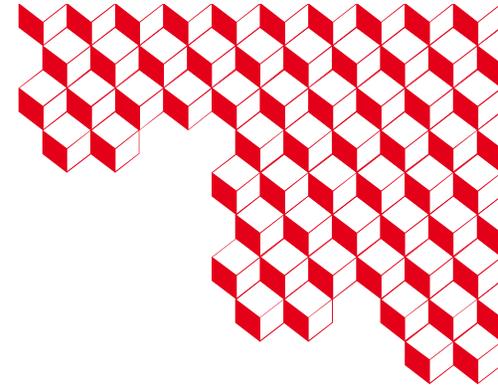




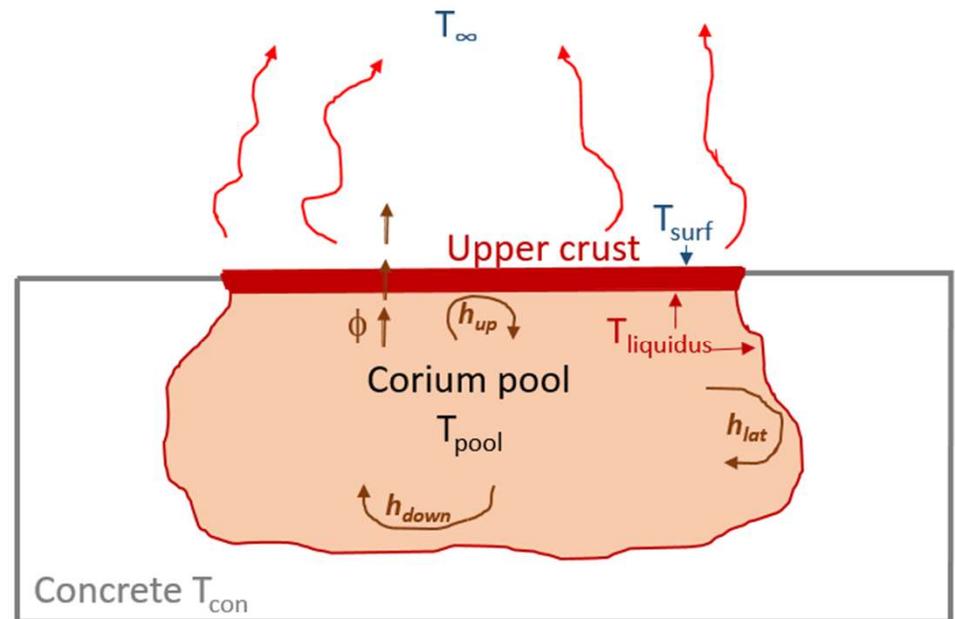
iresne



Problèmes aux interfaces pour la problématique de l'Interaction Corium Béton

R. Chauvin & N Seiler
CEA/DES/IRESNE

GdR TRANSINTER 2023



Exposé

1. Problématique Interaction Corium Béton

→ Deux types d'interfaces complexes

2. Interface Corium / Béton

- Problématique
- R&D au CEA

3. Interface Supérieure – avec ou sans renoyage

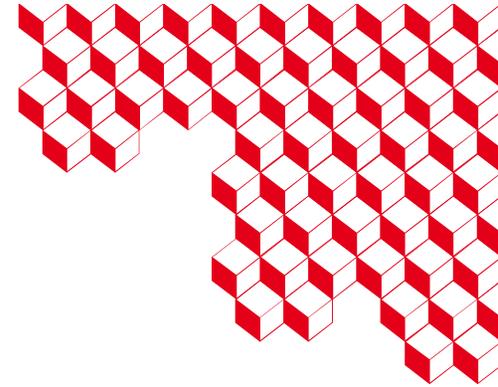
- Problématique
- R&D au CEA

4. Conclusion





iresne



Problématique Interaction Corium Béton & Interface

Contexte :

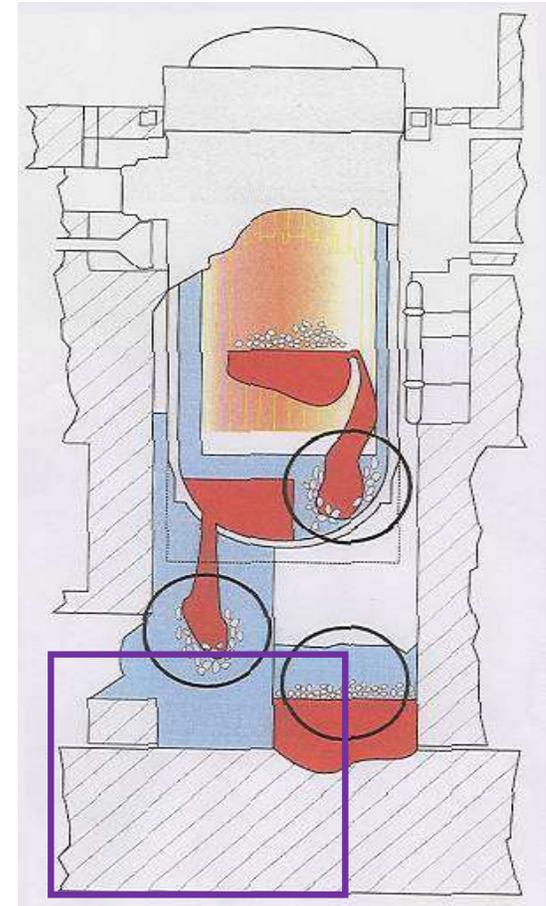
Interaction Corium Béton – en cas de rupture de la cuve

Caractéristiques :

- Phase oxyde & Phase métallique non miscibles (bain homogène ou stratifié)
- Puissance résiduelle ~ MW- 20MW
- ~40 - 120 tonnes
- Surface 100 m², hauteur 30 cm
- T ~ 2000K
- Différents types de béton selon les centrales (siliceux, silico-calcaire, calcaire)
- Dégazage du béton lors de l'ablation
- Vitesse d'ablation (~cm/h)
- Fonte : *béton-1200K, ... UO₂-ZrO₂, CaO– 2800K*



Schéma d'un accident grave avec percement de la cuve



Thématique qui soulève encore beaucoup de questions

- Prolongement de vie de Parc,
- Durée d'interaction longue → Fukushima (10 jours sans renoyage, puis renoyage eau de mer),
- ...

Fukushima unit 1—Cibula et al., FDR 2022

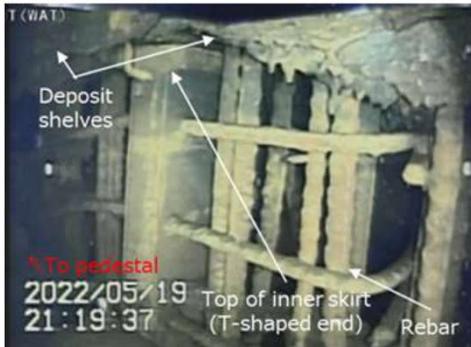
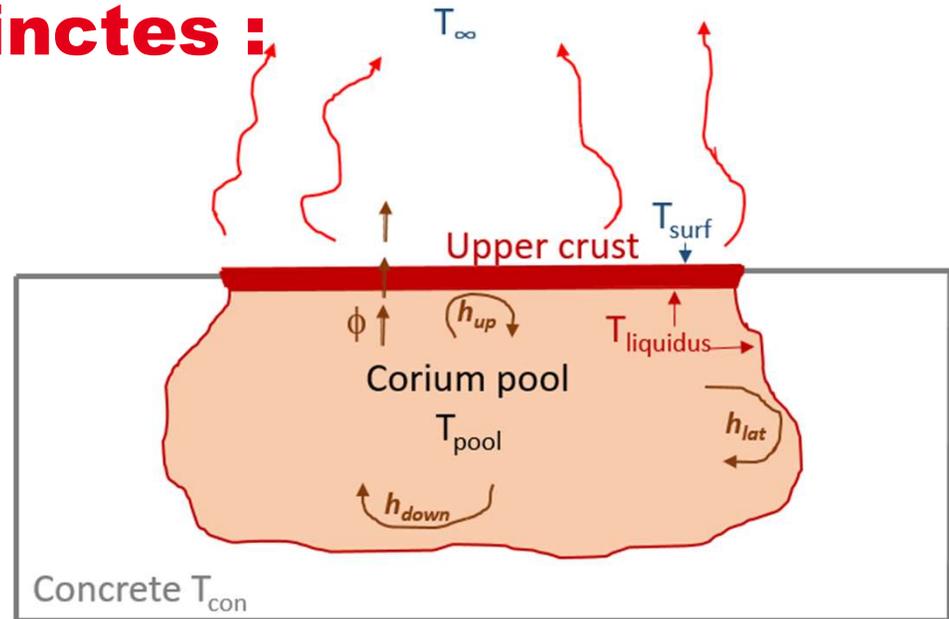


Fig. 6 Degradation of concrete in the vicinity of the pedestal opening (right wall of the opening)

2 Interfaces bien distinctes :



Essais VULCANO – CEA – Ch
Journeau et al.



- **Interface corium / béton**: ablation, possible coûte instable, de composition évoluant avec l'incorporation du béton. **Siège de transfert de chaleur, de masse, de composés (thermochimie)**,
- **Interface supérieure (avec ou sous renoyage)**: rayonnement ou évaporation intense (renoyage type quenching), dépendant de l'état de surface de la croûte.



Problématique traitée depuis de nombreuses années à l'échelle macroscopique:

- De nombreuses expériences,
- Des collaborations à l'échelle internationales,

Principales conclusions:

- Evaluation de flux et coefficients d'échange de chaleur globaux $\sim 100\text{W/m}^2/\text{K}$
- Influence du transport des composants du béton dans la bain (viscosité, diffusivité)
- Influence complexe du gaz issu du dégazage du béton – pas de consensus sur l'apport de la convection due au gaz
- Influence du type de béton sur l'anisotropie de l'ablation (composition du béton et des agrégats)

Table 1
List of 2D MCCI experiments with real materials versus concrete type.

| Concrete properties | F concrete (siliceous) | G concrete (LCS) | C concrete clinker | Haematite concrete | Mortar with silica |
|---|---|---|-----------------------------------|-------------------------------------|---|
| Related experiments | VB-U4, U5 (Journeau et al., 2009), CCI3 (Farmer et al., 2007), CCI5, CCI6 (Farmer et al., 2010) | VB-U6 (Journeau et al., 2009), CCI2 (Farmer et al., 2007), CCI4 (Farmer et al., 2010) | VB-ES-U2 (Journeau et al., 2012a) | VB-U7 (Journeau et al., 2012a) | VB-ES-U3 (Journeau et al., 2012a) |
| Ablation | Anisotropic | More or less isotropic | Anisotropic | Anisotropic | Too low ablation |
| Produced gas (moles/concrete litre) | Low: 8 mol/l | High: 19 mol/l | Inter-mediate: 13 mol/l | Low: 6 mol/l | Intermediate: 12 mol/l |
| Aggregate disintegration | Quartz at 2200 K /mortar at lower temp. | Gravels destroyed at 1100 K | Clinker intact at ablation temp. | Aggregates intact at ablation temp. | No large aggregates |
| Concrete shrinking | No shrinking | Shrinking by 30% of limestone gravels | No shrinking | No shrinking | No shrinking |
| Concrete melting | Liquidus 2000 K | Liquidus 2300 K eutectic valley | ~G concrete | Low liquidus | ~F liquidus ~2000 K; no eutectic valley |
| Transport properties of molten concrete | Viscous low diffusion | Fluid high diffusion | Fluid high diffusion | Inter-mediate | Viscous low diffusion |

Cranga et al., Annals of Nuclear Energy 74 (2014) 72-88

- SWICCS test – ANL (Lomperski & Farmer, NED 237, 2007) effet de la pression, du type de béton, flux de chaleur mesurés élevés
- ROSAU-DCAM - ANL en cours 5 tests suite aux essais SWICCS)
- MOCKA – KIT (Gaus-Liu et al., 2022) effet des barres d'acier, pression
- MERELAVA - CEA en cours avec chauffage inductifs et corium oxyde/métal 4 tests
- ...

Problématique traitée depuis de nombreuses années à l'échelle macroscopique:



Principales conclusions:

Formation d'une croûte sur la surface supérieure & sur l'interface corium/béton → croûte instable non réellement observée sur les expériences (malheureusement résultat post-mortem)

- **Cas d'un béton calcaire ou silico calcaire** ($\text{SiO}_2/\text{CaO} < 1$): grande quantité de gaz formés (CO_2 , H_2O) → éjection de corium qui peuvent former des lits de débris sur la surface supérieure en présence de croûte : principal facteur de refroidissement
- **Cas d'un béton siliceux** ($\text{SiO}_2/\text{CaO} > 3$): peu de gaz et d'éjection de corium, refroidissement
Influence du transport des composants du béton dans la bain (viscosité, diffusivité) assez faible → importance du refroidissement par le haut si renoyage: water ingression ou imbibition (eau pénètre dans la croûte fracturée)

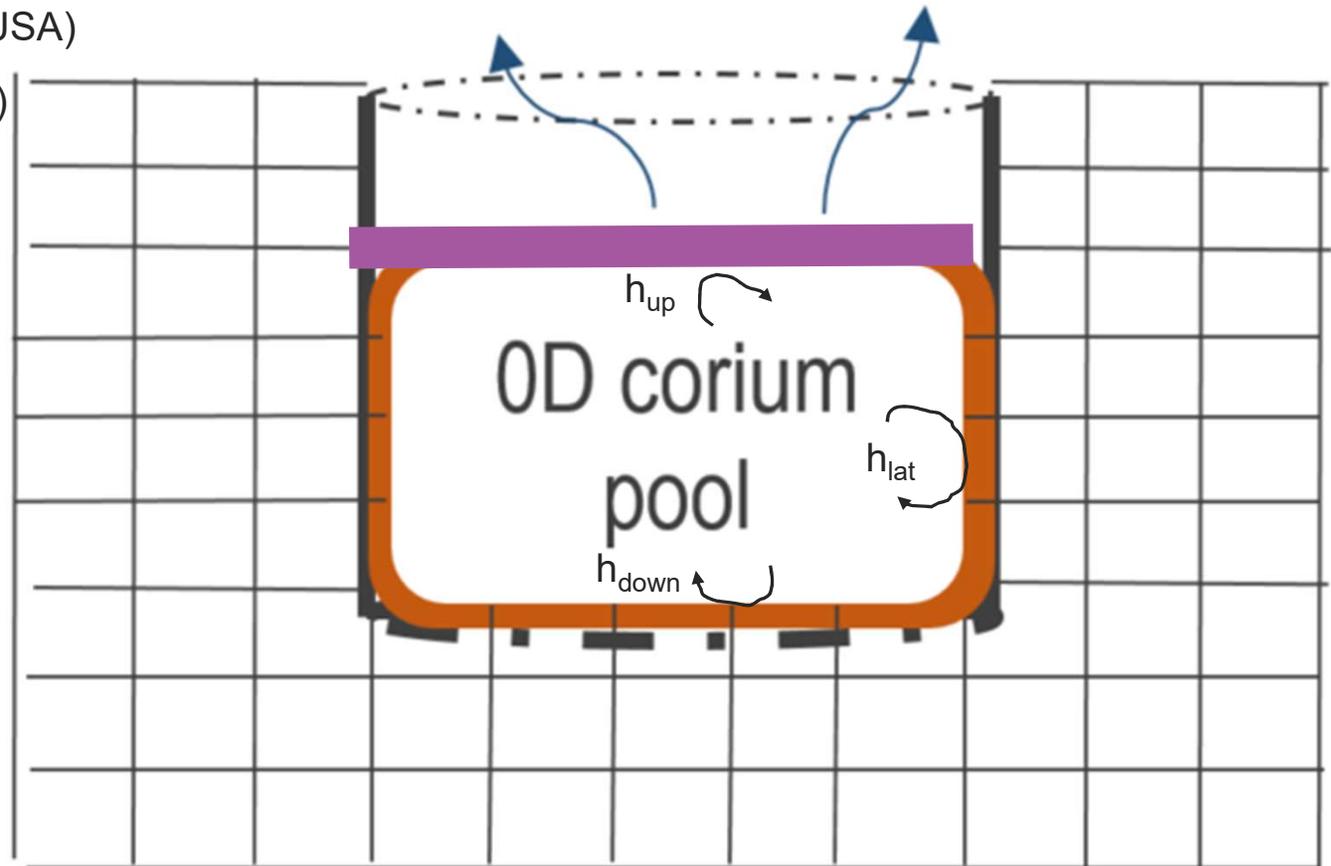
+ Travaux de remontée d'échelle : Études CFD pour les coefficients d'échanges (ex: Jahn 1975) → corrélation à l'échelle macroscopique / Validée sur les expériences macroscopiques:

Outils de simulation macroscopique (0D)



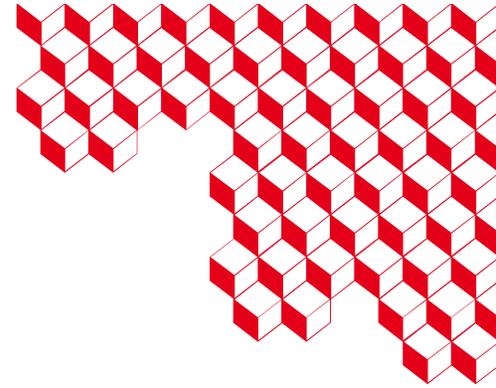
- MELCOR/CORQUENCH – ANL (USA)
- ASTEC/MEDICIS – IRSN (France)
- AC²/COCOSYS - GRS (Germany)
- TOLBIAC-ICB – CEA (France)
- ...

$$h = \mathcal{F}(\text{propriétés fluide}, J_v)$$





iresne



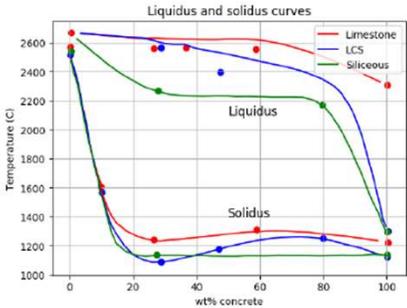
Interface Corium /Béton



Différentes approches pour la modélisation macroscopique de l'interface corium/béton:

Modèle fortement dépendant de:

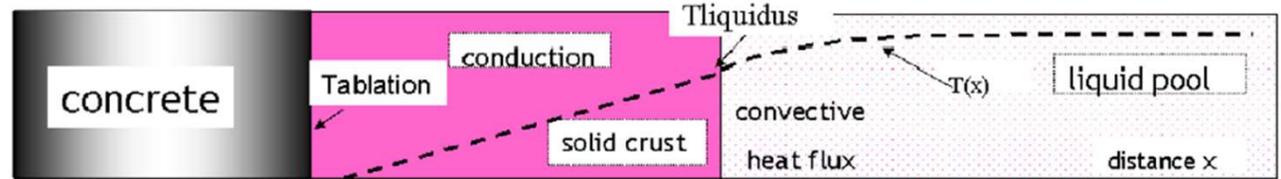
- Température d'interface ($T_{liquidus}$ ou $T_{solidus}$ ou entre)



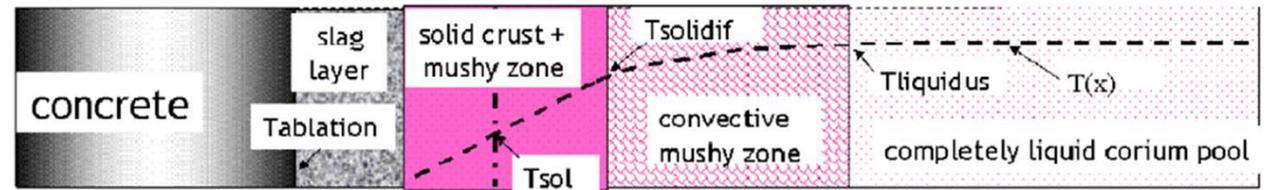
$$= \gamma T_{solidus} + (1 - \gamma) T_{liquidus}$$

Roche et al., 147

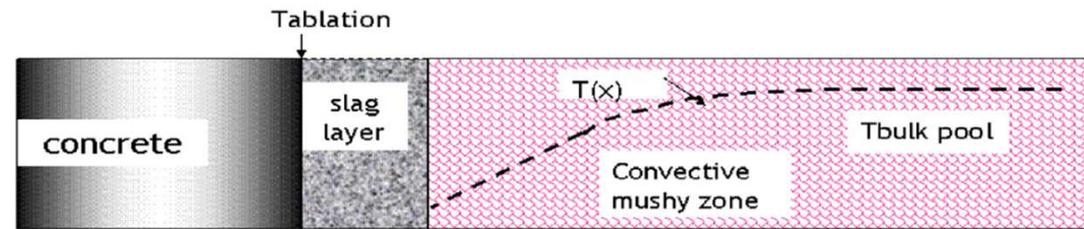
- Conductivité de la croûte, (C_{melt} ($T_{solidus}$))
- Coefficient d'échanges de chaleur imposés



TOLBIAC-ICB ('equilibrium crust model').



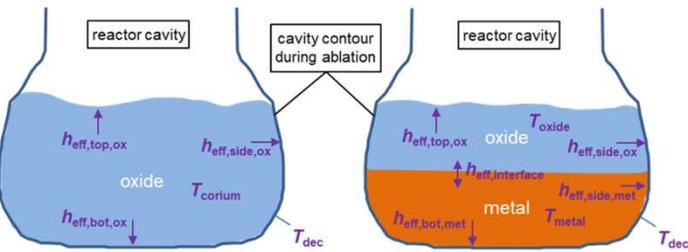
conductive zone
ASTEC/MEDICIS (non-equilibrium crust model)



Interface thermal resistance = $1/h_{slag}$
ASTEC/MEDICIS (no crust model), COCOSYS, FINCCI ...

COCOSYS

Cranga et al., Annals of Nuclear Energy 74 (2014) 72-88





Différentes approches pour la modélisation macroscopique de l'interface corium/béton:

Ajout de la physique dans l'équilibrium crust modèle de Tolbiac-ICB → **Temperature Interface Model** (Seiler et Combeau, 2014).

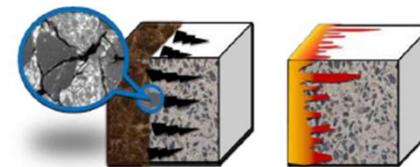
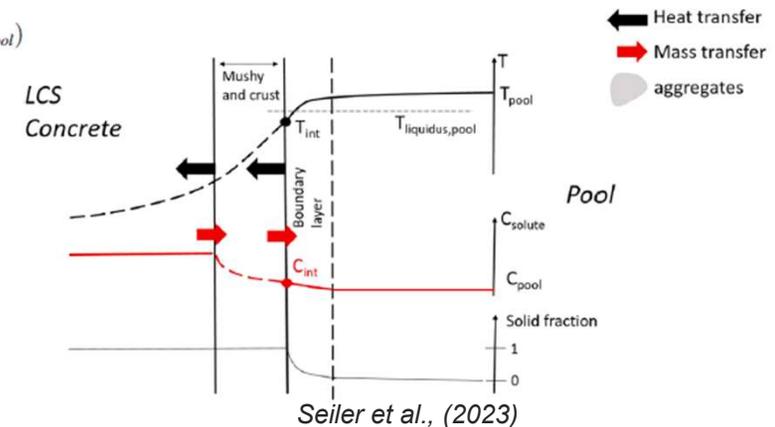
- Solide accumulé à l'interface de compositions (zone pâteuse → couche dense),
Nombreuses hypothèses; pas d'accumulation dans la zone pâteuse,
- Considère une compétition entre transfert de masse et transfert de chaleur
- Caractéristiques de l'interface modifiées
 - ✓ Concentration de béton/bain [kg/kg]
 - ✓ Température = $\mathcal{F}(C^{int})$

$$C_{int} = C_{liq.pool} + \frac{1}{1 + \frac{kM}{J_{abl}}}(C_w - C_{liq.pool})$$

Modèle macroscopique avec une constante ajustée (modélisation du transfert de masse)

Existe des modélisations 3D CFD de type suivi d'interface (front tracking code CARFT (Morita et al., 2021)

Mais on ne connaît pas la phénoménologie de dégradation du corium à cette interface



Approche locale et mécaniste pour comprendre la physique de cette interface : ANR IMMOC

Expected impacts

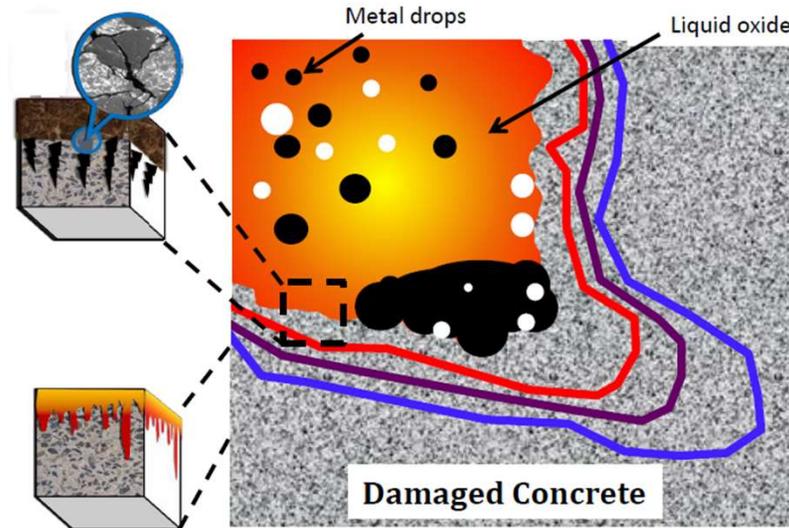
Reference experiments.

Help the understanding of concrete damaging under extreme conditions.

Instrumental developments for real time in situ analysis of degradation kinetics.

New mechanisms of heat propagation in heterogeneous media.

Nuclear installation safety.



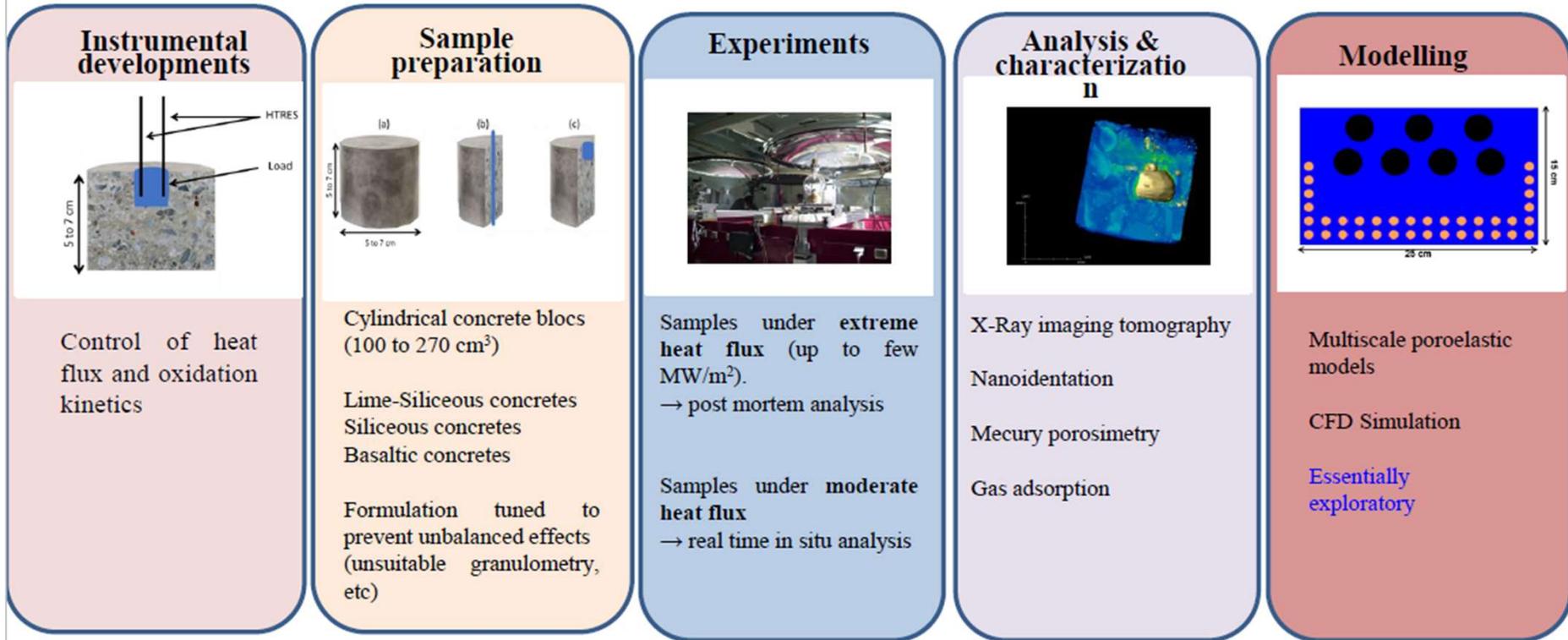
→ Caractérisation du béton à très haut flux/ température / fissuration / désagrégation

Partenaires:

- **AMU-CNRS: MADIREL** (M. Antoni)
- **AMU-CNRS: CEREGE** (D. Borschneck)
- **PROMES**: L. Charpentier
- **ENPC-UGE-CNRS Labo Navier**: C. Chateau

Mais aussi, par le passé : Simulations CFD pour étudier la compétition convection/transferts chaleur bain oxyde/métal et les effet inductif (cf plus loin) pour être représentatifs de la réalité.

5 tasks



Essais sans charge → T_{décomposition béton}
 Essais avec charge → phénoménologie locale de l'ablation



WP5.2 IMMOC – exploratoire - Simulation & Modèles

Objectif : Nouveaux modèles & Techniques numériques

Outil de R&D: le code **CIMAC** (S. Semenov, J.-F. Haquet, P. Piluso, M. Antoni)

- Navier-Stokes incompressible triphase
- Phases non miscibles
- Fonction « couleur » pour advection de la masse
- Reconstruction d'interface VOF-PLIC
- 1 équation de quantité de mouvement
- 1 pression
- Transferts de chaleur
- Forces de tension superficielle

- 2D → 3D

- Pas de thermochimie
- Pas de thermomécanique

WP5.2 IMMOC – exploratoire - Simulation & Modèles



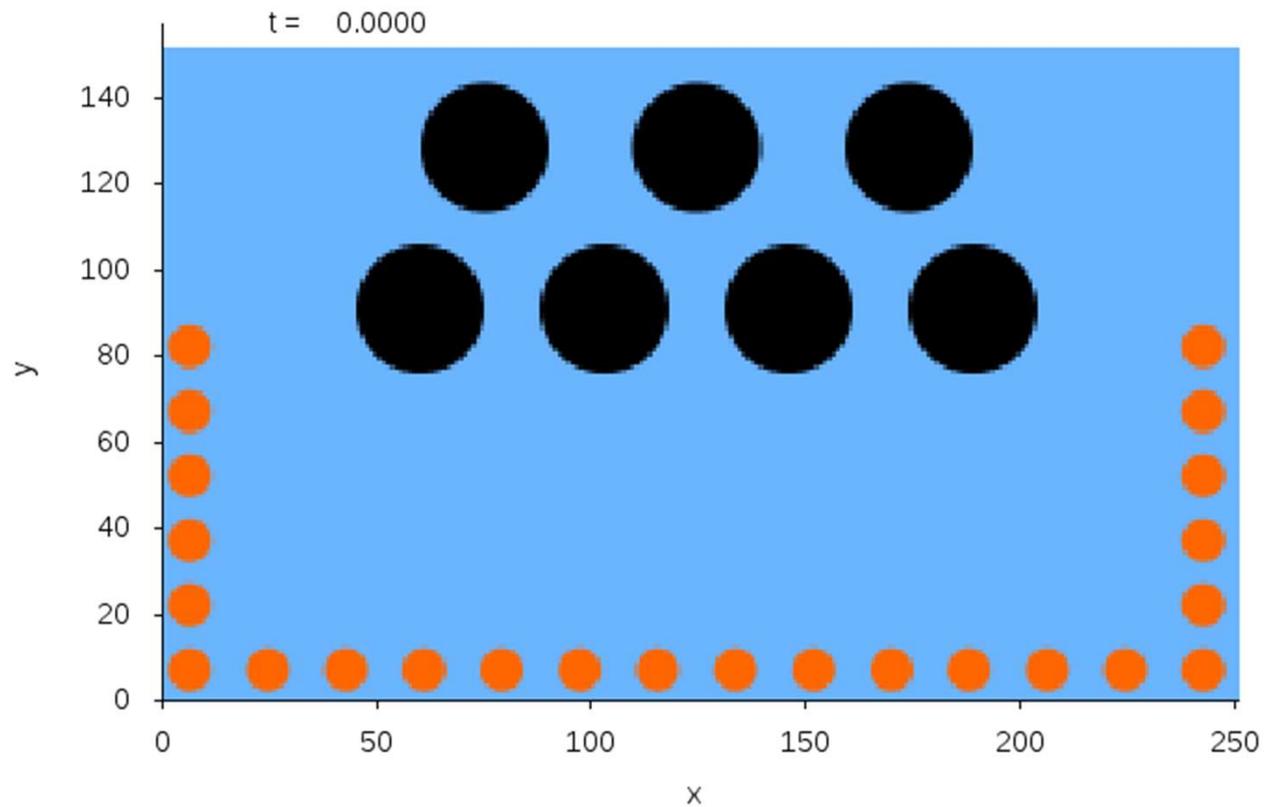
Exemple d'application

Oxide phase
 $\rho = 6312 \text{ kg/m}^3$
 $\mu = 19.4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

Metallic phase
 $\rho = 6461 \text{ kg/m}^3$
 $\mu = 4.75 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

Gaseous phase
 $\rho = 0.17 \text{ kg/m}^3$
 $\mu = 61.9 \text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$

$\sigma_{\text{ox-g}} = 0.58 \text{ N/m}$
 $\sigma_{\text{met-g}} = 1.79 \text{ N/m}$
 $\sigma_{\text{ox-met}} = 0.25 \text{ N/m}$



WP5.2 IMMOC – exploratoire - Simulation & Modèles

Modélisation interface corium/béton

- Béton = 4^{ème} phase (propriétés renseignées par les autres WPs)
- Traitement de l'interface corium/béton :
 - ✓ Suivi de l'interface corium/béton avec transferts de masse
 - ✓ Bilan d'énergie & Transferts de chaleur

Résultats validés sur les tests expérimentaux des autres WPs:

- Front d'ablation
 - Distribution finale des phases
- Effet du type de béton sur l'anisotropie (résultats des autres WP sur sa dégradation)

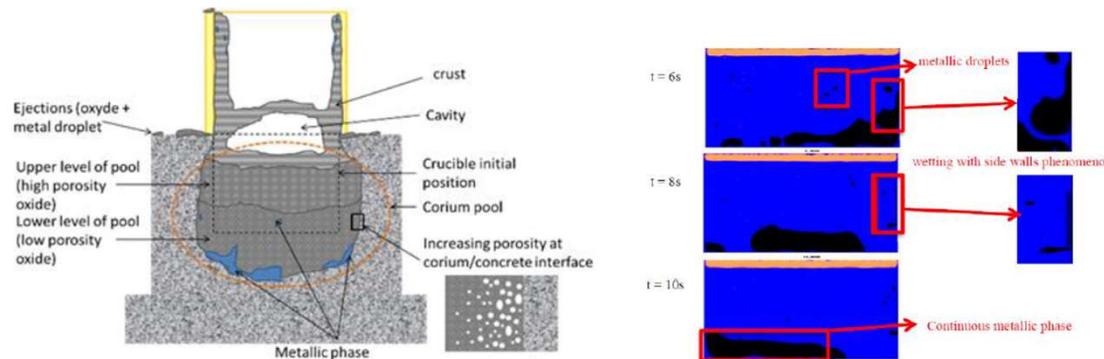
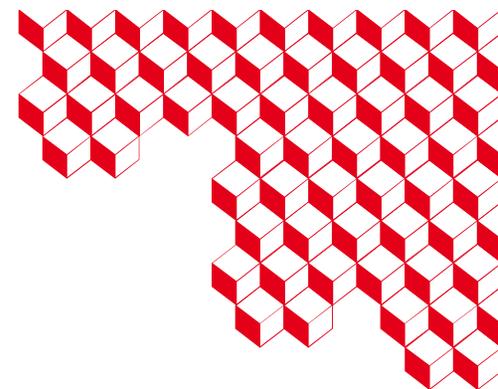


Figure 8 : left: Basaltic concrete (VF-U1) post-test repartition of the oxidic and metallic phases. Right : 2D CFD simulation of a corium.



iresne



Interface Supérieure

L'échelle macroscopique:

2 principaux modèles:

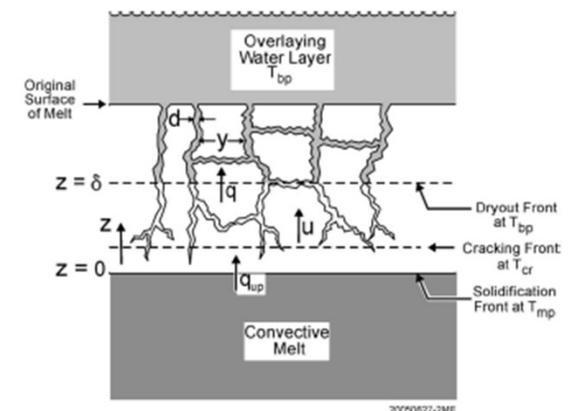
- **Lomperski and Farmer (2006)** → paramétrique
- **Epstein and Lister (1974, 1999, 2006)** (+ Yeo et al. (2019)) → analytique
 - ✓ Approche quasi-permanente,
 - ✓ Flux de chaleur extrait d'un milieu poreux de faible perméabilité ($\sim 10^{-9}$ m²) à Patmo → loi de Darcy, Écoulement eau/vapeur contre-courant (CCFL)
 - ✓ Perméabilité du solide fissuré (Lister) → 1D réseau polygonal de fissures se propageant dans une roche chaude,

$$\varphi_{imbi} = \left(\frac{h_{LV}(\rho_l - \rho_v)g}{\nu_v} \right)^{5/13} \left[\psi \frac{\alpha_{crs}^2 \rho_{crs}^2 (C_{p,crs}(T_{sol} - T_{sat}) + L)^2}{(T_{sol} - T_{cr}) + \frac{L}{C_{p,c}}} \right]^{4/13} (\alpha_T (T_{cr} - T_{sat}))^{15/13}$$

- Des paramètres influents mal connus : température de solidification, coefficient d'expansion thermique de la croûte de composition mal connue
- ...
- Une constante ajustable



SSWICS-3 (Lomperski and Farmer, NED 237, 2017)



Epstein (2006)

Evaluation analytique 1D → amélioration du flux d'imbibition

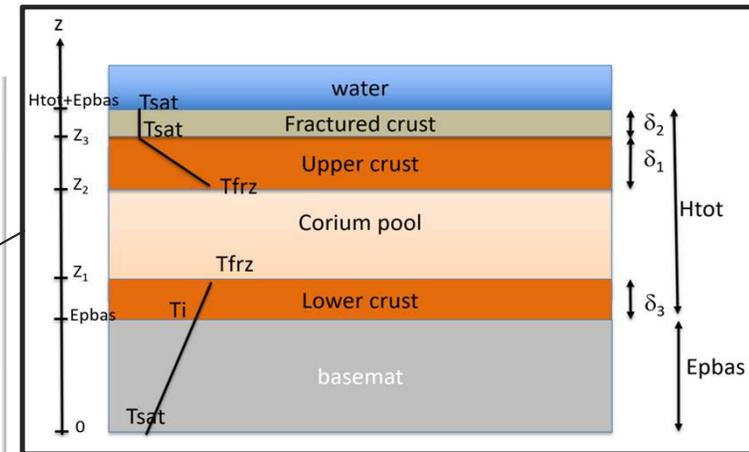
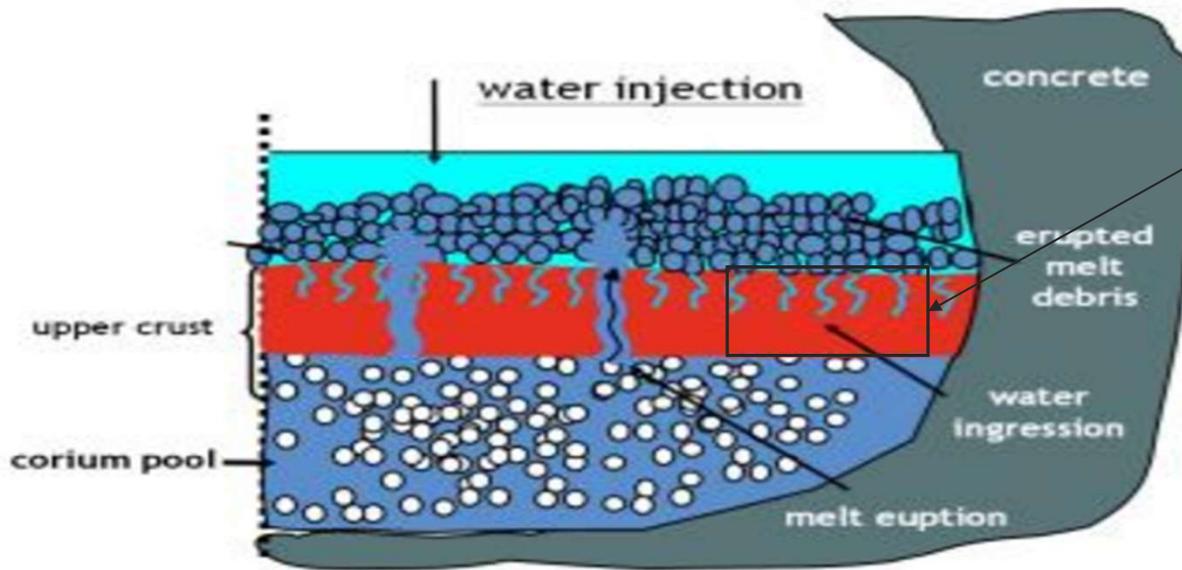


Illustration du phénomène de water ingress lié à la pénétration de l'eau dans les fissures qui se propagent dans la croûte supérieure du bain de corium et la modélisation 0D réalisée en support à l'amélioration des modèles de TOLBIAC-ICB.

Modèle 1D → modification des coefficients du modèle à partir des essais et différents types de bétons.



ANR MIT3BAR : Renoyage par le HAUT dans l'installation PLINIUS/MERELAVA



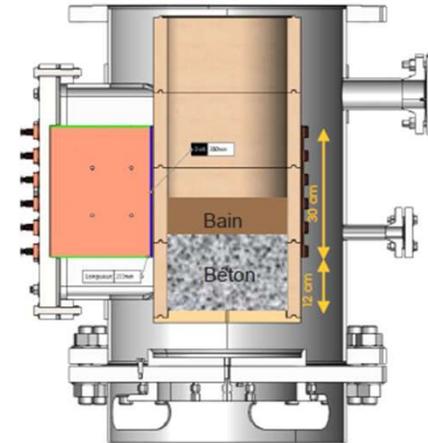
4 essais :

- 1^{er} Identique à SWICCS
- Différents types de béton (calcaire/ silicieux)

Corium (70-40 kg)

- Incorporation de béton (max 13.6 %) dans le corium
- Incorporation d'acier (max 15.1%) dans le corium
- Chauffage par induction 400 kW – [70-300 kHz]

Injection par le haut ~8 l/min



ME-U2

ME-U3

Impact de la présence de fer, béton sur le flux d'imbibition ?



FOCUS sur l'expérience MERELAVA réalisée le 22/03/2023



Post de CEA IRESNE

CEA IRESNE
1843 abonnés
1 sem.

[#Réussite #Essai #Corium] Première expérience de #renoyage dans l'installation #MERELAVA entre un #corium oxydes - métal et du #béton avec #puissance #résiduelle simulée, pour l'étude des #accidents #graves.

▶ Un renoyage de corium (amas de combustible et métaux issus de la #fusion du #cœur du réacteur) avec ablation de béton a été réalisé avec succès par nos équipes dans le dispositif #MERELAVA de la plateforme accidents graves #PLINIUS sur le site de #Cadarache, mercredi 22 mars 2023.

▶ Cette expérience fait partie d'un #projet de recherche financé par le Programme Investissements d'Avenir (#PIA), dans le cadre de l'action « Recherche en matière de Sécurité Nucléaire et de Radioprotection (#RSNR) » gérée par l'ANR (Agence nationale de la recherche).

🔍 MERELAVA, développé par les équipes du Laboratoire d'Etude des accidents Graves #LEAG du Département de technologie nucléaire de notre institut, permet la réalisation d'#expériences sur le #refroidissement du #corium par injection d'#eau par le haut.

🔥 La fusion du corium est obtenue par réaction #thermitique (réaction d'oxydoréduction auto-propagée et fortement exothermique). Le corium fondu, contenu dans un creuset en zircon, est instrumenté avec des #mesures de #température par thermocouples. Une fois la fusion obtenue et après une première ablation du béton, un système de #chauffage par #induction autour du dispositif a été utilisé pour simuler la puissance résiduelle pendant les séquences de refroidissement par renoyage.

📄 C'était la première fois qu'une expérience d'interaction corium / béton sous eau avec un #mélange #prototypique (UO₂+ZrO₂+métal) était réalisée et qu'un système de chauffage, par induction, était utilisé dans MERELAVA.

👏👏👏 Les équipes vont maintenant procéder au démontage du dispositif et à l'analyse de l'ensemble des résultats.

👏 Bravo aux équipes pour cette première expérience réussie !

👏 Viviane Bouyer Christophe Journeau Andrea Bachrata Arthur DENOIX Jules Delacroix Pascal PILUSO Hugo Laffolley.
Alexia BALLAND LONGEAU caroline TRUFFIER Philippe Fouderas.



45' d'interaction corium (oxide-métal)/béton avec renoyage par >50 L d'eau et simulation de la puissance radioactive résiduelle

[https://www.linkedin.com/posts/cea-iresne_premier-essai-dans-merelava-de-renoyage-de-activity-7046388094295552001-Ku Y?utm_source=share&utm_medium=member_desktop](https://www.linkedin.com/posts/cea-iresne_premier-essai-dans-merelava-de-renoyage-de-activity-7046388094295552001-Ku-Y?utm_source=share&utm_medium=member_desktop)





Conclusion:

La physique de l'ablation (Interaction Corium Béton) dépend fortement :

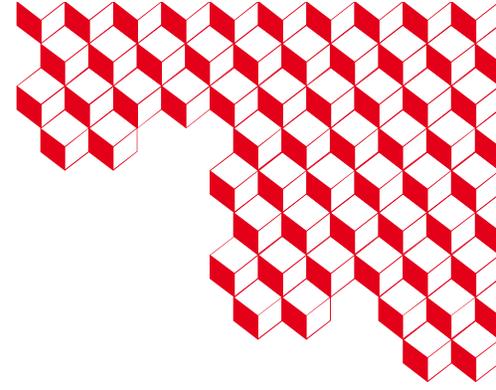
- Du type de béton,
- De la composition du bain de corium (+ béton + métal)

Les connaissances de ces phénomènes sont encore insuffisantes → modèles 0D à l'échelle macroscopique calés sur des données expérimentales

Besoin de connaissances approfondies plus locales:

- ANR IMMOC : dégradation du béton avec et sans charge métallique (expérience et simulation locale)
- ANR MERELAVA : effet macroscopique du renoyage pour un corium avec une forte teneur de béton et d'acier (expérience et simulation macroscopique)

Besoin d'expériences analytiques représentatives



Merci pour votre attention !