Fusion et fissuration du béton en cas d'interaction corium-béton

Club Cast3M

Clément Pionneau[1]

Directeurs de thèse : Ludovic Jason[1] et Natalie Seiler[2]
Encadrant de thèse : Christopher Nahed [1]

[1]Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Étude Mécanique et Thermique, 91191, Gif-sur-Yvette, France

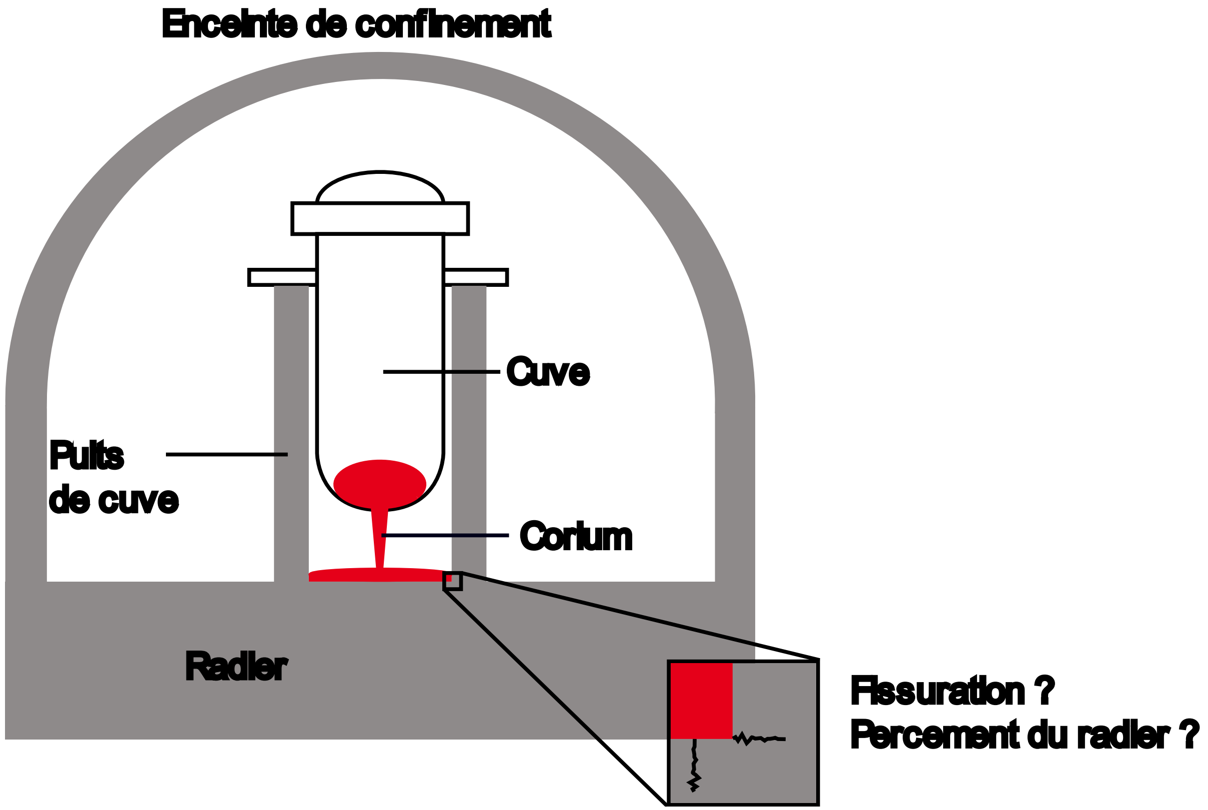
[2]CEA, DES, IRESNE, Cadarache, F-13108 Saint Paul-Lez-Durance, France

Contexte

- Enceinte de confinement et radier en béton :
  - Ultime barrière en cas d'accident grave

- Interaction corium béton → dégradation du béton :
  - Thermique
  - Chimique
  - Mécanique

- ASNR demande des dispositions afin d'éviter le percement du radier

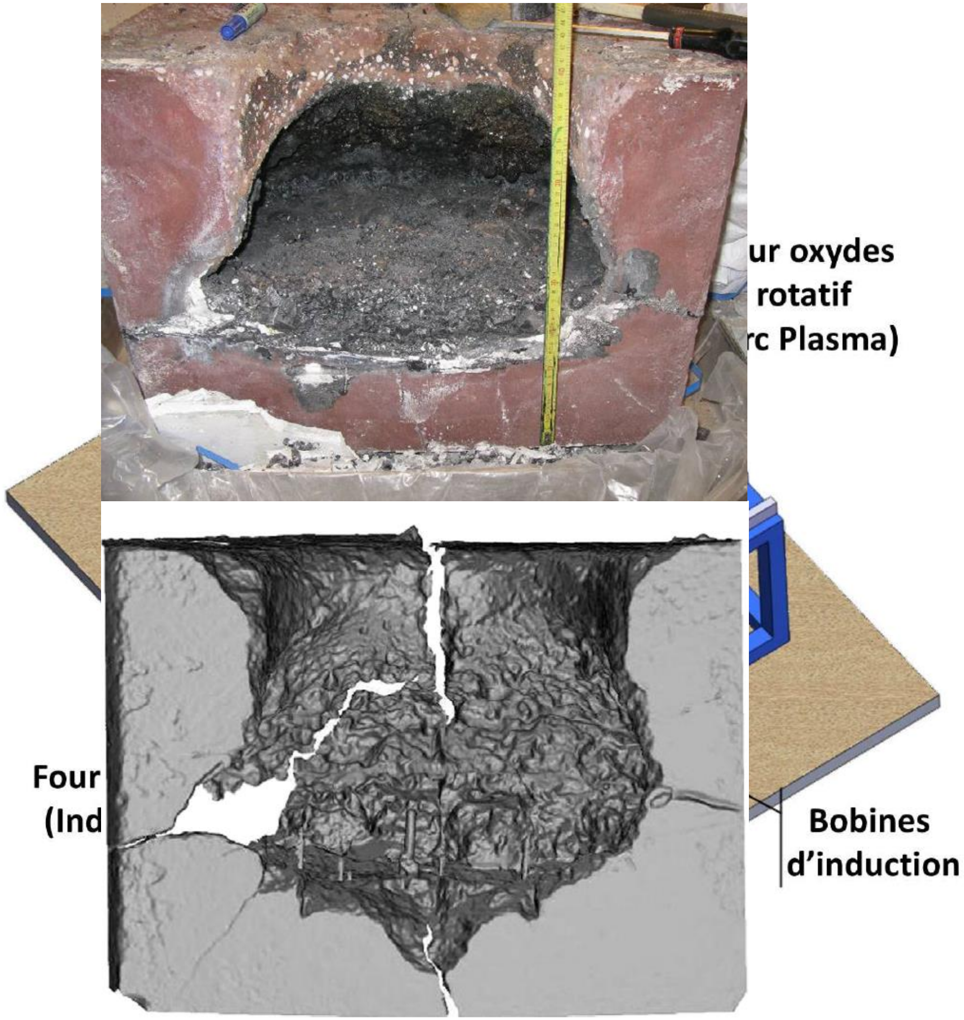


Contexte

- Collaboration avec le CEA de Cadarache :
  - Plateforme : Vulcano-ICB
  - Expérience petite échelle : VB-U7
  - Corium représenté par un mélange d'oxydes
  - Chauffage par induction
  - Rupture du creuset

- Objectifs :
  - Reproduction numérique de VB-U7
  - Contextualiser avec Fukushima

- Bibliographie :
  - Pas d'étude explicite publiée



VULCANO VB-U7 experiment on interaction between oxidic corium

Mécanismes de dégradation des bétons lors de l'Interaction Corium-Béton, L. Marteri

Plan

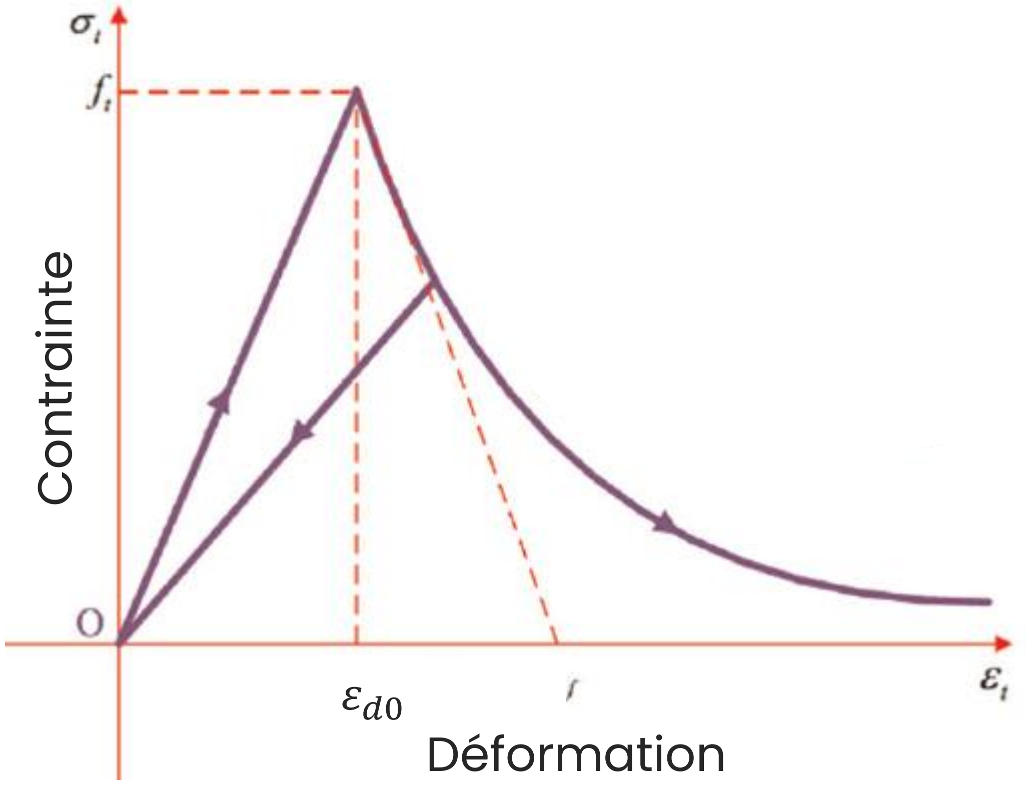
1. Méthodologie

Comportement

- Thermique : équation de la chaleur

$$\rho c_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} + \mathrm{div}\left(-\lambda(T)\cdot \underline{\mathrm{grad}\, T}\right) = 0$$

- Mécanique : modèle de Mazars régularisé en traction
  - $\underline{\underline{\sigma}} = (1-d)\mathbf{C} : \underline{\underline{\varepsilon}}$, $d \in [0,1]$
  - $d = f\left(\varepsilon_{eq}(t), \max\limits_{\tau<t} \varepsilon_{eq}(\tau)\right)$, t : temps
  - $\varepsilon_{eq} = \gamma\sqrt{\sum_{i=1}^{3}\langle\varepsilon_i\rangle_+^2}$

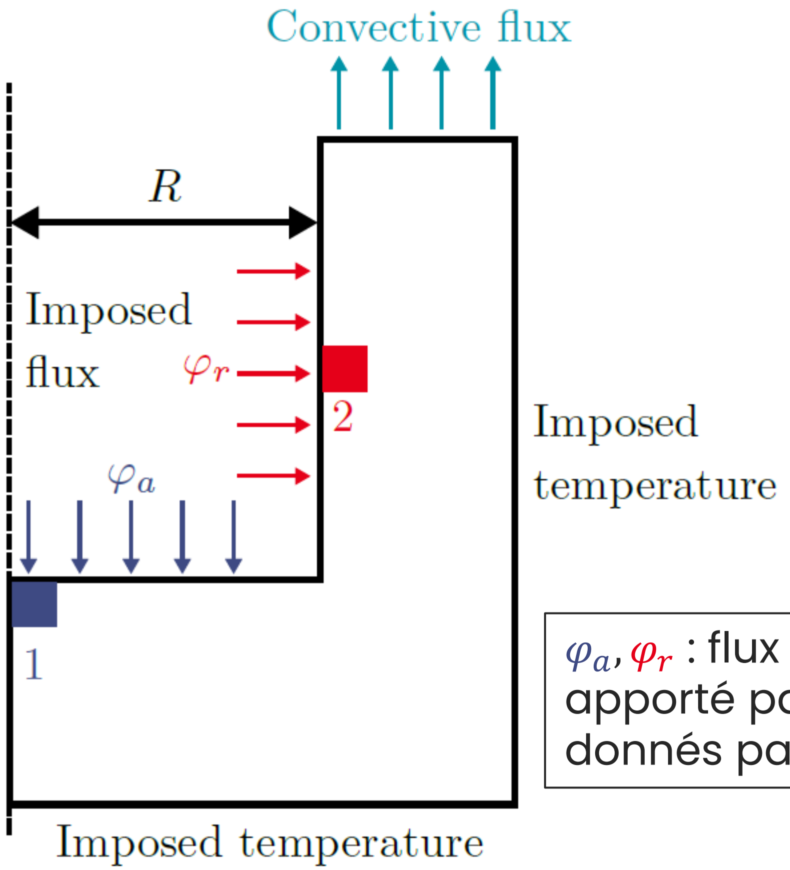


Essai de traction uniaxiale

Source : An effective model for analysis of reinforced concrete members and structures under blast loading

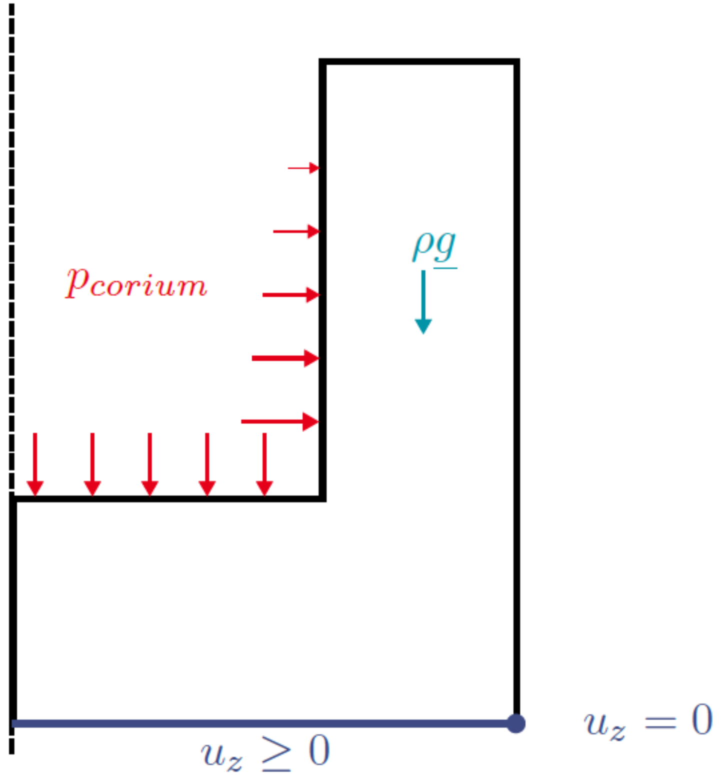
Géométrie, conditions limites et chargement

Modèle thermique



φ_a, φ_r : flux de chaleur apporté par le corium, donnés par Cadarache

Modèle mécanique

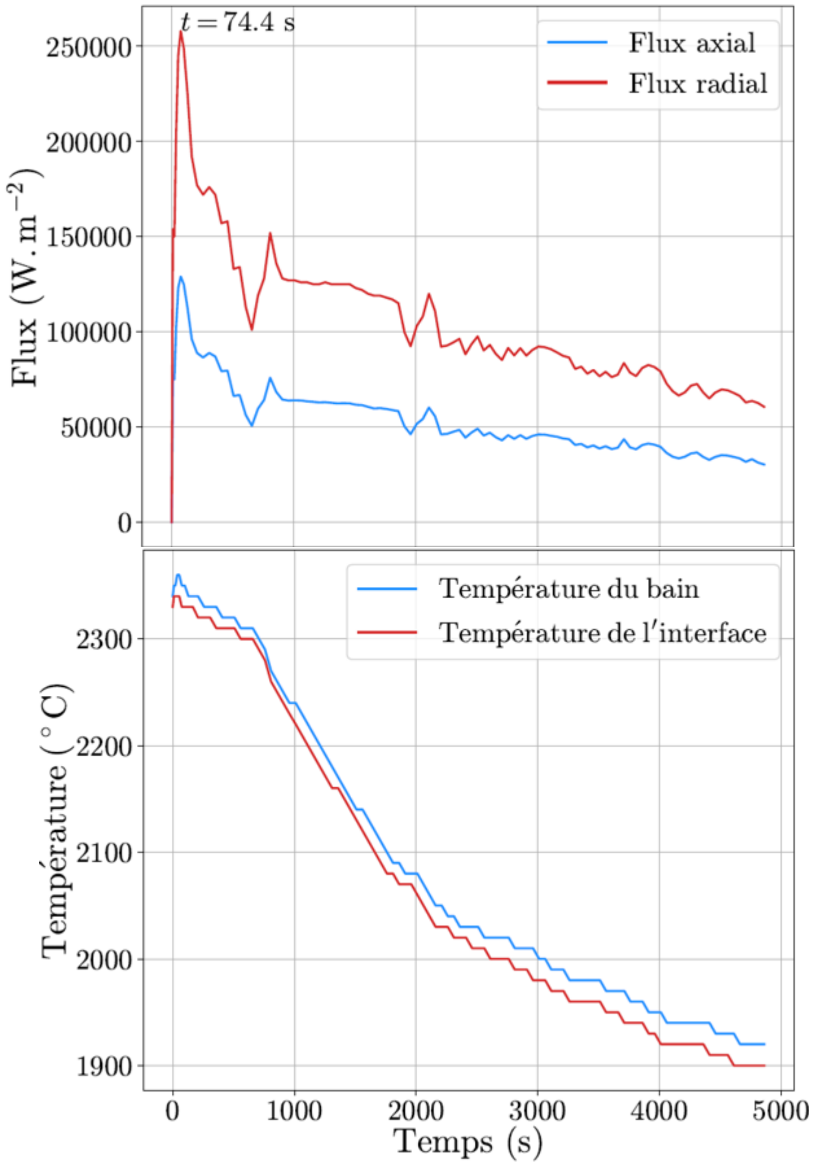


Données

- Propriétés matérielles :
  - $\rho, c_p(T), \lambda(T)$ → fournies
  - enthalpie d'ablation h_{abla} → fourni
  - Mécanique → Eurocode 2 – Calcul du comportement au feu

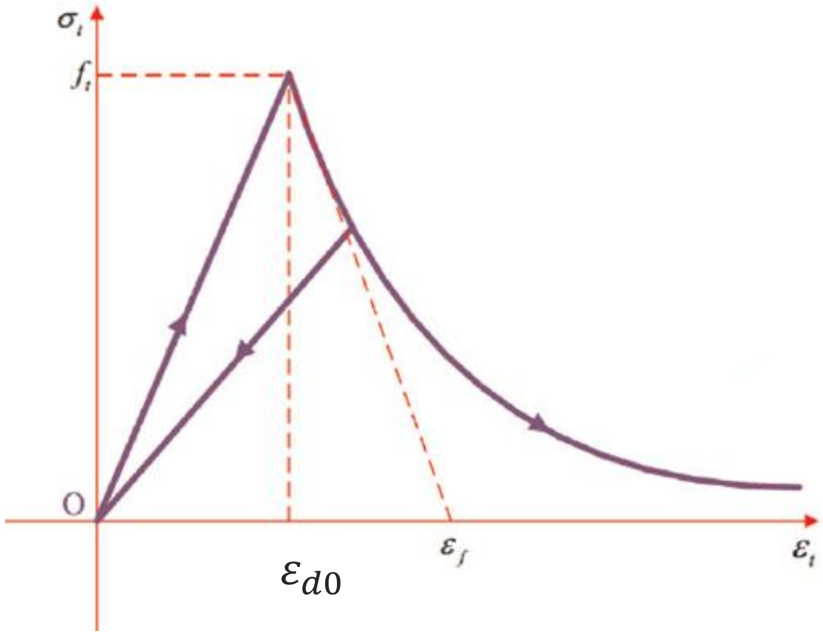
- Répartition des enthalpies de changement d'état / transformation chimique :
  - $c_p^*(T) \coloneqq c_p(T) + \frac{1}{T_{abla}-T_{ini}}\left(h_{abla} - \int_{T_{ini}}^{T_{abla}} c_p(\theta)d\theta\right)$

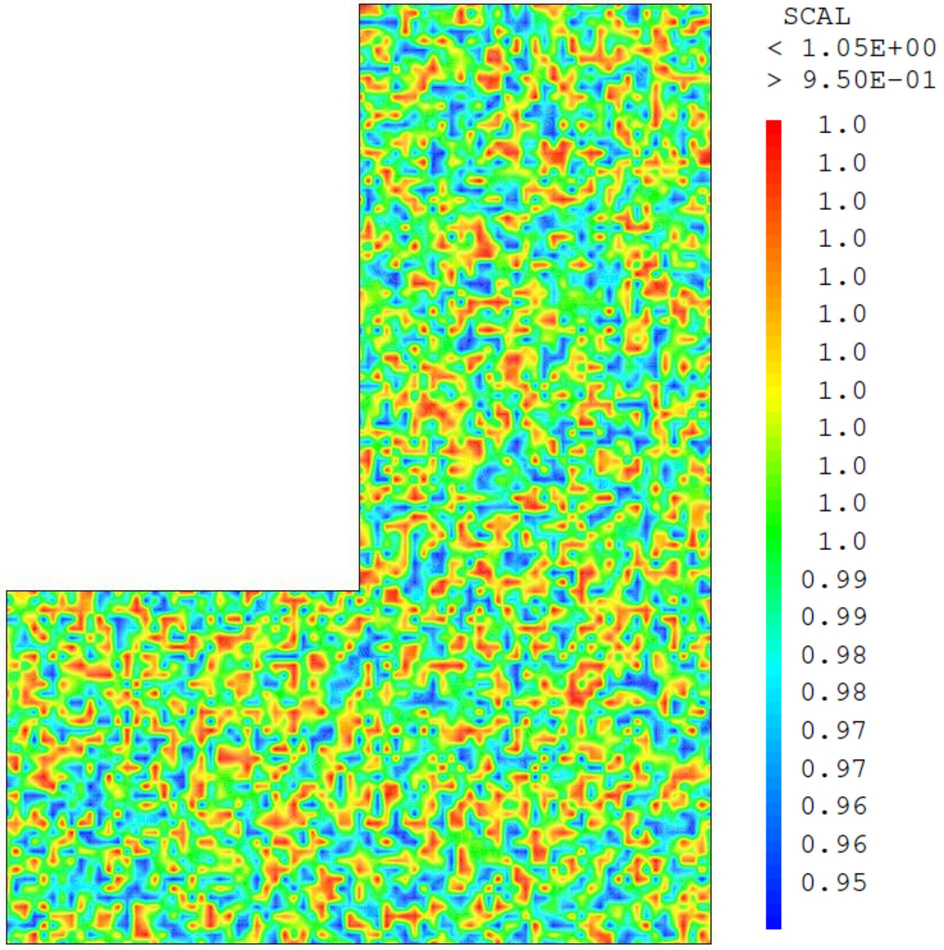
- Chargement :
  - Flux à l'interface corium-béton



Hétérogénéité du béton

- Objectif : vérification de la convergence du calcul malgré l'hétérogénéité
- Multiplication de ε_{d0} par un champ de bruit blanc non corrélé





$\varepsilon_{d0}/\varepsilon_{d0,ref}$

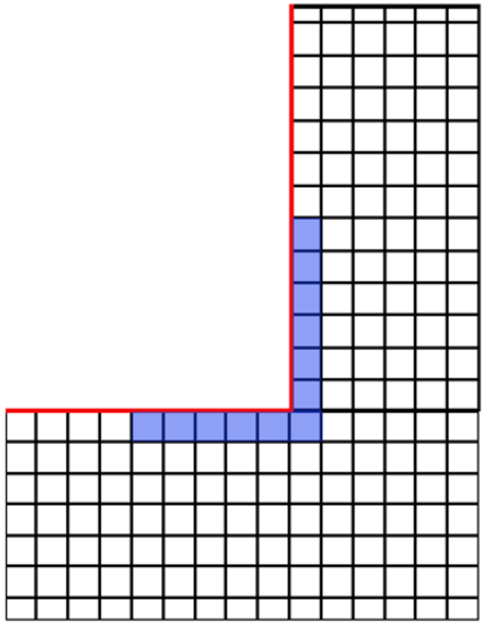
Fusion du béton

- Chargement thermique sévère conduit à l'ablation du béton

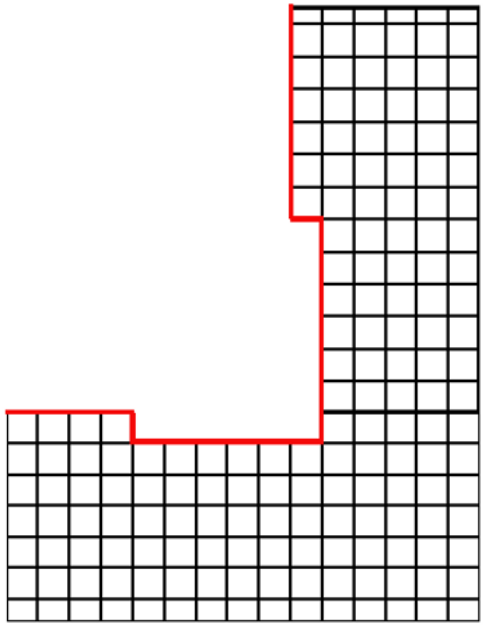
- Critère thermique pour retirer le béton ablaté :
  - Enthalpie massique

$$\frac{1}{V}\int_{élement}\left(\int_{T_{ini}}^{T(\underline{x})} c_p^*(\theta)d\theta\right)dV > 2.7\ \mathrm{MJ.kg^{-1}}$$

- Mise-à-jour des conditions limites :
  - Détecter la nouvelle zone d'ICB
  - Redéfinir les conditions limites



Détection des éléments atteignant le critère à la fin du calcul à t



Maillage à $t + \Delta t$

Déroulé d'un pas de temps avec PASAPAS

Calcul de la température

Procédure d'érosion thermique

- Critère thermique
- Réduction des maillages thermique et mécanique

Calcul mécanique

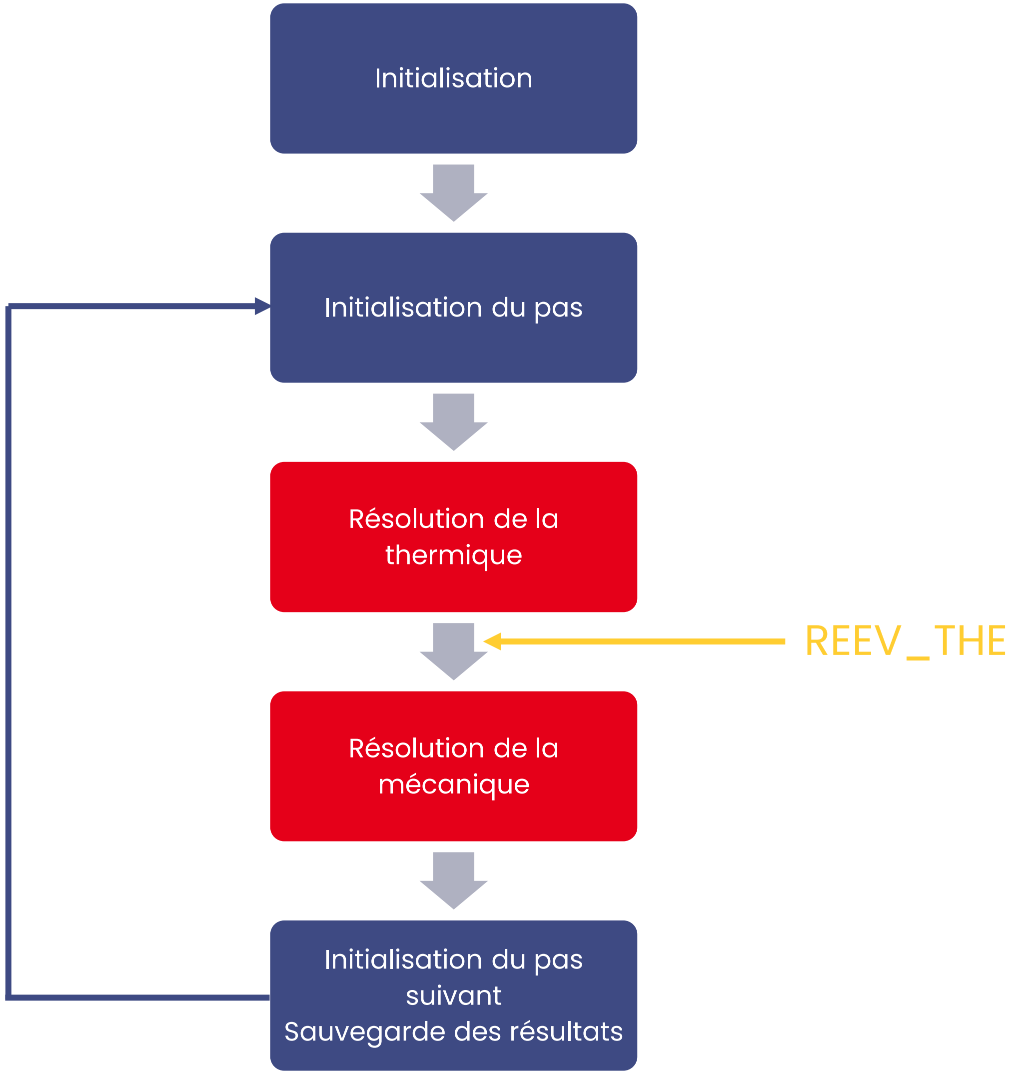
- Endommagement : Mazars

Pas suivant

Non utilisé mais possible avec PASAPAS

2. Mise en place dans Cast3M de ce modèle

Implémentation numérique dans la procédure PASAPAS



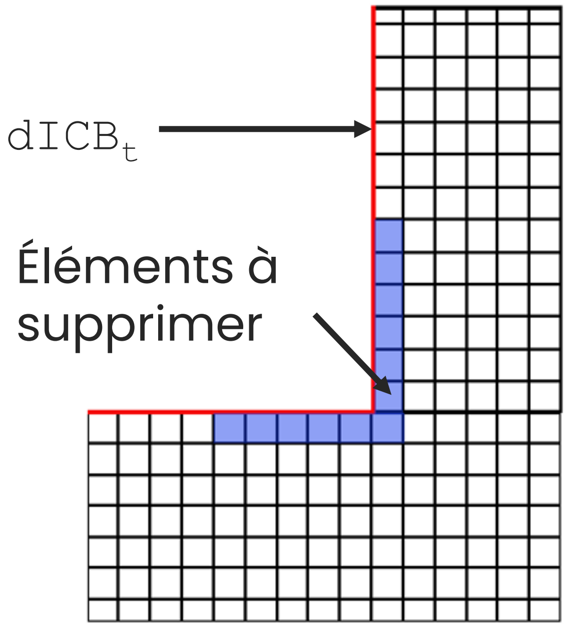
Calcul des critères d'érosion → REEV_THE

- Enthalpie massique :
  - $\frac{1}{V}\int_{élément}\left(\int_{T_{ini}}^{T(\underline{x})} c_p^*(\theta)d\theta\right)dV > 2.7\ \mathrm{MJ.kg^{-1}}$
  - $\int_{T_{ini}}^{T} c_p^*(\theta)d\theta$: INTG 'BORN', EVOL
  - $T(\underline{x}) \to \int_{T_{ini}}^{T(\underline{x})} c_p^*(\theta)d\theta$: VARI
  - INTG 'ELEM', CHAN, MANU

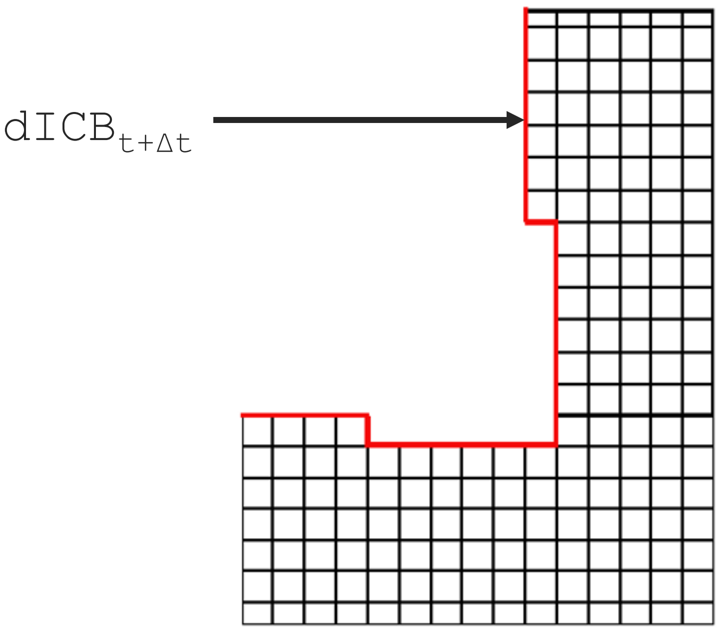
- Nouveau maillage :
  - Champ_enthalpie_massique ELEM 'INFERIEUR' 2.7E6;

- Réduction des modèles thermique et mécanique :
  - REDU Ancien_modele Nouveau_maillage;

Mise à jour des conditions limites → `REEV_THE`



Détection des éléments atteignant le critère à la fin du calcul à t



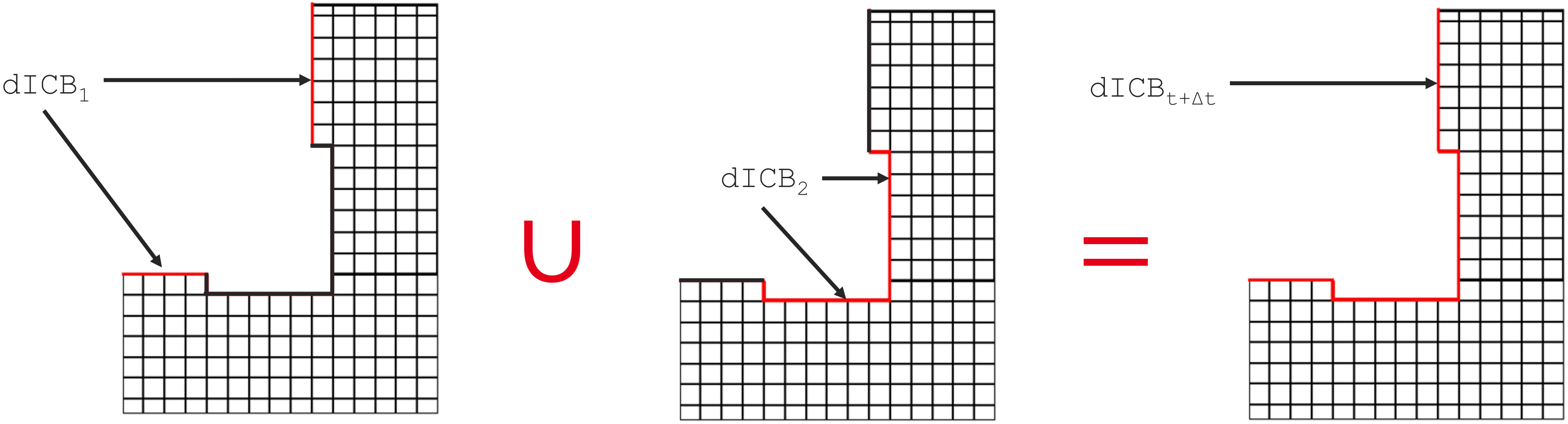
Maillage à $t + \Delta t$

Mise à jour des conditions limites → REEV_THE

dICB1 = $dICB_t$ INTE $dOmega_{t+\Delta t}$;

dICB2 = dElem_suppr INTE $dOmega_{t+\Delta t}$;

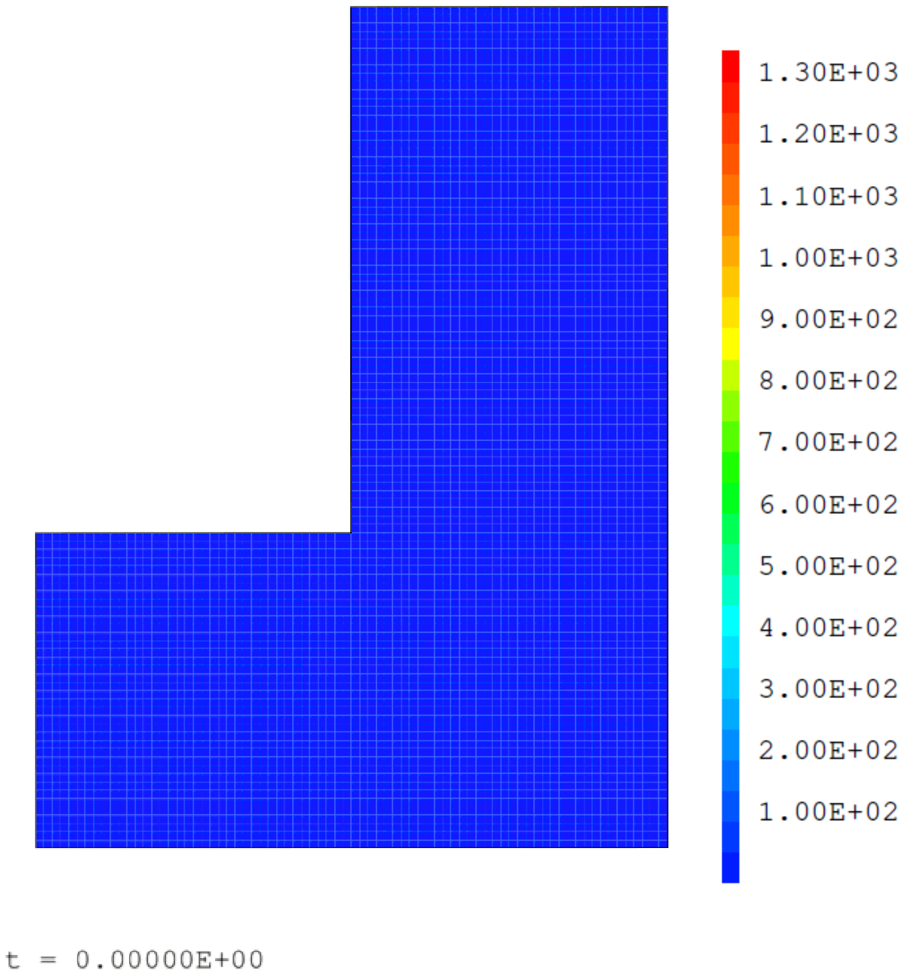
$dICB_{t+\Delta t}$ = dICB1 ET dICB2;



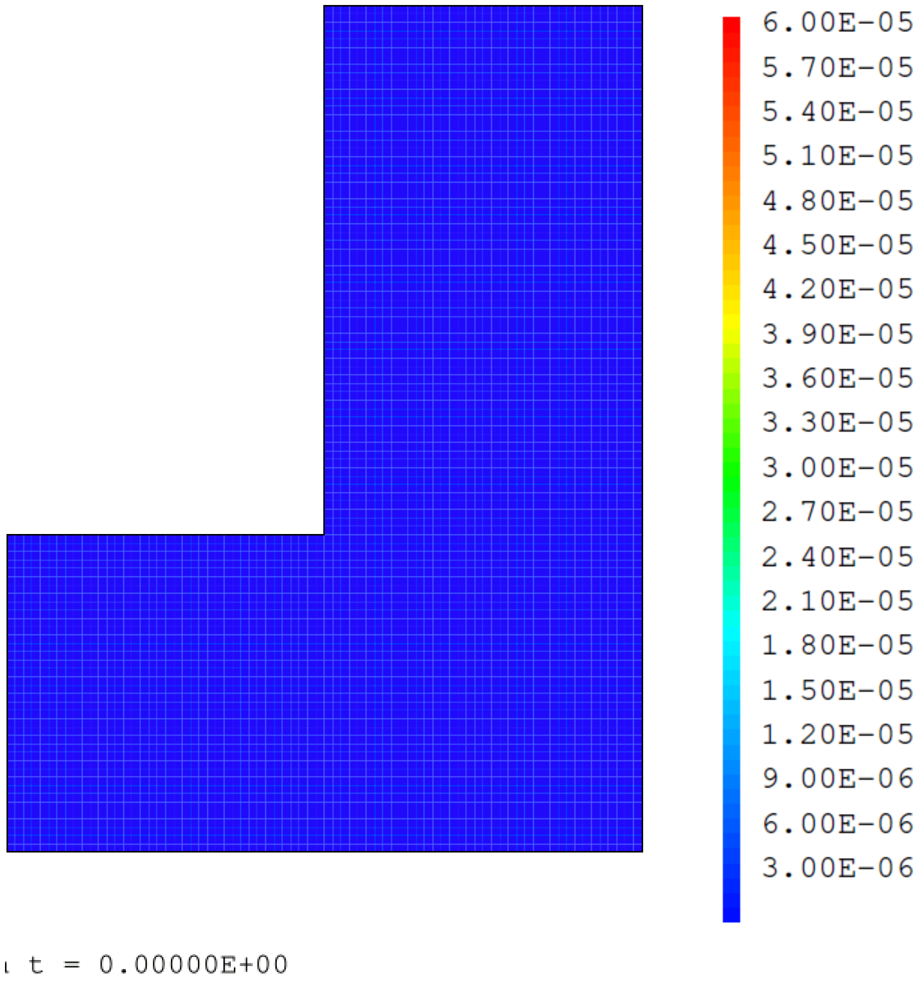
Maillage à $t + \Delta t$ Maillage à $t + \Delta t$ Maillage à $t + \Delta t$

3. Résultats

Température et ouverture de fissure



Température (°C)



Ouverture de fissure (m)

Bilan énergétique

Vérifier la conservation de l'énergie :

$$R_1 = \frac{E_{apportee\ par\ le\ corium} - (E_{elements\ supprimes} + E_{interne} + E_{perdue\ aux\ CL})}{E_{apportee\ par\ le\ corium}} = 0{,}9\ \%$$

$$R_2 = \frac{E_{elements\ supprimes} \quad - E_{ablater\ les\ elements\ supprimes}}{E_{ablater\ les\ elements\ supprimes}} = 0{,}9\ \%$$

4. Comparaison avec l'expérience

Volume ablaté

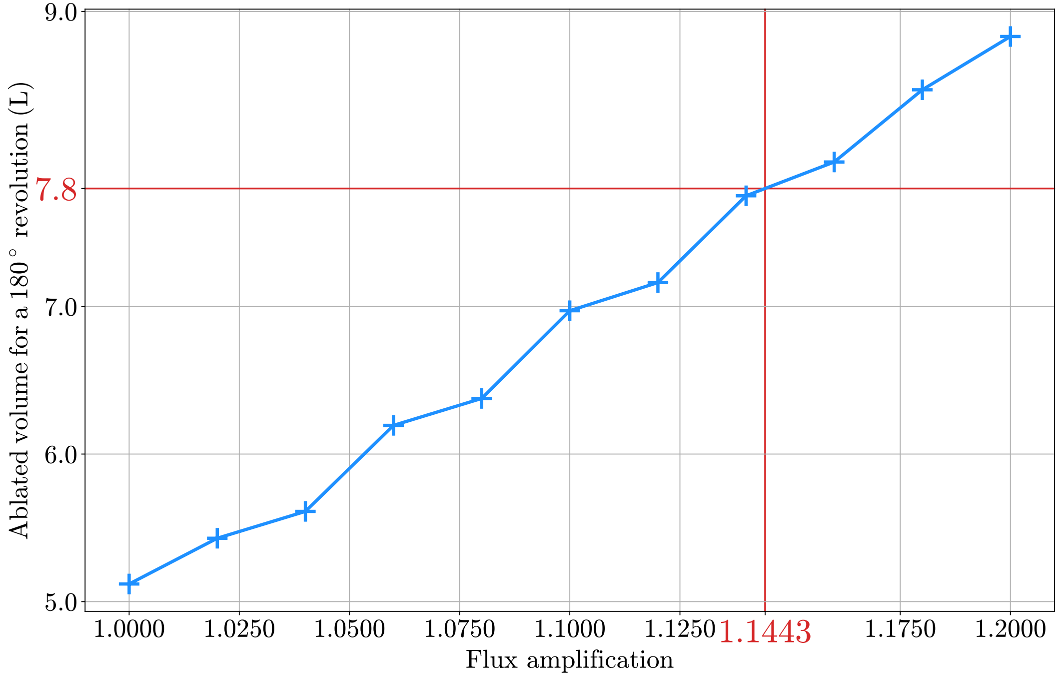
Volume ablaté expérimental : 7,8 L

Volume initialement ablaté (180 °) : 5,3 L

Recalage en augmentant le flux de chaleur

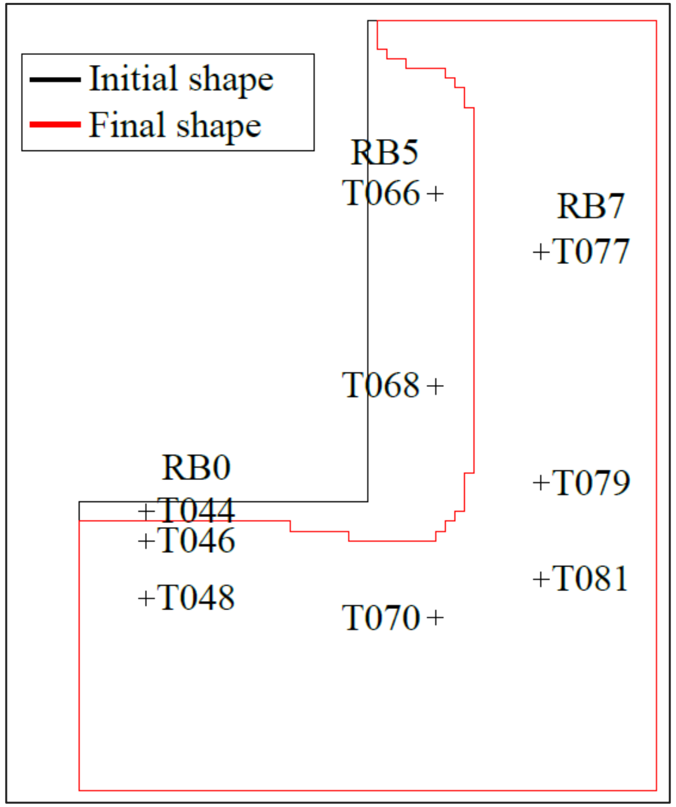
Amplification du flux de chaleur apporté par le corium de 14 %

Nouveau volume ablaté : 7,8 L

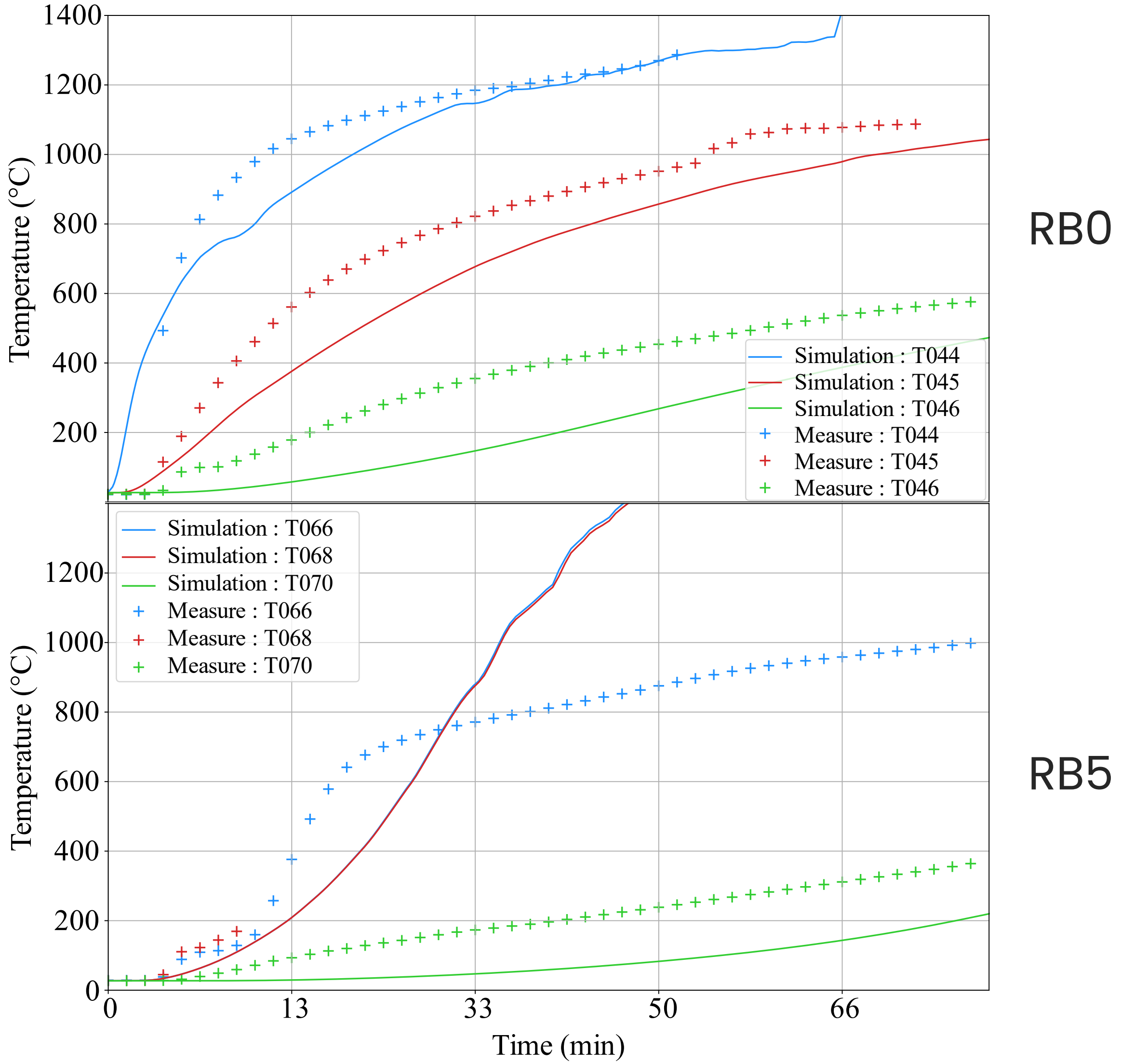


Volume ablaté calculé pour différentes amplifications du chargement

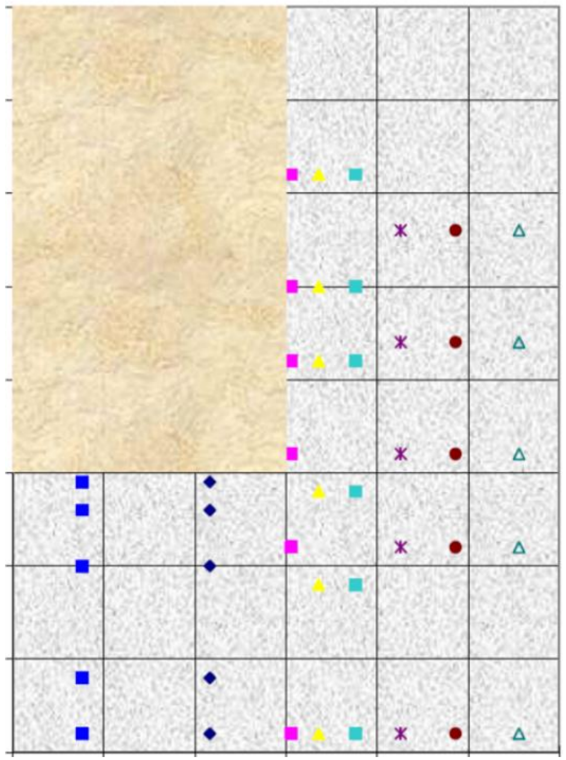
Comparaison avec les températures mesurées



Positions des thermocouples

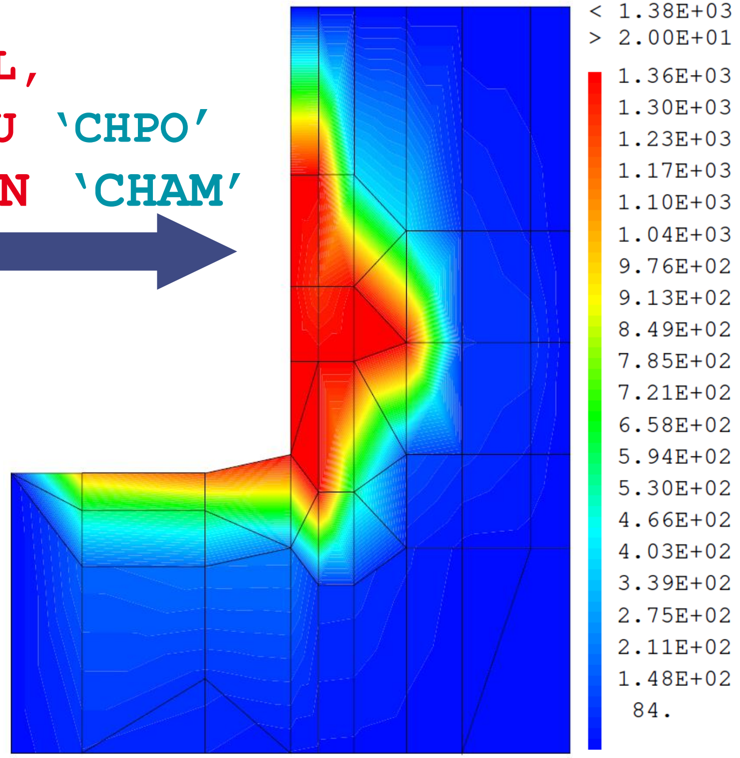


Utilisation des températures mesurées comme données d'entrées du calcul mécanique

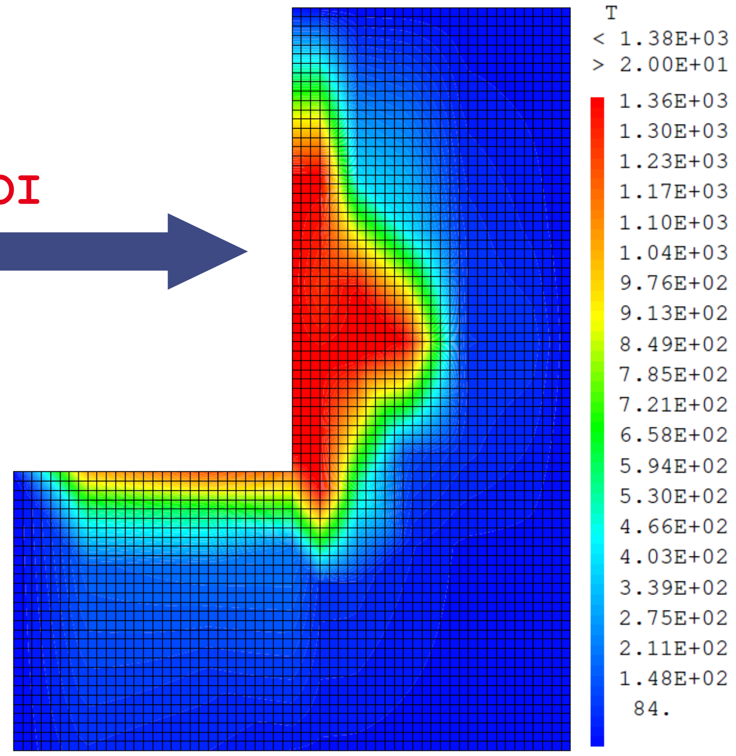


Positions des thermocouples

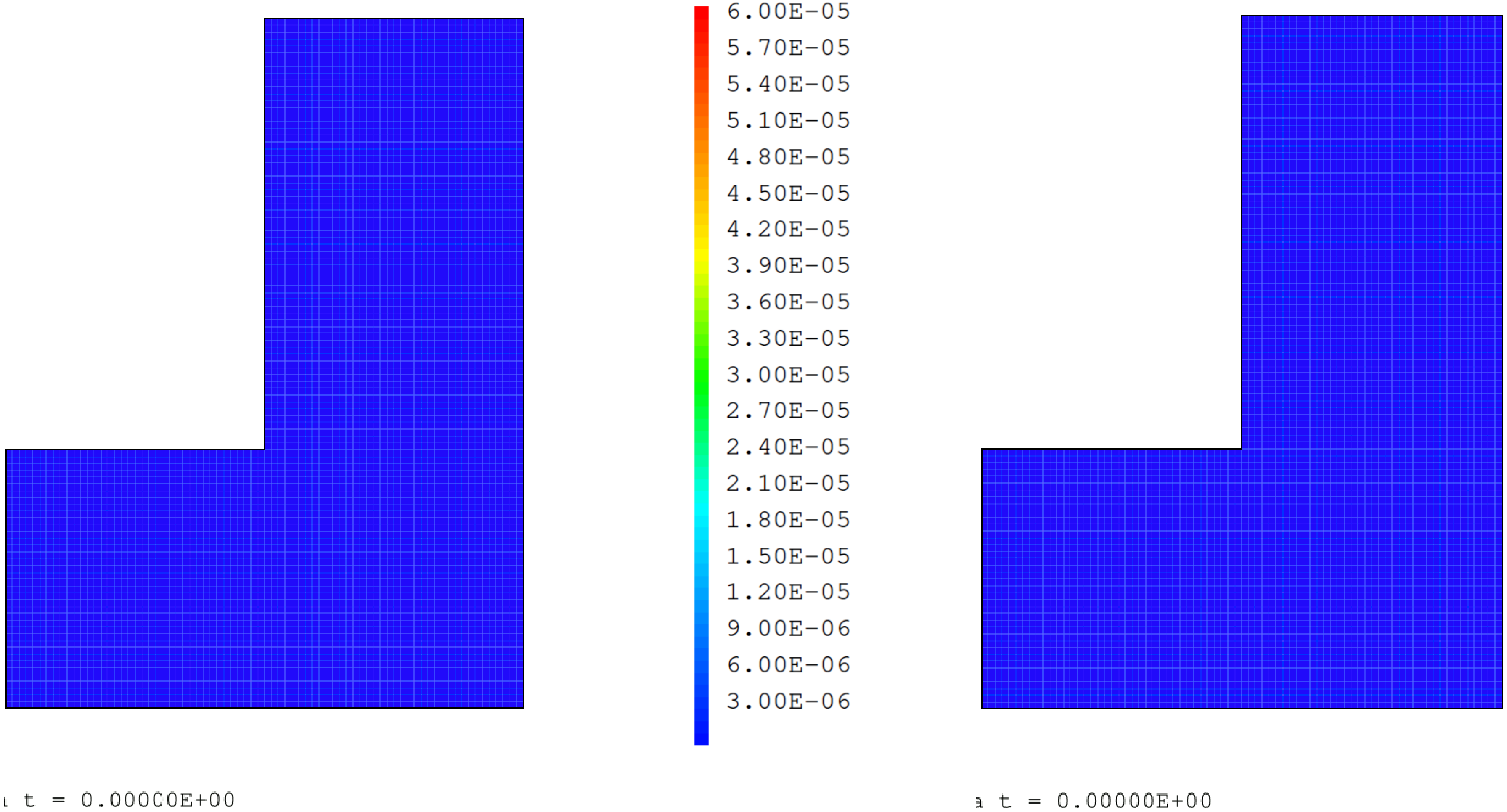
IPOL,
MANU 'CHPO'
CHAN 'CHAM'



PROI



Comparaison de l'ouverture de fissure obtenue avec la température simulée ou mesurée



Avec la température calculée

Avec la température mesurée

5. Conclusions et perspectives

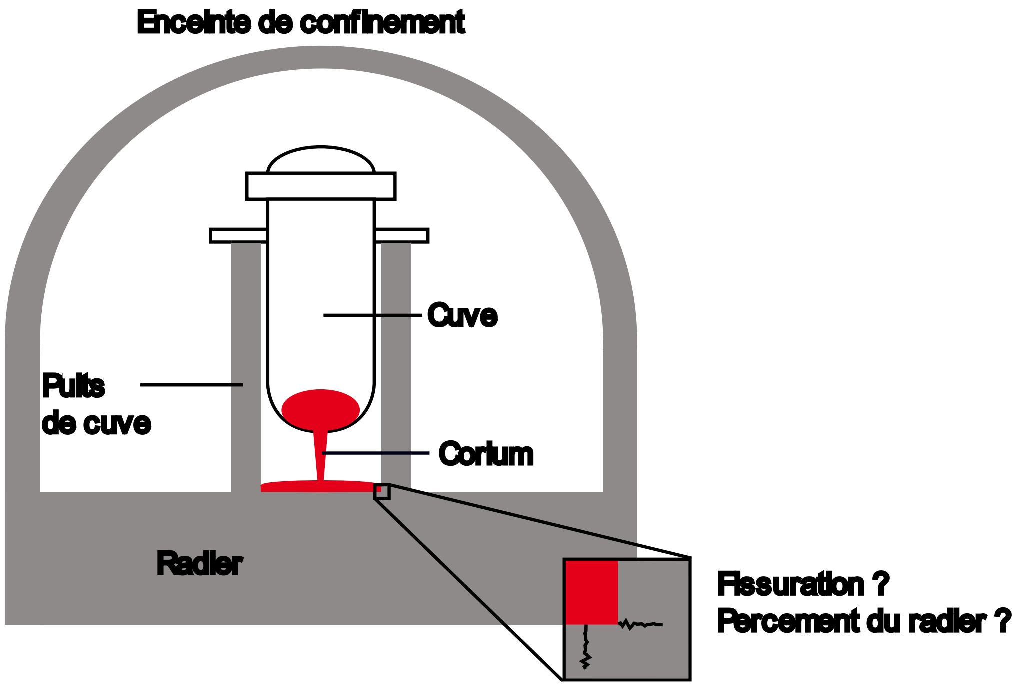
Conclusions et perspectives

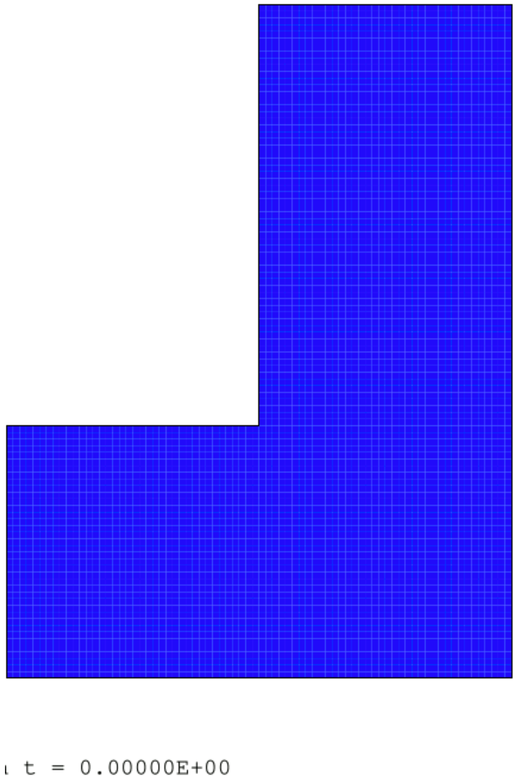
- Conclusions
  - Développement d'une méthode mettant en évidence des macro-fissures dans le cadre de l'ICB
  - Faisabilité de la simulation avec Cast3M
  - Développement d'un critère d'érosion énergétique
  - Limitation de la dépendance au maillage
  - Bilan énergétique respecté

- Perspectives
  - Thermique :
    - Flux non uniforme
    - Changements de phase
  - Mécanique :
    - Modèle plus représentatif
    - Optimisation pour un calcul 3D
    - Armatures en acier
  - Multiphysique :
    - Couplage mécanique ↔ thermique
    - Couplage avec code CFD

Merci

CEA SACLAY
91191 Gif-sur-Yvette Cedex
France
Clement.pionneau@cea.fr
Standard. + 33 1 69 08 60 00





6. Annexes

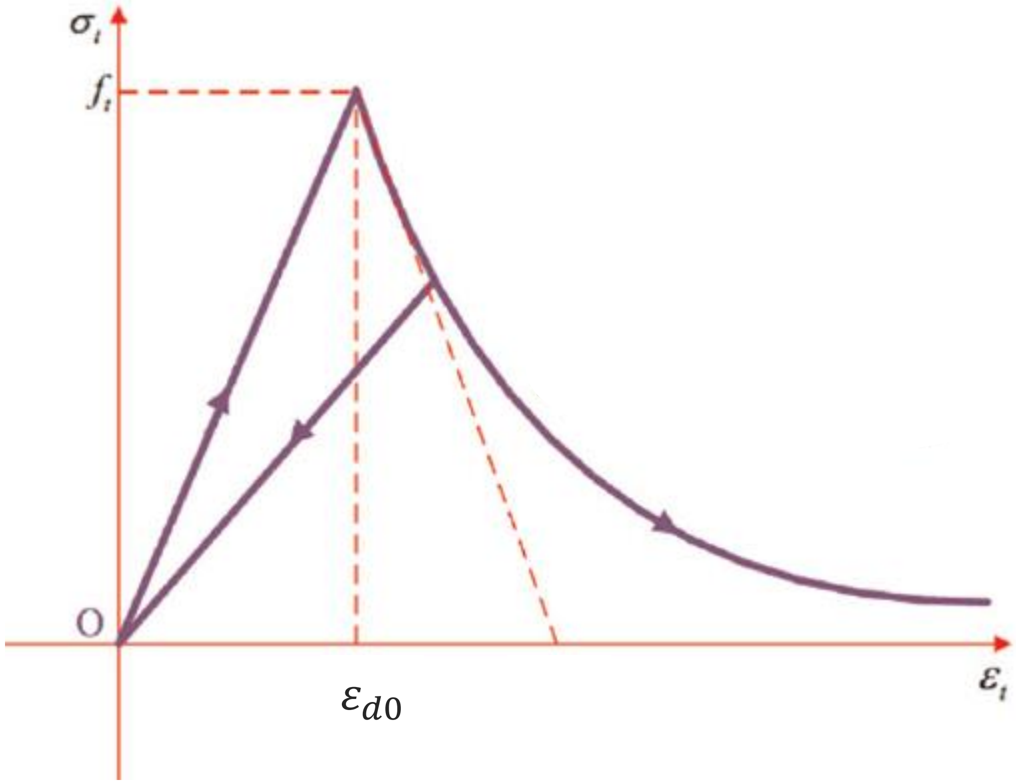
Ouverture de fissure

- Ouverture de fissure :
  - $\underline{u} = \underline{u}_e + \underline{u}_{ouv}$
  - $\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}_e + \underline{\underline{\varepsilon}}_{ouv}$
  - Mazars : $\underline{\underline{\varepsilon}}_{ouv} = d(\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\varepsilon}}_{th})$
  - Ouverture dans la direction $\underline{n}$:

$$\delta_n = \frac{1}{A} \int_{élément} \underline{n} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}_{ouv} \cdot \underline{n} \, dV$$

Le modèle de Mazars

- Modèle de Mazars régularisé en traction :
  - $\underline{\underline{\sigma}} = (1-\mathrm{d})\mathbf{C} : \underline{\underline{\varepsilon}}\ , d \in [0,1]$
  - $d = \alpha_t^{\beta} d_t(\varepsilon_{eq}) + \alpha_c^{\beta} d_c(\varepsilon_{eq})$
    $$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\langle\varepsilon_1\rangle_+^2 + \langle\varepsilon_2\rangle_+^2 + \langle\varepsilon_3\rangle_+^2}$$
  - $d \nearrow$ si $\varepsilon_{eq} > \kappa(d)$
    $$\kappa(0) = \varepsilon_{d0} = f_t/E$$
  - $d_c = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}}{\varepsilon_{eq}}(1-A_c) - A_c \exp\left(-B_c\left(\varepsilon_{eq} - \varepsilon_{d0}\right)\right)$
  - $d_t =$
    $$\begin{cases} 1 - \frac{\varepsilon_{d0}}{\varepsilon_{eq}}(1-A_t) - A_t \exp\left(-B_t\left(\varepsilon_{eq} - \varepsilon_{d0}\right)\right) & \text{sans régularisation} \\ 1 - \frac{\varepsilon_{d0}}{\varepsilon_{eq}} \exp\left(-B_t\left(\varepsilon_{eq} - \varepsilon_{d0}\right)\right) & \text{avec régularisation} \end{cases}$$
  - $\alpha_t = \frac{1}{\varepsilon_{eq}^2} \varepsilon_{ti} \langle\varepsilon_i\rangle_+$
  - $\varepsilon_{ti} = \frac{1+\nu}{E} \langle\bar{\sigma}_i\rangle_+ - \frac{\nu}{E} \sum_{j=1}^{3} \langle\bar{\sigma}_j\rangle_+$



Essai de traction uniaxiale

Source : [An effective model for analysis of reinforced concrete members and structures under blast loading]

Régularisation en traction

- Objectif : rendre constante l'énergie dissipée par la fissuration
  - Lois de la thermodynamique en quasi statique pour un système fermé isotherme :

$$\dot{U} = P_{ext} + P_{cal} \text{ et } \dot{S} = \frac{P_{cal}}{T} + P_s$$
$$TP_s = P_{ext} - \left(\dot{U} - T\dot{S}\right) = \mathrm{P_{ext}} - \dot{\Psi}$$

  - Energie dissipée si les appuis sont parfaits :

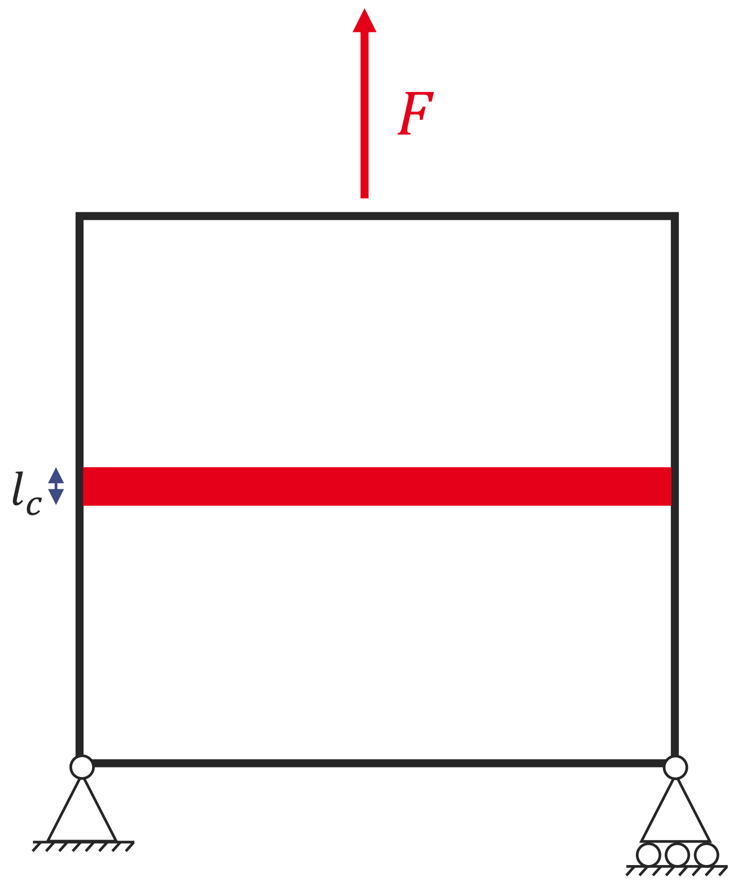
$$E_d = TP_s = \int_0^{\infty} F(u)du - 0$$

  - Localisation de l'endommagement dans une bande d'élément :

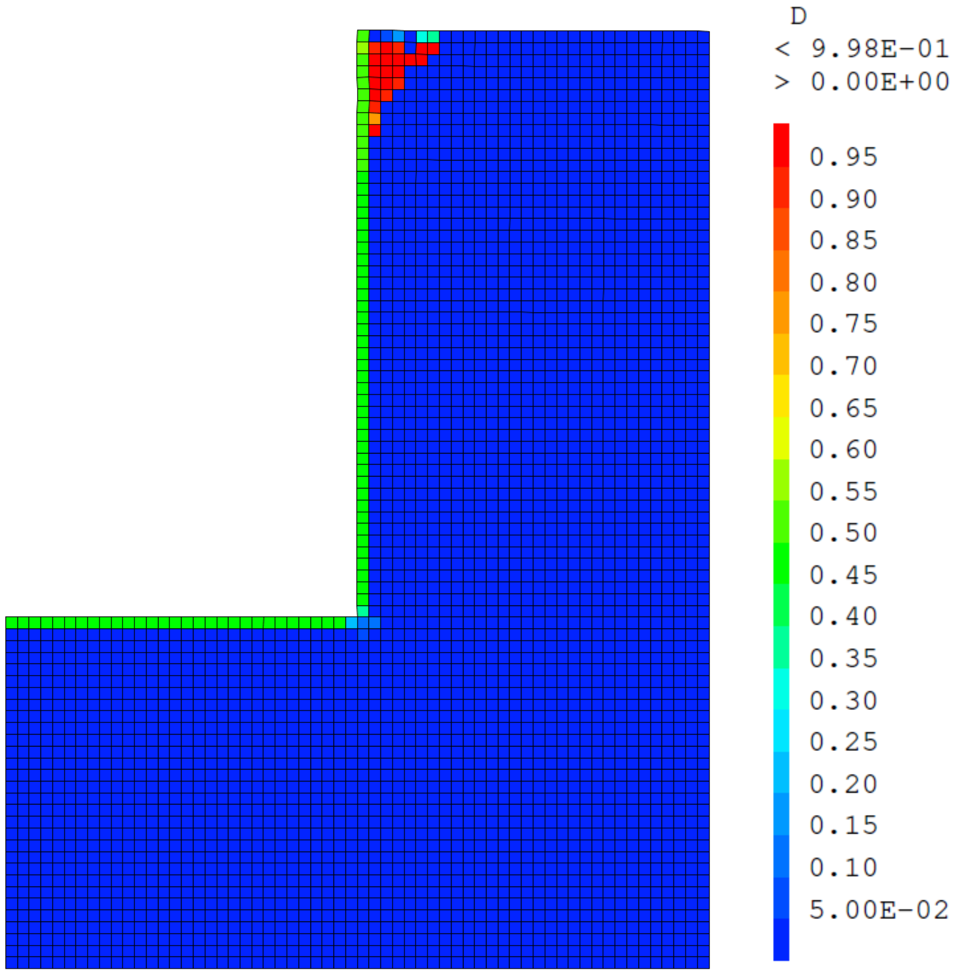
$$E_d = l_c \cdot S \int_0^{\infty} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon$$

  - Condition : énergie dissipée indépendante de l_c et égale à $G_{ft}S$ (G_{ft} : taux de relaxation de l'énergie) :

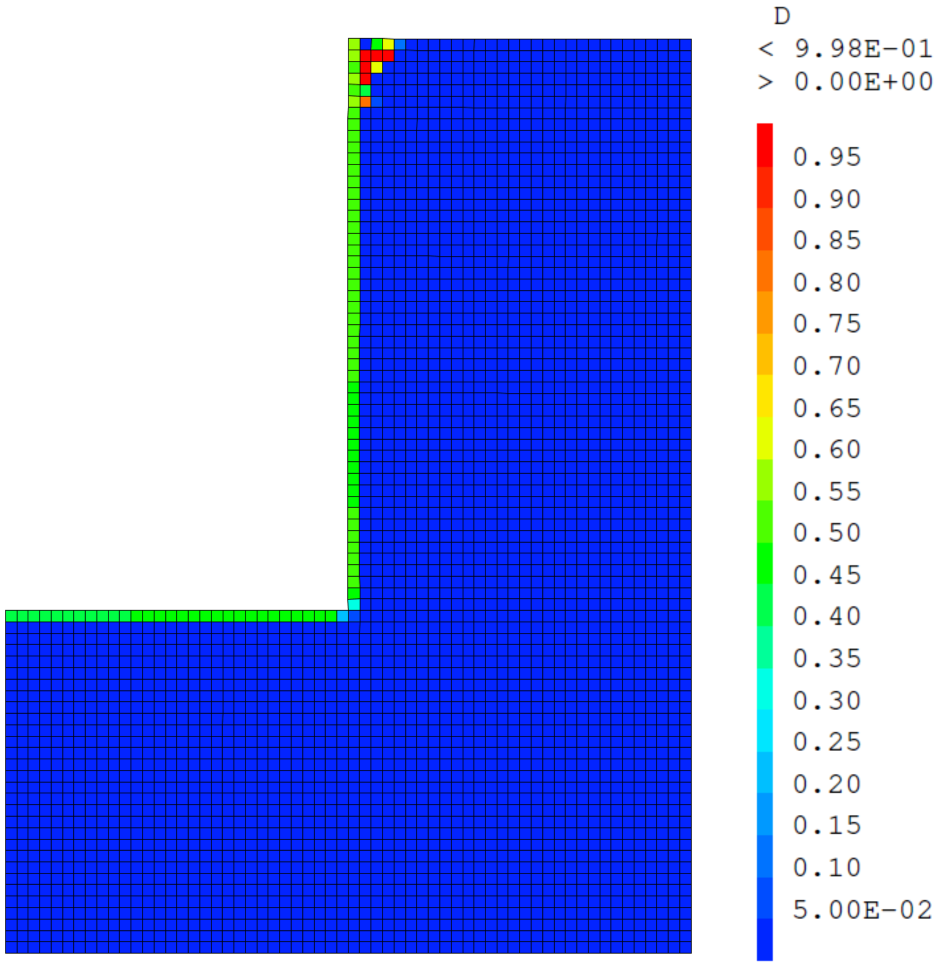
$$E_d = G_{ft}S \Rightarrow B_t = \frac{f_t l_c}{G_{ft} - \frac{1}{2}E\varepsilon_{d0}^2 l_c}$$



Régularisation en traction



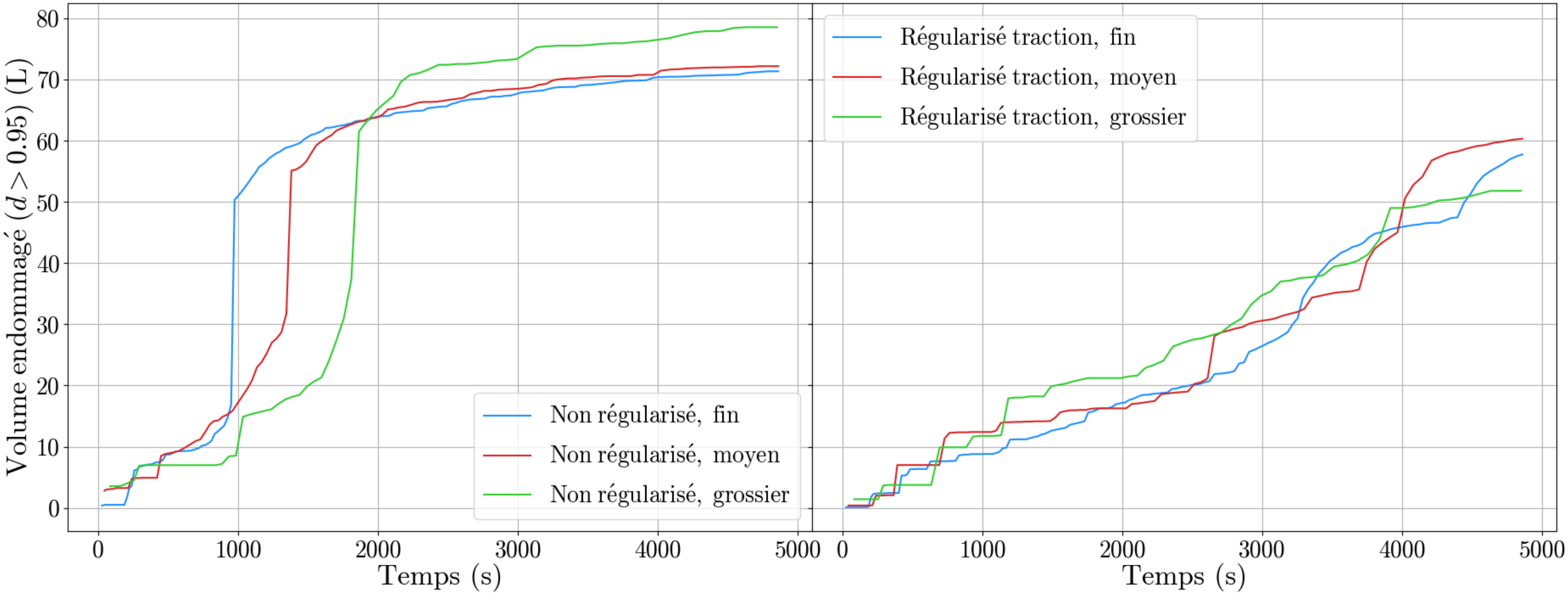
Sans régularisation



Avec régularisation

Régularisation en traction

Volume des éléments endommagés



Reconstruction du champs de température à partir des mesures

Mesures pour chaque capteur : `EVOL 'MANU' liste_temps liste_temperatures_capteur_i ;`

Conversion maillage en liste de points : `CHAN 'POI1' maillage ;`

Création d'une liste contenant le température au temps t associée à chaque point : `PROG`, `INSE`, `IPOL`

Création du champ par point : `MANU 'CHPO' liste_points liste_temperatures_t ;`

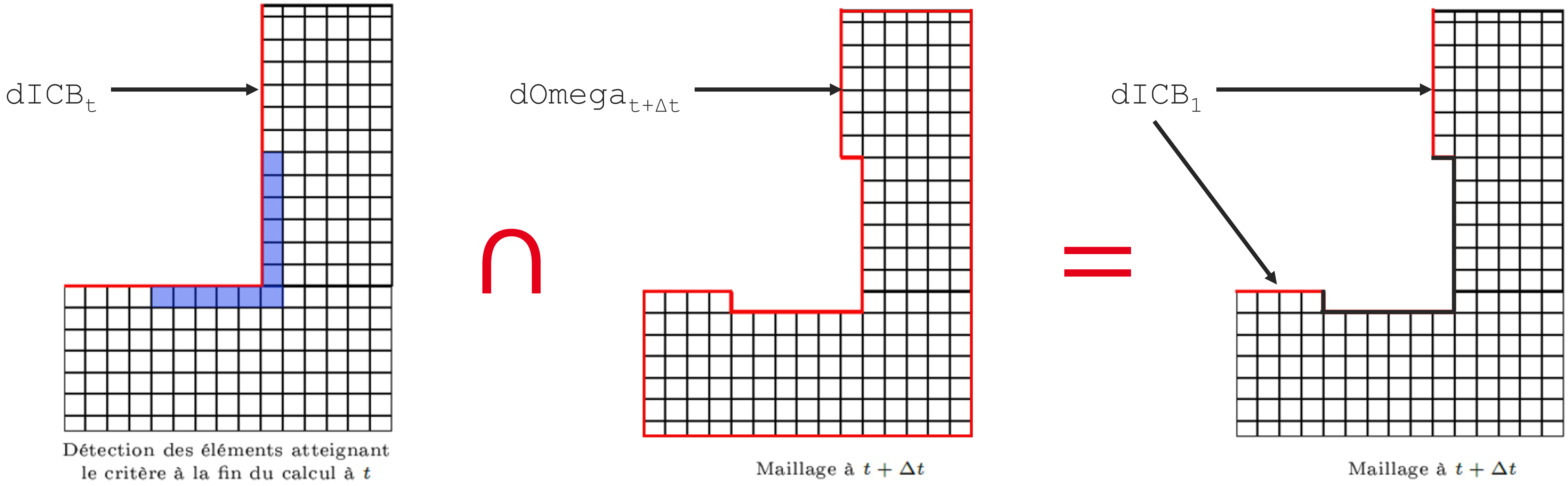
Conversion en champ par éléments : `CHAN 'CHAM' … ;`

Projection de ce champ sur le maillage mécanique : `PROI`

Mise à jour des conditions limites → REEV_THE

```
dICB1 = dICBt INTE dOmegat+Δt;
```

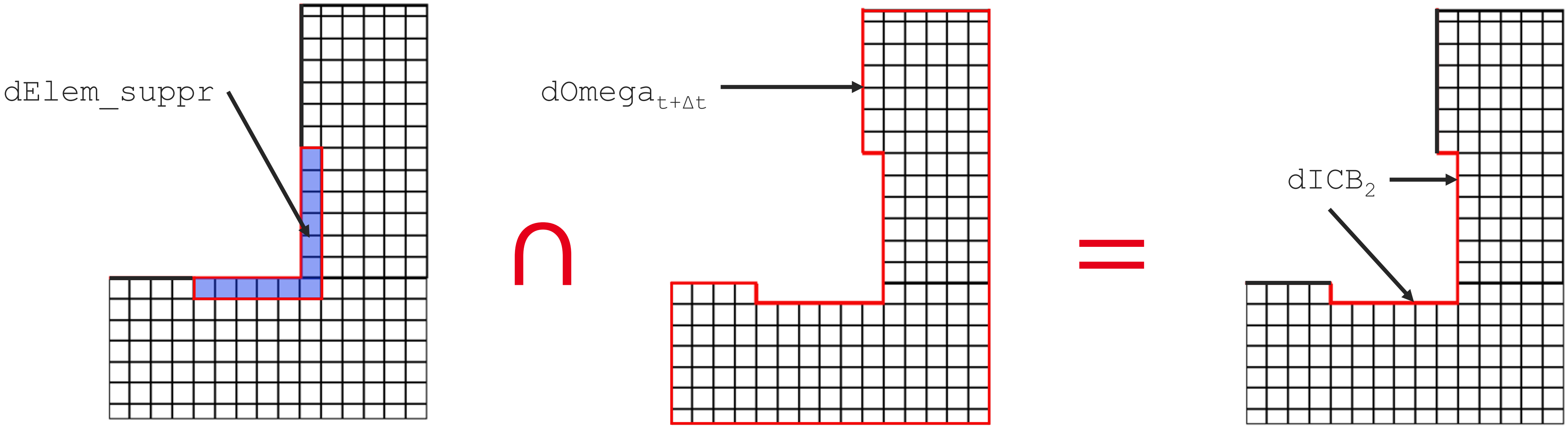
$dICB1 = dICB_t$ INTE $dOmega_{t+\Delta t}$;



Mise à jour des conditions limites → REEV_THE

dICB1 = dICB$_t$ INTE dOmega$_{t+\Delta t}$;

dICB2 = dElem_suppr INTE dOmega$_{t+\Delta t}$;



Détection des éléments atteignant le critère à la fin du calcul à t

Maillage à $t + \Delta t$

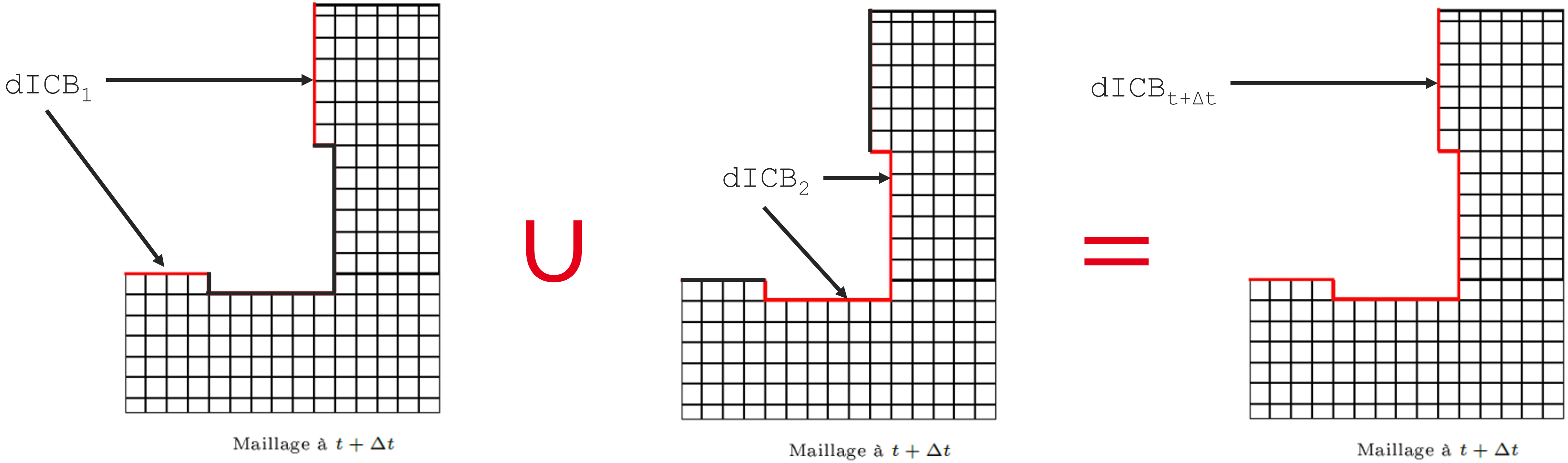
Maillage à $t + \Delta t$

Mise à jour des conditions limites → REEV_THE

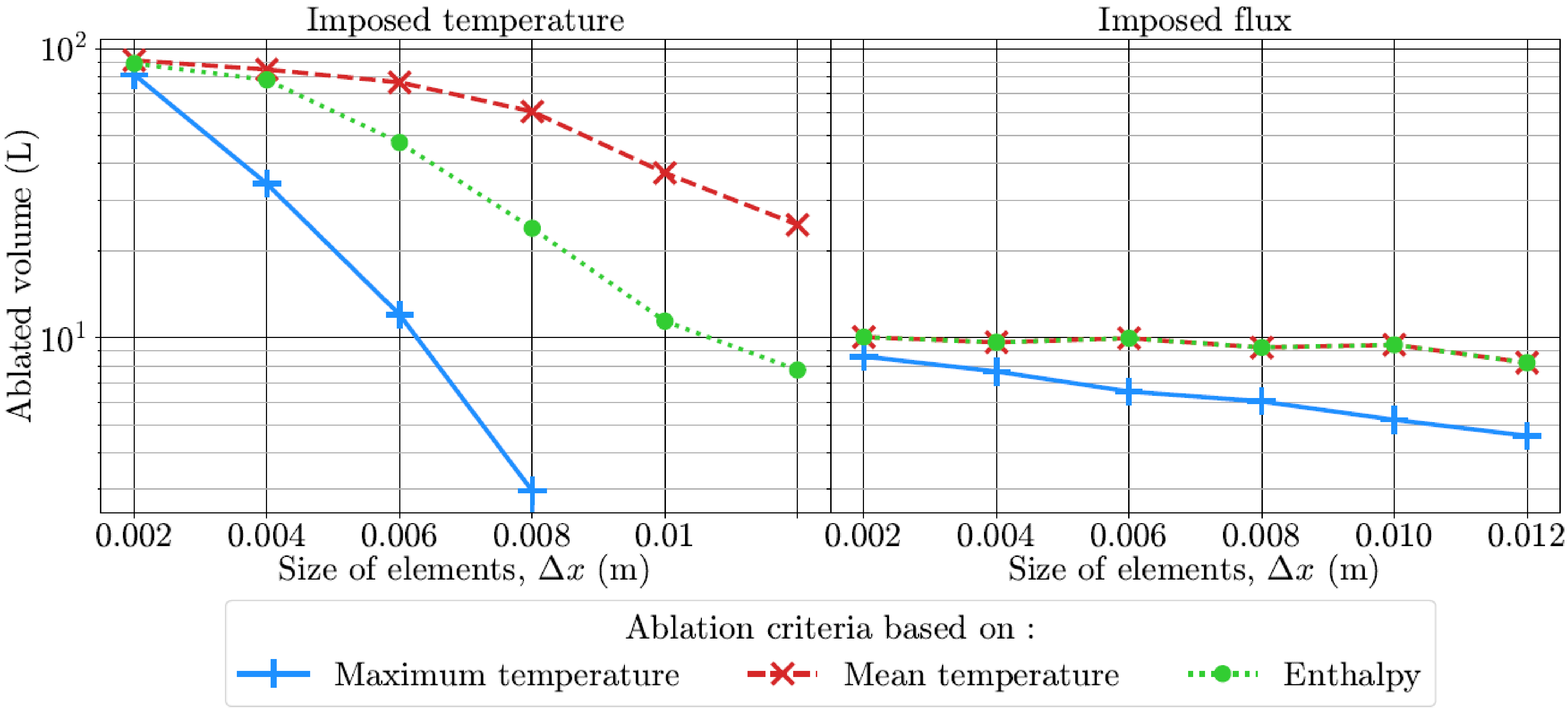
dICB1 = dICB$_{t}$ INTE dOmega$_{t+\Delta t}$;

dICB2 = dElem_suppr INTE dOmega$_{t+\Delta t}$;

dICB$_{t+\Delta t}$ = dICB1 ET dICB2;



Dépendance au maillage



Effet du pas de temps