

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS  
DIPHASIQUES POUR LES ÉTUDES DE  
CONCEPTION ET DE SÛRETÉ DES  
RÉACTEURS NUCLÉAIRES

*CEA-Saclay, DEN/DM2S/STMF*

- Le contexte général de la thermohydraulique
- And the specific context of Pressurized Water Reactors (PWR)
- Some aspects of modeling
- 2 applications

# Objectifs de la thermohydraulique pour les réacteurs nucléaires

- Dans un réacteur la chaleur est produite au sein du cœur par la réaction de fission
- La thermohydraulique des réacteurs est l'étude de tous les phénomènes thermiques et hydrauliques liés à l'évacuation de l'énergie produite par la fission nucléaire au sein du cœur.
- Le contexte du nucléaire
  - Limitation des rejets radioactifs
  - Maintenir le système dans un état sûr le plus rapidement possible en cas d'accident
- Nécessité d'analyse de tous les incidents et accidents potentiels pouvant intervenir au cours de la vie de la centrale et mise en œuvre des moyens d'intervention appropriés

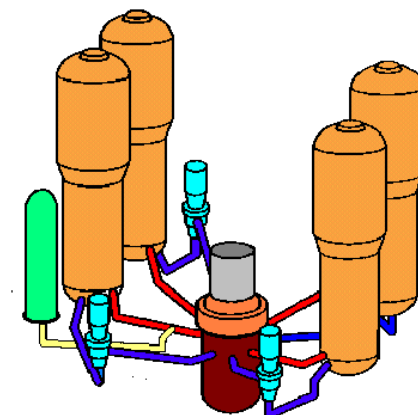
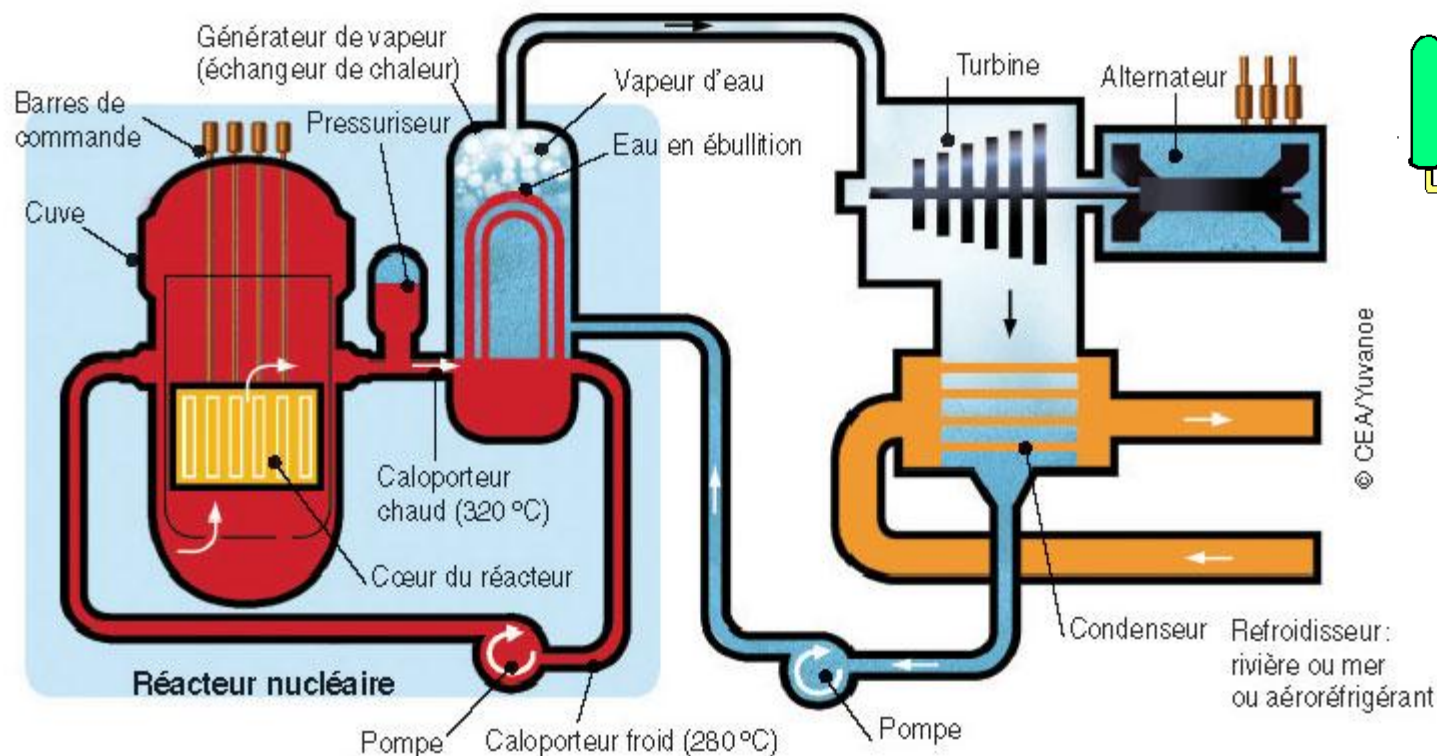
- Eau : Réacteur à Eau Pressurisée, Réacteur à Eau Bouillante, Réacteur à Eau Lourde, ...
- Métaux liquides :
  - Sodium liquide : RnRNA
  - Plomb
- Gaz :
  - CO<sub>2</sub> : UNGG
  - He : Réacteur à Très Haute Température (VHTR)
- Sels fondus
- ...

Le choix du caloporteur est guidé par les caractéristiques

- Thermiques :  $\lambda, \rho c_p,$
- Neutroniques : modération, absorption, ...
- De compatibilité : corrosion, interaction Na-H<sub>2</sub>O

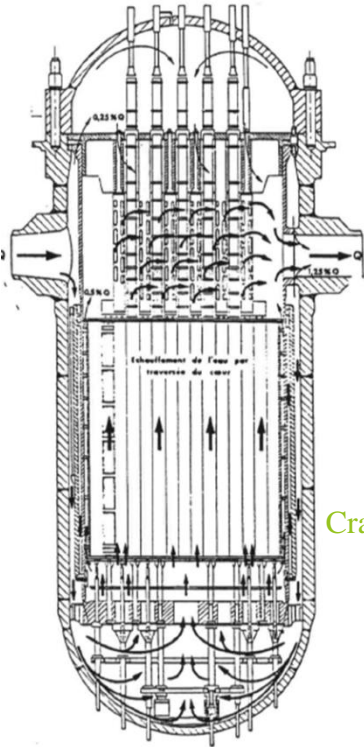
# Le circuit hydraulique d'un REP

Schéma de principe d'un réacteur à eau sous pression

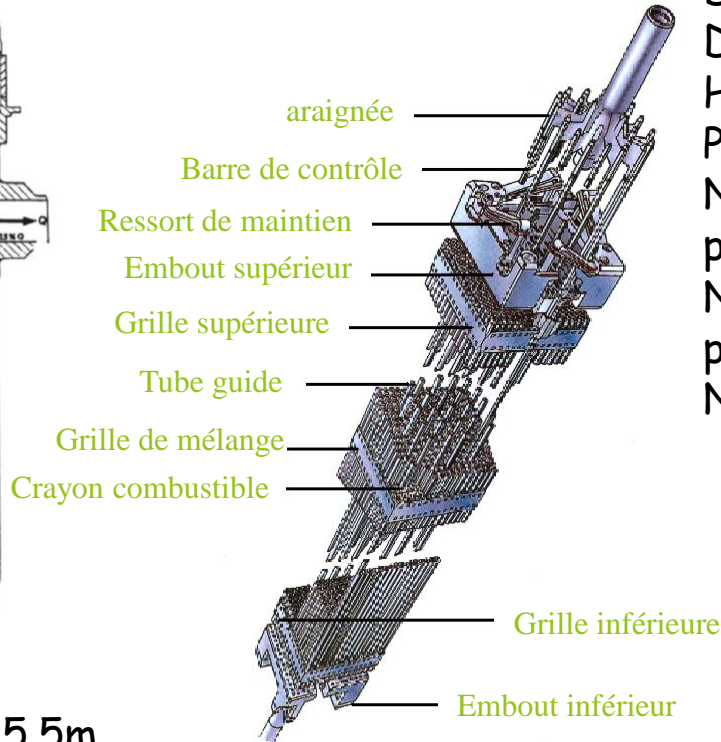


$$295^{\circ}\text{C} < T_{\text{cuve}} < 330^{\circ}\text{C}, T_{\text{sat}} = 345^{\circ}\text{C} \text{ à } P=155 \text{ bars}$$

# La cuve, le cœur, les assemblages d'un REP

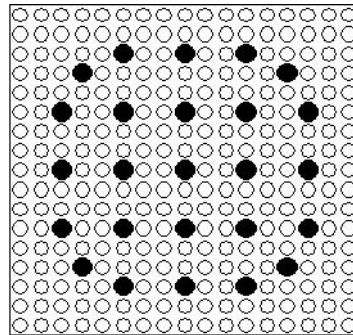


Cuve : H=13m, Ø=5.5m



Diamètre crayons UO2	0.95cm
Diamètre tube guide	1.20 cm
Hauteur chauffante	4.27 m
Pas du réseau	1.26 cm
Nombre de crayons UO2 par assemblage	264
Nombre de tube-guide par assemblage	25
Nombre d'assemblages	150 à 200

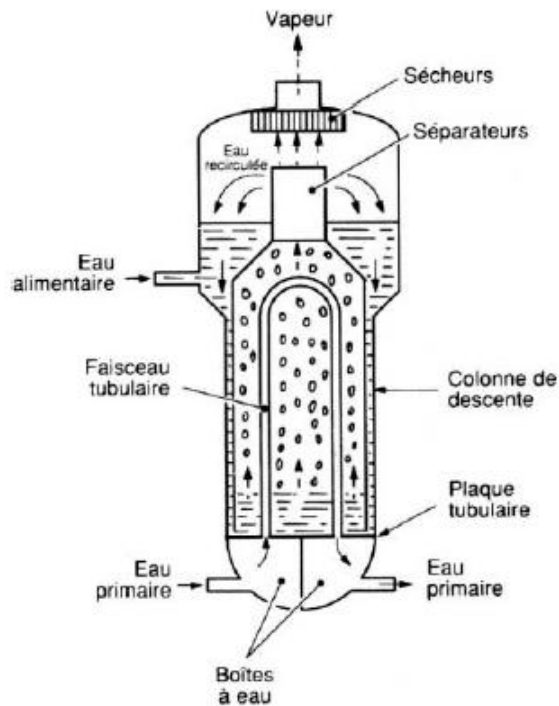
**Les puissances de calcul disponibles ne permettent pas actuellement une simulation numérique précise complète de la cuve**



Assemblage : 17 x 17  
crayons en réseau à pas carré



# Le Générateur de Vapeur (GV) d'un REP



## Caractéristiques principales (EPR) :

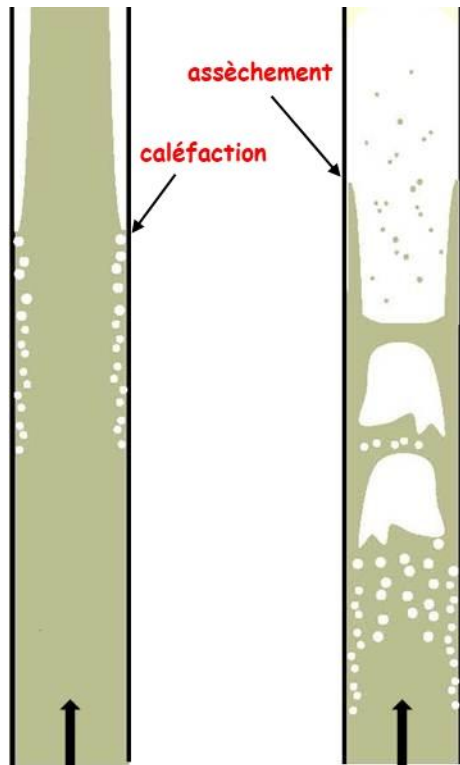
■ Hauteur	20.6 m
■ Diamètre	3.4 - 4.4 m
■ Environ 4500 tubes en U inversé	
■ Masse	300 t
■ Puissance	1000 MW th
■ Surface d'échange	7000 m <sup>2</sup>
■ Flux de chaleur	150 kW/m <sup>2</sup>

**Modélisation diphasique du secondaire**

# Pourquoi la modélisation thermohydraulique pour les études de sûreté ? L'exemple de la crise d'ébullition

La crise d'ébullition conduit à une dégradation du flux thermique en paroi. Elle se manifeste pour deux régimes d'écoulement :

- Caléfaction ou DNB
- Assèchement ou dry-out



Déroulement de la crise d'ébullition (caléfaction) :

- Chauffage du liquide par flux thermique paroi → liquide fonction de l'état du fluide caloporteur
- Démarrage de la nucléation en paroi  
⇒ utilisation du flux thermique en chaleur latente de vaporisation
- Création d'un film de vapeur en paroi  
⇒ diminution rapide du coefficient d'échange en paroi.
- Augmentation de la température de la gaine

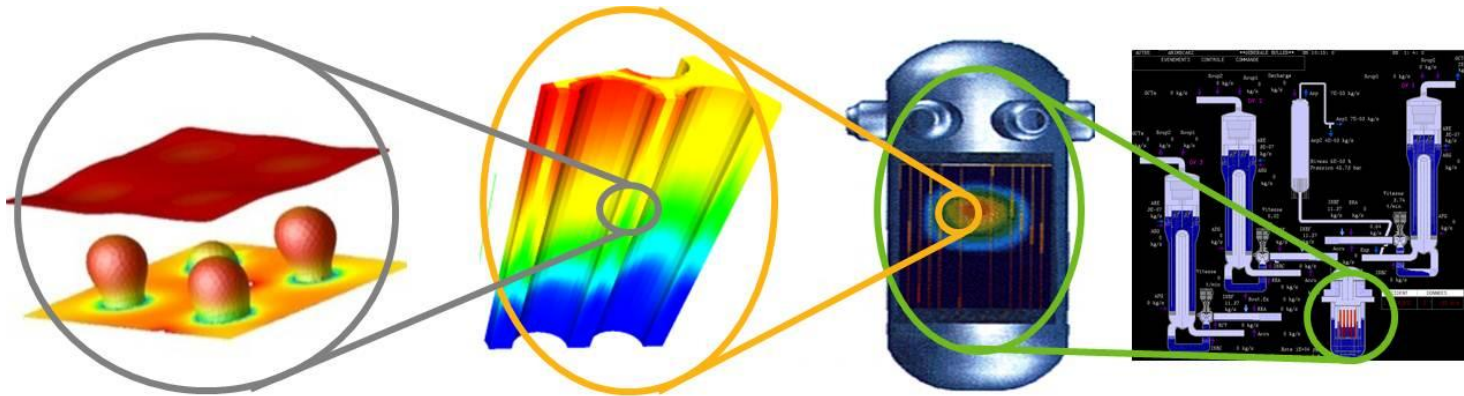


Fragment de grappe ayant subi une crise d'ébullition



# Les échelles de la modélisation thermohydraulique des réacteurs

La modélisation thermohydraulique des réacteurs nucléaires repose sur une vision multi-échelles.



*Locale instantanée (DNS)*

$1\mu\text{m} < L < 1\text{mm}$

*3D locale (C(M)FD)*

$1\text{mm} < L < 1\text{cm}$

*Composant*

$L \sim 1\text{cm}$

*Système*

$1\text{m} < L < 10\text{m}$

- DNS ou pseudo-DNS : nécessite une « modélisation » de phénomènes dépendant de l'échelle inférieure : coalescence, fragmentation, parois
- CMFD : code NEPTUNE\_CFD (CEA-EDF)
- Echelle composant: représentation homogénéisée de la géométrie (modélisation « poreuse »). Composants « cœur » et « Générateur de vapeur »
- Echelle système : modélisation essentiellement 1D avec quelques éléments 3D « sous-discrétisés » en maillage

# La thermohydraulique : La discipline du couplage

## ➤ Les couplages multi-physiques

### ■ Neutronique

$$\rightarrow \Phi_n \rightarrow Q_f, \varphi_f \rightarrow T_f, \rho_f \rightarrow \sigma_n(T_f, \rho_f) \rightarrow$$

- En général couplages explicites
- Travaux en cours sur les propriétés mathématiques de modèles simplifiés Th-N

### ■ Mécanique

En général chaînages Th→M (P. ex.: calcul des déformations des crayons)

### ■ Chimie

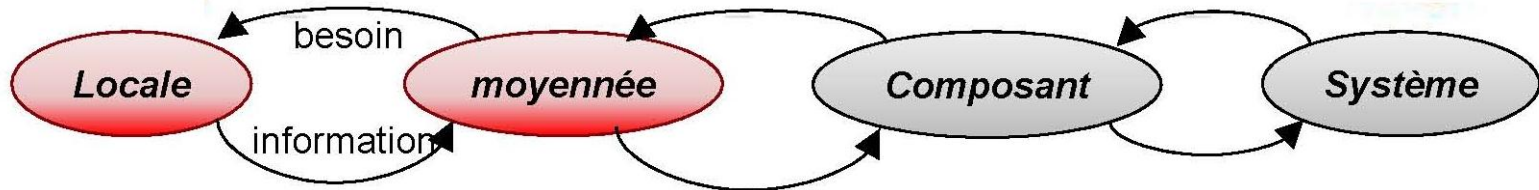
Transport de radioéléments dans les circuits des réacteurs

### ■ Matériaux

Corrosion, production d'H<sub>2</sub> par radiolyse des gaines de combustible

## ➤ Les couplages multi-échelles

### ■ « Remontée d'échelles »



### Extraire de simulations fines des informations pour les modèles moyennés :

- Ex. : à partir d'un calcul DNS déduire une modélisation de la turbulence dans un écoulement à bulles pour une simulation de type CMFD.

### ■ Couplage de modélisations à différentes échelles

- Couplage fort (implicite, interfacial) modélisation 1D - modélisation multiD
- Couplage faible (explicite, interfacial) échelle système - échelle CMFD : Cathare - Neptune\_CFD
- Couplage extra faible : technique de zoom.

# Les modèles diphasiques utilisés pour les réacteurs nucléaires

D'après E. Goncalves, modélisation et simulation de la cavitation :

modèles	7 équations	6 équations	4 équations	3 équations
équations	2 masses 2 QdM 2 énergies + $\alpha$	2 masses 2 QdM 2 énergies	1 masse 1 QdM 1 énergie + $\alpha$	1 masse 1 QdM 1 énergie
caractéristique	2 pressions 2 vitesses 2 températures	1 pression 2 vitesses 2 températures	1 pression 1 vitesse 1 température	1 pression 1 vitesse 1 température
propriétés	hyperbolique	Hyperbolique suivant valeur de $P_l$	$v_g - v_l = v_{\text{drift}}$	T=Tsats
dénominations	2-fluides	2-fluides	HRM ou « de dérive » ou « de drift »	HEM
codes	Système : RELAP-7	Système : Cathare, RELAP-5 CMFD : Neptune	Composant cœur : FLICA-4	Composant GV : Génépi

# Les modèles diphasiques utilisées pour les réacteurs nucléaires

Autre modèle :

modèle à 3 champs représentant par exemple un champ vapeur continu, un champ liquide dispersé (gouttes) un champ liquide en film le long des parois ou bien liquide continu, vapeur « dispersé » (bulles), vapeur en film à la paroi (caléfaction)

Tous les modèles utilisés dans l'industrie nucléaire requièrent une « modélisation physique » pour différents termes du système d'équations : **les lois de fermeture.**



Procédures de validation, évaluation des incertitudes et qualification des lois de fermeture (V U Q)

En ce qui concerne l'utilisation des corrélations de flux critique [redacted] pour les assemblages de combustible [redacted] devant être chargés dans le réacteur EPR de Flamanville 3, l'ASN vous demande de compléter la base expérimentale initiale et de mettre à jour vos notes en références [2] et [3] afin de répondre aux demandes de compléments figurant en annexe 1 avant toute utilisation dans les études des conditions de fonctionnement de référence du rapport de sûreté.

Extrait d'une lettre de l'ASN à EDF (cf. site de l'ASN) illustrant l'importance de la procédure de validation des lois de fermetures (corrélations).

Exemple : la démarche de validation dans le cas du code système Cathare

14 termes concernés dans les équations de conservation  
Modélisés avec plus de 100 lois de fermeture

Validation par Essais à effets séparés (SET pour *separate effect tests*) :

- 1000 SETs réalisés sur 40 installations expérimentales
- Plusieurs dizaines de paramètres mesurés et comparés aux résultats de calcul

Validation par Essais à effets intégraux (IET pour *separate effect tests*) :

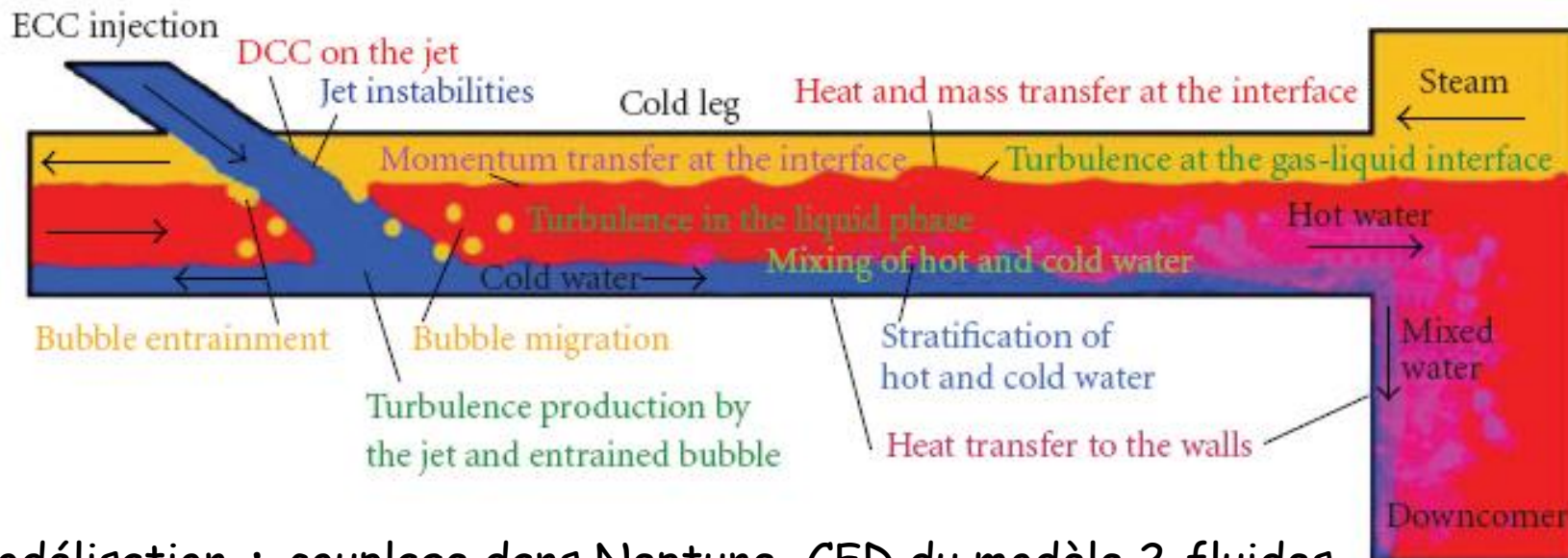
- 20 IETs réalisés sur 10 installations expérimentales
- ~ 1000 paramètres mesurés pour comparaison aux résultats de calcul.

VUQ des lois de fermeture de Cathare ~ 30 hommes.an



# Exemples d'applications

Application : « choc froid sur cuve » (PTS : Pressurized Thermal Shock)



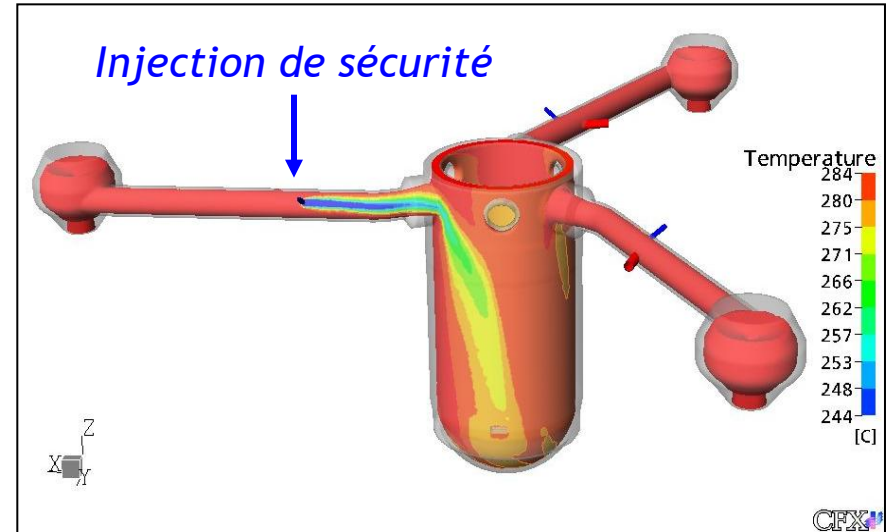
Modélisation : couplage dans Neptune\_CFD du modèle 2-fluides et de la « Large Interface Method (LIM) d'après P. Coste *et al.*

Application : « choc froid sur cuve » (PTS : Pressurized Thermal Shock)

Situation accidentelle de perte de réfrigérant.

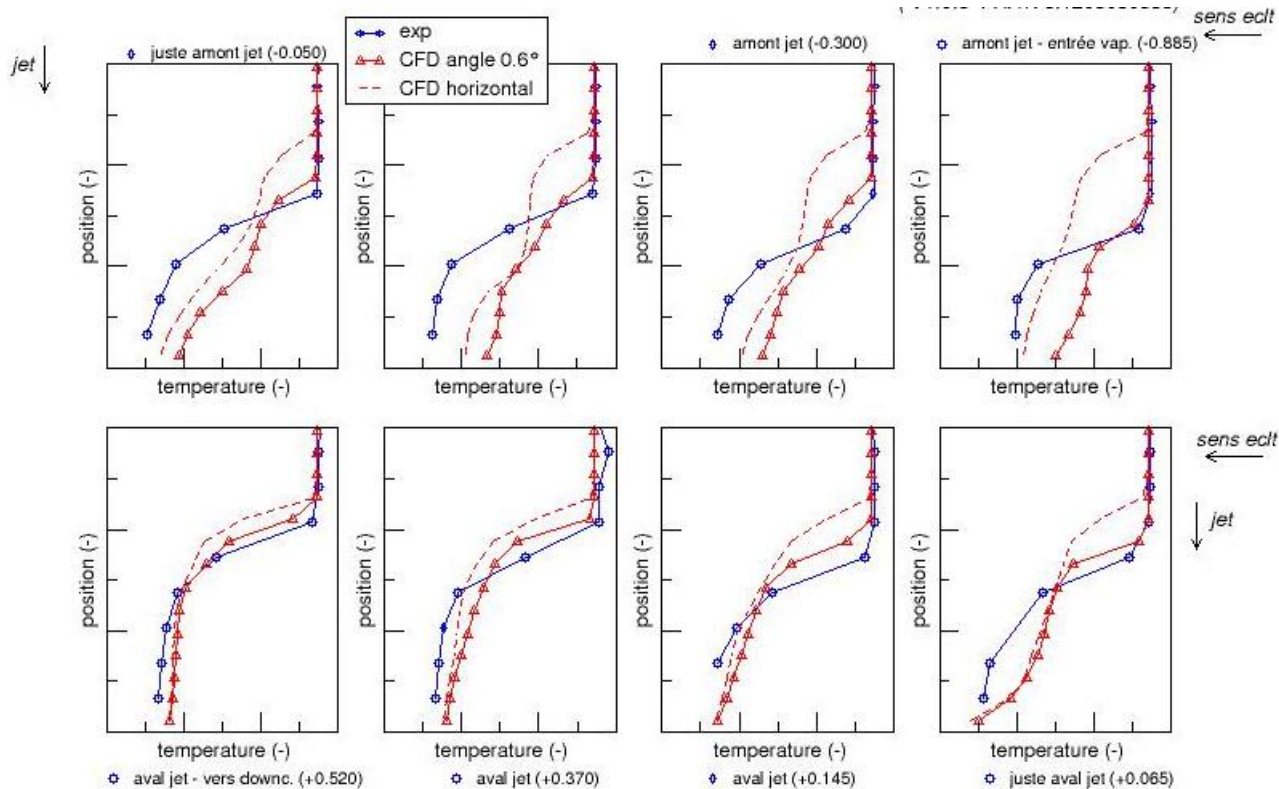
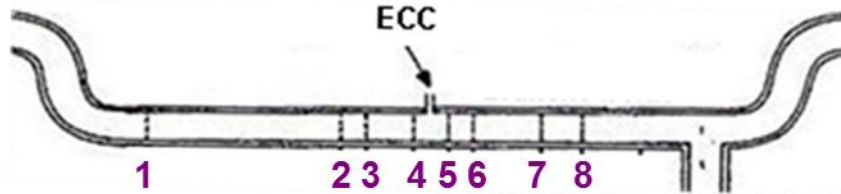
Injection de sécurité d'eau liquide Froide

Besoin de calculer la charge thermique sur les parois



# Exemples d'applications

## Application : « choc froid sur cuve » (PTS : Pressurized Thermal Shock)



## Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) « Grosse Brèche »

Scénario :

- Ouverture d'une brèche sur la branche froide alimentant la cuve
- Arrêt des pompes du circuit primaire
- Isolation des GV (arrêt de l'écoulement dans le secondaire)
- Ebullition du modérateur  $\implies$  perte de réactivité  $\implies$  arrêt de la réaction en chaîne
- Décharge des accumulateurs de secours
- Injections de sûreté conduisant au renoyage du cœur

La démonstration de sûreté repose sur un calcul système avec le code Cathare et doit conduire à

- Assurer le refroidissement du réacteur et le maintien du confinement
- Limiter l'oxydation par la vapeur d'eau de la gaine en zircaloy et contrôler ainsi le risque  $H_2$
- Limiter la montée en pression et température de façon à éviter la perte de confinement.

# Bibliographie

- [1] J.M. Hérard, O. Hurisse, Coupling of two and one dimensional unsteady Euler equations through a thin interface" , *Comput Fluids*, **36** 4 (2007)651-666.
- [2] NURISP, NUclear Reactor Integrated Simulation Project, <http://www.nuresim.com/>
- [3] F. Bassenghi, Validation of the CFD code NEPTUNE for a full scale simulator for decay heat removal systems with in-pool heat exchangers, PhD thesis, Università di Bologna (2013).
- [4] D. Bestion, From the direct numerical simulation to system codes - perspective for the multi-scale analysis of LWR thermalhydraulics, *Nucl. Eng. Technol.* **42** 6 (2010) 608-619.
- [5] M. Ndjinga, Influence of interfacial pressure on the hyperbolicity of the two-fluid model, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I* **344** (2007) 407-412.
- [6] R. A. Berry *et al.*, RELAP-7 theory manual, INL REPORT INL/EXT-14-31366 (2014).
- [7] S. Jayanti, M. Valette, Prediction of dry-out and post dry-out heat transfer at high pressure using a one-dimensional three-field model, *Int. J. Heat Mass Transfer* **47** (2004) 4895–4910.
- [8] J.M. Hérard, A three-phase flow model, *Math. Comput. Modell.* **45** (2007) 732–755.
- [9] D. Bestion. The physical closure laws in the CATHARE code *Nucl. Eng. Des.* **124** (1990) 229 – 245.