

# Matériaux pour les réacteurs de fusion nucléaire : Problèmes fondamentaux

**21-22 novembre 2007**

*Fondation Simone & Cino del Duca, 10 rue Alfred de Vigny, 75008 Paris*

Séminaire de l'Académie des sciences organisé avec le soutien  
du CEA-DEN (Saclay) et CEA-DRFC (Cadarache), et du GdR-PAMIR (CEA-CNRS)

## Programmes Résumés et liste des participants

### Comité scientifique

Jacques Friedel, Edouard Brézin, Robert Dautray, Jean Dercourt,  
Guy Laval, Yves Quéré, Jean Salençon de l'Académie des sciences

### Comité d'organisation

Georges Martin (CEA), Serge Bouffard (CEA), Jean-Louis Boutard (EFDA),  
Robert Guillaumont (Académie des sciences), André Zaoui (Académie des sciences)



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences



# **PROGRAMME**

## Mercredi 21 novembre 2007

### **Matinée sous la présidence de Y. Quéré**

- 9h-9h15      **Ouverture du colloque**  
J. Friedel
- 9h15-9h30    **Introduction**  
G. Laval
- 9h30-9h45    **Message du Haut Commissaire à l'Energie Atomique**  
B. Bigot
- 9h45-10h05   **Fusion thermo-nucléaire et matériaux**  
G. Marbach
- 10h05-10h30   *Pause*
- 10h30-10h55   **Problématiques de matériaux de composants face aux plasmas pour ITER et le réacteur**  
A. Grosman
- 10h55-11h20   **Discussion**
- 11h20-11h45   **Problèmes spécifiques aux matériaux pour les réacteurs de fusion**  
J.-L. Boutard
- 11h45-12h10   **Discussion**
- 12h10-13h40   *Buffet*

### **Après-midi sous la présidence de G. Zerah**

- 13h40-14h00   **Physique des matériaux sous irradiation**  
G. Martin
- 14h00-14h15   **Isolants inorganiques sous irradiation : problèmes spécifiques**  
Y. Limoge
- 14h15-14h45   **Discussion groupée sur les deux exposés**
- 14h45-15h05   **Interaction particule/matière (Modèles & installations expérimentales)**  
S. Bouffard
- 15h05-15h30   **Discussion**
- 15h30-15h50   *Pause*
- 15h50-16h10   **Stabilité et mobilité des défauts, amas et complexes**  
F. Willaime
- 16h10-16h35   **Discussion**
- 16h35-17h00   **Cinétiques contrôlées par la diffusion**  
M. Nastar
- 17h-17h25     **Discussion**
- 17h25-18h     **Discussion générale**

## Jeudi 22 novembre 2007

### **Matinée sous la présidence de A. Zaoui**

- 9h-9h25**      **Microstructures sous irradiation**  
**A. Barbu**
- 9h25-9h50**      **Discussion**
- 9h50-10h15**      **Plasticité et irradiation**  
**Y. Brechet, D. Rodney, M. Fivel**
- 10h15-10h40**      **Discussion**
- 10h40-11h*      *Pause*
- 11h-11h25**      **Ténacité, résilience : rupture des aciers martensitiques à haut chrome**  
**B. Marini**
- 11h25-11h50**      **Discussion**
- 11h50-12h15**      **Fragilisation par l'hélium (à haute et basse température)**  
**J. Henry**
- 12h15-12h40**      **Discussion**
- 12h40-14h00*      *Buffet*

### **Après-midi sous la présidence de J.-P. Poirier**

- 14h00-14h25**      **Etudes fondamentales de matériaux face au plasma : le cas du carbone**  
**P. Roubin**
- 14h25-14h50**      **Discussion**
- 14h50-15h15**      **Métallurgie des ODS**  
**Y. Brechet**
- 15h15-15h40**      **Discussion**
- 15h40-15h55*      *Pause*
- 15h55-16h20**      **Intérêt et limitations des modélisations multi-échelle pour prévoir le comportement sous irradiation des aciers des composants des réacteurs à eau sous pression**  
**J.- P. Massoud**
- 16h20-16h45**      **Discussion**

### **Conclusion sous la présidence de R. Dautray**

- 16h45-17h15**      **Discussion générale et Conclusions**  
**Bilan**  
**G. Martin**

**CONCLUSION GENERALE : JEAN DERCOURT**



# RÉSUMÉS

# Fusion thermo-nucléaire et matériaux

**Gabriel MARBACH**

CEA, DSM, DRFC

## 1. Introduction

Les spécificités de la réaction de fusion ont un impact particulier sur son environnement. Les composants face au plasma par exemple sont soumis à la fois aux radiations et aux particules provenant du plasma. Les matériaux de structure sont soumis à l'effet de neutrons très énergétiques (14MeV) produisant par réaction nucléaire de l'hélium et de l'hydrogène en quantité nettement plus importante que pour les réacteurs de fission. Considérant ces conditions particulières, des activités de recherche et développement dédiées aux matériaux sont en cours dans le cadre du programme européen sur la fusion.

## 2. Composants face au plasma

Dans la majorité des machines actuelles, le carbone est le matériau utilisé comme composant face au plasma. Cependant, celui-ci présente des propriétés d'érosion et de rétention des isotopes d'hydrogène incompatibles avec le fonctionnement d'un réacteur électrogène (longue durée en tritium). Dans ITER le choix de matériaux face au plasma est en cours de discussion mais dans la version de référence actuelle conserve des éléments en carbone, en particulier pour les composants soumis aux flux thermiques les plus importants. Un des objectifs d'ITER est de développer et expérimenter les matériaux acceptables pour les réacteurs du futur.

Un autre enjeu technologique consiste à valider les techniques d'assemblage des matériaux (Be, Cu, CFC, W...) qui composeront les composants face au plasma, et seront en charge d'extraire d'importants flux thermiques (entre 10 et 20 MW/m<sup>2</sup> dans le divertor d'ITER).

## 3. Couvertures tritigènes et matériaux de structure

Pour ITER le matériau de structure est un acier austénitique connu et qualifié de type 316 LN. Au-delà d'ITER, le matériau de structure devra être compatible avec la fluence neutronique (> 100 dpa) à une température suffisante pour obtenir un bon rendement.

Par ailleurs, les déchets de la fusion étant uniquement liés à l'irradiation des neutrons, l'objectif pour ce matériau est une décroissance radioactive forte à une échelle de 100 ans.

Le matériau actuellement envisagé en Europe est un acier martensitique avec des éléments qui s'activent peu sous irradiation. Cette nuance dite EUROFER est en cours de test sous flux rapide. Un objectif plus lointain est de faire appel à des alliages avec dispersion d'oxyde ou à des céramiques (SiC-SiC). Pour ce qui est des couvertures tritigènes, la conception doit associer les matériaux tritigènes (céramiques lithiées ou alliage lithium plomb), le système de refroidissement (hélium) ainsi qu'une structure suffisamment rigide pour être compatible avec les cas de chargement.

Les enjeux technologiques associés comprennent également la définition d'une technique d'assemblage. Pour les modules tests qui seront expérimentés dans ITER la compression isostatique à chaud est actuellement la seule technique répondant à l'ensemble des contraintes (technique développée par le CEA/DRT).

De manière encore plus générale, l'enjeu fondamental des matériaux pour la fusion est d'être adapté à tous les stades (aux contraintes complexes et variées) du cycle de vie des composants depuis la fabrication jusqu'au démantèlement

# Problématiques de matériaux de composants face aux plasmas pour ITER et le réacteur

**André GROSMAN**

Direction des Sciences de la Matière / Département de Recherches sur la Fusion Contrôlée  
Association Euratom-CEA - CEA Cadarache F-13108 Saint Paul Lez Durance

Les spécifications fonctionnelles des composants face au plasma dans les réacteurs de fusion sont particulièrement exigeantes. Elles se manifestent déjà à ce niveau dans ITER et le seront encore plus dans un réacteur électrogène. Ils doivent en effet permettre de supporter l'interaction avec des plasmas susceptibles de délivrer des flux qu'on cherchera à limiter à 20 MW/m<sup>2</sup> dans ITER. Ces flux sont principalement portés par des particules chargées et en particulier par des ions animés de quantités de mouvement significatives. Ceci a de nombreuses conséquences opérationnelles pour ce qui est de l'érosion des composants, du « recyclage interne » du combustible nucléaire dans le plasma, et de sa contrepartie en termes de rétention de ce combustible par la paroi. Le bombardement neutronique a en général des conséquences modérées dans ITER, mais ce ne sera plus le cas dans un réacteur. Les composants sont également des objets technologiques dont les contraintes d'assemblage peuvent mettre en exergue des propriétés spécifiques des matériaux ; ceci provient principalement de la nécessité de dédier une partie du composant à l'interaction plasma paroi et une autre à la réponse aux spécifications thermomécaniques.

Les mécanismes fondamentaux mis en jeu sont :

- La pulvérisation physique du matériau sous bombardement ionique, qui est assez bien comprise pour des matériaux purs. S'y ajoute, pour certains, des phénoménologies de type chimique sous flux d'hydrogène, carbone ou oxygène, ces deux derniers étant des impuretés intrinsèques assez communes dans les plasma de tokamaks
- Les mécanismes décrivant l'évolution des ions hydrogène en interaction avec la paroi (réflexion vers le plasma, processus variés de diffusion et de piégeage dans le matériau)

Une difficulté particulière proviendra de la nécessité de prendre en compte les modifications du matériau sous bombardement plasma et neutronique. Une autre est liée à la grande difficulté à spécifier précisément les charges imposées par le plasma, qui fait l'objet d'études spécifiques pour une meilleure compréhension voire même pour un meilleur contrôle.

Les matériaux encore envisagés pour faire face au plasma sont en nombre restreint, puisqu'ITER n'envisage que le béryllium, le carbone et le tungstène. Pour les phases postérieures et en particulier pour le réacteur, les spécialistes n'envisagent à ce jour que le tungstène, si on exclut des solutions plus exotiques comme l'utilisation directe de lithium liquide. Le tungstène est un matériau très délicat à mettre en œuvre et qui réclamera un développement conséquent.

# Problématiques spécifiques aux matériaux pour les réacteurs de fusion

Jean-Louis BOUTARD

EFDA-CSU Garching, Boltzmannstrasse 2, D-85748 Garching bei München (G)

Les matériaux pour les réacteurs de fusion seront soumis au flux intense des neutrons de 14 MeV de la fusion Deutérium – Tritium (D-T). Dans le projet de réacteur de démonstration, DEMO, le matériau de première paroi devrait subir une dose minimale de 50 Déplacements Par Atome (dpa). Les sections efficaces ( $n, \alpha$ ) et ( $n, p$ ) conduiront à une production d'hélium et d'hydrogène de  $\sim 12$  et  $\sim 45$  appm/dpa respectivement. Les déplacements par atome sont équivalents à ceux subis par les matériaux de structure de l'élément combustible d'un réacteur de fission à neutrons rapides, où les transmutations sont cependant moindres,  $\sim 0.3$  appmHe/dpa par exemple, dues à une énergie plus faible des neutrons de fission, typiquement  $\sim 2$  MeV. L'irradiation des neutrons de fusion affectera fortement la structure cristalline, les liaisons et composition chimiques ainsi que la microstructure, soit les trois grandeurs qui contrôlent les propriétés d'usage des matériaux.

En l'absence d'une source intense de neutrons de fusion D-T, les effets d'irradiation sont simulés par des irradiations en réacteurs de fission, en cible de spallation ou par faisceaux de particules chargées. Dans le futur, la source IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility), en cours d'étude, devrait fournir un spectre proche mais pas identique à celui de la fusion D-T car les neutrons y seront produits par des réactions de « stripping » de deutons de 40 MeV sur des noyaux de lithium. Les spectres de Primary Knocked-on Atoms (PKA) ou Premiers Atomes Frappés (PAF), les régimes de cascades et sous-cascades de déplacements de ces installations seront présentés. En dépit d'un spectre de PAF décalés vers les fortes énergies de recul, des expériences de recuits de dommage dû à des neutrons de 14MeV montrent que les défauts ponctuels et amas issus du recuit des cascades et sous-cascades présentent les mêmes stades que ceux obtenus à partir d'irradiation en spectre de fission.

L'effet de l'instabilité de phase sous irradiation sur les propriétés mécaniques sera discuté dans le cas particulier bien étudié de la décomposition  $\alpha/\alpha'$  des aciers ferritiques/martensitiques. Les différentes méthodes d'études de l'effet de la production d'hélium et de son agglomération avec les lacunes sur le durcissement et la fragilisation seront présentées dans le cas des aciers martensitiques à 9% Cr. Finalement la possibilité de gonflement des aciers ferritiques/martensitiques sous spectre de neutrons fusion sera discutée.

Le fluage d'irradiation est un fluage de type diffusion faisant appel à des mécanismes spécifiques de l'irradiation qui dominant la plasticité en service à faible contrainte mécanique. A plus forte contrainte lors d'essais de traction en pile on note un durcissement limité et l'absence de crochet de traction, contrairement au comportement post-irradiatoire en laboratoire chaud, montrant la spécificité du comportement plastique sous flux à forte contrainte.

# Physique des matériaux sous irradiation

**Georges MARTIN**

Conseiller Scientifique auprès du Haut Commissaire à l'Énergie Atomique  
CEA Siège, 91191 Gif sur Yvette Cedex

Bien qu'elle n'ait pas le statut d'une discipline clairement définie, la science des matériaux est très vivante. Ses acquis contribuent à l'efficacité de l'ingénierie des matériaux. En particulier, pour les futurs réacteurs de fusion, on devra nécessairement prédire le comportement des matériaux à partir d'essais effectués dans des conditions d'irradiation distinctes de celles du réacteur. Compte tenu de la lourdeur du retour d'expérience dans ce domaine, le processus d'extrapolation sera d'autant plus efficace qu'il s'appuiera sur des bases scientifiques plus sûres.

Sous irradiation, ce sont les conséquences à très long terme de l'interaction particule matière, très brève (femto-seconde), qui déterminent le comportement des matériaux et son évolution lente (plusieurs Mega-seconde): érosion, déformation, fragilisation.

De ce fait, la science des matériaux sous irradiation ne peut pas faire l'économie du raccord des échelles spatiales et temporelles : de l'atome, à l'échelle duquel la physique de l'interaction particule matière est établie, au matériau ou au composant, dont le comportement doit pouvoir être interprété à partir de la structure atomique ; de l'interaction particule matière, aux processus retardés de réarrangement de la structure atomique.

Après un bref rappel de l'état de l'art dans ce domaine, nous discutons le problème de la déstabilisation des phases, par irradiation (dont la précipitation de l'hélium n'est qu'un exemple). Le cas simple, où l'état du système peut être décrit par un paramètre d'ordre scalaire, se prête à un peu de théorie, dont les prédictions ont été vérifiées par l'expérience. Ces études ont permis de clarifier la manière dont il faut caractériser les conditions d'irradiation.

Pour les cas plus complexes, la simulation numérique offre des possibilités remarquables, mais encore limitées.

## Isolants inorganiques sous irradiation : aspects spécifiques

Yves LIMOGÉ

C.E.A./D.E.N./D.M.N./S.R.M.P., C.E. Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France  
ylimoge@cea.fr

Les matériaux soumis à une irradiation sont le siège d'évolutions structurales multiples, allant de la simple accumulation de défauts ponctuels à des transformations de phase les menant à de nouvelles structures, que celles-ci soient ou non d'équilibre. Ce phénomène constitue le vieillissement sous irradiation. Son impact sur les propriétés d'usage peut se traduire par la perte, partielle ou même totale, des caractéristiques de fonctionnement prévues. Les matériaux non métalliques n'échappent pas à ce schéma général.

La volonté de sélectionner les matériaux les plus adaptés, d'en concevoir de nouveaux, et le besoin de prévoir les limites de fonctionnement des matériaux existants, conduisent tout naturellement à tenter, comme pour les matériaux métalliques, de s'appuyer sur une compréhension fondée physiquement de leur comportement et de leur réaction à l'irradiation. La nature de leur mode de cohésion, comme bien souvent leurs caractéristiques physiques de matériaux pour les hautes températures, apportent une complexité et des difficultés nouvelles.

La présence d'une bande interdite, la cohésion qui mélange covalence et ionicité, la longue portée de l'interaction coulombienne, sont à l'origine de phénomènes spécifiques qui compliquent les études de vieillissement, tant expérimentales qu'en vue de la modélisation. Plus encore peut-être que pour les métaux, l'évolution récente des techniques d'étude de la structure électronique permettent d'espérer des progrès significatifs de ce côté.

Dans cette courte revue nous tenterons de présenter l'état des connaissances sur le vieillissement des matériaux non métalliques sous irradiation, en insistant sur les implications des spécificités mentionnées plus haut, telles qu'elles se manifestent aux diverses étapes qui concourent au processus de vieillissement. Compte tenu du champ très large ouvert et de leur importance dans le domaine nucléaire, nous appuierons notre revue pour l'essentiel sur l'exemple des oxydes. Nous aborderons ici à la fois les problèmes expérimentaux et les perspectives de modélisation. Cet article traitera donc successivement de la création des défauts primaires, qu'il s'agisse de l'effet des collisions ou de celui des interactions inélastiques, y compris sur la mobilité, des premières étapes de la réorganisation des défauts conduisant à l'apparition d'une microstructure d'irradiation, de l'impact de l'irradiation sur la mobilité atomique accélérée ou induite, enfin des divers changements de phase, d'origine statique ou dynamique, susceptibles de survenir.

## **Interaction particule/matière (Modèles et installations expérimentales)**

**Serge BOUFFARD**

CIMAP unité mixte CEA – CNRS – ENSICAEN – Université de Caen

Les recherches sur le comportement des matériaux des futurs réacteurs de fusion doit prendre en compte les spécificités de l'environnement radiatif de ces machines : un spectre de neutrons plus dur que dans les réacteurs nucléaires de fission avec pour corolaire une augmentation de la production par réaction nucléaire de gaz et d'impuretés, des températures élevées et des flux plus importants... A ces particularités pour les éléments de structure, s'ajoute l'endommagement et l'érosion des matériaux de première paroi qui subissent une irradiation intense par des particules de faible énergie.

Au cours de cette présentation, les particularités de ces irradiations neutroniques seront décrites : spectre de neutrons, spectre de primaires, morphologie des cascades de déplacement, réactions nucléaires... L'interaction primaire d'un neutron rapide avec les atomes cibles est à l'origine de deux importants phénomènes gouvernant l'évolution microstructurale des matériaux : la création de défauts et la production d'hétéroatomes. Ces deux phénomènes sont couplés et l'interaction impuretés – défauts joue un rôle important dans le vieillissement des matériaux. Pour la production de défauts, la connaissance des sections différentielles de collisions élastiques décrivant le spectre de primaires (atomes éjectés de leur site par un neutron) permet de discuter la distribution spatiale des défauts (production de cascades et de sous-cascades de déplacement). Par ailleurs, dans les matériaux isolants, les effets des excitations électroniques dues au ralentissement des ions de recul de haute énergie peuvent jouer un rôle (davantage pour la conductivité qu'elles peuvent induire sous flux que pour les défauts qu'elles sont susceptibles de créer). Les réactions nucléaires dépendent principalement de la nature des atomes cibles, l'estimation des sections efficaces de transmutation permet d'évaluer le nombre d'hétéroatomes créés par dpa.

Au vue de ces spécificités et après avoir décrit les caractéristiques des installations d'irradiation et les particules disponibles auprès des accélérateurs, les possibilités de simulation expérimentale par des faisceaux de particules chargées seront discutées.

## Stabilité et mobilité des défauts, amas et complexes

François WILLAIME

Service de Recherches de Métallurgie Physique, Centre d'Etudes de Saclay,  
CEA, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

L'irradiation par des particules de haute énergie produit dans les solides cristallins des défauts élémentaires, lacunes et interstitiels, à des concentrations bien supérieures à celles de l'équilibre thermodynamique. En migrant, ces défauts peuvent s'éliminer, se recombinaison avec leurs anti-défauts, s'associer à des impuretés ou éléments d'alliage et former des « complexes », ou s'agglomérer entre eux et former des amas de défauts qui deviennent aux grandes tailles des boucles de dislocation. Les défauts élémentaires sont ainsi à l'origine d'évolutions propres à l'irradiation, comme les changements de dimension (dont le gonflement), ou de composition chimique locale (précipitation ou ségrégation, induites ou accélérées par l'irradiation). Les grandeurs qui pilotent la cinétique d'évolution du matériau à l'échelle atomique sont d'une part la mobilité des défauts, amas et complexes, et d'autre part les énergies de liaison entre ces objets et les défauts ou impuretés. Ces grandeurs sont difficilement accessibles expérimentalement. Les méthodes de calcul de structure électronique dites *ab initio*, basées sur la Théorie de la Fonctionnelle de la Densité, permettent depuis peu de les déterminer avec précision pour les petits amas et complexes. Nous montrerons les avancées qui ont été obtenues dans ce domaine, depuis le premier calcul *ab initio* d'un auto-interstitiel dans le fer, effectué il y a seulement cinq ans. Parmi les cas revisités par ces techniques, figurent les petits amas hélium-lacunes dans le fer, qui sont particulièrement importants dans le cas de la fusion. Le couplage avec les modèles de cinétique (Monte Carlo cinétique ou dynamique d'amas) s'est avéré particulièrement riche pour la comparaison avec les expériences (anciennes) de recuit résistivité ou de désorption d'hélium. Les potentiels empiriques ajustés sur les calculs *ab initio*, sont également précieux pour sélectionner les configurations ou chemin de migration à explorer, ou simuler les défauts de plus grande taille. Si l'on veut améliorer les connaissances sur les énergies d'interaction et les mobilités il paraît maintenant incontournable de redévelopper une activité expérimentale fine des phénomènes associés, les outils de simulation pouvant servir de guide pour déterminer les conditions de réalisation des expériences, ou aider à l'interprétation complexe des résultats.

## **Cinétiques contrôlées par la diffusion**

**Maylise NASTAR**

CEA/Saclay  
DEN/DMN/SRMP, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Dans les matériaux de structure d'un réacteur, des phénomènes de ségrégation induits par l'irradiation, bien que très courants, sont encore mal compris. Ceci est en partie dû à la trop grande simplicité ou à l'absence de modèles de transport.

Cependant, dans un alliage métallique, nous disposons d'outils pour estimer le nombre de défauts ponctuels (lacunes et interstitiels), d'amas de défauts et d'échanges balistiques créés par l'irradiation. Le développement rapide des calculs de structure électronique nous donne accès aux mécanismes et aux fréquences de saut de ces défauts. La migration de ces défauts qui tendent à s'éliminer sur les puits de défauts génère un flux d'atomes. Ce flux de matière détermine les ségrégations observées sous irradiation. Même si nous connaissons l'origine de ces fluctuations de composition, il est toutefois difficile de les prédire tant elles dépendent des détails du couplage entre le flux des défauts et celui des atomes.

Les progrès récents de la théorie de champ moyen auto-cohérent permettent, à partir des fréquences de sauts atomiques, de déduire les coefficients phénoménologiques de la matrice d'Onsager et les flux associés. Les fréquences de saut dépendent de l'environnement local par un modèle dit de 'liaisons coupées', ce qui permet de prédire la grande variété de fréquences présentes dans un alliage concentré à partir d'un petit nombre de paramètres thermodynamiques et cinétiques. Les corrélations cinétiques sont prises en compte par un ensemble d'interactions effectives qui dépendent du temps, introduites dans une fonction de distribution du système hors d'équilibre. Les différentes approximations de la théorie incluent la plupart des autres modèles de diffusion. Les derniers progrès furent d'étendre l'approche multi-fréquence, habituellement réservée aux alliages dilués, aux alliages concentrés et de généraliser le formalisme initialement développé pour le mécanisme de diffusion lacunaire à celui plus complexe de l'interstitiel dans la configuration dissociée (dumbbell).

Ce formalisme de champ moyen est actuellement employé pour étudier la compétition entre une fréquence de saut thermique des lacunes ou des interstitiels et une dynamique forcée comme par exemple les échanges balistiques induits par l'irradiation.

# Microstructures sous irradiation

Alain BARBU

CEA/DEN/DMN

L'évolution microstructurale à long terme des matériaux sous irradiation et plus précisément des alliages métalliques est à l'origine de dégradations de leurs propriétés d'usage spécifique à ce mode de sollicitation. Ces dégradations sont très souvent relatives aux propriétés mécaniques mais peuvent l'être également à la stabilité dimensionnelle du composant ou de sa tenue à la corrosion.

Pour pouvoir prédire cette évolution microstructurale il est indispensable de comprendre les mécanismes physiques et de modéliser les cinétiques d'évolution. On se trouve alors confrontés à des phénomènes qui couvrent de vastes échelles de temps et d'espace : depuis la production des défauts primaires faisant suite à la collision neutron-atome dont le temps caractéristique est la dizaine de picosecondes à la diffusion des défauts à l'origine de l'évolution de la microstructure qui se fait sur des minutes, des heures, des années, en fonction de la température puisqu'elle est thermiquement activée.

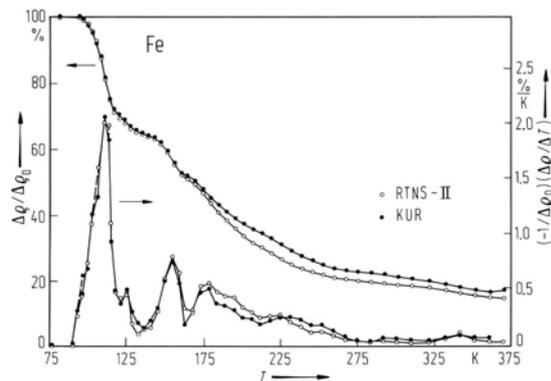
On connaît bien les mécanismes élémentaires à l'œuvre. Il s'agit principalement de :

- L'agglomération des défauts ponctuels et des atomes constitutifs de l'alliage ou produits dans les réactions nucléaires (He) sous forme d'amas qui ont pour effet de bloquer les dislocations et donc de durcir le matériau.
- La ségrégation d'éléments d'alliage, d'impuretés ou d'atomes produits dans les réactions nucléaires (He) sur les joints de grains induisant une diminution de leur cohésion avec pour conséquence une possibilité de rupture intergranulaire.

Hormis la production importante d'hélium, les mécanismes à l'origine de l'évolution sous irradiation des matériaux pour la fusion ne sont pas différents de ceux qui sont à l'œuvre dans les réacteurs de fusion. On peut même se demander si le dommage élémentaire induit par des neutrons de 14 MeV est significativement différent de celui induit par les neutrons de fission dont les énergies ne dépassent guère le MeV. En effet, au delà d'une certaine énergie cinétique transmise par le neutron à l'atome, la cascade de déplacements atomiques dans lesquels se forment les défauts primaires se scindent en sous-cascades avec pour conséquence que le spectre de sous cascades n'est pas très différent dans les deux cas.

Ce fait a été clairement mis en évidence en effectuant des recuits isochrones de résistivité électrique (sensible à la présence des défauts) après irradiation avec des neutrons de fusion et des neutrons de fission (Figure d'après Matsui 1988).

Dans cette intervention, je présenterai de façon synthétique les différentes méthodes permettant de simuler l'évolution microstructurale à long terme en insistant particulièrement sur les points bloquants. Un de ceux-ci est évidemment la connaissance de l'ensemble des paramètres caractérisant les propriétés énergétiques et cinétiques des différents éléments de la microstructure. Ceux-ci peuvent être obtenus par des calculs à l'échelle atomiques dans le cas de matériaux très simples tel que les métaux purs et les alliages binaires dilués.



On a ainsi pu, pour la première fois, reproduire une expérience de recuit de résistivité après irradiation du fer en se fondant uniquement sur des calculs réalisés à partir des premiers principes. Pour les alliages plus complexes, on montrera que, pour l'instant, on ne peut se passer d'ajustements effectués sur des résultats d'expériences judicieusement choisies, expériences qui de toutes façon sont toujours indispensables pour valider les simulations numériques multi-échelles.

## **Plasticité et irradiation**

**Yves BRECHET, D. RODNEY, M. FIVEL**

INPG

## **Ténacité, résilience : rupture des aciers martensitiques à haut chrome**

**Bernard MARINI**

CEA/DEN

Pour la fusion, certains composants de structure pourraient être réalisés en aciers martensitiques à haut chrome qui présente des propriétés d'usage compatible avec des conditions de fonctionnement sévères en termes de température et de dose. Ces matériaux de nature ferritique présentent une transition d'énergie absorbée par la rupture en fonction de la température, dite transition fragile-ductile. L'irradiation neutronique augmente le domaine de température de cette transition au-delà de la température ambiante rendant ainsi fragile ces matériaux dans des conditions de fonctionnement ou de manutention. Cette évolution doit être connue et maîtrisée afin de réduire le risque de rupture brutale.

La transition fragile ductile des aciers martensitiques à haut chrome présente un certain nombre de caractéristiques en comparaison aux transitions observées pour les aciers peu ou pas alliés, comme l'augmentation de l'énergie absorbée en fonction de la température et la dispersion associée. Les différents mécanismes physiques mis-en-jeu dans la transition des aciers ferritiques sont présentés et discutés dans ce contexte particulier.

## Fragilisation par l'hélium (à « haute » et « basse » température)

Jean HENRY

Service de Recherches Métallurgiques Appliquées, CEA Saclay

Outre les dommages d'irradiation, des quantités importantes d'hélium seront produites par réactions de transmutation dans les aciers martensitiques au chrome, matériaux de première paroi et de couverture des futurs réacteurs à fusion. Une fois créé, l'hélium produit reste piégé dans le matériau et ses effets fragilisants potentiels sont un sujet de préoccupation majeur. L'objectif de cet exposé est de faire brièvement le point sur l'état des connaissances relatives aux effets de l'hélium sur les propriétés mécaniques des aciers. Il faut souligner qu'en l'absence d'une source intense de neutrons de 14 MeV, diverses techniques alternatives de chargement en hélium ont donc été utilisées pour tenter d'évaluer les effets de cet élément.

Le phénomène dit de « fragilisation par l'hélium à haute température » a été mis en évidence il y a de nombreuses années. Il se manifeste typiquement pour des températures d'essai supérieures à environ  $0,5 T_f$  (où  $T_f$  est la température de fusion), par exemple par une réduction de la durée de vie en fluage et l'apparition d'un faciès de rupture partiellement intergranulaire. Ce phénomène a surtout été étudié à l'aide d'expériences de fluage sur de mini-éprouvettes implantées par des particules  $\alpha$  avant/pendant l'essai mécanique. Il a été montré que la rupture est contrôlée par la croissance de bulles d'hélium au niveau des joints de grain.

A plus basse température, il y avait jusqu'à récemment une controverse quant aux effets spécifiques de l'hélium qui provient de la méthode de chargement en hélium utilisée dans plusieurs études expérimentales. Celle-ci consiste à doper le matériau avec des isotopes du nickel ou du bore à forte section efficace pour les réactions  $(n,\alpha)$ . Malheureusement cette technique induit de nombreux artefacts ce qui rend l'interprétation des résultats expérimentaux particulièrement délicate.

Néanmoins des essais de traction et de flexion sur éprouvettes implantées en hélium avec un cyclotron à différentes températures et teneurs ont permis de mettre en évidence un phénomène de « fragilisation par l'hélium à basse température ». Par exemple, l'implantation de 0,5 at% He à 250°C dans une éprouvette d'acier martensitique au chrome provoque un durcissement très important associé à une rupture totalement intergranulaire. Il est postulé que ce mode de rupture résulte du durcissement induit par les amas de défauts et d'une forte densité de petites bulles d'hélium ainsi que de la diminution de la cohésion des joints liée à la présence d'hélium. Des examens fractographiques associés à l'analyse par éléments finis des essais de flexion réalisés à l'ambiante sur éprouvettes implantées et à -170°C sur éprouvettes non-implantées, indiquent que l'hélium diminue la contrainte critique de rupture intergranulaire. Par ailleurs, les essais de traction et de résilience effectués sur éprouvettes irradiées en spectre de spallation au PSI, montrent une fragilisation supérieure à celle attendue sous irradiation en spectre de fission, ce qui est attribué notamment à la forte création d'hélium en conditions de spallation.

Pour progresser dans la compréhension des effets de l'hélium sur l'évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques un effort de modélisation sera nécessaire. On mentionnera quelques résultats récents dans ce domaine à titre d'introduction à la discussion.

# Etudes fondamentales de matériaux face au plasma : le cas du carbone

**Pascale ROUBIN**

Laboratoire PIIM, UMR CNRS 6633  
Université de Provence, Centre Saint-Jérôme, 13 397 Marseille cedex 20

Cet exposé se situe dans le cadre du fonctionnement actuel des tokamaks et également, dans le cadre de ce qui est prévu pour les premières années de fonctionnement de ITER, c'est-à-dire que l'on n'aborde pas les problèmes liés au bombardement par des flux importants de neutrons de fusion.

Les matériaux des parois de tokamak doivent résister de façon stationnaire à de forts flux d'ions ( $\sim 10^{22} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) et d'énergie ( $\sim 10 \text{ MW m}^{-2}$ ), et de façon transitoire à des puissances très importantes dues aux instabilités du plasma de bord ( $1 \text{ MJ m}^{-2} / 100 \mu\text{s} / 1 \text{ Hz}$ ). Il est de plus nécessaire de limiter au maximum les perturbations du plasma en cas d'ablation. Pour l'ensemble de ces raisons, le carbone est un matériau de choix pour les parties des parois recevant les plus forts flux en raison de ces bonnes propriétés thermo-mécaniques et de son faible numéro atomique. Des matériaux composite carbone – carbone (composite à fibres de carbone) sont actuellement utilisés car ils permettent de profiter des propriétés de conductivité thermique du graphite de façon quasi-isotrope et également d'optimiser la résistance mécanique du matériau. Malheureusement, le carbone a un inconvénient majeur, car, léger, il s'érode facilement sous l'effet de l'irradiation du plasma. Cette érosion conduit à la formation de dépôts, plus ou moins bien liés aux surfaces sur lesquelles ils se sont formés, et qui sont susceptibles de donner lieu à des débris (ou poussières) lors de certains événements plasma. Ces poussières sont potentiellement très réactives et leur formation doit être sévèrement contrôlée pour des raisons de sécurité. De plus la grande souplesse d'hybridation du carbone le rend aussi très réactif et la formation d'hydrocarbures est observée, ce qui conduit à des dépôts contenant du combustible (deutérium pour les machines actuelles). Dans le cas du tritium, qui sera utilisé dans ITER, cette rétention est également à limiter le plus possible pour des raisons de sécurité. Une autre source possible de rétention est la diffusion du combustible au sein même du composite d'origine, comme cela a été mis en évidence à Cadarache sur le tokamak Tore Supra [1].

Nous présentons ici les études faites au laboratoire sur les matériaux d'origine des parois mais aussi sur les dépôts, dans le but de comprendre et d'analyser les phénomènes de rétention de deutérium et de formation de poussières. Nous avons fait des analyses de type spectroscopique (absorption X, microscopie Raman...), structurale (diffraction X, microscopie électronique...) et texturale (volumétrie isotherme d'adsorption, mercuro-porosimétrie...) afin d'obtenir une caractérisation physico-chimique la plus complète possible de ces composants carbonés [2-4]. Dans le cas des composites carbone – carbone, notre étude s'est focalisée sur l'analyse de leur porosité, ceci afin d'apporter des informations quantitatives sur les réseaux poreux qui peuvent être à l'origine de la diffusion en profondeur du combustible. Dans le cas des dépôts, l'analyse détaillée de leur structure, depuis la structure atomique jusqu'à leur texture poreuse, a été faite. Les analyses structurales ont conduit à la mise en évidence d'un processus de formation complexe, qui associe une formation de nanoparticules en phase gazeuse (croissance homogène) et une croissance auto-similaire sur certaines surfaces en interaction avec le plasma (croissance homogène).

1. Pégourié, B., et al., *Physica Scripta* **T111** (2004) 23.
2. Roubin, P. et al., *J. Nucl. Mater.* **337-339** (2005) 990.
3. Martin, C. et al., *J. Nucl. Mater.* **363-365** (2007) 1251.
4. Richou, M. et al., accepted for publication in *Carbon* (2007)

# **Métallurgie des ODS**

**Yves BRECHET**

INPG

# **Intérêt et limitations des modélisations multi-échelle pour prévoir le comportement sous irradiation des aciers des composants des réacteurs à eau sous pression**

**Jean-Paul MASSOUD**

EDF R&D, Département Matériaux et Mécanique des Composants

Dans les réacteurs nucléaires à eau sous pression (REP), les matériaux constitutifs des composants du cœur (cuve, structures internes de cuve...) sont soumis à une forte irradiation neutronique qui peut dégrader leurs performances. Pour assurer un fonctionnement optimal et sûr de ces réacteurs, les exploitants doivent être en mesure d'écarter tout risque de dégradation majeure ou de rupture. Pour cela il est nécessaire de prévoir le comportement sous irradiation de ces matériaux tout au long de la durée de vie du réacteur.

Actuellement ces prévisions sont fondées sur une base expérimentale et empirique qui est généralement suffisante, mais qui ne permet pas de prédire aisément leur comportement sur de très longues périodes ni d'extrapoler de façon fiable leur évolution dans des conditions nouvelles. Or l'allongement projeté de la durée de vie du parc nucléaire et le développement de réacteurs de nouvelles générations exigent la mise en œuvre de nouveaux moyens de compréhension et de prévision du comportement à long terme des matériaux.

La modélisation multi-échelle est une démarche complémentaire aux méthodes empiriques ou semi-empiriques utilisées actuellement pour prévoir le comportement des matériaux sous irradiation. On attend d'elle qu'elle permette à terme:

- une meilleure compréhension et une prédiction plus fiable des phénomènes de vieillissement (et de dégradation des propriétés qui en résultent) pour les matériaux des REP,
- de réduire l'empirisme des prévisions (à condition toutefois que les mécanismes soient bien connus),

Avec l'augmentation considérable des puissances de calcul des ordinateurs et avec les progrès récents dans la connaissance des mécanismes d'endommagement des matériaux sous irradiation, il est maintenant possible de développer des modélisations multi-échelles capable de simuler les effets de l'irradiation sur la microstructure des matériaux et de modéliser le comportement mécanique et la rupture de ces matériaux.

Ces modélisations multi-échelles nécessitent de développer, aux différentes échelles et sur des bases physiques sûres des modèles numériques ou théoriques qui doivent être soigneusement paramétrés et validés expérimentalement. Elles nécessitent également de coupler ou de chaîner ces modèles sous une même architecture logicielle pour prédire, à terme, les propriétés d'usage.

Mais il reste encore de nombreuses difficultés à résoudre. Parmi elles l'une des principales est la prise en compte de la complexité des matériaux (en terme de composition chimique et traitement thermomécanique) et des conditions de fonctionnement réelles.

Même s'il apparaît évident qu'il faudra encore de nombreuses années pour atteindre une prévision fiable du comportement sous irradiation d'aciers réels, des objectifs intermédiaires peuvent toutefois être atteints plus rapidement (et certains le sont déjà) avec des bénéfices significatifs :

- Apporter des justifications physiques aux formules de prévision empiriques actuellement utilisées
- Exploiter avec plus d'efficacité les bases de données expérimentales existantes,
- Optimiser les campagnes d'irradiations expérimentales et les essais: en les définissant et les interprétant mieux,
- Optimiser les programmes de surveillance de l'irradiation,
- Prévoir pour des conditions de fonctionnement en dehors des bases de données existantes, ou dépassant les capacités des programmes expérimentaux, ...
- Optimiser les conditions standards de fonctionnement, définir de nouvelles nuances de matériaux...
- Aider à la conception de matériaux à cinétique d'évolution maîtrisée pour les filières du futur...
- Fournir des outils pédagogiques de formation à la science des matériaux du nucléaire.



# Participants

ALAMO Ana	DEN/DSOE CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	ana.alamo@cea.fr
ATHENES Manuel	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	manuel.athenes@cea.fr
AUGER Thierry	ICMPE 2 à 8 rue Henri Dunant 94320 THIAIS	auger@glvt-cnrs.fr
BALANZAT Emmanuel	CIRIL - CIMAP BP 5133 14070 CAEN CEDEX 5	balanzat@ganil.fr
BAMBERGER Yves	Académies des technologies, EDF	yves.bamberger@edf.fr
BARBU Alain	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	alain.barbu@wanadoo.fr
BARTHE Marie-France	CERI 3A rue de la Férollerie 45071 ORLEANS	barthe@cnrs-orleans.fr
BECHADE Jean-Luc	DEN/DMN/SRMA CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	jean-luc.bechade@cea.fr
BECQUART Charlotte	LMPGM Université des Sciences et Technologie de Lille 59655 VILLENEUVE d'ASCQ Cedex	charlotte.becquart@univ-lille1.fr
BIGOT Bernard	Haut-Commissaire CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	
BILLOT Philippe	DEN/DMN CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	philippe.billot@cea.fr
BLAVETTE Didier	GPM Université de Haute Normandie 76801 ST ETIENNE ROUVRAY Cedex	didier.blavette@univ-rouen.fr
BORNERT Michel	Ecole Polytechnique Laboratoire de Mécanique des Solides 91128 PALAISEAU Cedex	bornert@lms.polytechnique.fr
BOUCHAUD Elisabeth	DSM/DRECAM/SPCSI CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	elisabeth.bouchaud@cea.fr
BOUFFARD Serge	CIRIL - CIMAP BP 5133 14070 CAEN CEDEX 5	bouffard@ganil.fr
BOUTARD Jean-Louis	EFDA, Garching Close Support Unit Boltzmannstrasse 2 D-85748 GARCHING Allemagne	jean-louis.boutard@tech.efda.org
BRECHET Yves	LTPCM INPG 38402 St MARTIN d'HYERES cedex	ybrechet@ltpmc.inpg.fr
BRETHEAU Thierry	LIM - ENSAM 151 Bd de l'Hôpital 75013 PARIS	thierry.bretheau@paris.ensam.fr
BREZIN Edouard	Académie des sciences / ENS Laboratoire de Physique théorique 75231 PARIS Cedex 05	Edouard.Brezin@lpt.ens.fr
CAILLARD Daniel	CEMES 29 rue Jeanne Marvig 31055 TOULOUSE Cedex 4	daniel.caillard@cemes.fr
CANCES Eric	CERMICS - ENPC 6 et 8 avenue Blaise Pascal 77455 MARNE la VALLEE cedex 2	cances@cermics.enpc.fr
CHAFFRON Laurent	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	laurent.chaffron@cea.fr

CHENE Jacques	DEN/DPC/SCCME CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	jacques.chene@cea.fr
CHEVALLIER Jean Pierre	CNAM 3 rue Conté 75003 PARIS	chevalie@cnam.fr
CLOUET Emmanuel	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	emmanuel.clouet@cea.fr
CROCOMBETTE Jean- Paul	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	jean-paul.crocombette@cea.fr
DAUTRAY Robert	Académie des sciences 23 quai de Conti 75006 PARIS	robert.dautray@orange.fr
de CARLAN Yann	DEN/DMN/SRMA CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	yann.decarlan@cea.fr
DECAMPS Brigitte	CSNSM 91405 ORSAY CAMPUS	brigitte.decamps@csnsm.in2p3.fr
DERCOURT Jean	Académie des sciences 23 quai de Conti 75006 PARIS	denis.dequaire@academie-sciences.fr
FINEL Alphonse	LEM - ONERA BP 72 92322 CHATILLON Cedex	alphonse.finel@onera.fr
FIVEL Marc	SIMAP INPG 38402 St MARTIN d'HYERES cedex	marc.fivel@gpm2.inpg.fr
FLURY-HERARD Anne	DSV CEA Fontenay aux Roses 92 FONTEBAY AUX ROSES	anne.flury-herard@cea.fr
FRIEDEL Jacques	Académie des sciences / Université Paris-Sud Laboratoire de Physique des solides 91405 ORSAY	
FU Chu Chun	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	chuchun.fu@cea.fr
GERVAIS Benoît	CIRIL - CIMAP BP 5133 14070 CAEN CEDEX 5	gervais@ganil.fr
GOSSET Dominique	DEN/DMN/SRMA CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	dominique.gosset@cea.fr
GRILHE Jean	Laboratoire de Métallurgie Physique Université de Poitiers 86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL Cedex	jean.grilhe@univ-poitiers.fr
GROSMAN André	DSM/DRFC CEA Cadarache 13108 St PAUL LEZ DURANCE cedex	andre.grosman@cea.fr
GUERIN Yannick	DEN/DEC CEA Cadarache 13108 St PAUL LEZ DURANCE cedex	yannick.guerin@cea.fr
GUET Claude	Cab. HC CEA-Siège 91191 Gif sur Yvette Cedex	claud.guet@cea.fr
GUILLON Pierre	Département ST2I CNRS 3 rue Michel-Ange 75794 PARIS cedex 16	pierre.guillon@cnsr-dir.fr
HENNEQUIN Pascale	LPTP Ecole Polytechnique 91128 PALAISEAU CEDEX	pascale@lptp.polytechnique.fr
HENRY Jean	DEN/DMN/SRMA CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	jean.henry@cea.fr
HOROWITZ Emmanuel	EDF/DPI/CNEN 165-173 Avenue Pierre Brossolette 92542 MONTRouGE Cedex	emmanuel.horowitz@edf.fr

LAVAL Guy	Académie des sciences Ecole polytechnique 91128 PALAISEAU Cedex	laval@cpht.polytechnique.fr
LEBOUAR Yann	LEM - ONERA BP 72 92322 CHATILLON Cedex	Yann.LeBouar@onera.fr
LECONTE Yann	DSM/DRECAM/SPAM CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	yann.leconte@cea.fr
LERAY Sylvie	DAPNIA/SPhN CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	sylvie.leray@cea.fr
LIMOGE Yves	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	yves.limoge@cea.fr
MADAY Yvon	Laboratoire Jacques-Louis Lions Université Pierre et Marie Curie 75252 PARIS Cedex 05	maday@ann.jussieu.fr
MAGAUD Philippe	DSM/DRFC CEA Cadarache 13108 St PAUL LEZ DURANCE cedex	andre.grosman@cea.fr
MANGELINCK Dominique	L2MP Université Paul Cézanne Faculté de St Jérôme 13397 MARSEILLE CEDEX 20	dominique.mangelinck@l2mp.fr
MARBACH Gabriel	DSM/DRFC CEA Cadarache 13108 St PAUL LEZ DURANCE cedex	marbach@drfccad.cea.fr
MARINI Bernard	DEN/DMN/SRMA CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	bernard.marini@cea.fr
MARINICA M. C.	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	mihai-cosmin.marinica@cea.fr
MARTIN Georges	Cab. HC CEA-Siège 91191 Gif sur Yvette Cedex	georges.martin34@wanadoo.fr
MASSOUD Jean-Paul	EDF EDF-Renardières MORET sur LOING	jean-paul.massoud@edf.fr
MATHON Marie Hélène	LLB CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	marie-helene.mathon@cea.fr
MAUGIS Philippe	CIRIMAT – ENSIACET/INPT 118 route de Narbonne 31077 TOULOUSE	philippe.maugis@ensiacet.fr
MONNET Isabelle	CIRIL - CIMAP BP 5133 14070 CAEN CEDEX 5	monnet@ganil.fr
MORDEHAI Dan	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	dan.mordehai@cea.fr
NASTAR Maylise	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	maylise.nastar@cea.fr
PAREIGE Philippe	GPM Université de Haute Normandie BP 12 76801 ST ETIENNE ROUVRAY Cedex	philippe.pareige@univ-rouen.fr
PETITE Guillaume	LSI Ecole Polytechnique 91128 PALAISEAU CEDEX	guillaume.petite@polytechnique.edu
PINEAU André	Centre des Matériaux ENSMP 91003 EVRY cedex	andre.pineau@ensmp.fr
POIRIER Jean Paul	Académie des sciences / IPGP 18 place des Vosges 75004 PARIS	jean-paul.poirier@noos.fr

PROVILLE Laurent	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	laurent.proville@cea.fr
QUERE Yves	Académie des sciences / Ecole polytechnique 23 quai de Conti 75006 PARIS	y.quere@academie-sciences.fr
RABIER Jacques	Laboratoire de Métallurgie Physique Université de Poitiers 86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL Cedex	jacques.rabier@univ-poitiers.fr
REBUT Paul-Henry	Académie des sciences / CEA 10 place des Vosges 75004 PARIS	phrebut@infonie.fr
RIVIERE Jean-Paul	Laboratoire de Métallurgie Physique Université de Poitiers 86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL	jean.paul.riviere@univ-poitiers.fr
RIZZA Giancarlo	LSI Ecole Polytechnique 91128 PALAISEAU CEDEX	giancarlo.rizza@polytechnique.edu
ROBIEUX Jean	Académie des sciences 5 rue du Professeur Leroux 92290 CHATENAY-MALABRY	robieux-Jean@wanadoo.fr
RODNEY David	SIMAP INPG 38402 St MARTIN d'HYERES cedex	david.rodney@gpm2.inpg.fr
ROMA Guido	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	guido.roma@cea.fr
ROUBIN Pascale	PIIM Université Provence - Aix Marseille 1 Centre de Saint-Jérôme 13397 MARSEILLE CEDEX 20	pascale.roubin@up.univ-mrs.fr
SCHUSTER Frédéric	DEN/Dir CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	frederick.schuster@cea.fr
SERRUYS Yves	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	yves.serruys@cea.fr
SITAUD Bruno	Synchrotron SOLEIL L'Orme des Merisiers Saint-Aubin 91192 GIF sur YVETTE CEDEX	bruno.sitaud@synchrotron-soleil.fr
SLODZIAN Georges	Académie des sciences Université Paris Sud 91405 ORSAY CEDEX	g.slodzian@orange.fr
SOISSON Frédéric	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	frederic.soisson@cea.fr
SUCQUET Pierre	Académie des sciences Laboratoire de mécanique et d'acoustique 13402 MARSEILLE CEDEX 20	suquet@lma.cnrs-mrs.fr
TEYSSANDIER Francis	PROMES – Tecnosud Rambla de la Thermodynamique 66100 PERPIGNAN	fteyssa@univ-perp.fr
THOME Lionel	CSNSM 91405 ORSAY CAMPUS	lionel.thome@csnsm.in2p3.fr
WATTEAU Jean Paul	Cab HC CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	jean-paul.watteau@cea.fr
WILLAIME François	DEN/DMN/SRMP CEA Saclay 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX	francois.willaime@cea.fr
ZAOUÏ André	Laboratoire de mécanique des solides École polytechnique 91128 Palaiseau Cedex	andre.zaoui@paris.ensam.fr
ZERAH Gilles	DAM/DPTA CEA DAM IdF 91680 BRUYERES le CHATEL	gilles.zerah@cea.fr

