



## Thermohydraulique du cœur des REP : étude fine des écoulements et problèmes physiques associés

Jacques GARNIER  
DEN/DTN/SE2T

## PLAN DU COURS



- 1) La thermohydraulique coeur
- 2) Le coeur du REP
- 3) Les échanges thermiques dans le coeur
- 4) La crise d'ébullition
- 5) Les études CEA à moyen et long terme

# LA THERMOHYDRAULIQUE DU CŒUR DES REP



## LE RÔLE DU THERMOHYDRAULICIEN

- Rappel des objectifs : Compromis entre les fonctionnalités attendues (production d'électricité ou de neutrons, minimisation des déchets) et les objectifs de sûreté.
- Le rôle du *thermohydraulicien* est donc d'étudier l'évacuation de la puissance produite. Pour cela il doit déterminer, dans un premier temps, les conditions de fonctionnement du réacteur, en fonction des contraintes qui peuvent lui être imposées par la neutronique du cœur et le choix des matériaux et du fluide caloporteur du réacteur.

- et

## Les contraintes du dimensionnement



- Maintien de niveaux de température acceptables vis-à-vis de leur intégrité
  - Rétention des Produits de Fission (PF)
  - Minimisation des pertes de charge dans le cœur
- Les contraintes technologiques : rendement thermodynamique, tenue thermomécanique du combustible, tenue des matériaux à la corrosion (tubes GV, gaines), résistance mécanique de la cuve et de ses internes

Interne combustible

Externe combustible  
Interne assemblage

Externe assemblage  
Interne chaudière

## LE REP

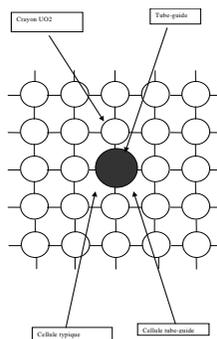


|                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| Diamètre crayons UO2  | 0.95 cm                   |
| Diamètre tube guide   | 1.20 cm                   |
| Hauteur chauffante    | 4.27 m                    |
| Pas du réseau         | 1.26 cm                   |
| Nombre de crayons UO2 | 264                       |
| Nombre de tube-guide  | 25                        |
| Nombre assemblages    | REP 900 : 157, 1300 : 193 |
| N4 :                  | 205                       |

Surface hydraulique typique : 0.878 cm<sup>2</sup>  
 Surface hydraulique tube-guide : 0.7709

Diamètre hydraulique typique : 1.178 cm  
 Diamètre hydraulique tube-guide : 0.988

Surface de passage moyenne assemblage : 246 cm<sup>2</sup>  
 Diamètre hydraulique moyen : 1.087 cm

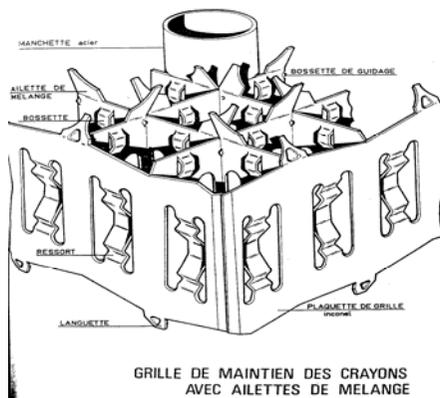


## Les grilles d'un REP



**Des grilles horizontales régulièrement espacées sont disposées suivant la verticale (8 à 10)**

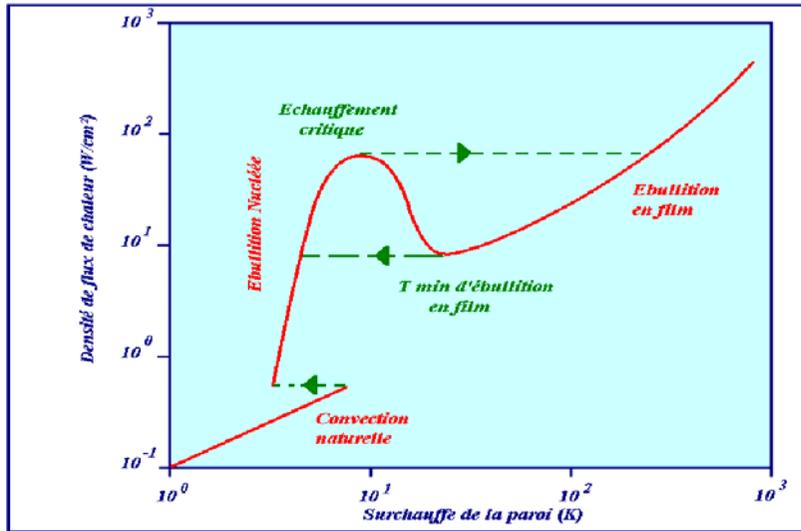
- Elles assurent une liaison mécanique avec les tubes-guides
- Elles assurent une fonction de mélange hydraulique très importante pour la sûreté



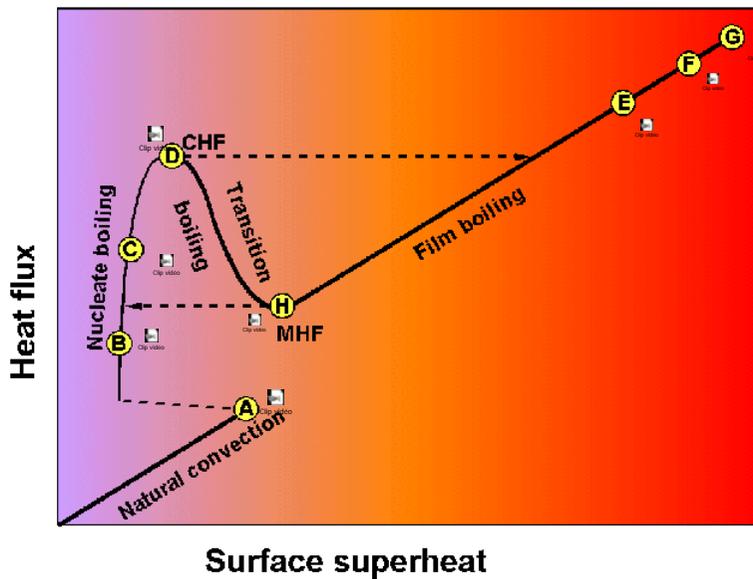
GRILLE DE MAINTIEN DES CRAYONS  
 AVEC AILETTES DE MELANGE

# LES ECHANGES THERMIQUES DIPHASIQUES

## L'échange thermique gaine/fluide : Courbe de NIKUYAMA

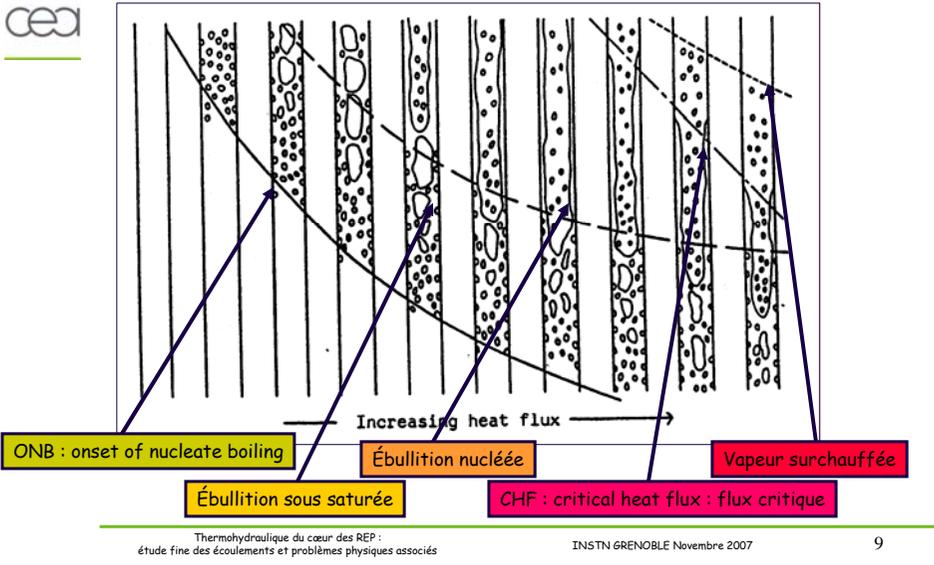


# LES ECHANGES THERMIQUES FLUIDE/GAINE

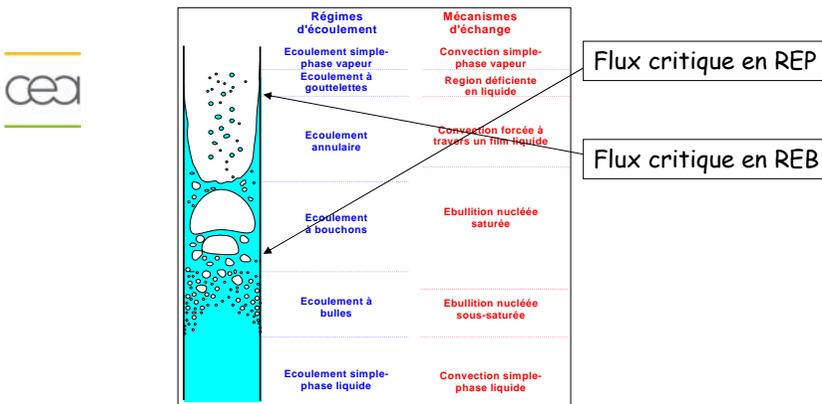


# LES ECOULEMENTS EN CŒUR DE REACTEUR REP ou REB

## Un canal chauffant en eau/vapeur



## L'EBULLITION EN CANAL



On distingue donc :

1. La caléfaction
  - Basse qualité
  - Fort écart de température
2. L'assèchement
  - Haute qualité
  - « faible » écart de température

## L'EBULLITION « EN VRAI » DANS LE COEUR

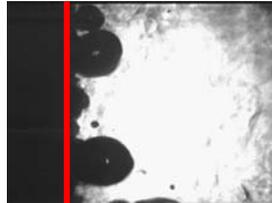
- Interaction entre ébullition et corrosion
- Visualisation de l'ébullition en conditions REP en géométrie réelle



- Pression : 2.6 MPa
- température : 202°C
- Vitesse massique :  $2.1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$
- Flux thermique : 0.6 MW/m<sup>2</sup>

Crayon  
combustible

Fluide

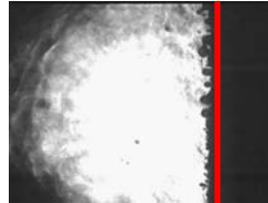


D ~ 290 μm

Gaine à 2.5 μm d'oxyde

Fluide

Crayon  
combustible



D ~ 60 μm

Gaine à 20 μm d'oxyde

## L'échange thermique gaine/fluide



- **Monophasique liquide**

- Convection forcée ou naturelle
- $T_p = T_{\text{liquide}} + \phi / h$ 
  - h coefficient d'échange thermique,  $\phi$  densité surfacique de flux de chaleur (flux thermique en surface)
  - Convection forcée  $h \cdot D_h / \lambda = Nu = f(Re, Pr)$  Reynolds et Prandtl,  $D_h$  diamètre hydraulique
  - Exemple : corrélation de Dittus-Boelter :  $Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} Pr^{0.4}$
  - $T_p - T_{\text{liquide}} = 40 \text{ °C}$  pour  $T_{\text{liquide}} = 300 \text{ °C}$ ,  $P = 155 \text{ bars}$ ,  $\phi = 140 \text{ W/cm}^2$

- **Diphasique**

- Dès que  $T_p$  atteint  $T_{\text{sat}} + \Delta T_{\text{sat}}$ , il y a ébullition en paroi
  - Si  $T_{\text{liquide}} < T_{\text{sat}}$  les bulles se recondensent dans le liquide froid
    - Ebullition sous-saturée
    - L'ébullition extrait beaucoup de chaleur (par chaleur latente)
    - $T_p$  reste bloqué à  $T_{\text{sat}} + \Delta T_{\text{sat}}$ ,  $\Delta T_{\text{sat}} = f(P, \phi)$  (empirique et permanent)

## L'échange thermique gaine/fluide

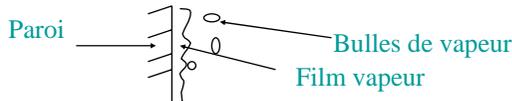


- Si  $T_{\text{liquide}} = T_{\text{sat}}$  pas de recondensation

- L'ébullition permet d'extraire beaucoup de chaleur du fait de la grande chaleur latente de l'eau

- **Mais**

- Il peut arriver que les bulles en parois coalescent et forme un film de vapeur à la paroi



- Ce film conduit très mal la chaleur
- L'échange s'effondre et la température de gaine augmente violemment

→ C'est le flux critique

- **Très brutal** et à éviter pour ne pas détruire la gaine (notamment risque emballement de la réaction d'oxydation de la gaine en Zr par l'eau)

## Phénomènes limitatifs : La crise d'ébullition

Fragment de grappe ayant subi une crise d'ébullition sans coupure de la puissance dans la section d'essais

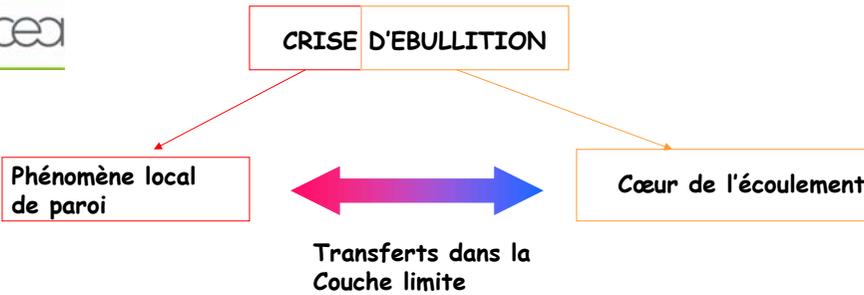


Désespéré!!



Les thermocouples n'étaient pas à la bonne place!!!

## LA PHYSIQUE DE LA C.E.



La crise d'ébullition sera modélisée quand seront modélisés:

- L'ébullition au sein du fluide
- L'ébullition de paroi
- Les transferts en couche limite

## LE CHF



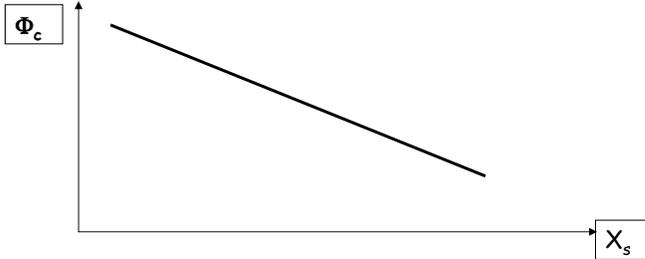
La physique mise en jeu

1. L'ébullition à cœur de l'écoulement
  - Taux de vapeur
  - type d'écoulement
2. L'ébullition de paroi
  - Sites de nucléation
  - Glissement des bulles à la paroi (PWR)
  - assèchement d'un film liquide (BWR)

## EVOLUTIONS DU FLUX CRITIQUE



influence de la qualité



décroissance **linéaire** (non expliquée) avec la qualité

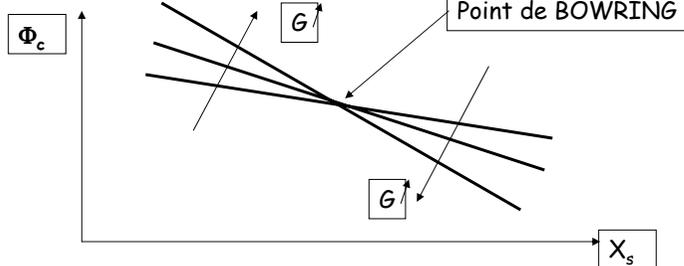
Si  $X$  quantité de vapeur en paroi

CHF diminue

## EVOLUTIONS DU FLUX CRITIQUE



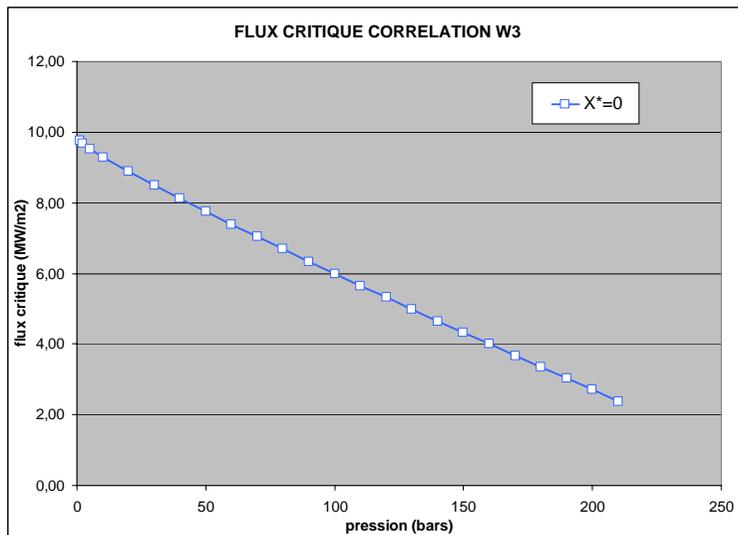
Influence de la vitesse massique (débit)



A basse qualité : si  $G \nearrow$  on augmente le coefficient d'échange  
 → CHF augmente

A haute qualité : si  $G \nearrow$  on déstabilise le film liquide en paroi  
 → CHF diminue

## EVOLUTIONS DU FLUX CRITIQUE



## critères de dimensionnement le REC (ou RFTC)



*En conditions de fonctionnement de classes 1 et 2 :*

- Maintenir l'intégrité de l'assemblage : fonctionnement normal possible avec quelques crayons non étanches
- Eviter la crise d'ébullition (= mécanisme potentiel de perte d'intégrité du crayon)



- Assurer une probabilité d'au moins 95% à un taux de confiance de 95% de ne pas atteindre le flux de chaleur critique sur les crayons limitatifs du cœur => Respect d'une valeur minimale du Rapport de Flux Thermique Critique (RFTC) ou encore Rapport d'Echauffement Critique (REC)

## critères de dimensionnement : Le REC ou RFTC



On définit le REC (RFTC)

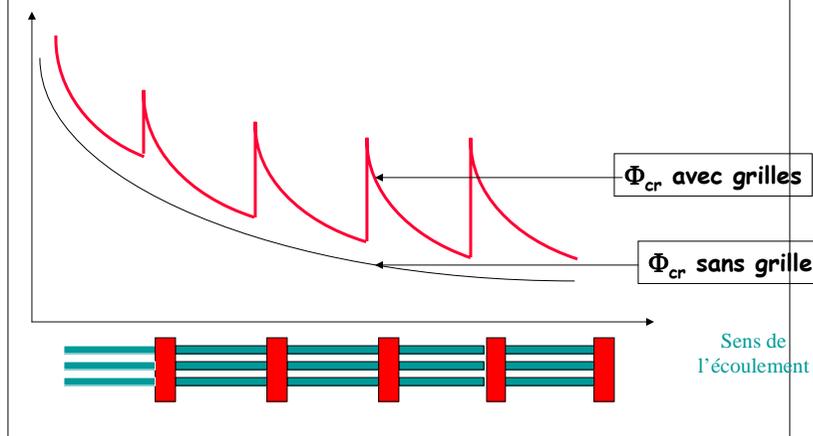
$$REC = \frac{\phi_{\text{critique\_réel}}}{\phi_{\text{local}}}$$

- Critère statistique
  - REC > 1+ε avec ε dépendant de la corrélation utilisée
- Ce critère sert de base au seuil des alarmes
- A conditions thermohydrauliques données les performances vis-à-vis du Flux critique dépendent beaucoup du design assemblage (grilles avec les ailettes\*)
  - Secteur fortement concurrentiel et permettant des gains en pilotage réacteur (Moins d'arrêts d'urgence intempestifs si le flux critique est plus élevé avec un certain type de combustible)
- \*Les grilles avec ailettes brassent le fluide transversalement réduisant le titre des canaux chauds et créent de la turbulence qui accroît le flux critique

## Le profil axial du flux critique en réacteur



- La marge au flux critique est maximale en aval de chaque grille et minimale en amont de la suivante!



## critères de dimensionnement : Le REC ou RFTC



- Construction d'une corrélation fournissant une approximation du flux critique réel

et

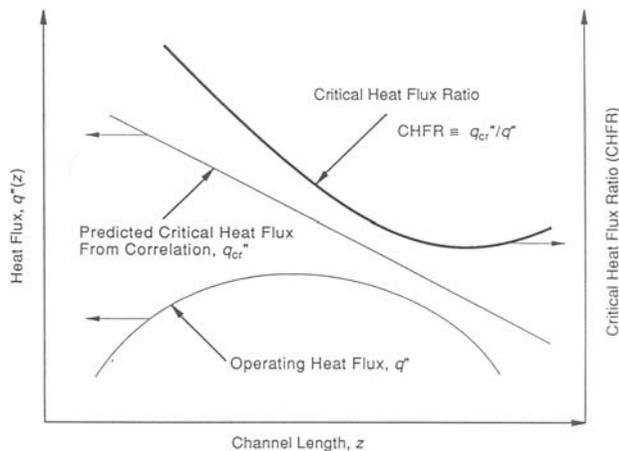
Mise au point d'une méthode pour évaluer la marge à la crise d'ébullition

Nécessité de réaliser de nombreuses et coûteuses campagnes d'essais notamment sur la boucle OMEGA (CEA/Grenoble)

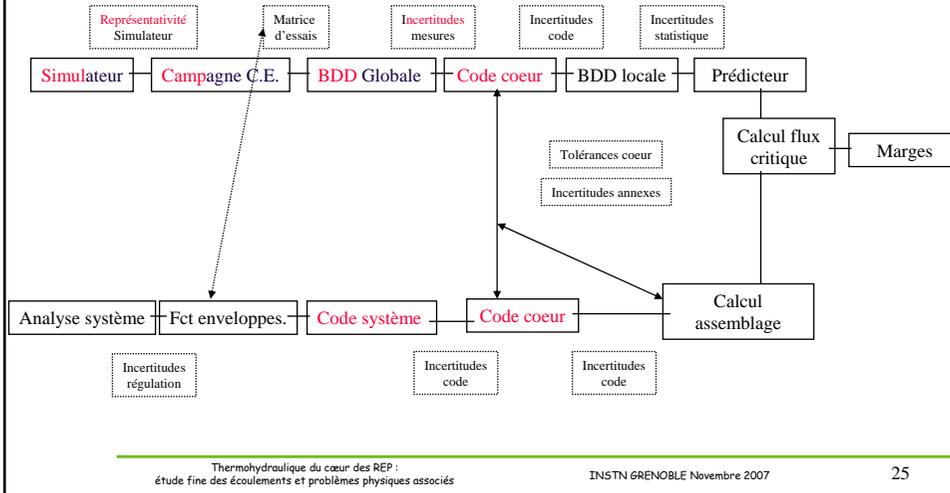
## critères de dimensionnement : Le REC ou RFTC



- Cote critique et flux critique sont déterminés simplement!



# LA DEMARCHE EN CRISE D'EBULLITION



## critères de dimensionnement : Le REC ou RFTC

- **La boucle OMEGA :**

- Réfrigérant : eau
- Puissance : 10 MW
- Pression max: 170 bar
- Vitesse massique : environ 4500 kg/m<sup>2</sup>s

- **La section d'essais**

- Géométrie 5x5- Crayons pleine hauteur
- Chauffage par effet Joule
- Crise d'ébullition détectée par des thermocouples de paroi

- **Une campagne :**

- Un type de grille
- Un espacement entre grilles
- Une forme axiale de flux

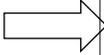
- **Les résultats :**

- Variation des conditions aux limites (Ps, Ge, Te)
- Valeur du flux critique
- Localisation de la crise d'ébullition

## critères de dimensionnement : Le REC ou RFTC



- Instrumentation globale des sections d'essais => utilisation d'un code de calcul pour déterminer les variables thermohydrauliques locales (Pression, vitesse massique et titre), à l'endroit de la crise d'ébullition.



Nécessité de valider le code calcul => Installation **Graziella**

*boucle en Fréon 12 dont la section d'essais est une grappe de 25 tubes (5x5) de diamètre externe 9.5 mm au pas de 12.6 mm. Un boîtier carré en Makrolon définit la section de passage du fluide. Les tubes sont chauffés par effet Joule (15000 A au maximum pour une tension maximale de 55 V) avec une surchauffe de 33.5% pour les 9 tubes centraux*

Mesures par prélèvement des répartitions de débits et enthalpies en sortie de grappe

## critères de dimensionnement : Le REC ou RFTC



- Exemples de corrélation de flux critique établies en tube chauffant (1/3):

### Corrélation W3 de Westinghouse

Sa formulation en unité SI est :

$$\phi_c = A \times B \times C \times D \times E$$

avec  $\phi_c$  en MW/m<sup>2</sup>.

$$A = [(6,379 - 0,1968p) + (0,5432 - 0,04502p) \exp(18,177 - 0,5989p)]\chi$$

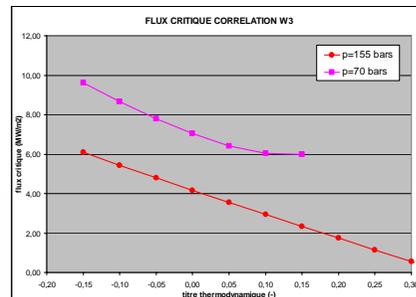
(p en MPa),

$$B = [G(0,10942 - 1,1768\chi + 0,12749\chi|\chi|) + 1,037] [G \text{ en } t/(m^2 \cdot s)],$$

$$C = (1,157 - 0,869\chi),$$

$$D = (0,2664 + 0,8357 \exp(-124,1D)) (D \text{ en } m),$$

$$E = [0,8258 + 0,0003413(H_e^{sat} - H_e)] (H \text{ en } kJ/kg).$$



## les facteurs correctifs



- Pour tenir compte d'une variation axiale de flux, on divise la valeur du flux critique par celle du facteur de flux non uniforme (FNU) modélisé par :

$$FNU = \frac{K}{\varphi(Z_c) [1 - \exp(-KZ_c)]} \int_0^{Z_c} \varphi(\xi) \exp[-K(Z_c - \xi)] d\xi$$

- $Z_c$  est compté soit à partir du début de la cote d'ébullition soit de la longueur chauffante

- $K$  en  $m^{-1}$ 

$$K = \frac{b_1(1-x)^{b_2}}{G^{b_3}}$$

$b_1 = 185.6$   
 $b_2 = 4.31$   
 $b_3 = 0.478$

## les facteurs correctifs



Pour passer du tube au faisceau

### ▪ Facteur de paroi froide

$$\Phi_{U.PF}^{crit} = \Phi_U^{crit} * F_{PF}$$

Pour la corrélation W3 celui-ci est :

$$F_{PF} = 1 - \left( 1 - \frac{D_H}{D_{CH}} \right) \left[ \frac{13.76 - 1.372 \exp(1.78\tau) - 4.533G^{-0.0535} - 0.0342 p^{0.14}}{-79.523 D_H^{0.107}} \right]$$

## les facteurs correctifs

Pour passer du tube au faisceau



### ▪ Facteur de grille

$$F_G = 1.0 + 2.21 \cdot 10^{-5} G (TDC/0.019)^{0.35}$$

### ▪ Penalité d'arcure

$$F_A = 1 \quad \text{quand} \quad \bar{\phi} \leq [4763. - 24.24P]$$

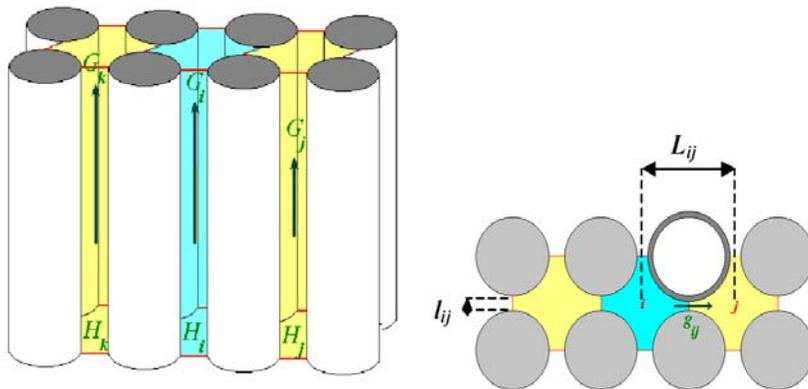
$$F_A = 1 - (1.79 - 9.49 \cdot 10^{-3} P) 10^{-3} [\bar{\phi} - (4763. - 24.24P)]$$

## Facteurs influents, données et méthodes de calcul

Codes de calcul de cœur (FLICA au CEA, TA, FRA)



### Analyse par sous canaux

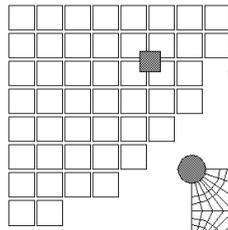


## Facteurs influents, données et méthodes de calcul

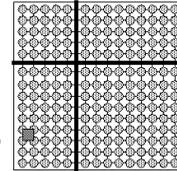
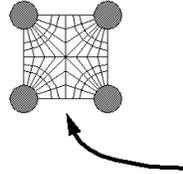


Démarche progressive :

- Calcul du cœur complet  
Avec / sans symétries  
Pas de détail interne assemblage
- Zoom sur l'assemblage « chaud »  
Géométrie réelle (grilles, ...)
- Zoom sur le sous canal critique  
Uniquement dans les cas « difficiles »



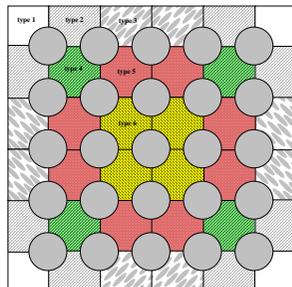
maillages cœur REP  
500 à 50000 mailles



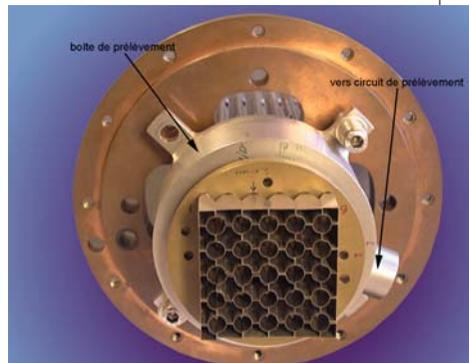
## La validation des codes de calcul



- Installation Graziella



types et numérotation de sous-canaux dans une grappe



## Problématique CEA de la C.E. : Objectif et contextes



- **Objectif :**

Compréhension de l'ébullition engendrée en paroi par transfert thermique en convection forcée avec prise en compte des phénomènes physiques à toutes les échelles de la Mécanique des Milieux Continus.

- **Contexte historique :**

- Progrès de la modélisation :
  - Empirisme -> Analyse physique
- Evolution des besoins expérimentaux :
  - Paramètres globaux -> données locales
- Evolution des moyens de mesure :
  - Miniaturisation de l'instrumentation et augmentation des bandes passantes

- **Contexte d'application : Les REP**

## Problématique : démarche expérimentale



- **L'ébullition en convection est multi-échelles**

- Macro-échelle :  $10^{-2}$  ->  $10^{-3}$  m Cœur de l'écoulement
- Mésos-échelle :  $10^{-3}$  ->  $10^{-4}$  m Couche limite
- Micro-échelle :  $10^{-4}$  ->  $10^{-5}$  m Phénomènes de paroi et ligne triple

- **L'analyse expérimentale :**

- Caractériser la phénoménologie
- Établir les interactions
- Fournir les données pertinentes
- Rester représentative des conditions REP
- **TOPOLOGIE** (depuis 1990), **EBULLITION DE PAROI** (depuis 2001)

## TOPOLOGIE : Cœur de l'écoulement

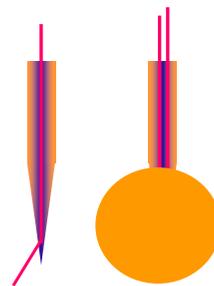


- **Objectifs :**
  - ✓ Quantification des paramètres prépondérants
  - ✓ Compréhension et modélisation de l'évolution topologique
- **Spécificités :**
  - ✓ Gamme REP
  - ✓ Développement complet de l'ébullition ONB -> CE
  - ✓ Étude en similitude
- **Enjeux :**
  - ✓ Capitalisation des développements technologiques
  - ✓ Validation en **fluide réel**

## Instrumentation : Sonde optique Principe



- **Principe**
  - Variation discrète de l'indice de réfraction



- **Informations accessibles :**
  - La fonction indicatrice de phase

- 1 Élément sensible → Taux de présence  
Concentration d'aire interfaciale
- 2 Éléments sensibles → Vitesse des interfaces  
Granulométrie
- 4 Éléments sensibles → Concentration d'aire interfaciale

## TOPOLOGIE : Les acquis

- **Techniques :**

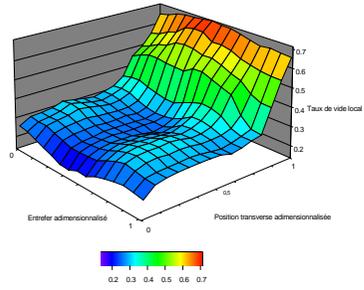
Générateur Thermohydraulique : DEBORA

Fluide simulant

Dimensionné en gamme équivalente REP

Instrumentation :

Sondes optiques mono et multi-capteurs  
Chaîne d'acquisition associée  
Conditionnement + Acquisition + Traitement  
Transfert technologique réussi (RBI Meylan)



- **Scientifiques :**

Banques de données : *Variations spatiales 2D ou 3D de  $\alpha$ ,  $a_p$ ,  $V_g$ ,  $D$ ,  $Q_c$*

Tube flux uniforme gamme REP (G. Cubizolles 1996)

Tube flux non uniforme gamme restreinte.

Canal rectangulaire gamme REP-PN (F. François 2001)

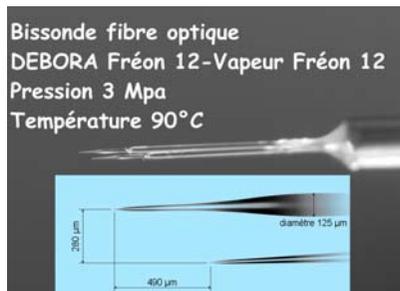
Interprétation :

Thèses : Etienne Manon (2000), F. François (2001)

Publications : MST J. Garnier et al. (2001)

## Instrumentation : Sonde optique Acquis 1

- **Capteurs :**





- Sonde Haute Pression haute température :



## TOPOLOGIE : Les programmes en cours



- Extension des banques de données :

Géométrie complexe :

Promoteur de mélange en tube,  
Effets géométriques en canal rectangulaire.

- Interprétation :

Collaboration avec [Clemson University](#) (2001-2002)

## TOPOLOGIE : Les perspectives 1



- **Immédiates (1-2 ans) : Analyses séparées des effets**
  - Objectif : Amélioration de la modélisation
    - Recondensation
    - Coalescence
    - Fractionnement
  - Moyens : DEBORA et Instrumentation existante
  - Enjeu : Capitalisation des acquis techniques.
- **Court terme (2-3 ans) : Passage en fluide réel (H<sub>2</sub>O)**
  - Objectif : Validation de la similitude
  - Moyens : PATRICIA + chaîne d'acquisition CEA - RBI
  - Besoins : Capteur Haute Pression Haute Température.
  - Enjeu : Validation de la démarche .
- **Moyen terme (3-7ans)**
  - **Extension de moyens de mesure :**
    - Objectif: Vitesse liquide locale en conditions REP
    - Moyens : DEBORA
    - Besoins : *Durcissement* de l'anémométrie thermique.
    - Enjeu : Extension des banques de données
  - **Passage aux écoulements en grappes:**
    - Objectif: Validation de la similitude
    - Moyens : GRAZIELLA et OMEGA instrumentation HT/HP
    - Besoins : Technologie de déplacement de sondes locales
    - Enjeu : Obtention de données en **conditions réelles REP.**

## EBULLITION DE PAROI : QLOVICE



**Quantification des**  
**LOis de paroi et**  
**Visualisation de la**  
**Crise d'**  
**Ebullition**

## QLOVICE : Phénoménologie méso échelle



- **Objectifs :**

- Quantification
  - Densité de sites de nucléation
  - Fréquence de détachement
  - Diamètre de bulles au détachement
- Identification
  - Nature du glissement pariétal des bulles (avec ou sans contact?)
  - Phénoménologie de la crise d'ébullition

## QLOVICE : Perspectives court terme



- **Stratégie :**

Visualiser l'ébullition à travers la paroi chauffante.

Problème : Développement de l'élément chauffant transparent

Solution : Dépôt d'une couche mince conductrice et transparente

- **Projets :**

- **DAGOBERT**

Dispositif d'Analyse de la GerminatiOn des BullES sur  
Résistance Transparente.  
Dispositif d'essais

- **EUROD :**

EtUde de la Résistance d'Oxyde en Dépôts.  
Banc de caractérisation d'un ensemble chauffant transparent

# QLOVICE Micro Échelle



- **Objectif : Phénoménologie de la ligne triple**
  - Situation dynamique en déséquilibre thermique.
  - Phénoménologie et quantification
  
- **Avancement :**
  - Veille technologique : caractérisation des angles de contact.

## Synthèse : Stratégie globale



|              | Délai d'achèvement<br>2 à 5 ans   | Délai d'achèvement<br>5 à 10 ans   | Délai d'achèvement<br>10 à 15 ans                     |
|--------------|---|--|---|
| <b>Macro</b> | Effets séparés<br>(tube)<br>DEBORA<br>13  | Quantification<br>Topologie en grappe<br>Omega<br>Vitesse liquide FEDRE<br>Modélisation<br>123 | Qualification<br>234                                  |
| <b>méso</b>  | Identification des<br>phénomènes<br>Visualisation<br>(EUROD et<br>DAGOBERT)<br>13 | Quantification et<br>modélisation<br>123   | Qualification<br>234                                  |
| <b>micro</b> | Angle de contact<br>dynamique<br>4  | Transfert de masse<br>4  | Physique de la ligne<br>triple<br>Modèle prédictif CE |

1 – Codes industriels actuels  
2 – CTA  
3 – NEPTUNE  
4 – SND