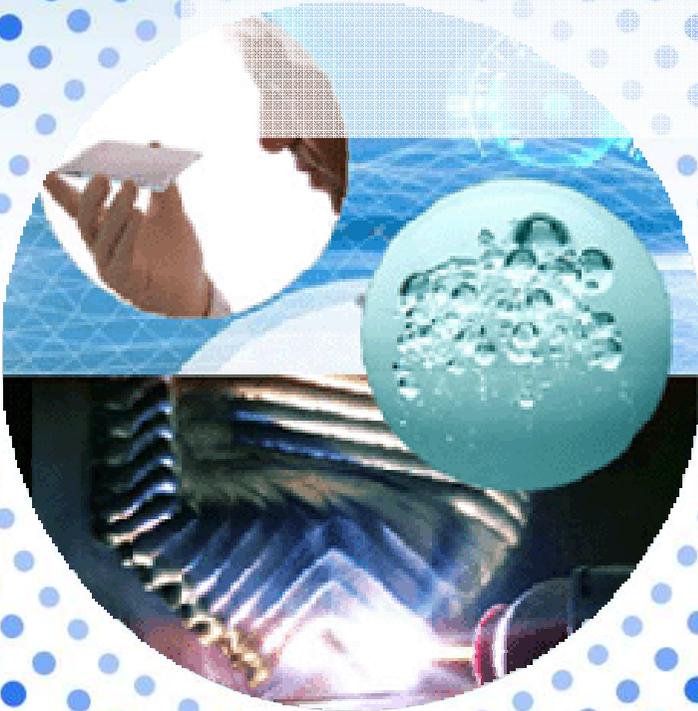


Une approche aux échelles méso et microscopiques peut-elle nous permettre d'améliorer le dimensionnement en fatigue de nos composants ?



GT2 – SF2M
2 avril 2013
F. CURTIT



- ◎ Quel est le domaine concerné
- ◎ La démarche actuelle pour le dimensionnement en fatigue et les limites d'une approche phénoménologique
- ◎ Le projet AFGRAP – quelques aspects des évolutions récentes

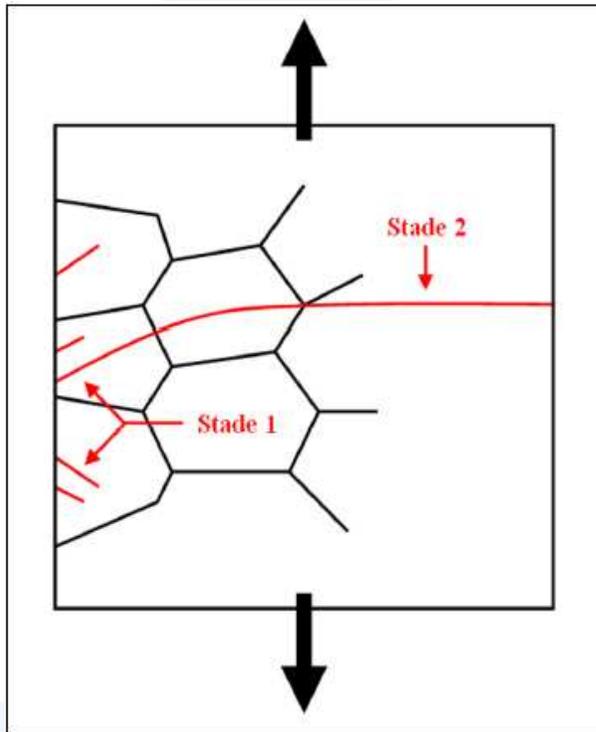


Le scénario de l'endommagement



- Localisation de la déformation
- Apparition d'un relief de surface irréversible

microstructure



- Amorce d'une micro fissure intra-granulaire
- Extension de la fissure aux grains voisins

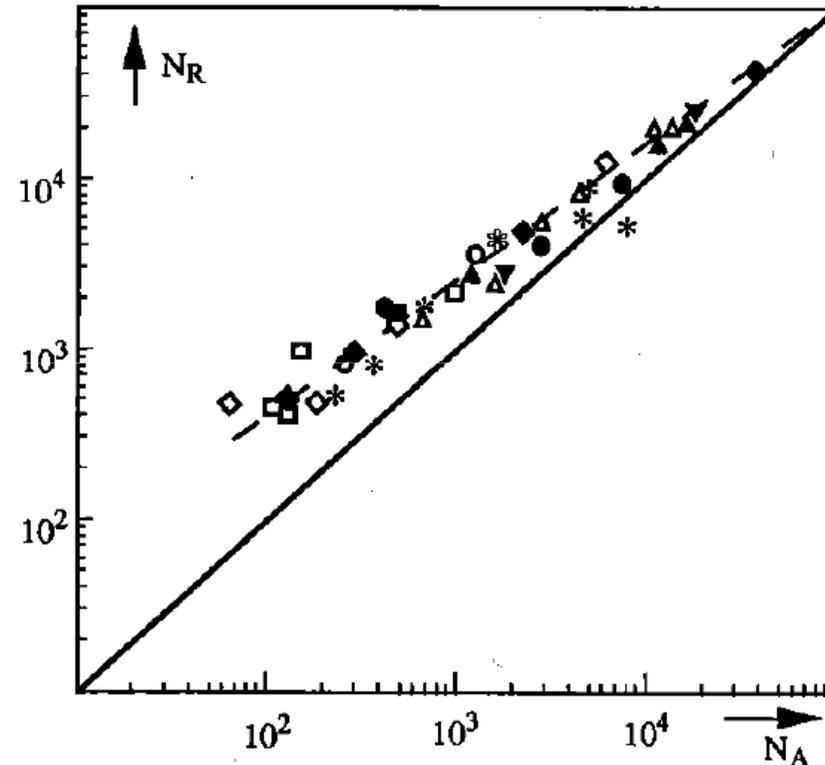
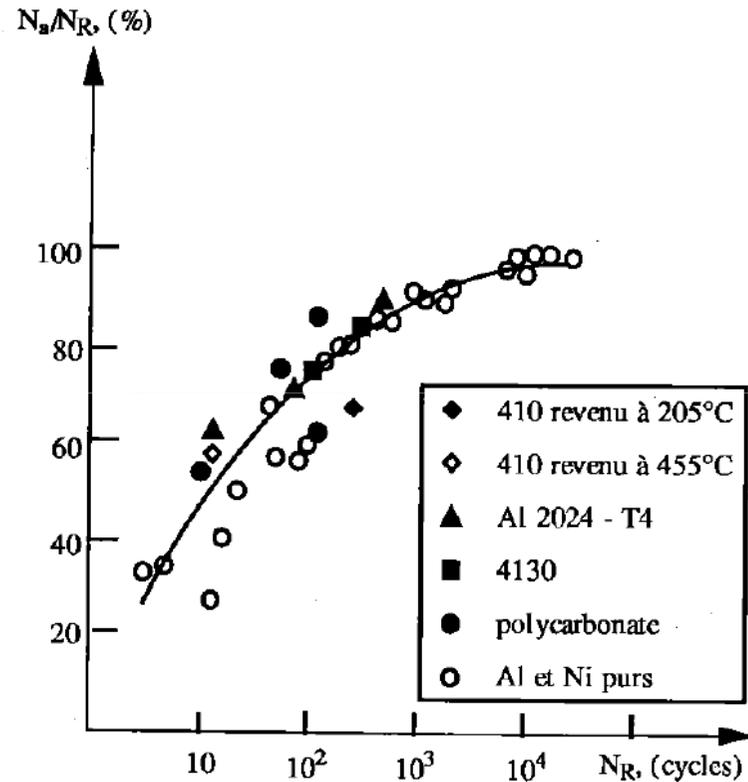
mécanique

- Propagation d'une fissure mécaniquement courte
- Propagation d'une fissure longue – régime de Paris



Quels sont les domaines pertinents

Amorçage industriel : fissure de 2 à 3 mm



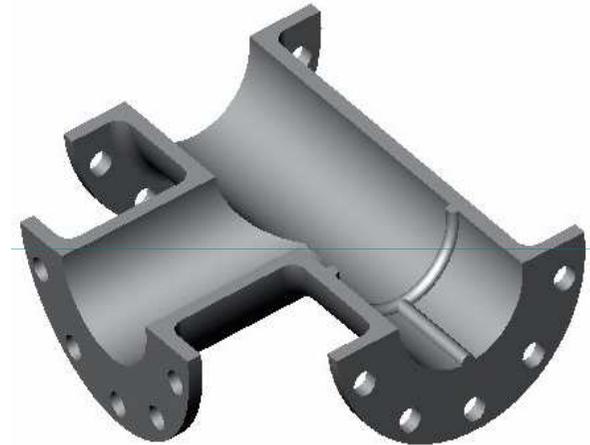
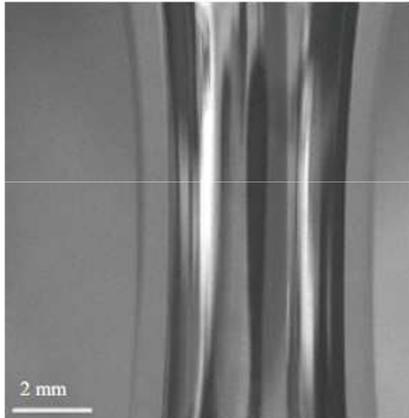
Les phases d'amorçage intra-granulaire et de micro propagation sont d'autant plus importantes que l'amplitude de chargement est faible.

On s'intéresse donc prioritairement au domaine polycyclique.



De l'éprouvette au composant

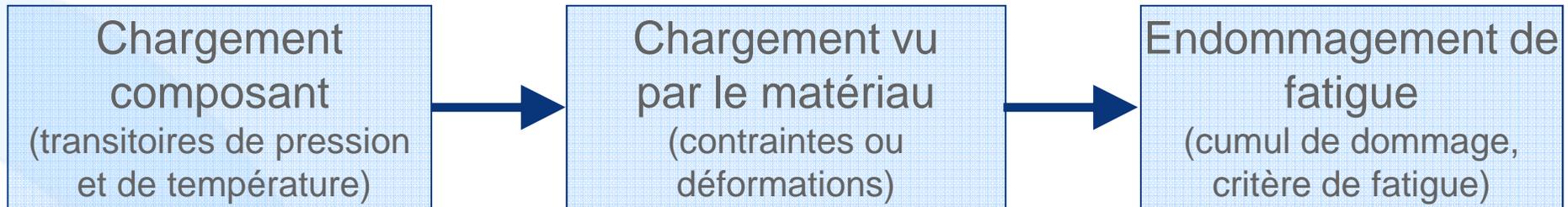
- ⊙ Dispersion intrinsèque du matériau
- ⊙ Effet d'échelle
- ⊙ Nature du chargement (radialité, multiaxialité, contrainte moyenne)
- ⊙ La finition de surface
 - Ecrouissage
 - Contraintes résiduelles
 - Rugosité
- ⊙ L'influence du milieu
- ⊙ Ainsi que la présence de soudures, chargements d'amplitude variable ...



Nécessité de définir des marges de sécurité



Une démarche globale



Chargements de conception

Chargements issus du REX

Calculs élastiques avec correction de plasticité

Calculs élastoplastiques

Calculs élastoplastiques avec prise en compte des contraintes résiduelles et/ou de l'écrouissage

Courbe de fatigue codifiée (Wöhler)

Critère de fatigue plus évolués (formulation énergétique)



Les contextes d'application

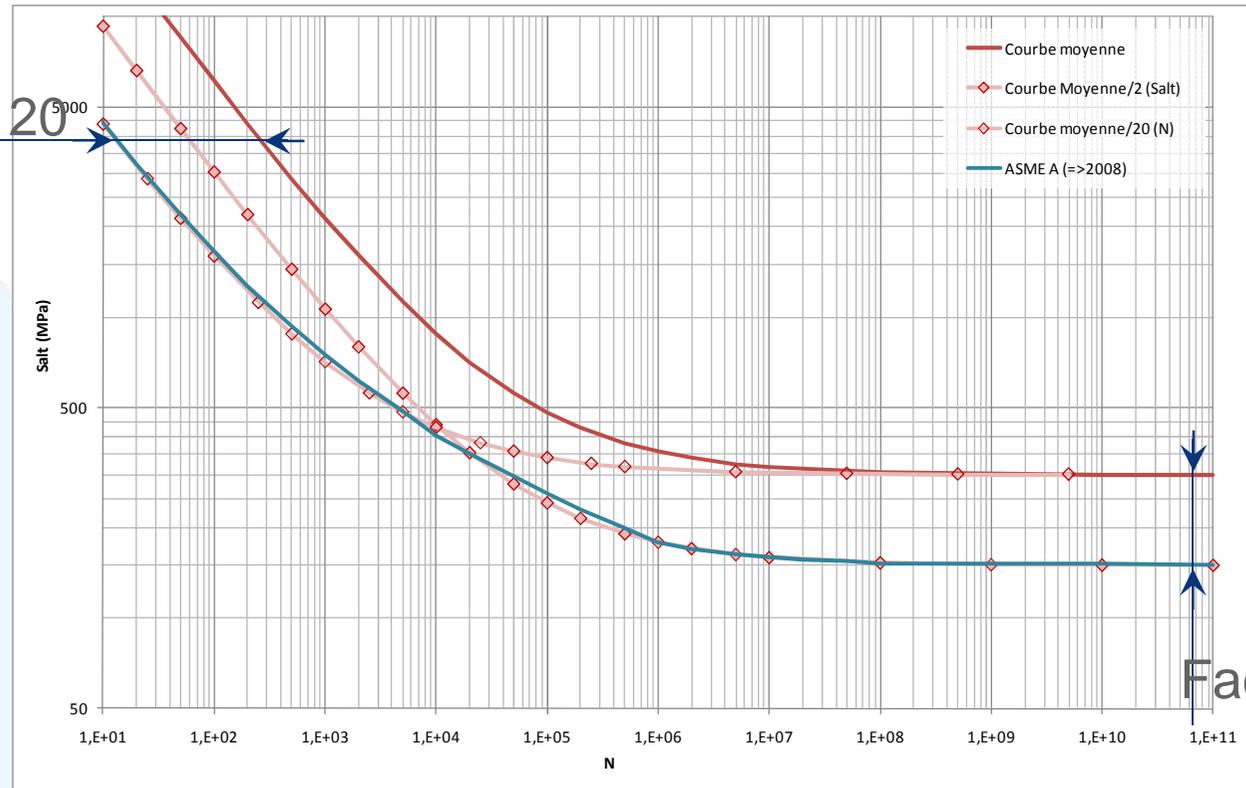
Complexité croissante

- ◎ Phase de conception
 - Chargements enveloppes ; estimation des contraintes simple
- ◎ Justification en exploitation (écarts ; réparations ; périodicité des contrôles)
 - Estimation plus fine de l'endommagement ; Courbe de fatigue codifiée
- ◎ Appuis aux dossiers de sureté
 - Lois de comportement plus fines ; critères d'endommagement plus évolués
- ◎ Spécification de nouveaux composants
 - Quelle rugosité et/ou procédé spécifier
 - Quelle est l'influence d'une nuance légèrement différente



Les courbes de fatigue codifiées

Facteur 20



Facteur 2

Dispersion intrinsèque du matériau : $F_{disp.}$

Effet d'échelle : $F_{ech.}$

Influence du chargement : $F_{char.}$

Influence de l'état de surface : $F_{surf.}$

Influence de l'environnement : $F_{env.}$

$$F_{total} = F_{disp.} \times F_{ech.} \times F_{char.} \times F_{état surf.} \times (F_{env.})$$



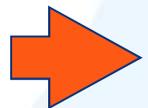
Utilisation de critères plus évolués

- ⊙ On peut prendre en compte les spécificités du chargements
 - Contraintes moyennes, radialité ... (sous réserve d'une LdC adaptée)
- ⊙ L'état de surface peut être (partiellement) pris en compte
 - Ecrouissage, contraintes résiduelles
- ⊙ Les effets de rugosité, d'environnement ne sont pas intégrés dans la simulation
- ⊙ La formulation d'un critère est plus ou moins empirique



Les limites d'une approche phénoménologique

- ⊙ Les conditions représentatives ne sont pas toujours faciles à reproduire sur des éprouvettes (chargement biaxial, ...)
- ⊙ La prise en compte d'un nouveau paramètre se traduit par une matrice d'essais conséquente
- ⊙ Toute extrapolation des résultats est impossible (et les interpolations délicates)
- ⊙ Des questions restent en suspend :
 - Doit-on cumuler les effets aggravants
 - Peut-il exister des synergies entre deux phénomènes aggravants (environnement / état de surface, ...)



Nécessité d'une meilleure compréhension des mécanismes



Micromécanique et fatigue

- ⊙ Dans le domaine du comportement la micro mécanique permet de prédire la réponse d'un matériau en fonction des phases qui le constituent, de sa texture, ...
- ⊙ On constate un retard dans le domaine de la fatigue :
 - La fatigue est un mécanisme local : effet de voisinage, de substrat
 - Le chargement cyclique se traduit par des calculs lourds (au moins quelques cycles sont nécessaires) et parfois délicats (pb de convergence aux changements de sens de chargement).
 - On observe de nombreuses amorces qui nécessitent une analyse statistique



Le projet AFGRAP

Amorçage d'une fissure de **F**atigue dans un **GR**ain d'**A**grégat polycristalin et **P**ropagation dans les grains adjacents

- ◎ Projet ANR MatEtPro 2009-2013
- ◎ 4 partenaires industriels
 - AREVA, APERAM (ARCELOR-MITTAL), EDF, CEA
- ◎ 5 Partenaires universitaires
 - ECP - MSSMAT ; ENSMP - CdM ; ENSMA - Pprime ; Univ. Savoie-SYMME ; INP Grenoble – SIMAP
- ◎ Etudes centrées sur un acier 316L(N) à Température ambiante



Les objectifs

◎ Objectifs scientifiques

- Mieux comprendre les mécanismes d'amorçage en liens avec le chargement et l'état de surface.
- Proposer des critères pour l'amorçage intra-granulaire et pour le franchissement des premiers joints de grains.

◎ Objectifs industriels

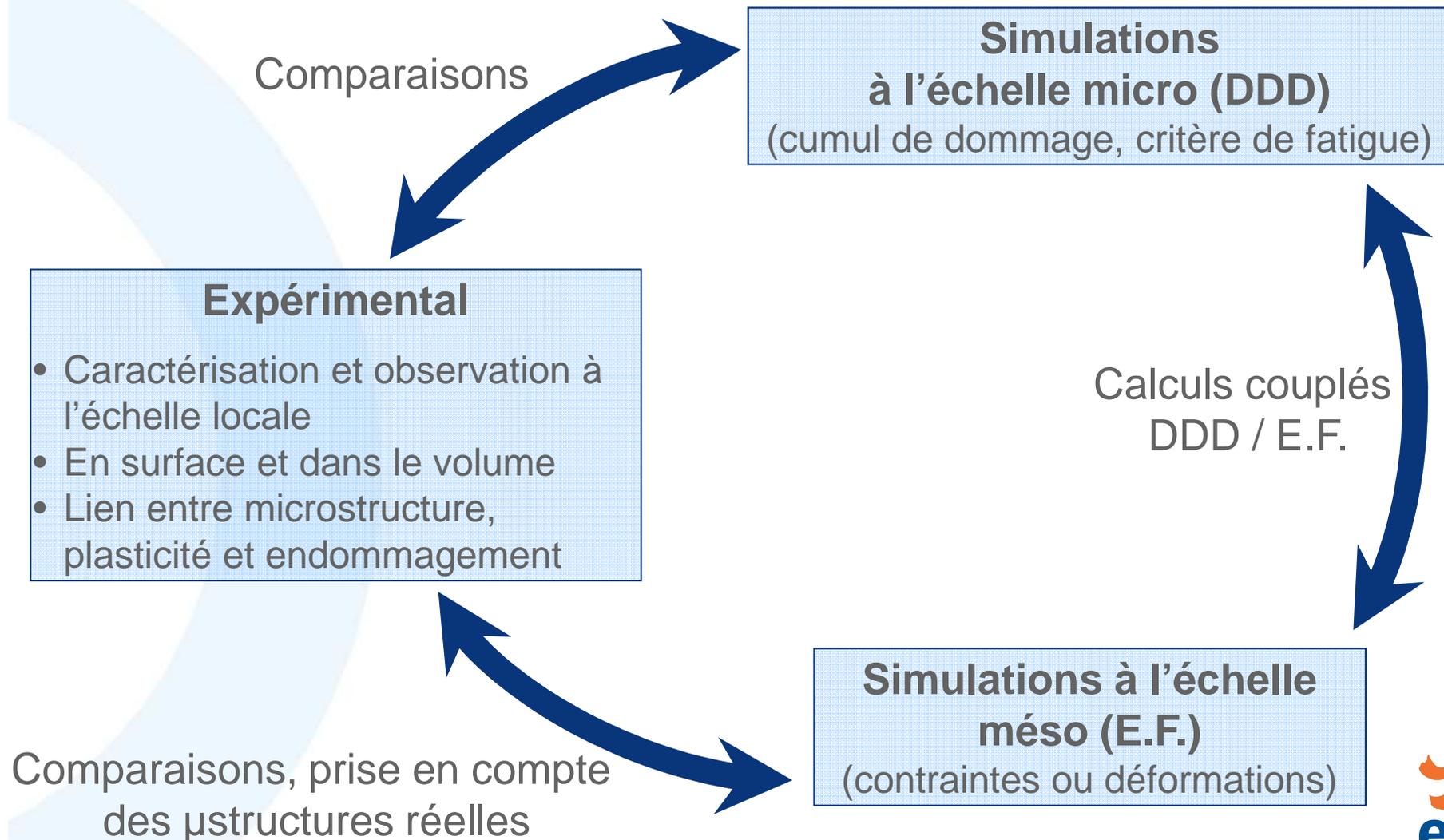
- Définir un état de surface (rugosité, procédé, ...) technico-économique optimal en fonction des sollicitations.
- Optimiser des plans d'essais en fatigue

Dans le cadre du projet, on se focalise :

- sur l'amorçage au niveau des PSB
- Sur un matériau : l'acier 316L(N)

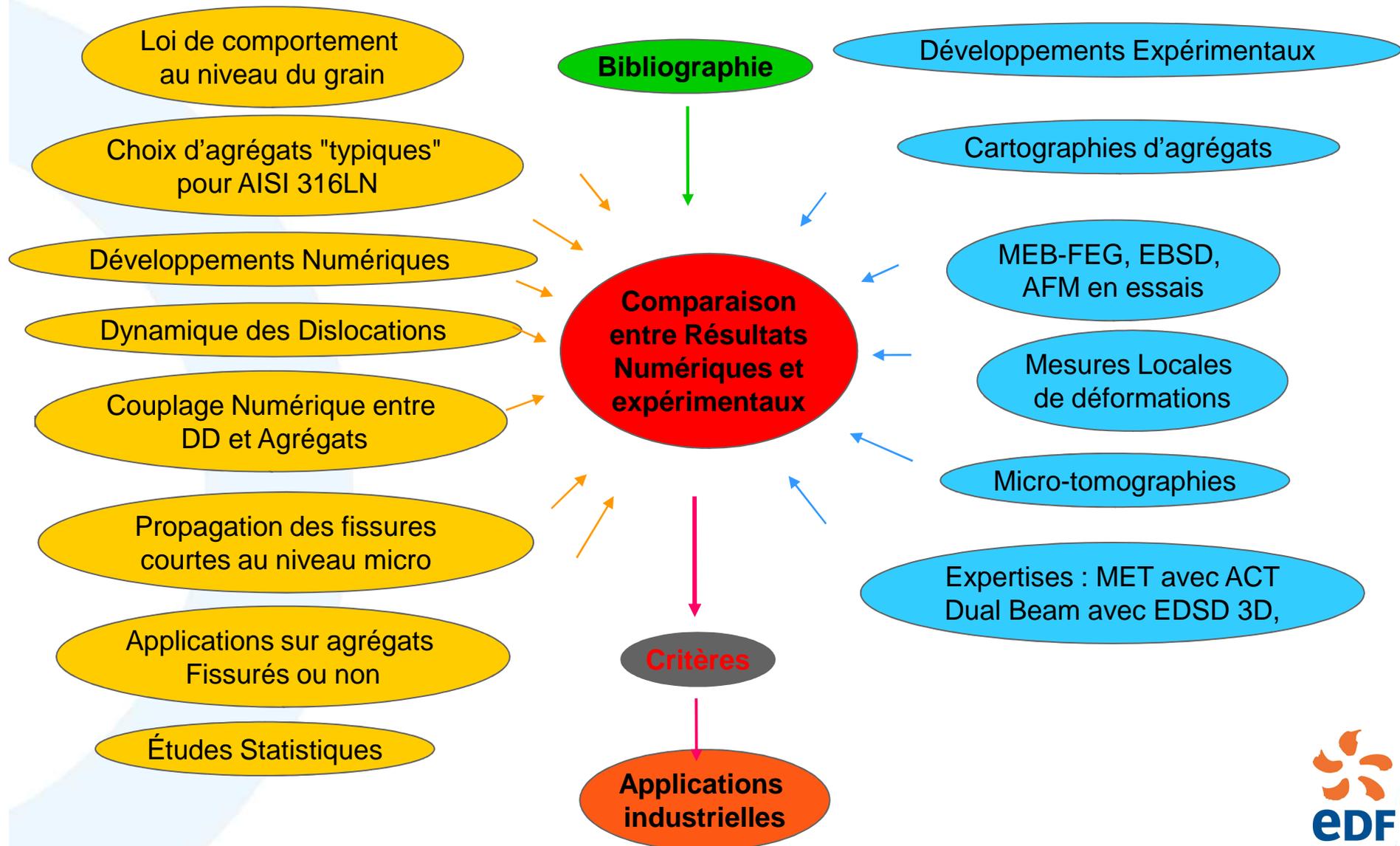


Les grands axes du projet





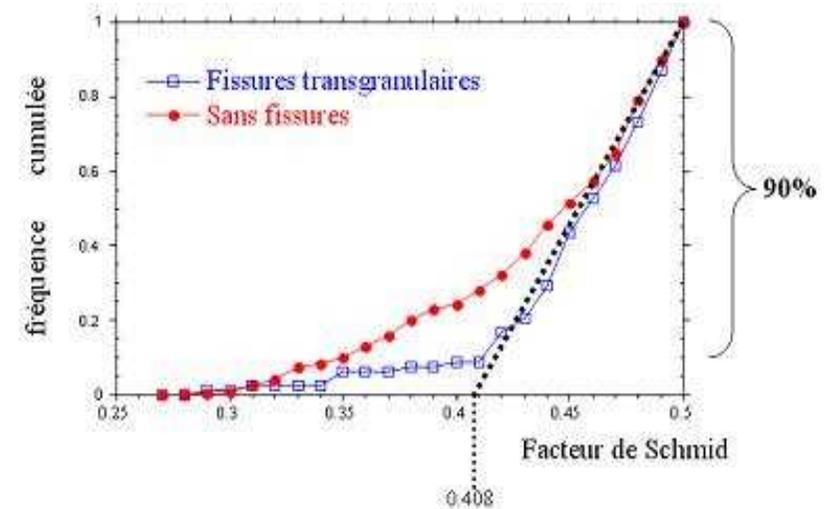
Tâches AFGRAP



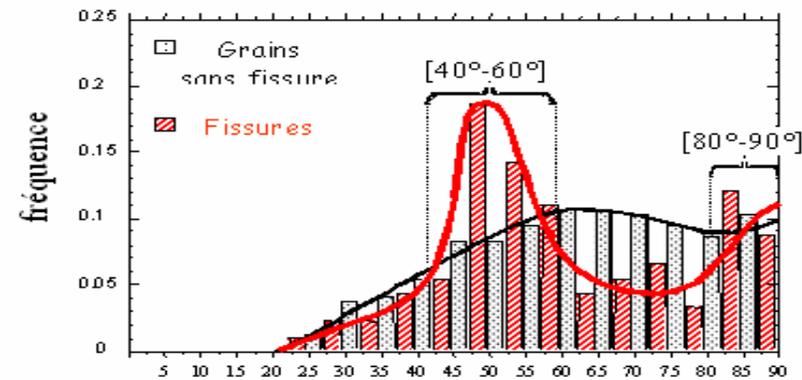
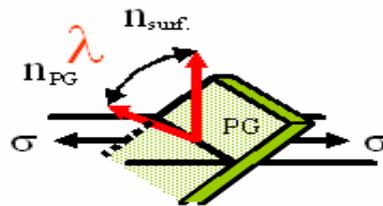


Amorçage – les acquis expérimentaux

⊙ L'amorçage intra-granulaire est corrélé au facteur de Schmid



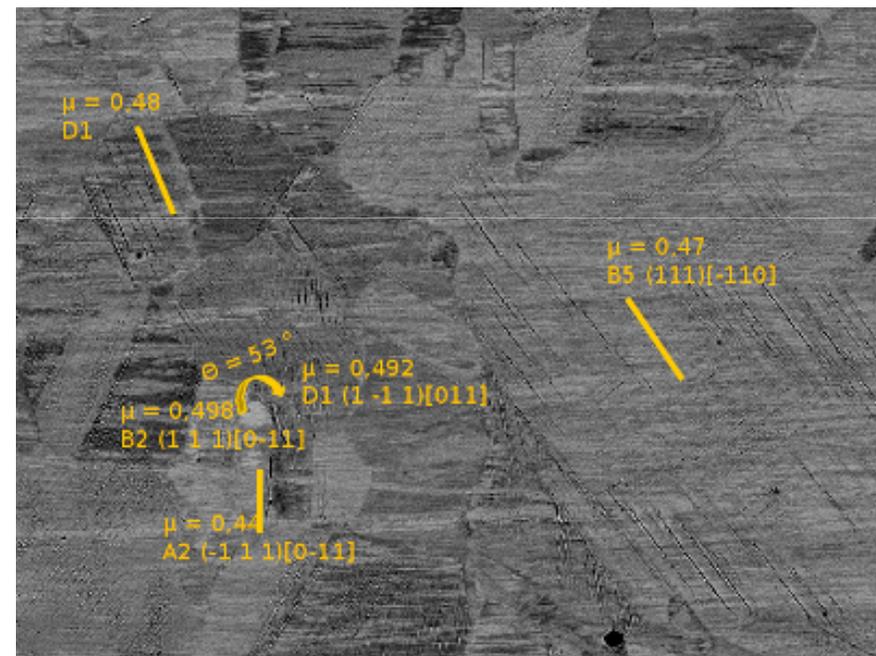
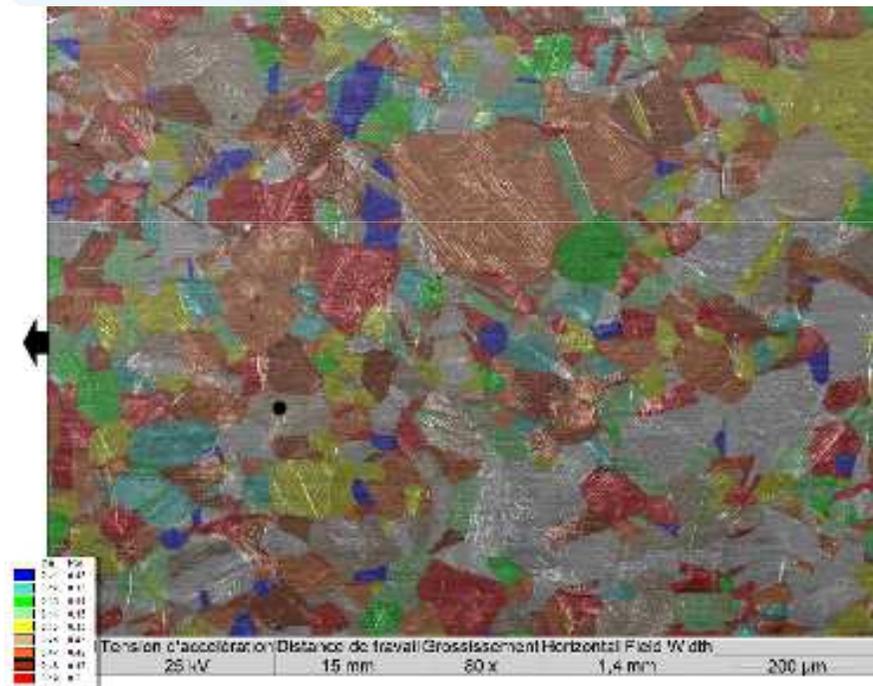
⊙ L'orientation du système principal est importante





Les nouvelles possibilités expérimentales 1

- En surface, il est possible de faire des cartographie EBSD de grande dimension, et donc d'accéder à des études statistiques de l'endommagement ou de l'activité plastique sur une population suffisante.



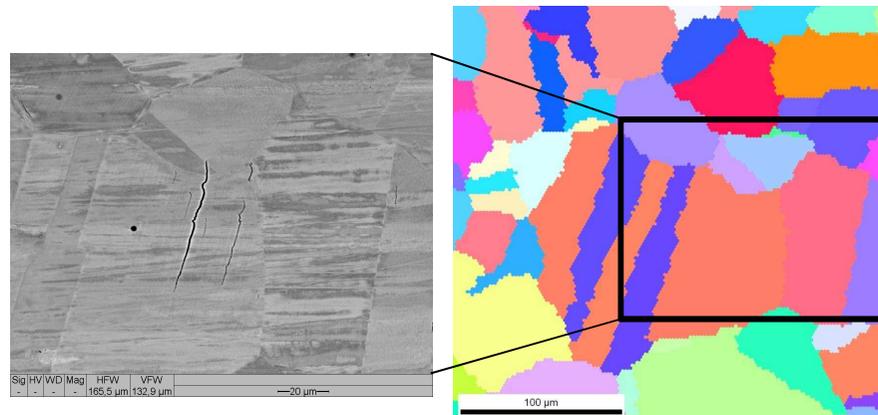
Thèse de T. GHIDOSI - Pprime





Les nouvelles possibilités expérimentales 2

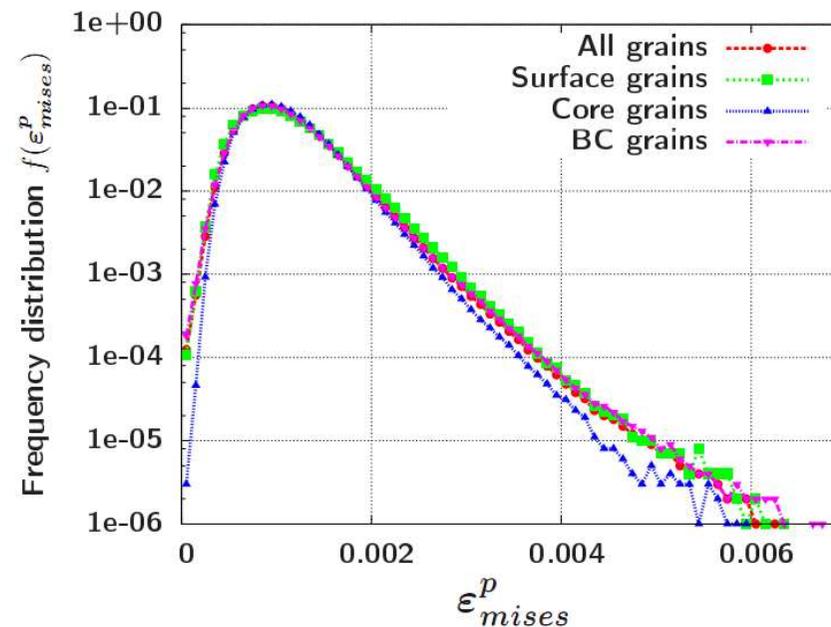
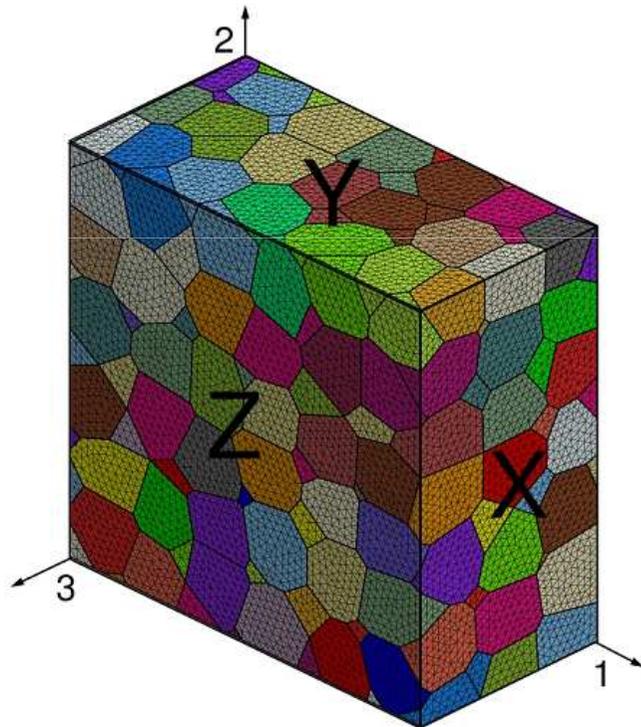
- On peut accéder à la microstructure dans le volume
 - Pour caractériser le matériau par EBSD séries (thèses d'Anne Le Pecheur, Julien Schwartz, ...)
 - Pour caractériser le matériau et l'endommagement (thèse de Th Ghidossi)
 - Agrégat de grande dimension (~ 5,4*1,4 mm) sur une éprouvette cyclée, essai interrompu à 20% de la durée de vie. Plus de 3800 grains et de nombreuses fissures
 - 39 couches sur 115 μm d'épaisseur
 - Accès à la forme des fissures dans le volume
 - Sur des volumes plus restreints, le FIB permet une analyse encore plus fine





Les modélisations E.F. sur agrégats synthétiques

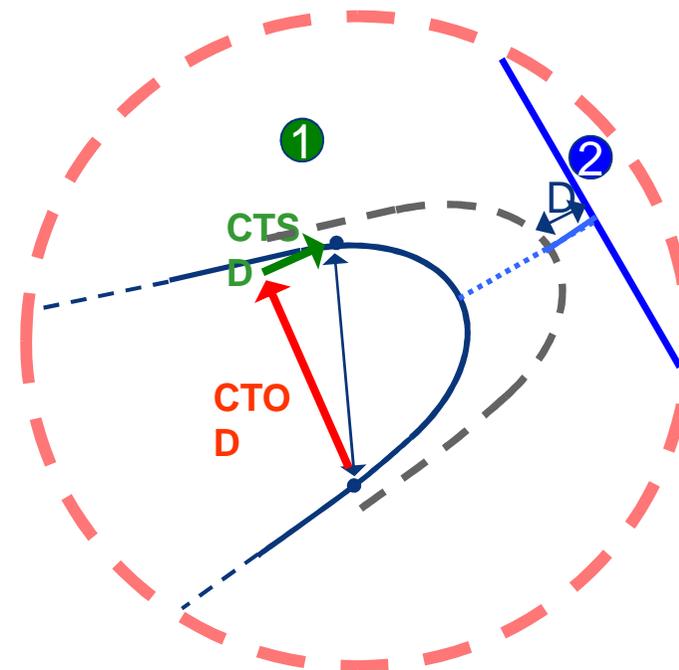
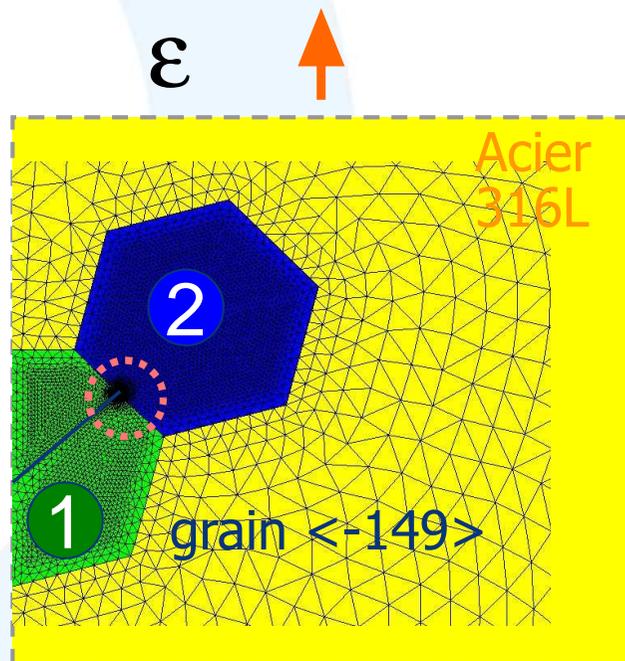
- ⊙ L'évolution de la puissance de calcul permet aujourd'hui de réaliser un nombre significatif de simulations et d'accéder à une analyse statistique des résultats (Y. Guilhem – ENSMP)





Les études E.F. sur le franchissement du joint de grain

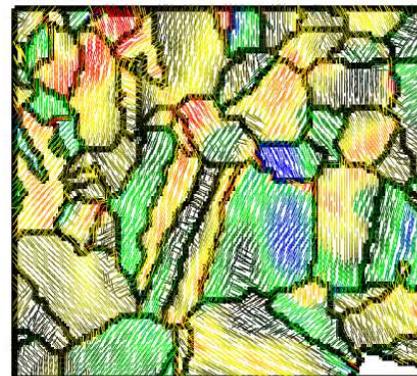
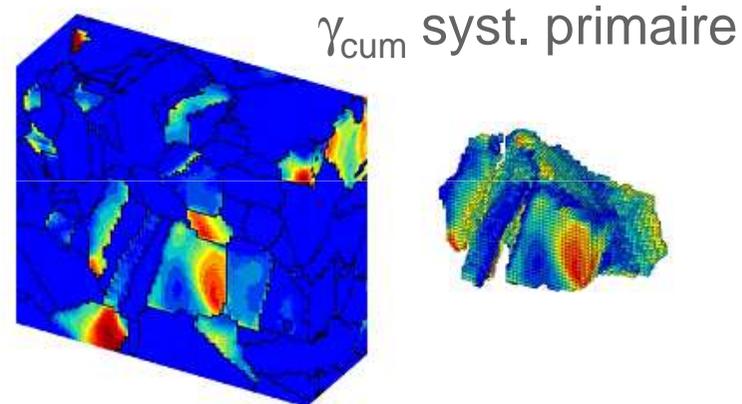
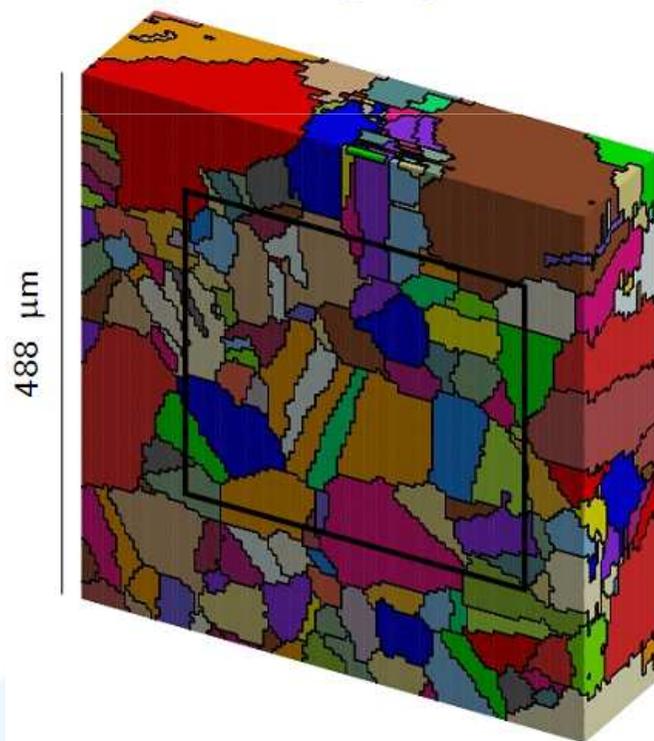
- ⊙ Simulation 2D1/2 ; deux grains en plasticité cristalline dans une matrice élastoplastique.
- ⊙ On s'intéresse à différentes configurations de désorientation entre les deux grains (angles de tilt et de twist)
- ⊙ Une fissure est introduite dans le premier grain. On peut observer une décroissance du CTSD plastique à l'approche du joint.





Les modélisations E.F. sur agrégats réels

- Des agrégats réels sont reconstruits autour de grains fissurés à partir des EBSD séries réalisées par T. Ghidossi
- Les simulations sont réalisées sur les mêmes configurations par plusieurs partenaires (et avec plusieurs Lois de plasticité cristalline) et différents critères sont évalués.



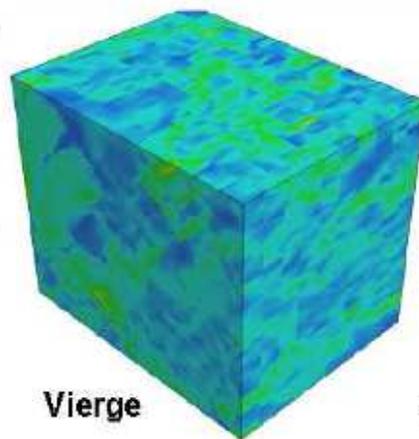
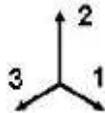
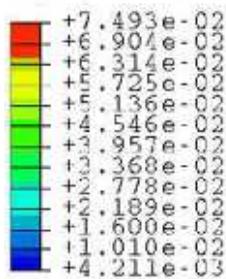
Indicateur d'intensité et d'orientation des PSB



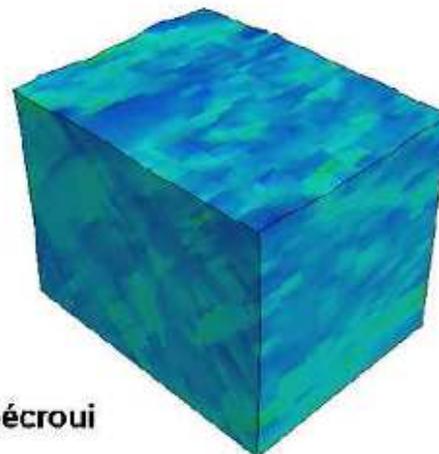
Calculs E.F. et état de surface

- ⊙ A. Le Pecheur : calcul d'une configuration avec gradient d'écoulement, contraintes résiduelles et relief.
- ⊙ Y. Guilhem : calculs avec des reliefs d'amplitude différentes

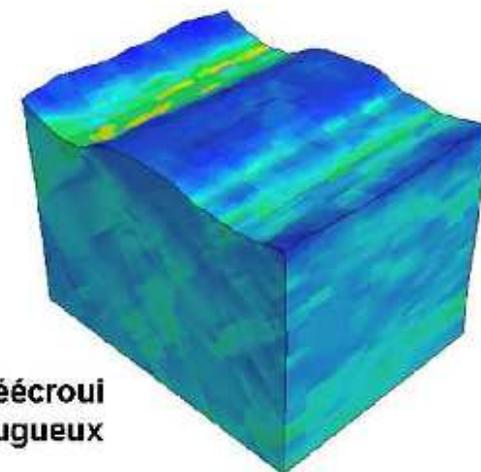
On s'intéressait initialement à la portée en profondeur de l'effet de la rugosité



Vierge



Précroui

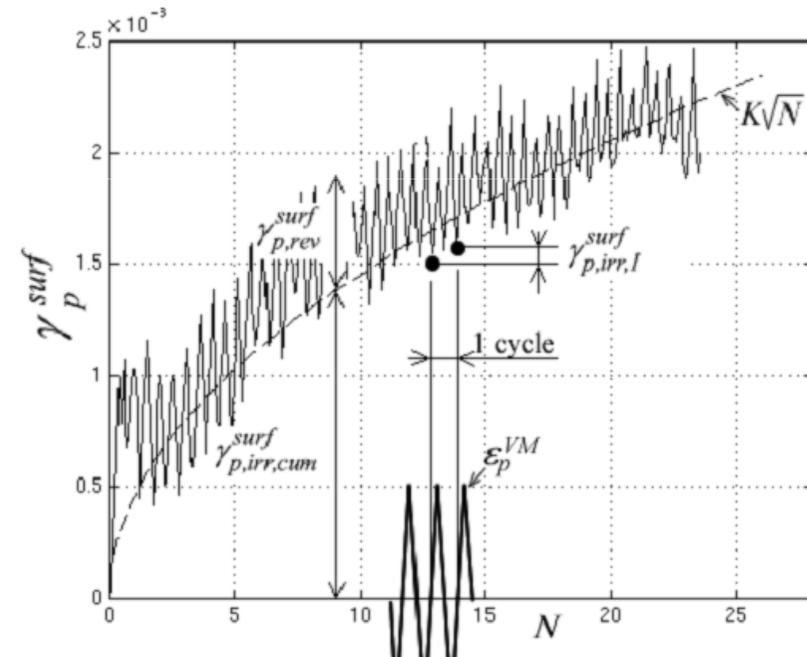
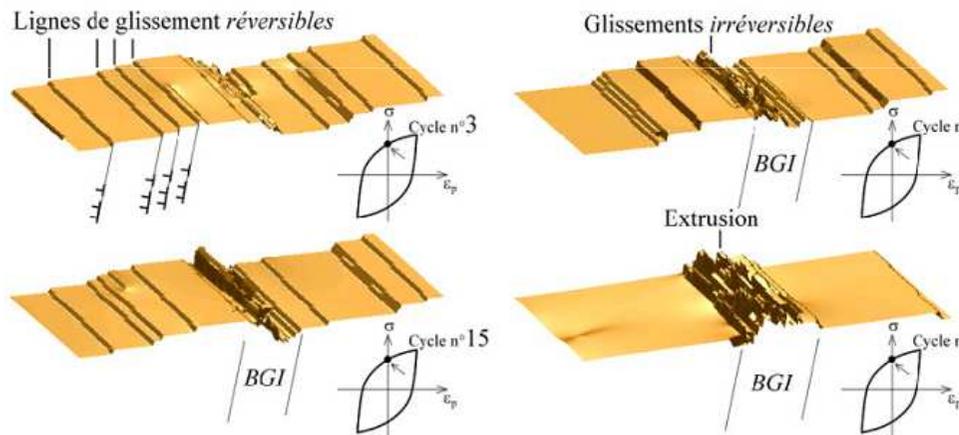


Précroui
Rugueux



Les modélisations de l'amrçage en DDD (configurations académiques)

- A chaque cycle, le glissement plastique génère un relief en surface. Une partie de ce relief est irréversible et croît au fil des cycles jusqu'à atteindre une hauteur critique.

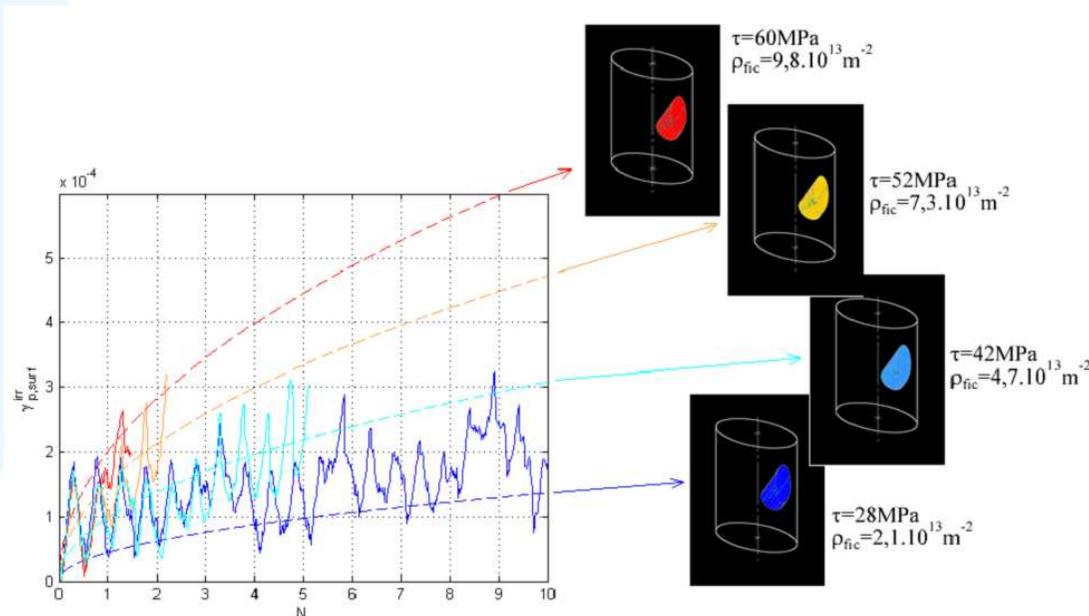


Ch Déprés, M. Fivel, Ch. Robertson



Les modélisations de l'amorçage en DDD (vers les conditions réelles)

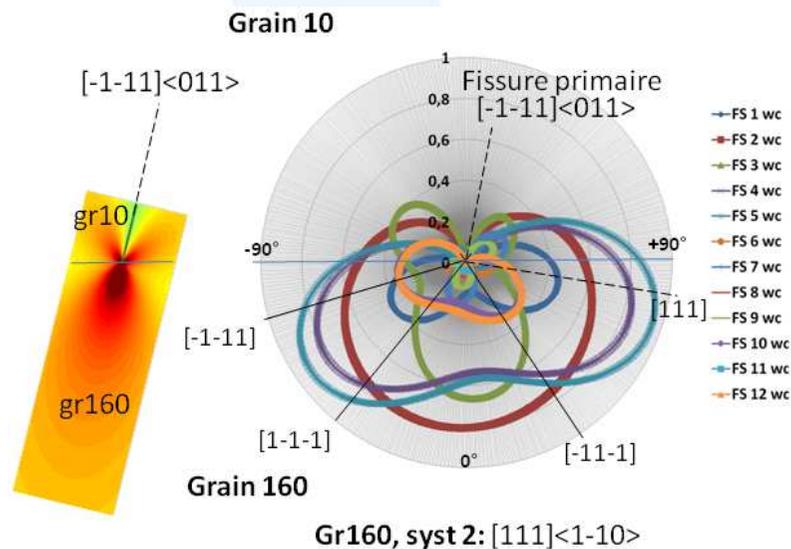
- A partir de simulations sur un grain isolé modélisé en DDD on examine :
 - L'influence de l'écroûissage initial
 - L'influence d'un chargement d'amplitude variable
 - L'influence d'une rayure en surface
 - L'influence de la taille de grain (diamètre, profondeur, volume "débouchant")
 - L'influence d'une contrainte moyenne



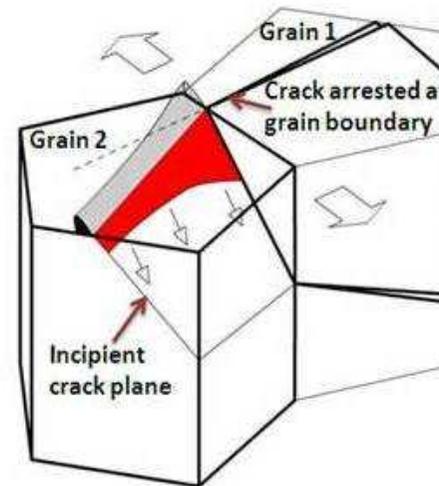


Les modélisations de la micro-propagation en DDD

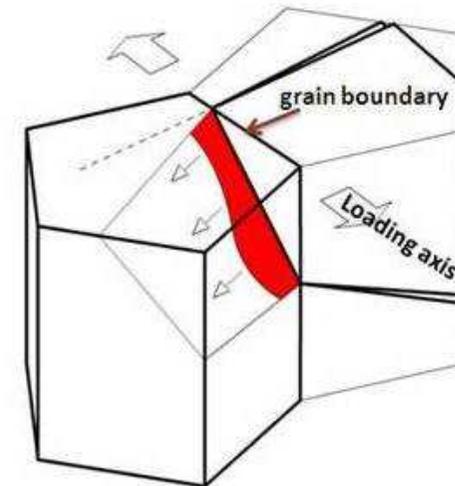
- On fait l'hypothèse d'une propagation indirecte dans le grain adjacent.
- On introduit une fissure dans le grain primaire (champ de contrainte analytique) et on examine l'amorçage d'une fissure dans le grain secondaire.
- Une première validation expérimentale a pu être obtenue.



Indirect transmission



Direct transmission





Lien entre échelles méso et micro

- Méthode retenue : couplage entre calculs E.F. et DDD
 - Grain(s) DDD dans une matrice E.F. en plasticité cristalline
 - Prise en compte de situations réelles (issues des EBSD sériées de Pprime)
 - Possibilité de simuler des configuration réelles de grains fissurés
- Objectifs :
 - Comparaison simulation / expérimental
 - Comparaison entre simulations E.F. et DDD



Perspectives

- ⊙ Les investigations expérimentales dans le volume constituent une évolution significative (EBSD séries, FIB, tomographie, ...)
- ⊙ La puissance de calcul croissante donne accès à des analyses statistiques, y compris sur des configurations réelles.
- ⊙ Le couplage DDD / E.F. offre une piste intéressante pour mieux comprendre les mécanismes à l'échelle locale
- ⊙ On aurait pu parler également :
 - De l'identification des lois de plasticités cristalline
 - De la prise en compte des GND dans la loi de comportement
 - De l'évolution de la méthodologie (maillages semi-périodiques, ...)
- ⊙ Nous ne disposons pas encore de "vrai" critères micromécaniques quantitatifs
- ⊙ Les outils / méthodes d'analyse doivent encore évoluer afin de mieux "digérer" un volume de données de plus en plus conséquent.



Perspectives industrielles

- ⊙ La compréhension des mécanismes d'amorçage progresse, en particulier pour l'état de surface neutre, mais il faut évoluer vers plus de quantitatif.
- ⊙ L'influence des paramètres liés à l'état de surface (contraintes résiduelles, écrouissage et rugosité) reste une priorité
- ⊙ L'approche micro-mécanique est une voie à privilégier pour la prise en compte de l'environnement, de la fatigue en milieu jusqu'à la CSC



Fin !