de nouveaux codes, afin de couvrir la gamme la plus large possible d'applications. Etant donné l'ambition et les enjeux théoriques, mathématiques et informatiques de cette démarche, des collaborations renforcées devront être engagées avec de nouveaux partenaires académiques, notamment pour les aspects de simulation directe d'écoulements diphasiques ou d'interaction fluides-structures.

De fait, la constitution du Pôle Paris-Saclay ouvre des perspectives tout à fait intéressantes et prometteuses pour le DM2S. Le comité souhaite néanmoins attirer l'attention sur les points suivants :

Le transfert de compétences du site de Grenoble (et Cadarache) à Saclay implique un grand nombre de personnes (de l'ordre de 50), qui doivent être remplacées dans un délai très court, ce qui fait courir un risque de perte de mémoire et de connaissance (par exemple en matière d'approche théorique, de modélisation physique, de maîtrise des codes et de techniques expérimentales). Bien que l'ensemble du département ait bien pris la mesure du risque encouru et de l'impact de cette décision de regroupement d'activités, le succès de cette opération n'est pas réellement assuré, surtout au niveau d'excellence attendu. La perte de compétence pourrait conduire finalement à un déclassement dramatique aux niveaux national et international, voire même à l'abandon de certains pans de l'activité du STMF, malgré leur importance et pertinence industrielles.

La focalisation du partenariat académique avec l'Université Paris-Saclay devrait certes faciliter les interactions entre les acteurs locaux, mais, peut-être si l'on n'y prête garde, au détriment de l'implication du DM2S dans des projets avec les autres partenaires nationaux et internationaux et rendre par conséquent plus difficiles les collaborations durables avec d'autres centres académiques, ce qui serait à terme contreproductif.



## Conclusion

### ▪ *Avis global sur le thème :*

Il est clair que le STMF présente un potentiel unique issu du regroupement de deux écoles, l'une à Grenoble dans le domaine du développement de lois de fermeture et de codes industriels en thermo-hydraulique, s'appuyant sur un programme expérimental exceptionnel, et l'autre à Saclay dans le domaine de la modélisation mathématique et de la simulation numérique d'écoulements à physique complexe. Le STMF est un service unique, reconnu pour ses compétences en thermohydraulique des réacteurs avec des possibilités de transversalités très larges du fait de la cohabitation au sein du DM2S des deux autres services, le SEMT (pour l'aspect interaction fluide-structure) et le SERMA (pour le couplage neutronique-thermohydraulique). Le STMF jouit d'une longue et fructueuse tradition de partenariats industriels (AREVA, EDF).

### ▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

Parmi les points forts de la thématique, on relève principalement :

- l'expérience acquise dans le domaine de la modélisation 3D à l'échelle du composant avec le développement d'un code de référence au niveau international (CATHARE) ;
- la maîtrise avancée d'une famille de codes de type CFD, développés en interne ou en partenariat ;
- le développement d'une démarche multiéchelle numérique, s'appuyant sur le chainage des outils de simulation ;
- l'utilisation de techniques de pointe pour le déploiement HPC (High Performance Computing) ;
- la compétence en expérimentation, sur des installations couvrant toutes les échelles, du prototype à l'échelle du réacteur.

Il faut également ajouter à cela les activités liées au processus de validation et vérification (V&V process) des codes, en lien avec le développement et l'exploitation d'installations expérimentales de tout premier plan.

L'interaction entre le STMF et les deux autres services (neutronique et mécanique) au sein d'un même département représente un réel atout qu'il y a lieu de valoriser.

### ▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

Parmi les points faibles ou à améliorer, la transversalité entre les trois services du DM2S devrait être renforcée afin de rendre les échanges d'expertise et d'outils plus effectifs et de mettre à profit tout le potentiel de coopération.

Il existe un risque important pour le développement de la thématique, en particulier vers l'approche multi-échelle, voire pour le maintien du niveau de compétence (code CATHARE), lié au transfert de l'activité du site de Grenoble sur le site de Saclay. Une question cruciale concerne notamment le déménagement puis l'exploitation des installations expérimentales sur le site de Saclay.

Dans cette phase de restructuration, avec un fort renouvellement des personnes et une focalisation sur un seul site, le STMF risque d'être fragilisé dans son rôle de référent national en thermo-hydraulique des réacteurs, rôle qu'il se doit d'assurer vis-à-vis de la communauté industrielle et académique.

### ▪ *Recommandations :*

Dans la phase délicate de transition du transfert Grenoble-Saclay, le comité suggère au STMF de s'appuyer sur ses partenaires industriels ou académiques pour accompagner dans la durée la montée en compétence des nouveaux personnels qui seront amenés à être recrutés.

Il est recommandé de maintenir un effort significatif dans le domaine expérimental au sein de projets associant des approches théoriques et numériques pour le développement de la compréhension des phénomènes physiques majeurs et/ou la validation des outils applicatifs.



Le comité d'experts encourage le STMF à poursuivre le développement de la modélisation par remontée d'échelle, dont les premiers résultats sont particulièrement pertinents (modélisation des termes de diffusion-dispersion dans les milieux poreux, transferts aux interfaces libre-poreux).

Le comité d'experts encourage la poursuite du développement du couplage numérique multi-physique (neutronique - thermohydraulique, fluide-structure, ...) et multi-échelle en s'appuyant sur la généralisation du HPC et la mise en œuvre de méthodes mathématiques plus performantes.

Pour améliorer la qualité de la transversalité, le comité préconise le renforcement de la collaboration avec le milieu scientifique universitaire, spécialiste de problèmes multi-échelle et multi-physique.

Enfin, il est recommandé que les liens naturels avec l'ENEN (European Nuclear Education Network) continuent à être entretenus, notamment en publiant régulièrement les offres de stages, de thèses et de post-docs.



## 5 • Déroulement de la visite

### Dates de la visite

Début : 14 Janvier 2014 à 12h00

Fin : 16 Janvier 2014 à 15h00

### Lieu de la visite

Institution : CEA Centre de Saclay DEN/DANS/DM2S

Adresse : Bâtiment 454, 91191 Gif-sur-Yvette

### Locaux spécifiques visités :

Mur d'images, Bâtiments STMF et SEMT

### Déroulement ou programme de visite

#### *Mardi 14/01/2014*

12h-13h30	Déjeuner d'accueil (Salon Rotonde CEA Saclay)
13h30-14h	Huis-clos du comité d'experts
14h-16h30	Présentations générales (mur d'images DM2S) Présentation de la DEN - organisation (D. de PRUNELE) Présentation de la DANS (S. PIVET) Présentation DM2S (C. CAVATA, A. NICOLAS) Illustrations de quelques activités transverses Film réacteur numérique (C. CALVIN) Présentation « les mathématiques appliquées au DM2S » (J. SEGRE) Présentation Uranie + méthodologie Incertitudes (J. M. MARTINEZ)
16h30-17h00	Pause-café
17h00-18h00	Réunion du comité d'experts (huis-clos)
18h00	Fin de la première journée.



*Mercredi 15/01/2014*

8h30-12h30	Thème « thermohydraulique » (mur d'images) Présentation du STMF (B. FAYDIDE) Modélisation multi-échelle en Thermohydraulique (D. JAMET) Présentation choc froid - Système et CFD (P. COSTE) Pause : 30mn Film ULOF (couplage multi-échelle) et/ou AGATE (HPC et CFD) (S. LI et U. BIEDER) Présentation Risque H2 -Dispersion et combustion (E. STUDER) Visite MISTRA (J. BRINSTER)
12h30-13h30	Buffet
13h30-17h30	Thème « mécanique » (salle 40, Bâtiment 607, plateforme RESEDA) Présentation du SEMT (X. AVERTY) Durée de fonctionnement et intégrité du circuit primaire (Y. KAYSER & O. DOYEN) IFS : vibrations sous écoulement et EPX (T. LAPORTE) Pause : 20mn Etude de la vulnérabilité sismique des ouvrages et des équipements : (I. POLITOPOULOS & C. FEAU) Visite de Reseda (Y. KAYSER & T. LAPORTE)
17h30-18h30	Réunion du comité d'experts (huis-clos)
18h30	Fin de la deuxième journée.

*Jeudi 16/01/2014*

8h15-11h30	Thème « neutronique » (mur d'images) Présentation du SERMA (P. Blanc-Tranchant) Action "upscattering": amélioration du calcul de l'effet Doppler, (F. DOLCI) Méthodologies innovantes & multiphysique, (F. DAMIAN) Pause : 15mn Actions de soutien aux installations (M. SOLDEVILA, F. MALOUCH, E. GAGNIER) Film RIA (P. BLANC-TRANCHANT ou A. AGGERY)
11h30-12h00	Entretien avec les doctorants du DM2S (ou représentants)
12h00-12h30	Entretien avec les personnels du conseil d'unité (ou représentants)
12h30-13h	Entretien final avec l'équipe de direction
13h-15h	Déjeuner de travail du comité d'experts à huis-clos (Salon rotonde ou plateaux repas)



15h

Clôture de la visite par le président

Départ du comité d'experts

### Points particuliers à mentionner

Le comité d'experts a apprécié les excellentes présentations, la qualité des informations et l'intérêt des documents fournis en support de l'évaluation, les réponses apportées aux questions ainsi que les engagements pris quant aux compléments d'information à apporter. La forte présence des équipes et le souci de répondre avec précision aux questions du comité témoignent d'un réel enthousiasme et du niveau de compétence au sein du DM2S.



## 6 • Observations générales des tutelles

CEA/DEN/DIR  
DO 150 23/07/14



14MMAC000159

diffusé le : 23/07/14

Monsieur Pierre GLAUDES  
Directeur de la section des unités  
de recherche  
AERES  
20 rue Vivienne  
75002 Paris

Saclay, le 23 juillet 2014

*Objet : Rapport d'évaluation AERES du DM2S*

*P.J. : Corrections factuelles mineures*

Monsieur,

Le rapport de l'AERES d'évaluation du Département de Modélisation des Systèmes et des Structures, dans la droite ligne des échanges que nous avons eus, constitue une analyse enrichissante du positionnement et de l'activité de notre département dans le monde de la recherche appliquée.

Nous avons apprécié le constat global fait par le Comité sur la qualité des travaux conduits au DM2S dans le domaine de la physique des réacteurs et de la mécanique, tant pour la modélisation physique et la simulation numérique que pour l'aspect expérimental, considérés tout à fait comme à l'état de l'art, aux niveaux national et international.

Rejoignant l'avis de l'AERES, le DM2S définit son action avec un haut niveau d'exigence de telle façon que dans tous ces domaines, il demeure un acteur de premier plan. A cet égard nous considérons l'ensemble des recommandations du Comité comme un outil précieux.

Nous avons bien noté la recommandation de l'AERES d'améliorer encore la notoriété des travaux du DM2S par :

- l'augmentation des publications dans les revues à comité de lecture ;
- de nouvelles coopérations avec des partenaires prestigieux à l'international ;
- l'émergence d'une nouvelle génération d'experts internationaux.

Conscient de la pertinence de cette recommandation, le Département poursuivra les actions engagées dans ces trois directions malgré les contraintes budgétaires ne favorisant pas cette démarche.

././

La pratique dans les métiers du DM2S de favoriser les participations aux conférences de la communauté sera ainsi complétée par des incitations à privilégier celles dont les actes étendus sont publiés dans des revues à comité de lecture.

La recherche de nouveaux partenariats qu'ils soient à l'international ou en France est une action de fond qui sera poursuivie. Récemment elle s'est traduite par exemple par la réactivation de la coopération avec JAEA au Japon ou le développement aux USA d'une collaboration avec LLNL sur le Monte Carlo naturel en neutronique et la mise en place d'une collaboration avec le MIT dans le domaine de la modélisation des écoulements diphasiques à l'échelle DNS.

L'éclosion de nouveaux experts internationaux est un des objectifs poursuivis par le DM2S. Il s'agit d'une action sur le long terme qui passe notamment par une incitation marquée au passage de HdR. Avec 3 Habilitations déjà passées en 2014, 6 prévues dans les 18 prochains mois et l'attribution cette année à un ingénieur du DM2S/SERMA du prix SFEN Jacques Gaussens récompensant un chercheur de moins de 35 ans, le DM2S récolte les premiers fruits de cette démarche.

Enfin, l'implication dans les comités scientifiques et/ou d'organisation des conférences internationales continuera à être encouragée, l'organisation par le DM2S de SNA & MC 2014 en est un exemple marquant.

Nous avons noté la recommandation du Comité de renforcer les transversalités dans le Département, en particulier concernant le partage des méthodes numériques. Bien que des transversalités existent naturellement dans le cadre d'actions partagées entre les services sur des projets mettant en œuvre des modélisations multi-physiques vers les partenaires industriels (interaction fluide-structure (IFS), bruit neutronique, projets orientés Défense), le DM2S renforcera ces échanges, notamment pour le numérique, via des collaborations communes avec certains partenaires académiques et des séminaires du Département.

### **Pour la neutronique**

Nous avons bien noté la recommandation faite par le Comité d'améliorer la diffusion au niveau international de certains outils neutroniques comme TRIPOLI ou APOLLO. Il s'agit là d'une préoccupation déjà forte du SERMA en soulignant toutefois, concernant les outils déterministes, les possibilités forcément restreintes en la matière liées au cadre partenarial dans lequel ces outils sont développés. Malgré cela, on pourra noter, qu'à des fins de R&D, APOLLO2 a pu être mis à disposition des différents partenaires européens impliqués dans le projet de développement d'une plate-forme d'outils de simulation pour la physique des réacteurs NURESIM, et de ses suites NURISP et NURESAFE. TRIPOLI4® est quant à lui de fait déjà largement distribué à l'international, via l'OCDE/AEN ou plus largement dans le cadre ITER (Chine, Inde...), pour la réalisation de calculs à sources fixes. Des perspectives importantes apparaissent par ailleurs avec le formulaire CRISTAL dédié à la criticité, qui embarque notamment APOLLO2 et TRIPOLI4®, et dont la version V2 sera disponible à l'international, via l'AEN, à partir de la fin d'année. Sur la base de ces éléments, les efforts du SERMA visant à renforcer la diffusion de ses outils de simulation seront poursuivis et amplifiés dans l'avenir.

..!..

Nous avons noté par ailleurs l'incitation forte à développer les relations avec l'autre centre de compétences de la DEN dans le domaine neutronique, à Cadarache. Ces relations sont aujourd'hui déjà importantes : le projet de simulation neutronique de la DEN (dont le DM2S est département pilote) est partagé pour 2/3 à Saclay et 1/3 à Cadarache, et de nombreux sujets (développement et applications d'APOLLO3®, pour les RNR-Na notamment, études sur les innovations dans les réacteurs à eau, travaux portant sur la vérification et la validation des codes ou sur les données nucléaires et leur traitement,...) permettent des échanges étroits et nourris. Ces relations se déclinent également en termes de vision stratégique avec, par exemple, une implication du DM2S dans le groupe de travail mis en place pour la définition de la nouvelle maquette critique ZEPHYR. Partageant toutefois l'avis que ces relations sont cruciales et se développeront au bénéfice à la fois du CEA et de ses partenaires et clients, le DM2S cherchera à les renforcer dans l'avenir.

Le DM2S partage totalement le constat porté sur la nécessité de *« définir des priorisations en période de contraintes budgétaires et de sensibiliser les industriels sur un ou des projets ambitieux sur le long terme sur lesquels il serait bon d'anticiper des développements, éventuellement de longue haleine, pour contribuer à faire progresser la simulation, en support à un objectif de fonctionnement sûr du parc nucléaire national »*. Si le SERMA dispose en effet d'une vision établie sur les besoins de renforcement et d'amélioration de la simulation numérique en neutronique, déclinée en axes de travail clairement identifiés, les contraintes budgétaires actuelles et le manque de partage de leur vision stratégique de la part des partenaires industriels de ce domaine, notée par le Comité, font que les échéances associées à la concrétisation de ces ambitions sont difficiles à préciser. Conscient de ces difficultés et de la nécessité de préparer l'avenir, au-delà des réponses aux besoins opérationnels de court terme, le SERMA priorise toutefois quelques grands sujets sur lesquels il cherche à sensibiliser ses partenaires industriels afin que davantage de moyens puissent leur être consacrés. On pourra notamment citer dans ce cadre l'ambition du calcul déterministe de cœur en une étape, dont le SERMA poursuivra dans l'avenir la promotion auprès de ses partenaires.

Enfin, concernant le constat porté sur les méthodologies d'optimisation multicritères, dont le Comité perçoit que *« si elles ont bien été identifiées dans les objectifs généraux [...] (elles) ne semblent plus faire partie des axes de travail privilégiés »*, il est important de souligner qu'il s'agit là d'un sujet très actif au SERMA depuis plusieurs décennies, avec une volonté de progrès et de renforcement continu, via l'utilisation aujourd'hui de la plateforme URANIE développée au DM2S. Cette volonté est notamment illustrée avec une thèse en cours, consacrée à des travaux sur ces méthodes d'optimisation appliquées pour la conception d'un réacteur RNR-Na.

#### **Pour la mécanique et la thermique**

Nous avons noté la recommandation du Comité de renforcer la visibilité à travers des collaborations ciblées, des partenariats prestigieux, en particulier dans le domaine du séisme. En ce sens, des projets sont en discussions dans le cadre de l'appel à projet H2020 au niveau européen pour l'ensemble des activités du SEMT. Dans le cadre du séisme, des initiatives sont prises pour échanger et proposer des collaborations au-delà du cercle de l'Europe.

..!..

Concernant le comportement vibratoire des faisceaux de tubes, nous avons noté l'incitation du comité à élaborer un outil prédictif du comportement en vibration puis usure de ce type de composant. En ce sens, des travaux sont actuellement en cours au DM2S afin d'améliorer une chaîne de calcul écoulement – vibration – usure déjà existante (« GENEPI-GERBOISE » exploitée par AREVA). Ils font d'ailleurs l'objet d'un projet dédié dans le cadre de l'Institut Tripartite (AREVA-CEA-EDF) récemment créé.

Nous avons noté le point de vigilance indiqué par le Comité d'évaluation sur la pyramide des âges fortement déséquilibrée du SEMT. Une attention particulière y est portée par la direction du service et du département, et est un des moteurs dans les propositions de plans emplois annuels.

Concernant la modélisation numérique du soudage, nous notons le besoin de clarification sur la stratégie du laboratoire de technologie d'assemblage. Le choix a été fait lors de l'évaluation orale de ne présenter que les travaux autour de simulations Thermo-Métallurgique-Mécaniques. Ceux-ci ne couvrent qu'une partie des activités du laboratoire concerné. L'objectif général est en effet d'améliorer l'intégrité des structures soudées par une prise en compte réaliste des procédés du soudage. Cela suppose une simulation multi-physique du procédé, la simulation des effets thermomécaniques induits et la simulation des conséquences de ces effets sur l'intégrité des structures. Ces trois thématiques sont traitées par le laboratoire et intègrent à la fois des activités à vocation applicative et d'autres de recherche et développement innovantes (modélisation thermique-métallurgique-mécanique chaînée à des analyses d'intégrité par exemple). Pour ceux-là, le choix a été fait d'utiliser le code de recherche et développement Cast3M qui offre des fonctionnalités plus nombreuses (possibilité et maîtrise de développements nouveaux, facilité d'introduction de nouvelles lois de comportement et de nouveaux modèles, couplages multiples, ...), comparativement au logiciel Sysweld, à finalité plus industrielle.

### **Pour la thermohydraulique**

Nous avons pris connaissance avec le plus grand intérêt de l'évaluation du Comité sur la problématique du regroupement des activités de thermohydraulique à Saclay. Nous avons noté que l'AERES, remarquant que « *la localisation au sein d'une même entité de l'ensemble des briques du domaine, procède d'une cohérence certaine et constitue une opportunité d'optimisation et de progrès pour l'élaboration de plates-formes multi-physiques et multi-échelles* », a jugé cruciale, notamment du point de vue socio-économique et culturel, la réussite de cette transition. Rejoignant l'analyse du Comité sur les risques associés à cette démarche, le DM2S, ainsi qu'il a été noté dans le rapport de l'AERES, s'est pleinement engagé pour le succès de cette opération. Cela s'est traduit, depuis 2012 par :

- une campagne de recrutements très active conduisant à l'intégration jusqu'à présent de 31 personnes, tant jeunes ingénieurs-chercheurs qu'experts reconnus du domaine ;
- une activité de formation multiforme comme des sessions spécifiques à l'INSTN, des séminaires du STMF (modélisation physique dans CATHARE, modèles de turbulence pour les écoulements monophasiques ou diphasiques), des travaux en binôme entre porteurs de la compétence et jeunes recrutés permettant de coupler formation et réponses aux besoins des partenaires ;
- le démarrage des travaux d'aménagement des bâtiments à Saclay pour l'accueil des personnels et des équipements ;

...

- des appréciations très positives de la part de partenaires sur des travaux pilotés majoritairement par de jeunes recrutés.

Conscient de la tâche encore à accomplir, le DM2S veillera au maintien des moyens nécessaires à la conduite de ce transfert.

Nous avons noté la recommandation du comité d'engager une action d'évaluation de nouveaux modèles mathématiques afin d'enrichir les codes de thermohydraulique, dans un souci de robustesse et d'élargissement des domaines d'application. En phase avec cet avis, le DM2S a entrepris une telle action, de façon transverse aux différentes échelles de modélisation, en abordant aussi bien les aspects mathématiques que purement numériques. Ce travail est mené en collaboration avec nos partenaires académiques « traditionnels » (LRC Manon) mais également en envisageant de nouveaux partenariats (par exemple : Texas A&M University).

Nous avons relevé que, concernant les installations et maquettes expérimentales dédiées à la thermohydraulique diphasique et à la mécanique des fluides, le Comité constate qu'elles « sont connues aux niveaux national et international et utilisées pour la validation des codes de calcul associés ». Cependant nous prenons note de la recommandation d'initier des collaborations avec d'autres organismes, en particulier internationaux, afin de partager les coûts dans le domaine de la qualification expérimentale sur maquettes et boucles d'essai. Il s'agit d'une démarche de longue haleine dans laquelle le DM2S s'engagera avec détermination.

En conclusion, l'évaluation par l'AERES du DM2S a fourni aux équipes de ce département l'opportunité de se mobiliser pour réaliser une auto-analyse structurante dont l'impact fédérateur est à souligner.

Je souhaite remercier la commission d'évaluation de l'AERES et son président Monsieur Raphael Assedo, pour son analyse fine et exhaustive des activités du DM2S, ainsi que le professeur Christophe Gourdon qui a assuré son rôle de délégué scientifique avec rigueur et efficacité.

Je vous prie d'agréer, Monsieur, l'expression de mes salutations distinguées.



Christophe BEHAR