



Écoulements diphasiques

Thermohydraulique cœur Méthodes et codes

eric.royer@cea.fr

CEA Saclay, DM2S/SFME

Programme



- Quels sont les enjeux de la Thermohydraulique du cœur?
- Quels sont les phénomènes limitatifs à prendre en compte?
- Comment dimensionner le cœur?
- Quels sont les outils et méthodes disponibles?

Enjeux de la thermohydraulique cœur



- Thermohydraulique cœur: définition?
- Garantir la sûreté à en toutes circonstances
 - Contrôler la réactivité (réactions neutroniques)
 - Assurer le refroidissement
 - Confiner la radio-activité (intégrité des barrières)
- Obtenir les meilleures performances possibles
 - Souplesse d'exploitation (marges)
 - Rendement élevé (conversion de l'énergie, utilisation du combustible)...
- Le dimensionnement TH est un problème d'optimisation multi-critères en interaction avec les autres disciplines
 - Matériaux: oxydation, corrosion, tenue thermique...
 - Neutronique: contre-réactions, stabilité...
 - Mécanique: vibrations, fatigue...
 - Combustible: gainage, température...

Enjeux de la thermohydraulique cœur



- Analyse des effets thermiques et hydrauliques dans le cœur du réacteur (siège de la production d'énergie thermique)
 - Conditions normales, incidentelles et accidentelles
 - Etats stationnaires et transitoires (lent ou rapide)

- Chaque filière présente ses spécificités/difficultés
 - REP
 - REB
 - PN
 - RNR...

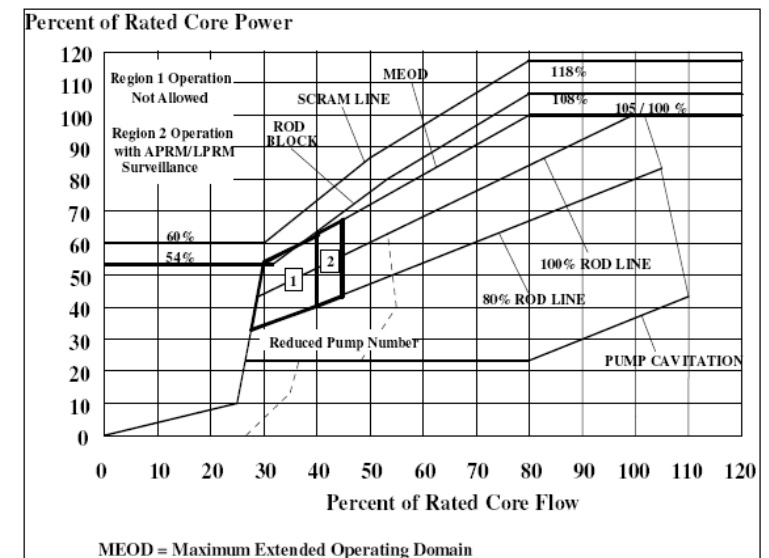
Les limitations d'origine thermohydraulique



- Echange thermique
 - Passage en ébullition: corrosion, réduction de la modération
 - Crise d'ébullition: élévation excessive de la température combustible

- Quantité de mouvement
 - Pertes de charges: puissance de pompage ou convection naturelle
 - Répartition du débit, en particulier en canaux fermés

- Instabilités dynamiques

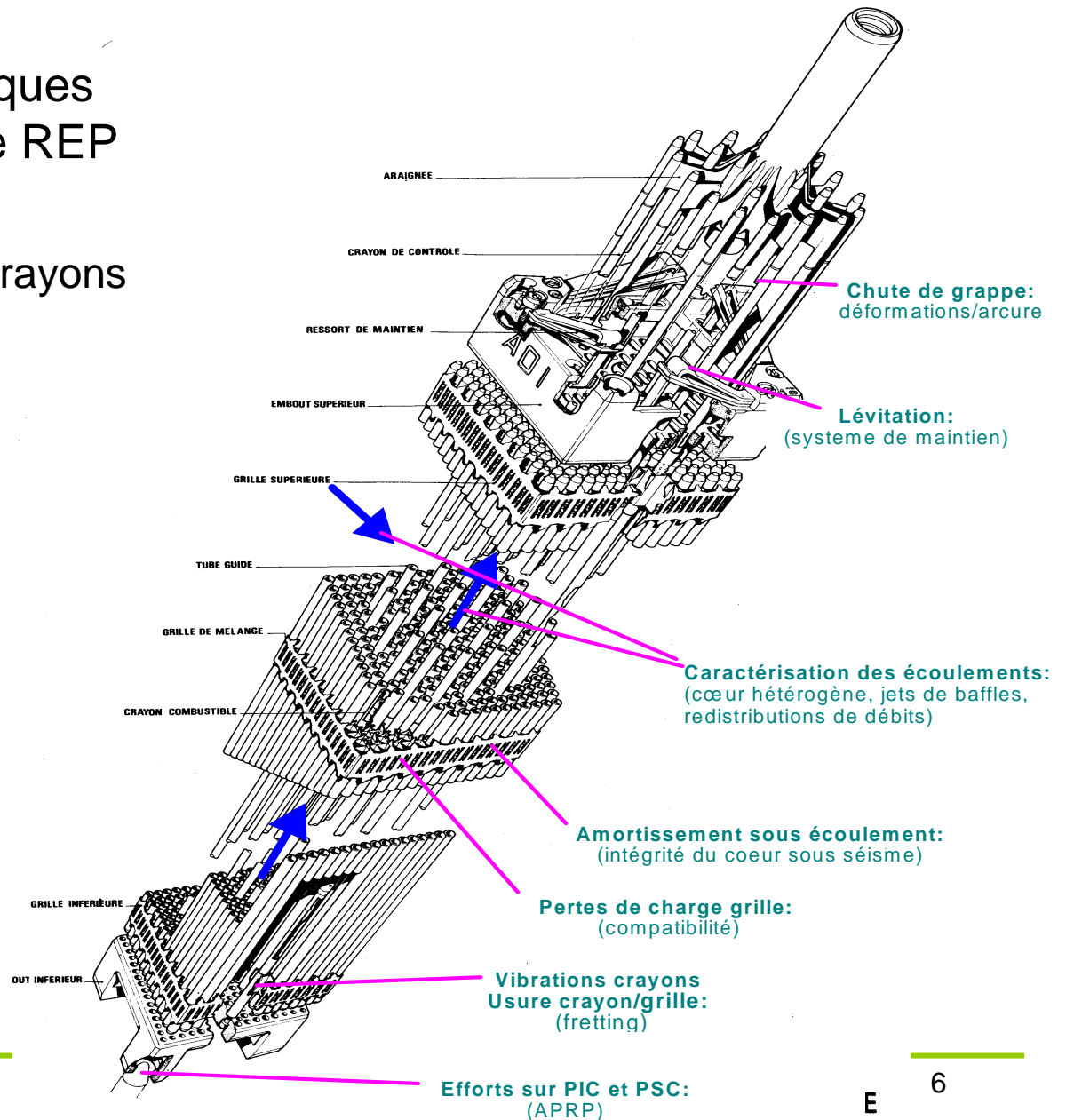


Les limitations d'origine thermohydraulique



▪ Effets hydro-mécaniques dans un assemblage REP

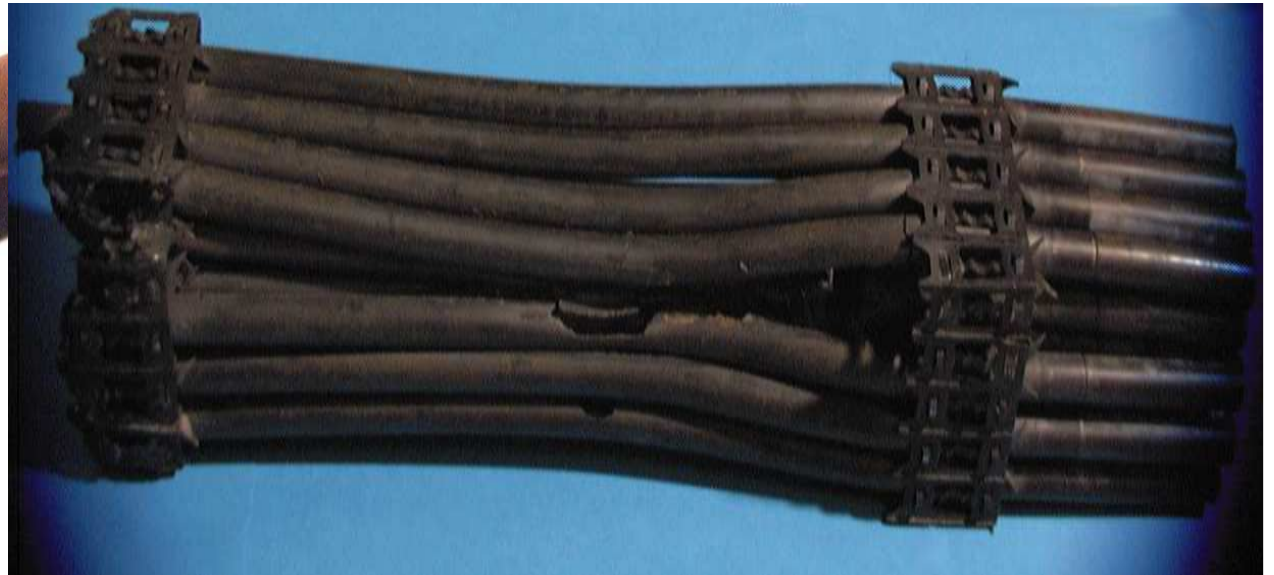
- Forces d'envol
- Arcure des tubes/crayons
- Grilles mélange et maintien
- Vibrations



Les limitations d'origine thermohydraulique



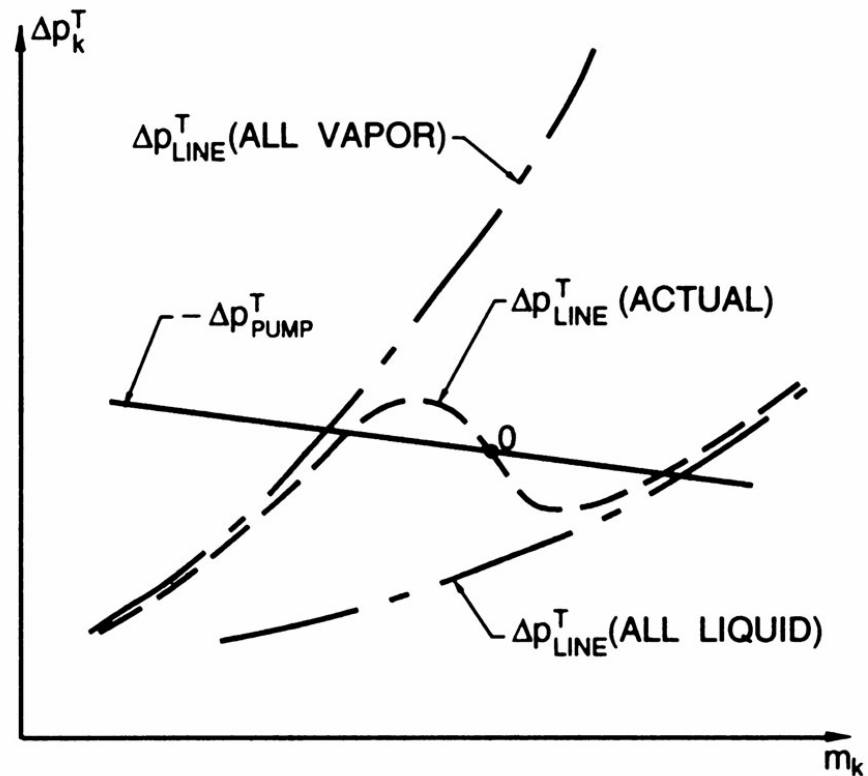
- Crise d'ébullition (flux critique)
 - Dégradation très rapide de l'échange thermique (film vapeur)
 - Effet à seuil, fortement dépendant des conditions
 - Conséquences possibles: destruction du gainage, fusion du combustible
 - ☞ Solutions technologiques?



Les limitations d'origine thermohydraulique



- Redistribution de débit (instabilité de Ledinegg)
 - Réduction instantanée du débit au point de redistribution
 - Perte du refroidissement (possibilité de destruction du gainage, fusion du combustible)
 - ☞ Solutions technologiques?



Le dimensionnement



- Principes pour simplifier le problème
 - Découplage des effets
 - Conditions pénalisantes/enveloppes (incertitudes comprises)
 - Analyse statique d'abord

- Approche « canal »
 - Raisonnement 1D ou multi-1D
 - Empilement de toutes les pénalités au même endroit
 - Facteur de puissance neutronique (axial et radial)
 - Hétérogénéité locale combustible
 - Conditions limites
 - Section de passage...

Le dimensionnement

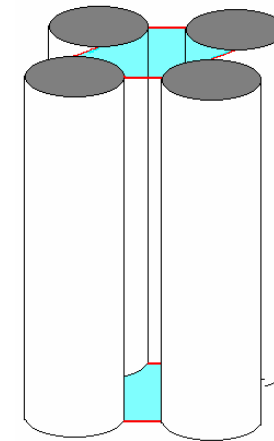
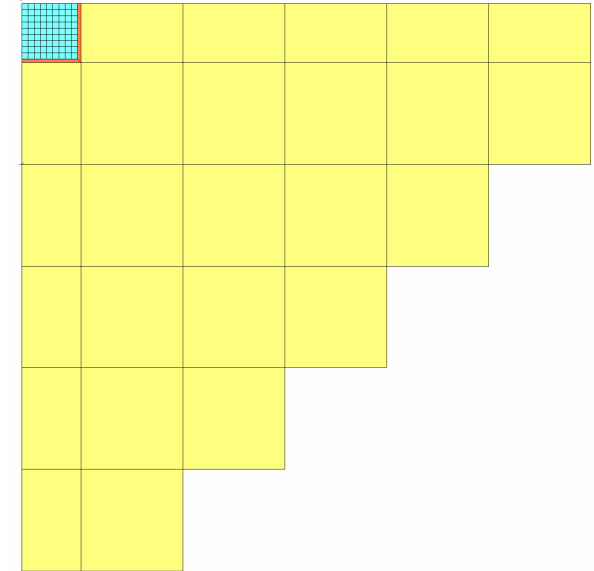


▪ Exemple d'application REP: marge au flux critique

- Objectif: évaluer le REC ou RFTC

$$REC = \Phi_{cr} / \Phi$$

- Méthode: approche à deux niveaux pour obtenir les conditions « locales » utilisées par les prédicteurs de flux critique
 - Pression (P)
 - Vitesse massique (G)
 - Titre thermodynamique (x)
- La prédiction du flux critique:
 - Valeur nominale (pour Dh donné)
 - Effet de flux non uniforme
 - Effet de paroi froide
 - Effet de grille



Le dimensionnement



Exemple d'application réacteur à plaques: marge à l'ébullition

- Objectif: évaluer le point d'ébullition (précurseur à la redistribution de débit)
- Méthode: approche à plusieurs niveaux pour obtenir les conditions « locales »

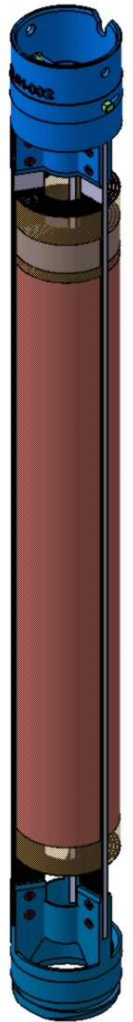
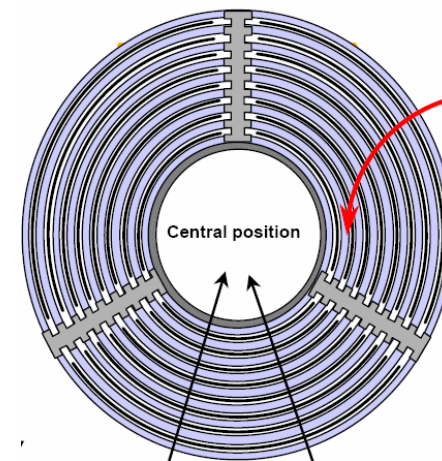
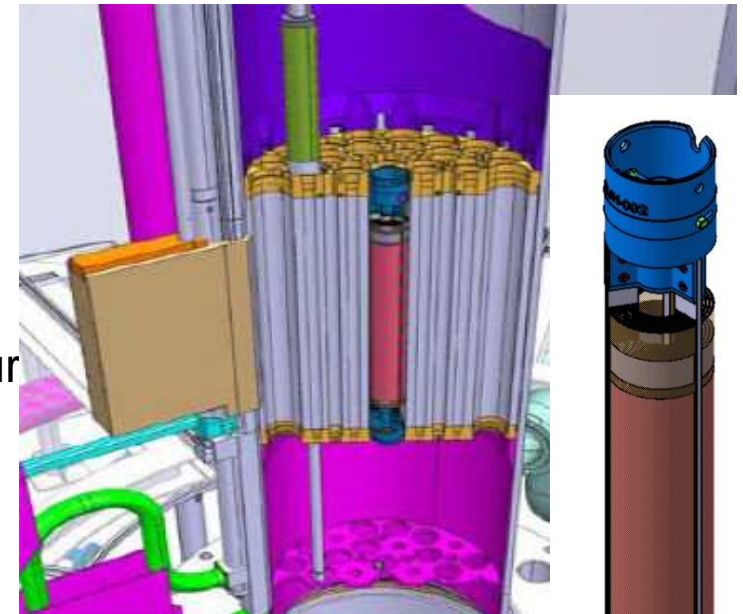
- Pression (P)
- **Vitesse massique (G)**
- Titre thermodynamique (x)

- La prédiction de la température de paroi en ébullition (surchauffe $T_p - T_{sat}$):

$$\Delta T_{sat} = f(\Phi, P)$$

- La marge est obtenue en comparant à la température de paroi en convection liquide (monophasique)

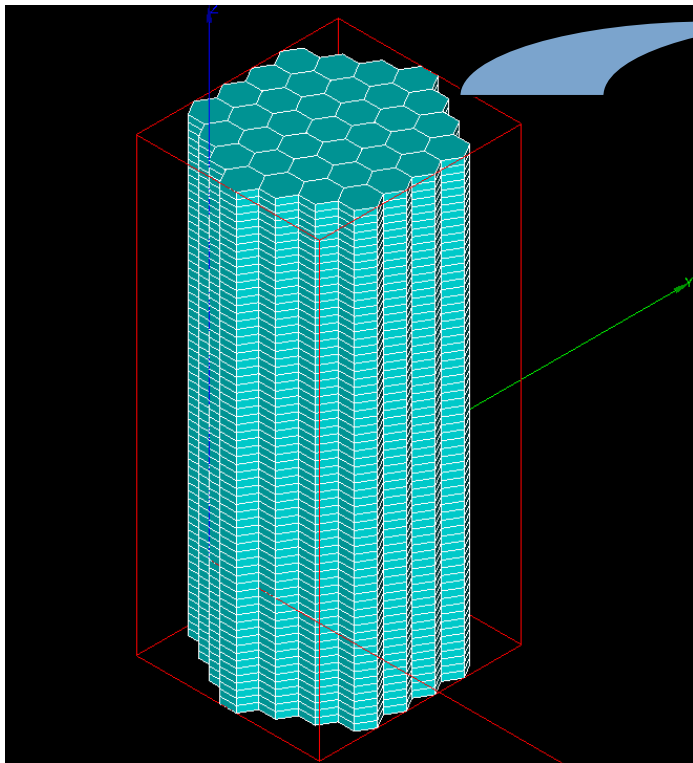
$$T_{p,cl} = T_l + \Phi / h$$



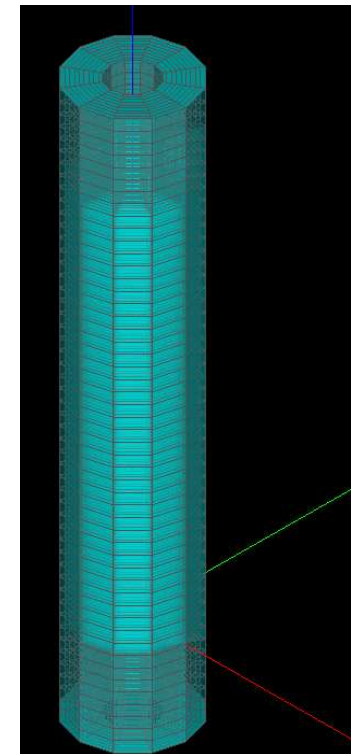
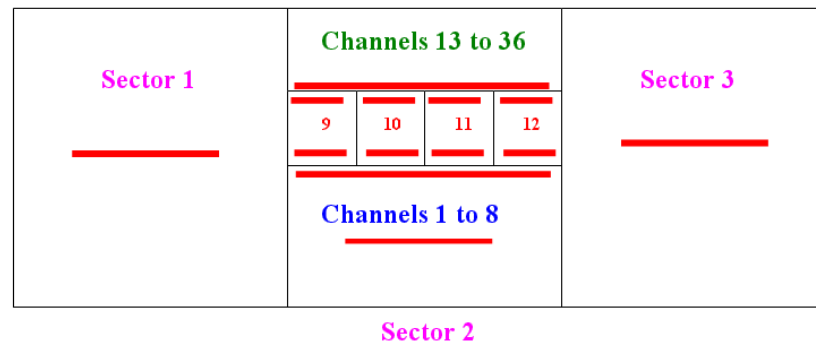
Le dimensionnement



- Exemple d'application réacteur à plaques: comment arriver au sous-canal?
 - Calcul cœur
 - Calcul élément chaud avec distinction secteur/canal/piste



Conditions limites
élément chaud

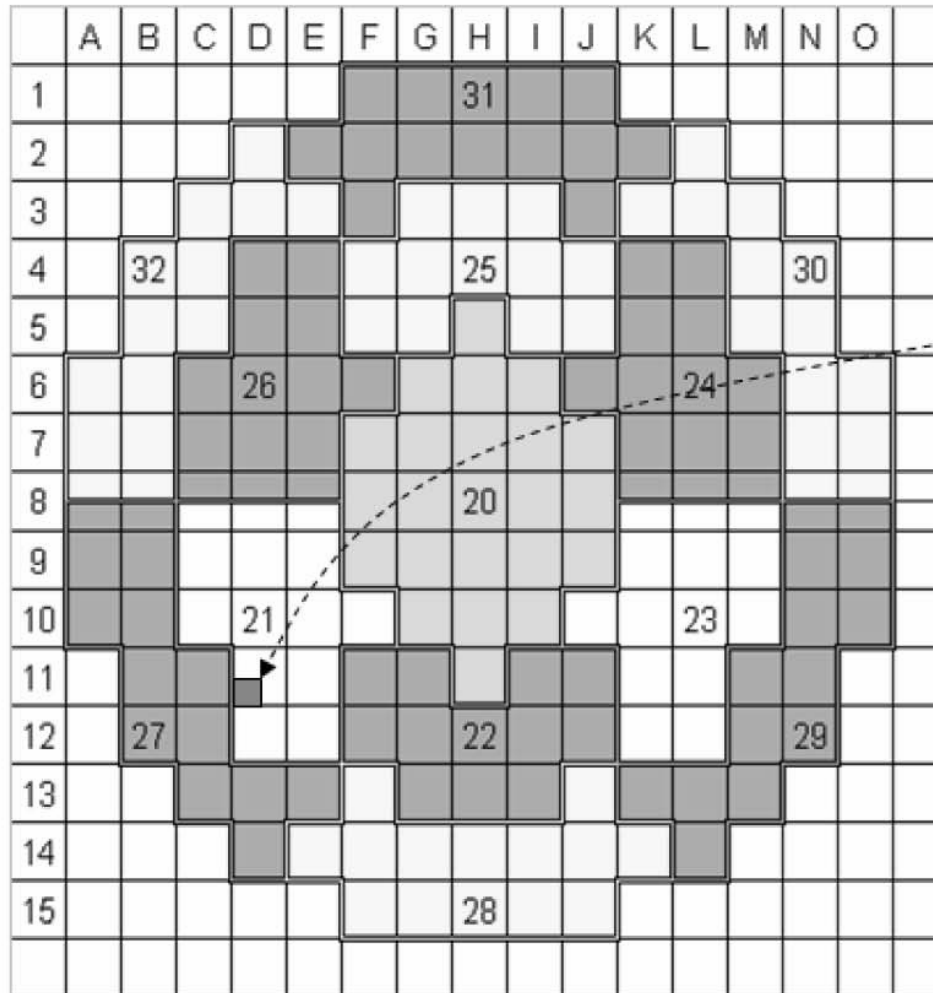


Les outils de simulation: petit historique

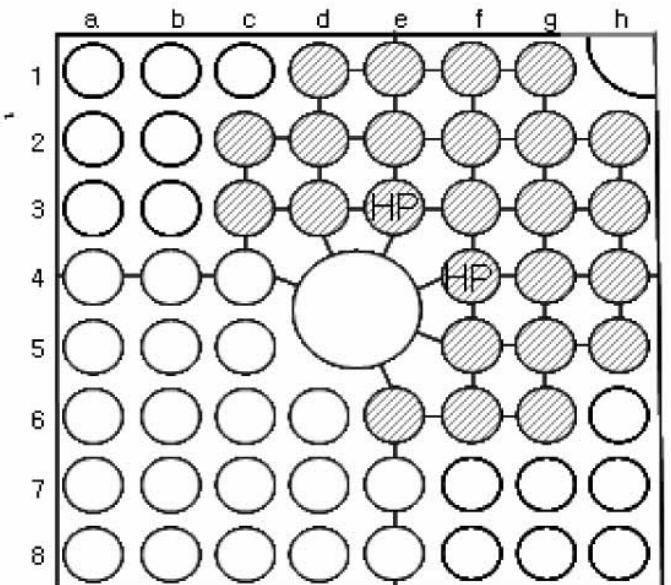


- 1970's: approche à sous-canaux (COBRA, VIPER, FLICA3...)
 - Approche homogénéisée (poreuse)
 - Hypothèse fondamentale: écoulement 1D dominant
 - *Cross flow*: résultent de l'écart de pression dans le plan radial (souvent avec géométrie fortement simplifiée)
 - Modélisation physique: modèle homogène + *drift flux*
- 1980's-90's: codes « composant » 3D (THYC, FLICA4...)
 - Les équations de QDM sont résolues en 3D
 - La modélisation physique est peu différente de la génération précédente...
 - Mais l'on élargit les domaines d'applications (bas débit, multi-filières, échangeurs)
- 2000's: plate-formes multi-échelles et multi-physique (Neptune)
 - Rapprochement des échelles CFD et poreuses (mêmes moteurs 3D)
 - Cohérence des lois de fermeture entre échelles

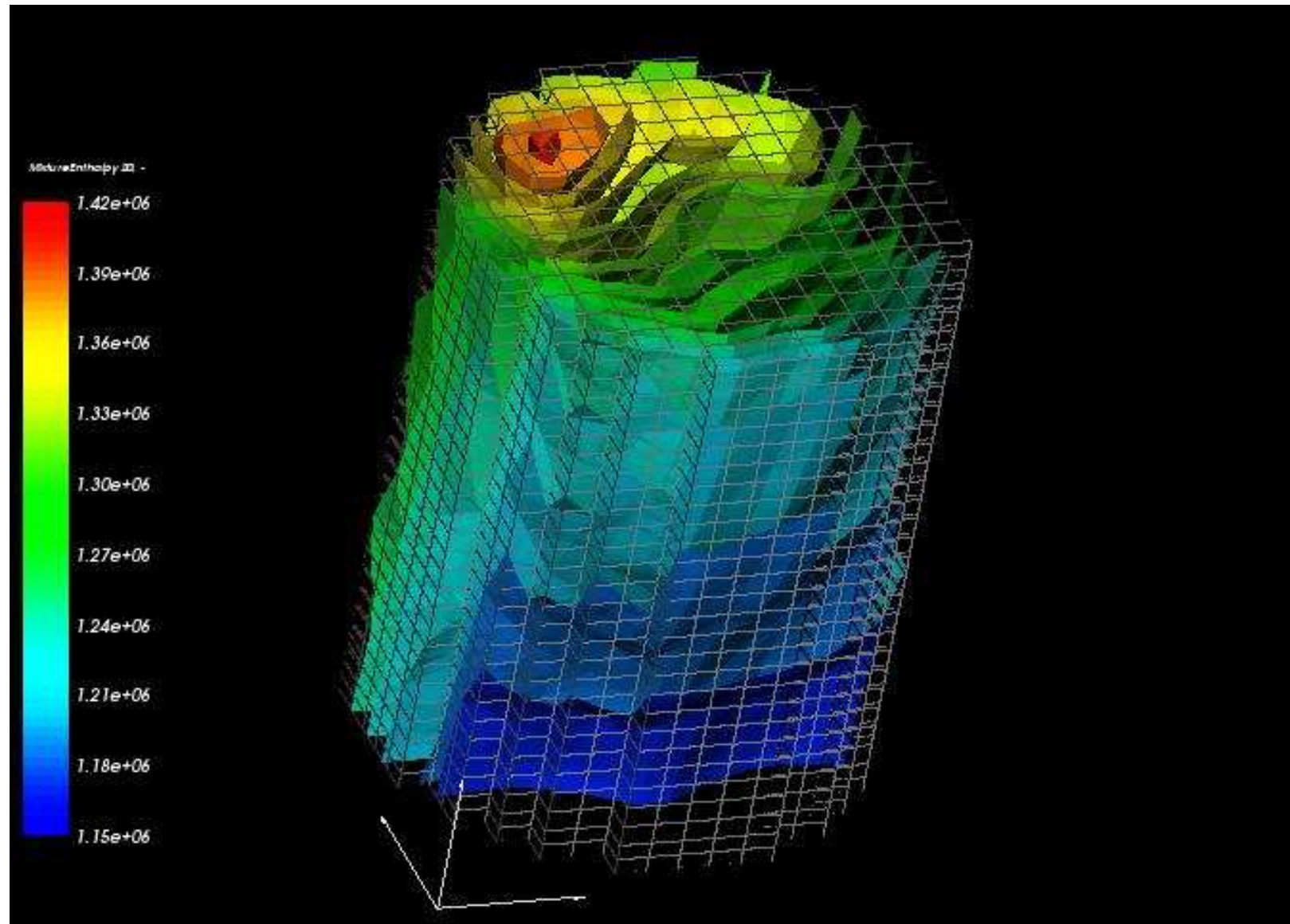
Les outils de simulation: quelle utilisation?



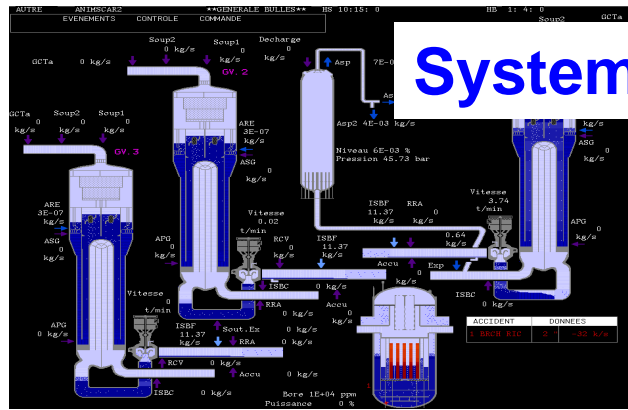
Hot subassembly (1/4 F/A)



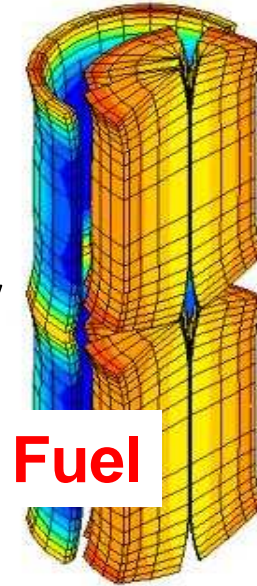
Les outils de simulation: quelle utilisation?



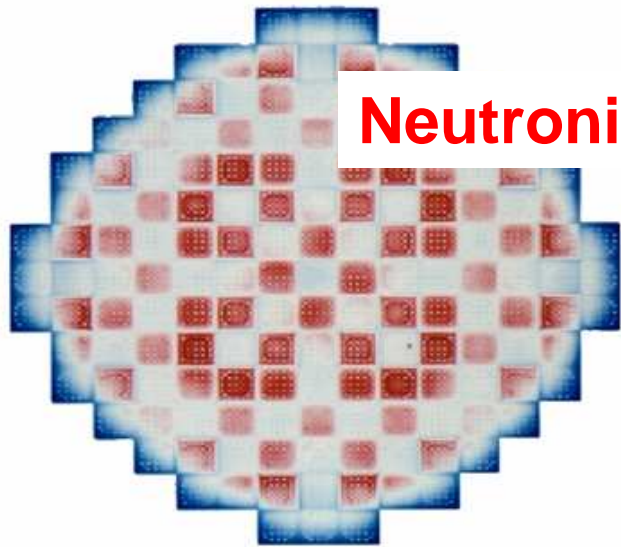
Les outils de simulation: quel avenir?



Multi-physics

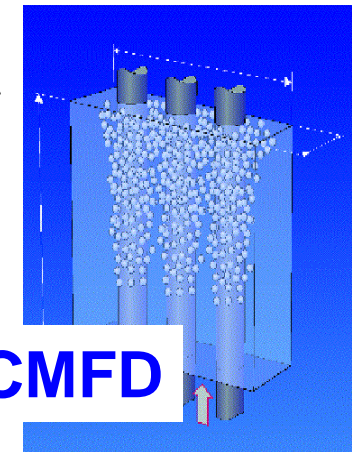


Neutronics



Multi-scales

CMFD





Annexes, compléments

Modèle 4 équations: système d'équations



Mélange

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_k (\alpha_k \rho_k) + \vec{\nabla} \cdot \sum_k (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) = 0$$

Mass balance

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_k (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) + \vec{\nabla} \cdot \sum_k (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k \otimes \vec{u}_k + \alpha_k \vec{\Pi}_k) = \sum_k (\alpha_k \rho_k) \vec{g} + (\vec{\tau}_f + \vec{\tau}_s)$$

Momentum balance

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_k (\alpha_k \rho_k E_k) + \vec{\nabla} \cdot \sum_k (\alpha_k \rho_k E_k \vec{u}_k + \alpha_k \vec{\Pi}_k \cdot \vec{u}_k) = \sum_k (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) \cdot \vec{g} + Q_{tot} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}$$

Energy balance

Vapeur

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_v \rho_v + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{u}_v - K_{cv} \vec{\nabla} c) = \Gamma_{lv} + \Gamma_{wv}$$

Mass balance

Pour arriver à 6:

$$\begin{cases} U_v - U_l = f(P, G...) \\ h_v = h_{v,sat} \end{cases}$$

Modèle 4 équations: lois de fermeture



- Frottement pariétal
 - Coefficients isotherme
 - Correcteurs

$$\vec{\tau}_f = -f \cdot \frac{\rho \|\vec{u}\| \vec{u}}{2D_{hy}}$$

$$f = f_{iso} \cdot f_{Tp} \cdot f_{2\phi} \quad f_{iso}^{turb} = a \text{Re}^{-b}$$

- Echange thermique
 - Convection monophasique (Dittus-Boelter)
 - Ebullition nucléée (Thom, Jens-Lottes)
 - Flux critique
 - Post-assèchement

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_p = H_{sp} (T_p - T_\ell) ; H_{sp} = Nu \frac{\lambda_l}{D_H} \\ N_u = a \text{Re}^b \text{Pr}^c \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_p^{GNV} = T_{sat} + \Delta T_{sat} \\ \Phi_{vap} = K (T_p - T_{sat})^n \end{array} \right.$$

Modèle 4 équations: lois de fermeture



- Vaporisation en paroi
 - Fraction de flux
 - Décomposition de flux

- Condensation/flashing
 - Échange thermique liquide/vapeur

- Ecart de vitesse
 - Tabulations du glissement
 - Modèle de dérive (drift)

$$\varphi_p = \varphi_{vap} + \varphi_\ell$$

$$\Gamma_{p,vap} = \varphi_{vap} / (h_v - h_l)$$

Prédicteur de flux critique



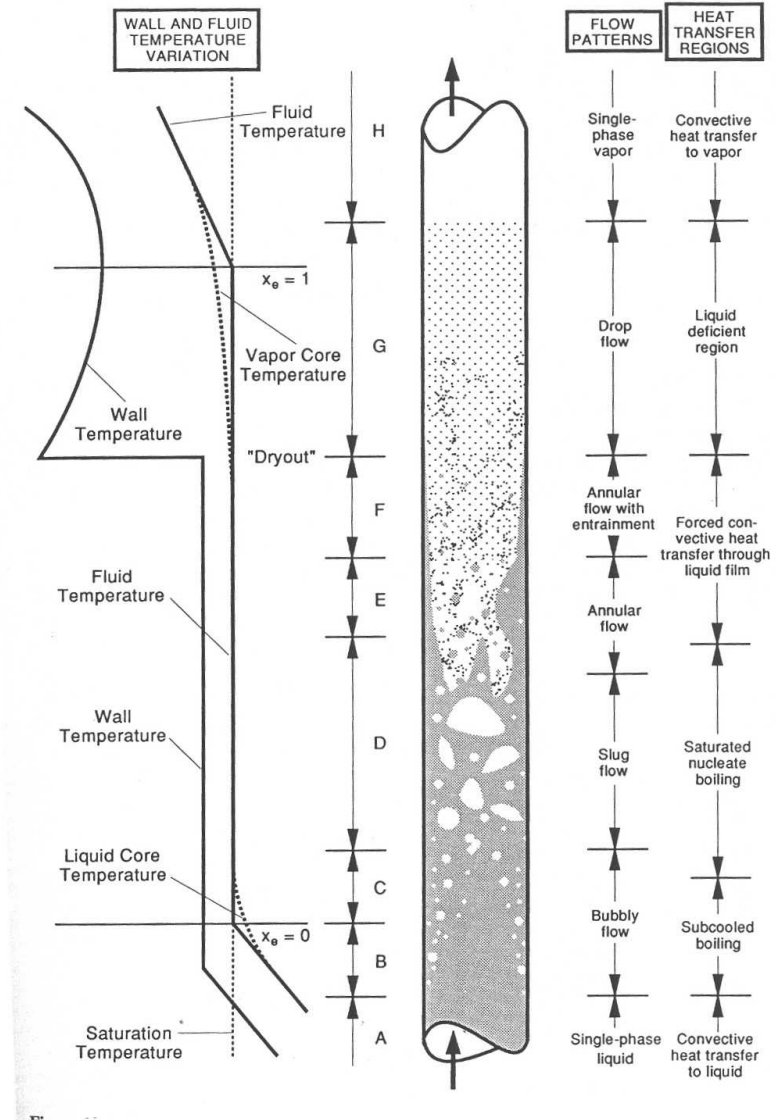
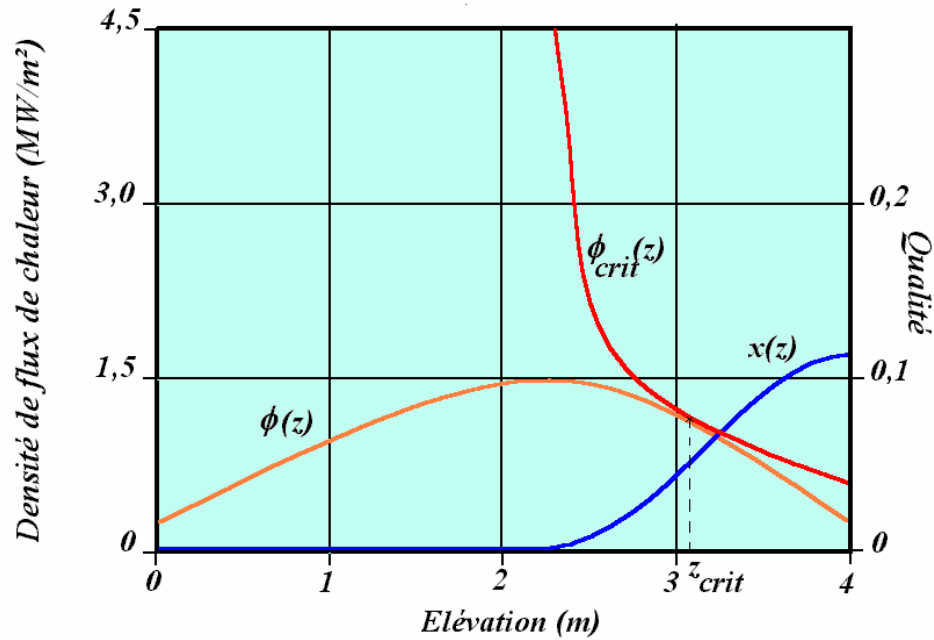
- Fort caractère empirique
 - Directement issu des essais
 - Délicat à « extrapoler »
 - Corrélations propriétaires, associée à un code et un type d'assemblage

$$\varphi_U^{crit} = \left[(2,022 - 0,006238 p) + (0,1722 - 0,001427 p) e^{(18,177 - 0,005987 p)\tau} \right] \\ * \left[(0,1484 - 1,596\tau + 0,1729\tau|\tau|)(2,326G + 3271) \right] \\ * [1,157 - 0,869\tau] \\ * [0,2664 + 0,8357 e^{-124,1D_H}] \\ * [0,8258 + 0,0003413(h_l^{sat} - h_l)]$$

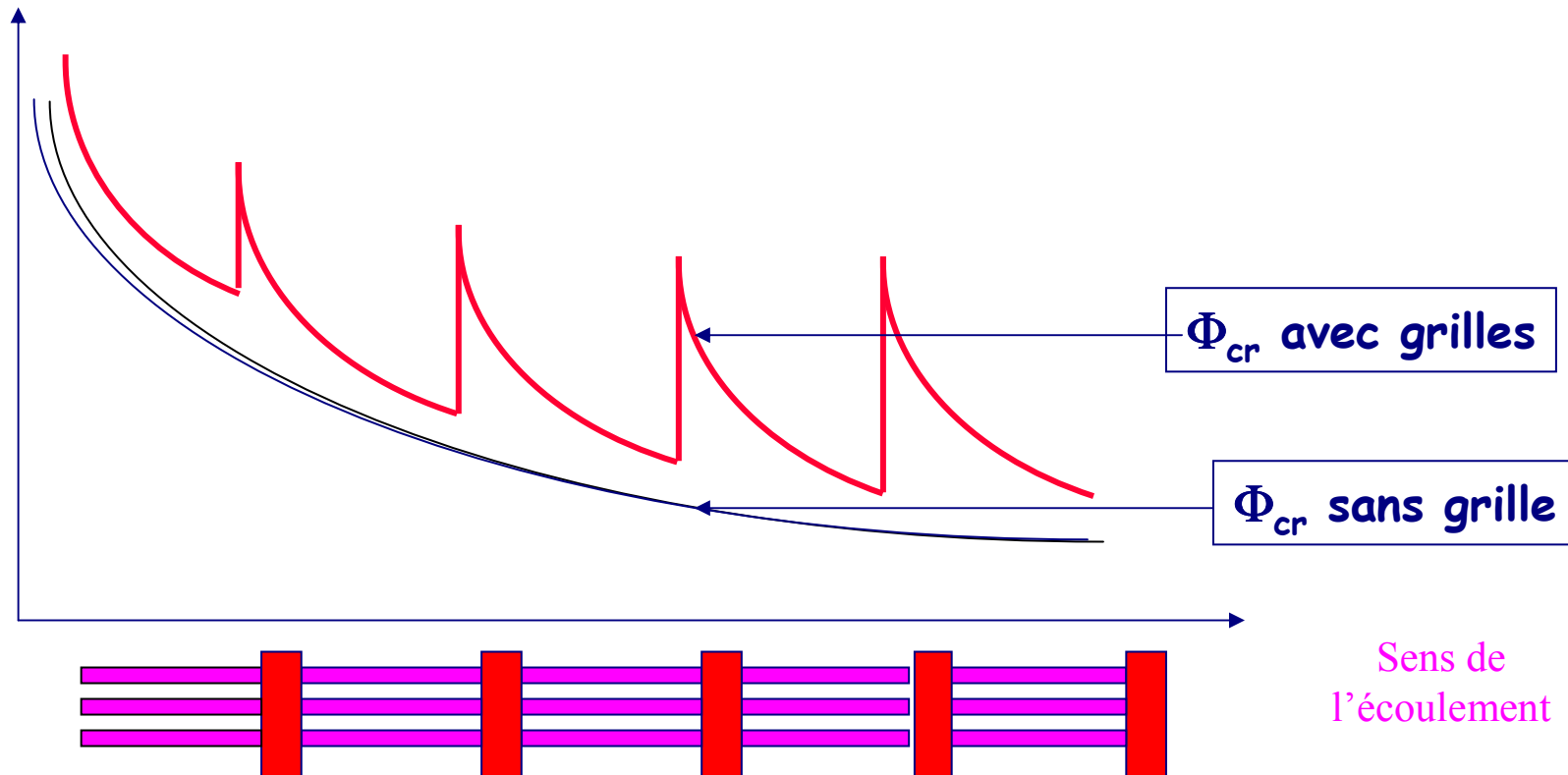
- Formulation de type nominale + corrections
 - Paroi froide
 - Effet de grille
 - Flux axial non uniforme
 - *Effet de géométrie*

$$\varphi^{crit} = \varphi_U^{crit} \frac{F_{PF} F_G F_A}{F_{NU}}$$

Occurrence du flux critique

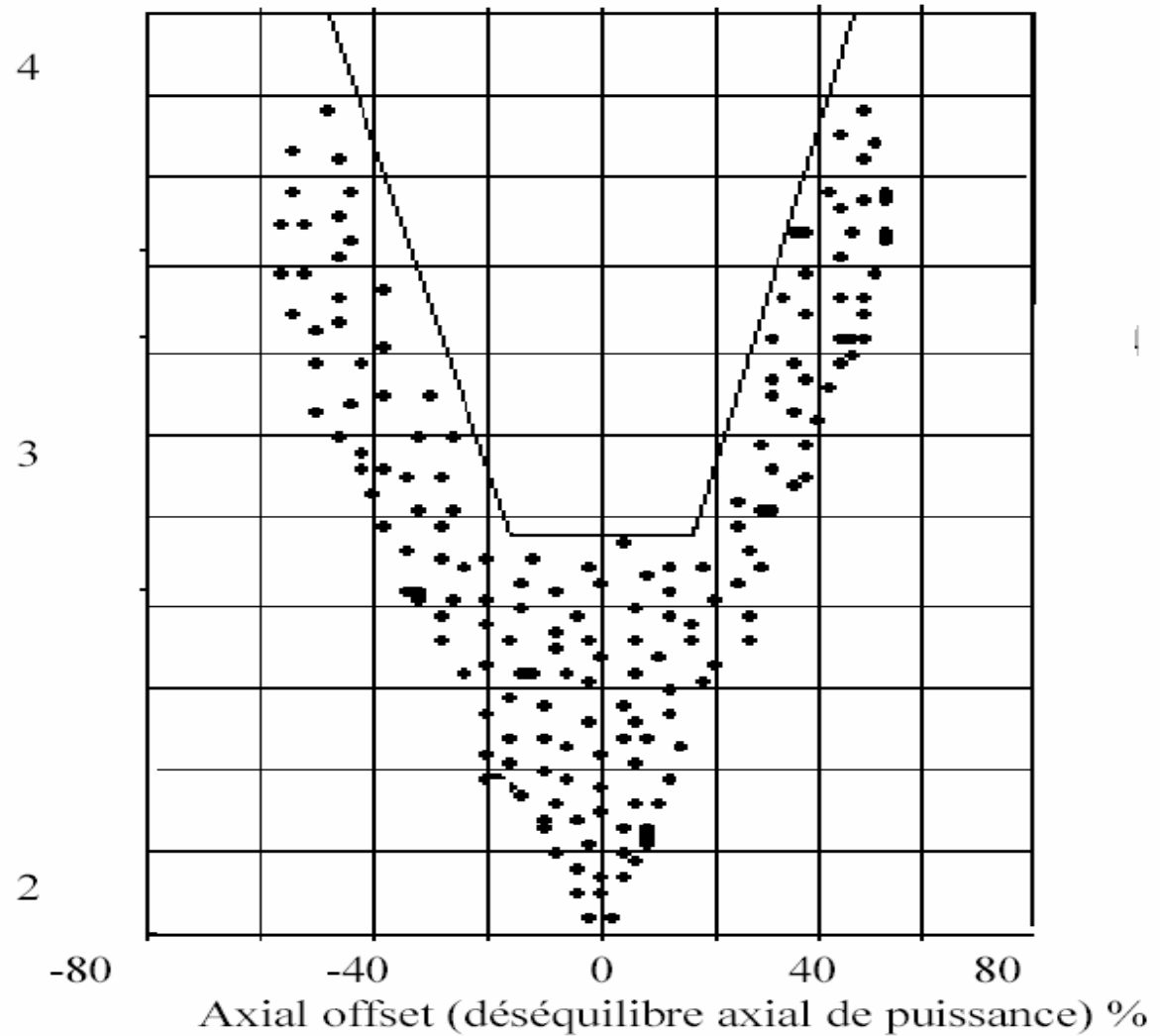


Occurrence du flux critique: effet des grilles

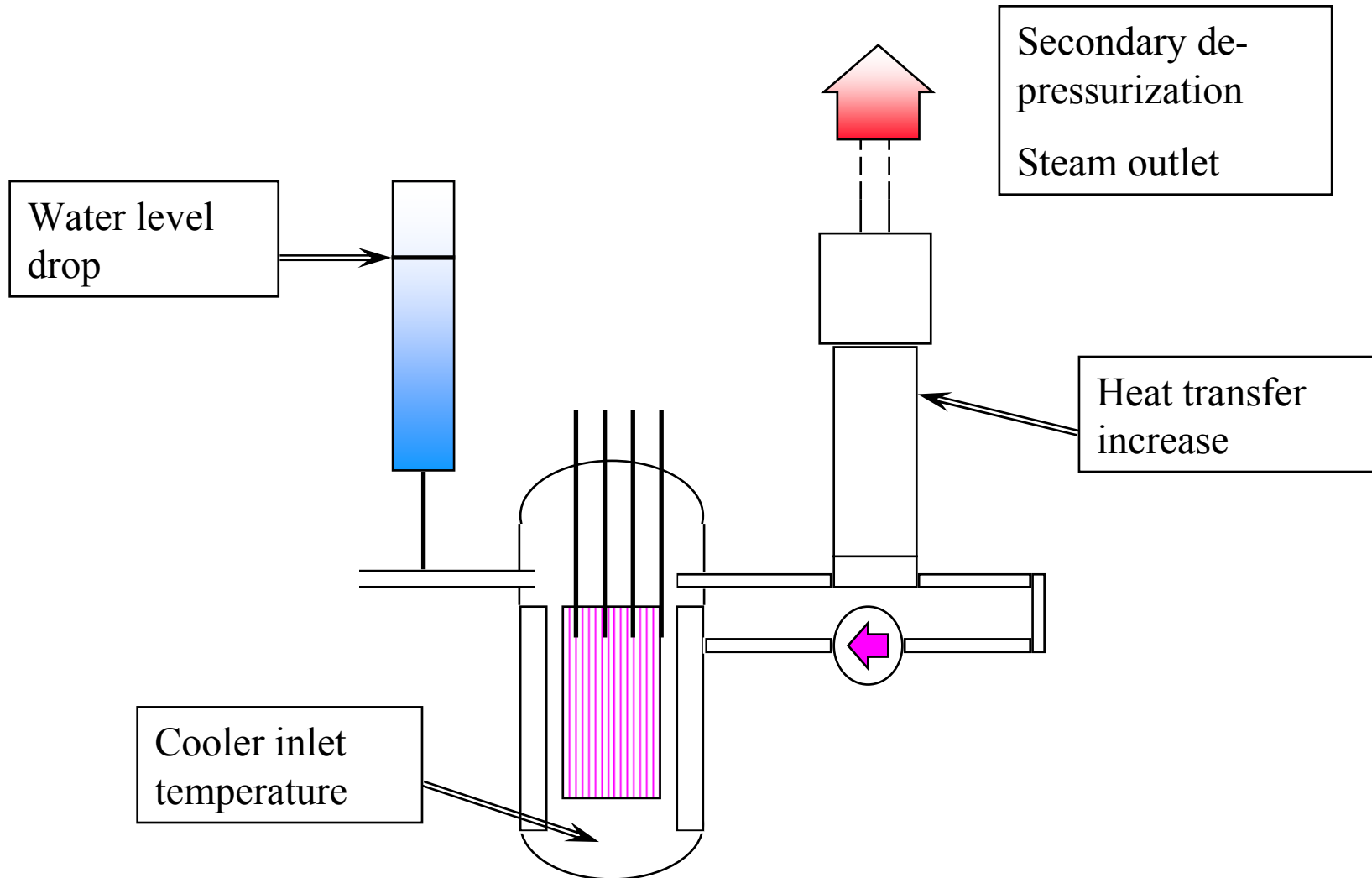


Conditions limites de puissance

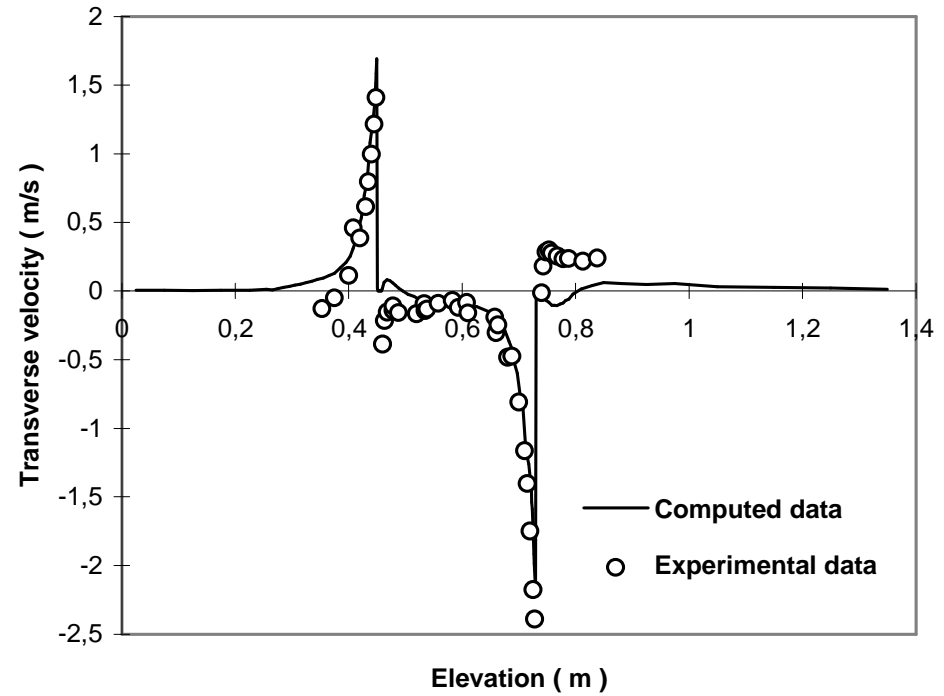
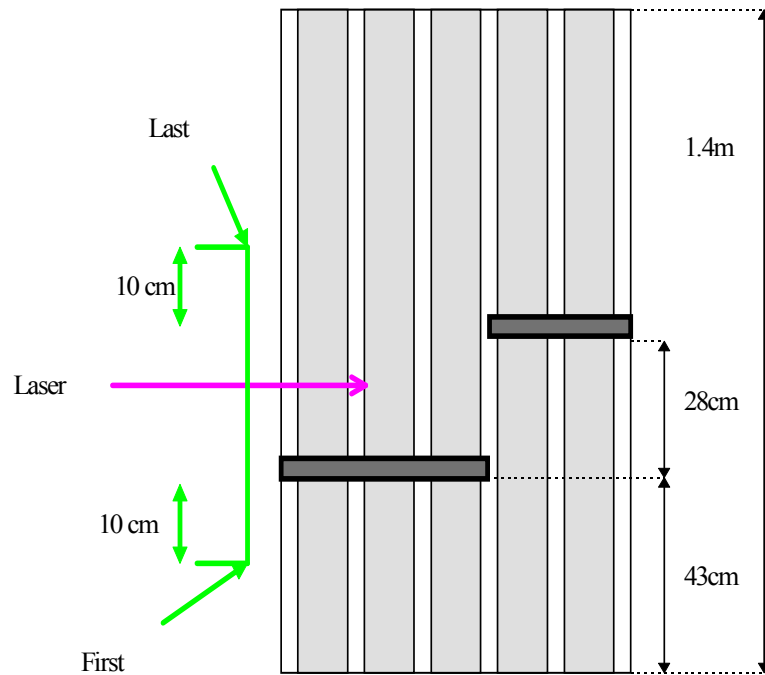
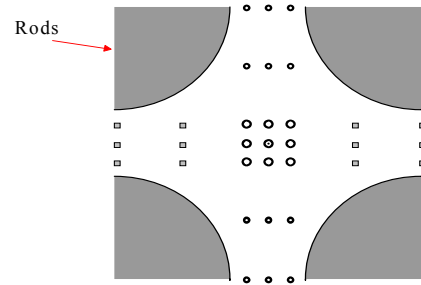
Facteur de point chaud total F_{TQ}^T



RTV: phénoménologie et scenario



Validation: AGATE



Validation: PELCOS



- Example of two-phase conditions for BWR
 - 70 bars
 - 750, 1500 kg/m²/S
 - Measurement of outlet quality (0.02 - 0.31)
 - Optimization of turbulent viscosity

