

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

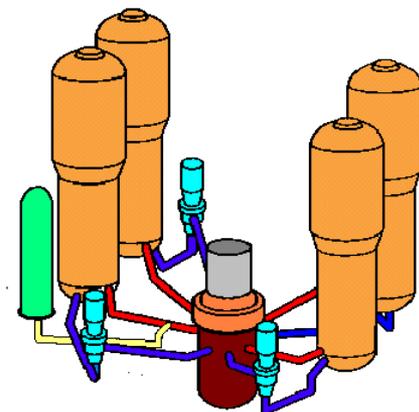
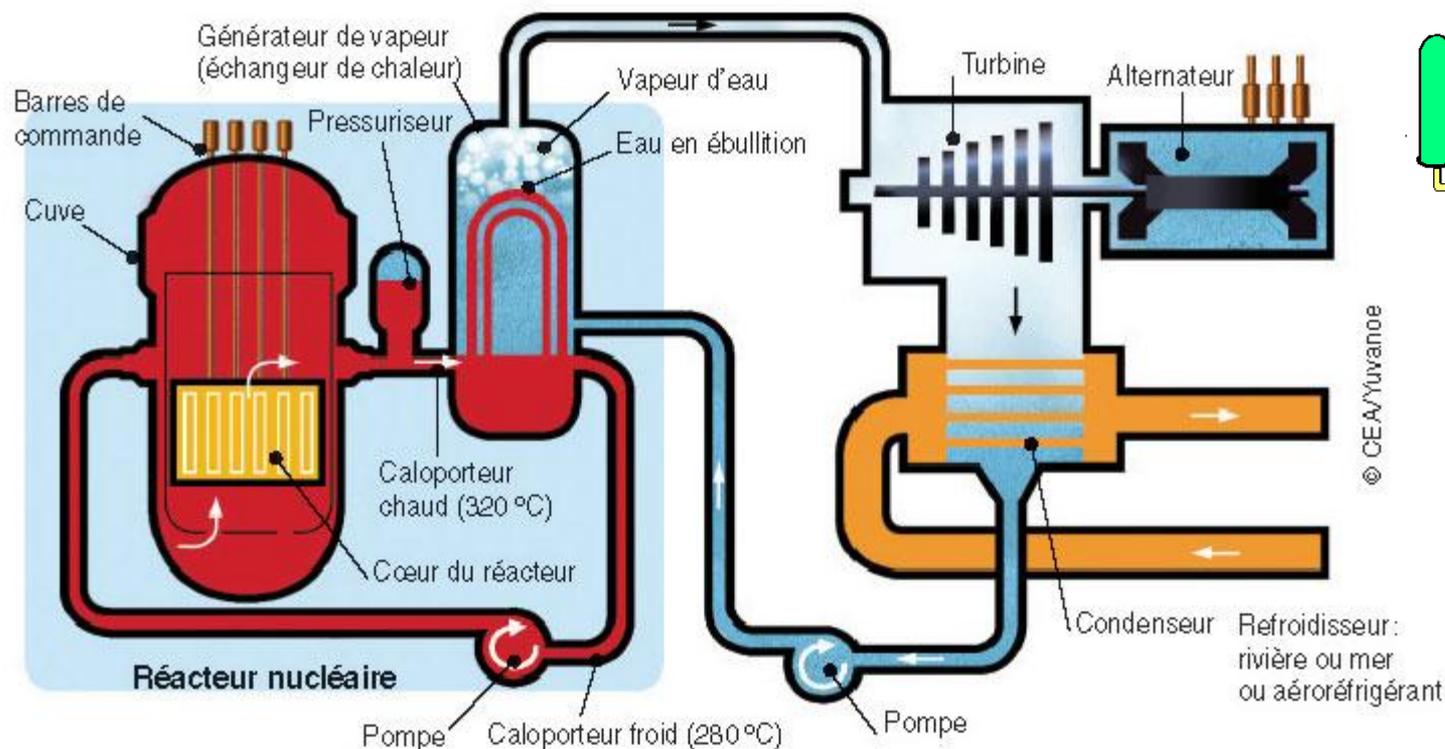
- Eau : Réacteur à Eau Pressurisée, Réacteur à Eau Bouillante, Réacteur à Eau Lourde, ...
- Métaux liquides :
 - Sodium liquide : RnRNA
 - Plomb
- Gaz :
 - CO₂ : UNGG
 - He : Réacteur à Très Haute Température (VHTR)
- Sels fondus
- ...

Le choix du caloporteur est guidé par les caractéristiques

- Thermiques : $\lambda, \rho c_p,$
- Neutroniques : modération, absorption, ...
- De compatibilité : corrosion, interaction Na-H₂O

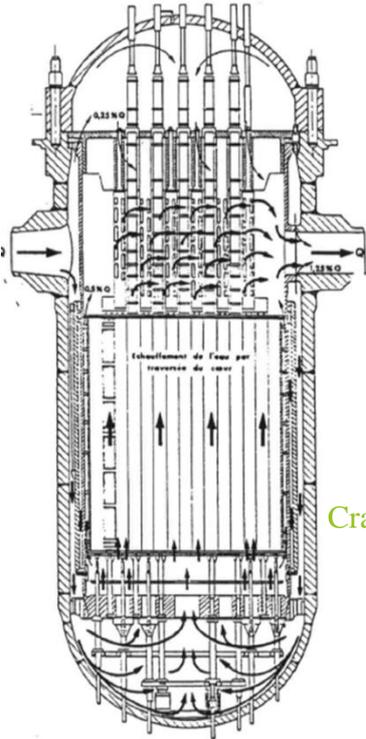
Le circuit hydraulique d'un REP

Schéma de principe d'un réacteur à eau sous pression

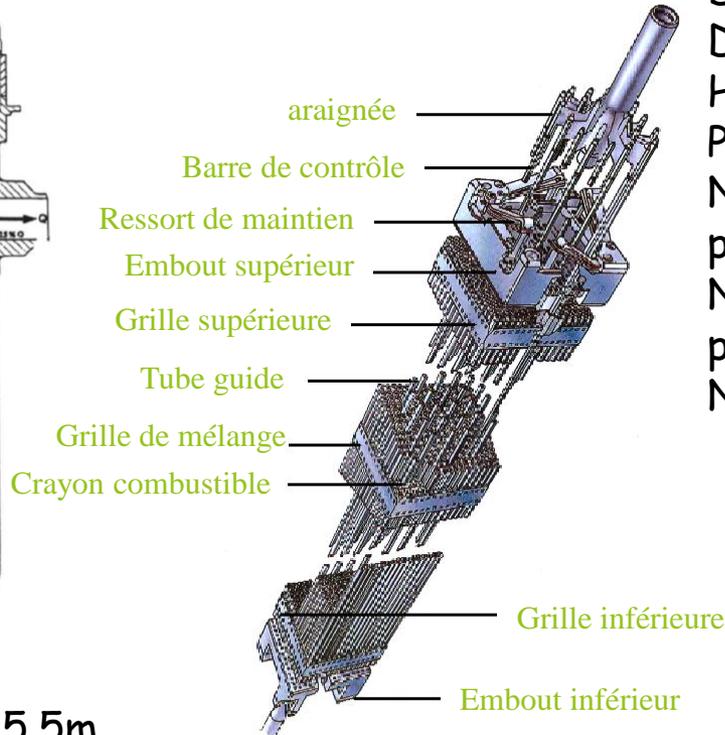


$$295^{\circ}\text{C} < T_{\text{cuve}} < 330^{\circ}\text{C}, T_{\text{sat}} = 345^{\circ}\text{C} \text{ à } P=155 \text{ bars}$$

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

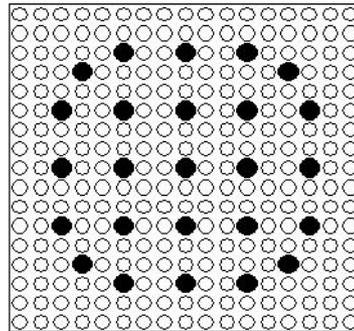


Cuve : H=13m, Ø=5.5m



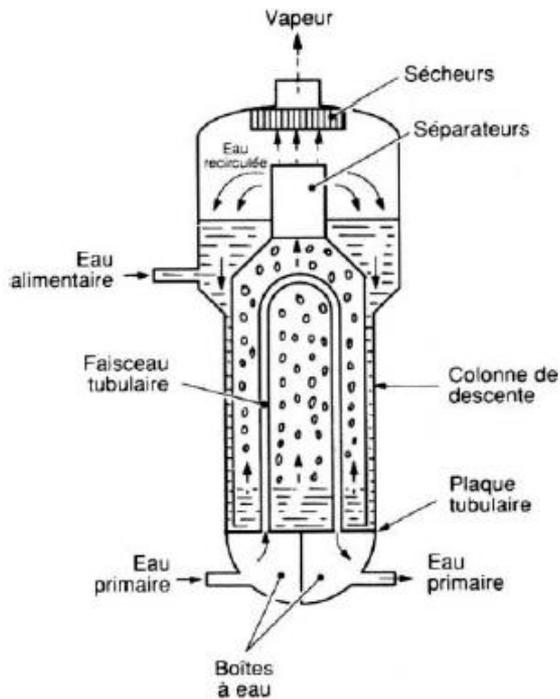
Diamètre crayons UO2	0.95cm
Diamètre tube guide	1.20 cm
Hauteur chauffante	4.27 m
Pas du réseau	1.26 cm
Nombre de crayons UO2 par assemblage	264
Nombre de tube-guide par assemblage	25
Nombre d'assemblages	150 à 200

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) :

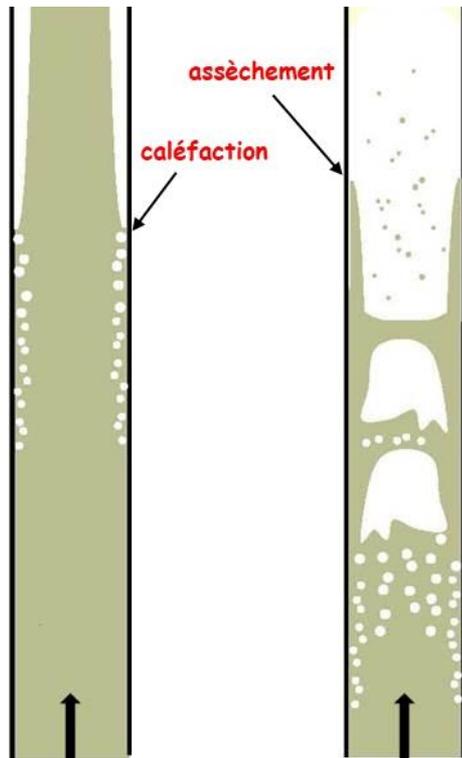
■ Hauteur	20.6 m
■ Diamètre	3.4 - 4.4 m
■ Environ 4500 tubes en U inversé	
■ Masse	300 t
■ Puissance	1000 MW th
■ Surface d'échange	7000 m ²
■ Flux de chaleur	150 kW/m ²

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) :

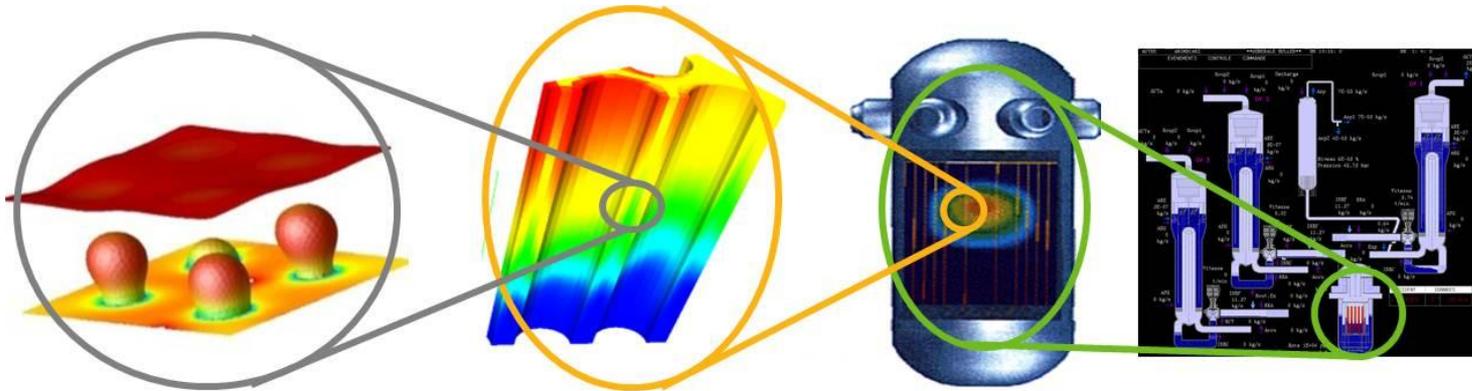
- Chauffage du liquide par flux thermique paroi → liquide fonction de l'état du fluide caloporteur
- Démarrage de la nucléation en paroi
⇒ utilisation du flux thermique en chaleur latente de vaporisation
- Création d'un film de vapeur en paroi
⇒ diminution rapide du coefficient d'échange en paroi.
-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

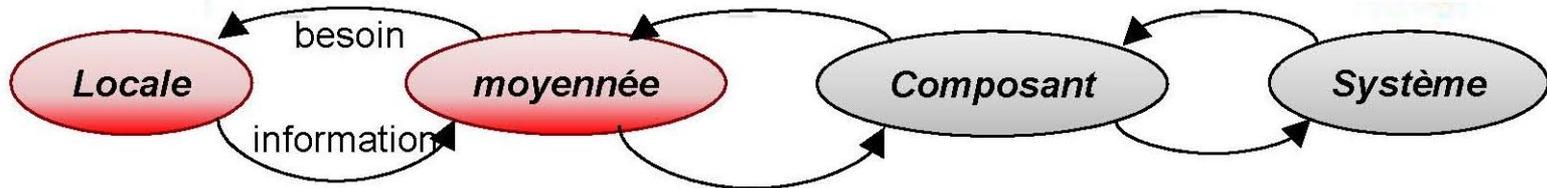
Transport de radioéléments dans les circuits des réacteurs

■ Matériaux

Corrosion, production d'H₂ 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 + α	2 masses 2 QdM 2 énergies	1 masse 1 QdM 1 énergie + α	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

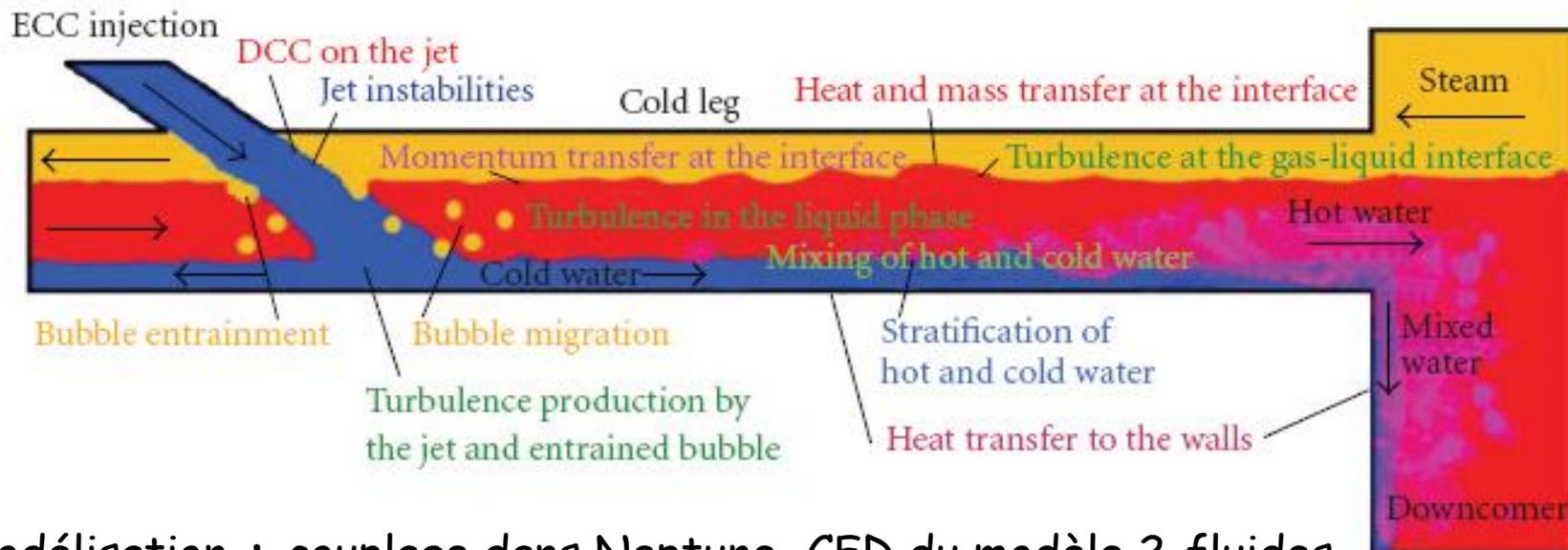
Validation par Essais à effets intégraux (IET pour *separate effect tests*) :

- 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)



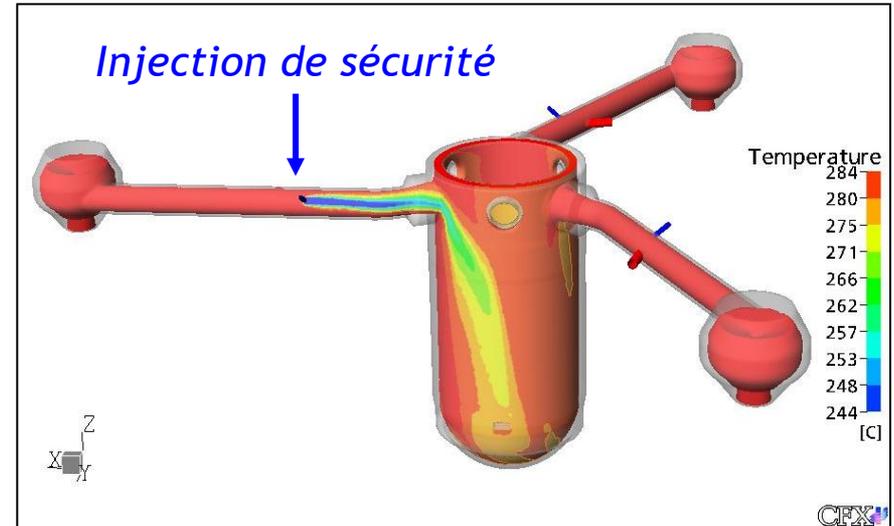
Modélisation : couplage dans Neptune_CFD du modèle 2-fluides et de la « Large Interface Method (LIM) d'après P. Coste *et al.*

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

Situation accidentelle de perte de réfrigérant.

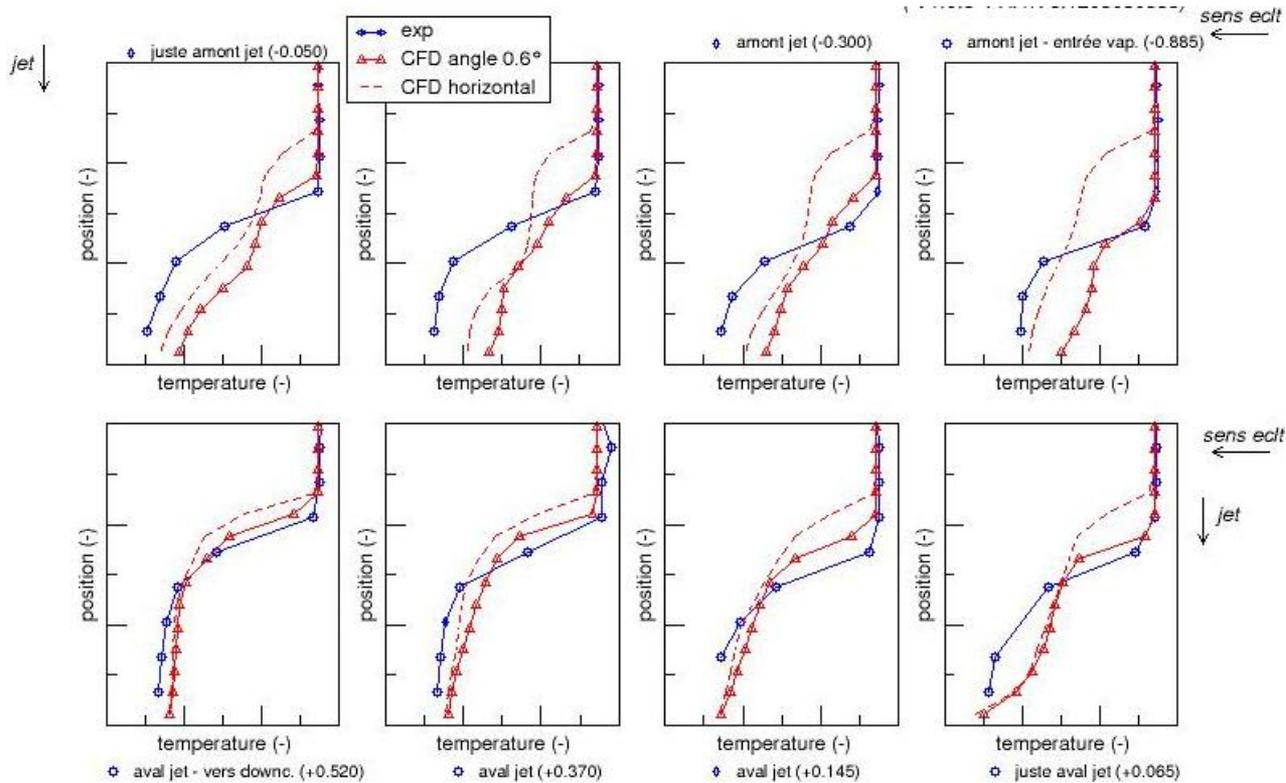
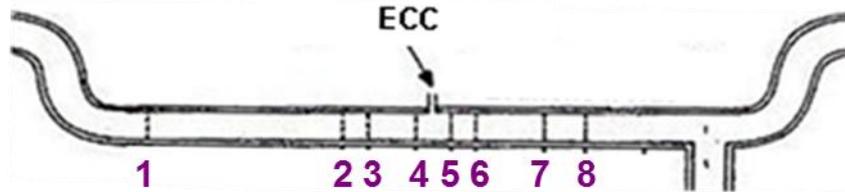
Injection de sécurité d'eau liquide Froide

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.