



Journées Multiphasiques et Incertitudes

*Ecole Centrale Nantes - 13 et 14 novembre 2017*

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Faire avancer la sûreté nucléaire*

# Lits de débris et milieux poreux dans le contexte des accidents graves de réacteur nucléaire

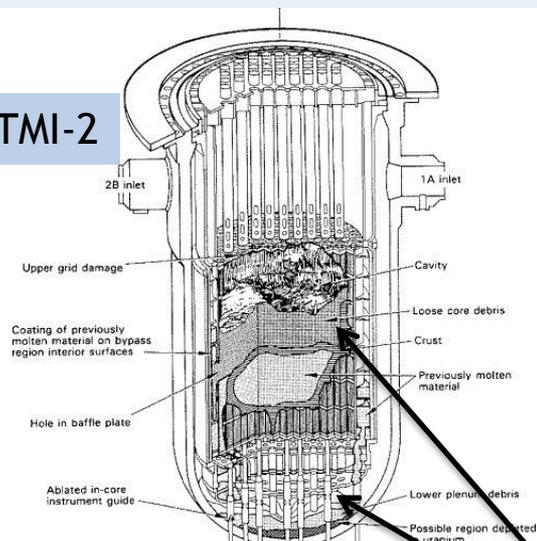
## **Renaud Meignen**

Laboratoire d'Etude de la Physique du Corium (LEPC),  
Service des Accidents Graves  
Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire  
BP 3 - 13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex  
[renaud.meignen@irsn.fr](mailto:renaud.meignen@irsn.fr)

- Enjeux de sûreté nucléaire, en cas d'accident grave, concernant les lits de débris et milieu poreux
- Panorama des activités à l'IRSN
- Modélisation dans le code MC3D
- Discussion relative aux incertitudes

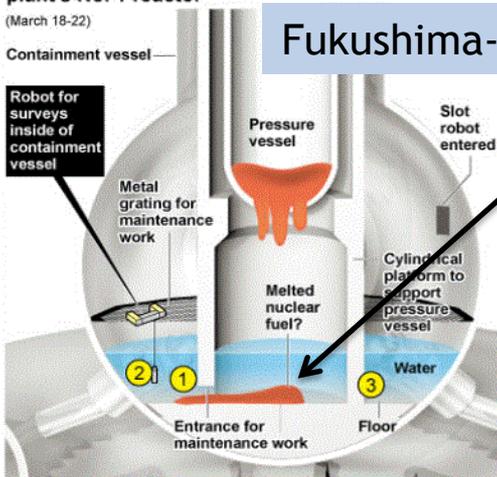
# Enjeux de sureté

TMI-2



Investigation results of Fukushima No. 1 nuclear plant's No. 1 reactor  
(March 18-22)

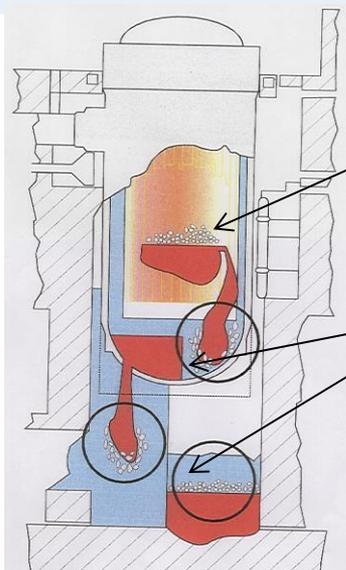
Fukushima-1



(Images provided by International Research Institute for Nuclear Decommissioning)

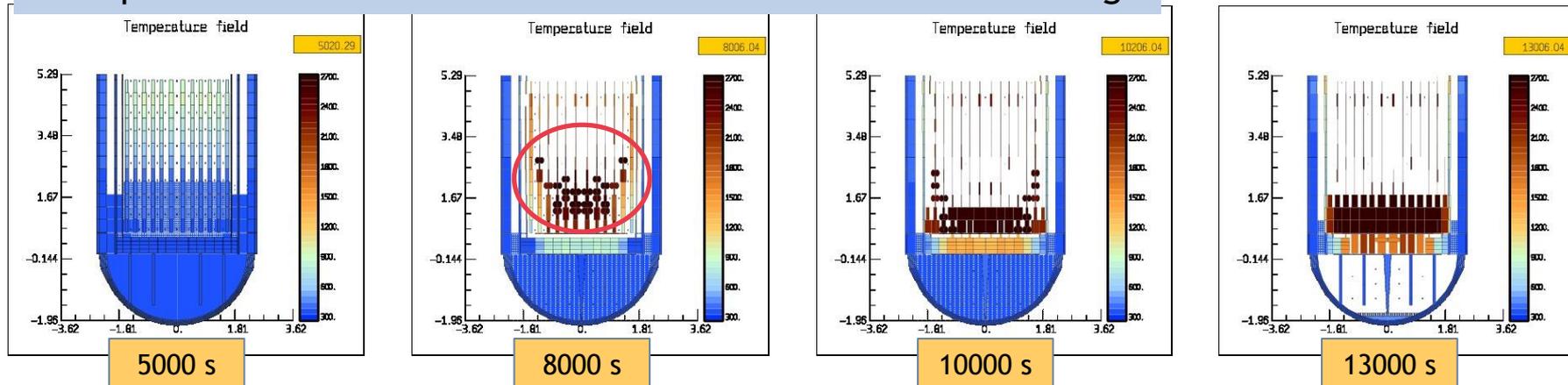
- Les accidents nucléaires ont principalement lieu par la perte du refroidissement et du réfrigérant. Celle-ci entraîne l'échauffement du coeur puis sa fusion (corium)
- Cependant, la progression du corium dans l'installation ne peut être stoppée que par son refroidissement par l'eau
- Cela peut se faire dans la cuve (TMI-2) ou hors de la cuve (Fukushima)

# Où et quand ?

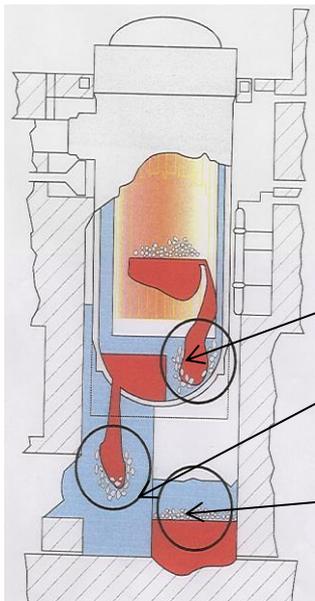


- Debris comes first from the **fragmentation and collapse of the fuel rods** => solid angular particles
- Some of these debris may also be found in the lower head or in the cavity below the vessel (reactor pit)

## Example of ASTEC calculation with debris formation and melting



# Où et quand ?



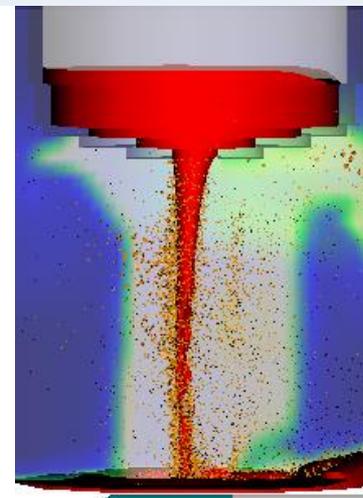
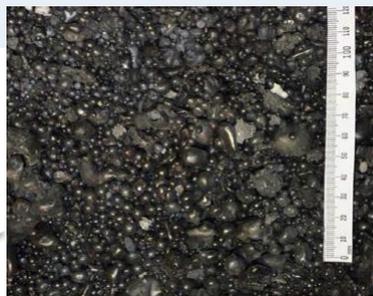
Debris may further appear from the fragmentation resulting during an **interaction of the molten corium and the water** during melt relocations

- In vessel
- Ex-vessel

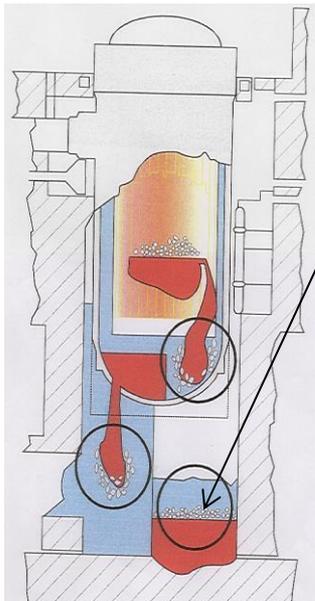
Debris may lastly appear during the **interaction of molten corium with concrete under water**

Example of a 3D calculation of melt relocation from the vessel to the pit with MC3D code

Post-test surface of top flooding experiment of real corium interacting with concrete Exp. Performed at Argone Nat. Lab.



# Où et quand ?



■ The molten corium may also be cooled down in some conditions thanks to the **fractures appearing on top of the solid crust by thermal stresses**

- The crust might also partly fragment by thermal stresses  
=> so-called « water ingression » phenomenon

Post-test surface of top flooding experiment of real corium interacting with (silicious) concrete



# Enjeux

- Il existe donc, au cours de la progression du corium plusieurs étapes de production de débris, avec possibilité de refroidissement, et dans le cas contraire fusion, progression, re-production d'un lit de débris
- La caractérisation de la refroidissabilité des débris est un élément majeur pour décider des meilleurs stratégies
  - En-cuve ou hors-cuve ?
  - Quel est le meilleur instant pour réinjecter l'eau ?
- Il faut pour cela maîtriser les processus de production des débris et leur interaction avec le réfrigérant.

# Particularities and uncertainties

- **Large span of particle sizes**, with nevertheless in general a mean Sauter diameter of the order of some **few millimeters**
  - Flows involving **inertial effects**, still an area of research for isothermal flows
- Competition between internal power (so-called « residual » power) and cooling
  - **Transient** situations of flooding (top or bottom) of uppermost interest
  - Involves **high gradients** fluid concentrations in the porous medium
- Debris bed quite badly characterized with **strong heterogeneities**
- Very **high temperatures** of the porous media => melting occurs at ~2500 K.
  - High uncertainties on the heat transfers, in particular regarding the **transient boiling**.
- **Reactive material** involving **oxidation** with fast kinetics
  - Responsible for (re)melting of the debris bed

# Panorama des activités « lit de débris » à l'IRSN

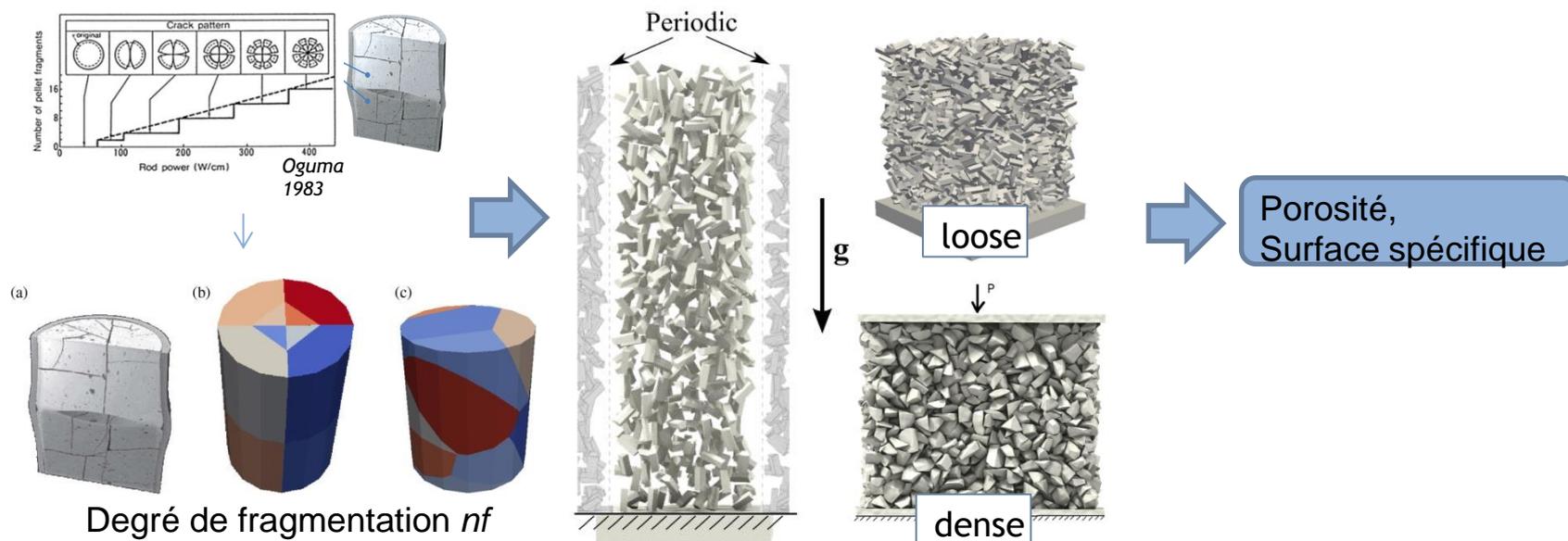
- La résolution se fait par réduction progressive des incertitudes de l'ensemble des problématiques dans la modélisation
- Double objectif de compréhension de la phénoménologie et de modélisation dans le logiciel ASTEC, code simulant l'ensemble de la séquence accidentelle (donc modélisation peu fine)
- Programme expérimental relatif à
  - La dynamique des écoulements 2-phases (isothermes) en régime inertiel
  - La caractérisation des processus d'ébullition
  - Le refroidissement de lit de débris à « grande » échelle => PEARL
- Modélisation des écoulements à l'aide de logiciels CMFD non dédiés (MC3D et ICARE-CATHARE-2)
- Modélisation des lits eux-mêmes : code dédiés

# Panorama des activités « lit de débris » à l'IRSN

- Support à des expériences en matériau réel, en particulier expériences sur l'interaction du corium avec le béton, dans les installations du CEA (VULCANO) ou d'ANL (programme CCI)

# Structure d'un lit de débris en-cuve

- Simulation de l'effondrement des pastilles fragmentées + gaines par une méthode « granulaire » de type “Contact Dynamics”



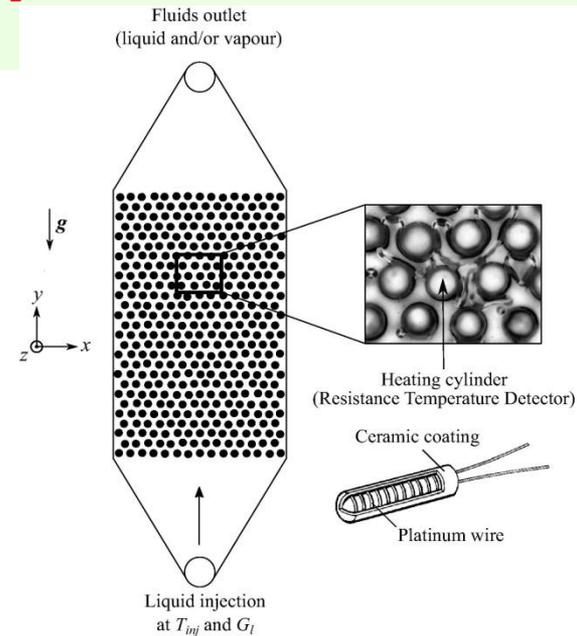
Nguyen et al., *Investigation of the structure of debris beds formed from fuel rods fragmentation*, Nuclear Engineering and Design, Volume 313, March 2017, Pages 96-107



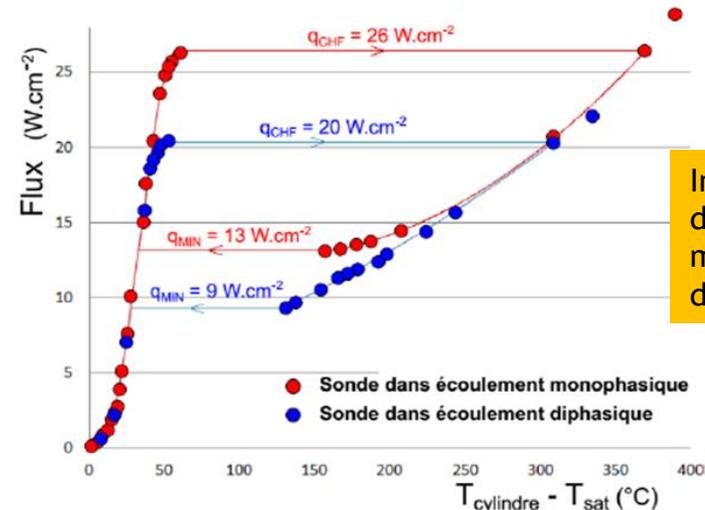
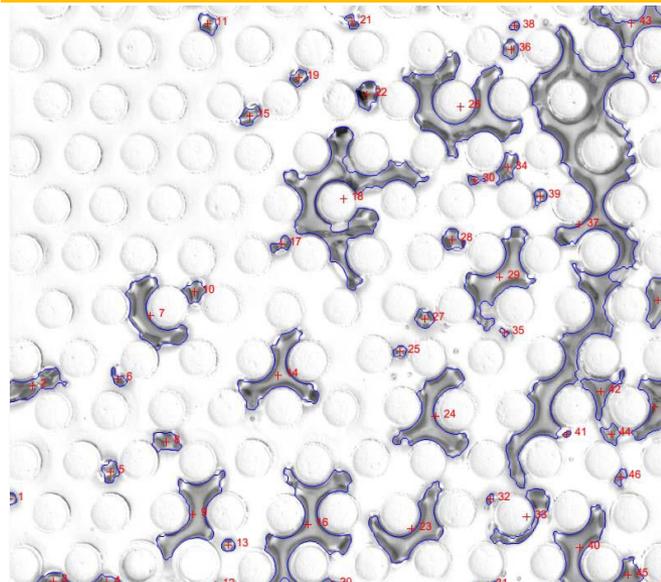
En cours : Impression 3D des lits numériques afin de caractériser perméabilité et passabilité dans dispositif expérimental

# Programme analytique IMFT

- Installation mettant en œuvre un réseau 2D d'éléments chauffant (cylindre) avec l'objectif de caractériser les processus d'ébullition dans un milieu poreux
- Dispositif permettant des prises de vue à haute vitesse où l'on distingue les phases liquide et gaz. Le fluide est du HFE-7000 (ébullition à 34° C). Les cylindres chauffants font environ 3mm de diamètre



Exemple de visualisation des « bulles » dans le réseau de cylindres



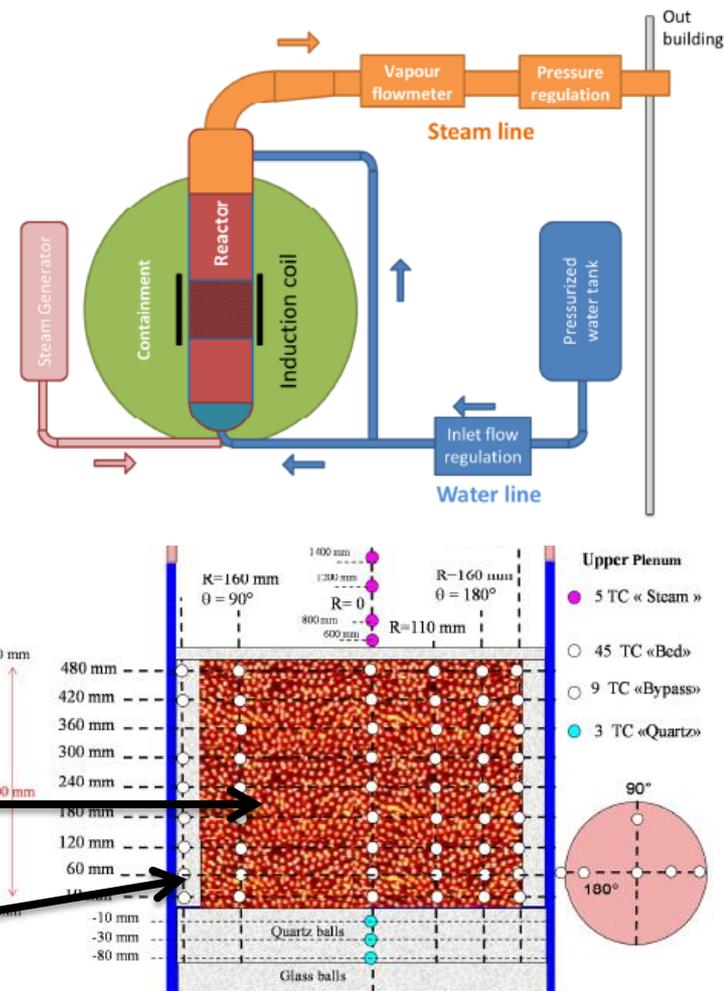
Impact du débit de vapeur sur les mécanismes d'ébullition

# Installation PEARL

- Installation dédiée à l'étude du renoyage d'un lit de débris dans une configuration 2D, avec lit hétérogène (bipasse)
- Impact de la pression jusqu'à 10 bars
- PEARL est complétée
  - par une installation similaire (PRELUDE), mais de plus petite dimension, opérant à P atm
  - Une installation (CALIDE) pour la mesure de pertes de charge en écoulements isothermes

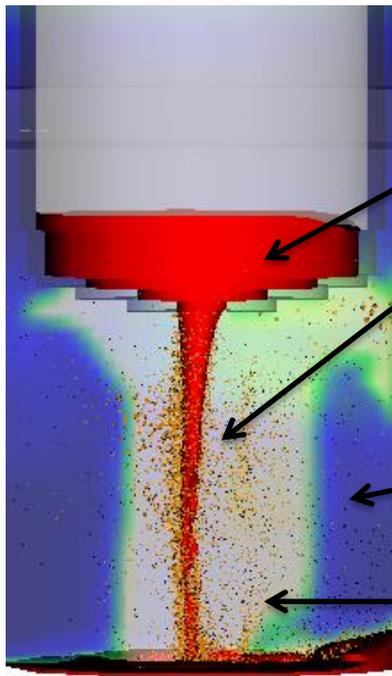
Zone chauffante : billes d'acier

Bipasse, simulant des assemblages non dégradé, billes de quartz



# Modélisation dans MC3D

- MC3D : code the thermohydraulique multiphasique 3D eulérien, principalement développé pour étudier l'interaction (explosive) entre le corium fondu et l'eau (interaction corium-eau ou explosion de vapeur)
- Application aux études des milieux poreux en AG, mais code non-dédié



- Corium en phase continue (bain, jet, film...)
- Gouttes de corium (par fragmentation du jet)
  - Ou billes solides
  - Modélisation récente de type MUSIG
- Eau liquide
- Vapeur d'eau (par ébullition) + incondensables

# Modélisation dans MC3D

## ■ Solveur en pression (méthode ICE) avec

- Maillage régulier entrelacé (vitesses aux faces)
- Bilan de masse et énergie en volumes finis
  - Ex : bilan de masse liquide avec termes sources d'évaporation pour les bulles/gouttes et pour l'ébullition en film

$$\frac{\partial \alpha_l \rho_l}{\partial t} + \text{div}(\alpha_l \rho_l \vec{V}_l) = \Gamma_{lv}^{b/d} + \Gamma_{lv}^{film}$$

- Bilan de qdm en différences finies, forme non conservative (variable = vitesse)

$$\bar{\alpha}_l \bar{\rho}_l \frac{\partial \vec{V}_l}{\partial t} + \tilde{\alpha}_l \tilde{\rho}_l (\vec{V}_l * \nabla \vec{V}_l) = -\bar{\alpha}_l \bar{\nabla} P + \bar{\alpha}_l \bar{\rho}_l \bar{g} - K_l s \vec{V}_l + \text{Kif}_{dl} (\vec{V}_d - \vec{V}_l) + \text{Kif}_{gl} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) + (\Gamma_{lv}^{film} + \Gamma_{lv}^{b/d}) \vec{V}_{l \leftrightarrow g} - M_{lg} + M_{dl}$$

↑  
Variables moyennées

↑  
Variables « convectés » (upwind ou 2<sup>nd</sup> ordre)

↑  
Couplage fluide/poreux

↑  
Frottement interfacial fluide/fluide

# Application aux milieux poreux

■ Du fait de la perméabilité importante des milieux considérés, les termes de couplage « inertiel » et interfacial (eau/vapeur) sont considérés. Plusieurs lois sont disponibles.

- Le milieu poreux est représenté par les « drops », porosité :  $\varepsilon = (1 - \alpha_d)$
- Les taux de présence sont « absolus ». On utilise aussi la notion de saturation  $S_l = \frac{\alpha_l}{\varepsilon}$
- Couplages visqueux et inertiel avec le milieu poreux :

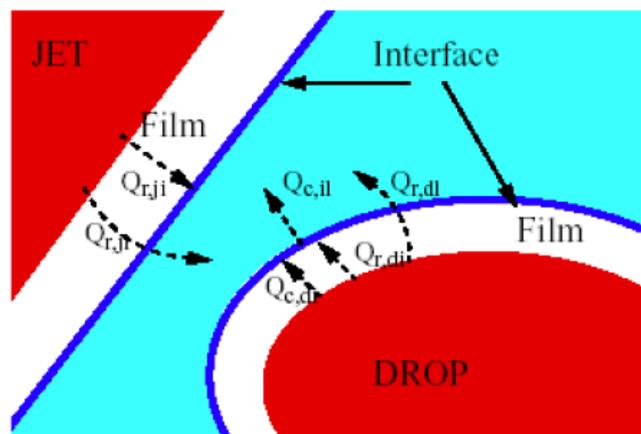
$$Kif_a = \alpha_i^2 \frac{\mu_c}{KK_i} + \frac{\rho_l}{\eta\eta_i} \alpha_i^3 \|\vec{V}_l - \vec{V}_d\|$$

- Le frottement interfacial
  - Schulenberg & Muller : terme de frottement interfacial inertiel

$$Kif_{lg} = C.S_l^7 S_g \frac{\rho_l}{\sigma} (\rho_l - \rho_g) D \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} |V_g - V_l|$$

- Tung & Dhir : plus complexe mais moins stable dans l'ensemble
- Absence de modélisation de la capillarité (peu utile dans les applications actuelles, à introduire pour les applications « fractures » (infiltration d'eau dans les crottes))

# Transferts thermiques



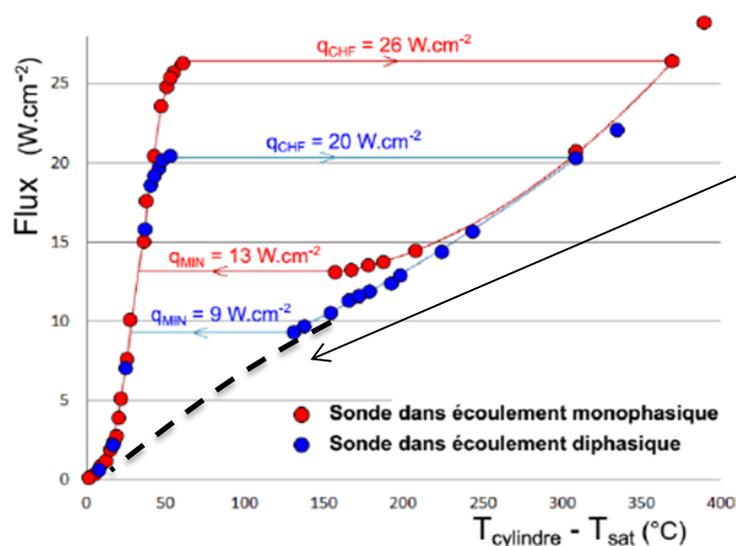
■ Dans les situations de noyage du corium, les températures atteintes peuvent être extrêmement importantes et il est nécessaire de représenter correctement l'ébullition associée

■ MC3D étant surtout développé pour l'interaction corium-eau, une grande attention est prêtée à la modélisation de l'ébullition en film et des travaux sont toujours en cours

■ Il y a peu de données expérimentales concernant l'ébullition en milieu poreux, les données obtenues en collaboration avec l'IMFT indiquent une faible dépendance au taux de vide local, mais changement des flux de transitions

■ Dans les situations de renoyage (comme pour l'interaction corium-eau), il semble que l'ébullition nucléée soit d'un faible impact et il a été fait le choix de ne pas la modéliser finement, mais de simplement faire un lissage entre ébullition en film et convection monophasique

Il reste que la connaissance est limitée pour ces configurations et que des données exp. sont nécessaires pour ajuster la modélisation



# Transferts thermiques

■ La carte d'écoulement est également très incertaine et cela impact fortement les échanges

■ Les points importants concernent

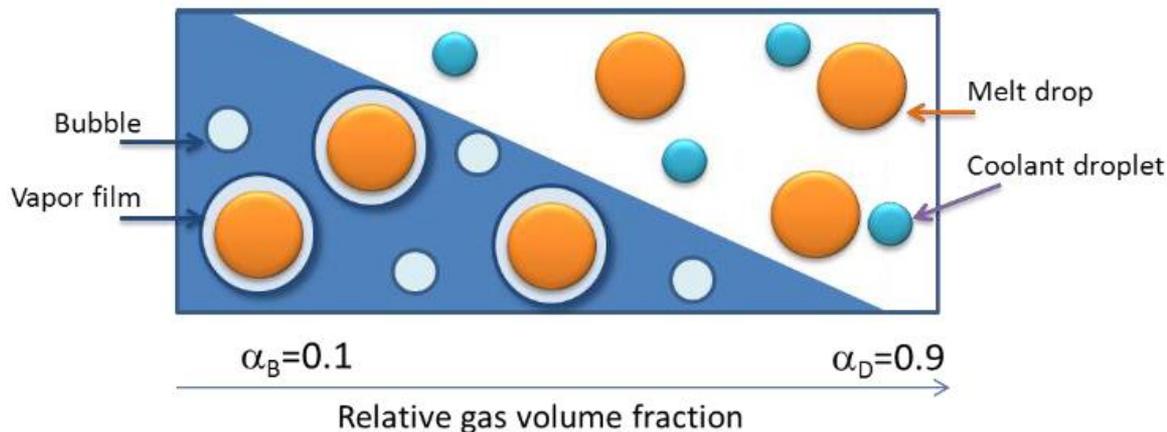
- La fraction de gouttes/billes en contact avec le liquide, ie en ébullition en film
- La fraction de gouttelettes d'eau

- Évaporation au contact de la vapeur chaude

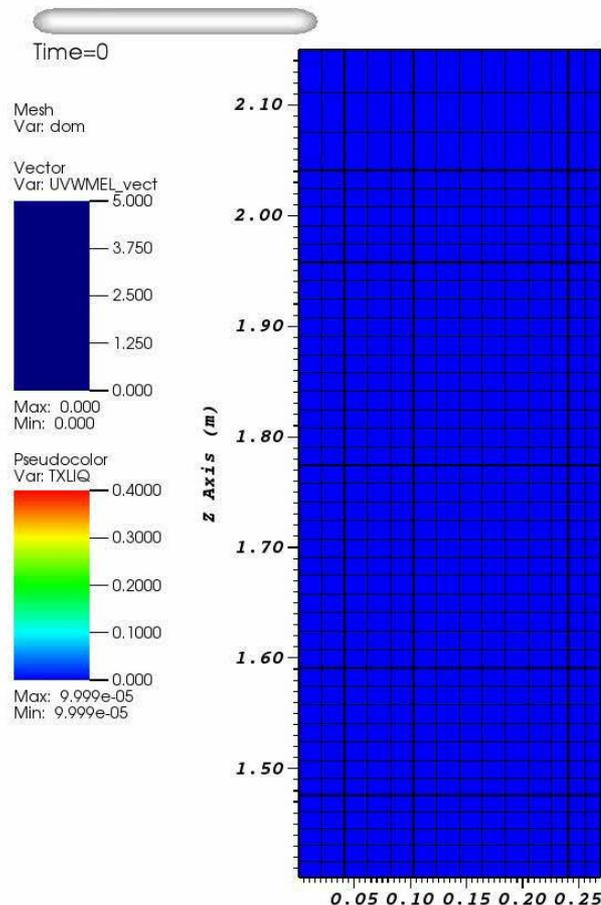
- Impact sur le milieu poreux

=> Quelle tailles pour les gouttes d'eau

=> Transferts thermiques par impact des gouttes d'eau: corrélation de Forslund (?)

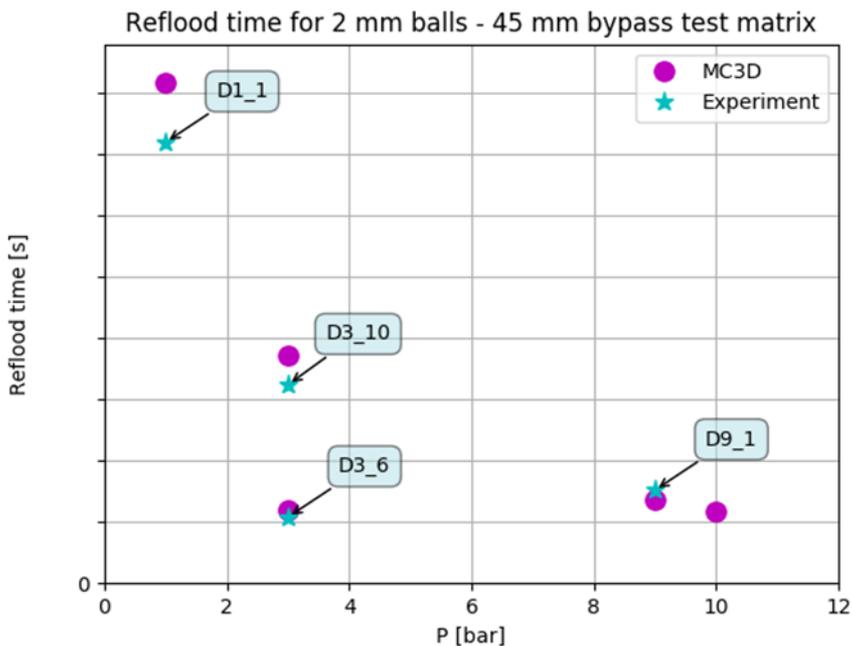


# Application au renoyage par le bas

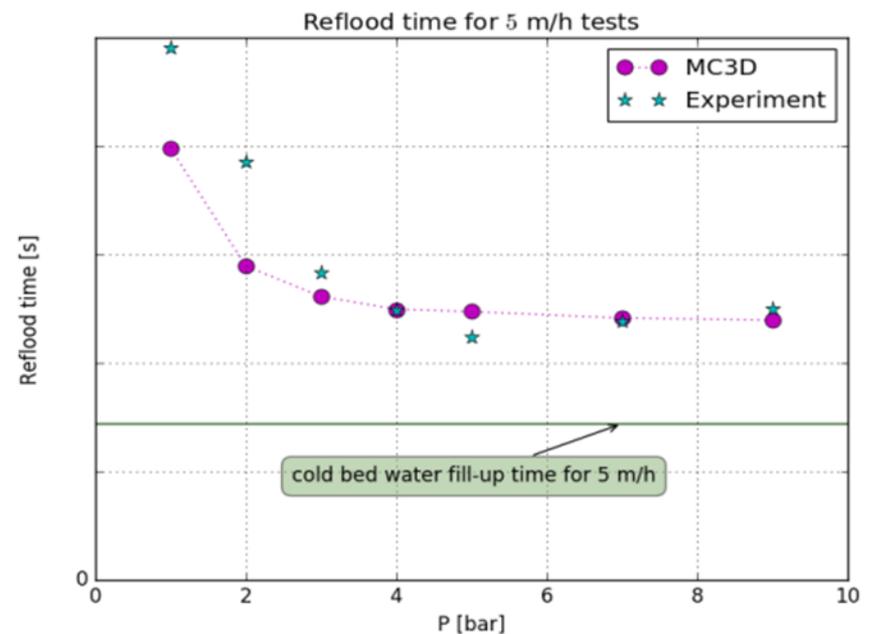


- Calcul d'une expérience PEARL avec des billes de 2 mm, flux d'eau par le bas (5 m/h), Température initiale de 700 C, chauffage du lit (sauf bipasse)
- La production massive de vapeur induit un fort frottement inertiel du gaz
- Pour compenser cette forte perte de charge, l'eau (dont le débit est imposée) contourne le lit de débris.
- Comportement au final essentiellement 1D. Les effets 2D apparaissent uniquement au front de renoyage, principalement pour l'eau
- Très fort brassage de l'eau au dessus du bain

# Pré-calculs MC3D comparés aux résultats expérimentaux PEARL

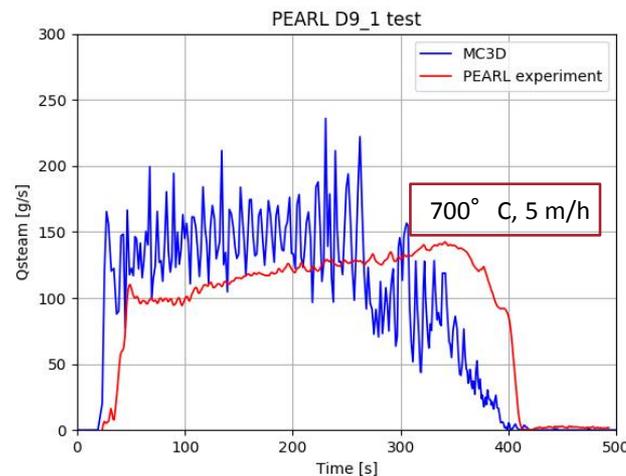
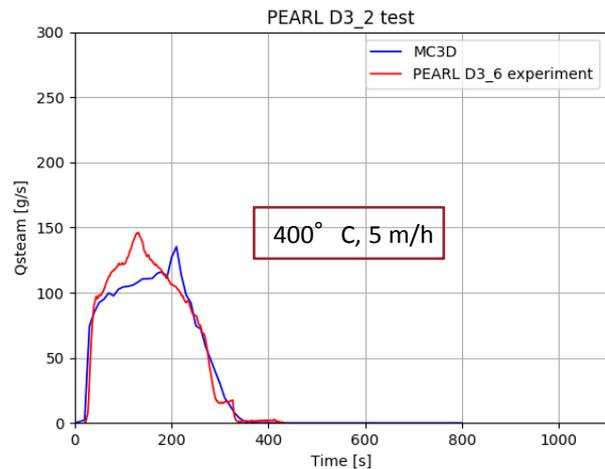
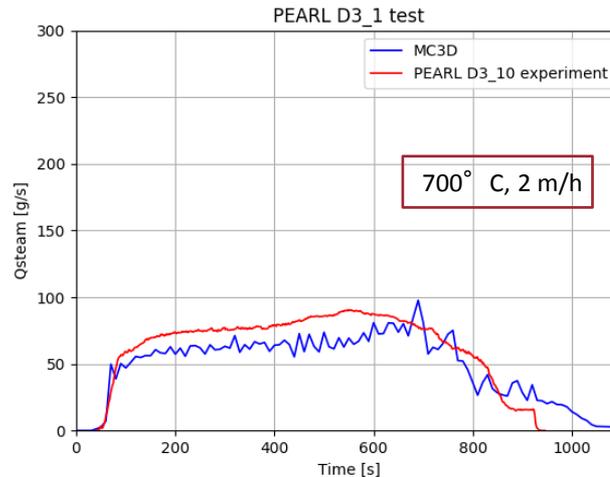
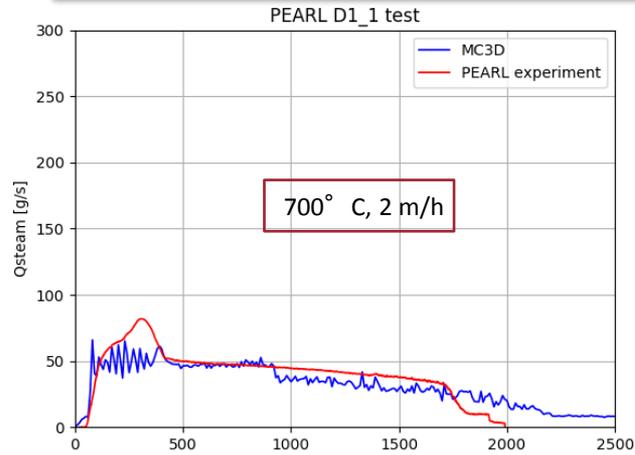


L'effet de la pression, qui « aplati » le profil de renoyage et augmente le « rendement » est globalement bien reproduit



# Comparaison pré-calculs MC3D avec PEARL C2

## Production de vapeur en sortie



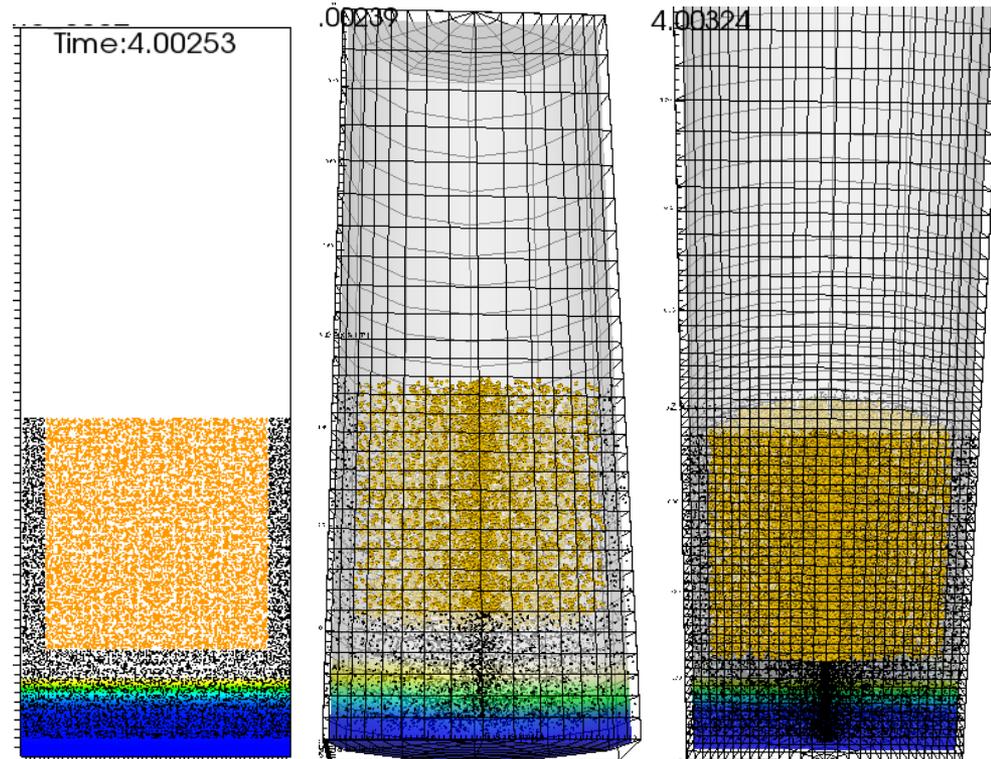
Résultats globalement satisfaisant pour la simulation permettant:

- Une interprétation plus simple
- Une spécification pour la modélisation dans le code système ASTEC

Une application aux situations « réacteur » est donc envisageable

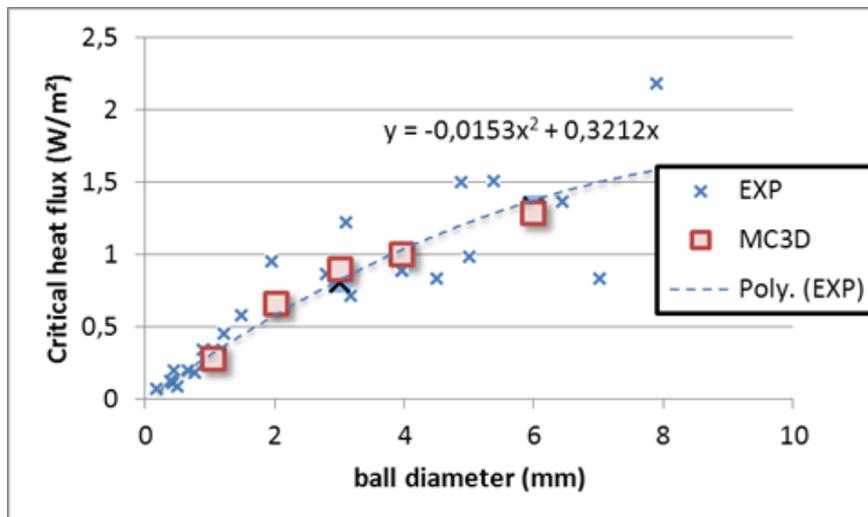
# Impact du maillage

- Plusieurs maillages ont été testés
  - 2D / 3D
  - Fin/grossier
- Peu d'effet du raffinement, dans la mesure ou le bipasse reste suffisamment bien résolu.
- Calculs 2D suffisants pour les applications actuelles



# Application pour l'évaluation du flux critique

- L'enjeu étant celui du refroidissement, il est important d'évaluer le flux critique, ie la puissance résiduelle telle qu'elle induit un assèchement local pour un lit donné
  - Nota : l'assèchement n'est pas nécessairement critique, au sens de la fusion du lit de débris, mais il s'agit d'un critère sans doute suffisant en terme de sureté.
- Les expériences actuelles partent d'un lit noyé et augmentent le chauffage interne jusqu'à détection de l'assèchement



Comportement satisfaisant des modèles. Faible incertitude. La dispersion expérimentale est cependant mal expliquée. Pourrait être lié à des effets locaux et phénomène d'hystérésis.

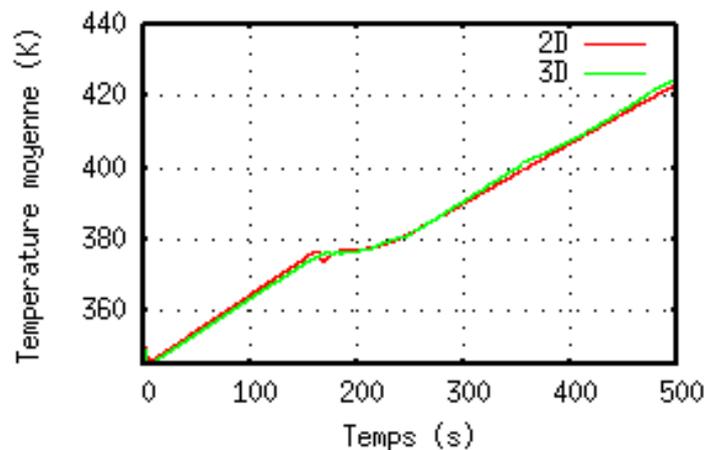
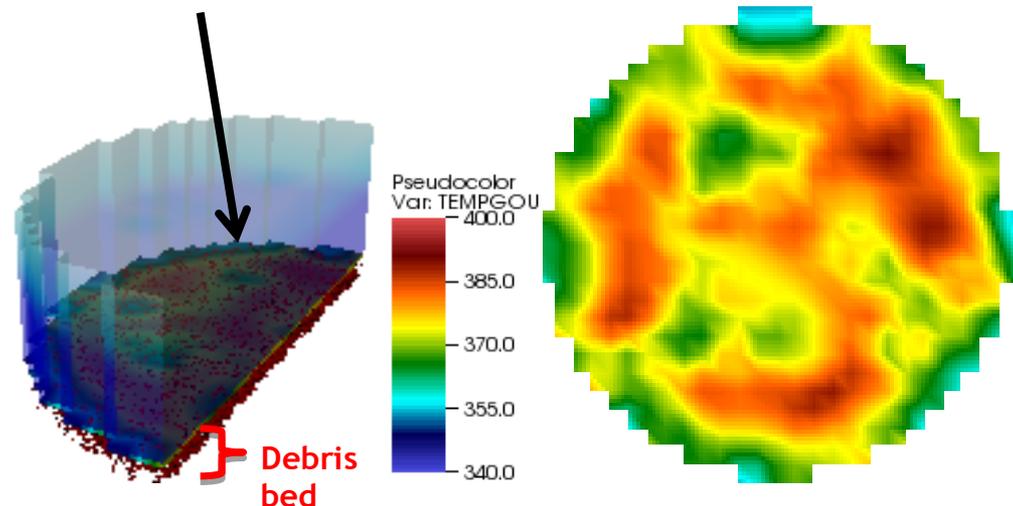
# Flux critique, applications réacteur

Les simulations 3D illustrent un comportement globalement différent du 2D

- Absence de grande structure convective au dessus du lit
- hétérogénéité spatiale avec présence de cellules convectives dans le lit

Mais le flux critique n'est pas sensible finalement à la modélisation 2D/3D pour les cas étudiés

Visualization of debris bed surface



# Top flooding : la limite des modèles

- Le « bottom flooding » et le flux critique d'un lit déjà noyé sont évalués de manière satisfaisante au regard des incertitudes.
- Dans les deux cas, il s'agit d'écoulements co-courants, conditions dans lesquels ont été effectués les expériences et sont établies les lois de fermeture.
- Le « top flooding », partant d'un lit asséché (situation plus réaliste), est beaucoup plus délicat à simuler. De fait, aucune simulation de tels cas a été trouvée dans la littérature.
  - Forte sensibilité aux modèles de couplages hydro ainsi qu'aux transferts thermiques
  - Forte sensibilité aux limites quand les saturations tendent vers 0

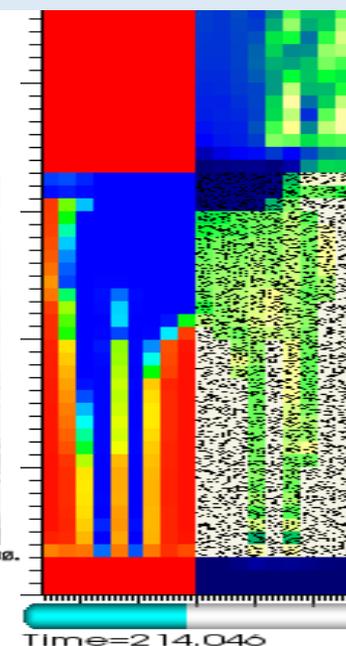
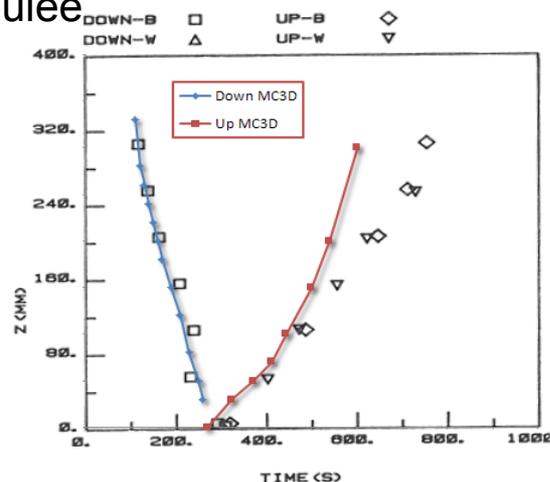
# Expériences top flooding

La principale expérience documentée est celle de Ginsberg (1986), qui décrit un écoulement en deux phases:

- Pénétration d'eau par des canaux (phase de contre-courant)
- Renouage par le bas par l'eau accumulée

Ginsberg, D = 3.18 mm, T = 912 K  
Left: temperature field of particles.

Right: liquid saturation



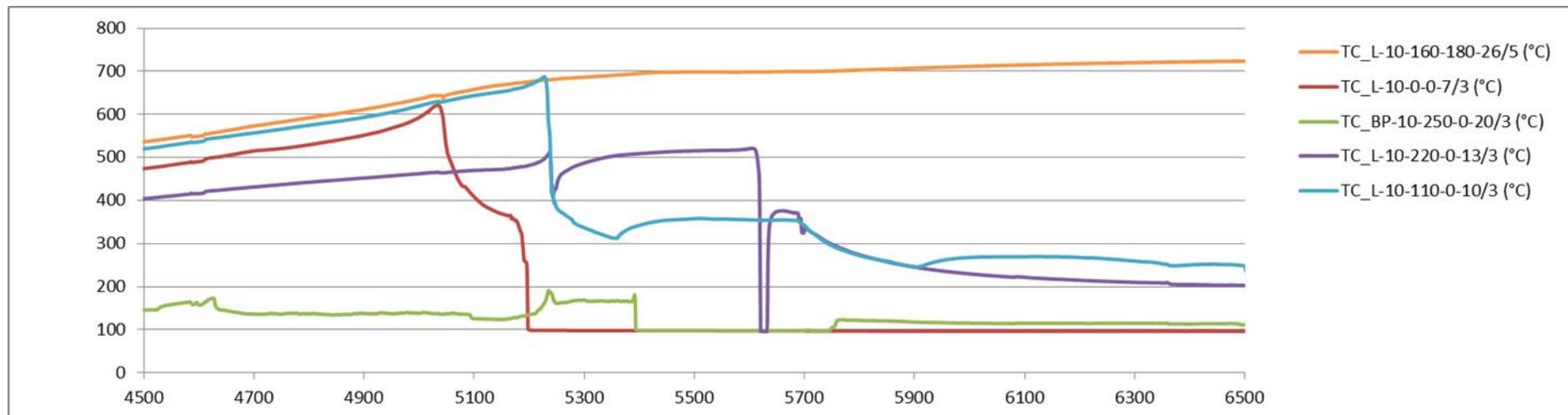
Il est possible de retrouver ce comportement avec MC3D mais très forte sensibilité aux modèles et conditions aux limites => **situation non satisfaisante**

Ginsberg T. et al. 1986, *An Experimental and Analytical Investigation of Quenching of Superheated Debris Beds under Top-Reflow Conditions*, Final Report. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.

# Expériences top flooding PEARL

Des expériences ont été récemment réalisées dans l'installation PEARL (résultats non diffusés, non consolidés) illustrant ce comportement, même en présence de forte hétérogénéité (bipasse).

- Expériences sans accumulation d'eau par le bas, avec chauffage interne
- On observe un refroidissement rapide de certaines zones tandis que d'autres reste asséchées et non refroidies sur le long terme.



# Discussion sur le bilan qdm

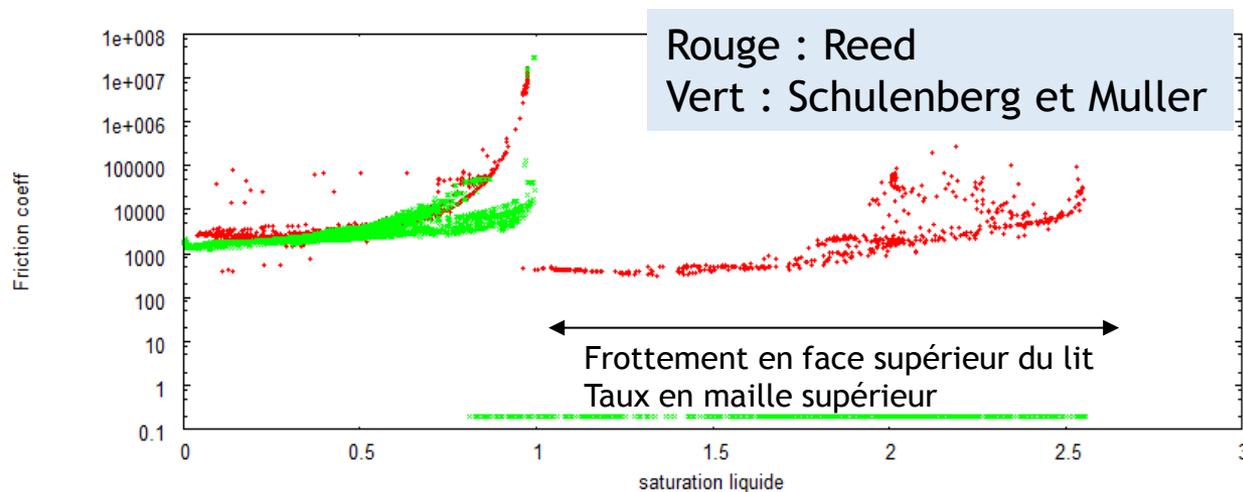
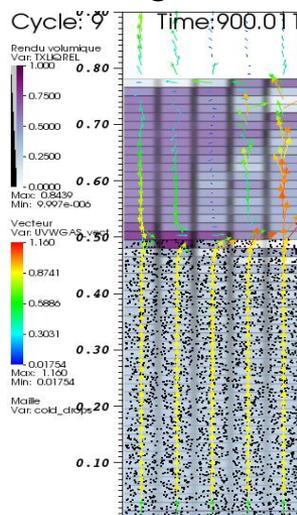
Les incertitudes restent assez nombreuses au final quand aux lois constitutives de couplage et le comportement aux faibles saturations de gaz et de liquide restent mal compris.

- On trouve des corrélations pour les perméabilités et passabilités relatives en
- n et m variant de 3 à 6

$$K_{l,g} = S_{l,g}^n, \eta_{l,g} = S_{l,g}^m$$

Frottements tendant vers l'infini mais avec de fortes différences

- Ne permettent pas de calculer (sans ajustement) un front de propagation d'eau ou de gaz



# Discussion sur le bilan qdm

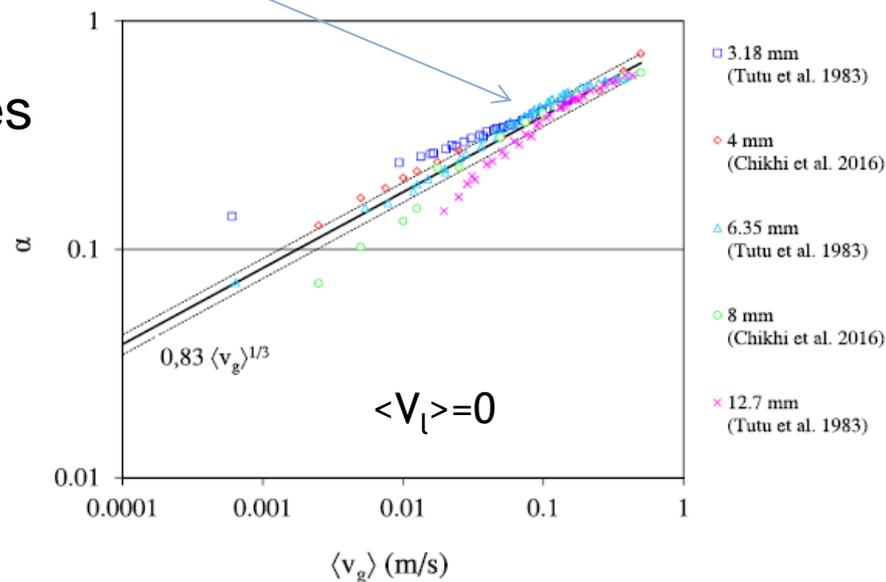
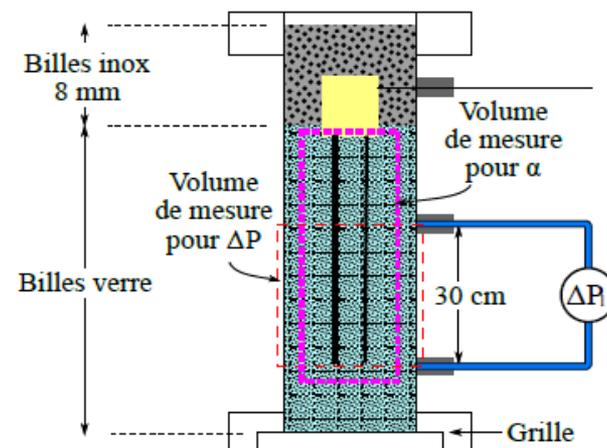
## ■ Expériences de Clavier (IJMF, 2017) dédiés aux écoulements en régime inertiel

- Fort impact du diamètre des billes à faible saturation gaz (faible débit).
- Convergence au-delà d'une certaine vitesse (taux de présence)

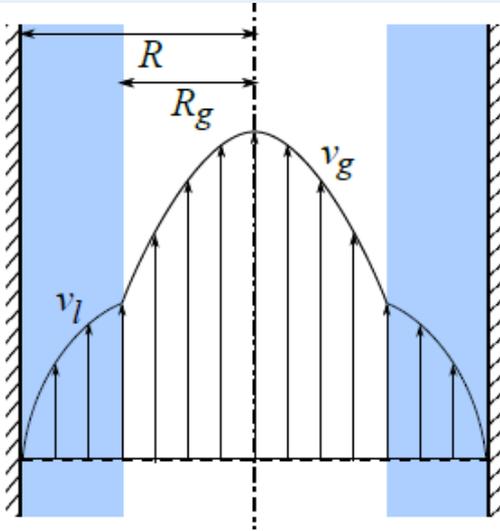
## ■ Absence de données pour les faibles taux de présence de liquide

## ■ Absence de données en contre-courant

=> comportement en renoyage par le haut (contre-courants) ?

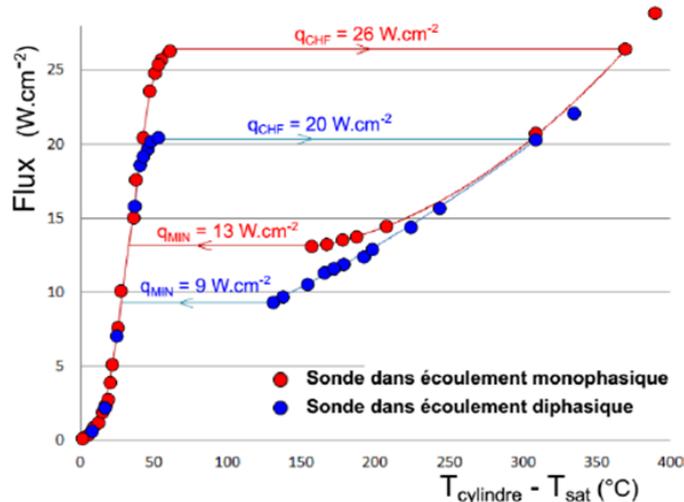


# Discussion sur le bilan qdm



- La configuration en écoulement annulaire prise comme référence pour la mise au point des modèles n'est **pas** pertinente dans de nombreuses situations quand le milieu poreux est chaud :

- Ebullition en film
- Assèchement localisé avec possibilité de présence de gouttes d'eau



- Note : dans les conditions de milieu poreux, l'assèchement des billes intervient à faible surchauffe, dès 50 K

- Les couplages inter-phases ne sont souvent pas pris en compte car sujets à controverses (pourtant, en général, le gaz ne frotte pas avec le poreux mais avec le liquide)

# Discussion sur la forme du bilan qdm

- En régime inertiel, n'y a pas de consensus quand à la forme du bilan de qdm et les lois de fermeture pour le frottement interfacial

- Formulations inertielles type Schulenberg & Muller introduites de manière heuristique

$$F = 350.S_l^7 S_g \frac{\rho_l}{\sigma} \frac{K}{\eta} (\rho_l - \rho_g) g \left( \frac{j_g}{S_g} - \frac{j_l}{S_l} \right)^2$$

- Les modèles de moyennage dits « up-scaling » conduisent à une formulation type (Lasseux, 2008)

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{v}_l \rangle = & - \frac{K_{ll}}{\mu_l} \cdot (\nabla \langle p_l \rangle^l - \rho_l \mathbf{g}) - \mathbf{F}_{ll} \cdot \langle \mathbf{v}_l \rangle \\ & + \mathbf{K}_{lg} \cdot \langle \mathbf{v}_g \rangle - \mathbf{F}_{lg} \cdot \langle \mathbf{v}_g \rangle \end{aligned}$$

- Il est possible de retomber sur la formulation MC3D (en  $V_l - V_g$ ), moyennant la condition de conservation de la qdm

$$K_{if_{\mathcal{E}^i}} = \alpha_l \alpha_{\mathcal{E}} \frac{\mu_l}{K_{ll}} (K_{l\mathcal{E}} - F_{l\mathcal{E}}) = \alpha_l \alpha_{\mathcal{E}} \frac{\mu_{\mathcal{E}}}{K_{\mathcal{E}\mathcal{E}}} (K_{\mathcal{E}^i} - F_{\mathcal{E}^i}) \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \frac{\mu_l}{K_{ll}} K_{l\mathcal{E}} &= \frac{\mu_{\mathcal{E}}}{K_{\mathcal{E}\mathcal{E}}} K_{\mathcal{E}^i} \text{ (Lasseux 1996)} \\ \frac{\mu_l}{K_{ll}} F_{l\mathcal{E}} &= \frac{\mu_{\mathcal{E}}}{K_{\mathcal{E}\mathcal{E}}} F_{\mathcal{E}^i} \end{aligned}$$

# Discussion sur le bilan de qdm

- Clavier a proposé un modèle a partir de ses résultats expérimentaux (ainsi que ceux de Tutu) et de la formulation de Lasseux

*Clavier R., Chikki N., Ficot F., Quintard M., Modeling of inertial multi-phase flows through high permeability porous media : friction closure laws, IJMFT, 91 (2017), 243-261*

- La condition  $\frac{\mu_l}{K_{ll}} K_{lg} = \frac{\mu_g}{K_{gg}} K_{gl}$  est introduite par construction du modèle

- Mais les lois proposés concernant les facteurs inertiels  $F_{lg}$  et  $F_{gl}$

- Ne vérifient pas la condition  $\frac{\mu_l}{K_{ll}} F_{lg} = \frac{\mu_g}{K_{gg}} F_{gl}$
- Ne sont pas fonction de la vitesse des fluides, mais de la taille des billes (effet caché de la vitesse ?)

$$K_{lg} = k_{lg} \frac{\mu_g (1 - \alpha)^2}{\mu_l \alpha}$$

$$K_{gl} = \frac{\mu_l K_{gg} K_{lg}}{\mu_g K_{ll}}$$

$$F_{lg} = K_{lg} \frac{\alpha^3}{\alpha^3 + (1 - \alpha)^n}$$

$$F_{gl} = f_{lg} \alpha^6$$

Des efforts sont encore nécessaires afin de rationaliser le problème

# Conclusions

- Le refroidissement des lits de débris peut être simulé de manière satisfaisantes (au regard des incertitudes) avec les modèles « classiques » dans les situations de noyage par le bas ou de recherche de flux critique en lit noyé.
- Des difficultés importantes apparaissent cependant dans le cas des écoulements contre-courant (top flooding, infiltration d'eau dans les croues chaudes).
- Liées à un certains nombres d'incertitudes/simplifications concernant tant l'hydrodynamique, qui apparait souvent assez mal posée, que le thermique, par le très faible nombre de données expérimentales.
- Des efforts importants restent donc nécessaires pour une modélisation cohérente et complète