

## **Modélisation et simulation de la Rupture Ductile : synthèse des connaissances et questions d'enjeux**

- Une journée en partenariat avec EDF R&D -

**Mardi 25 SEPTEMBRE 2012  
EDF R&D, salle TA220  
1, avenue du Général de Gaulle 92141 Clamart**

Organisateurs : Jérôme LAVERNE (EDF R&D Clamart) [jerome.laverne@edf.fr](mailto:jerome.laverne@edf.fr) 01 47 65 32 01  
Yann MONERIE (IRSN Cadarache) [yann.monerie@irsn.fr](mailto:yann.monerie@irsn.fr) 04 42 19 96 17

### **Introduction**

La rupture ductile est un phénomène de fissuration essentiellement diffuse qui conduit à une déformation importante et une plastification généralisée du matériau. Les principaux mécanismes en jeu sont la nucléation, la croissance et la coalescence de cavités couplées à un phénomène de dissipation plastique. Ce mode de rupture caractérise notamment la plupart des métaux à la température ambiante et la quasi-totalité des matériaux à haute température.

La modélisation de ce phénomène est particulièrement complexe et porte des enjeux industriels importants. Pour traiter cette question il est nécessaire d'établir un équilibre entre une modélisation représentative du point de vue de la physique et pertinente du point de vue des contraintes de l'ingénieur.

Lors de cette journée, les communautés académique et industrielle ont échangé sur les différentes approches établies/émergentes et sur les pratiques et besoins industriels.

Plusieurs questions essentielles ont été abordées et débattues au cours de la journée :

- quels modèles pour quelle finesse de description physique ? (endommagement, multi-échelle, CZM, approches critères, ...)
- quelle mise en oeuvre numérique ? (algorithmes non linéaires, des grandes déformations, incompressibilité plastique, adaptation de maillage, détermination du trajet de fissuration, ...)
- quels mécanismes ? (couplage endommagement-plasticité, influence de la triaxialité, mode de fissuration mixte, forme et loi de croissance des cavités à l'échelle micro, coalescence et passage endommagement-fissuration, transition ductile-fragile, ...)
- quels essais expérimentaux pour quelles grandeurs matériaux ?

Les supports de présentation sont disponibles sur : <http://www.mecamat.asso.fr/ArchivesGT.html>.

# Synthèse de la journée

Le succès de cette journée thématique est illustré par :

- le nombre de participants (106)
- la présence combinée d'acteurs du monde académique et du monde industriel, notamment dans les domaines de l'énergie (AREAVA, CEA, EDF, IFPEN, IRSN) et des transports (ONERA, PSA, Renault, SNECMA)
- la qualité des exposés et débats tout au long de la journée.

Ce succès est un indicateur direct de l'importance de ce thème de recherche pour les années à venir. Les forts enjeux industriels associés font que ces lieux de rencontre autour des aspects scientifiques et techniques sont essentiels à la conduite sereine de cette R&D. Les acteurs présents ont notamment souligné :

- l'importance du rôle que pouvait jouer la communauté MECAMAT dans cette recherche ;
- l'ampleur des retombées attendues dans l'industrie principalement autour des thématiques en vieillissement/prédictibilité des matériaux et des structures.

Cette journée thématique doit donc être mise en perspective du colloque national Mécamat 2013 sur le thème « Effets d'environnement sur le comportement mécanique et la dégradation des matériaux ».

Le directeur scientifique d'EDF R&D, dans son introduction à la journée, souligne l'intérêt d'accueillir ce type de manifestation sur le site de Clamart et l'engagement de l'entreprise au sein de l'association MECAMAT. Il mentionne par ailleurs l'intérêt de participer avec l'IRSN à l'animation scientifique sur des thèmes amont indépendamment des obligations réglementaires de sûreté nucléaire qui relient les deux entités. Enfin, il exprime une attente de visibilité à court terme sur le niveau de maturité atteint par les différentes approches en rupture ductile. L'objectif est de distinguer les hypothèses physiques, les choix de modélisations et de simulation qui font consensus de ceux relevant de questions encore très amont et pour lesquelles le débat reste ouvert. Il propose à la communauté MECAMAT de s'interroger sur cette question.

Même si la journée n'a pas directement répondu à cette dernière attente, qui pourra faire l'objet de débats dans d'autres réunions à venir, elle y a toutefois contribué à travers des échanges fructueux que l'on tente de résumer dans une synthèse réalisée à chaud en fin de journée :

## **Modélisation.**

D'importantes avancées théoriques ont été obtenues les dernières années dans la modélisation de l'endommagement ductile, principalement à l'aide d'approches micromécaniques : enrichissement des modèles de Gurson à tout taux de triaxialité, prise en compte de plusieurs populations de cavités, rôle de la forme des cavités, etc. Cependant de nombreux points doivent encore être éclaircis : effets du troisième invariant des contraintes, de la distribution spatiale des pores, rôle de la taille relative des pores par rapport à la taille de la zone plastique, coalescence, formulation sous chargements cycliques, etc.

La grande technicité de ces modèles et leurs difficultés de mise en œuvre numérique sont un frein indéniable à leur diffusion en milieu industriel. En particulier, selon la complexité des applications visées, les modèles non couplés semblent avoir encore de beaux jours devant eux, en dépit de leurs limitations reconnues.

Par ailleurs, les problèmes de localisation associés à ces modèles d'endommagement ductile ont conduit à de nombreux développements de modèles non locaux. Ces derniers ont montré leur efficacité mais le débat reste ouvert, notamment autour du sens physique des longueurs caractéristiques introduites.

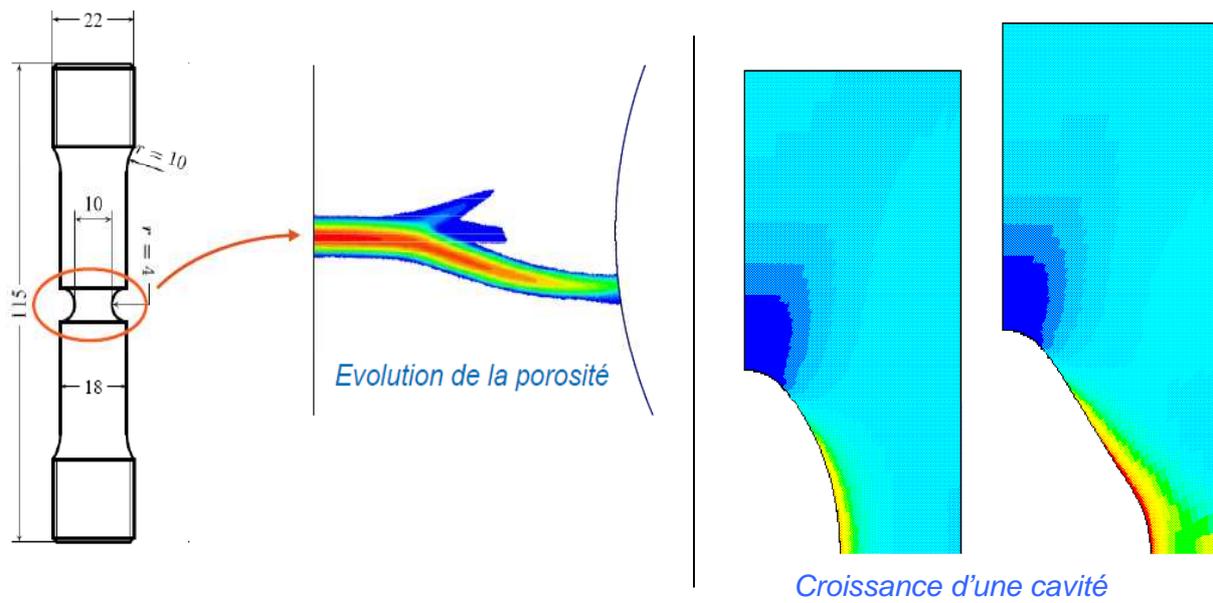
## **Simulation numérique.**

Dans ce domaine aussi, de nombreuses solutions ont émergé ces dernières années : formulations à gradient, éléments finis étendus (X-FEM), modèles de zone cohésive, « Level Set » épaisses (TLS) etc. La recherche en rupture ductile n'étant pas stabilisée, il

est parfois délicat de dissocier ce qui relève des techniques numériques et des modèles. Il est cependant clair que de grandes difficultés subsistent. Pour les illustrer, il est intéressant de noter que la question de la taille de maille comme un paramètre « physique » associé aux modèles d'endommagement fait encore débat.

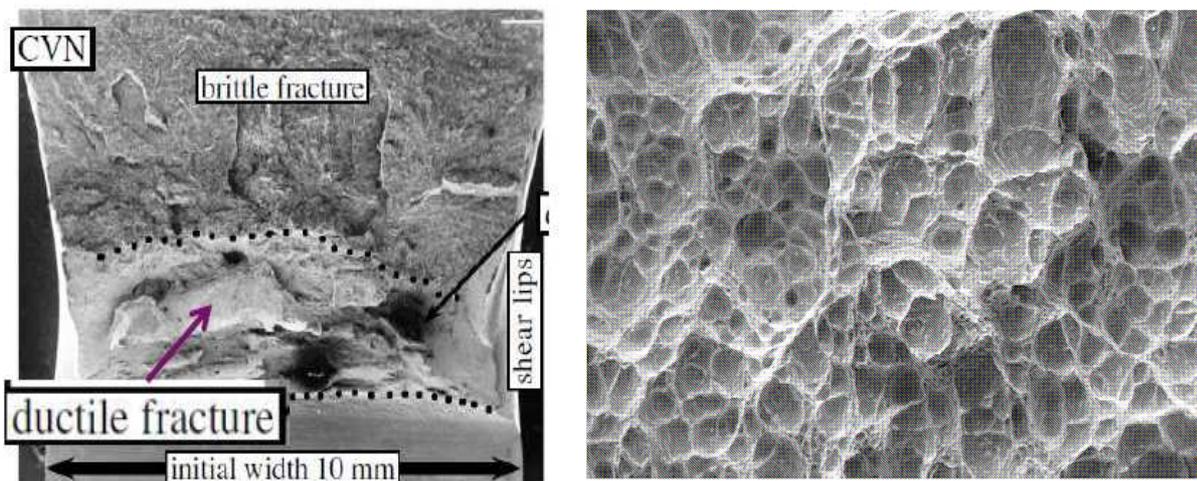
Un point semble acquis : le développement de l'endommagement à l'échelle microscopique émerge naturellement comme un problème de mise en forme (croissance de cavités par plasticité uniquement).

Enfin, la stratégie d'utilisation conjointe de modèles d'endommagement volumique (disons Gurson) et surfacique (modèles cohésifs) n'est pas claire : faut-il les dissocier, les chaîner, les coupler ? La réponse est encore moins claire dans le cas de modèles non locaux qu'ils soient volumiques et/ou surfaciques.



### Identification expérimentale.

L'importante phase de développement modélisation/simulation semble avoir un peu occultée les besoins expérimentaux dans le domaine. Ils sont aujourd'hui principalement orientés vers les questions de germination et de coalescence. D'une manière générale, la difficulté d'identifier les paramètres des modèles d'endommagement ductile a été soulignée, de même que l'interprétation du sens physique de ces paramètres (par exemple, la taille caractéristique des modèles à gradient). Les besoins expérimentaux sont donc aujourd'hui forts mais différent aussi selon le champ d'application et les échelles de temps considérées (des impacts au vieillissement).



## Besoins industriels.

La journée a montré que les besoins industriels dans ce domaine sont forts. Le juge de paix dans l'utilisation concrète des modèles et des techniques numériques associées sera vraisemblablement le ratio fiabilité/simplicité de mise en œuvre. Ce point passe à terme par une recherche de codification de certaines configurations de fissuration ductile. Il s'agit aujourd'hui d'estimer à quelle échelle temporelle cet objectif pourra être atteint.



## Le mot des organisateurs.

Les organisateurs tiennent à remercier chaleureusement :

- les orateurs, pour leurs efforts de synthèse, la qualité de leurs interventions, leur mise à disposition d'un résumé et de leurs présentations,
- les participants, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour cette journée et les débats auxquels ils ont contribué,
- EDF R&D (projet ANODE60) pour son accueil et la prise en charge de la journée.

# Annexe : Programme de la journée

9h Accueil

## Avancées académiques

9h30 Leblond J.-B. (Université Pierre et Marie Curie, IJLRA)  
« Quelques problèmes actuels en mécanique de la rupture ductile »

10h10 Pardoën T. (Université Catholique de Louvain)  
« Void coalescence modelling : strain hardening, second population and shear effects »

10h50 Pause

11h10 Besson J. (Ecole des Mines, CDM)  
« Simulation de la déchirure ductile »

11h50 Tanguy B. (CEA Saclay)  
« Endommagement ductile des aciers : identification des modèles à partir de l'expérimentation »

12h30 Repas (Buffet sur place)

## Pratiques et attentes industrielles

14h00 Introduction Andrieux S. (directeur scientifique EDF R&D)

14h10 Perrin G. (AREVA)  
« Croissance de cavité et espérances industrielles »

14h50 Lorentz E. (EDF R&D)  
« Verrous et perspectives en matière de prédiction de la rupture ductile à EDF R&D »

15h30 Pause

15h50 Deloison D. (EADS)  
« Critères de ruptures basés sur la mécanique de l'endommagement - Application à des alliages d'aluminium aéronautiques »

16h30 Merhy E. (PSA Peugeot Citroën)  
« Caractérisation de la propagation de fissure pour l'AS7G03 sous un chargement thermomécanique de fatigue »

17h10 fin

# Annexe : Résumés

**Leblond J.-B. (Université Pierre et Marie Curie, IJLRA)**

**« Quelques problèmes actuels en mécanique de la rupture ductile »**

Cet exposé passe en revue quelques problèmes théoriques qui se posent actuellement en mécanique de la rupture ductile. Quatre sujets sont envisagés :

- 1) L'accélération de la rupture ductile sous l'effet de chargements cycliques, due à la croissance continue de la porosité moyenne au cours des cycles.
- 2) Les effets de forme des cavités, schématisées comme des ellipsoïdes généraux (à trois axes distincts).
- 3) L'extension du travail classique de Thomason sur la coalescence des cavités sous chargement de traction à des chargements généraux.
- 4) La localisation infinie de l'endommagement dans les modèles standard, et une solution possible à ce problème.

**Pardoen T. (Université Catholique de Louvain, iMMC)**

**« Void coalescence modelling : strain hardening, second population and shear effects »**

Except for some perfect single crystals and some pure polycrystals, ductile fracture in metallic materials is always the result of void coalescence, which can be preceded or not by plastic localization such as necking or shear banding. Void coalescence is also a plastic localization mechanism but at the level of the ligaments connecting the cavities. It is directly controlled by the local geometry of the void/ligament configuration. After the onset of coalescence, the voids keep growing towards each other. In many instances, but not always, the key step in this process is the onset of void coalescence which is a good indicator of the ductility of the material. Several criteria have been proposed in the past to predict the onset of void coalescence, essentially relying on geometrical arguments. During the last few years, we have put some efforts in introducing several physical features, which can be dominant depending on the metal and on the loading conditions, i.e. the effect of strain hardening, the effect of shear and the effect of a second population of voids on void coalescence. These enhancements will be described in the presentation. We will also revisit the original criterion of Thomason and briefly address the entire coalescence process.

**Besson J. (Ecole des Mines, Cdm)**

**« Simulation de la déchirure ductile »**

Les modèles à bases physiques permettant de décrire les mécanismes de la rupture ductile ont connu des développements continus depuis les années 1970. Il est désormais possible de décrire la germination et la croissance des cavités mais également leur changement de forme et leur rotation. La coalescence est également prise en compte par les modèles en intégrant évolution des distances entre cavités. Il est aussi possible de tenir compte de l'anisotropie plastique.

En dépit de toutes ces avancées, l'emploi de ces modèles pour prédire, grâce à la simulation par éléments finis, la résistance à la fissuration de structures reste très limité. Cela est en partie dû au fait que les calculs restent peu fiables et peu robustes. Ces comportements induisent en effet une localisation de la déformation et de l'endommagement et ainsi une forte dépendance au maillage (taille, orientation, formulation, ...). La présentation se concentrera sur des exemples de simulation de la propagation de fissures ductiles en mettant l'accent sur les problèmes numériques, les solutions pragmatiques actuelles et les solutions envisagées à plus long terme.

**Tanguy B. (CEA Saclay)**

**« Endommagement ductile des aciers : identification des modèles à partir de l'expérimentation »**

Dans le monde industriel, les structures dont on souhaite assurer l'intégrité sont gérées par le concept de la tolérance au dommage. Dans le cas de structures fissurées, la justification de l'intégrité des structures est aujourd'hui basée sur l'approche globale de la rupture. Les courbes de résistance à la déchirure ductile sont utilisées pour évaluer la nocivité d'un défaut et son développement potentiel lorsqu'il est soumis à un chargement monotone. Cependant cette approche peut être mise en défaut dans certains cas de chargement.

Cet exposé s'intéresse à la rupture ductile dans les aciers et à sa modélisation par l'approche locale de la rupture qui permet d'envisager de répondre à ces cas et de compléter l'approche globale. L'expérimentation et la démarche d'identification des paramètres des modèles sont deux étapes intimement liées. L'exposé détaillera la modélisation et la démarche d'identification utilisée pour deux exemples industriels où l'approche globale ne peut être mise en oeuvre : la rupture ductile des pipelines et la rupture ductile des éprouvettes Charpy.

## **Perrin G. (AREVA)**

### **« Croissance de cavité et espérances industrielles »**

Le terme "ductile" a deux sens. Le premier sens est d'intérêt technologique : la rupture d'un matériau qui présente une certaine ductilité (EPFM). Il fait intervenir classiquement le paramètre d'énergie surfacique  $J$ . Le deuxième sens de l'expression est plus précise : il décrit un mode de rupture particulier dans lequel les champs mécaniques développent une porosité dans le matériau, lequel périt ensuite de sa coalescence.

Areva utilise la théorie de la rupture ductile dans le premier cadre pour établir la sûreté des installations. Une théorie enveloppe, avec des marges souvent importantes, est suffisante.

Areva étudie aussi la rupture ductile dans le deuxième sens depuis les années 1980 afin de parfaire sa connaissance des matériaux qu'il utilise pour construire les composants importants pour la sûreté des installations qu'il utilise ou qu'il vend.

C'est dans ce contexte qu'Areva participe au développement de ces sciences et techniques.

Cet exposé exposera les choix d'Areva en cette matière et les raisons qui y ont conduit : utilisation de l'approche locale ; cadre du matériau de Gurson ; modèle à moments de contraintes.

## **Lorentz E. (EDF R&D)**

### **« Verrous et perspectives en matière de prédiction de la rupture ductile à EDF R&D »**

Si le risque de rupture fragile demeure l'élément dimensionnant pour les composants critiques des centrales nucléaires, certaines situations de chargement et de matériaux conduisent à s'intéresser aux conditions de rupture ductile. A ce titre, l'extension de la mécanique de la rupture linéaire aux configurations élastoplastiques constitue l'approche la plus immédiate. Une autre voie vise à modéliser le développement de l'endommagement ductile jusqu'à l'échelle du point matériel. Plus ambitieuse, elle se heurte à un certain nombre de difficultés - tant au niveau de la modélisation que de sa mise en œuvre numérique - qui ne la prédisposent pas à une mise en œuvre industrielle à court terme. C'est pourquoi on examine également une troisième option, intermédiaire en difficultés comme en richesse de description, qui s'appuie sur une formulation cohésive surfacique de la fissuration.

## **Deloison D. (EADS)**

### **« Critères de ruptures basés sur la mécanique de l'endommagement - Application à des alliages d'aluminium aéronautiques »**

Trois modèles classiques (Rice&Tracey, Lemaitre et Bonora) sont revisités dans un cadre unifié pour proposer des critères simples d'amorçage des fissures en statique. Les critères sont comparés entre eux sur leur capacité à reproduire les résultats expérimentaux et leur facilité de mise en œuvre.

## **Merhy E. (PSA Peugeot Citroën)**

### **« Caractérisation de la propagation de fissure pour l'AS7G03 sous un chargement thermomécanique de fatigue »**

Jusqu'à présent, PSA utilise un dimensionnement à l'amorçage de la fissure, la phase de propagation étant méconnue. Cependant, des essais réalisés sur des culasses montrent que certaines fissures peuvent être stables, alors que d'autres ont une durée de propagation voisine de la durée nécessaire à l'amorçage. Il est donc possible de profiter de la phase de propagation. Ceci, en affinant le critère d'acceptation en fatigue de façon à ce qu'il tienne compte de la phase de propagation, en l'incluant dans la durée de vie de la pièce. On éviterait ainsi le surdimensionnement.

Le but de l'étude se traduit ainsi par la recherche d'une loi de propagation de fissure sous un chargement thermomécanique anisotherme (à rapport de charge négatif) permettant d'estimer la vitesse de propagation des fissures présentes dans les culasses des moteurs HDI. On devrait ainsi pouvoir étendre la durée de vie des pièces, à terme.

Pour cela, une partie majeure du travail a été consacrée à la caractérisation expérimentale de la propagation de fissure dans l'AS7G03. Les effets de la température, du rapport de charge, de l'amplitude des facteurs d'intensité de contrainte, de la fréquence du chargement et de la compression ont été tous étudiés. L'une des observations principales de cette phase de l'étude porte sur la mixité et la progressivité du mécanisme de propagation. À faible  $K_{max}$ , la fissuration est essentiellement due à un effet de fatigue. Avec l'augmentation de  $K_{max}$ , l'effet de la fatigue diminue alors que celui du chargement statique, causant une rupture ductile à forte déformation plastique, augmente.

# Informations pratiques

La réunion se tiendra en salle TA220 (voir plan), une inscription préalable est obligatoire.

## Repas du midi

Un buffet gratuit sera servi sur place le midi.

## Accès en transports en commun

Métro ligne 13 : Terminus Châtillon-Montrouge, puis bus 195 ou 295, arrêt Clamart-Fontenay Division Leclerc.

Métro ligne 4 : Terminus Porte d'Orléans, puis bus 295, arrêt Clamart-Fontenay Division Leclerc.

Métro ligne 12 : Terminus Mairie d'Issy, puis bus 394, arrêt Clamart-Fontenay Division Leclerc.

RER C : gare Issy Val-de-Seine, puis bus 394, arrêt Clamart-Fontenay Division Leclerc.

RER B : gare Bourg-la-Reine ou Fontenay-aux-Roses, puis bus 394, arrêt Clamart-Fontenay Division Leclerc.

## Accès en voiture

A partir de PARIS, Porte de Châtillon : emprunter la D906, direction "Clamart Versailles", jusqu'au rond-point de la Division Leclerc (limite Châtillon-Clamart). Le site EDF est situé sur la gauche du rond point.

A partir de l'A86 Versailles : Depuis l'A86, emprunter la sortie "Clamart Paris Porte de Châtillon", prendre la D906 sur environ 3 km jusqu'au rond-point de la Division Leclerc (limite Châtillon-Clamart). Le site EDF est situé sur la droite du rond-point.

## Plan du site EDF R&D de Clamart

