



*Le code système du futur :  
Turbulence, aire interfaciale et  
modèle multi-champs*

Guillaume SERRE (CEA)

# ÉCOULEMENTS ET TRANSFERTS DE CHALEUR DIPHASIQUES DANS LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

## Le code système du futur : Turbulence, aire interfaciale et modèle multi-champs

P106\_25\_v1

**Guillaume SERRE**  
DEN/DER/SSTH



# Code Système du futur

G. Serre

CEA-Grenoble , 17 rue des martyrs,  
38054 GRENOBLE Cedex 9, FRANCE

Email:guillaume.serre@cea.fr

- ✓ Limitations des codes systèmes actuels
- ✓ De nouvelles voies d'amélioration : le projet Cathare 3
  - modélisation de la turbulence
  - Modélisation de l'aire interfaciale
  - Approche multichamps

## Codes systèmes actuels :

- ✓ basés sur le modèle bi-fluide à 6 équations couplées (masse, qdm, énergie)
- ✓ Modules 0D, 1D, 3D pour les milieux poreux
- ✓ Validation physique sur une base de données expérimentale gigantesque.

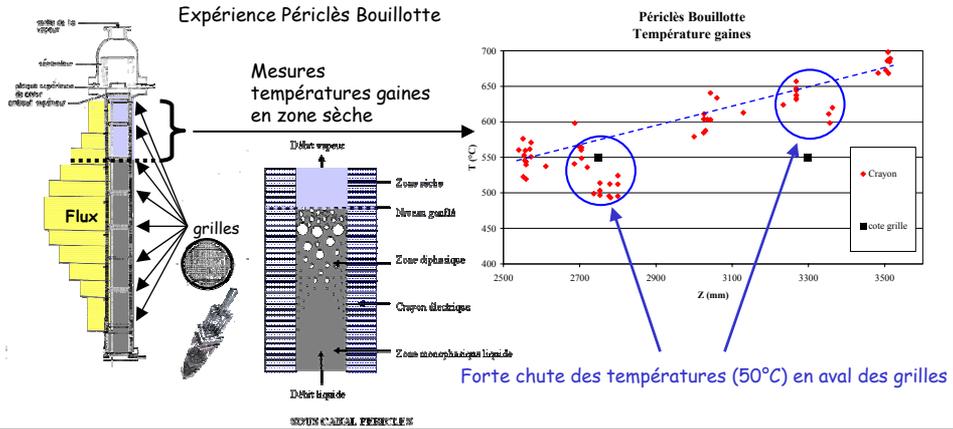
## Quelques limites connues :

- ✓ Fort degré d'empirisme de certaines lois de fermeture.
- ✓ Évaluation très rudimentaire de l'aire interfaciale .
- ✓ Carte d'écoulement : critère algébrique; pas de transition dynamique.
- ✓ Écoulements non établi et phénomènes turbulents mal ou non traités.
- ✓ Un seul champ pour rendre compte de comportements différents.

## Pourquoi modéliser la turbulence dans les codes systèmes ?

Les transferts thermiques entre paroi et fluide en dépendent

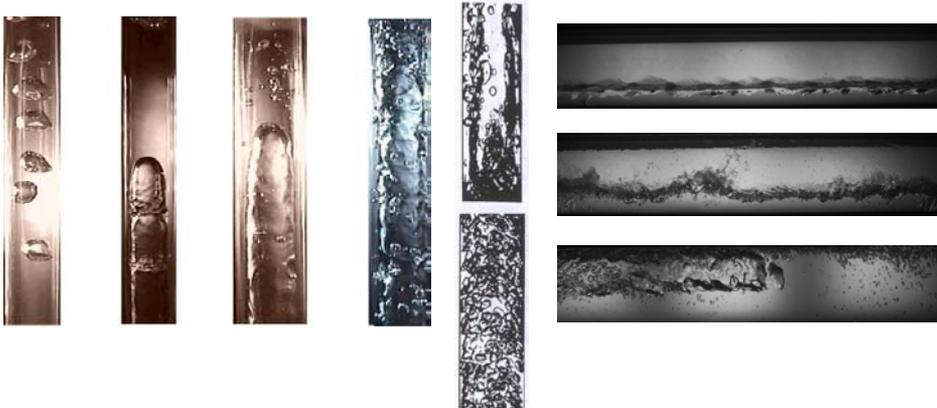
Refroidissement du cœur sensible aux promoteurs de turbulence  
(grilles d'espacement avec ailettes).



## Pourquoi modéliser la turbulence dans les codes systèmes ?

Topologie des écoulements diphasiques dépend de la turbulence.  
La surface d'échange (aire interfaciale) également.

Ex : écoulements à fort débits d'air  
(interface augmente avec la turbulence,  
des bulles/gouttes sont arrachées)



## Pourquoi modéliser la turbulence dans les codes systèmes ?

Les transitions de régime d'écoulement dépendent de la turbulence

Ex: écoulement horizontal à bulle <->

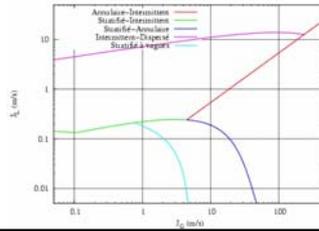


La turbulence du liquide joue contre la stratification.

écoulement stratifié



Expérience Métero

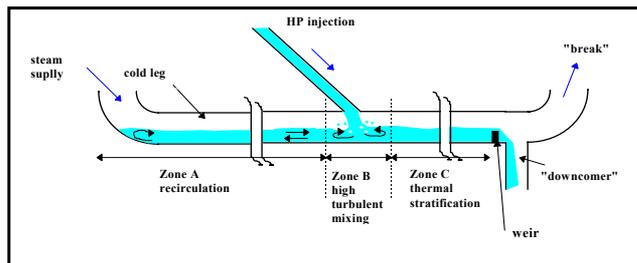
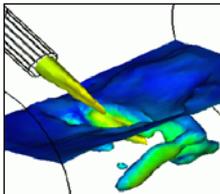


## Pourquoi modéliser la turbulence dans les codes systèmes ?

Les transferts interfaciaux dépendent de la turbulence.

Ex : choc froid.

La condensation dépend fortement de la turbulence induite par le jet de l'injection de secours.



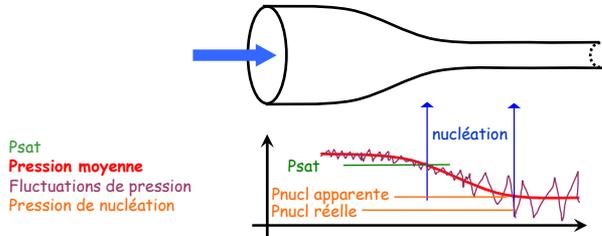
Expérience Cosi

## Pourquoi modéliser la turbulence dans les codes systèmes ?

Les transferts interfaciaux dépendent de la turbulence.

Ex : Retard à l'autovaporisation.

Les fluctuations de pression turbulente jouent sur la surdétente du liquide.



Surdétente apparente :  $\Delta \bar{P} = P_{Sat} - \bar{P} > 0$

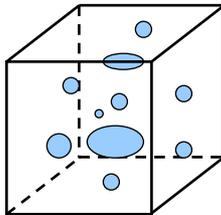
Surdétente réelle :  $\Delta P_{Max} = P_{Sat} - (\bar{P} - \text{Max}|p'|)$        $\text{Max}|p'| = F(K_L)$

Impact attendu sur le débit critique

## Pourquoi modéliser l'aire interfaciale dans les codes systèmes ?

Qu'est-ce que l'aire interfaciale ?

$A_i$  ( $m^2$ ): Aire interfaciale : surface totale des inclusions contenues dans le volume  $V$  / volume  $V$



Soient  $V$  le volume du cube,

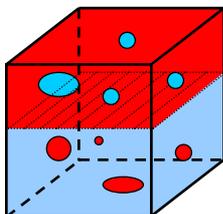
Si les surfaces des  $n$  bulles/gouttes/particules,

L'aire interfaciale :

$$A_i = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{V}$$

Cas particulier de  $n$  sphères de diamètre identique  $d$  occupant la fraction  $\alpha$  du volume  $V$  :  $A_i = \frac{n \pi d^2}{V} = \frac{6 \alpha}{d}$

$$d_s = \frac{6 \alpha}{A_i} \text{ diamètre de Sauter}$$



Cas général, on peut définir les aires interfaciales suivantes

Boules bleues :  $A_{i_b} = \frac{\sum_{i=1}^{nb} S_{i_b}}{V}$

Boules rouges :  $A_{i_r} = \frac{\sum_{i=1}^{nr} S_{i_r}}{V}$

la frontière entre zones rouge et bleu :  $A_{i_f} = \frac{\text{Surface frontière}}{V}$

Remarque  $A_{i_r} \gg A_{i_f}$   
 $A_{i_b} \gg A_{i_f}$

## Pourquoi modéliser l'aire interfaciale dans les codes systèmes ?

Les transferts interfaciaux sont proportionnels à... l'aire interfaciale.

Flux de chaleur de condensation/vaporisation :  $\Phi = f(A_i, Nu, \Delta T, \dots)$

Frottement interfacial :  $\tau_i = f(A_i, C_f, \Delta V, \dots)$

Dans les codes actuels  $A_i$  est calculé par des corrélations algébriques :

Écoulement à gouttes :  $A_{i_g} = \frac{6\alpha}{d_g}$   
 corrélation empirique  $\rightarrow$

Écoulement annulaire :  $A_{i_a} = \frac{4}{D_H}$

Écoulement à bulles :  $A_{i_b} = \frac{1}{\frac{1}{D_H} + \xi}$   $\xi = \sqrt{\sigma / g \Delta \rho}$

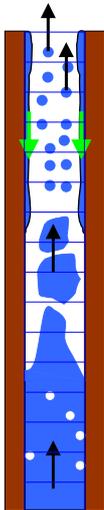
Écoulement stratifié :  $A_{i_s} = \frac{8}{\pi D_H} \sqrt{\alpha(1-\alpha)}$

Corrélations simplistes, statiques, rien pour les transitions d'écoulement

$\Rightarrow$  Modéliser une aire interfaciale DYNAMIQUE avec une équation de transport

## Pourquoi utiliser une approche multi-champs dans les codes systèmes ?

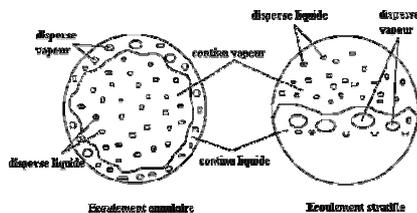
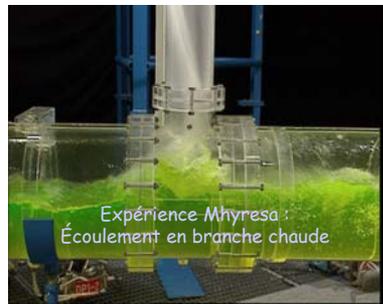
Situations où le modèle bi-fluide est pris en défaut.



Renoyage par le bas et le haut

Modèle bi-fluide :  
 1 vitesse liquide pour décrire les gouttes et le film  
 qui ont des dynamiques TRES différentes !

Modèle multi-champs :  
 1 vitesse pour les gouttes ET 1 vitesse pour le film



## Modèle de turbulence de CATHARE 3

### Modèle local (3D) de turbulence diphasique

Équations pour l'énergie cinétique turbulente de la phase k :  $k_k$  et  
pour la dissipation de l'énergie cinétique turbulente de la phase k :  $\varepsilon_k$

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k k_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_k \rho_k k_k \overline{U_{kj}})}{\partial x_j} = \alpha_k \rho_k (P_k + P_{ki}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \rho_k \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_k}{\partial x_j} \right) - \alpha_k \rho_k \varepsilon_k + \Gamma_k k_{ki}$$

Convection	production monophasique (cisaillement)	production diphasique (sillage de bulles...)	diffusion	dissipation	transfert de masse
------------	--	--	-----------	-------------	-----------------------

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k \varepsilon_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_k \rho_k \varepsilon_k \overline{U_{kj}})}{\partial x_j} = \alpha_k \rho_k \frac{\varepsilon_k}{k_k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} P_{ki}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \rho_k \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \alpha_k \rho_k \frac{\varepsilon_k^2}{k_k} + \Gamma_k \varepsilon_{ki}$$

Avec  $\nu_t = c_\nu \frac{k^2}{\varepsilon}$  et  $c_{\varepsilon 1} 1.92$ ,  $c_{\varepsilon 3} 1.44$ ,  $\sigma_k 1$ ,  $\sigma_\varepsilon 1.3$ ,  $c_\tau 0.09$

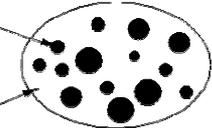
Ce modèle est dédié aux codes CFD pas aux codes systèmes : à moyenner.

Morel, C., Pouvreau, J., Laviéville, J., Boucker, M., 2004, Numerical simulations of a bubbly flow in a sudden expansion with the NEPTUNE code, 3rd Int. Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, Pisa, Italy, September 22-24.

## Modèle de turbulence de CATHARE 3

Adaptation du modèle local de turbulence en le moyennant avec une approche MILIEUX POREUX.

Solide

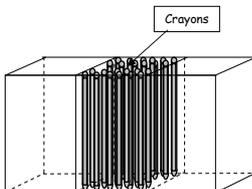
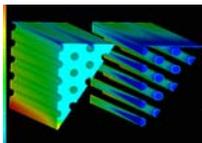


Fluide

$\chi = \begin{cases} 1 & \text{dans le fluide} \\ 0 & \text{dans le solide} \end{cases}$

$\langle \psi \rangle_f = \frac{1}{V_f} \int_V \chi \psi \, dV$   
 Porosité :  $\vartheta = \frac{V_f}{V} = \frac{1}{V} \int_V \chi \, dV$

Approche milieux poreux : les parois, structures (crayons combustibles,...) sont inclus dans les moyennes spatiales et deviennent des **termes sources** des équations moyennées.



#### Code CFD classique

Discretisation fine, les mailles épousent les surfaces des crayons, les crayons sont des conditions limites pour la qdm et le bilan d'énergie

#### Code système poreux

3 mailles. Dans la maille du centre :  
 volume fluide = volume maille - volume crayons  
 surface totale des crayons → terme de frottement qdm  
 Puissance thermique crayons → terme source éq. d'énergie

## Modèle de turbulence de CATHARE 3

Équation pour l'ÉNERGIE CINÉTIQUE TURBULENTE MOYENNE de la phase k :  $K_k = \langle k_k \rangle_{\alpha p f}$

$$A_k \equiv \langle \alpha_k \rangle_f \quad E_k = \langle \varepsilon_k \rangle_{\alpha p f} \quad R_k \equiv \langle \rho_k \rangle_{\alpha f} \equiv \frac{\langle \alpha_k \rho_k \rangle_f}{\langle \alpha_k \rangle_f} \quad \Psi_k \equiv \langle \Psi_k \rangle_{\alpha p f} \equiv \frac{\langle \alpha_k \rho_k \Psi_k \rangle_f}{\langle \alpha_k \rho_k \rangle_f}$$

$$\frac{\partial(A_k R_k K_k)}{\partial t} + \frac{1}{9} \frac{\partial(\vartheta A_k R_k K_k U_{kj})}{\partial x_j} = A_k R_k (P_{kM} + P_{kiM} + P_{k\vartheta} + P_{ki\vartheta}) - A_k R_k E_k + \langle \Gamma_k k_{ki} \rangle_f$$

↑ Convection  
↑ production externe (M) et interne (9) monophasique et diphasique (i)  
↑ dissipation  
↑ transfert de masse (changement de phase)

**Production externe :**  
cisaillement/frottement  
interfacial entre 2 mailles

**Production interne :**  
cisaillement/frottement  
interfacial à l'intérieur d'une  
maille (après intégration)

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( v_k + \frac{\tilde{v}_{ik}}{\sigma_k} \right) \left[ \frac{1}{9} \frac{\partial}{\partial x_j} (\vartheta A_k R_k K_k) - \left\langle k_k \frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial x_j} \right\rangle_f \right] \right\}$$

↑ Diffusion moléculaire et turbulente

$$- \frac{1}{9} \frac{\partial(\vartheta A_k R_k \langle \delta k_k \delta \overline{U}_{kj} \rangle_{\alpha p f})}{\partial x_j}$$

↑ dispersion (provient de la moyenne du terme convectif initial)

Termes à modéliser

## Modèle de turbulence de CATHARE 3

Équation pour la DISSIPATION MOYENNE de l'énergie cinétique turbulente de la phase k :  $E_k = \langle \varepsilon_k \rangle_{\alpha p f}$

$$A_k \equiv \langle \alpha_k \rangle_f \quad K_k = \langle k_k \rangle_{\alpha p f} \quad R_k \equiv \langle \rho_k \rangle_{\alpha f} \equiv \frac{\langle \alpha_k \rho_k \rangle_f}{\langle \alpha_k \rangle_f} \quad \Psi_k \equiv \langle \Psi_k \rangle_{\alpha p f} \equiv \frac{\langle \alpha_k \rho_k \Psi_k \rangle_f}{\langle \alpha_k \rho_k \rangle_f}$$

$$\frac{\partial(A_k R_k E_k)}{\partial t} + \frac{1}{9} \frac{\partial(\vartheta A_k R_k E_k U_{kj})}{\partial x_j} = A_k R_k \left( C_{e1} \frac{E_k}{K_k} P_{kM} + C_{e3} \frac{P_{kiM}}{T_i} - C_{e2} \frac{E_k^2}{K_k} \right) + A_k R_k P_{k\vartheta} + \langle \Gamma_k \varepsilon_{ki} \rangle_f$$

↑ Convection  
↑ production externe mono et diphasique (i)  
↑ dissipation  
↑ production interne  
↑ transfert de masse (changement de phase)

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( v_k + \frac{v_{ik}}{\sigma_\varepsilon} \right) \left[ \frac{1}{9} \frac{\partial}{\partial x_j} (\vartheta A_k R_k E_k) - \left\langle \varepsilon_k \frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial x_j} \right\rangle_f + \frac{1}{V_f} \int_{\Sigma} \alpha_k \rho_k \varepsilon_k n_j dS \right] \right\} + \frac{1}{V_f} \int_{\Sigma} \alpha_k \rho_k v_k \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial x_j} n_j dS$$

↑ Diffusion moléculaire et turbulente

$$- \frac{1}{9} \frac{\partial(\vartheta A_k R_k \langle \delta \varepsilon_k \delta \overline{U}_{kj} \rangle_{\alpha p f})}{\partial x_j}$$

↑ dispersion

## Modèle de turbulence de CATHARE 3

Simplifications des équations moyennées :  
on néglige les termes de diffusion, dispersion.

1ères applications à des cas 1D (tuyau) donc sans production externe et sans changement de phase.

$$\frac{\partial(A_k R_k K_k)}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial(9A_k R_k K_k U_{zk})}{\partial z} = A_k R_k [P_{k\beta} + P_{k\beta 9} - E_k]$$

$$\frac{\partial(A_k R_k E_k)}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial(9A_k R_k E_k U_{zk})}{\partial z} = A_k R_k [P_{k\beta 9} - C_{\varepsilon 2} \frac{E_k^2}{K_k}]$$

$$A_k \equiv \langle \alpha_k \rangle_f$$

$$R_k \equiv \langle \rho_k \rangle_{af} \equiv \frac{\langle \alpha_k \rho_k \rangle_f}{\langle \alpha_k \rangle_f}$$

$$K_k = \langle k_k \rangle_{\alpha \rho f}$$

$$E_k = \langle \varepsilon_k \rangle_{\alpha \rho f}$$

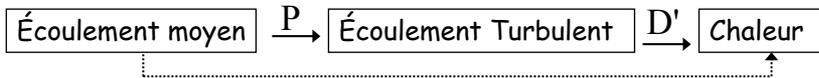
Les termes de production internes mono et diphasique doivent être modélisés

Chandesris M., Serre G., Sagaut P.,  
"A macroscopic turbulence model for flow in porous media adapted to channel, pipe and rod bundle flows",  
Int. J. of Heat and mass transfer 49, 2006.

Chandesris M., Serre, G. : « One dimensional averaged (k-ε) turbulence model applied to channel, pipe and rod bundle flows »,  
NURETH 11, 2-6 octobre 2005, Avignon, France

## Modèle de turbulence de CATHARE 3

Modélisation de la production monophasique : bilan d'énergie cinétique



$$\underbrace{\frac{1}{\rho} F_j \langle \bar{u}_j \rangle_f}_{\text{Puissance dissipée}} = \underbrace{\frac{\nu}{V_f} \int_{V_f} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)^2 dV}_{\text{Chaleur}} - \underbrace{\left\langle \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle_f}_{\substack{\text{Turbulence} \\ P}} \xrightarrow{D} \underbrace{P_{k\beta} = 2 \frac{U^3}{D_h} \left\{ C_f \left( 1 - y_{\text{lim}}^+ \sqrt{\frac{C_f}{2}} \right) + C_{is} (1 - \eta) \right\}}_{\substack{\text{Géométries régulières} \\ \text{Singularités}}}$$

Cf, Cfs coef. de perte de charge régulière et singulière  
η: perte d'énergie cinétique moyenne en chaleur dans les singularités géométriques

PRODUCTION MONOPHASIQUE = PUISSANCE DES FORCES DE FROTTEMENT - DISSIPATION EN CHALEUR

Modélisation de la production diphasique : extrapolation de la production monophasique

$$P_{k\beta 9} = |(V_G - V_L) \tau_i| \quad (\tau_i \text{ frottement interfacial})$$

PRODUCTION DIPHASIQUE = PUISSANCE DES FORCES DE FROTTEMENT INTERFACIALE

## Modèle de turbulence de CATHARE 3

### Modélisation de la production de dissipation

Approche "classique":  $P_{k\epsilon g} \propto \frac{P_{k\theta}}{\tau}$

Plusieurs choix possibles pour le temps caractéristique:  $\tau =$

$$\tau = \begin{cases} K_k / E_k \\ K_k / P_{k\theta} \\ \frac{K_\infty / P_{k\theta}}{\sqrt{K_k} / L} \end{cases}$$

$K_\infty$ : énergie cinétique turbulente moyenne à l'ÉQUILIBRE

$$K_k = K_{k\infty} \quad P_{k\theta} = E_k = \epsilon_{k\infty} \quad (\text{Production} = \text{dissipation})$$

Relation de turbulence à l'équilibre valable *localement*:  $\epsilon = \frac{k^{3/2}}{\ell}$

⇒ Nouvelle échelle de longueur pour les variables *moyennes*:  $\epsilon_{k\infty} = \frac{K_{k\infty}^{3/2}}{L_M} \quad L_M = \frac{D_H}{1 - y_{\text{lim}}^+ \sqrt{C_f/2}}$

$$K_{k\infty} = C_{1\infty} U_k^2 C_f^{2/3}$$

**Production monophasique de dissipation:**  $P_{k\theta} \propto \frac{P_{k\theta}^2}{K_{k\infty}}$

**Production diphasique de dissipation:**  $P_{k\theta i} \propto \frac{P_{k\theta i}}{\sqrt{K_k}} L_D$

**Production « singulière » de dissipation:**  $P_{k\theta S} \propto \frac{P_{k\theta S}}{\sqrt{K_k}} L_S$

$$P_{k\theta} = 2C_f \frac{D_H}{U^3} \frac{1}{D_i \left(1 - y_{\text{lim}}^+ \sqrt{\frac{C_f}{2}}\right)}$$

$L_D = \frac{6 \alpha_g}{Ai_b}$  Diamètre de Sauter  
Couplage avec l'aire interfaciale

$L_S$ : dimension caractéristique

## Modèle de turbulence de CATHARE 3

### Synthèse

$$\frac{\partial(A_k R_k K_k)}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial(9A_k R_k K_k U_{zk})}{\partial z} = A_k R_k [P_{k\theta} + P_{k\theta S} + P_{k\theta i} - E_k]$$

$$\frac{\partial(A_k R_k E_k)}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial(9A_k R_k E_k U_{zk})}{\partial z} = C_{\epsilon 2} A_k R_k \left[ \frac{P_{k\theta}^2}{K_{k\infty}} + C_\epsilon \sqrt{K_k} \left( \frac{P_{k\theta S}}{L_S} + \frac{P_{k\theta i}}{L_D} \right) - \frac{E_k^2}{K_k} \right]$$

$$A_k \equiv \langle \alpha_k \rangle_f$$

$$R_k \equiv \langle \rho_k \rangle_{af} \equiv \frac{\langle \alpha_k \rho_k \rangle_f}{\langle \alpha_k \rangle_f}$$

$$K_k = \langle k_k \rangle_{\alpha p f}$$

$$E_k = \langle \epsilon_k \rangle_{\alpha p f}$$

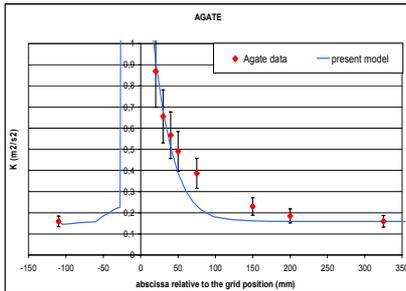
monophasique  $P_{k\theta} = 2 \frac{U^3}{D_h} C_f \left(1 - y_{\text{lim}}^+ \sqrt{\frac{C_f}{2}}\right) \quad K_{k\infty} = C_{1\infty} U_k^2 C_f^{2/3}$

singulier  $P_{k\theta S} = 2 \frac{U^3}{D_h} C_\beta (1 - \eta) \quad L_S$ : dimension caractéristique

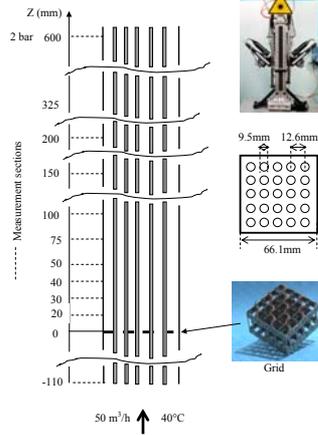
diphasique  $P_{k\theta i} = |(V_G - V_L) \tau_i| \quad L_D = \frac{6 \alpha_g}{Ai_b}$

## Turbulence à l'aval d'une grille de mélange en géométrie grappe : Agate

Prédiction par un modèle k-ε de l'évolution axiale de l'énergie cinétique turbulente k dans une grappe 5X5 avec une grille de mélange en entrée. Expérience AGATE (mesure des vitesses turbulentes par LDA).



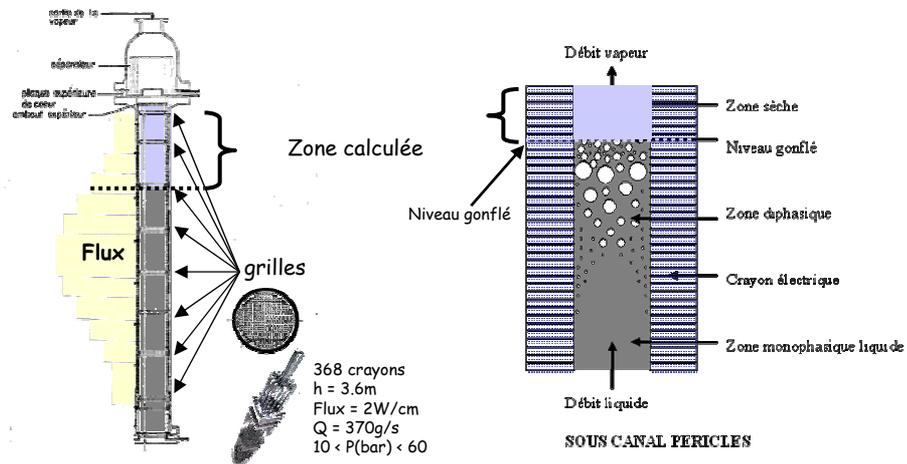
G. Serre, D. Bestion, "Progress in Improving two-fluid model in system code using turbulence and interfacial area equations", NURETH-II, Avignon, France, October 3-6, 2005 ]



Le calcul de l'énergie cinétique turbulente k dans l'eau permettra de préciser l'influence de la grille sur :

- le mélange turbulent inter-canal.
- le transfert thermique crayon - fluide.

## Effet des grilles de mélange sur la turbulence et le transfert thermique à l'aval des grilles de mélange en géométrie grappe. Expérience Périclès Bouillotte

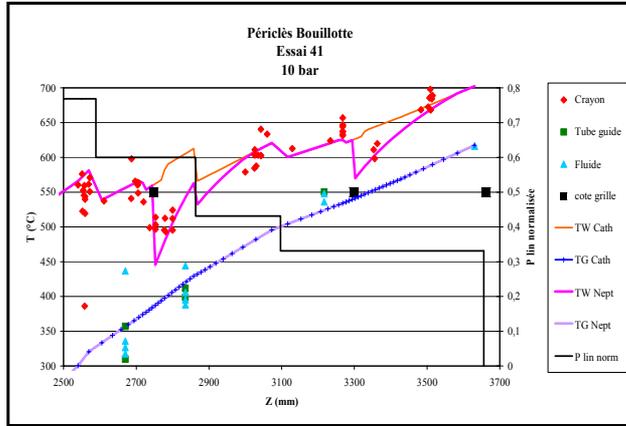


Mesures températures paroi et vapeur. Pas de mesure turbulente  
 ⇒ validation du modèle de turbulence sur une expérience adiabatique en géométrie similaire : Agate

## Effet des grilles de mélange sur la turbulence et le transfert thermique à l'aval des grilles de mélange en géométrie grappe.

$$Nu = Nu_0 Re^n Pr^m \left( \frac{k}{k_\infty} \right)^p$$

- Chute significative des température de gaine à l'aval des grilles.
- Le nouveau modèle de transfert thermique inclus la turbulence et prédit bien ce phénomène.



Calcul des températures de gaine en zone asséchée dans l'expérience PERICLES bouillotte. Les calculs sont réalisés en utilisant Cathare 2 (modèle bi-fluide à 6 équations) et Cathare 3 (=Nept).  
G. Serre, private communication

## Équations de transport pour l'aire interfaciale dans les codes systèmes

Densité moyenne d'inclusions : n

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(n \vec{V}_n) = \sum_{i=1}^4 N_i$$

Moyenne dans la section A

$$A \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(A N \langle \langle v_{nz} \rangle \rangle)}{\partial z} = A \sum_{i=1}^5 \langle N_i \rangle$$

Ni :  
nucléation au cœur du fluide  
Collapse  
Fragmentation  
coalescence

$N = \langle n \rangle = \frac{1}{A} \iint_A n(x, y, z) da$   
 $\langle N_5 \rangle$  : nucléation en paroi

Hypothèse d'inclusions sphériques monodisperses

$$N = \frac{A i^3}{36 \pi \alpha_N^2}$$

$\alpha_N$  : taux de présence de N

Ai (m<sup>-1</sup>): Aire interfaciale : surface totale des inclusions contenues dans le volume V / volume V

$$A \frac{\partial Ai}{\partial t} + \frac{\partial(A Ai v_{Nz})}{\partial z} = \frac{2 Ai}{3 \alpha_d} \left( A \frac{\partial \alpha_N}{\partial t} + \frac{\partial(A \alpha_N v_{Nz})}{\partial z} \right) + 12 \pi \left( \frac{\alpha_N}{Ai} \right)^2 A \sum_i N_i$$

## Équations de transport pour l'aire interfaciale dans les codes systèmes

Aire interfaciale des bulles  $A_{ib}$  Termes à modéliser

$$\frac{\partial A_{ib}}{\partial t} + \text{div}(A_{ib} \vec{V}_{Aib}) = \frac{2}{3} \frac{A_{ib}}{\alpha_g \rho_g} \left( \Gamma_g - \alpha_g \frac{d\rho_g}{dt} \right) + 12\pi \left( \frac{\alpha_g}{a_i} \right)^2 (\phi_{COb} + \phi_{BKb}) + \sum_j S_{jb}$$

Vitesse interfaciale    Changement de phase  $(\Gamma : \text{terme source du bilan de masse})$     Variation d'aire liée à la pression et la température    coalescence, fragmentation    Nucléation, collapse, Déformation (cisaillement...)

Aire interfaciale des gouttes

$$\frac{\partial A_{id}}{\partial t} + \text{div}(A_{id} \vec{V}_{Aid}) = \frac{2}{3} \frac{A_{id}}{\alpha_l \rho_l} \left( \Gamma_l - \alpha_l \frac{d\rho_l}{dt} \right) + 12\pi \left( \frac{\alpha_g}{a_i} \right)^2 (\phi_{COd} + \phi_{BKd}) + \sum_j S_{jd}$$

**Indices**  
 b : bulle  
 g : gaz  
 d : goutte (drop)  
 l : liquide

Vitesse interfaciale : égale à la vitesse des bulles/gouttes (hypothèse valable en écoulement dispersé)

$$\vec{V}_{Aib} = \vec{V}_g \quad \vec{V}_{Aid} = \vec{V}_l$$

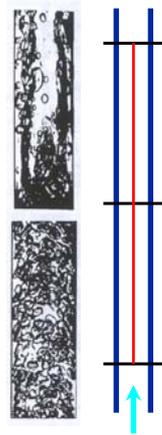
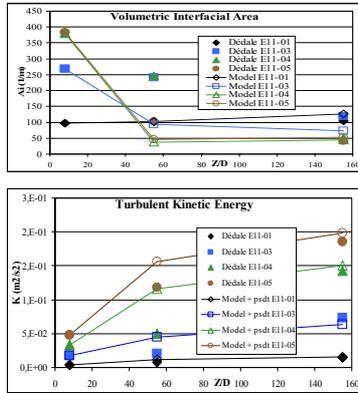
## Équations de transport pour l'aire interfaciale dans les codes systèmes

### Modélisation de la fragmentation et de la coalescence pour des bulles

	Coalescence	Fragmentation
Terme source	$\Phi_{CO} = -f_C \eta_C$	$\Phi_{BK} = -f_B \eta_B$
Fréquence de collision (collisions aléatoires dues aux tourbillons turbulents)	$f_C \propto \frac{\varepsilon^{1/3} A_i^{11/3}}{\alpha^{5/3} f(\alpha)}$	$f_B \propto \frac{\varepsilon^{1/3} A_i^{11/3}}{\alpha^{8/3}} g(\alpha)$
Efficacité de coalescence (durée de contact des bulles / temps de drainage du film) Efficacité de fractionnement (énergie turbulente / énergie de rupture)	$\eta_C \propto \exp\left[-\sqrt{\frac{We}{We_{CR}}}\right]$ $\eta_C \propto \left[1 - \exp\left(-Cte \frac{\alpha_{Max}^{1/3} \alpha^{1/3}}{\alpha_{Max}^{-1/3} - \alpha^{1/3}}\right)\right]$	$\eta_B \propto \exp\left[-\frac{We_{CR}}{We}\right]$

Weber turbulent :  $We = \frac{\rho_L u_t^2 d}{\sigma}$     Vitesse turbulente :  $u_t^2 = (\varepsilon d)^{2/3}$

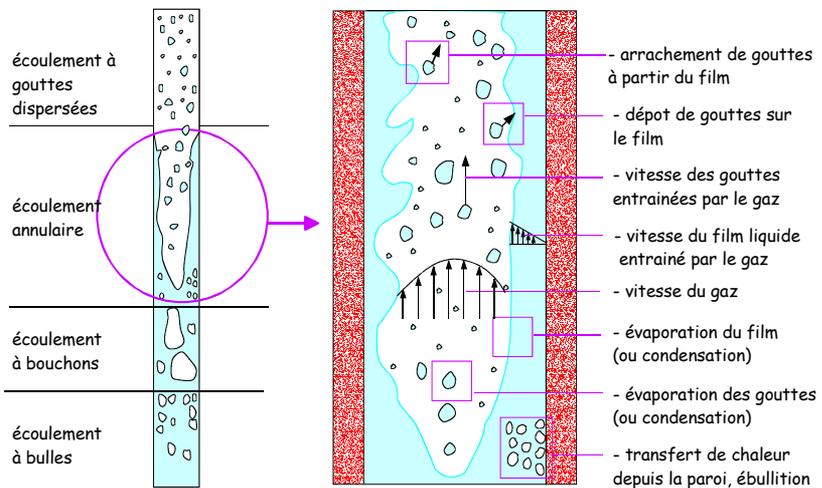
## Calcul d'un écoulement à bulles avec des modèles couplés de turbulence et d'aire interfaciale



Évolutions axiales de l'énergie cinétique turbulente  $k$  et de l'aire interfaciale calculées et mesurées dans l'expérience DEDALE (EDF). Modèles couplés  $k-\epsilon, A_i$ .

G. Serre, D. Bestion, "Progress in Improving two-fluid model in system code using turbulence and interfacial area equations", NURETH-11, Avignon, France, October 3-6, 2005

## Modèle 1D-3 champs



## Modèle 1D-3 champs

1 champ gaz	3 équations de bilan
1 champ liquide en gouttes	3 équations de bilan
1 champ liquide continu	3 équations de bilan
Total :	9 équations de bilan

### 3 bilans de masse

Liquide Continu (film) :

$$\frac{\partial}{\partial t} (A \alpha_{lc} \rho_{lc}) + \frac{\partial}{\partial z} (A \alpha_{lc} \rho_{lc} V_{lc}) = +A\Gamma_R - A\Gamma_A - A\Gamma_{lcv}$$

Modèles + spécifiques  
(liquide OU gouttes)

↓  
Changement de phase  
entre film liquide  
et vapeur

Gaz :

$$\frac{\partial}{\partial t} (A \alpha_g \rho_g) + \frac{\partial}{\partial z} (A \alpha_g \rho_g V_g) = +A\Gamma_{lcv} + A\Gamma_{ldv}$$

Changement de phase  
entre gouttes  
et vapeur

Liquide Dispersé (gouttes) :

$$\frac{\partial}{\partial t} (A \alpha_{ld} \rho_{ld}) + \frac{\partial}{\partial z} (A \alpha_{ld} \rho_{ld} V_{ld}) = -A\Gamma_R + A\Gamma_A - A\Gamma_{ldv}$$

Nouveaux modèles à développer : Redéposition Arrachement

## Modèle 1D-3 champs

### 3 bilans d'impulsion

Liquide Continu (film) :

$$A \alpha_{lc} \rho_{lc} \left[ \frac{\partial V_{lc}}{\partial t} + V_{lc} \frac{\partial V_{lc}}{\partial z} \right] + A \alpha_{lc} \frac{\partial P}{\partial z} + A p_{ilcg} \frac{\partial \alpha_{lc}}{\partial z} - A \beta \alpha_g \alpha_{ld} \rho_m \left[ \frac{\partial V_g}{\partial t} - \frac{\partial V_{lc}}{\partial t} + V_g \frac{\partial V_g}{\partial z} - V_{lc} \frac{\partial V_{lc}}{\partial z} \right]$$

$$= -A\Gamma_{lcv} (W_{lcv} - V_{lc}) + A\Gamma_R (V_{ld} - V_{lc}) + A\tau_{lcv} - \chi_f C_f \frac{\rho_g}{2} V_{lc} |V_{lc}| + A \alpha_{lc} \rho_{lc} g_z - R \frac{\alpha_g}{4} p_{ilcg} \frac{\partial A}{\partial z}$$

Vitesse interfaciale film/vapeur    
 Frottement film/vapeur    
 frottement film/paroi

Modèles + spécifiques  
(liquide OU gouttes)

Gaz :

$$A \alpha_g \rho_g \left[ \frac{\partial V_g}{\partial t} + V_g \frac{\partial V_g}{\partial z} \right] + A \alpha_g \frac{\partial P}{\partial z} - A p_{ilcg} \frac{\partial \alpha_{lc}}{\partial z} - A p_{ildg} \frac{\partial \alpha_{ld}}{\partial z} + A \beta \alpha_g \alpha_{ld} \rho_m \left[ \frac{\partial V_g}{\partial t} - \frac{\partial V_{lc}}{\partial t} + V_g \frac{\partial V_g}{\partial z} - V_{lc} \frac{\partial V_{lc}}{\partial z} \right]$$

$$= A\Gamma_{lcv} (W_{lcv} - V_g) + A\Gamma_{ldv} (W_{ldv} - V_g) - A(\tau_{lcv} + \tau_{ldv}) - \chi_f C_g \frac{\rho_g}{2} V_g |V_g| + A \alpha_g \rho_g g_z + \frac{R \alpha_{lc}}{4} p_{ilcg} \frac{\partial A}{\partial z}$$

Liquide Dispersé (gouttes) : pas de frottement paroi ni de terme de stratification ni de masse ajouté  
Mais besoin d'un modèle de diamètre de gouttes

$$A \alpha_{ld} \rho_{ld} \left[ \frac{\partial V_{ld}}{\partial t} + V_{ld} \frac{\partial V_{ld}}{\partial z} \right] + A \alpha_{ld} \frac{\partial P}{\partial z} + A p_{ildg} \frac{\partial \alpha_{ld}}{\partial z} = -A\Gamma_{ldv} (W_{ldv} - V_{ld}) + A\Gamma_A (V_{lc} - V_{ld}) + A\tau_{ldv} + A \alpha_{ld} \rho_{ld} g_z$$

Vitesse interfaciale gouttes/vapeur    
 Frottement gouttes/vapeur

## Modèle 1D-3 champs

### 3 bilans d'énergie

Liquide Continu (film) :

$$A \frac{\partial}{\partial t} \left( \alpha_{lc} \rho_{lc} \left[ H_{lc} + \frac{V_{lc}^2}{2} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A \alpha_{lc} \rho_{lc} V_{lc} \left[ H_{lc} + \frac{V_{lc}^2}{2} \right] \right) - A \alpha_{lc} \frac{\partial P}{\partial t}$$

$$= A (q_{lci}) + \chi (q_{pic}) - A \Gamma_{lcv} \left[ H_{lc} + \frac{W_{lcv}^2}{2} \right] + A \Gamma_R \left[ H_{ld} + \frac{V_{ld}^2}{2} \right] - A \Gamma_A \left[ H_{lc} + \frac{V_{lc}^2}{2} \right] + A \alpha_{lc} \rho_{lc} V_{lc} g_z$$

Flux de chaleur film liquide/interface & film/paroi

Gaz :

$$A \frac{\partial}{\partial t} \left( \alpha_g \rho_g \left[ H_g + \frac{V_g^2}{2} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A \alpha_g \rho_g V_g \left[ H_g + \frac{V_g^2}{2} \right] \right) - A \alpha_g \frac{\partial P}{\partial t}$$

$$= A (q_{gic}) + \chi (q_{gid}) + \chi_c q_{pg} + A \Gamma_{lcv} \left[ H_v + \frac{W_{lcv}^2}{2} \right] + A \Gamma_{ldv} \left[ H_v + \frac{V_{ldv}^2}{2} \right] + A \alpha_g \rho_g V_g g_z$$

Flux de chaleur gaz/film & gaz/gouttes

Liquide Dispersé (gouttes) :

$$A \frac{\partial}{\partial t} \left( \alpha_{ld} \rho_{ld} \left[ H_{ld} + \frac{V_{ld}^2}{2} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A \alpha_{ld} \rho_{ld} V_{ld} \left[ H_{ld} + \frac{V_{ld}^2}{2} \right] \right) - A \alpha_{ld} \frac{\partial P}{\partial t}$$

$$= A (q_{ldi}) + \chi (q_{pid}) - A \Gamma_{ldv} \left[ H_{ld} + \frac{W_{ldv}^2}{2} \right] - A \Gamma_R \left[ H_{ld} + \frac{V_{ld}^2}{2} \right] + A \Gamma_A \left[ H_{lc} + \frac{V_{lc}^2}{2} \right] + A \alpha_{ld} \rho_{ld} V_{ld} g_z$$

Flux de chaleur gouttes/interface & gouttes/paroi

Modèles + spécifiques  
(liquide OU gouttes)

## Modèle 1D-3 champs

### Arrachement des gouttes

Entraînement hydrodynamique  
Arrachement sur vagues

$$\Gamma_{ah} = 5.75 \cdot 10^{-5} \frac{4}{D_h} \rho_g V_g \left[ (\alpha_{lc} \rho_{lc} V_{lc} - \dot{m}_{lfc}) \frac{D_h \rho_l}{\sigma \rho_g} \right]^{0.316}$$

Hewitt & Govan

+ Effet de l'ébullition  
Éclatement de film par les bulles

$$\Gamma_{ab} = 4.77 \cdot 10^2 \Gamma_{cv}^{2.5} \left[ \frac{\alpha_{lc} D_h}{4 \sigma \rho_g} \right]^{0.75}$$

Débit ébullition

Débit seuil  
d'arrachement

Ueda

### Dépôt des gouttes

diffusion transverse des gouttes

$$\Gamma_r = \frac{4}{D_h} \rho_{ld} \frac{\alpha_{ld}}{\alpha_{ld} + \alpha_g} (\max(C_r - k_q, 0)) \text{Fr}$$

Hewitt & Govan

$$C_r = 0.18153 \left( \frac{\rho_g D_h}{\sigma} \right)^{-1/2} \leftarrow 0.3 \geq \frac{\alpha_{ld} \rho_{ld}}{(\alpha_{ld} + \alpha_g) \rho_g} \geq 0.3 \Rightarrow C_r = 0.083 \left( \frac{\rho_g D_h}{\sigma} \right)^{-1/2} \left( \frac{\alpha_{ld} \rho_{ld}}{\alpha_{ld} + \alpha_g} \right)^{-0.65}$$

- inhibition due à la production de vapeur  
La vapeur diffuse du film vers le centre

$$k_q = \frac{\Gamma_{cv}}{0.065 \rho_{lc} \pi D_h \sqrt{\alpha_{ld} + \alpha_g}}$$

Hoyer

## Modèle 1D-3 champs

### Diamètre de gouttes

$$\frac{\delta}{\ell} = (2.5 We e^{-0.58} + 0.1 \alpha_{id}^{0.25}) \quad \ell = \sqrt{\sigma/g\Delta\rho} \quad We = \rho_v V_v^2 \ell / \sigma$$

### Apparition de l'écoulement annulaire

$$Ku_v = U_v \left( \frac{\rho_v^2}{g\sigma(\rho_{id} - \rho_v)} \right)^{\frac{1}{4}} > 3.2 \quad \& \quad X_{th} > 0.1$$

## Modèle 1D-3 champs

### Frottement paroi

Frottement paroi en modèle homogène ou bi-fluide

$$\left( \frac{dp}{dx} \right)_{2\Phi}^{wall} = \Phi_l^2 \left( \frac{dp}{dx} \right)_l^{wall} \quad X^2 = - \frac{\left( \frac{dp}{dx} \right)_l^{wall}}{\left( \frac{dp}{dx} \right)_g^{wall}}$$

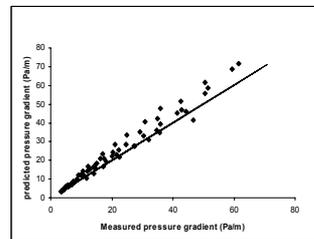
$$\left( \frac{dp}{dx} \right)_{2\Phi}^{wall} = \Phi_g^2 \left( \frac{dp}{dx} \right)_v^{wall} \quad \Phi_l^2 = 1 + \frac{c}{X} + \frac{1}{X^2}$$

$$\Phi_g^2 = 1 + cX + X^2$$

$$X_u = \left[ \frac{\mu_l}{\mu_g} \right]^{0.1} \left[ \frac{1-X}{X} \right]^{-0.1} \left[ \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{-0.1}$$

$$X_{vv} = \left[ \frac{\mu_l}{\mu_g} \right]^{-0.5} \left[ \frac{1-X}{X} \right]^{0.5} \left[ \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{0.5}$$

*Ex: Lockhardt-Martinelli*



*Données tube Wurtz*

*Modèle plus simple et plus physique  
donnant de meilleurs résultats.*

Frottement paroi en modèle 3 champs

$$\tau_{wf} = C_f \rho_f \frac{V_f^2}{2}$$

$$C_f = f(Re) \quad \text{with} \quad Re = \frac{G_f D}{\mu_f}$$

## Modèle 1D-3 champs

### Assèchement & post-assèchement en tube

#### Modèle bi-fluides à 6 équations

Prédiction de l'assèchement par des corrélations:  $\varphi_{crit}(P,G,X_{th},...)$  ou  $X_{do}$

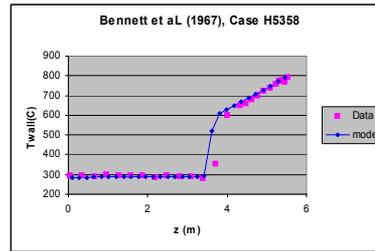
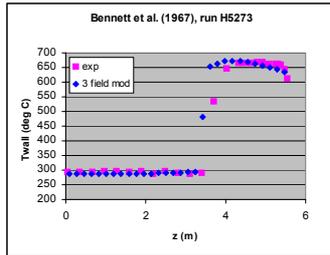
#### Modèle 3 champs à 9 équations

Assèchement prédit par le critère  $\alpha_{lc} = 0$  résultant de :

- l'entraînement et le dépôt de gouttes
- le transfert thermique paroi-film et film-vapeur.

Température paroi bien prédite grâce à :

- Flux paroi/vapeur
- Flux paroi/goutte
- Flux vapeur/gouttes
- diamètre de gouttes



Géométrie tube, D=12mm, L=5m, Flux uniforme, 69 bar  
M Valette avec le code Cathare 3

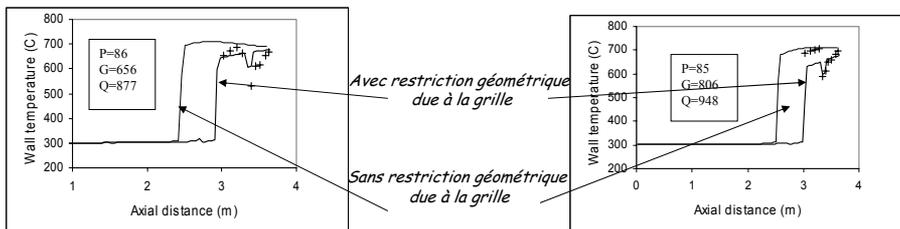
## Modèle 1D-3 champs

### Assèchement & post-assèchement en grappe PWR

En modélisant simplement la restriction de section due à la grille, on améliore le calcul de:

- l'accroissement du dépôt
- le retard à l'assèchement
- le refroidissement en zone sèche sans remouiller.

*Modélisation plus physique permettant d'obtenir de meilleurs résultats.*

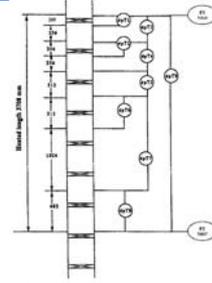


Essais THTF  
M Valette avec le code Cathare 3

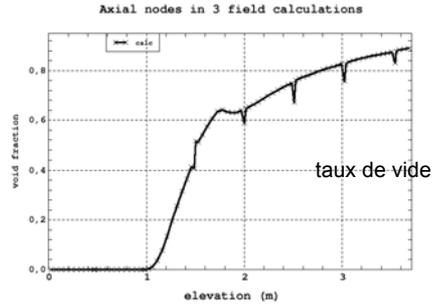
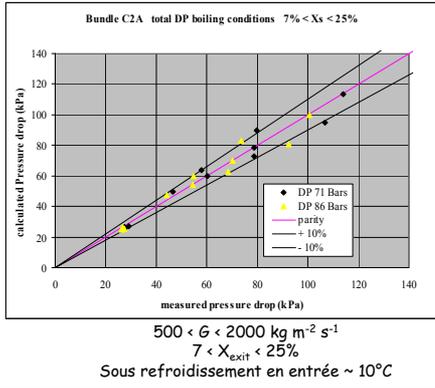
## Modèle 1D-3 champs

### Assèchement & post-assèchement en grappe BWR

Benchmark OCDE/NRC BWR basé sur la base de données NUPEC.  
 Géométrie BWR, échelle 1 en hauteur, grappe 8x8 de crayons avec 7 grilles.



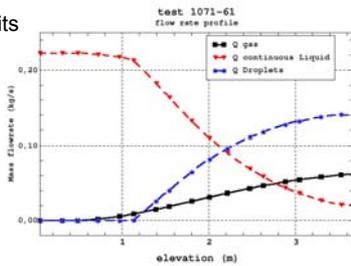
#### Chute de pression



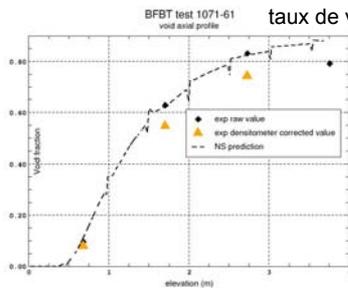
## Modèle 1D-3 champs

### Assèchement & post-assèchement en grappe BWR

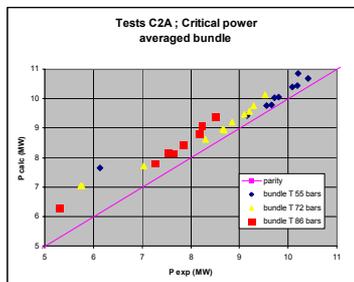
#### Débits



#### taux de vide



#### Puissance critique



## Conclusion sur les nouveaux modèles dans les codes systèmes

Modèles 3 champs : suffisamment mûrs pour être implantés dans des codes systèmes industriels (déjà présent dans des codes composants : Cobra TF, NASCA, MARS).

### Transport de l'aire interfaciale

Des avancées significatives dans les écoulements à bulles verticaux ascendants (Ishii, Hibiki,...).

Des difficultés pour les écoulements plus complexes (manque de données expérimentales pour mettre au point les modèles).

Les modèles à 1 équation de  $A_i$  sont d'intérêt limité dans les écoulements poly-dispersés.

La transition écoulement à bulle - écoulement stratifié, sera intéressante à étudier avec ce type de modèle.

L'écoulement annulaire dispersé serait également intéressant à analyser avec cette approche.

### Modèle de turbulence

La turbulence est fortement couplée avec l'aire interfaciale. Ces 2 grandeurs doivent donc être modélisées et calculées en tenant compte de ce couplage.

La turbulence est fortement impliquée dans de nombreux phénomènes. L'ajout d'une information sur la turbulence dans les termes sources associés à ces phénomènes et intervenant dans les équations de bilan (impulsion, énergie), devrait permettre une amélioration de ces modèles.