

Stratégies et Modèles de Calculs pour Structures en Béton

Christian La Borderie

Laboratoire de Sciences Appliquées au Génie Civil
Université de Pau et des Pays de l'Adour

18 Décembre 2003

Introduction

Les enjeux du calcul de structures en génie civil

Modélisation du comportement non linéaire des structures
béton

Les moyens nécessaires aux calculs de structures

Modélisation de l'endommagement mécanique

Introduction des effets de la vitesse des déformations

Modélisation de l'anisotropie induite

Quelques éléments d'une nouvelle approche

Approches multi-échelles dans la modélisation des couplages

Introduction

Passage macro - micro

Passage micro - macro

Conclusions et perspectives

Les enjeux du calcul de structures en génie civil

Enjeux

- Participer à la conception de structures exceptionnelles.
- Compléter la réglementation lorsqu'elle est
 - Incomplète.
 - Défaillante.



Les enjeux du calcul de structures en génie civil

Enjeux

- Participer à la conception de structures exceptionnelles.
- Compléter la réglementation lorsqu'elle est
 - Incomplète.
 - Défaillante.



Les enjeux du calcul de structures en génie civil

Enjeux

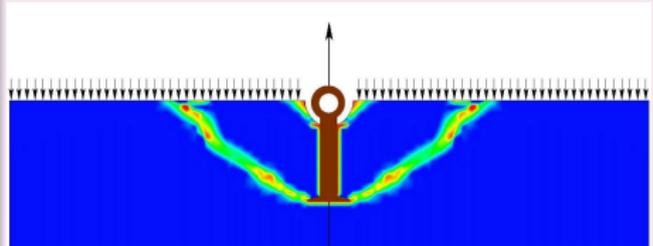
- Participer à la conception de structures exceptionnelles.
- Compléter la réglementation lorsqu'elle est
 - Incomplète.
 - Défaillante.



Les enjeux du calcul de structures en génie civil

Enjeux

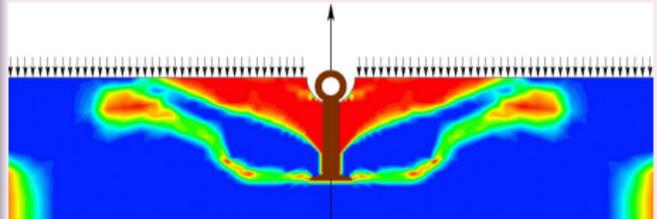
- Participer à la conception de structures exceptionnelles.
- Compléter la réglementation lorsqu'elle est
 - Incomplète.
 - Défaillante.



Les enjeux du calcul de structures en génie civil

Enjeux

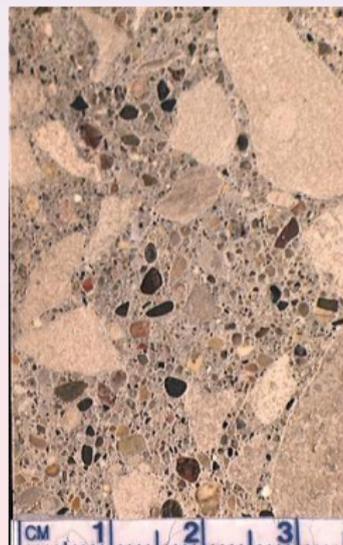
- Participer à la conception de structures exceptionnelles.
- Compléter la réglementation lorsqu'elle est
 - Incomplète.
 - Défaillante.



Différentes échelles de représentation

Constituants du béton

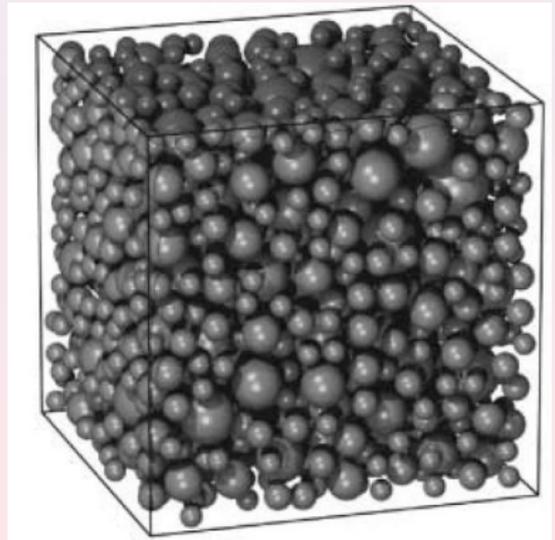
- Le béton est par nature hétérogène
- Modélisation du béton à une échelle "microscopique"
- Modélisation du béton à une échelle "macroscopique"



Différentes échelles de représentation

Constituants du béton

- Le béton est par nature hétérogène
- **Modélisation du béton à une échelle "microscopique"**
- Modélisation du béton à une échelle "macroscopique"



Différentes échelles de représentation

Constituants du béton

- Le béton est par nature hétérogène
- Modélisation du béton à une échelle “microscopique”
- **Modélisation du béton à une échelle “macroscopique”**

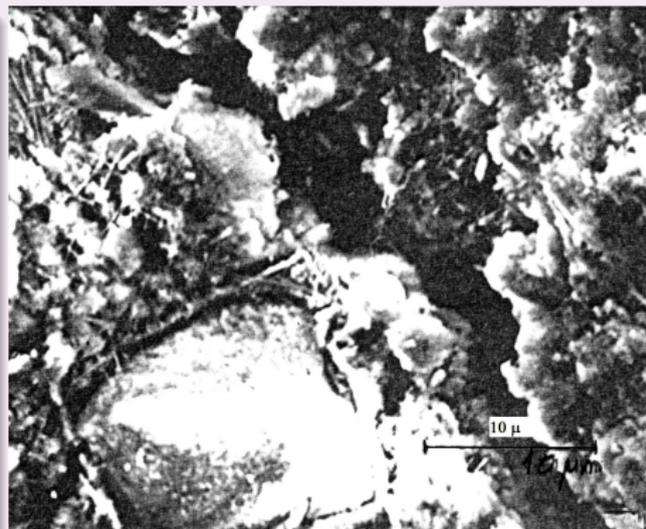
Échelle de représentation “macroscopique”

- Statistiquement représentative du comportement mécanique
- Compatible avec la taille des structures et les moyens de calculs
- **Trois fois la taille de la plus grosse hétérogénéité**

Dégradation du béton sous chargement mécanique

Sous l'effet de sollicitations

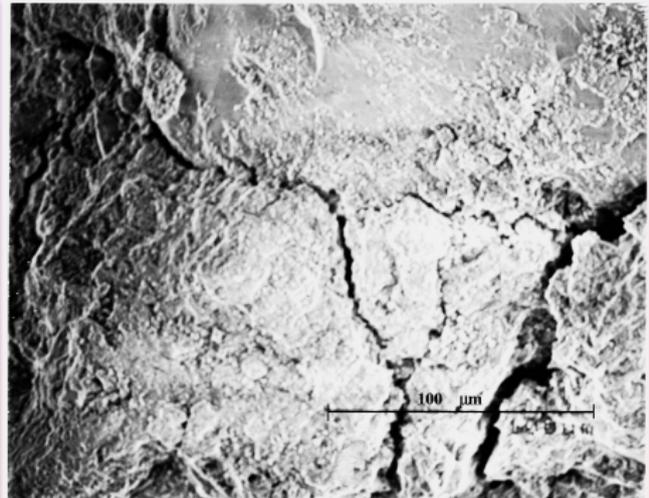
- Le matériau "vierge" est microfissuré.
- Le béton se microfisse.
- Les déformations se localisent et forment des macrofissures.
- La dégradation du matériau et la localisation des déformations déterminent le comportement de la structure.



Dégradation du béton sous chargement mécanique

Sous l'effet de sollicitations

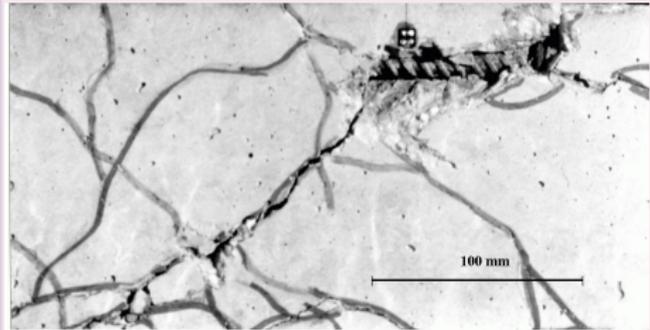
- Le matériau "vierge" est microfissuré.
- **Le béton se microfisse.**
- Les déformations se localisent et forment des macrofissures.
- La dégradation du matériau et la localisation des déformations déterminent le comportement de la structure.



Dégradation du béton sous chargement mécanique

Sous l'effet de sollicitations

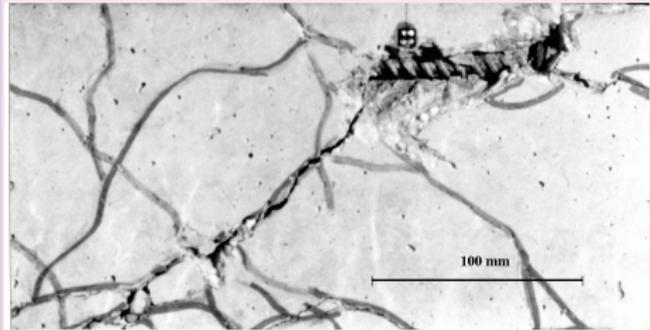
- Le matériau "vierge" est microfissuré.
- Le béton se microfisse.
- **Les déformations se localisent et forment des macrofissures.**
- La dégradation du matériau et la localisation des déformations déterminent le comportement de la structure.



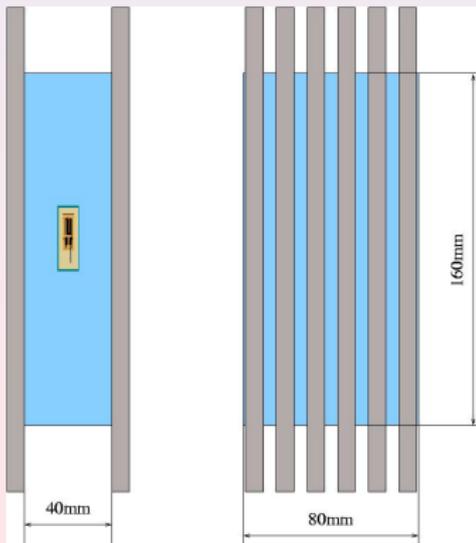
Dégradation du béton sous chargement mécanique

Sous l'effet de sollicitations

- Le matériau "vierge" est microfissuré.
- Le béton se microfisse.
- Les déformations se localisent et forment des macrofissures.
- La dégradation du matériau et la localisation des déformations déterminent le comportement de la structure.



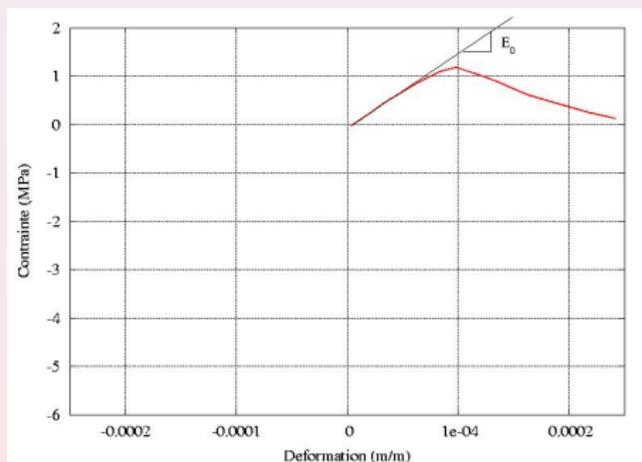
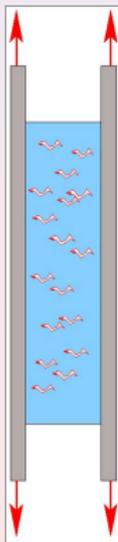
Comportement uniaxial du béton



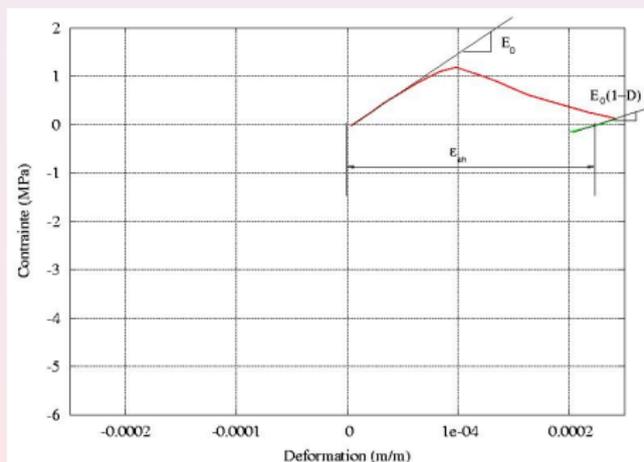
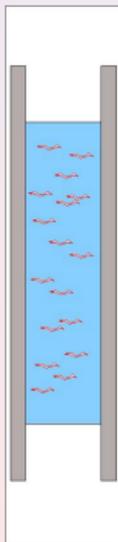
Essai PIED (Mazars, Berthaud et Ramtani)

L'ajout de barres en aluminium collées sur le béton permet d'obtenir une structure à écrouissage positif et d'éviter ainsi la localisation des déformations

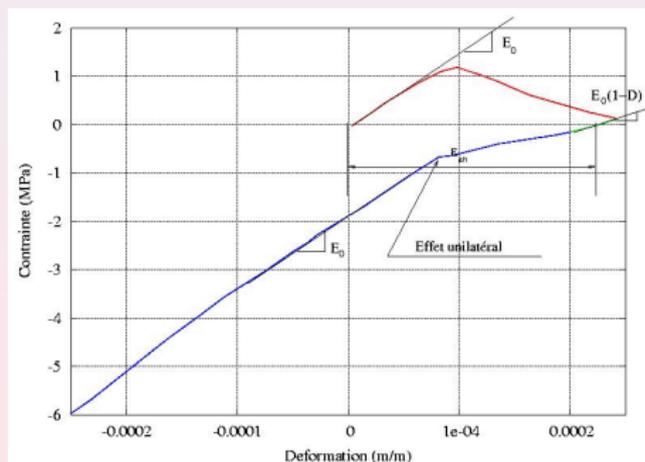
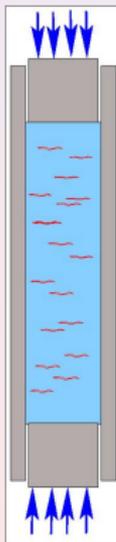
Comportement uniaxial du béton



Comportement uniaxial du béton



Comportement uniaxial du béton



Les moyens nécessaires aux calculs de structures

Il faudrait

- **Un modèle utilisable dans tous les cas.**
- Maîtriser la localisation des déformations.
- Identification simple des paramètres.
- Pouvoir coupler avec d'autres phénomènes physiques.

Moyens

- Endommagement.
- Déformations anélastiques.
- Effets unilatéraux.
- **Effets de la vitesse des déformations.**
- **Anisotropie.**

Les moyens nécessaires aux calculs de structures

Il faudrait

- Un modèle utilisable dans tous les cas.
- **Maîtriser la localisation des déformations.**
- Identification simple des paramètres.
- Pouvoir coupler avec d'autres phénomènes physiques.

Moyens

- Au niveau matériel (Non Local, Gradient, **Visco-endommagement** ...)
- Au niveau structurel (Fissuration fictive, Hillerborg)

Les moyens nécessaires aux calculs de structures

Il faudrait

- Un modèle utilisable dans tous les cas.
- Maîtriser la localisation des déformations.
- **Identification simple des paramètres.**
- Pouvoir coupler avec d'autres phénomènes physiques.

Moyens

- Petit nombre de paramètres
- Identification aisée à partir d'essais simples

Les moyens nécessaires aux calculs de structures

Il faudrait

- Un modèle utilisable dans tous les cas.
- Maîtriser la localisation des déformations.
- Identification simple des paramètres.
- **Pouvoir coupler avec d'autres phénomènes physiques.**

Moyens

- **Enrichissement macro - micro** (couplage endommagement-écoulement)
- **Passage micro - macro** (couplage thermique-endommagement)

Introduction des effets de la vitesse des déformations

Thèse de .J.F. Dubé

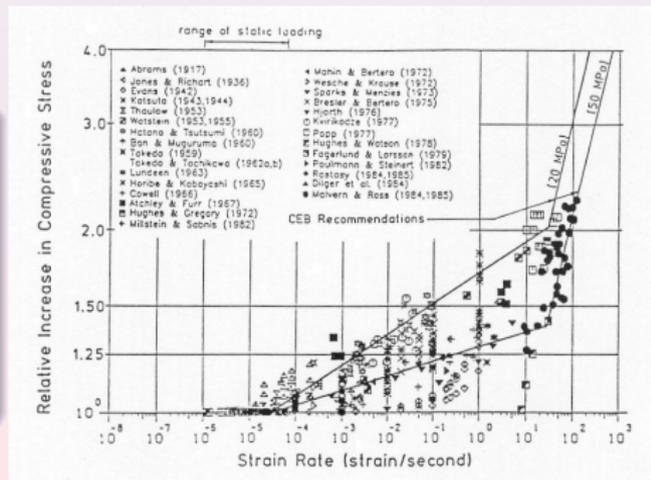
Objectifs de la modélisation

- Effets de la vitesse des déformations
- Régularisation du problème dynamique
- Influence sur la réponse dynamique
 - Calculs aux souffles
 - Calculs sismiques

Effets de la vitesse des déformations

Constatations expérimentales

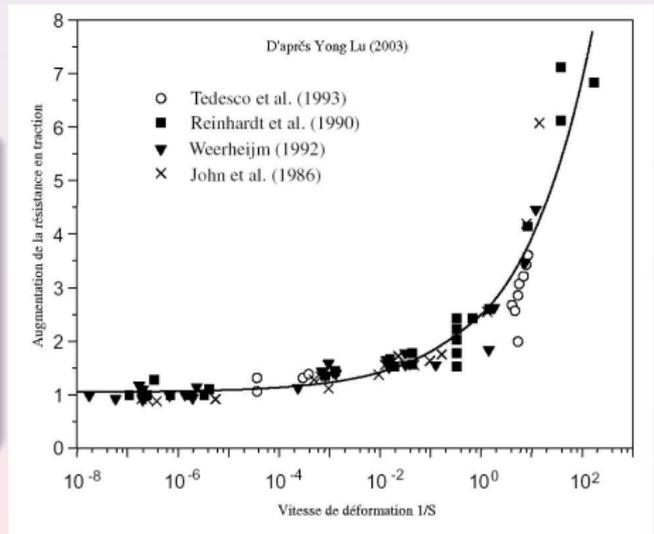
- La résistance du béton dépend de la vitesse de sollicitation.
- Les modifications sont sensibles à partir de vitesses de l'ordre de 10^{-2} s^{-1}



Effets de la vitesse des déformations

Constatations expérimentales

- La résistance du béton dépend de la vitesse de sollicitation.
- Les modifications sont sensibles à partir de vitesses de l'ordre de $10^{-2} S^{-1}$

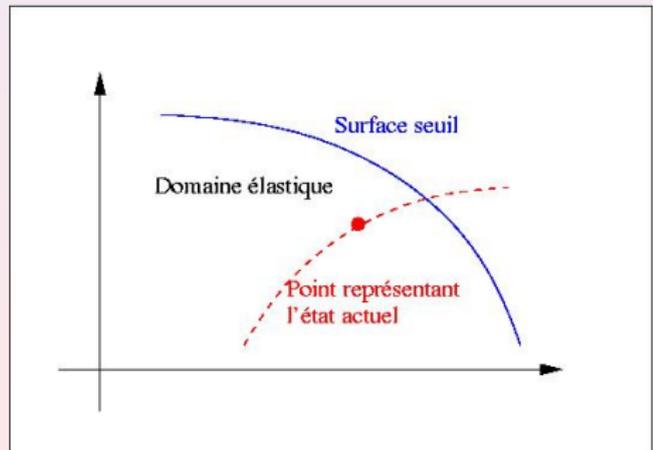


Modification de l'équation de consistance

Modèle standard

L'évolution des variables d'écroissage A_k est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$, V_k : variables internes
- $A_k = \lambda \frac{\partial F}{\partial V_k}$ où λ est déterminé par la condition de consistance $F = 0, \dot{F} = 0$

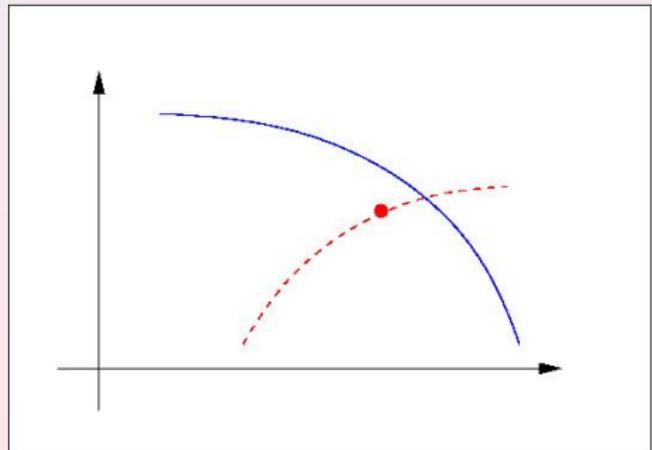


Modification de l'équation de consistance

Modèle standard

L'évolution des variables d'écroûissage A_k est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$, V_k : variables internes
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition de consistance $F = 0, \dot{F} = 0$

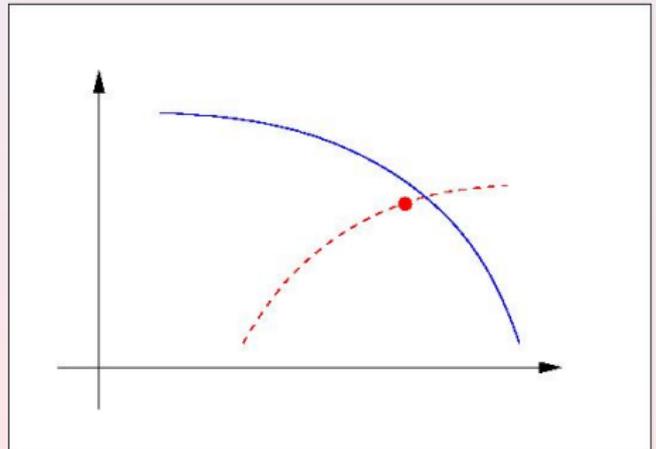


Modification de l'équation de consistance

Modèle standard

L'évolution des variables d'écroûissage A_k est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$, V_k : variables internes
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition de consistance $F = 0, \dot{F} = 0$

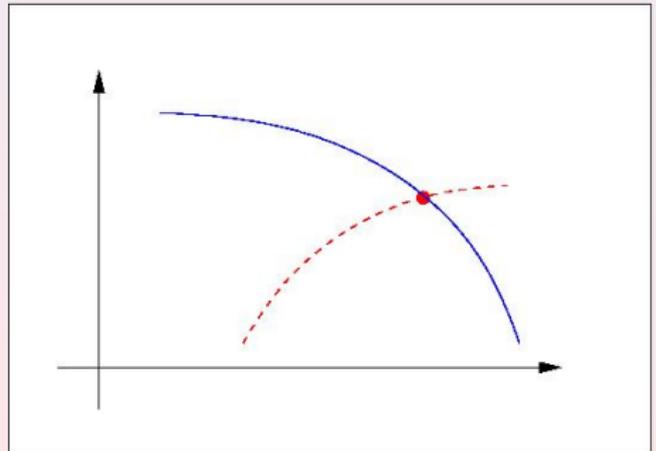


Modification de l'équation de consistance

Modèle standard

L'évolution des variables d'écroûissage A_k est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$, V_k : variables internes
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition de consistance $F = 0, \dot{F} = 0$

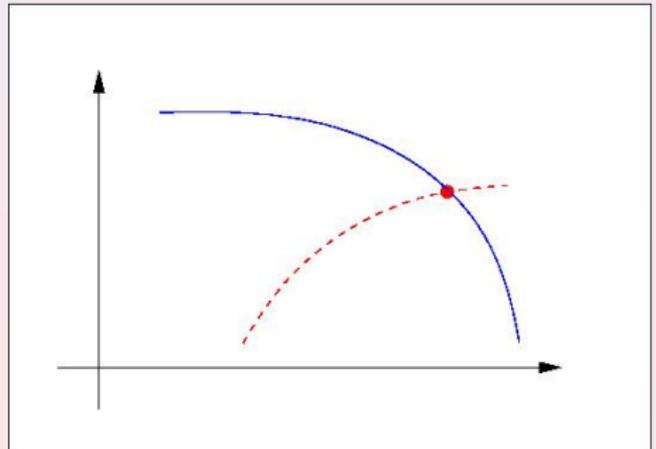


Modification de l'équation de consistance

Modèle standard

L'évolution des variables d'écroûissage A_k est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$, V_k : variables internes
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition de consistance $F = 0, \dot{F} = 0$

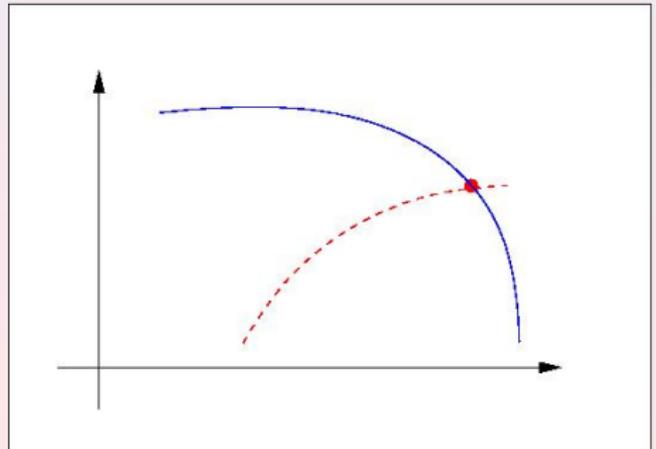


Modification de l'équation de consistance

Modèle standard

L'évolution des variables d'écroûissage A_k est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$, V_k : variables internes
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition de consistance $F = 0, \dot{F} = 0$

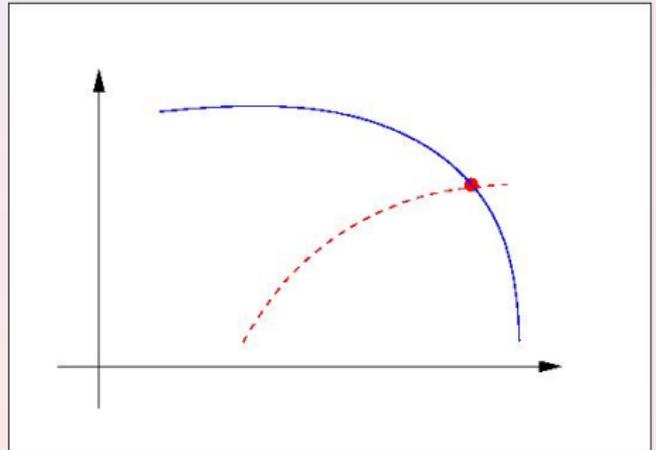


Modification de l'équation de consistance

Modèle standard

L'évolution des variables d'écroûissage A_k est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$, V_k : variables internes
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition de consistance $F = 0, \dot{F} = 0$



Modification de l'équation de consistance

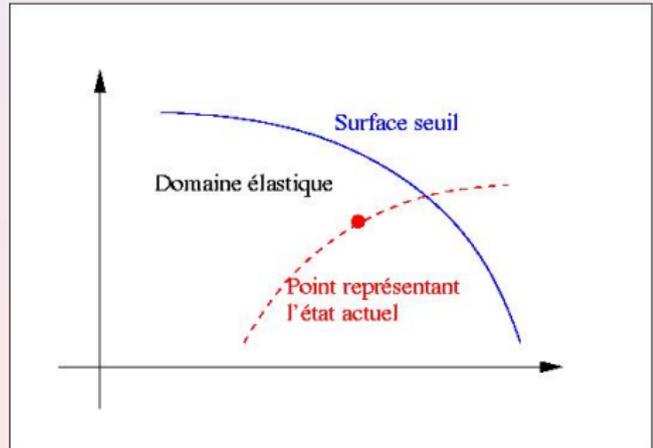
Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$

- $A_k = \lambda \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Ou λ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{-m} \dot{F}$$



Modification de l'équation de consistance

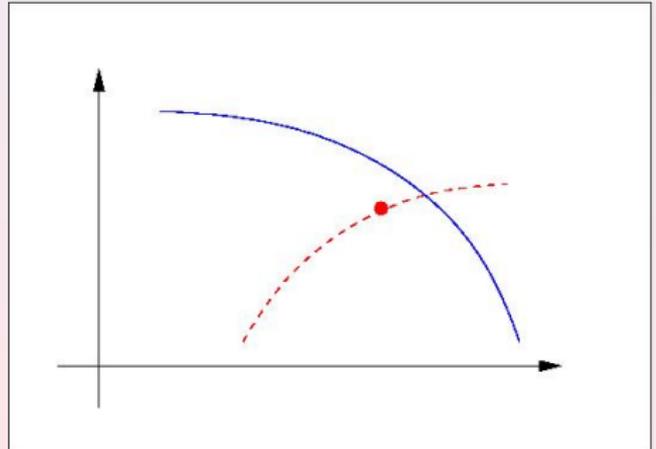
Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$

- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle^{+N}$$



Modification de l'équation de consistance

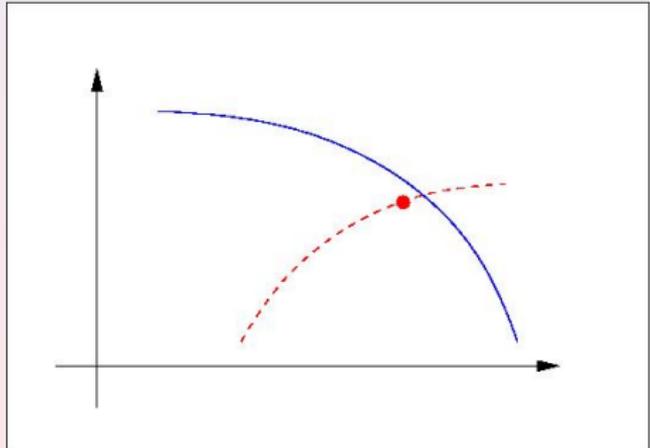
Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$

- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle^{+N}$$



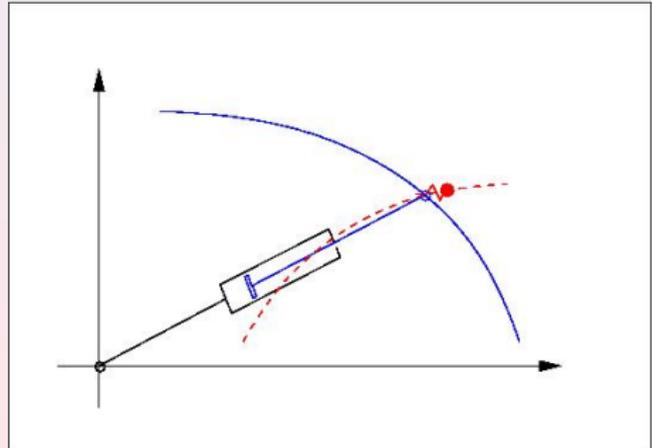
Modification de l'équation de consistance

Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle^{+N}$$



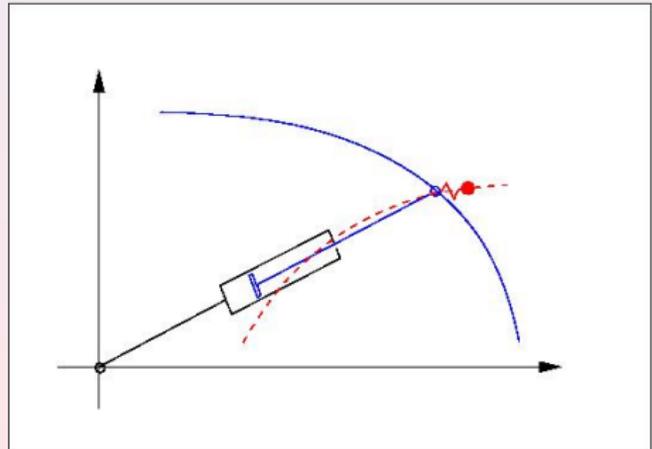
Modification de l'équation de consistance

Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \langle \frac{F}{F_0} \rangle^{+N}$$



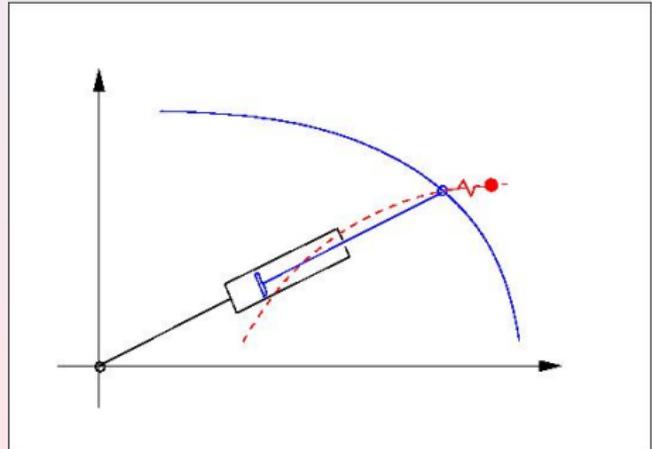
Modification de l'équation de consistance

Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle^{+N}$$



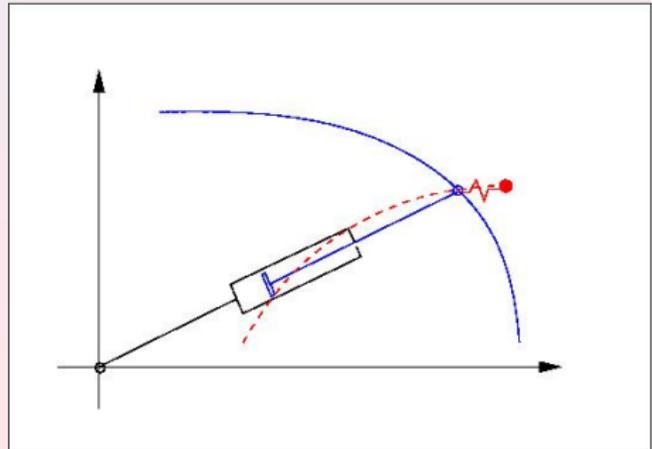
Modification de l'équation de consistance

Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle^{+N}$$



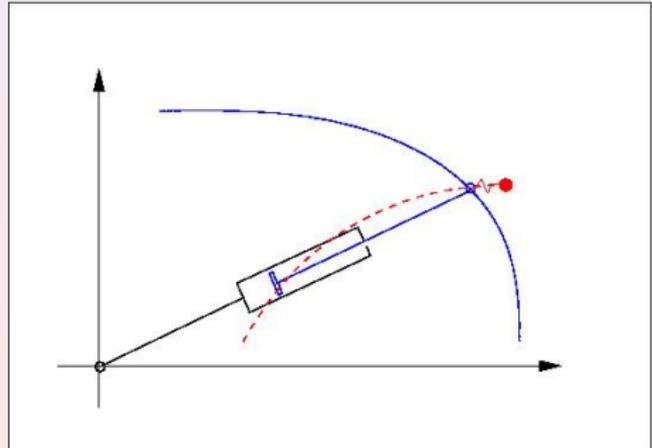
Modification de l'équation de consistance

Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle^{+N}$$



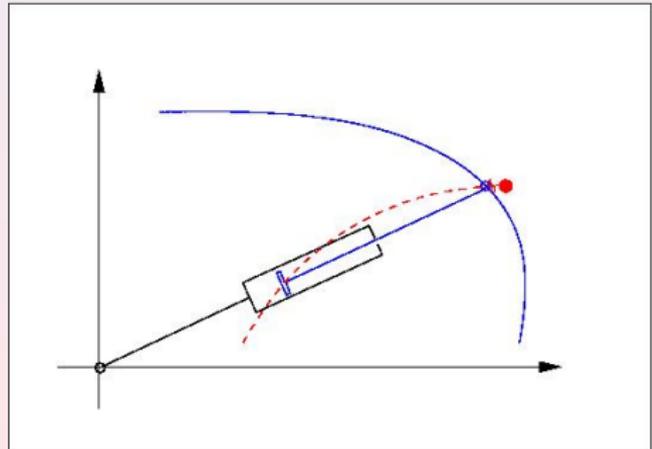
Modification de l'équation de consistance

Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \langle \frac{F}{F_0} \rangle^{+N}$$



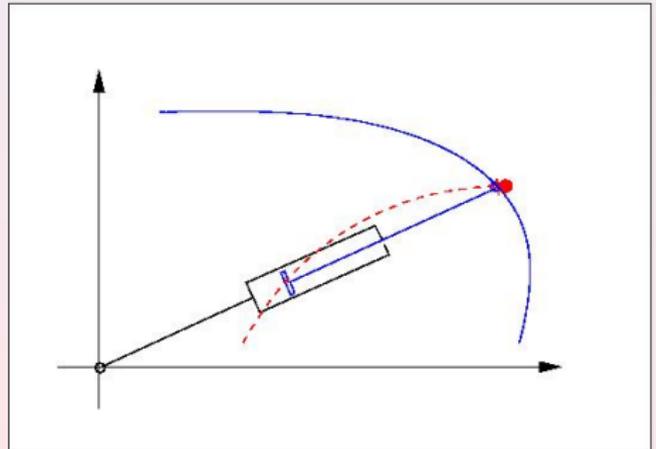
Modification de l'équation de consistance

Modèle Visco-endommageable

L'écoulement est déterminé par :

- La fonction seuil $F(\sigma, \varepsilon, V_k)$
- $\dot{A}_k = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial V_k}$ Où $\dot{\lambda}$ est déterminé par la condition d'écoulement

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle^{+N}$$



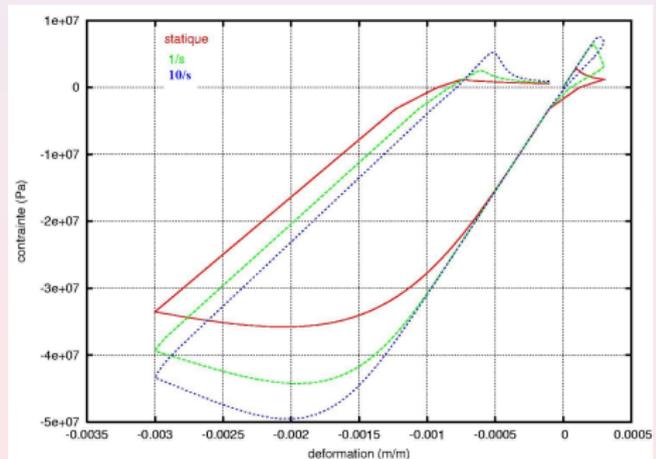
Identification de l'effet de vitesse (Modèle unilatéral)

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{m} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle^+{}^N \quad (1)$$

avec F_0 valeur initiale de la fonction seuil, m et N deux paramètres à identifier.

Application au modèle unilatéral

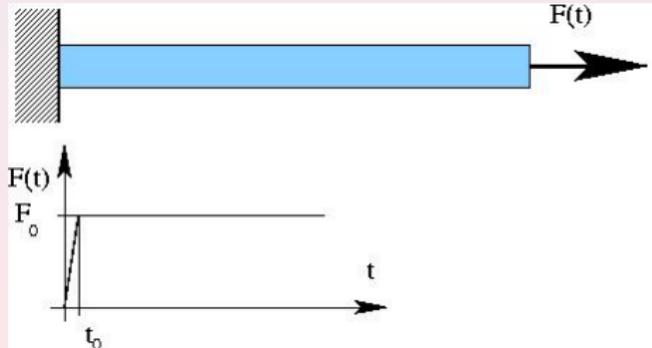
- En traction :
 $m = 130S$ et $N = 0,2$
- En compression :
 $m = 6000S$ et $N = 0,2$



Régularisation du problème dynamique.

Propagation d'onde uniaxiale

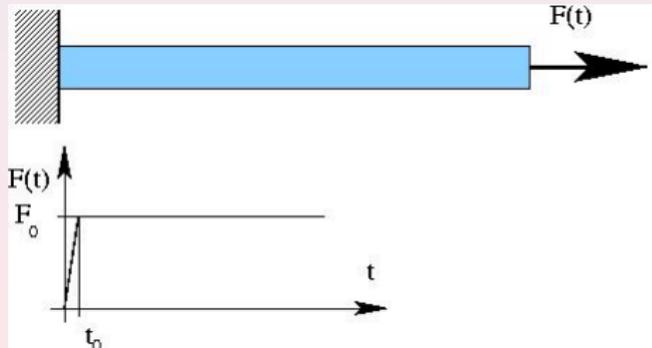
- Un milieu uniaxial est sollicité par un échelon en effort d'intensité égale au $3/4$ de sa résistance.
- L'onde se propage et double en intensité lorsqu'elle se réfléchit sur l'encastrement.



Régularisation du problème dynamique.

Propagation d'onde uniaxiale

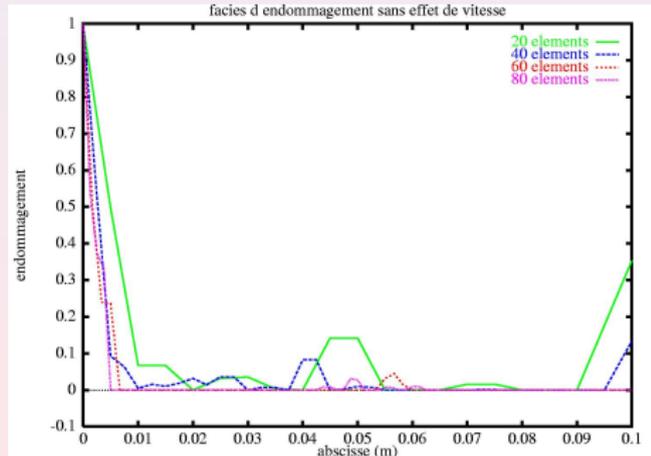
- Un milieu uniaxial est sollicité par un échelon en effort d'intensité égale au $3/4$ de sa résistance.
- L'onde se propage et double en intensité lorsqu'elle se réfléchit sur l'encastrement.



Régularisation du problème dynamique

Propagation d'onde uniaxiale

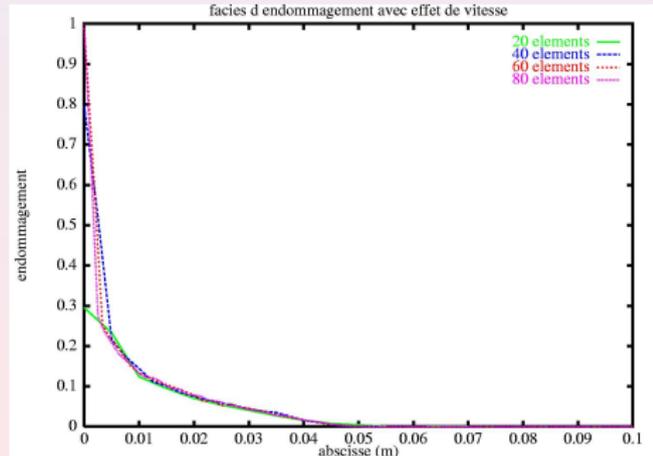
- Les résultats du calcul sans effet de vitesse ne sont pas objectifs.
- L'introduction de l'effet de vitesse permet d'obtenir des résultats objectifs.



Régularisation du problème dynamique

Propagation d'onde uniaxiale

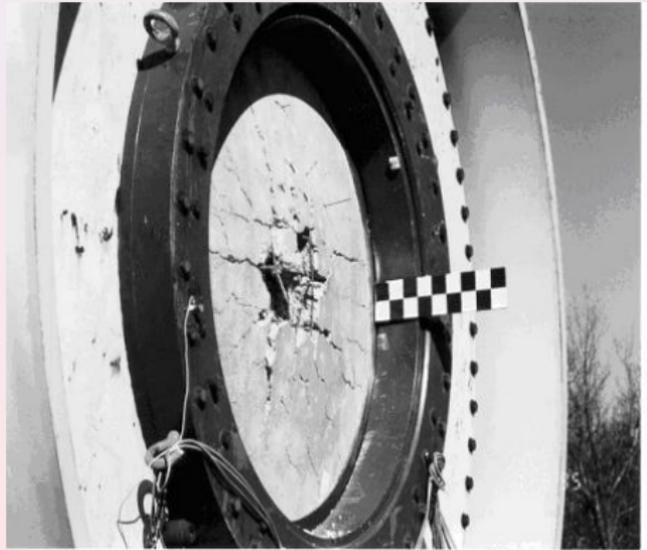
- Les résultats du calcul sans effet de vitesse ne sont pas objectifs.
- L'introduction de l'effet de vitesse permet d'obtenir des résultats objectifs.



Structure soumise à un souffle

Expérience Pontiroli (CEG)

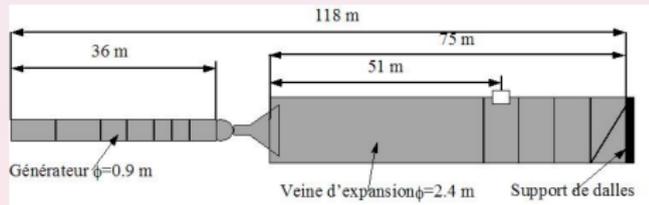
- Dalle Circulaire en béton armé de 1,2m de portée.
- Sollicitation par un souffle.
- Montée en pression en 10–5S, descente en 0,2S.



Structure soumise à un souffle

Expérience Pontiroli (CEG)

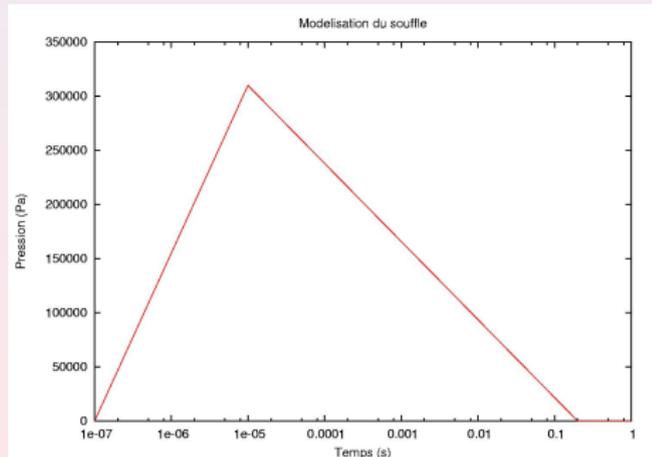
- Dalle Circulaire en béton armé de 1,2 m de portée.
- Sollicitation par un souffle.
- Montée en pression en 10–5S, descente en 0,2S.



Structure soumise à un souffle

Expérience Pontiroli (CEG)

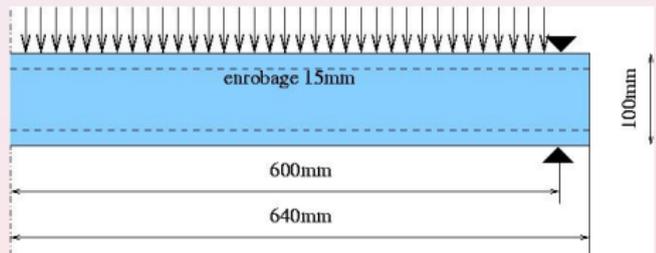
- Dalle Circulaire en béton armé de 1,2m de portée.
- Sollicitation par un souffle.
- Montée en pression en 10–5S, descente en 0,2S.



Structure soumise à un souffle

Calcul dynamique explicite

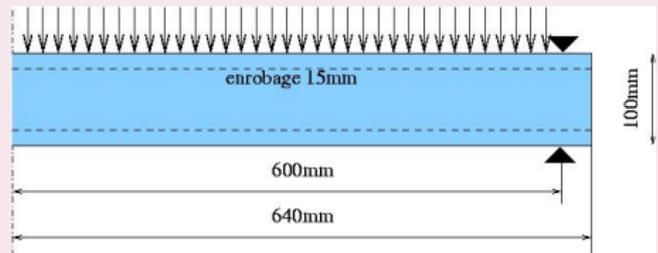
- Modélisation par des éléments de coques multicouches en axisymétrique.
- Vitesses de déformation maximales constatées $\dot{\epsilon}_{max} \simeq 10S^{-1}$
- Influence de l'effet de vitesse, sur la réponse de la structure.



Structure soumise à un souffle

Calcul dynamique explicite

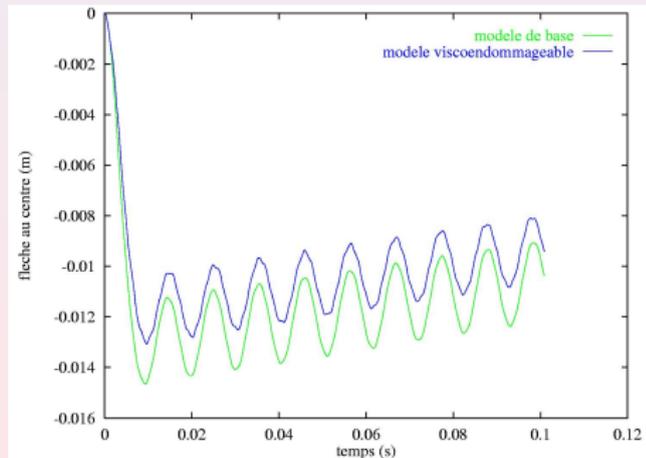
- Modélisation par des éléments de coques multicouches en axisymétrique.
- **Vitesses de déformation maximales constatées**
 $\dot{\epsilon}_{max} \simeq 10S^{-1}$
- Influence de l'effet de vitesse, sur la réponse de la structure.



Structure soumise à un souffle

Calcul dynamique explicite

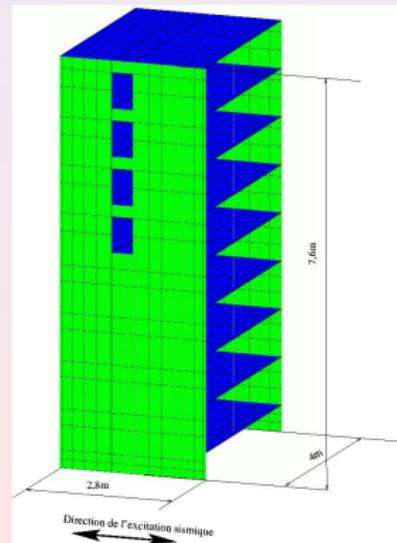
- Modélisation par des éléments de coques multicouches en axisymétrique.
- Vitesses de déformation maximales constatées $\dot{\epsilon}_{max} \simeq 10S^{-1}$
- Influence de l'effet de vitesse, sur la réponse de la structure.



Calculs sismiques

Projet CASSBA

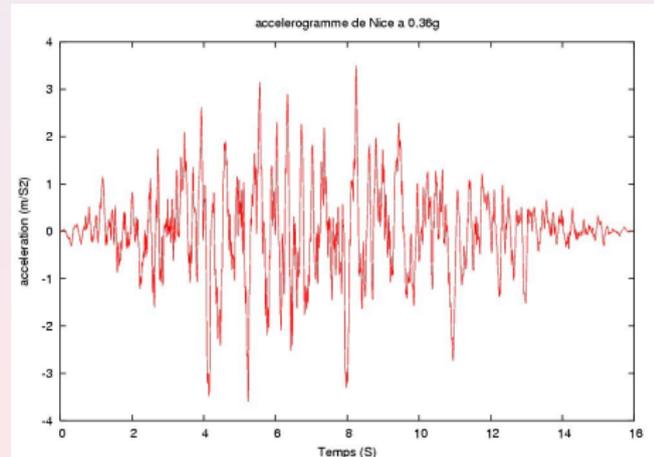
- Maquette d'un immeuble de 8 étages à voiles porteurs à l'échelle 1/3
- Accélérogramme de Nice normé à $0,36g$



Calculs sismiques

Projet CASSBA

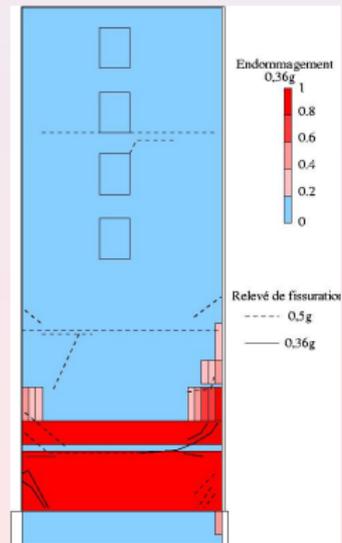
- Maquette d'un immeuble de 8 étages à voiles porteurs à l'échelle 1/3
- **Accélérogramme de Nice normé à 0,36g**



Calculs sismiques

Calculs

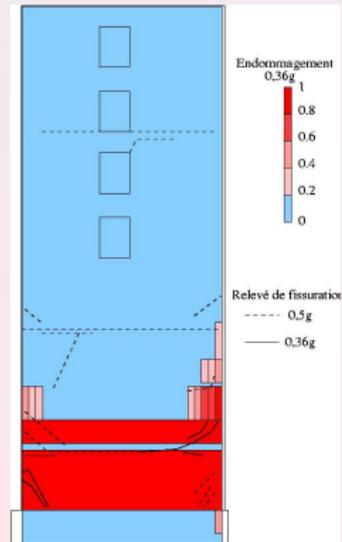
- Éléments de poutres multicouches (EFiCoS) avec modélisation du contact
- Champ d'endommagement
- Déplacement en tête



Calculs sismiques

Calculs

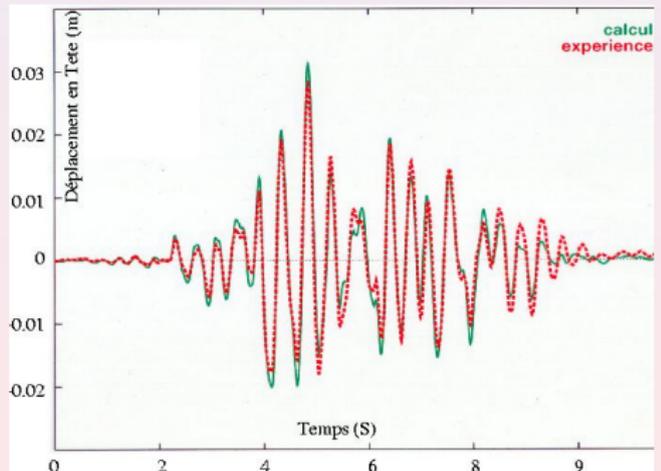
- Éléments de poutres multicouches (EFiCoS) avec modélisation du contact
- **Champ d'endommagement**
- Déplacement en tête



Calculs sismiques

Calculs

- Éléments de poutres multicouches (EFiCoS) avec modélisation du contact
- Champ d'endommagement
- Déplacement en tête



Conclusions

La méthode appliquée permet

- de prendre en compte l'effet des vitesses de déformations
- de régulariser le problème dynamique
- d'utiliser tout type de modèle d'endommagement

Remarques

- Pour des chargements rapides tels que les souffles ou les chocs.
- L'effet n'est pas visible en dynamique lente

Conclusions

La méthode appliquée permet

- de prendre en compte l'effet des vitesses de déformations
- de régulariser le problème dynamique
- d'utiliser tout type de modèle d'endommagement

Remarques

- Effectif en dynamique rapide.
- Améliore la rapidité de convergence en dynamique lente mais n'est pas suffisant pour assurer l'objectivité du résultat.
- Les discrétisations spatiale et temporelle doivent être compatibles avec l'onde de choc générée par la fissuration.
- Inefficace sous chargement statique.

Conclusions

La méthode appliquée permet

- de prendre en compte l'effet des vitesses de déformations
- de régulariser le problème dynamique
- d'utiliser tout type de modèle d'endommagement

Remarques

- Modèle unilatéral (implanté dans la version client CASTEM 2000) et EFiCoS
- Modèle de J. MAZARS.
- Modèle de F. RAGUENEAU.

Modélisation de l'anisotropie induite : Thèse S. Fichant

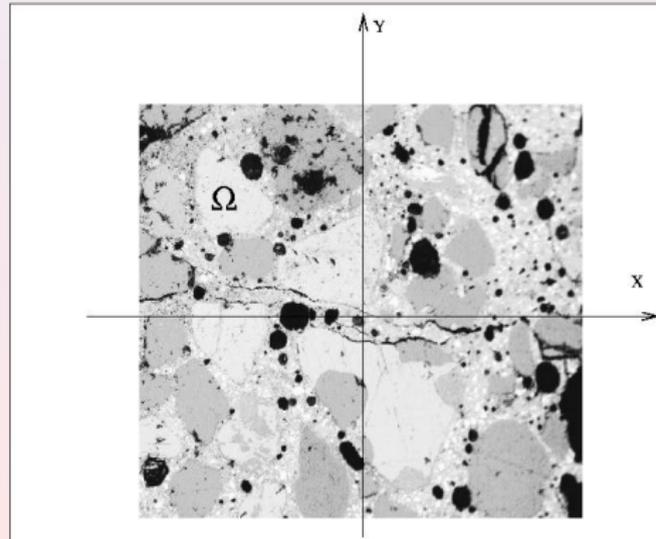
Constatations

- La microfissuration puis la macrofissuration ont des orientations privilégiées en fonction de la sollicitation.
- Il y a autant d'anisotropies que d'effets à mesurer !! : Endommagement (raideur), déformations anélatiques, ...
- Les résultats expérimentaux permettant de mesurer l'anisotropie induite de l'endommagement sont très peu nombreux.
- En fonction de l'échelle d'observation, l'anisotropie peut être représentée au niveau matériel ou structurel.

Modélisation de l'anisotropie structurelle

Représentation d'un milieu fissuré Ω

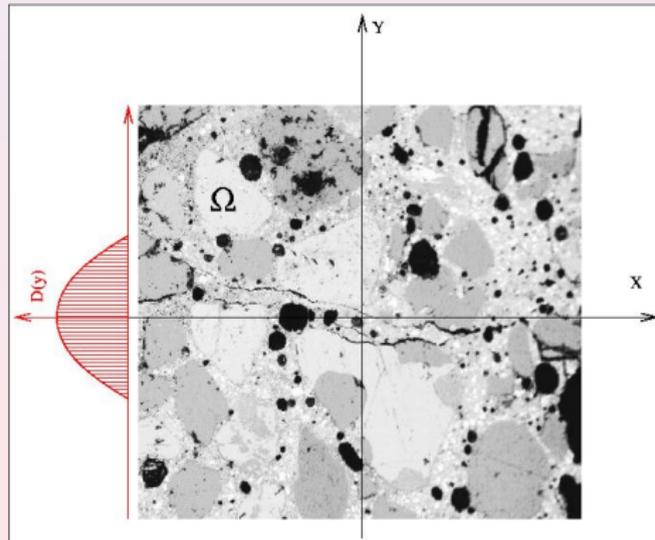
- Fissure réelle à l'échelle "macroscopique"
- Champ d'endommagement compatible avec la fissuration
- Conditions sur $\partial\Omega$ compatibles avec 2 échelles de modélisation



Modélisation de l'anisotropie structurelle

Représentation d'un milieu fissuré Ω

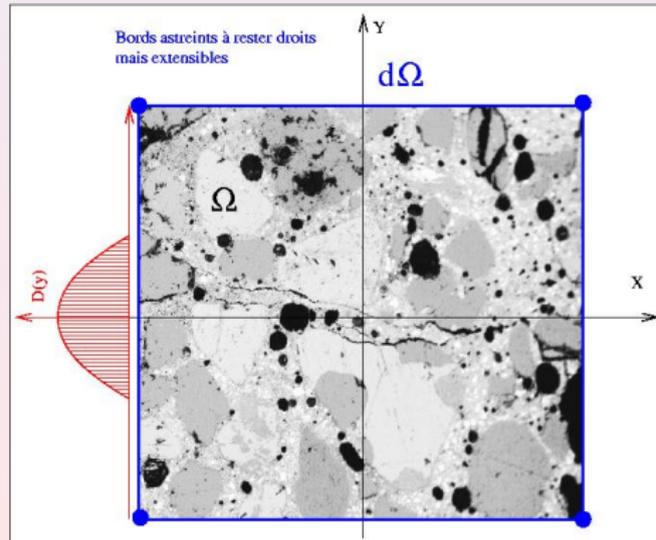
- Fissure réelle à l'échelle "macroscopique"
- **Champ d'endommagement compatible avec la fissuration**
- Conditions sur $\partial\Omega$ compatibles avec 2 échelles de modélisation



Modélisation de l'anisotropie structurale

Représentation d'un milieu fissuré Ω

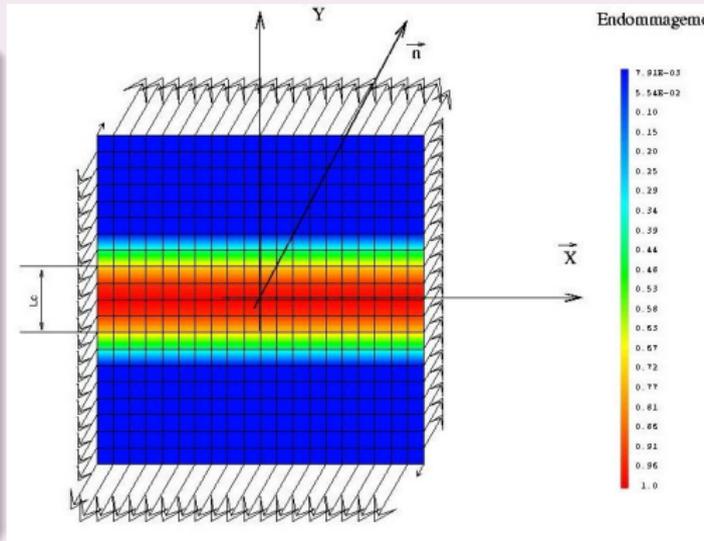
- Fissure réelle à l'échelle "macroscopique"
- Champ d'endommagement compatible avec la fissuration
- Conditions sur $\partial\Omega$ compatibles avec 2 échelles de modélisation



Modélisation de l'anisotropie structurelle

Expérience numérique

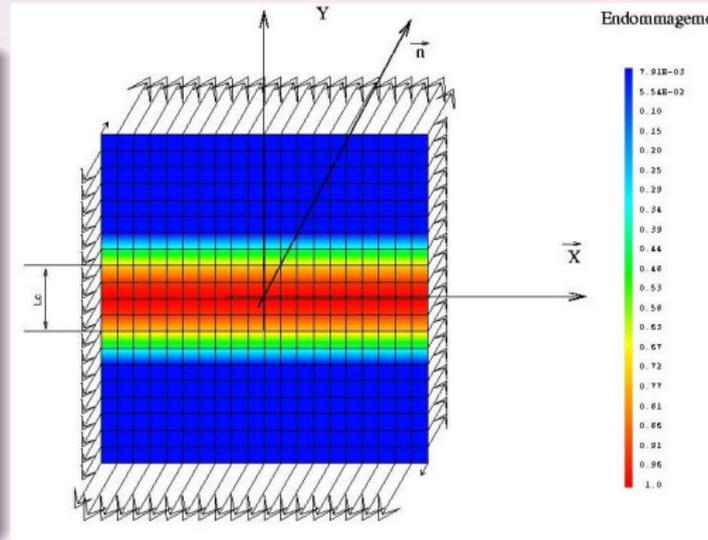
- **Champ d'endommagement isotrope**
- Sollicitation sur $\partial\Omega$ générée par une contrainte normale orientée par un vecteur tournant \vec{n}
- Mesure de la raideur relative quand \vec{n} varie



Modélisation de l'anisotropie structurelle

Expérience numérique

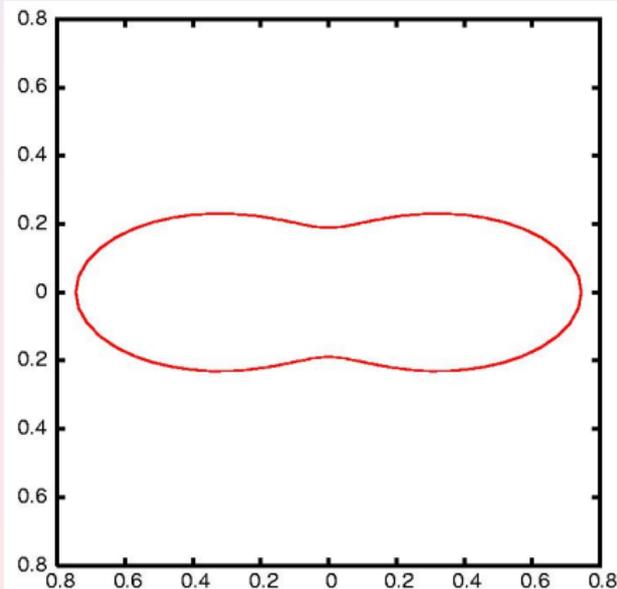
- Champ d'endommagement isotrope
- Sollicitation sur $\partial\Omega$ générée par une contrainte normale orientée par un vecteur tournant \vec{n}
- Mesure de la raideur relative quand \vec{n} varie



Modélisation de l'anisotropie structurale

Expérience numérique

- Champ d'endommagement isotrope
- Sollicitation sur $\partial\Omega$ générée par une contrainte normale orientée par un vecteur tournant \vec{n}
- **Mesure de la raideur relative quand \vec{n} varie**



Modélisation de l'anisotropie matérielle

Principe

- Représentation de l'anisotropie induite au niveau du modèle matériel
- Difficultés
- Solution adoptée

Par

- Des déformations anélastiques anisotropes
- Un endommagement orthotrope

Modélisation de l'anisotropie matérielle

Principe

- Représentation de l'anisotropie induite au niveau du modèle matériel
- **Difficultés**
- Solution adoptée

Modélisation conjointe

- des déformations anélastiques
- de l'anisotropie
- des effets unilatéraux

Création et modification des directions d'anisotropie en fonction de la sollicitation

Modélisation de l'anisotropie matérielle

Principe

- Représentation de l'anisotropie induite au niveau du modèle matériel
- Difficultés
- **Solution adoptée**

Modèle de Stéphanie Fichant

- Création d'une famille de modèles : isotrope + orthotrope
- Couplage avec la plasticité
- Formulation variationnelle menant au tenseur élastique sécant

Déformations anélastiques

Modèle de Nadai

- Fonction seuil calculée à partir des contraintes effectives $\tilde{\sigma}$
- Critère de Nadai : Deux Drucker-Prager Assemblés F_1 et F_2 ayant la même forme :
- $F_i = \sqrt{\frac{2}{3}} J_2' + A_i \frac{I_1'}{3} - B_i w$

Avec

$$\tilde{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}^0 (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p)$$

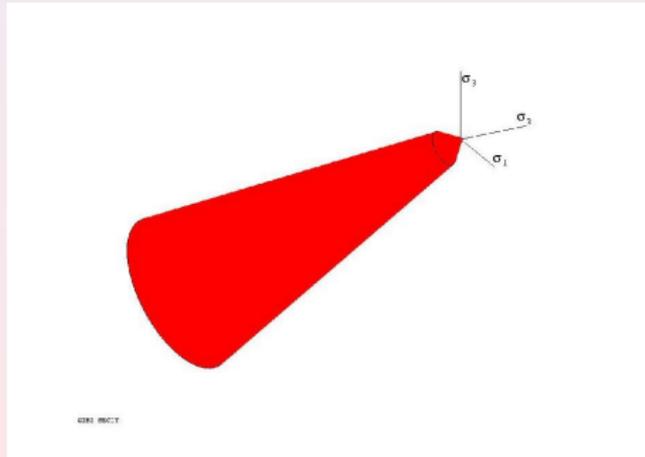
et C_{ijkl}^0 : l'opérateur sécant du matériau vierge

Déformations anélastiques

Modèle de Nadai

- Fonction seuil calculée à partir des contraintes effectives $\tilde{\sigma}$
- Critère de Nadai : Deux Drucker-Prager Assemblés F_1 et F_2 ayant la même forme :

$$F_i = \sqrt{\frac{2}{3} J'_2} + A_i \frac{I'_1}{3} - B_i w$$



Déformations anélastiques

Modèle de Nadai

- Fonction seuil calculée à partir des contraintes effectives $\tilde{\sigma}$
- Critère de Nadai : Deux Drucker-Prager Assemblés F_1 et F_2 ayant la même forme :
- $$F_i = \sqrt{\frac{2}{3} J_2'} + A_i \frac{I_1'}{3} - B_i w$$

Avec

I_1' : Premier invariant de $\tilde{\sigma}$

J_2' : Second invariant du déviateur de $\tilde{\sigma}$

w : Variable d'écroutissement

A_i et B_i $i = 1, 2$, paramètres du modèle

Cinématiques d'endommagement

Endommagement

$$\sigma_{ij} n_j = (1 - d(\vec{n})) \tilde{\sigma}_{ij} n_j$$

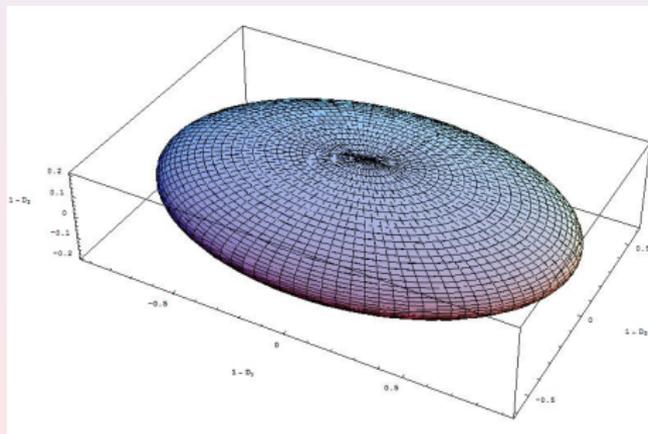
- **Isotrope** : $1 - d(\vec{n}) = 1 - D$
D est un scalaire
- **Orthotrope** :
 $1 - d(\vec{n}) = \|(I_d - D) \vec{n}\|$
D est un tenseur d'ordre 2.

Cinématiques d'endommagement

Endommagement

$$\sigma_{ij} n_j = (1 - d(\vec{n})) \tilde{\sigma}_{ij} n_j$$

- **Isotrope** : $1 - d(\vec{n}) = 1 - D$
 D est un scalaire
- **Orthotrope** :
 $1 - d(\vec{n}) = \|(I_d - D) \vec{n}\|$
 D est un tenseur d'ordre 2.



Évolution de l'endommagement

Règles

- L'endommagement évolue avec les extensions
- L'incrément d'endommagement a la même base propre que l'incrément de déformations
- Maîtrise de l'énergie de fissuration

Déformation équivalente

- Modèle isotrope :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\langle \varepsilon_1^e \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_2^e \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_3^e \rangle_+^2}$$

- Modèle anisotrope :

$$\tilde{\varepsilon}(\vec{n}) = n_i \varepsilon_{ij}^e n_j$$

Évolution de l'endommagement

Règles

- L'endommagement évolue avec les extensions
- L'increment d'endommagement a la même base propre que l'incrément de déformations
- Maîtrise de l'énergie de fissuration

Évolutions

- si $\tilde{\varepsilon} > \varepsilon_{d0}$ alors
$$dD_{ii} = \frac{\varepsilon_{d0}}{\tilde{\varepsilon}_{ii}^2} (1 + B_t \tilde{\varepsilon}_{ii}) \exp(B_t (\varepsilon_{d0} - \tilde{\varepsilon}_{ii})) d\tilde{\varepsilon}_{ii}$$
$$\Delta D_{ii} = \int_{\tilde{\varepsilon}_{ii}}^{\tilde{\varepsilon}_{ii} + \Delta \tilde{\varepsilon}_{ii}} d\tilde{\varepsilon}_{ii}$$
- $\Delta D_{ii} > 0$
- $B_t = \frac{h f_t}{G_f}$, h : taille de l'élément.

Évolution de l'endommagement

Règles

- L'endommagement évolue avec les extensions
- L'increment d'endommagement a la même base propre que l'incrément de déformations
- Maîtrise de l'énergie de fissuration

Évolutions

- si $\tilde{\varepsilon} > \varepsilon_{d0}$ alors

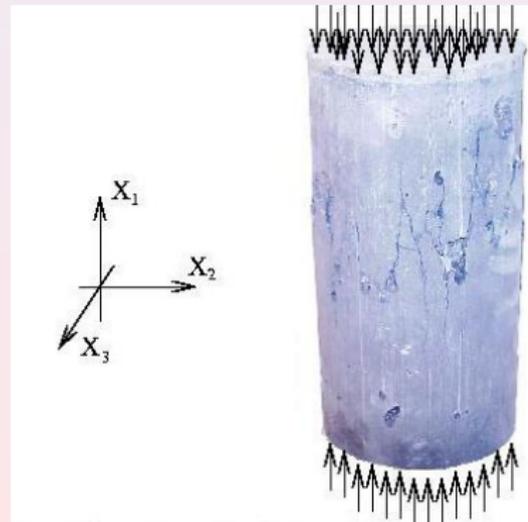
$$dD_{ii} = \frac{\varepsilon_{d0}}{\tilde{\varepsilon}_{ii}^2} (1 + B_t \tilde{\varepsilon}_{ii}) \exp(B_t (\varepsilon_{d0} - \tilde{\varepsilon}_{ii})) d\tilde{\varepsilon}_{ii}$$

$$\Delta D_{ii} = \int_{\tilde{\varepsilon}_{ii}}^{\tilde{\varepsilon}_{ii} + \Delta \tilde{\varepsilon}_{ii}} d\tilde{\varepsilon}_{ii}$$
- $\Delta D_{ii} > 0$
- $B_t = \frac{h f_t}{G_f}$, h :taille de l'élément.

Endommagement indirect en compression

Règles

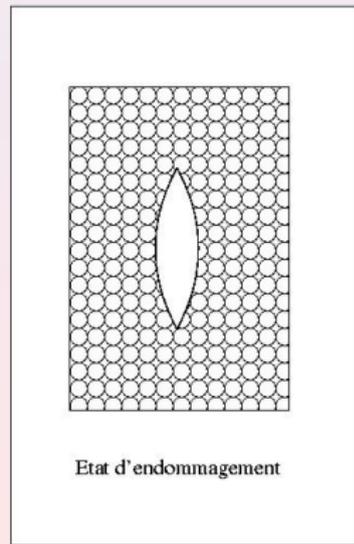
- La fissuration se développe dans les directions orthogonales à l'axe de sollicitation.
- Les extensions sont génératrices d'endommagement.
- L'endommagement a un effet direct D sur la traction.
- L'endommagement a un effet indirect D_c sur la compression.



Endommagement indirect en compression

Règles

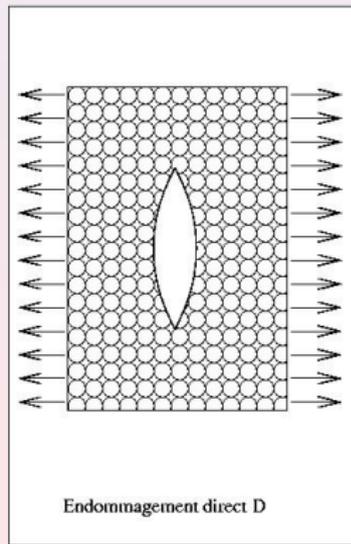
- La fissuration se développe dans les directions orthogonales à l'axe de sollicitation.
- Les extensions sont génératrices d'endommagement.
- L'endommagement a un effet direct D sur la traction.
- L'endommagement a un effet indirect D_c sur la compression.



Endommagement indirect en compression

Règles

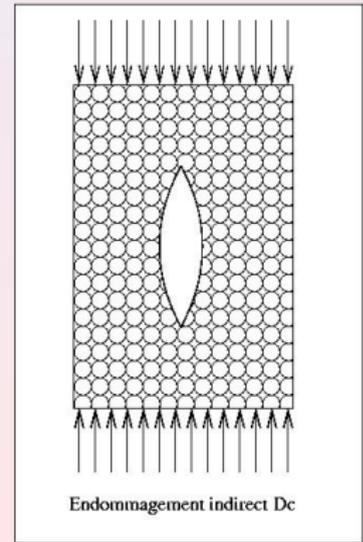
- La fissuration se développe dans les directions orthogonales à l'axe de sollicitation.
- Les extensions sont génératrices d'endommagement.
- L'endommagement a un effet direct D sur la traction.
- L'endommagement a un effet indirect D_c sur la compression.



Endommagement indirect en compression

Règles

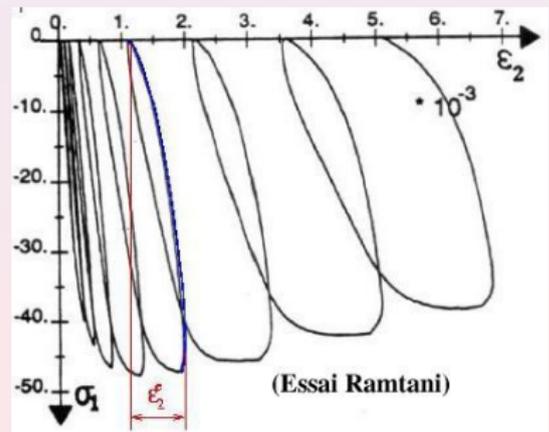
- La fissuration se développe dans les directions orthogonales à l'axe de sollicitation.
- Les extensions sont génératrices d'endommagement.
- L'endommagement a un effet direct D sur la traction.
- L'endommagement a un effet indirect D_c sur la compression.



Identification de l'endommagement indirect

À Partir d'un essai de compression

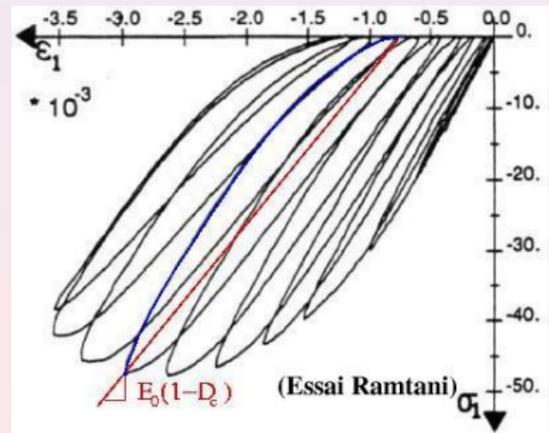
- Mesure des extensions élastiques.
- Calcul de l'endommagement D correspondant.
- Mesure de l'endommagement indirect D_c
- Identification de la relation D_c en fonction de D
- $D_c = D^\beta$



Identification de l'endommagement indirect

À Partir d'un essai de compression

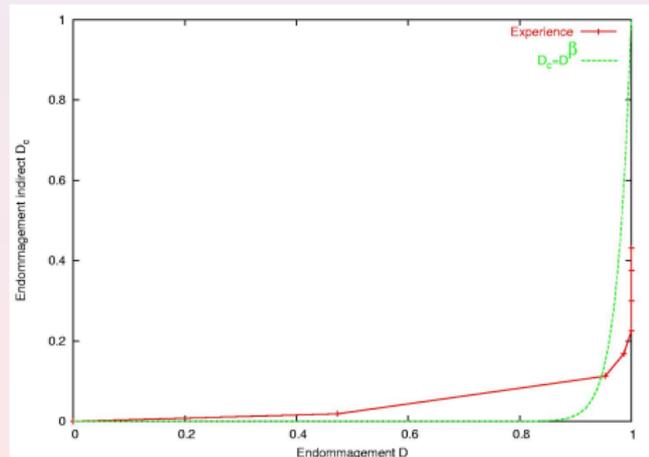
- Mesure des extensions élastiques.
- Calcul de l'endommagement D correspondant.
- Mesure de l'endommagement indirect D_c
- Identification de la relation D_c en fonction de D
- $D_c = D^\beta$



Identification de l'endommagement indirect

À Partir d'un essai de compression

- Mesure des extensions élastiques.
- Calcul de l'endommagement D correspondant.
- Mesure de l'endommagement indirect D_c
- Identification de la relation D_c en fonction de D
- $D_c = D^\beta$



Récapitulation

Endommagement dans sa base propre

$$D \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix}$$

$$1 - d(\vec{n}) = \|(I_d - D) \vec{n}\|$$

Effet sur la compression

$$D_c \begin{bmatrix} \left(\frac{D_2+D_3}{2}\right)^\beta & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{D_3+D_1}{2}\right)^\beta & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{D_1+D_2}{2}\right)^\beta \end{bmatrix}$$
$$1 - d_c(\vec{n}) = \|(I_d - D_c) \vec{n}\|$$

Récapitulation

Calcul de la pseudo-contrainte τ

$$\begin{aligned}\tilde{\sigma}_{ij} &= C_{ijkl}^0 (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p) \\ \tau_{ij} n_j &= (1 - d(\vec{n})) \tilde{\sigma}_{ij}^+ n_j + \\ & (1 - d_c(\vec{n})) \tilde{\sigma}_{ij}^- n_j\end{aligned}$$

Attention !!

- Le tenseur résultant n'est pas symétrique.
- La matrice sécante n'est pas symétrique : Violation du premier principe de la thermodynamique

Calcul de l'opérateur élastique

Principe

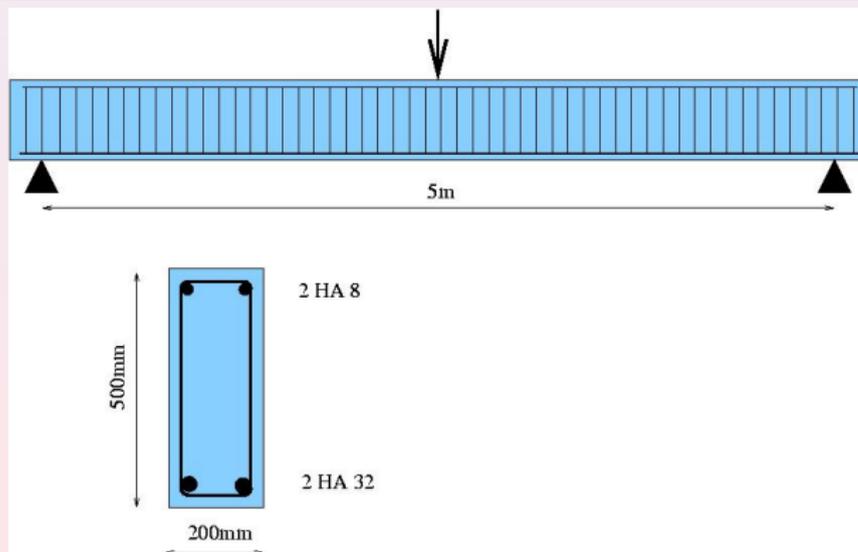
- On cherche la relation élastique la plus proche de la précédente vérifiant les propriétés de symétrie essentielles.
- On utilise une formulation variationnelle inspirée des modèles microplans

sur la sphère unitaire Ω

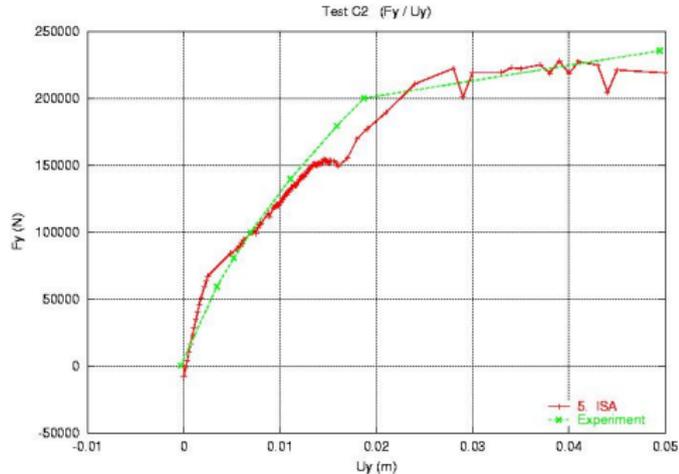
$$\sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^* \int_{\Omega} d\Omega = \int_{\Omega} \tau_{ij} n_j \varepsilon_{ij}^* n_j d\Omega$$

$$\forall \varepsilon^* \quad t_{qj} \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ji}^*$$

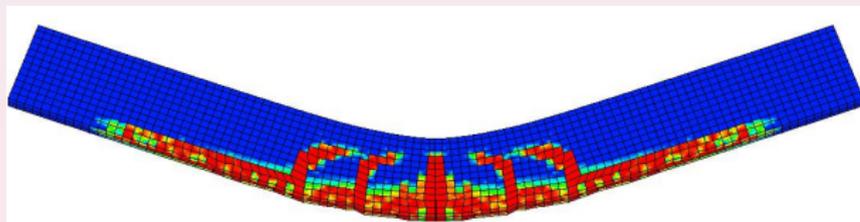
Applications cas test Benchmark MECA. Poutre en flexion trois points



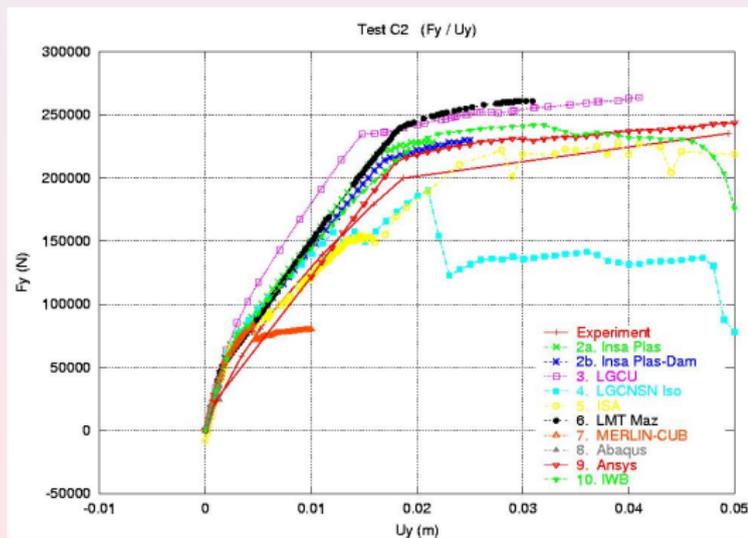
Applications cas test Benchmark MECA. Poutre en flexion trois points



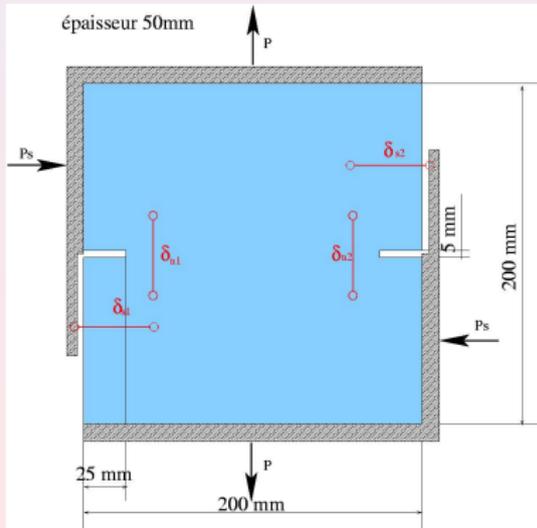
Applications cas test Benchmark MECA. Poutre en flexion trois points



Applications cas test Benchmark MECA. Poutre en flexion trois points



Tests de Nooru-Mohamed : Traction Cisaillement



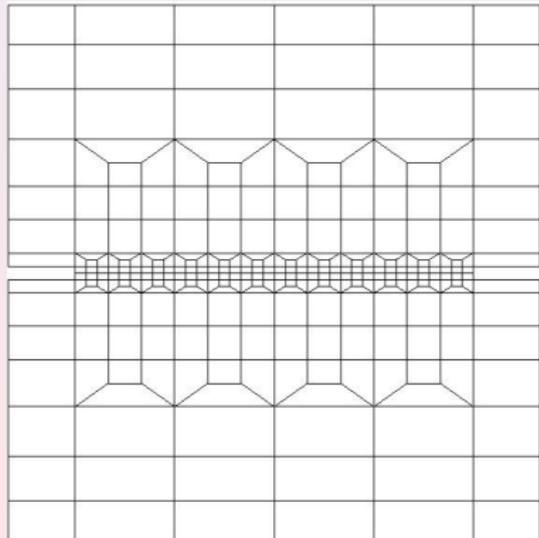
chargement

1. on charge l'éprouvette en traction jusqu'à $\delta_n = 200\mu m$ à $P_s = 0$
2. on décharge jusqu'à $P_n = 0$
3. on charge en cisaillement jusqu'à $\delta_s = 150\mu m$

Tests de Nooru-Mohamed : Traction Cisaillement

sensibilité des résultats vis à vis du maillage

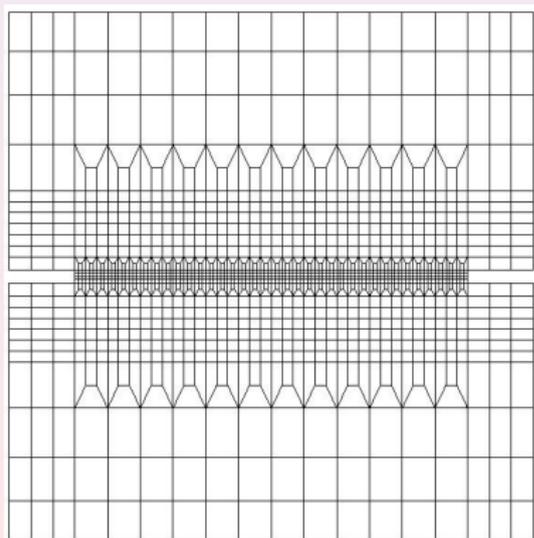
- Utilisation de deux maillages avec le modèle isotrope
- Comparaison des réponses globales en traction
- Comparaison des champs d'endommagement



Tests de Nooru-Mohamed : Traction Cisaillement

sensibilité des résultats vis à vis du maillage

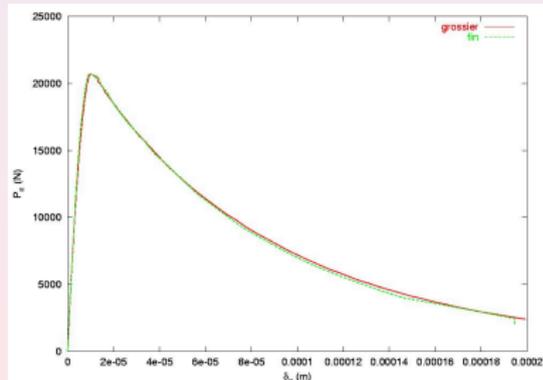
- Utilisation de deux maillages avec le modèle isotrope
- Comparaison des réponses globales en traction
- Comparaison des champs d'endommagement



Tests de Nooru-Mohamed : Traction Cisaillement

sensibilité des résultats vis à vis du maillage

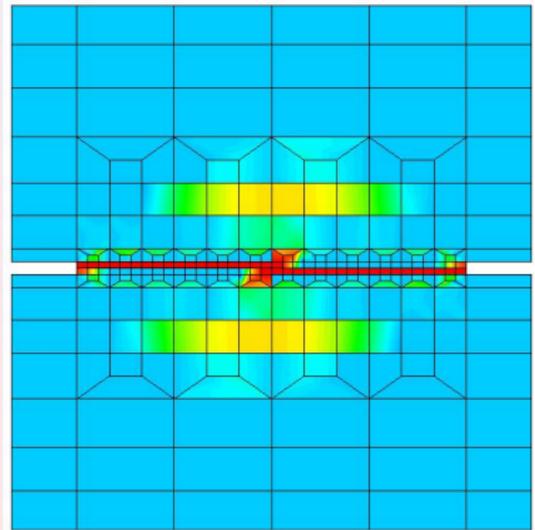
- Utilisation de deux maillages avec le modèle isotrope
- Comparaison des réponses globales en traction
- Comparaison des champs d'endommagement



Tests de Nooru-Mohamed : Traction Cisaillement

sensibilité des résultats vis à vis du maillage

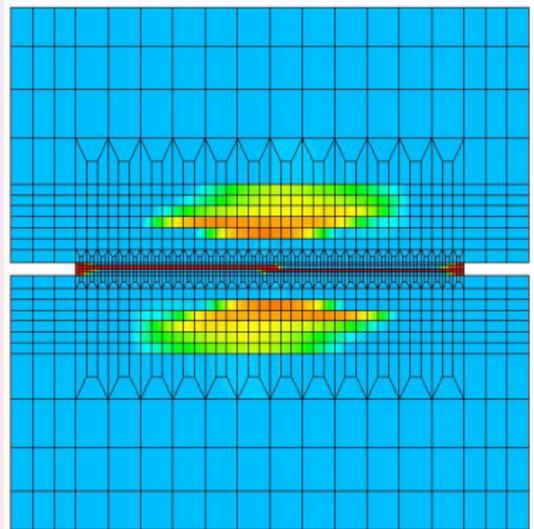
- Utilisation de deux maillages avec le modèle isotrope
- Comparaison des réponses globales en traction
- Comparaison des champs d'endommagement



Tests de Nooru-Mohamed : Traction Cisaillement

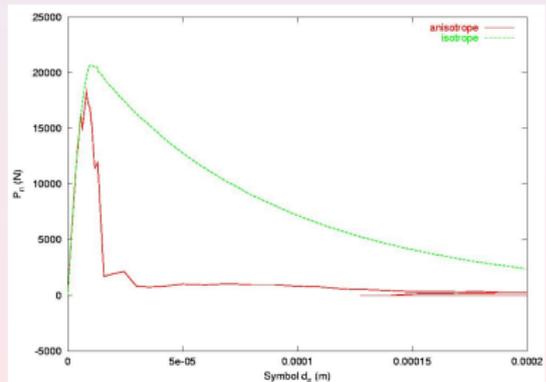
sensibilité des résultats vis à vis du maillage

- Utilisation de deux maillages avec le modèle isotrope
- Comparaison des réponses globales en traction
- Comparaison des champs d'endommagement



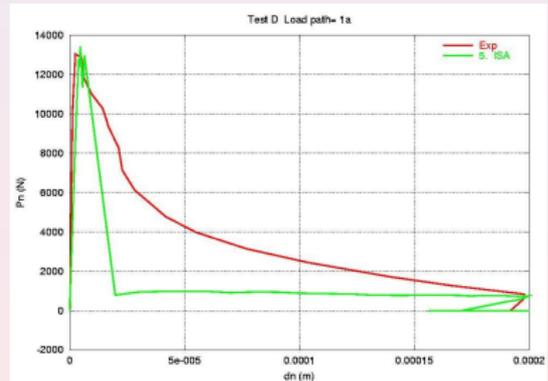
Comparaison isotrope anisotrope expérience

- Courbes $P_n - \delta_n$
 - isotrope - anisotrope
 - expérience - anisotrope
 - expérience - anisotrope Nantes
 - expérience - isotrope Nantes
 - Tous les participants
 - Courbes $P_s - \delta_s$ isotrope - anisotrope
 - Endommagement final



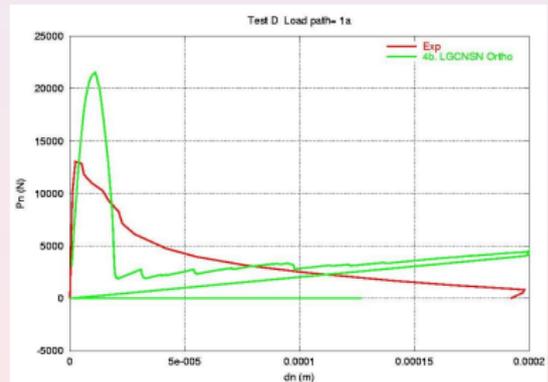
Comparaison isotrope anisotrope expérience

- Courbes $P_n - \delta_n$
 - isotrope - anisotrope
 - expérience - anisotrope
 - expérience - anisotrope Nantes
 - expérience - isotrope Nantes
 - Tous les participants
- Courbes $P_s - \delta_s$ isotrope - anisotrope
- Endommagement final



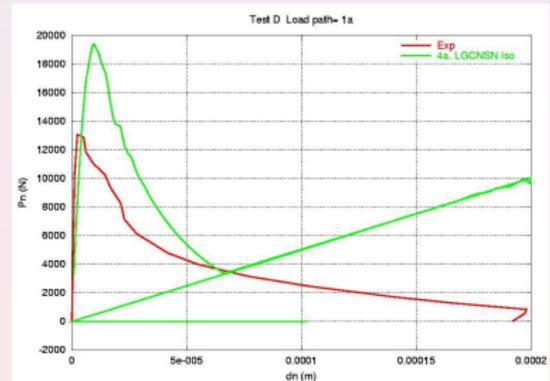
Comparaison isotrope anisotrope expérience

- Courbes $P_n - \delta_n$
 - isotrope - anisotrope
 - expérience - anisotrope
 - expérience - anisotrope Nantes
 - expérience - isotrope Nantes
 - Tous les participants
- Courbes $P_s - \delta_s$ isotrope - anisotrope
- Endommagement final



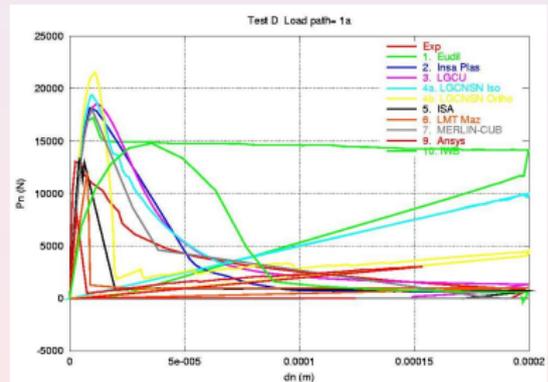
Comparaison isotrope anisotrope expérience

- Courbes $P_n - \delta_n$
 - isotrope - anisotrope
 - expérience - anisotrope
 - expérience - anisotrope Nantes
- expérience - isotrope Nantes
 - Tous les participants
- Courbes $P_s - \delta_s$ isotrope - anisotrope
- Endommagement final



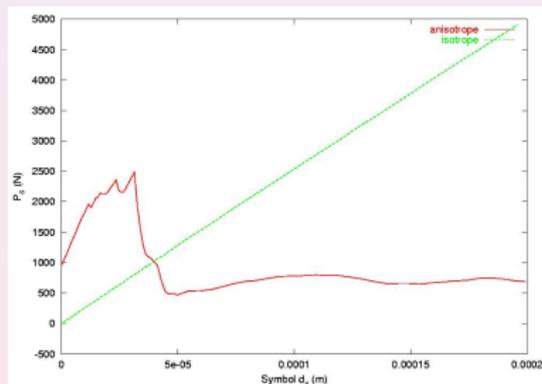
Comparaison isotrope anisotrope expérience

- Courbes $P_n - \delta_n$
 - isotrope - anisotrope
 - expérience - anisotrope
 - expérience - anisotrope Nantes
 - expérience - isotrope Nantes
- Tous les participants
- Courbes $P_s - \delta_s$ isotrope - anisotrope
- Endommagement final



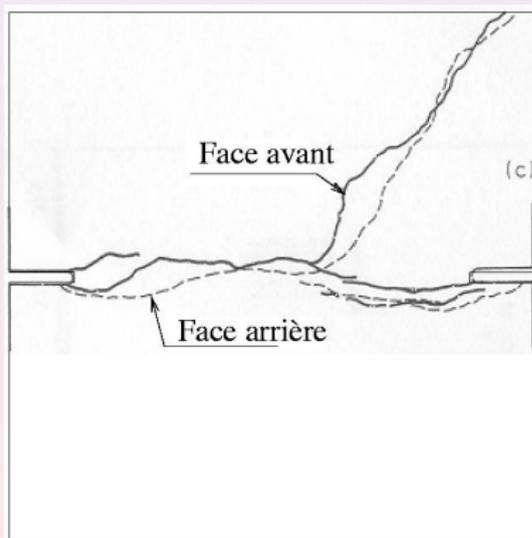
Comparaison isotrope anisotrope expérience

- Courbes $P_n - \delta_n$
- Courbes $P_s - \delta_s$ isotrope - anisotrope
- Endommagement final



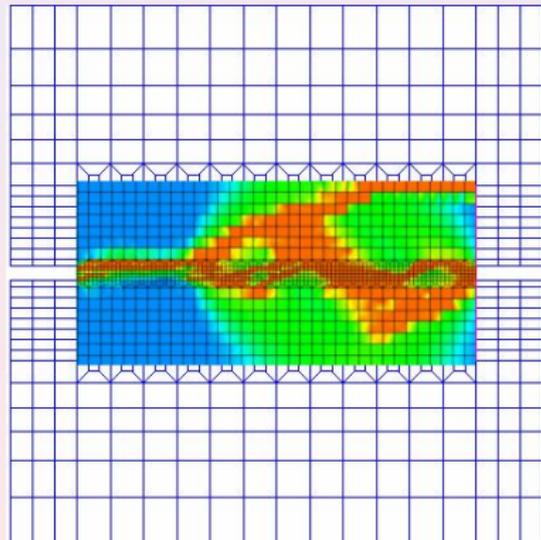
Comparaison isotrope anisotrope expérience

- Courbes $P_n - \delta_n$
- Courbes $P_s - \delta_s$ isotrope - anisotrope
- Endommagement final



Comparaison isotrope anisotrope expérience

- Courbes $P_n - \delta_n$
- Courbes $P_s - \delta_s$ isotrope - anisotrope
- Endommagement final



Conclusions

Points à considérer

- **Anisotropie structurelle**
- Déformations anélastiques
- Anisotropie matérielle
- Le modèle proposé

Remarques

- Semble suffisante pour représenter la plupart des cas.
- La fissuration doit être organisée
- La prise en compte des effets unilatéraux est nécessaire

Conclusions

Points à considérer

- Anisotropie structurelle
- **Déformations anélastiques**
- Anisotropie matérielle
- Le modèle proposé

Remarques

- Doivent être nécessairement anisotropes.
- Représentation de l'essai de compression.
- Redistributions de contraintes après endommagement.

Conclusions

Points à considérer

- Anisotropie structurelle
- Déformations anélastiques
- **Anisotropie matérielle**
- Le modèle proposé

Remarques

- Modèles encore trop complexes pour être exploités industriellement
- Nécessité à démontrer expérimentalement sur des essais simples (compression puis traction)

Conclusions

Points à considérer

- Anisotropie structurelle
- Déformations anélastiques
- Anisotropie matérielle
- **Le modèle proposé**

Remarques

- Est un des seuls modèles d'endommagement anisotrope unilatéral couplé à la plasticité exploité.
- Le couplage avec la plasticité et l'énergie de fissuration sont mal maîtrisés.
- Identification délicate des paramètres.

Quelques éléments d'une nouvelle approche. Thèse M. Matallah

Introduction

- **Aucun modèle d'endommagement n'est capable d'affronter toutes les situations**
 - Le modèle de Mazars reste le plus fiable et le plus utilisé
 - Ce modèle possède un certain nombre de lacunes

Quelques éléments d'une nouvelle approche. Thèse M. Matallah

Introduction

- Aucun modèle d'endommagement n'est capable d'affronter toutes les situations
- **Le modèle de Mazars reste le plus fiable et le plus utilisé**
 - Ce modèle possède un certain nombre de lacunes

Quelques éléments d'une nouvelle approche. Thèse M. Matallah

Introduction

- Aucun modèle d'endommagement n'est capable d'affronter toutes les situations
- Le modèle de Mazars reste le plus fiable et le plus utilisé
- Ce modèle possède un certain nombre de lacunes

Objectifs

Observations

- Les effets unilatéraux sont liés aux ouvertures et fermetures de micro-fissures
- Déformations anélastiques représentent l'Ouverture Unitaire des microFissures (OUF)
- L'anisotropie de l'endommagement est liée à l'orientation des microfissures

Conséquences

- L'endommagement doit être activé ou désactivé par les ouvertures de microfissures
- l'OUF active ou désactive l'endommagement
- l'OUF donne l'effet anisotrope de l'endommagement

Objectifs

Observations

- Les effets unilatéraux sont liés aux ouvertures et fermetures de micro-fissures
- **Déformations anélastiques représentent l'Ouverture Unitaire des microFissures (OUF)**
- L'anisotropie de l'endommagement est liée à l'orientation des microfissures

Conséquences

- L'endommagement doit être activé ou désactivé par les ouvertures de microfissures
- l'OUF active ou désactive l'endommagement
- l'OUF donne l'effet anisotrope de l'endommagement

Objectifs

Observations

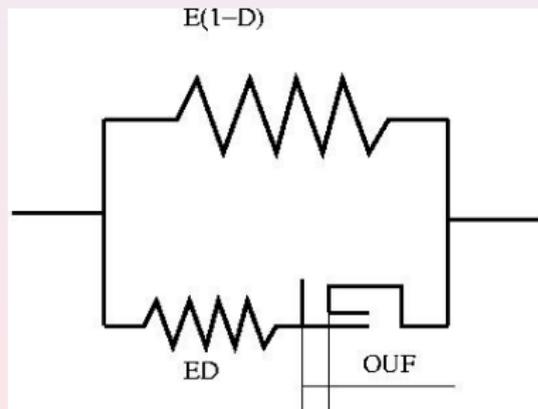
- Les effets unilatéraux sont liés aux ouvertures et fermetures de micro-fissures
- Déformations anélastiques représentent l'Ouverture Unitaire des microFissures (OUF)
- L'anisotropie de l'endommagement est liée à l'orientation des microfissures

Conséquences

- L'endommagement doit être activé ou désactivé par les ouvertures de microfissures
- l'OUF active ou désactive l'endommagement
- l'OUF donne l'effet anisotrope de l'endommagement

Moyens

- On utilise le principe du modèle de F. Ragueneau
- Relation uniaxiale
- L'anisotropie de l'endommagement est liée à l'orientation des microfissures



Moyens

- On utilise le principe du modèle de F. Ragueneau
- **Relation uniaxiale**
- L'anisotropie de l'endommagement est liée à l'orientation des microfissures

$$\sigma = E(1 - D)\varepsilon + ED(\varepsilon - \varepsilon_{ouf})$$

Moyens

- On utilise le principe du modèle de F. Ragueneau
- Relation uniaxiale
- L'anisotropie de l'endommagement est liée à l'orientation des microfissures

$$\sigma = E\varepsilon - ED\varepsilon_{ouf}$$

Campagne expérimentale

- On manque cruellement de résultats expérimentaux sur le comportement uniaxial cyclique
 - traction puis compression
 - compression puis traction
- L'essai PIED est trop délicat à mettre en oeuvre
- Les essais de traction directe peuvent être alternés mais non cycliques
- Essai PIEL : Pour Identifier l'Endommagement Localisé

Campagne expérimentale

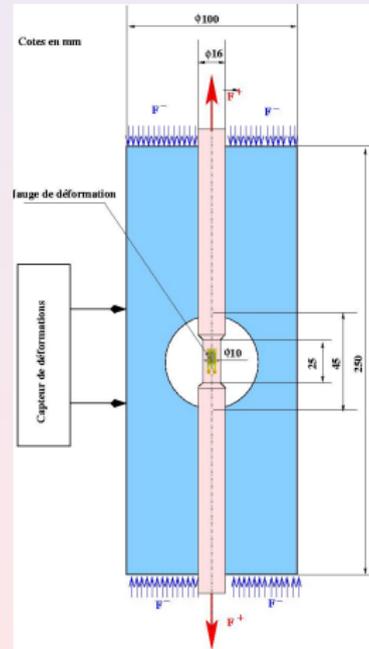
- On manque cruellement de résultats expérimentaux sur le comportement uniaxial cyclique
 - traction puis compression
 - compression puis traction
- **L'essai PIED est trop délicat à mettre en oeuvre**
- Les essais de traction directe peuvent être alternés mais non cycliques
- Essai PIEL : Pour Identifier l'Endommagement Localisé

Campagne expérimentale

- On manque cruellement de résultats expérimentaux sur le comportement uniaxial cyclique
 - traction puis compression
 - compression puis traction
- L'essai PIED est trop délicat à mettre en oeuvre
- Les essais de traction directe peuvent être alternés mais non cycliques
- Essai PIEL : Pour Identifier l'Endommagement Localisé

Campagne expérimentale

- On manque cruellement de résultats expérimentaux sur le comportement uniaxial cyclique
 - traction puis compression
 - compression puis traction
- L'essai PIED est trop délicat à mettre en oeuvre
- Les essais de traction directe peuvent être alternés mais non cycliques
- **Essai PIEL : Pour Identifier l'Endommagement Localisé**



Prototype essai PIEL



Prototype essai PIEL



Conclusions

Résultats

- Modélisation
- Campagne expérimentale

À la fin du doctorat de M. Matallah

Approches multi-échelles dans la modélisation des couplages

Phénomène modélisé

- **Comportement mécanique macroscopique**
- Écoulement dans une macrofissure
- Endommagement thermique

Dimensions caractéristiques

- Trois fois la taille du plus gros granulat $\approx 10\text{cm}$
- Ouverture de fissure $\approx 0,1\text{mm}$
- Taille du plus petit granulat $\approx 1\text{mm}$

Approches multi-échelles dans la modélisation des couplages

Phénomène modélisé

- Comportement mécanique macroscopique
- **Écoulement dans une macrofissure**
- Endommagement thermique

Dimensions caractéristiques

- Trois fois la taille du plus gros granulat $\approx 10\text{cm}$
- Ouverture de fissure $\approx 0,1\text{mm}$
- Taille du plus petit granulat $\approx 1\text{mm}$

Approches multi-échelles dans la modélisation des couplages

Phénomène modélisé

- Comportement mécanique macroscopique
- Écoulement dans une macrofissure
- **Endommagement thermique**

Dimensions caractéristiques

- Trois fois la taille du plus gros granulat $\approx 10\text{cm}$
- Ouverture de fissure $\approx 0,1\text{mm}$
- Taille du plus petit granulat $\approx 1\text{mm}$

Passage macro - micro hétérogénéisation (H. Boussa)

Objectifs

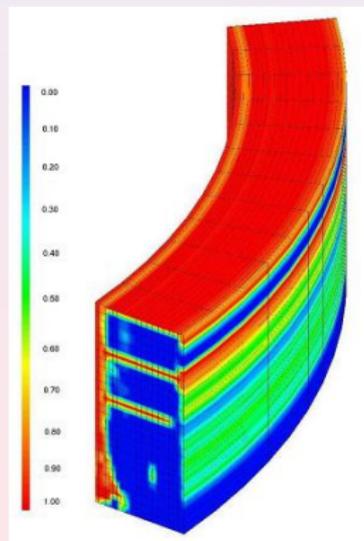
- On souhaite calculer la perméabilité d'une structure
- On calcule l'endommagement (échelle macroscopique)
- On souhaite en déduire le taux de fuite



Passage macro - micro hétérogénéisation (H. Boussa)

Objectifs

- On souhaite calculer la perméabilité d'une structure
- On calcule l'endommagement (échelle macroscopique)
- On souhaite en déduire le taux de fuite



Passage macro - micro hétérogénéisation (H. Boussa)

Objectifs

- On souhaite calculer la perméabilité d'une structure
- On calcule l'endommagement (échelle macroscopique)
- On souhaite en déduire le taux de fuite

Mais

- La donnée de la longueur et de l'ouverture de fissure est insuffisante.
- Les résultats macroscopiques doivent être "enrichis" pour tenir compte de l'hétérogénéité du matériau.

Méthode d'hétérogénéisation

- **Choix de l'échelle de modélisation**

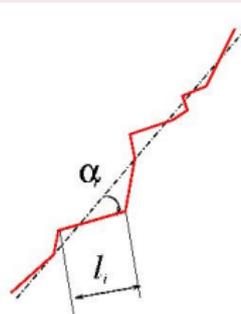
- Modélisation du milieu
- Identification du modèle

- $\approx 1/10^{eme}$ ouverture de fissure

- $\approx 0,01mm$

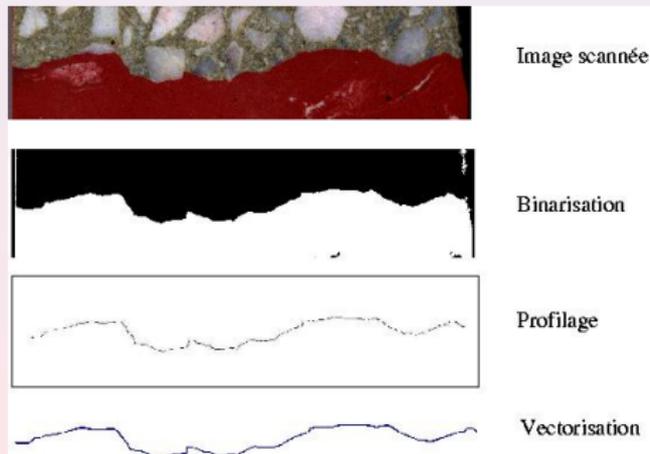
Méthode d'hétérogénéisation

- Choix de l'échelle de modélisation
- **Modélisation du milieu**
- Identification du modèle



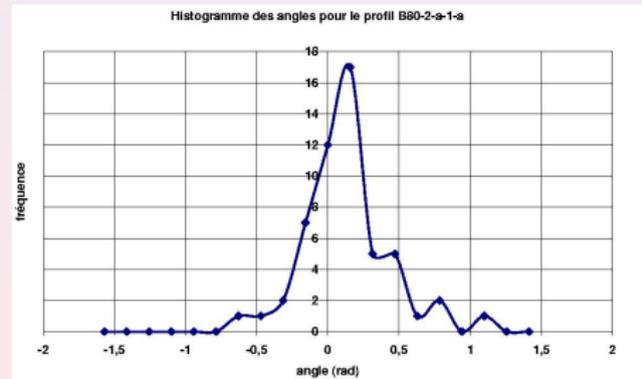
Méthode d'hétérogénéisation

- Choix de l'échelle de modélisation
- Modélisation du milieu
- **Identification du modèle**



Méthode d'hétérogénéisation

- Choix de l'échelle de modélisation
- Modélisation du milieu
- Identification du modèle



Simulation des écoulements

- **Hypothèses**

- Paramètres de l'écoulement
- Simulations 2D sur des longueurs de fissures de 50mm

Hypothèses

- Fluide incompressible
- Vitesse nulle aux parois

Simulation des écoulements

- Hypothèses
- Paramètres de l'écoulement
- Simulations 2D sur des longueurs de fissures de 50mm

Paramètres

- Distributions angulaires et de longueurs
- Caractéristiques du fluide
- Ouverture de fissure
- Différentiel de pression

Simulation des écoulements

- Hypothèses
- Paramètres de l'écoulement
- Simulations 2D sur des longueurs de fissures de 50mm

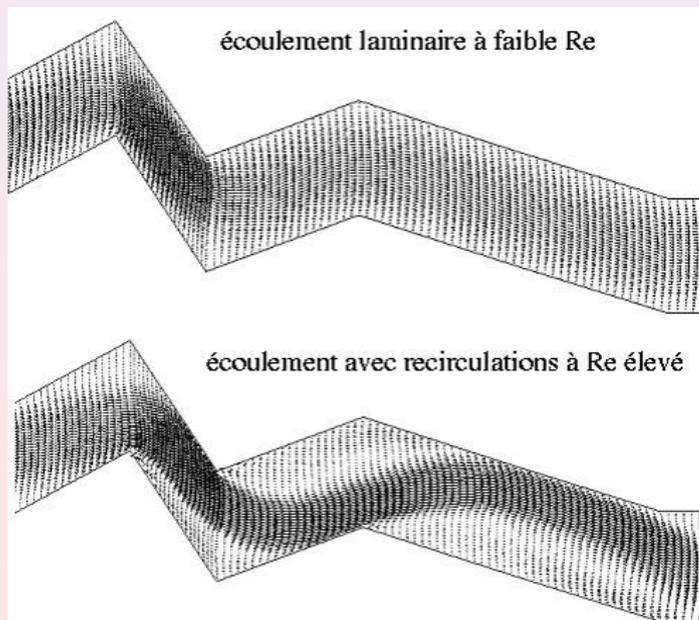
Simulations

- Navier Stokes
- ≈ 38000 éléments
- ≈ 10000 pas de temps pour obtenir le régime établi

Quelques résultats

Résultats

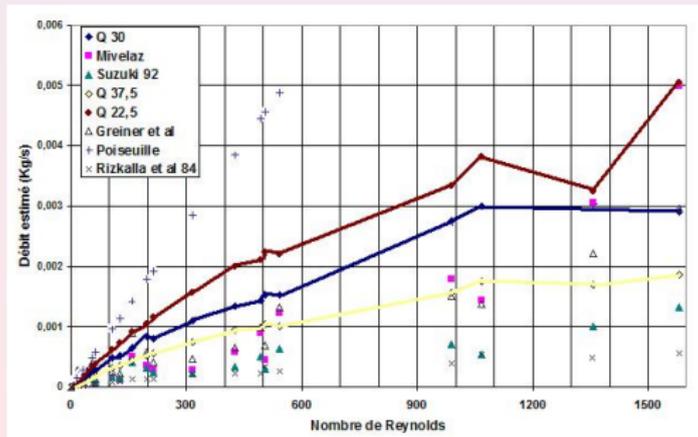
- Influence des paramètres sur la nature de l'écoulement.
- Débit massique en fonction de Re
- Comparaison des résultats de la littérature



Quelques résultats

Résultats

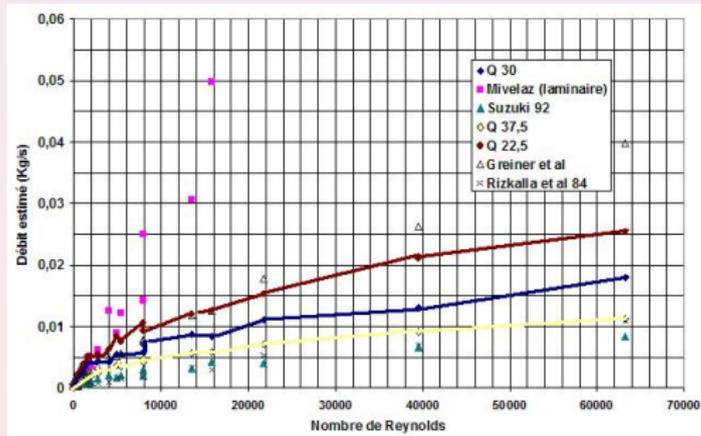
- Influence des paramètres sur la nature de l'écoulement.
- Débit massique en fonction de Re
- Comparaison des résultats de la littérature



Quelques résultats

Résultats

- Influence des paramètres sur la nature de l'écoulement.
- Débit massique en fonction de Re
- Comparaison des résultats de la littérature



Conclusions

Points abordés

- **Modélisation de la géométrie de la fissure**
- Simulations d'écoulements
- Utilisation concrète

Remarques

- Adaptée au problème d'écoulement.
- La distribution angulaire est prépondérante
- Modélisation 3D à envisager (c.f. géologie)

Conclusions

Points abordés

- Modélisation de la géométrie de la fissure
- **Simulations d'écoulements**
- Utilisation concrete

Remarques

- Validées dans le domaine d'étude.
- Permettent de compléter et éventuellement remplacer des études expérimentales.
- Envisager la simulation de fluide multiphasiques.

Conclusions

Points abordés

- Modélisation de la géométrie de la fissure
- Simulations d'écoulements
- **Utilisation concrete**

Remarques

- Validée sur le problème MAEVA
- Le travail doit être complété pour une utilisation "ingénieur"

Passage micro - macro, homogénéisation (G. Mounajed et A. Menou)

Objectifs

- On souhaite évaluer l'endommagement thermique du béton
- Les dilatations thermiques différentielles génèrent de l'endommagement
- Les différents endommagements se combinent

Origines

- Dilatations empêchées.
- Transformations chimiques.
- Dilatation différentielles.

Passage micro - macro, homogénéisation (G. Mounajed et A. Menou)

Objectifs

- On souhaite évaluer l'endommagement thermique du béton
 - **Les dilatations thermiques différentielles génèrent de l'endommagement**
 - Les différents endommagements se combinent
- Un bloc de béton libre soumis à une température homogène s'endommage.
 - Ceci avant toute transformation chimique.
 - Simulation à l'échelle du grain de sable

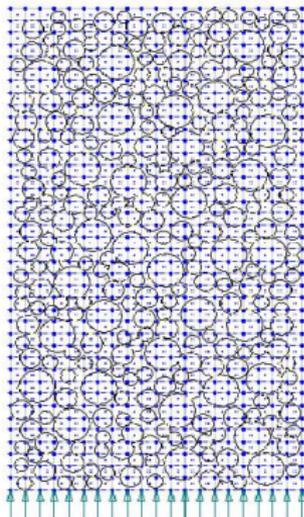
Passage micro - macro, homogénéisation (G. Mounajed et A. Menou)

Objectifs

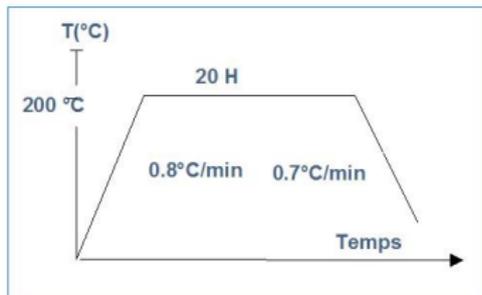
- On souhaite évaluer l'endommagement thermique du béton
 - Les dilatations thermiques différentielles génèrent de l'endommagement
 - Les différents endommagements se combinent
- Un bloc de béton libre soumis à une température homogène s'endommage.
 - Ceci avant toute transformation chimique.
 - Simulation à l'échelle du grain de sable

Simulation des essais de A. Noumoué (Béton numérique Symphonie)

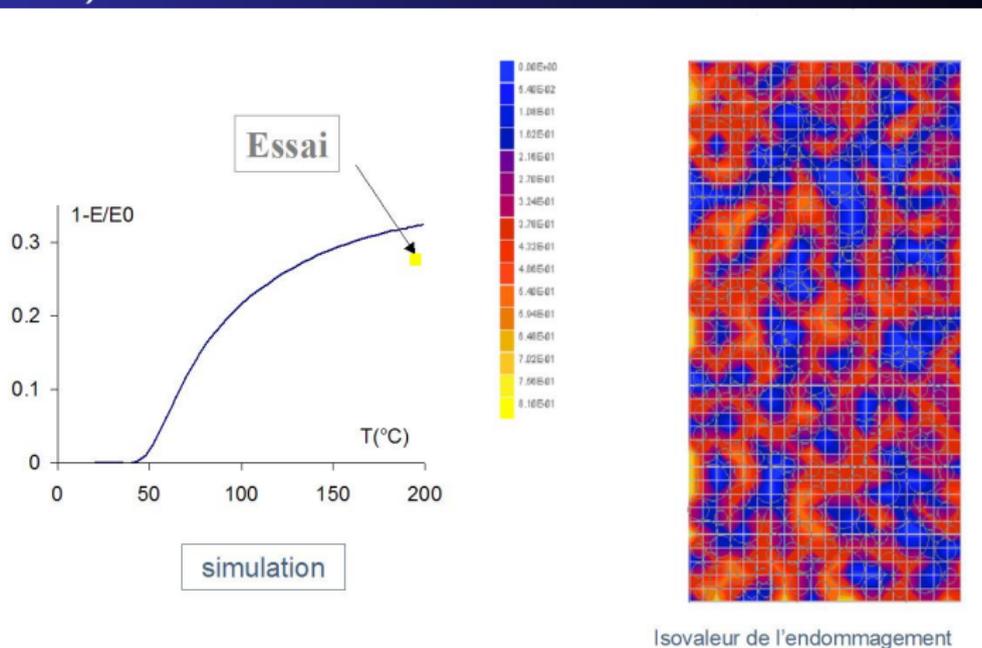
Éprouvette 16/32 en béton chauffée à 200°C (vitesse en montée en température de 0.8°C/min) et refroidie avec une vitesse de (0.7°C/min).



Maillage et conditions aux limites et Génération du maillage



Simulation des essais de A. Noumoué (Béton numérique Symphonie)



Conclusions

Points abordés

- **Endommagement thermique**
- Dilatations différentielles
- Utilisation concrete

Remarques

- Dilatation “empêchées”.
- Dilatations différentielles
- Transformations chimiques

Conclusions

Points abordés

- Endommagement thermique
- **Dilatations différentielles**
- Utilisation concrete

Remarques

- Génèrent un endommagement à l'échelle microscopique.
- Simulées par une approche béton numérique.
- Approche validée sur des expériences

Conclusions

Points abordés

- Endommagement thermique
- Dilatations différentielles
- **Utilisation concrete**

Remarques

- Par un modèle d'endommagement couplé

Perspectives générales

Sujets

- **Comportement mécanique**
- Couplage thermomécanique
- Couplage endommagement écoulement

Études

- Modélisation de l'endommagement (thèse M. Matallah).
- Interface acier béton (thèse A. Daoud juillet 2003).
- Comportement cyclique des assemblages chevillés (thèse CSTB)
- Fiabilité des ancrages dans les structures minces (thèse CE-RIB 2004)

Perspectives générales

Sujets

- Comportement mécanique
- **Couplage thermomécanique**
- Couplage endommagement écoulement

Études

- Modèle d'endommagement couplé à la température (Thèse CSTB A. Menou février 2004).
- Simulation du comportement de structures à l'incendie (Projet CERIB 2005).

Perspectives générales

Sujets

- Comportement mécanique
- Couplage thermomécanique
- Couplage endommagement
écoulement

Études

- DEA Mathématiques
Appliquées UPPA 2004
- Projet de doctorat IRSN
2005.

Le Laboratoire de Sciences Appliquées au Génie Civil

Composition du laboratoire

- 2 Professeurs d'Université
- 6 Maîtres de Conférences
- 2 Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherche
- 7 Doctorants

Équipes de recherche

Structures et transferts (CLB)

- Endommagement
- Calculs de structures
- Couplages

Génie côtier (Stéphane Abadie)

- Comportement hydro-sédimentaire de l'embouchure de l'adour
- Modélisation numérique du déferlement
- Liquéfaction autour de structures marines

Formation par la recherche

Thèses soutenues

- Hocine Boussa *“Structures en béton soumises à des sollicitations thermomécaniques sévères. Évolution des dommages et des perméabilités”*, Janvier 2000 (Bourse MRT/ENS Cachan), C. La Borderie et J. Mazars
- Atef Daoud *“Étude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant. Contribution à la modélisation numérique de l'interface”*, Juillet 2003 (Bourse Ministère Tunisien), M. Lorrain et C. La Borderie

Formation par la recherche

Thèses en cours

- Christophe Brière *“Analyse des capacités prédictives d'un modèle numérique hydrodynamique par comparaison avec des mesures in situ”*, 2004 (Sur contrat) S. Abadie et P. André
- Didier Rihouey *“Développement d'outils d'analyse géostatistique pour systématiser l'interprétation de mesures in-situ”*, 2004 (Bourse BAB), P. Maron et P. André.
- Mohammed Matallah *“Modélisation de l'endommagement unilatéral du béton”*, 2005 (Bourse BAB) C. La Borderie.
- Jean Dubranna *“Suivi et modélisation du dépôt de clapage à l'embouchure de l'Adour”*, 2006 (Bourse BAB), P. Maron et P. André.

Formation par la recherche

Thèses en collaboration

- Abdellah Menou *“Comportement des bétons au feu. Modélisation de l'endommagement à haute température”* 2004 (Bourse CSTB), G. Mounajed, H. Carré et C. La Borderie
- Pierre Lubin *“Simulation numérique du déferlement”*, 2005 (Bourse MASTER), J.P. Caltagirone et S. Abadie
- Elliot Polania *“Etude du comportement critique d'assemblages de dalles alvéolées”*, 2005 (CIFRE CERIB), M. Lorrain et S Bernardi.
- Abdelghani Si Chaib *“Étude du comportement des chevilles de fixation sous chargement cyclique de type séisme”* (2006, Bourse CSTB) G. Mounajed et C. La Borderie.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

