



QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATION DE LOIS DE COMPORTEMENT EN GRANDES DÉFORMATIONS GÉNÉRÉES AVEC L'OUTIL MFRONT

J. Hure¹, M. Callahan¹, C. Ling^{1,2}, B. Tanguy¹, T. Helfer³

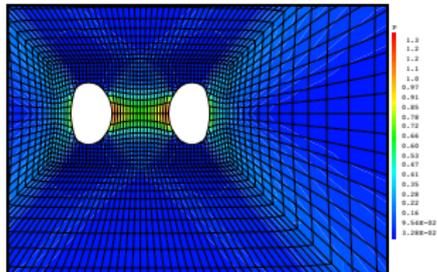
¹ CEA Saclay, Département des Matériaux pour le Nucléaire

² Mines ParisTech, Centre des Matériaux

³ CEA Cadarache, Département d'Étude du Combustible

Club Cast3M 2014
Paris, 28 Novembre 2014

- Étude du comportement mécanique des matériaux (irradiés)



- Modélisations et simulations Cast3M

- ✓ Lois de comportement
- ✓ Calculs de (petites) structures

- Collaboration EDF et Centres des Matériaux (Mines ParisTech)
 - ✓ Nécessite des lois utilisables dans plusieurs codes éléments finis
- Développement des lois de comportement sous MFront
- Applications rupture / endommagement / plasticité cristalline
 - ✓ Nécessite de prendre en compte les grandes déformations

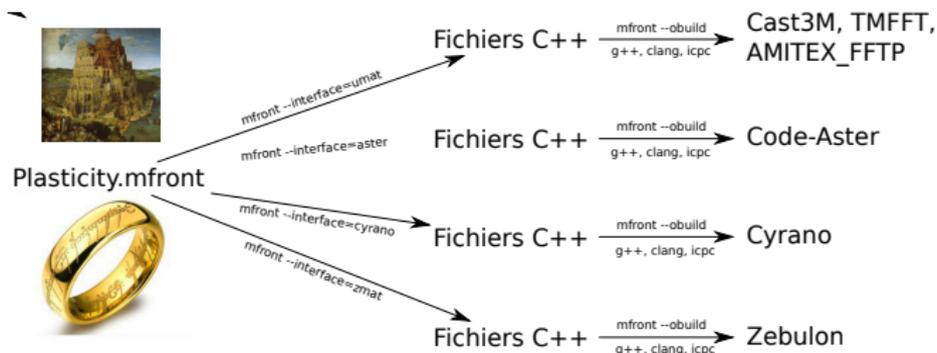
- MFront est un générateur de code issu cadre du projet PLEIADES codéveloppé par CEA et EDF;
- MFront a été mise en open-source à la demande d'EDF pour Code-Aster:
 - ✓ simplicité d'utilisation
 - ✓ robustesse et efficacité numérique
 - ✓ <http://tfel.sourceforge.net>

```

@DSL IsotropicPlasticMisesFlow; //< domain specific language
@UMATFiniteStrainStrategies[umat] {None, FiniteRotationSmallStrain,
    MieheApelLambrechtLogarithmicStrain};
@Behaviour Plasticity; //< name of the behaviour
@Parameter H = 22e9; //< hardening slope
@Parameter s0 = 200e6; //< elasticity limit
@FlowRule{ //< flow rule
  f = seq-H*p-s0;
  df_dseq = 1;
  df_dp = -H;
}
  
```

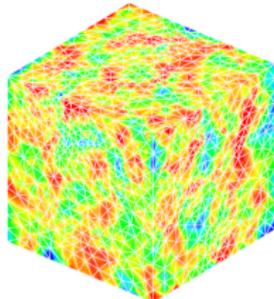
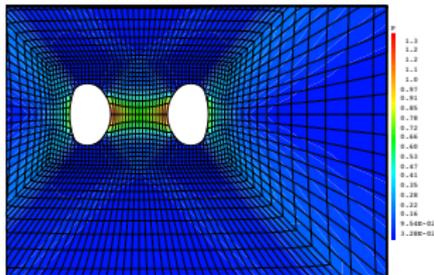
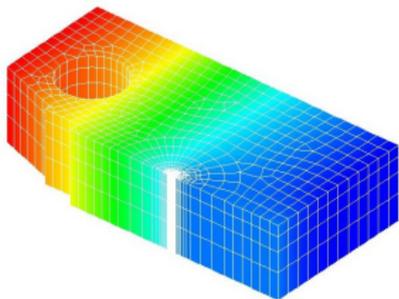
- Intégrateur spécifique et générique (explicite, implicite)

Les différentes interfaces de MFront



- À partir d'un fichier *unique*, MFront va générer des sources *spécifiques* aux différents solveurs
- Les bibliothèques générées peuvent être appelés depuis différents codes aux éléments finis (Cast3M, Code-Aster, ZeBuLoN, etc...) ou par transformée de Fourier rapide (TMFFT, AMITEX_FFTP, ...) ou directement via le `fortran`, le `C++`, ...

- 3 exemples de lois de comportement sous MFront ...
 - ✓ Prédiction de la rupture par clivage d'un acier de cuve
 - ✓ Croissance et coalescence de cavités dans un acier inoxydable
 - ✓ Plasticité cristalline des aciers inoxydables irradiés
- ... avec 2 formalismes de grandes déformations
 - ✓ Déformations logarithmiques (Miehe-Apel-Lambrecht)
 - ✓ Décomposition multiplicative $\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{F_e}} \underline{\underline{F_p}}$



Exemple 1 : Ténacité de l'acier de cuve des REP

- Prédiction de la ténacité par l'approche locale de la rupture

$$✓ P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_W}{\sigma_u} \right)^m \right]$$

- Base de données expérimentales

- ✓ Essais de traction standards
- ✓ Essais sur éprouvettes entaillées

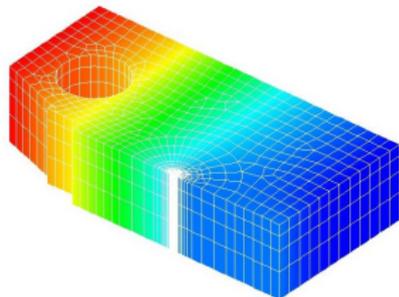
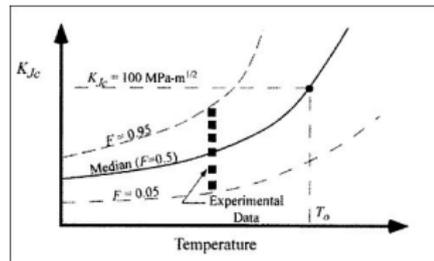
- Formalisme en petites déformations

$$✓ \mathcal{F} = \sqrt{\frac{3}{2} (\underline{\underline{s}} - \underline{\underline{X}}) : (\underline{\underline{s}} - \underline{\underline{X}}) - R(p)}$$

$$✓ \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}_p = \left(\left\langle \frac{\mathcal{F}}{k_1} \right\rangle^{-n_1} + \left\langle \frac{\mathcal{F}}{k_2} \right\rangle^{-n_2} \right)^{-1} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \underline{\underline{\sigma}}}$$

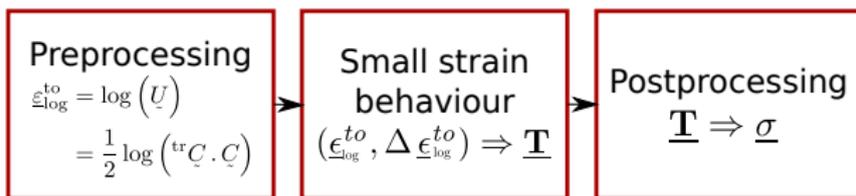
- Grandes déformations ?

- ✓ Hypoélasto-plasticité
- ✓ → Déformations logarithmiques



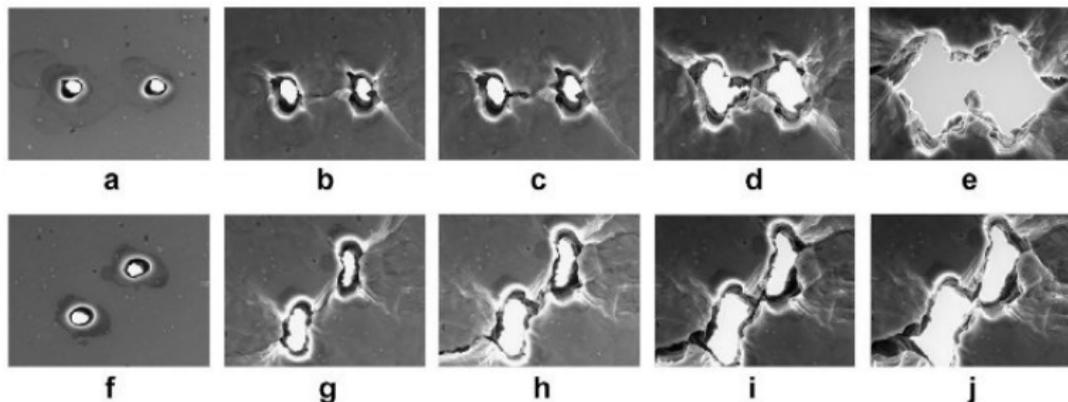
```
@UMATFiniteStrainStrategies[umat] {None, FiniteRotationSmallStrain,
                                     MieheApelLambrechtLogarithmicStrain};
```

- Le formalisme des lois petites déformations peut être réutilisé pour construire des lois grandes déformations **objectives**
- Deux stratégies lagrangiennes sont disponibles dans MFront:
 - ✓ grandes rotations, petites déformations (disponible dans **Code-Aster**)
 - ✓ déformations logarithmiques d'après Miehe et al.. (disponible dans **Code-Aster** et **Zebulon**).



- \underline{T} est le dual de la déformation logarithmique $\underline{\epsilon}_{\log}^{\text{to}}$
 - ✓ $P = \underline{T} : \underline{\dot{\epsilon}}_{\log}^{\text{to}} = \underline{S} : \underline{\dot{\epsilon}}_{\text{GL}}^{\text{to}}$
- La loi obtenue est objective (formalisme lagrangien) ;
- **Aucune restriction** sur le formalisme petite déformation:
 - ✓ Ecrouissage cinématique
 - ✓ Orthotropie initiale ou induite
- *Désavantages*: les phases de pré- et post- traitements sont non triviales et ont un coût numérique important.

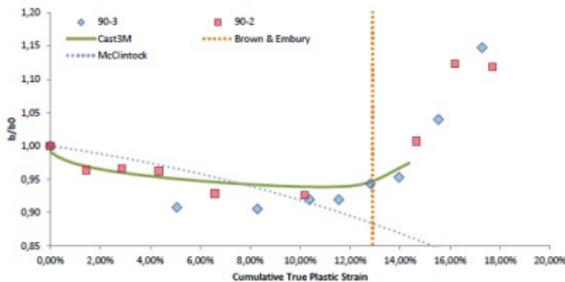
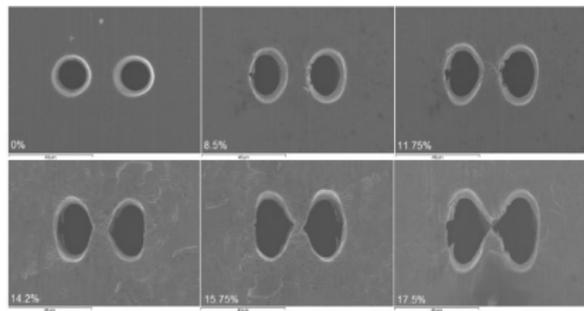
- Nucléation, **Croissance et coalescence** de cavités
- Réalisation d'expériences modèles



Weck *et al.*

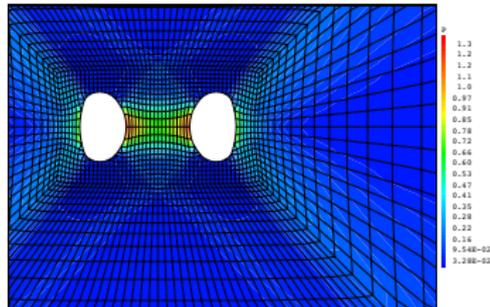
- Et sur les aciers utilisés dans les réacteurs nucléaires (REP) ?

○ Développement d'un protocole expérimental



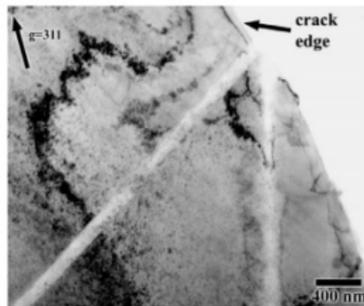
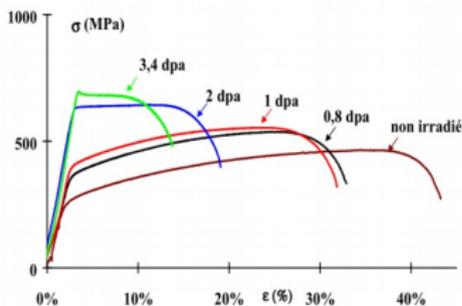
○ Simulations des essais

- ✓ Loi élasto-plastique
- ✓ Formalisme de Miehe-Apel-Lambrecht
- ✓ Robuste pour de (très) grandes déformations



Exemple 3: Plasticité cristalline (Thèse C. Ling)

- Acier inoxydable austénitique irradié
 - ✓ Application: rupture ductile, fissuration intergranulaire

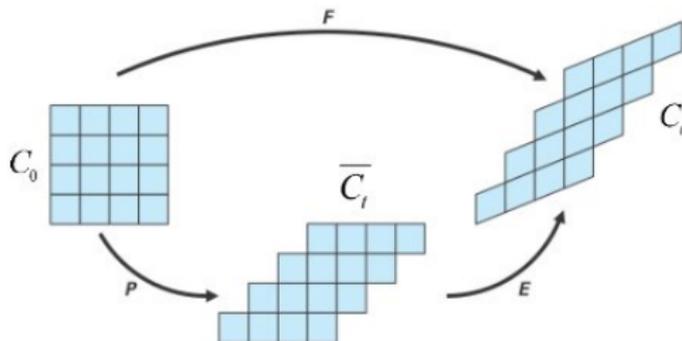


Thèse Xu Han, 2012

- Formalisme plasticité cristalline (en petites déformations)
 - ✓ Partition additive des déformations $\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{\epsilon_e}} + \underline{\underline{\epsilon_p}}$
 - ✓ Élasticité $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\Lambda}} : \underline{\underline{\epsilon_e}}$
 - ✓ Écoulement plastique *global* $\underline{\underline{\dot{\epsilon}_p}} = \sum \dot{\gamma}^s \underline{\underline{N}}^s$
 - ✓ Loi d'écoulement *locale* $\dot{\gamma}^s = \left\langle \frac{|\tau^s| - \tau_c^s(\rho)}{K_0} \right\rangle^n \text{signe}(\tau^s)$

- Formalisme en grandes déformations

- ✓ Décomposition du gradient de la transformation $\underline{\mathbf{F}} = \underline{\mathbf{F}}_e \underline{\mathbf{F}}_p$
- ✓ Élasticité $\underline{\underline{\Pi}} = \underline{\underline{\Lambda}} : \underline{\underline{E}}_e^{GL}$
- ✓ Écoulement plastique *global* $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}_p \rightarrow \underline{\underline{\dot{F}}}_p \underline{\underline{F}}_p^{-1}$
- ✓ Calcul de $\tau^s = \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{N}}^s \rightarrow \left[J_E {}^t \underline{\underline{F}}_e \underline{\underline{\sigma}} {}^t \underline{\underline{F}}_e^{-1} \right] : \underline{\underline{N}}^s$



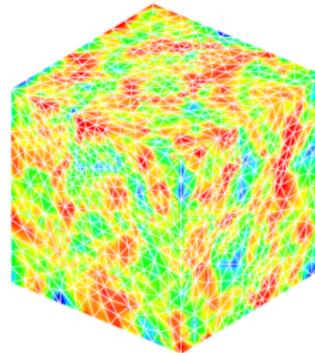
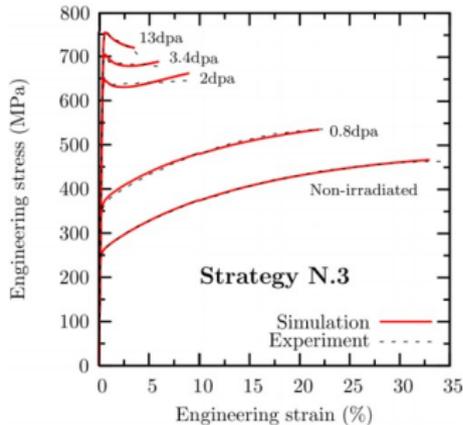
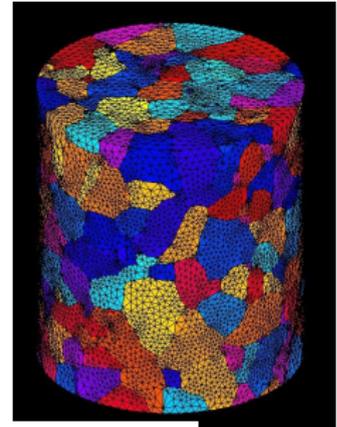
- Algorithme d'intégration implicite (Newton-Raphson)

```

@Integrator{
  ...
  for (unsigned short i=0; i!=Nss; i++){
    stress   tauc = tau0+mu*sqrt(sum_a_rho[i]);
    stress   tau  = ss.mus[i] | M;
    real     sgn  = (tau>0) ? 1 : -1;
    strain   dp   = abs(dgamma[i]);
    stress   Dtau = abs(tau)-tauc;
    fgamma[i] -= dt*pow(max(Dtau,0.)/K,n)*sgn;
    frho[i]   =(drho[i]-dp*(sqrt(sum_b_rho[i])/Ka-G0*(rho0+rho[i]+theta*
      drho[i])))/rho0;
  }
  feel = eel+deel-computeGreenLagrangeTensor(Fe);
  ...
}
  
```

- ✓ Possibilité de calculer la matrice jacobienne de manière numérique
- Sous-découpage des pas de temps
- Limitation des incréments des variables d'états lors de l'intégration

- Calculs sur agrégats (Voronoi ou réaliste)
 - ✓ Comportement macroscopique
 - ✓ Rupture ductile (Modèle poreux)
 - ✓ Contraintes aux joints de grains



- Du point de vue de l'utilisateur Cast3M + MFront
 - ✓ Deux nouveaux formalismes en grandes déformations
 - ✓ ... et d'autres en les codant soi-même

- Avis (subjectif) sur l'utilisation de MFront
 - ✓ Simplicité d'utilisation (Stagiaires, doctorants ...)
 - ✓ Permet de se concentrer sur la mécanique
 - ✓ Possibilité de travail collaboratif (utilisateurs d'autres codes éléments finis)