

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Enhancing nuclear safety*

# Travaux en lien avec le GDR

PSN-RES/SEMIA - Cadarache

Pierre RUYER, Tony GLANTZ

MEMBER OF

**ETSON**

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANISATIONS  
NETWORK

# Points abordés

- Brève présentation du contexte
- Nucléation
- Transition rapide de régimes d'ébullition
- Ébullition en film à gouttes dispersées
- Ébullition explosive

# Transferts thermiques bouillants dans les scénarios accidentels

## Sûreté nucléaire: une puissance à évacuer

- Le combustible nucléaire est immergé
- Pics de puissance, perte de refroidissement/réfrigérant
- Surchauffe parois de 10 à 2000K, régimes d'ébullition variés
- Conditions +/- transitoires

## Des transferts à évaluer

- IRSN analyse techniquement des dossiers de sûreté et mène des recherches dans le domaine

## Des programmes de R&D

- Programmes d'essais sur réacteurs de recherche (CIP), Projets ANR PERFROI & DENOPI, installations grande échelle  
Développement de logiciels de simulation
- Recherche orientée sur des phénomènes plus élémentaires

# Transferts thermiques bouillants dans les scénarios accidentels

## Collaborations des 5 dernières années

### Chercheurs

- Catherine Colin
- Julien Sebilleau
- Michel Gradeck
- Alexandre Labergue
- Romuald Rullière
- Marc Clause
- Philippe Haberschill
- Yann Bartosiewicz
- Matthieu Duponcheel

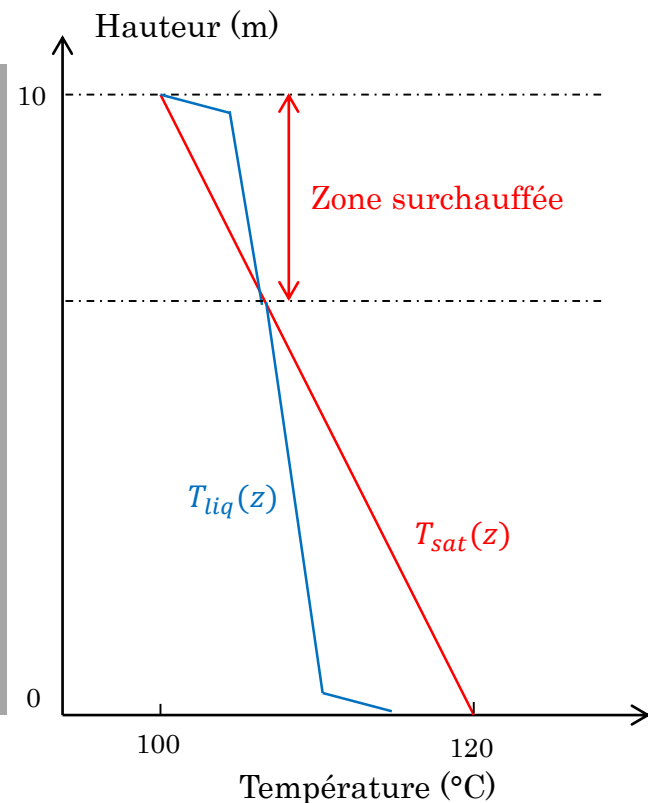
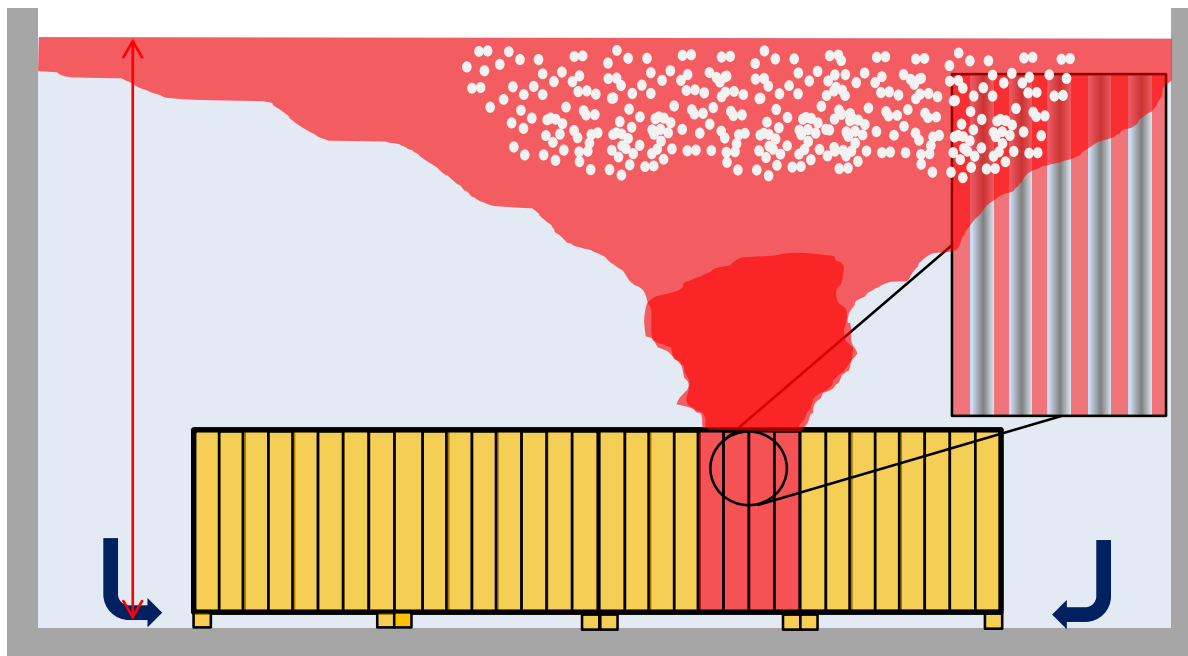
### Doctorants- post-doctorants

- Nicolas Baudin
- Valentin Scheiff
- Adrien Abatte
- Jean Muller
- Juan-David Pena Carrillo
- Arthur Vieira Da Silva
- Juan Luna
- Jimmy Martin



# Nucléation sur paroi non chauffée

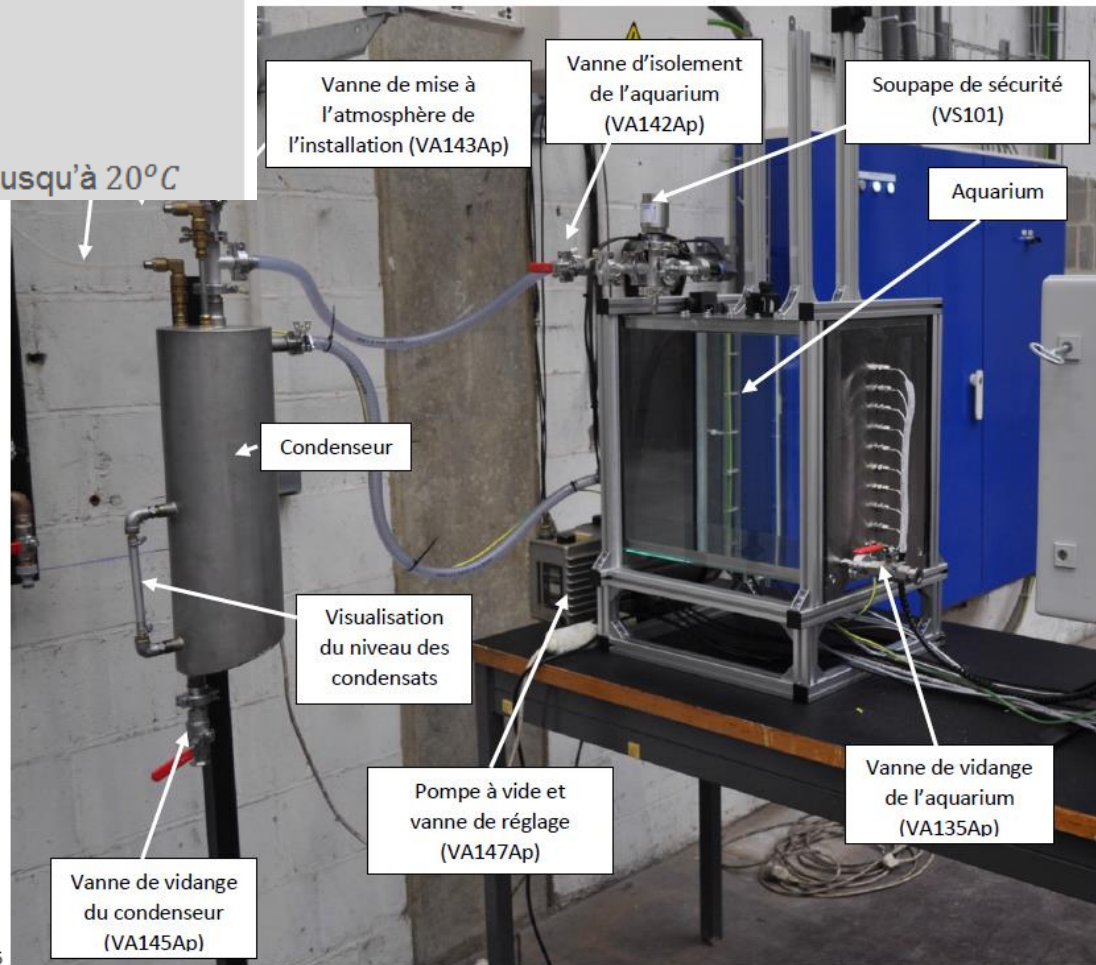
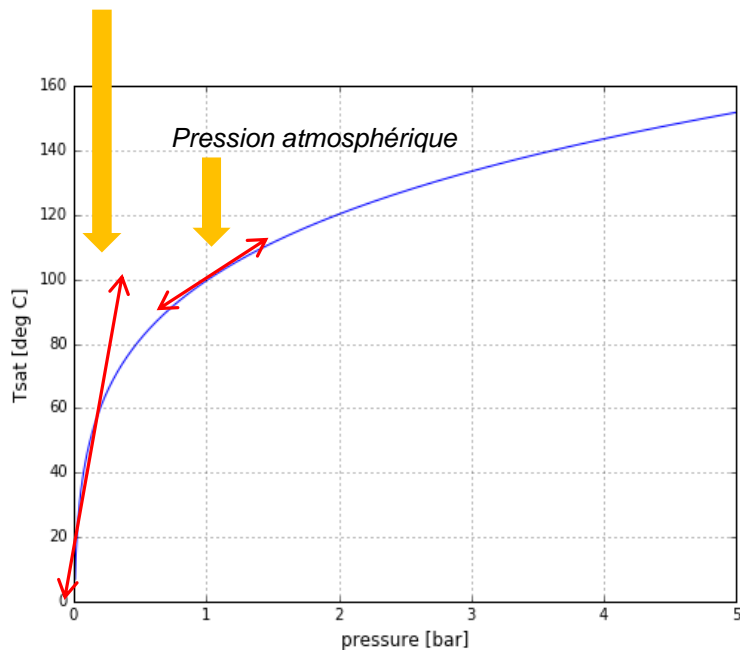
- Piscine d'entreposage de combustible en situation de perte de refroidissement: création de vapeur par évaporation à la surface libre vs nucléation



# Nucléation sur paroi non chauffée

- Hauteur d'eau : 40 cm
- Volume d'eau : 40 L
- Source de chaleur : 1 kW
- Pression de ciel :  $\approx 20 \text{ mbar} - 1 \text{ bar}$
- Différence verticale de température de saturation : jusqu'à  $20^\circ\text{C}$

Domaine des basses pressions



# Nucléation sur paroi non chauffée

Des effets d'histoire: germes d'incondensables ?

1<sup>er</sup> essai : après remplissage du dispositif



2<sup>ème</sup> essai : sans remise à l'atmosphère du volume d'eau



# Nucléation sur paroi non chauffée

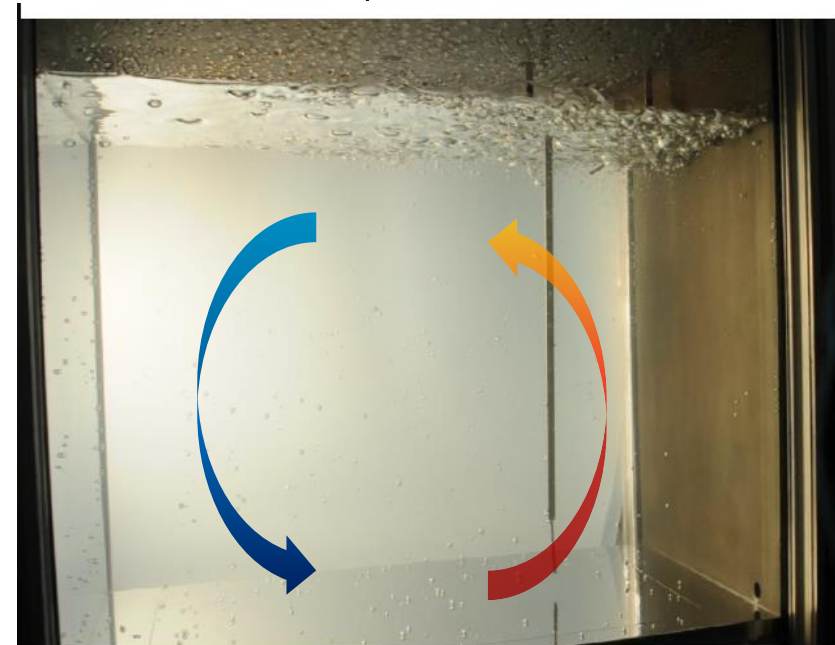
Des phénomènes violents





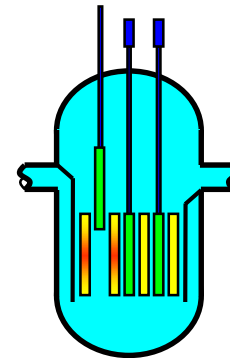
# Nucléation sur paroi non chauffée

- Des campagnes expérimentales
- Développement d'une instrumentation (acoustique) caractérisant les spectres de taille des germes
- Modélisation de la nucléation/croissance
- Modélisation numérique CFD moyennée diphasique (évaporation à la surface libre + flashing)



# Vers l'ébullition en film lors d'un échauffement rapide

- Perte de contrôle de la réactivité: énergie déposée très rapidement dans les crayons de combustible
- Élévation rapide de la température des gaines
  - De la conduction transitoire à l'ébullition en film
  - En passant par l'ébullition nucléée ?
  - Quelles lois d'échange ? Quels critères de changement de régime ?



Reactor Power  
& fuel Temperature

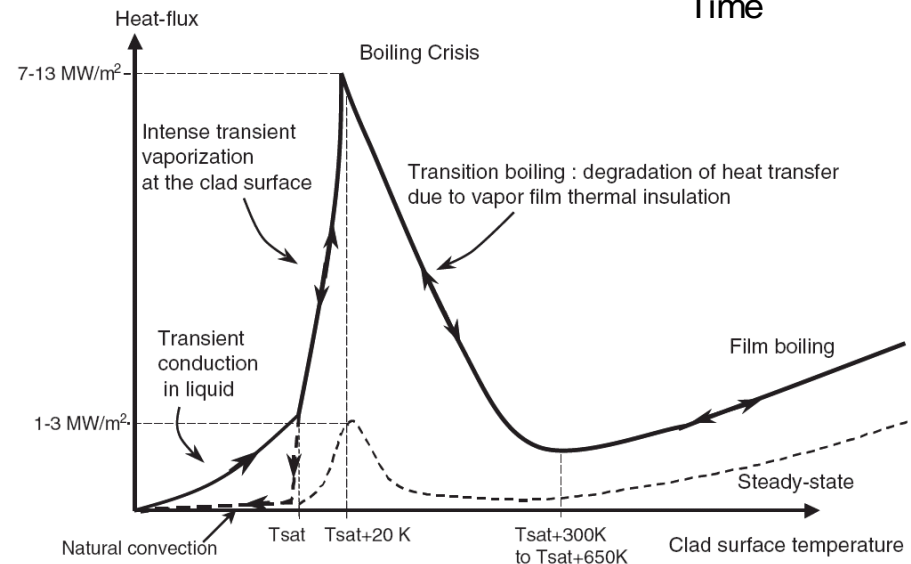
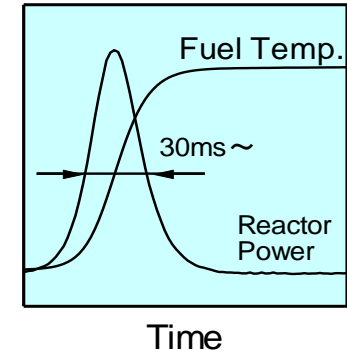


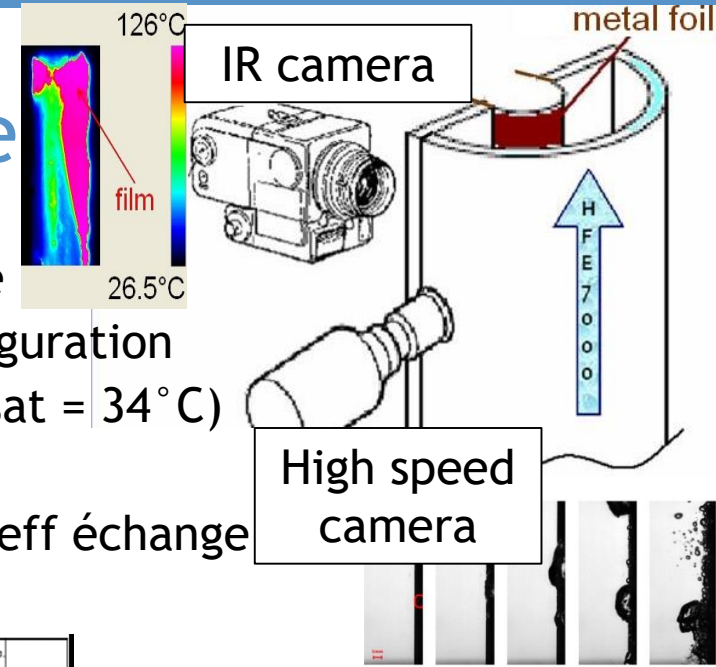
Fig. 14 Schematic view of the experimental boiling curve in the NSRR Tests

Besson et al. ,Clad-to-Coolant Heat Transfer in NSRR Experiments  
Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 44, No. 5, p. 723–732 (2007)

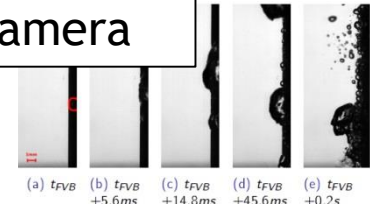
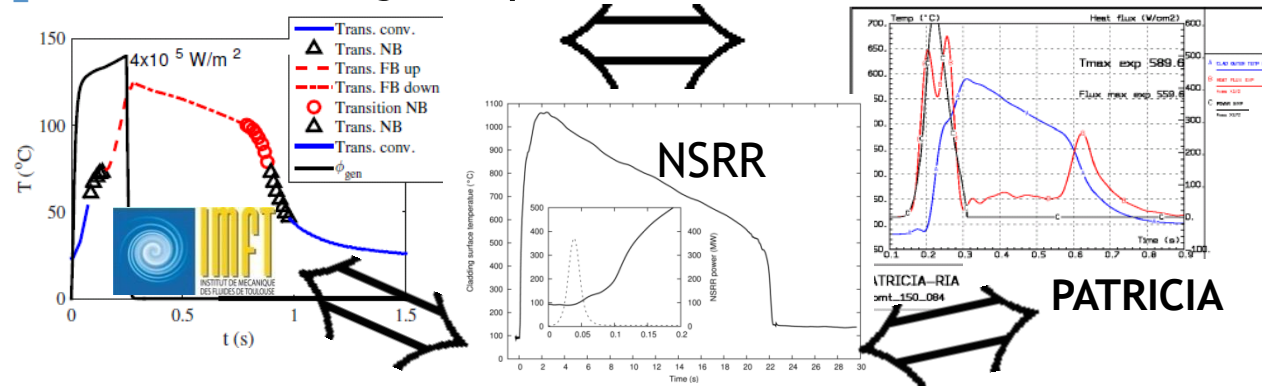
# Simulation expérimentale

Recréer des conditions d'ébullition transitoire

- Chauffage par effet Joule à puissance contrôlée
- Géométrie semi-annulaire reproduisant la configuration
- Écoulement turbulent sous-refroidi HFE7000 ( $T_{sat} = 34^\circ\text{C}$ )
- Faibles énergies et températures
- Clinquant peu épais: mesure température et coeff échange

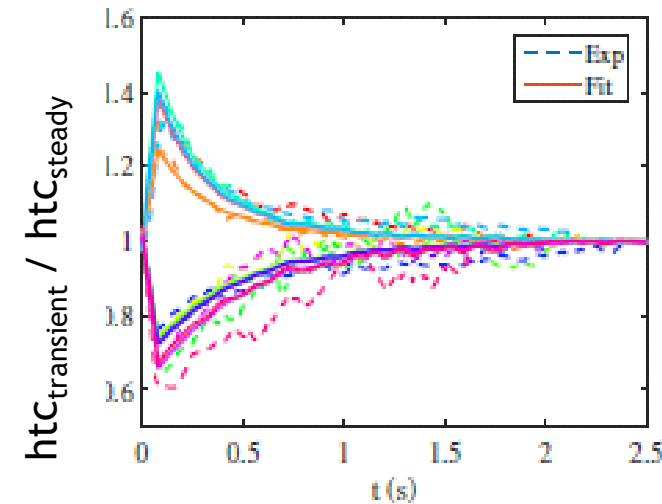


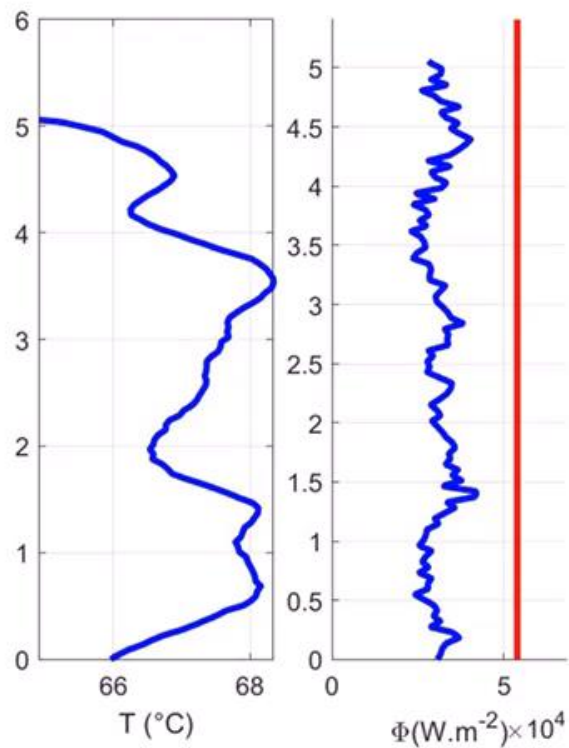
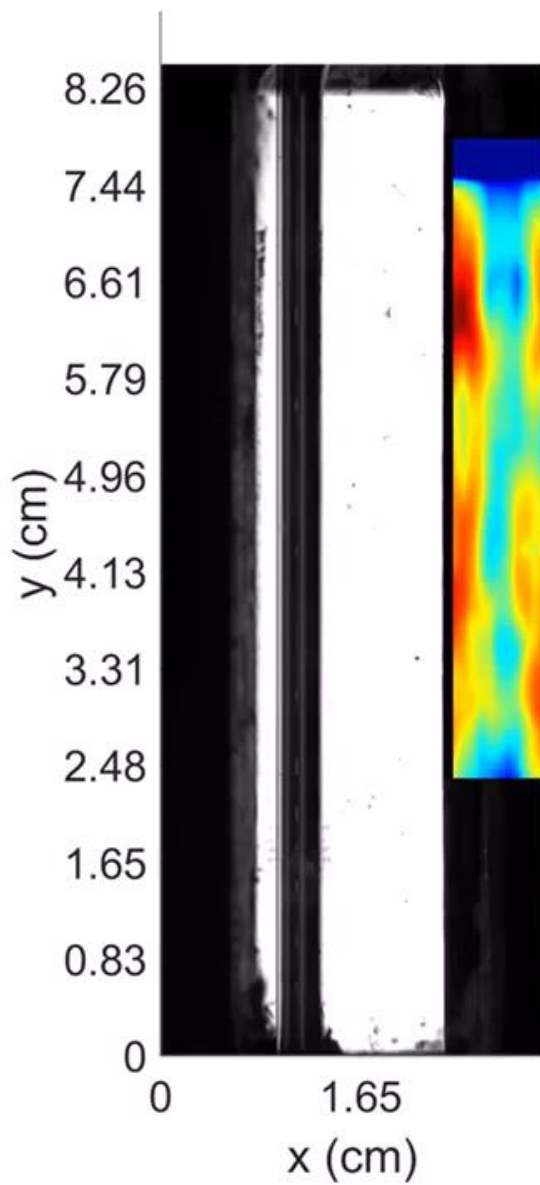
Phénoménologie reproduite et instrumentée



Influence de la cinétique de chauffe

- Relaxation vers des coeff. d'échange stationnaires
- Analyse couplée vidéo-thermique





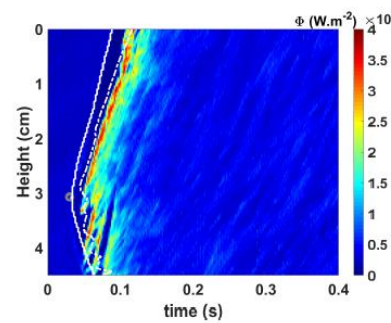
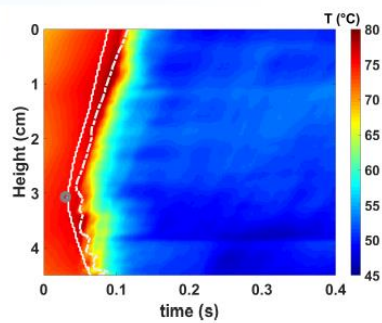
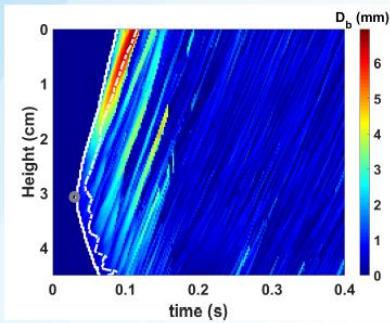
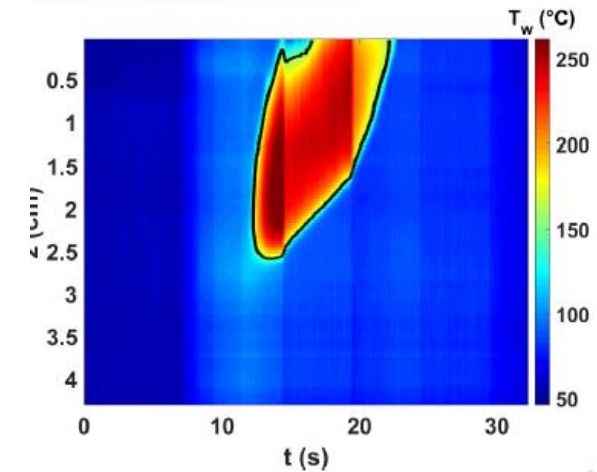
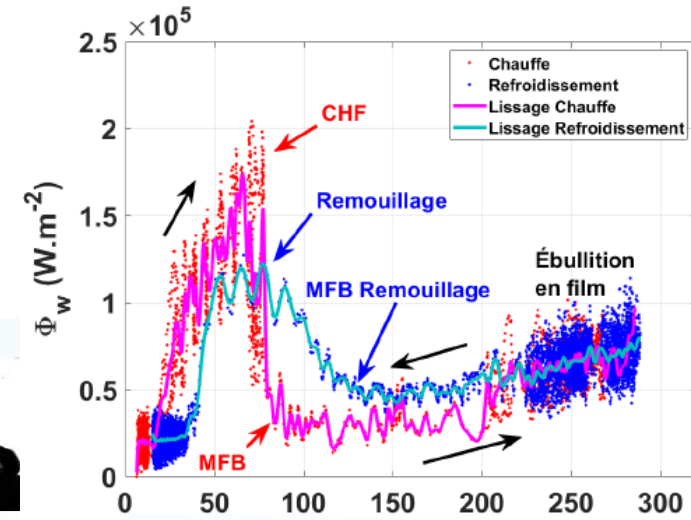
# Phénoménologie propre à l'ébullition lors d'un échauffement rapide



When there is enough energy to trigger a nucleation site, a large bubble will spread on the wall.



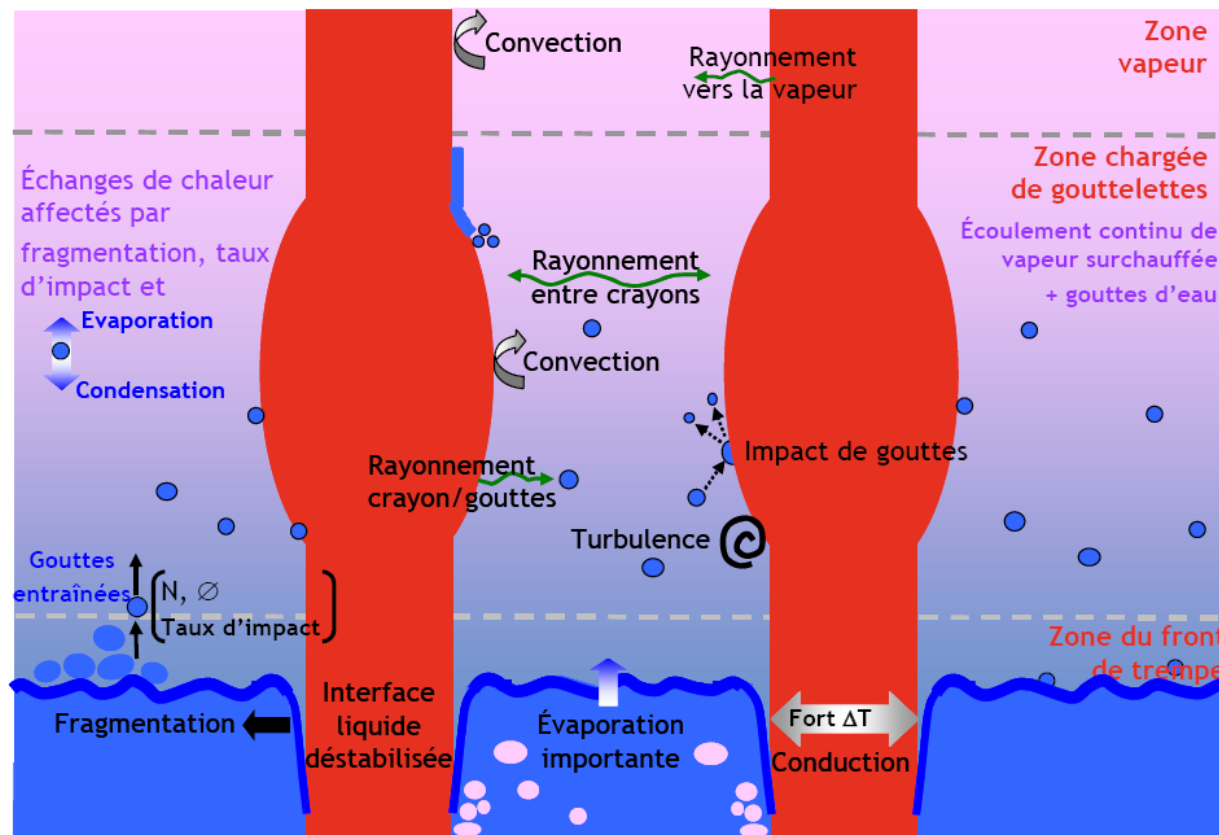
This bubble affects locally and significantly the temperature field and heat transfer.



Continuation de l'activité avec collaboration France-USA : dispositifs fonctionnant avec de l'eau aux conditions haute pression haute température

# Perte de réfrigérant - renoyage

➔ Des transferts avec un fluide en forts déséquilibres



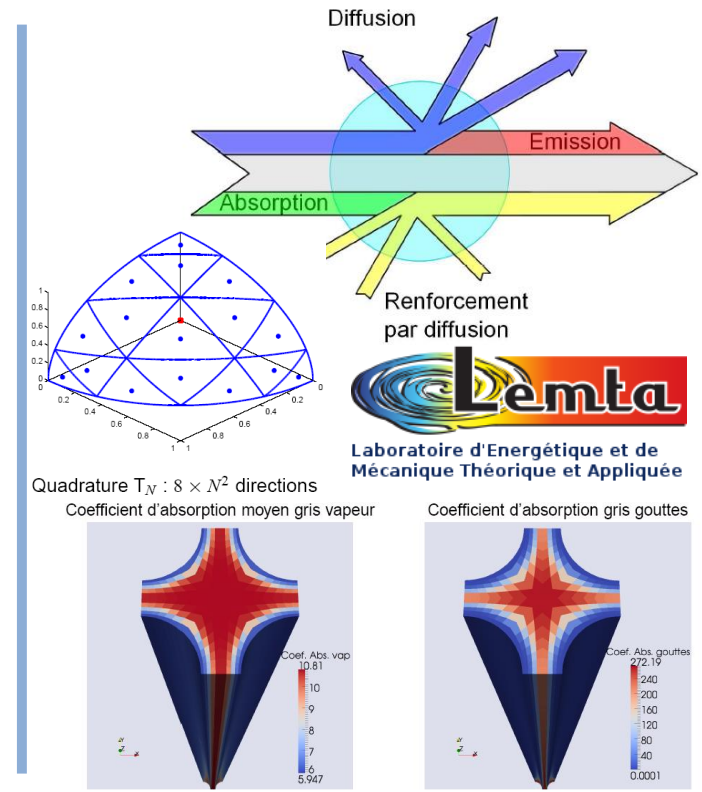
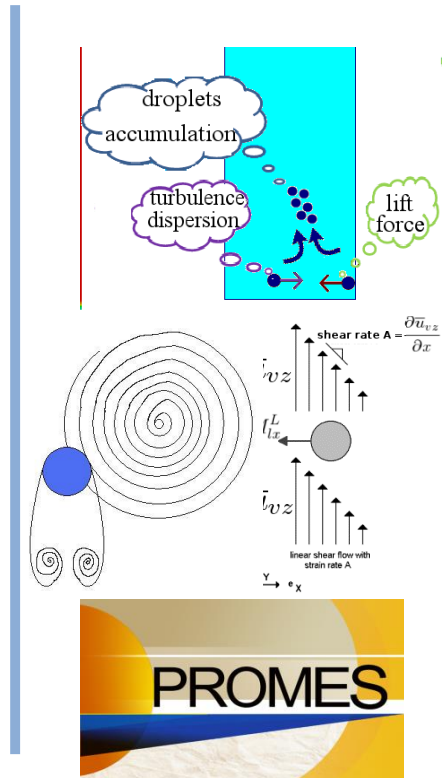
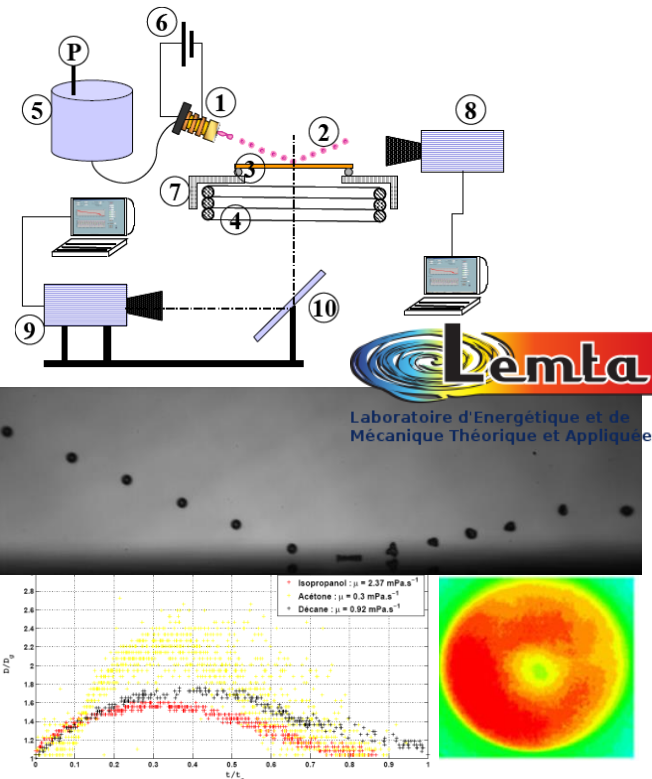
➔ Quel mécanisme prépondérant ?

➔ Quelle influence de la géométrie ?

# Mécanismes de transfert

Travaux antérieurs sur l'évaluation de chacun des phénomènes

Chaleur extraite par impact de gouttes + dynamique des gouttes + transferts radiatifs



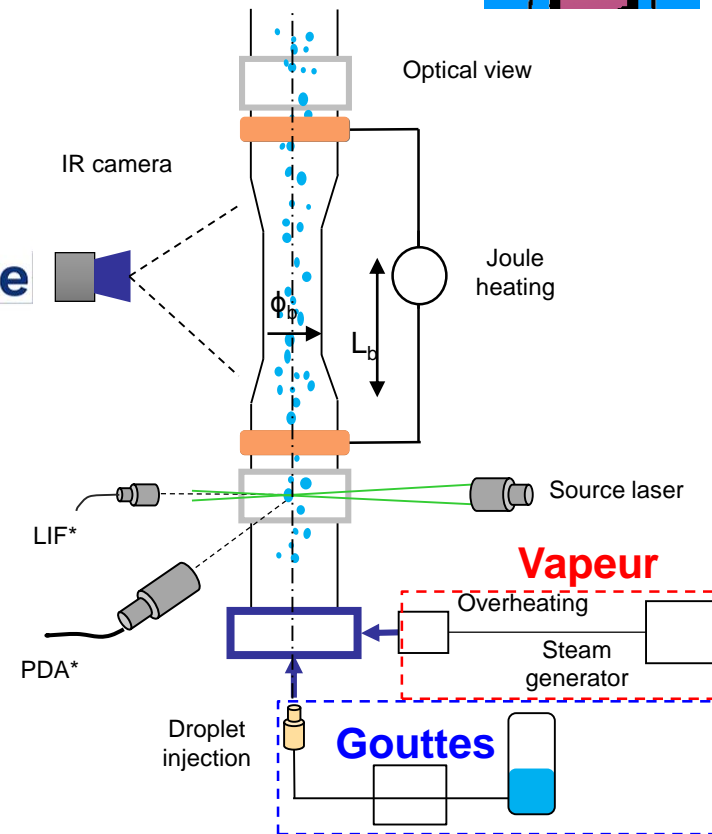
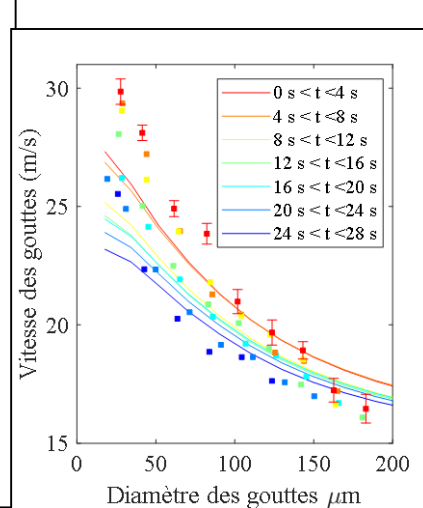
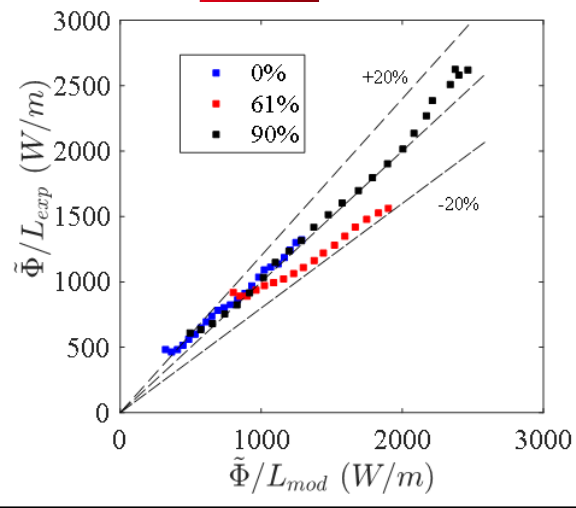
Modélisations intégrées dans une approche CFD Euler-Euler: validation ?

# Transferts paroi-écoulement à gouttes dispersées

- Distributions en taille et vitesse des gouttes en aval et en amont de la section d'essai
- Caractérisation conjointe des transferts thermiques et de la population de gouttes
- Validation des modélisations et corrélations à l'échelle de la CFD



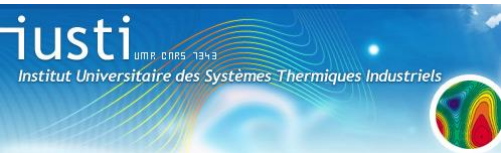
Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée





# Ébullition explosive

Un transfert de chaleur et de masse plus rapide que le temps de relaxation mécanique du fluide



CETHIL

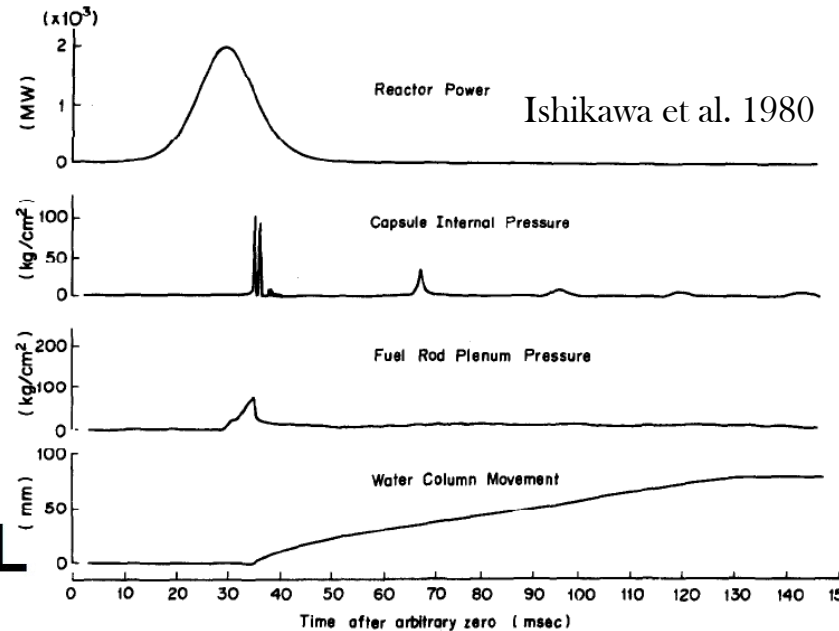
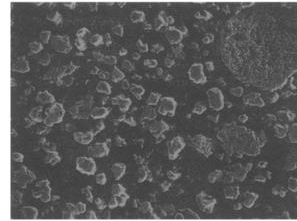
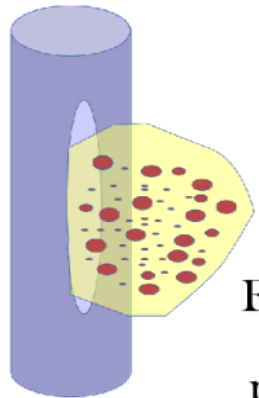
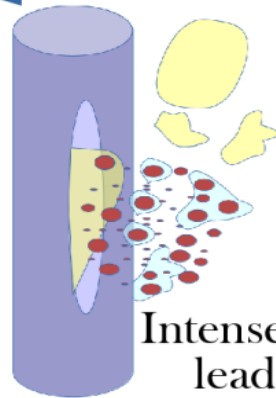


Fig. 31. Transient data in the waterlogged fuel rod irradiated at 156 cal/g UO<sub>2</sub>.

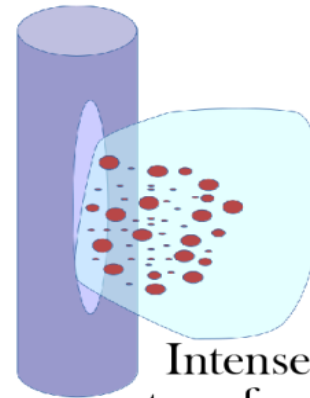
Thermal interaction



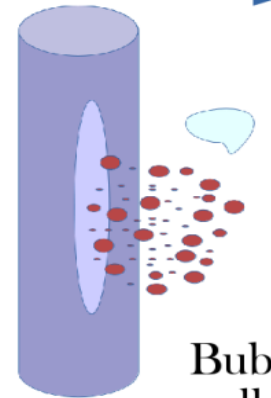
Ejection of solid fuel particles + fission gas



Intense heat transfer leading to local pressure increase



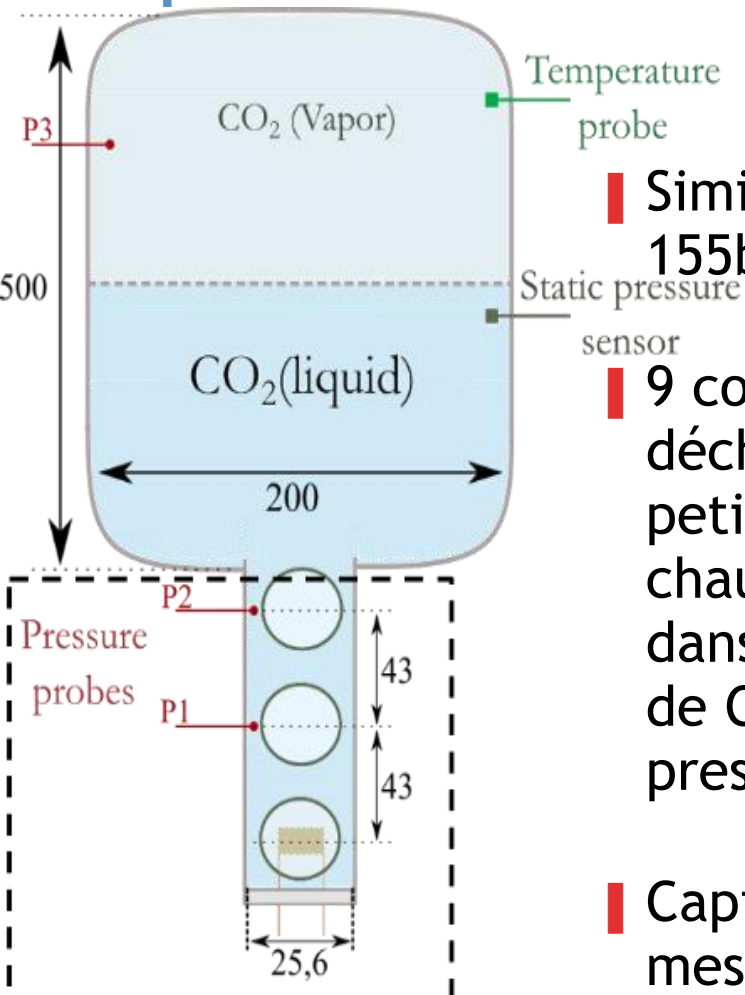
Intense mass transfer + large vapor pocket



Bubbles collapse

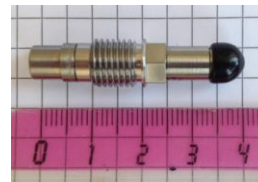
Données cible: pic de pression et taille de la poche de vapeur

# Interaction thermique reproduite en laboratoire

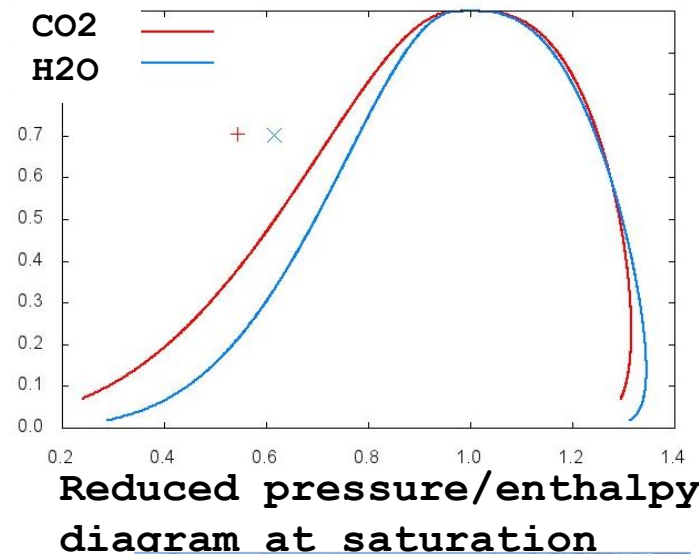


■ Similitude  $H_2O/CO_2 \Rightarrow 155b, 300^\circ C / 20b, -6^\circ C$

■ 9 condensateurs se déchargent dans un petit élément chauffant immergé dans un tube rempli de  $CO_2$  liquide pressurisé



■ Capteurs de pression, mesure de la température + visu

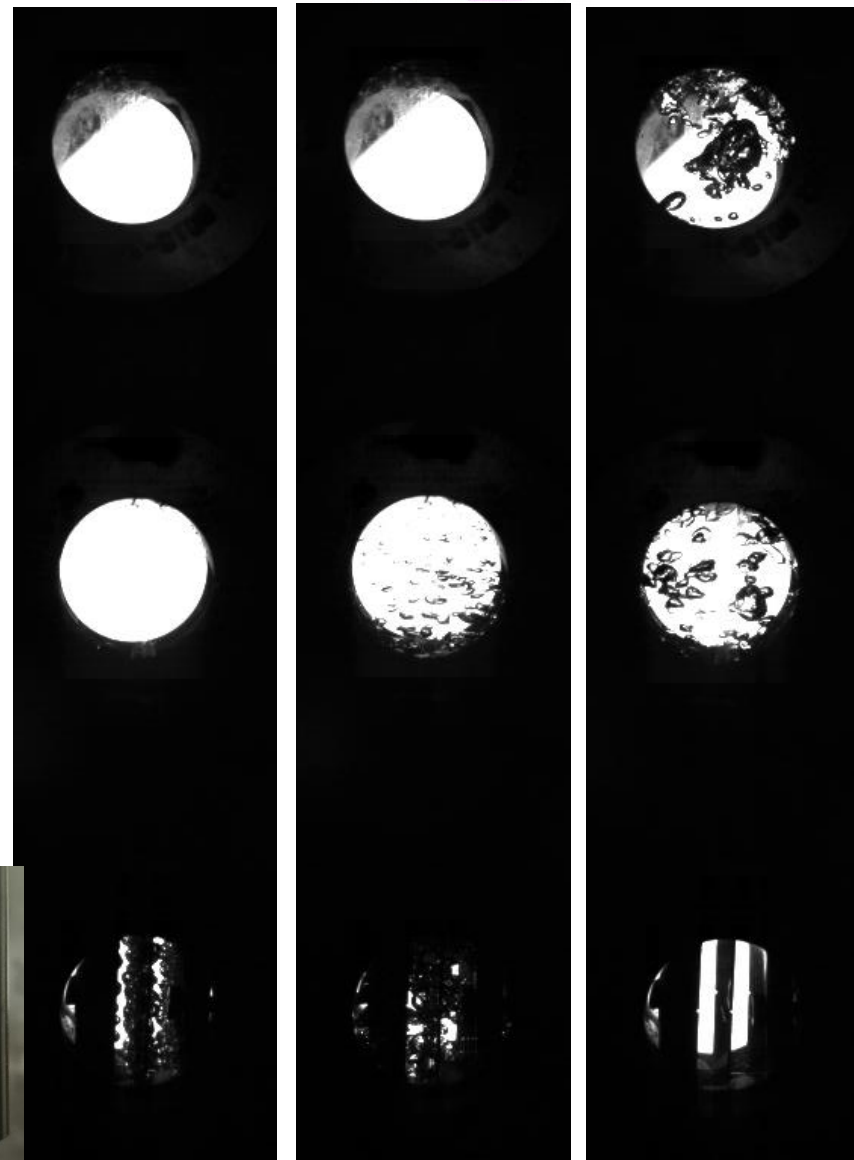
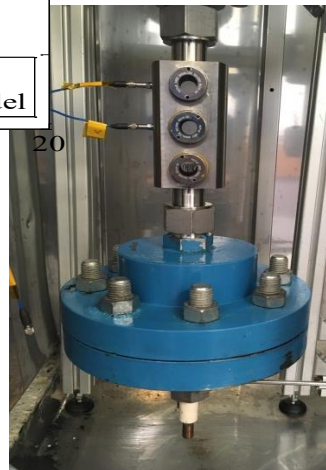
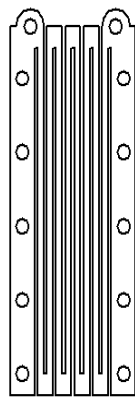
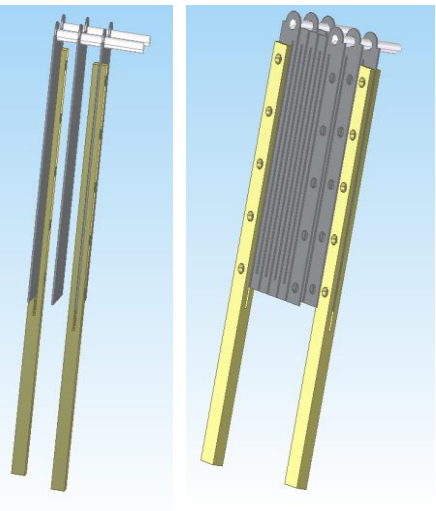
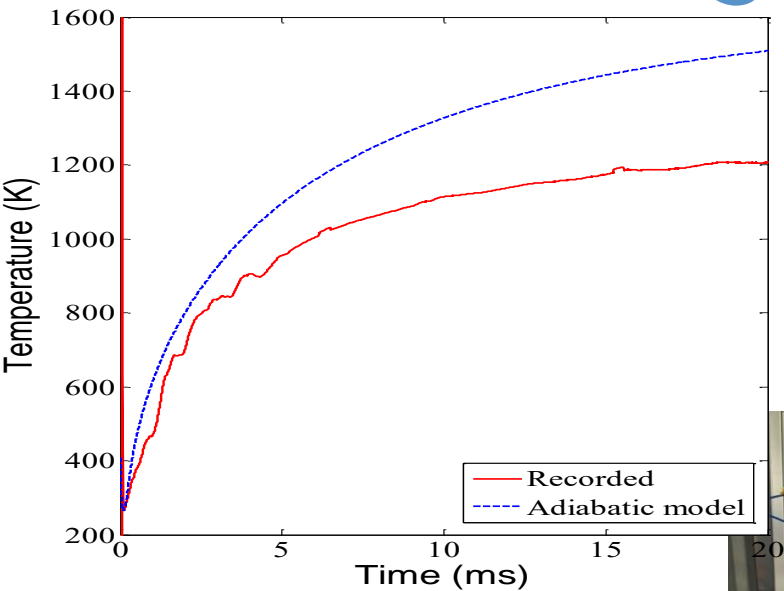


**CETHIL**

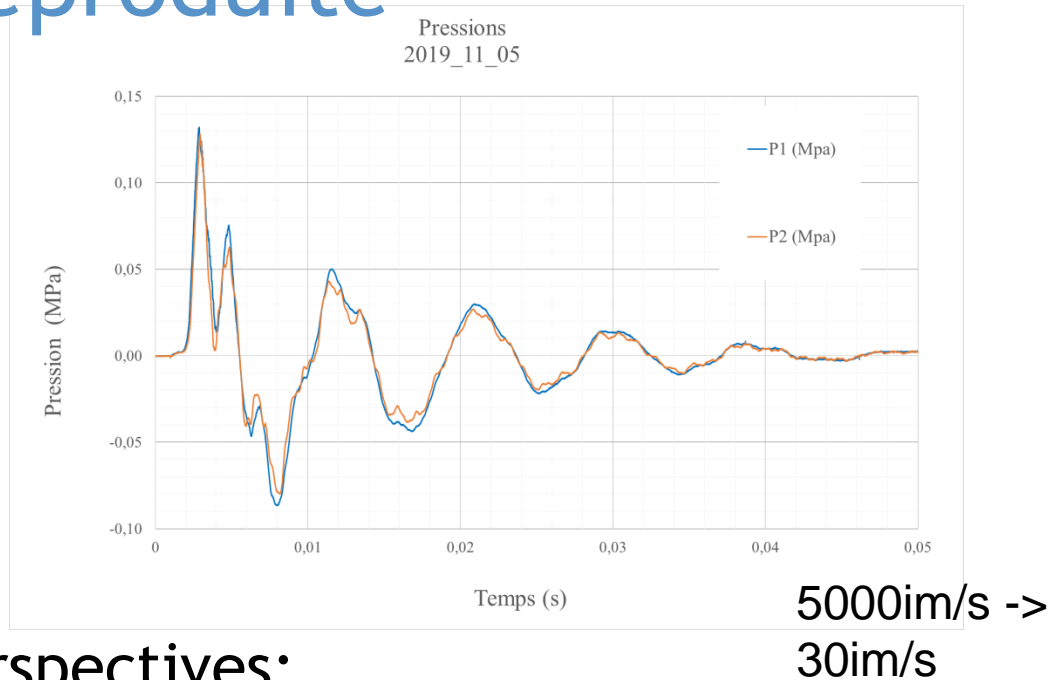
# Phénoménologie reproduite



CETHIL

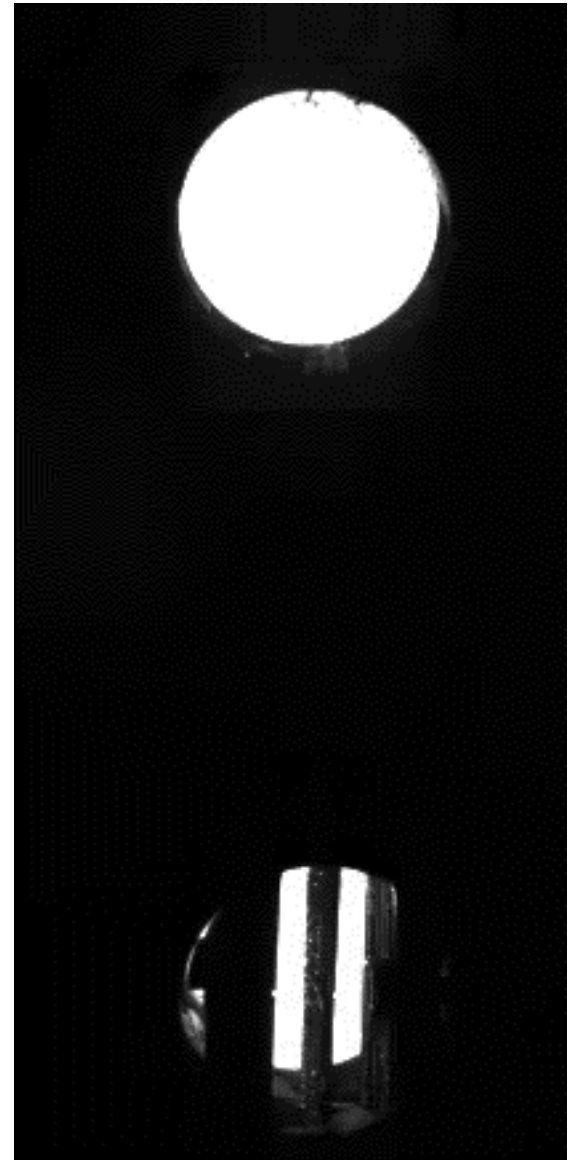


# Phénoménologie reproduite



## Perspectives:

- Analyse synchronisée des signaux: estimation de la dynamique de vaporisation vs transferts vers le  $\text{CO}_2$  vs pression
- Modélisation analytique et simulation numérique



# Activités en lien avec le GDR

- Aspect expérimentaux, de modélisation et de simulation numérique des phénomènes de changement de phase en relation avec l'évaluation des transferts de chaleur
- Des situations stationnaires, transitoires, voire très transitoires
- Des collaborations avec des membres du GDR, des besoins de développer des dispositifs originaux, de l'instrumentation, de la modélisation
- Projet d'organiser un séminaire d'échanges sur les phénomènes d'ébullition transitoires: dans le cadre du GDR ?
- 2 sujets de thèse en ligne (site GDR + site IRSN)
  - Étude expérimentale et numérique des écoulements diphasiques et des interactions fluide-structure au sein d'un faisceau tubulaire
  - Ébullition transitoire lors d'un RIA : étude expérimentale depuis des conditions analytiques à des conditions réacteur
- Les travaux sur l'ébullition transitoire et explosive sont co-financés par EDF dans le cadre d'un programme de collaboration.