

Commissariat à l'Energie Atomique/ Grenoble  
Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires

Session d'Etudes sur

**LES ECOULEMENTS ET TRANSFERTS DE CHALEUR DIPHASIQUES  
DANS LES REACTEURS NUCLEAIRES**

7 au 11 Décembre 2009

**LES CODES D'ACCIDENTS GRAVES:  
DEGRADATION DU COEUR**

Gilles RATEL

Commissariat à l'Energie Atomique/ Grenoble  
Département de Technologies Nucléaires  
Service d'études Thermohydrauliques et Technologiques

**LES REACTEURS A EAU PRESSURISEE (REP)**

- **SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES**
- **UN EXEMPLE DE CODE SCENARIO : VULCAIN**
  - . **physique de dégradation du cœur**
  - . **exemple de calcul**
  - le code ASTEC**
- **LES CODES MECANISTES**
- **PROGRAMMES DE RECHERCHE**
- **UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D**

**LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES (RNR)**

- **RAPPEL NEUTRONIQUE**
- **SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES**
- **UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE: SIMMER 3**

**REFERENCES**

## LES REP: SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES

Suppose des défaillances multiples et en séquence des systèmes de sauvegarde

### 1. Exemple de scénario haute pression: TMLB

- . pertes des alimentations électriques, arrêt d'urgence
  - ⇒ arrêt des pompes primaires et secondaires
  
- . perte alimentation de secours secondaires
  - ⇒ perte de la source froide = secondaires des générateurs de vapeur (GV)
  - ⇒ puissance résiduelle évacuée par vaporisation de l'eau
    - La vapeur est évacuée par la soupape pressuriseur, le circuit reste en pression à 170bar.
  
  - ⇒ dénoyage du cœur, circuit primaire monophasique vapeur (eau + H<sub>2</sub>)

### 2. Exemple de scénario basse pression: AF

- . grosse brèche sur circuit primaire
  - ⇒ perte eau normale et secours, chute de pression primaire (▲ 5bar), montée pression enceinte (▼ 3bar)
  - ⇒ vaporisation de l'eau par puissance résiduelle et chute pression
  
  - ⇒ dénoyage du cœur, circuit primaire monophasique vapeur (eau + H<sub>2</sub>)

### 3. Evolution du scénario sans action corrective: accident grave

Le dénoyage définitif du cœur conduit successivement à:

- . fusion des crayons combustibles, relâchement des produits de fission (PF)
- . interactions chimiques (oxydation gaines avec production H<sub>2</sub>, recombinaison des matériaux fondus...)
- . formation d'un bain de corium liquide dans le cœur (U-Zr-O-Al-Fe...)
  
- . coulée du bain vers le fond de cuve, rupture cuve?

### **Contexte accidents graves REP:**

- cinétique lente (>1 heure) car puissance résiduelle faible et risques limités d'explosions
- neutronique simple (puissance =  $f(\text{temps}, \text{masse})$ )

### **But modélisation:**

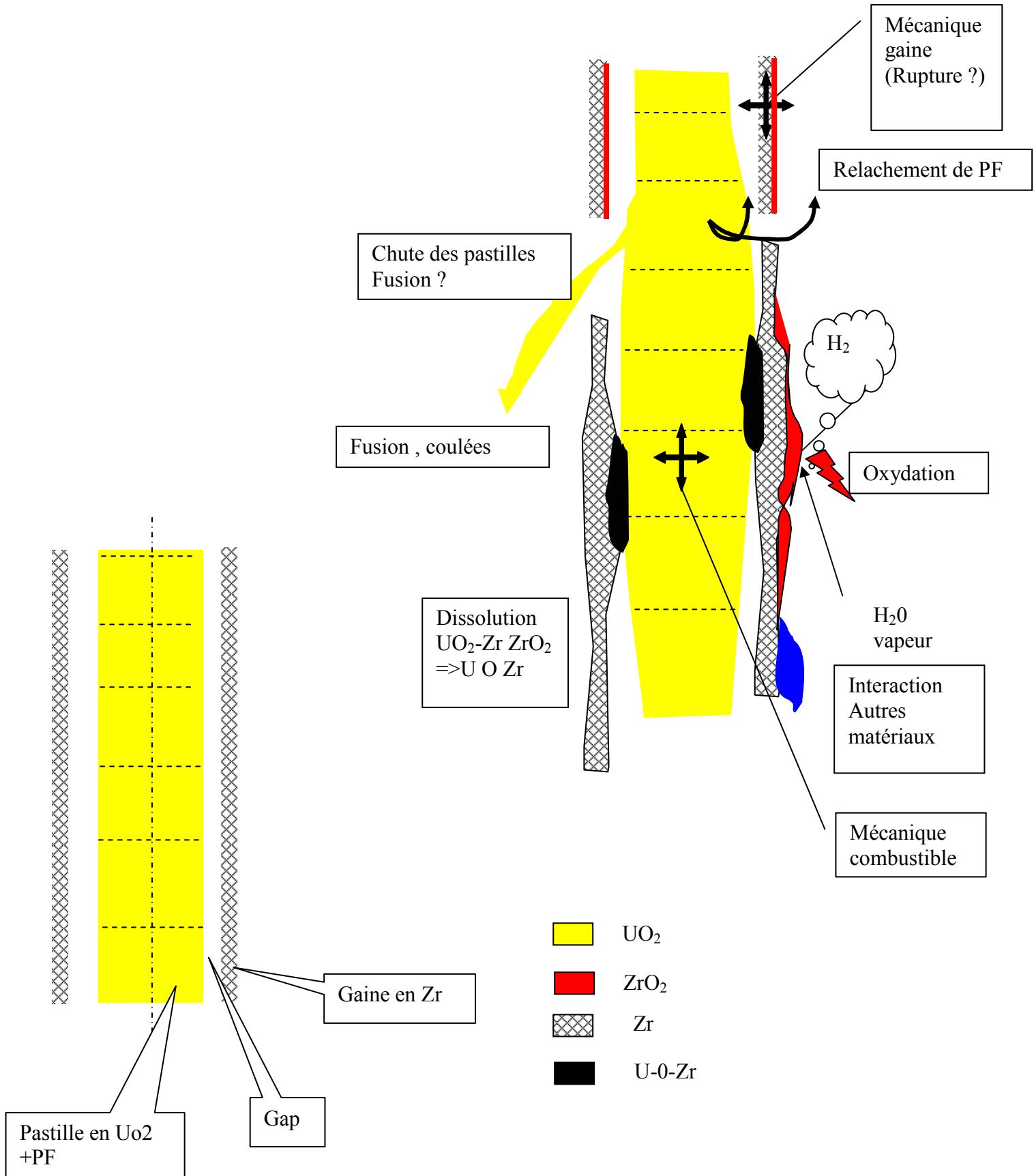
- prédire cinétique (quand le corium rompt-il la cuve?)
- influence des actions correctives (par exemple: influence d'un renoyage)

### **Difficultés pour modélisation:**

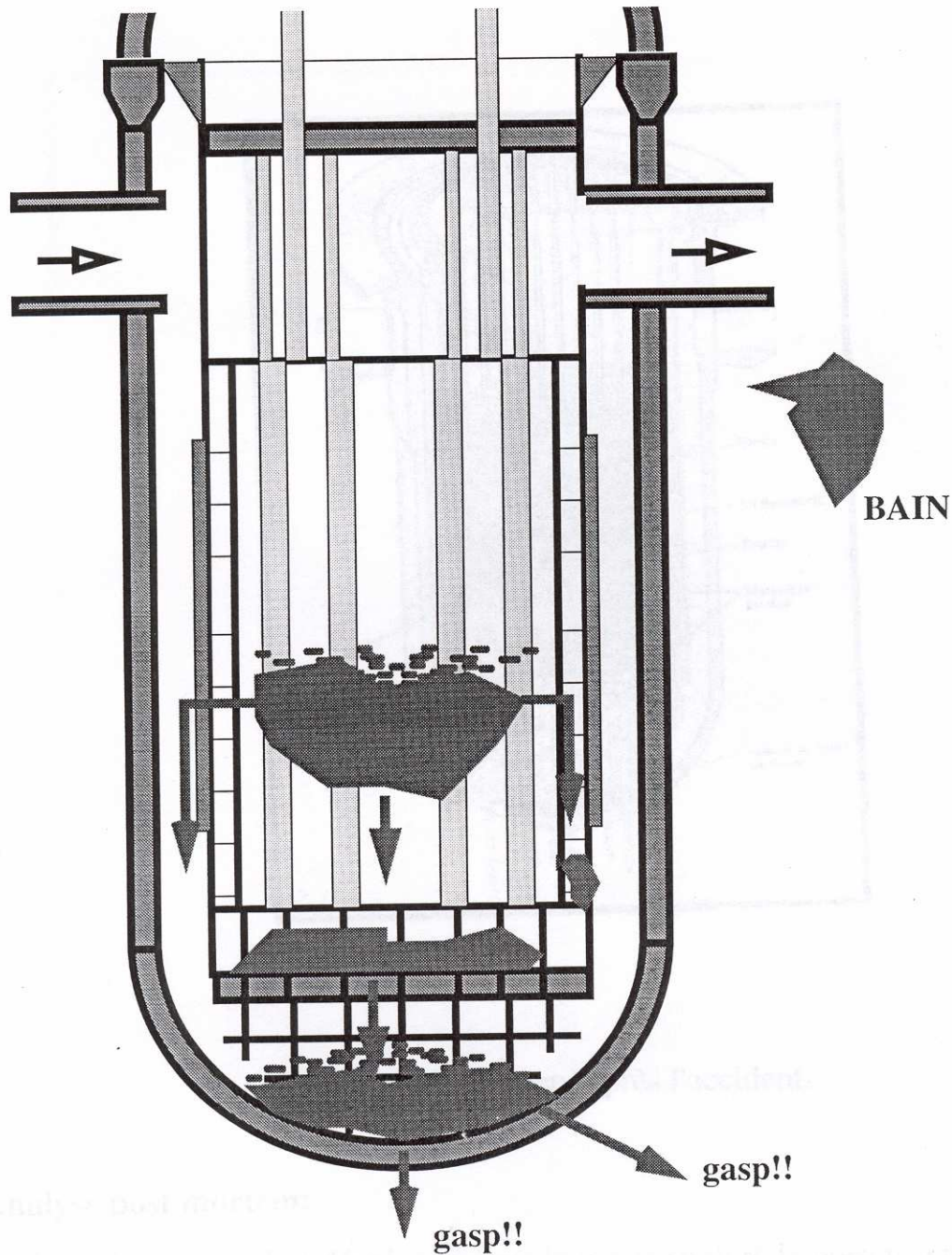
- grand nombre de phénomènes à traiter
- géométrie du cœur variable (assemblages, débris, bain...)

**! phénomènes multiphasiques (solide - liquide - gaz)**

### SCENARIO: SCHEMA DEGRADATION DE CRAYON COMBUSTIBLE



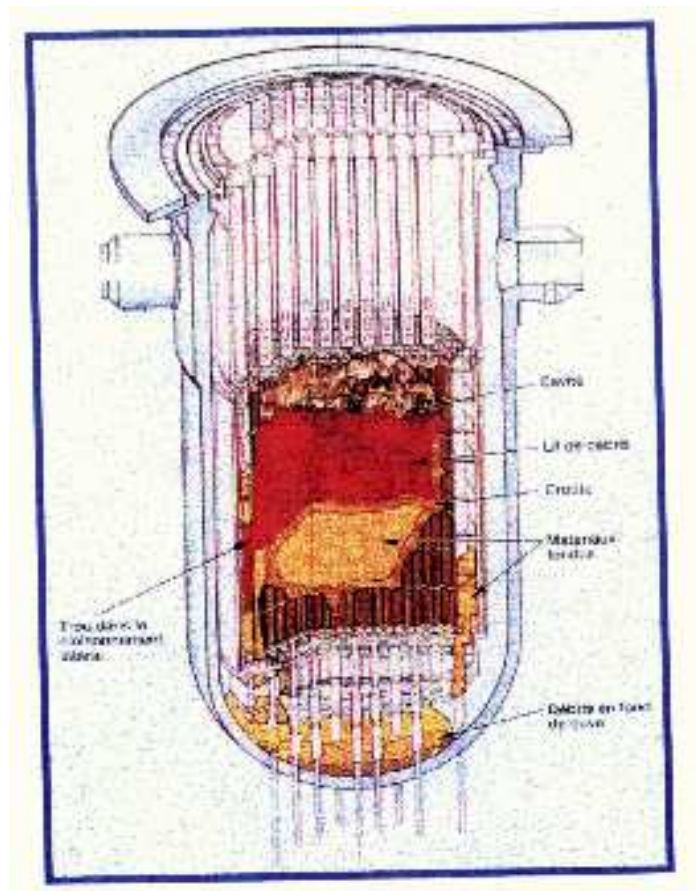
## SCENARIO: SCHEMA DE L'EVOLUTION D'UN BAIN DE CORIUM



### points essentiels de modélisation:

- thermique et dynamique d'un bain
- réponse mécanique et thermique des structures périphériques du cœur et de la cuve
- possibilité de stopper le bain (interaction avec l'eau...)

## SCENARIO: ACCIDENT DE Three Mile Island (USA, 1979)



Etat final du réacteur après l'accident.

### Analyse post mortem:

Un bain de corium s'est développé dans le cœur, malgré la présence pendant une longue durée d'eau en cuve.

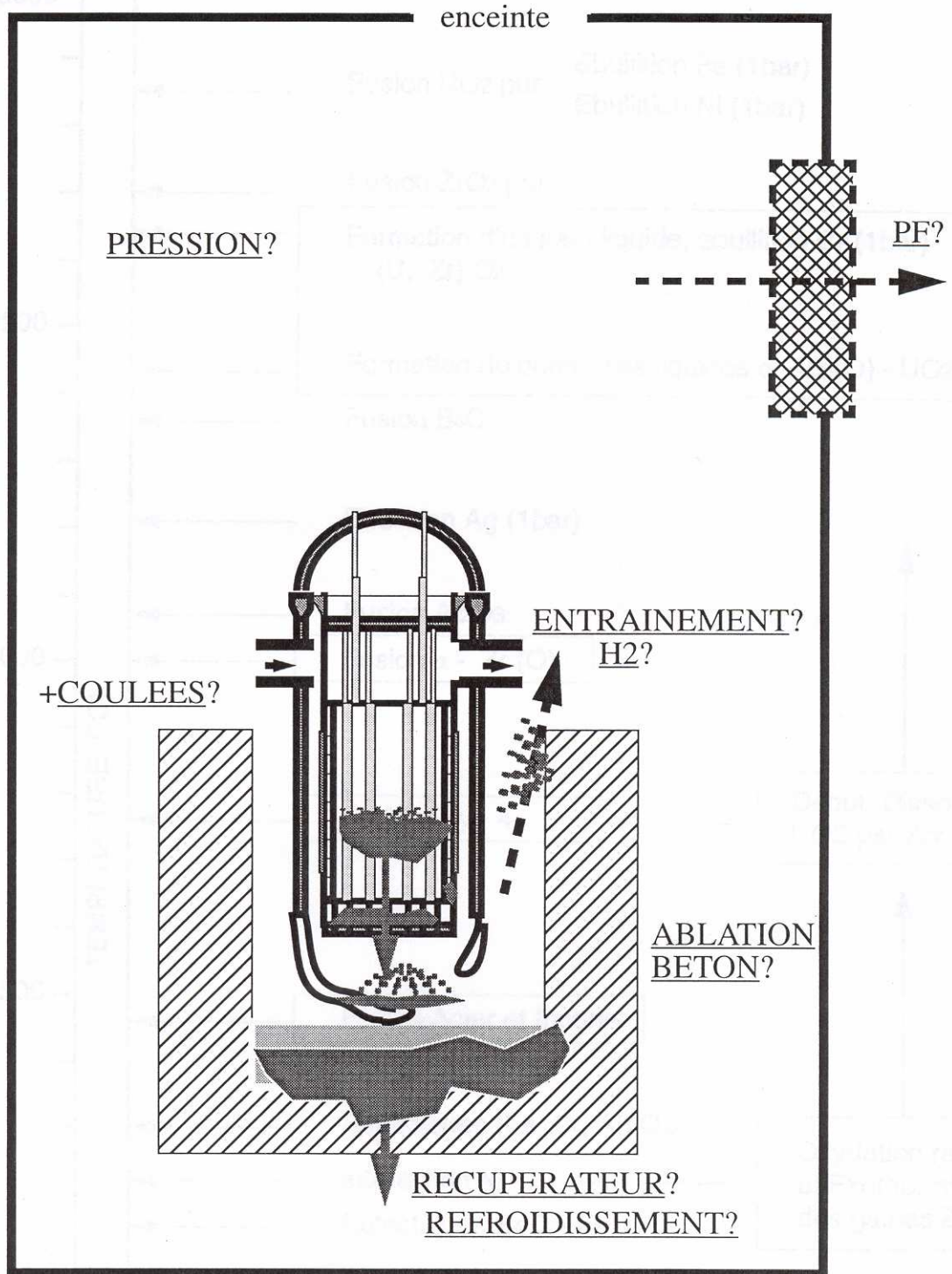
Le corium a coulé vers le fond de cuve, via le baffle.

Le fond de cuve a tenu, malgré une tache très chaude constatée sur la cuve.

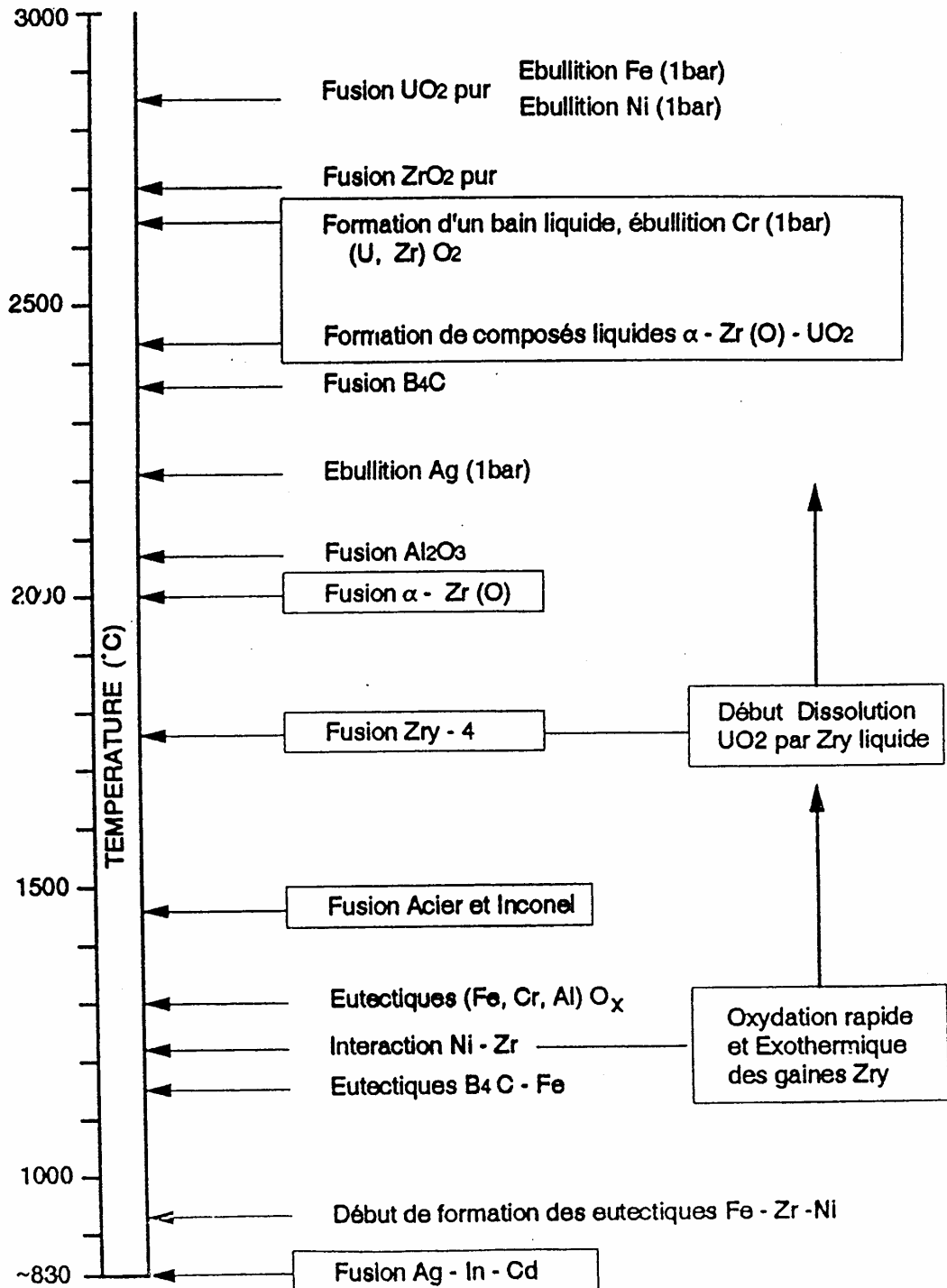
Les modélisations actuelles prédiraient une rupture rapide de la cuve:

☞ besoin encore d'améliorer nos connaissances.

## SCENARIO: PROBLEMATIQUE HORS CUVE



### SCENARIO: GAMME DE TEMPERATURE





## UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

Code développé par DRN/DTP pour l' IRSN depuis 1985.

Ce code a été aujourd'hui remplacé par le module DIVA d'ASTECv1. Mais la problématique et les phénomènes physiques décrits sont les mêmes. Les améliorations principales apportées pour DIVA sont présentées dans des



### Objectifs du code:

- . modélisation de l'évolution du cœur et des circuits primaire et secondaire à partir du découvrement du cœur jusqu'à formation d'un bain de corium, coulée en fond de cuve et rupture de la cuve. Calcul en continu des relâchements de produits de fission (PF).

⇒ le but est de prédire les rejets de PF et de corium hors cuve

- . code orienté pour des calculs de sûreté

⇒ modèles simplifiés pour calcul rapide de scénario ( $t_{\text{calcul}} \ll t_{\text{réel}}$ )

⇒ modélisation exhaustive pour traiter tout le scénario

⇒ utilisation paramétrique (étude de sensibilité) seulement

### Utilisations:

- Calcul de scénarios d'accidents graves pour les REP français (⇒ EPS2...),
  - dans le système de code ASTECV0 (IPSN-GRS) (réf.2)
  - sur le simulateur SIPA (IRSN)

### Qualification:

- . difficile (un seul cas réel: TMI)
  - ⇒ calcul essais internationaux de dégradation cœur (Phébus, CORA, PBF, ACRR ) (réf. 3,4)
  - ⇒ nouveau calcul accident TMI
  - ⇒ comparaison avec d'autres codes globaux (ex. Maap, Diva)
- . qualification effets séparés possible
  - renoyage cœur peu dégradé (essais Péracles (réf.5))
  - condensation aux GV avec incondensables ...
  - bain fondu en fond de cuve

**Références:** modèles (réf.1), exemples de calculs (réf.9), qualification (réf.3)

## Code VULCAIN: conditions initiales, thermohydraulique circuit

### Conditions initiales d'un calcul Vulcain:

Un calcul débute sur:

- un inventaire en eau réduit = début dénoyage définitif cœur
- un transitoire lent (i.e. après toutes les sécurités automatiques)

⇒ gestion écoulement monophasique gaz ( $H_2O+H_2$ ) dans le circuit primaire

Les conditions initiales (pression, niveaux...) sont fournies par le calcul de la phase initiale du scénario (CATHARE par exemple).

ASTECV1 possède un module (CESAR) qui calcule la thermohydraulique tout le long du scénario (phase initiale, jusqu'à la dégradation avancée)

### Niveau de modélisation de la thermohydraulique des circuits:

Description modulaire des circuits primaire et secondaire:

succession de modules points tuyaux, brèches, Tés, GV, accumulateurs...

Fluide gaz monophasique ( $H_2O+H_2$ )

Hypothèse de régime quasi-permanent (pas de temps fixe de 1 à 20s)

Modèles points/1D (bilan masse et énergie, pas de QdM)

⇒ complexité << codes best estimate (CATHARE: 2 phases, 6 éqs, 3D)

Propriétés physiques des fluides = CATHARE

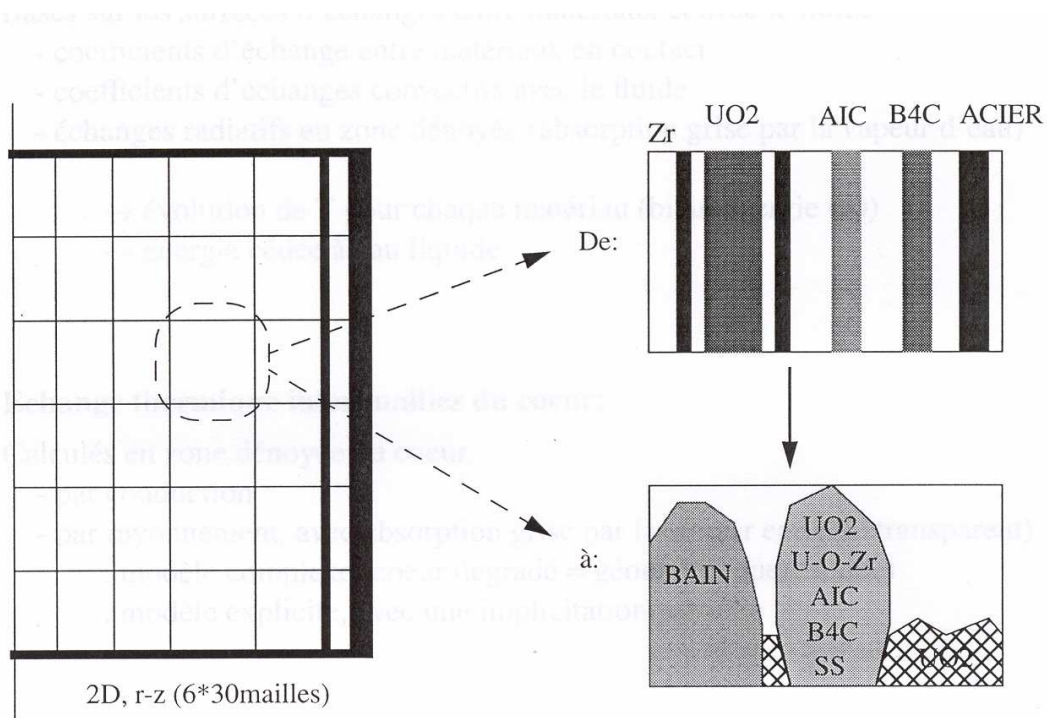
ASTECV1 (CESAR) décrit la thermohydraulique diphasique, transitoire

Cas particuliers:

- . GV: maillé avec modèle de condensation en présence d' $H_2$ ; options tubes rompus, tubes horizontaux, GV pollués par accumulation de  $H_2$
- .  $H_2O$  liquide dans le circuit (condensats, accumulateurs...): mouvements imposés par l'utilisateur, pas d'échanges thermiques; traitement possible des bouchons d'eau en branche froide.

## Code VULCAIN: description du cœur

### Géométrie modélisée, maillage:



### Gestion des matériaux: $\text{UO}_2$ , Zr, $\text{ZrO}_2$ , A-I-C, B4C, Acier

masse  
 enthalpie  
 surfaces d'échanges  
 concentration des sous-matériaux  
 produits de fission  
 sont gérés par matériau, par maille et lors des mouvements

### Propriétés physiques: $C_p$ , $\rho$ , $T_{\text{fusion}}$ , $L$ ...

= issues de MATPRO (réf.6),  $f(\text{temp.})$ , linéarisées par morceaux

## **Code VULCAIN: échanges thermiques dans le cœur dégradé**

### **Echanges thermiques dans chaque maille du cœur:**

Basés sur les surfaces d'échanges entre matériaux et avec le fluide

- coefficients d'échange entre matériaux en contact
- coefficients d'échanges convectifs avec le fluide
- échanges radiatifs en zone dénoyée (absorption grise par la vapeur d'eau)

⇒ Évolution de T pour chaque matériau (bilan énergie 0D)

⇒ énergie cédée à eau liquide

### **Echange thermique inter-maillages du cœur:**

Calculés en zone dénoyée du cœur.

- par conduction
- par rayonnement, avec absorption grise par la vapeur eau (H2 transparent)
  - . modèle complexe (cœur dégradé = géométrie quelconque)
  - . modèle explicite, avec une implicitation partielle

### **Gestion de l'eau dans le cœur:**

Energie cédée à l'eau

- ⇒ production de vapeur en pool boiling
- ⇒ évolution de la hauteur du mélange liquide + bulles vapeur (modèles de Wilson ou Cunningham&Yeh)

## Code VULCAIN: dégradation chimique des crayons

### Oxydation du Zr

Réaction:  $\text{Zr} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{ZrO}_2 + 2 \text{H}_2$

☞ exothermique (emballement réaction) avec production d'hydrogène

- calcul de la réaction en fonction de la surface de contact Zr / eau et couche intermédiaire de  $\text{ZrO}_2$ .
- Cinétique = lois de type Arrhenius

☞ Modélisation fine des contacts nécessaire pour reproduire ce phénomène en géométrie dégradée, hors de portée de code type Vulcain.

### Dissolution de $\text{UO}_2$ et $\text{ZrO}_2$ par Zr

Si Zr liquide en contact avec  $\text{UO}_2$  ou  $\text{ZrO}_2$ :

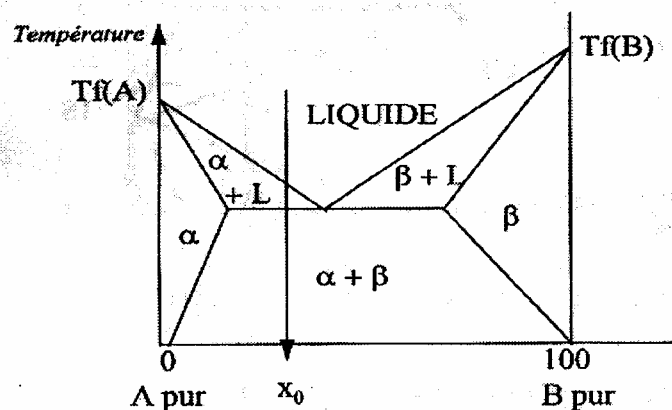
⇒ dissolution avec formation d'un matériau ternaire U-O-Zr

(modèle basé sur travaux de Kim&Olander (réf.7) et Hofmann (réf.8))

### Matériau ternaire U-O-Zr

Fusion non isotherme (T fusion entre 2000 et 2800C).

Exemple de diagramme de phase d'un matériau binaire (A-B)



☞ Ce matériau ternaire U-O-Zr forme l'embryon des bains de corium

## **Code VULCAIN: mouvements de matériaux dans le cœur**

### **Coulées de matériaux fondus (hors bain de corium):**

Dans une maille, si un matériau est 100% fondu

⇒ coulée en « bougie »

⇒ chute verticale intégrale jusqu'à une maille suffisamment froide ou pleine, sans échange thermique.

### **Ecroulements de pastilles UO<sub>2</sub>:**

Si les pastilles UO<sub>2</sub> ne sont plus maintenues (gainés Zr fondues...):

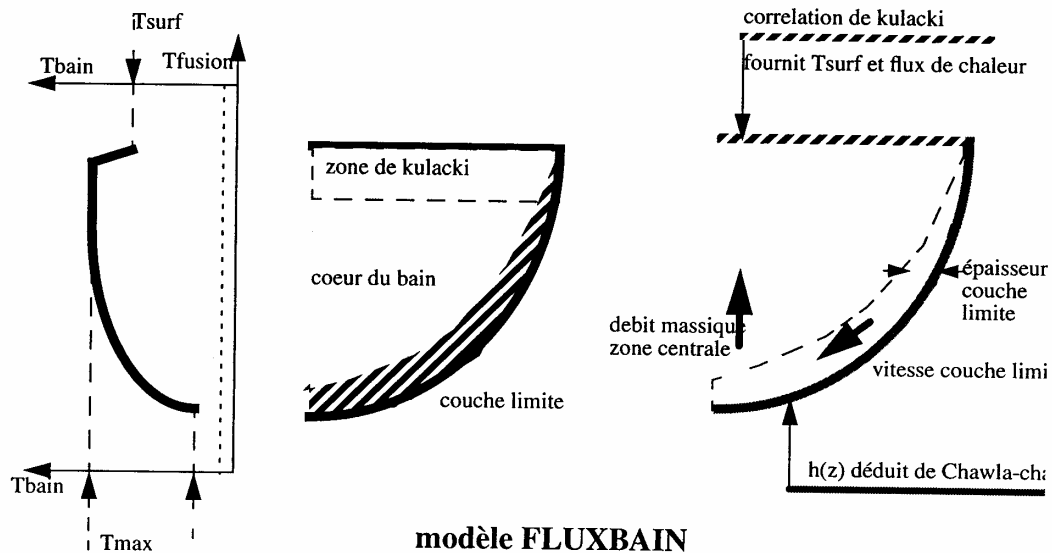
⇒ chute verticale sous forme de débris UO<sub>2</sub>.

☞ gestion des mouvements verticaux discontinus, sans échanges thermiques (pas de coulées continues, ni d'étalement)

## Code VULCAIN: bain de corium dans le cœur

Si matériaux 100% liquides dans une maille pleine:

⇒ activation du modèle de bain de corium



### Modèle de bain:

- hypothèse de bain de composition homogène (UO<sub>2</sub>Zr + AIC + B<sub>4</sub>C + Acier)

- mouvements internes et champ de température: modèle FLUXBAIN

- progression du bain:

- . par gel / fusion au niveau de l'interface avec le reste du cœur
- . par coulées gravitaires et étalement (modèles très simplifiés)

⇒ géométrie quelconque de bain

- couplage avec le reste du cœur par échanges thermiques

- coulées du bain:

- . latéralement quand le bain atteint les structures périphériques du cœur
- . par le bas (chute du cœur) quand le bain atteint la plaque support cœur

☞ Evolution du bain et coulées vers le fond de cuve

## Code VULCAIN: renoyage du cœur

Seul un modèle très simplifié est envisageable car  
échelle de temps du code >> échelle de temps de renoyage

### Modèle de renoyage:

- sur un critère thermique, détermination du type d'échange matériaux / fluide:

ébullition nucléée / ébullition de transition / ébullition en film

- pour le cas de l'ébullition de transition (trempe des matériaux):

. calcul d'un temps caractéristique local de trempe

(corrélation de Dua&Tien)

. connaissant la surchauffe des matériaux, on en déduit la puissance (moyenne) extraite lors de la trempe de cette maille.

⇒ un coefficient d'échange équivalent

N.B: pas de gestion explicite du front de trempe (trop complexe)

- modèle équivalent pour le renoyage en film par le haut du cœur  
(avec un critère de blocage par CCFL)

☞ Modèle très simplifié, mais résultats satisfaisants (sur essais PERICLES)

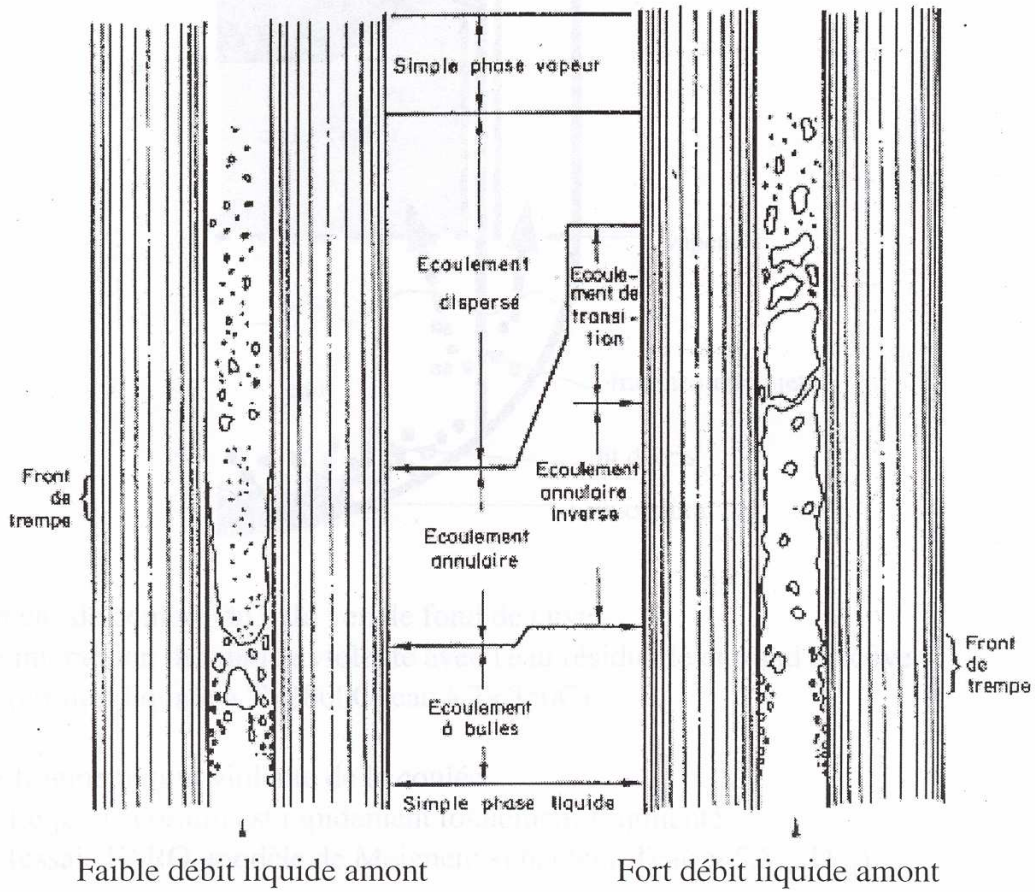
☞ Essais QUENCH (FZK) en cours: T jusqu'à 2000 C

☞ Modèle étendu au renoyage de bains (sans qualification)

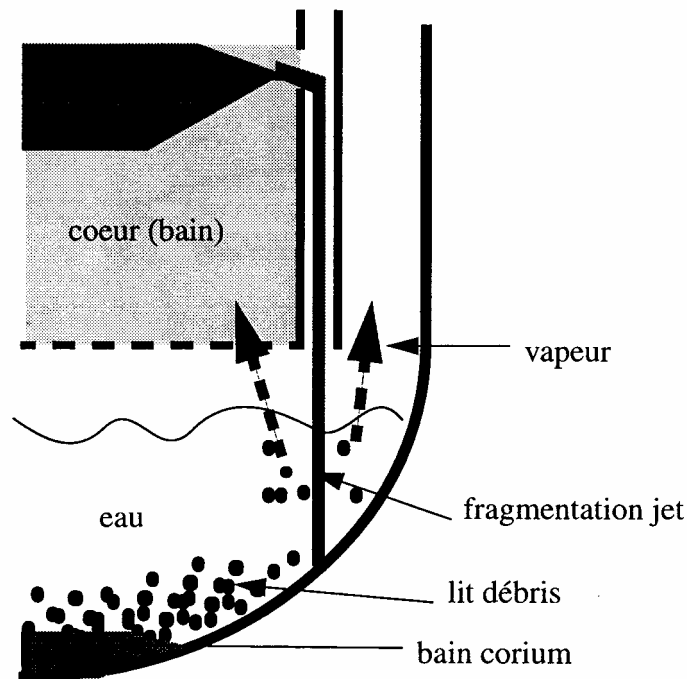


Cour VALCANT: fragmentation des moules de corium / eau

### Schéma de configuration de renoyage:



## Code VULCAIN: fragmentation des coulées de corium / eau



En cas de coulées du bain vers le fond de cuve

☞ interaction thermique violente avec l'eau résiduelle en fond de cuve  
(corium liquide à  $T > 2800\text{C}$ , eau à  $T < 350\text{C}$ )

☞ fragmentation violente de la coulée

Le jet de corium est rapidement totalement fragmenté:

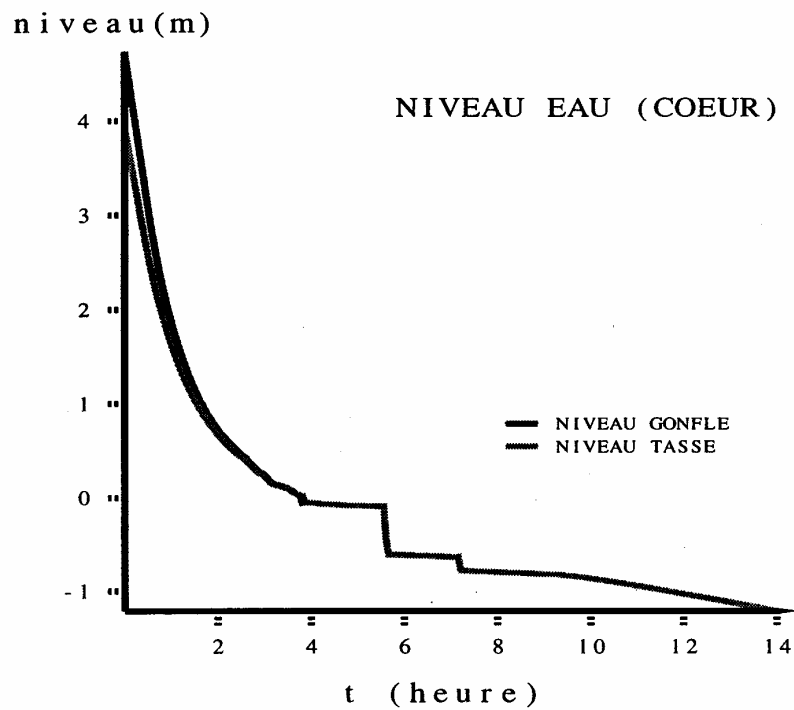
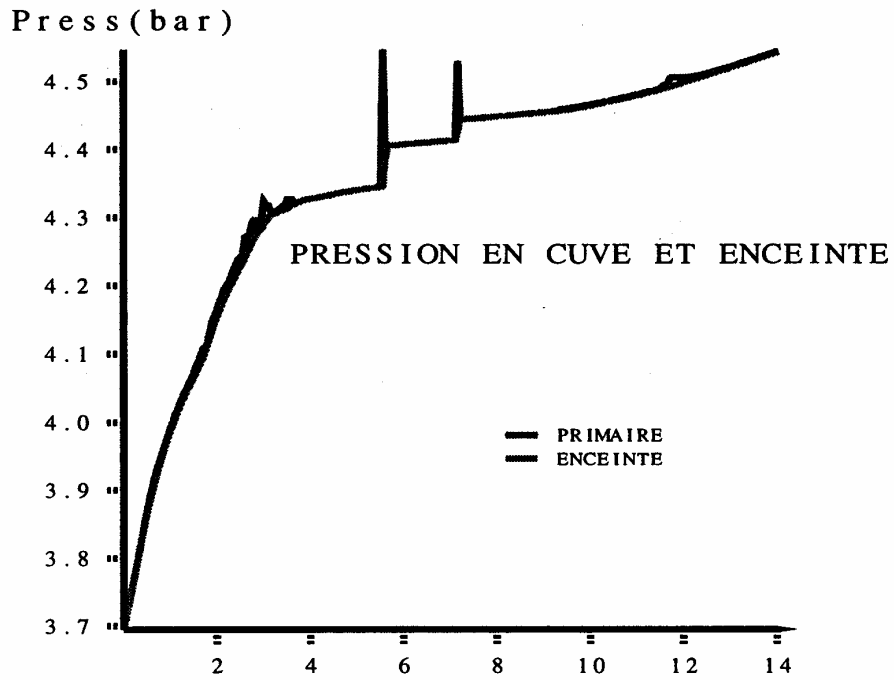
(essais FARO, modèle de Meignen: si hauteur d'eau  $> 5 \cdot V_{\text{jet}} D_{\text{jet}}$ )

☞ particules de corium (diamètre  $\approx 3\text{mm}$ ) = très grande surface d'échange  
production de vapeur très intense, explosion vapeur

⇒ Pic de pression primaire, risque mécanique

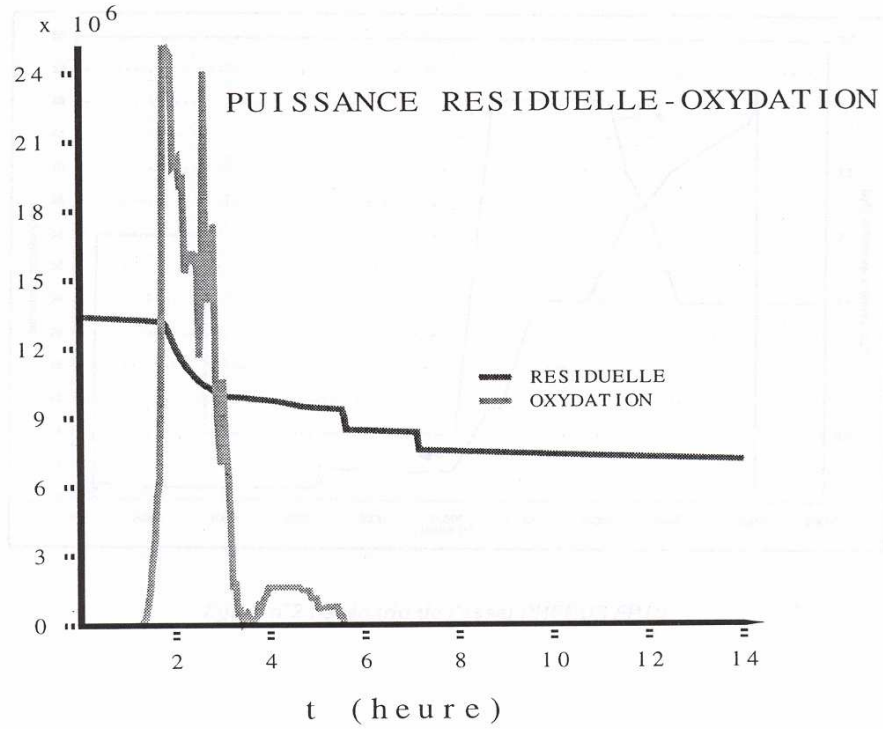
☞ formation d'un lit de débris en fond de cuve, formant un nouveau bain corium

### Code VULCAIN: un exemple de calcul de scénario AF

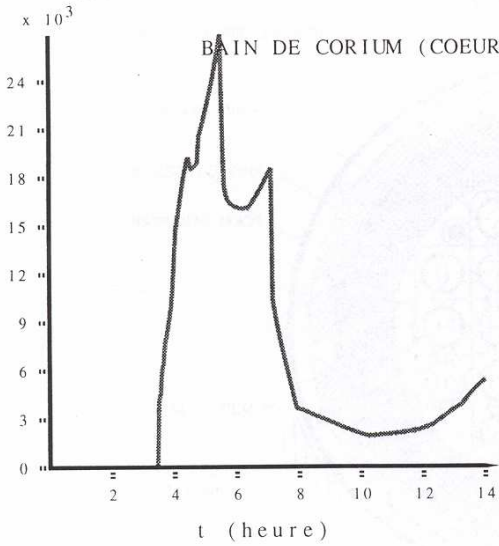


### Code VULCAIN: un exemple de calcul de scénario AF

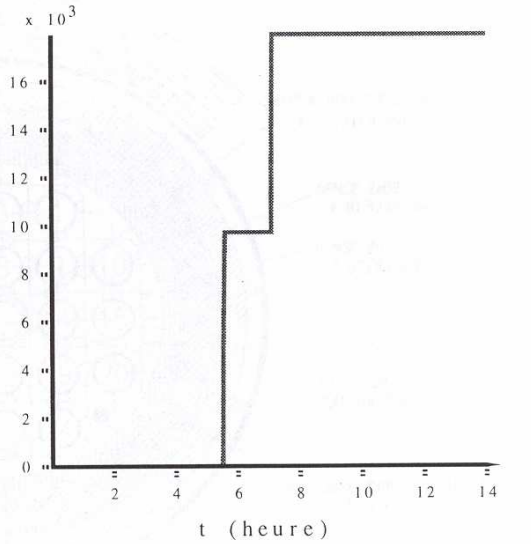
PUIS. (W)



masse (kg)



masse (kg)



## CALCUL PHEBUS FPT0

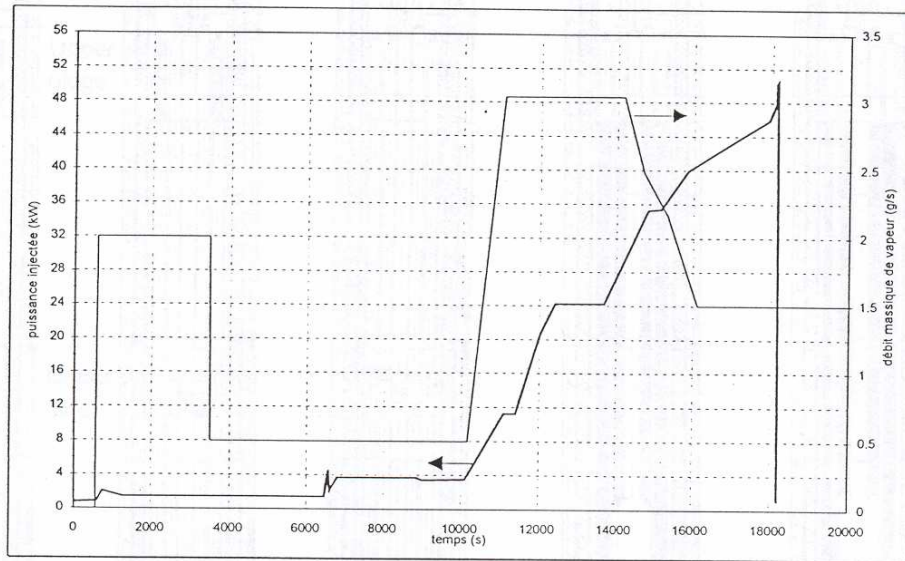
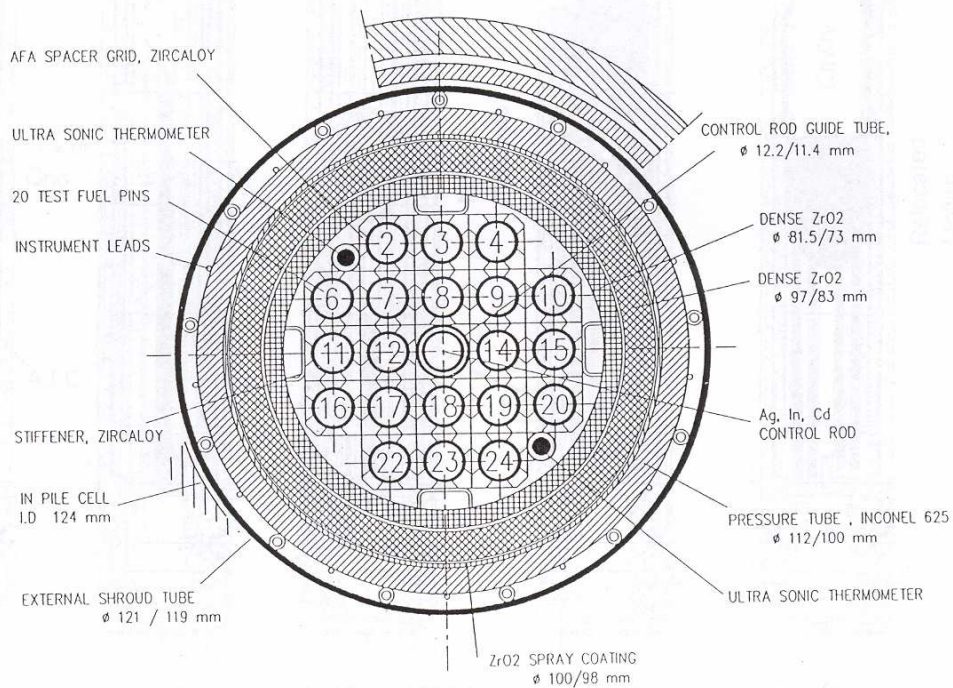
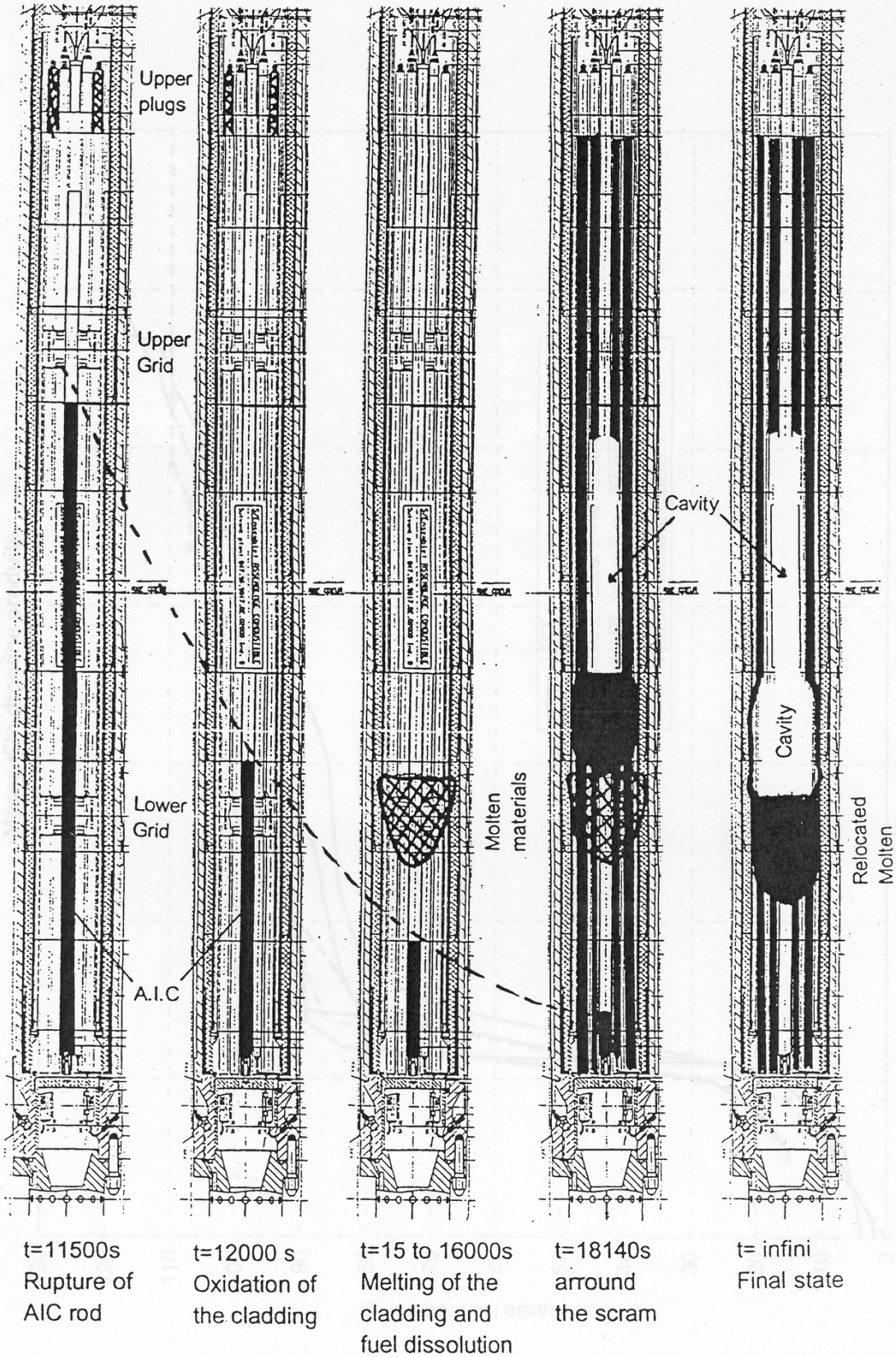
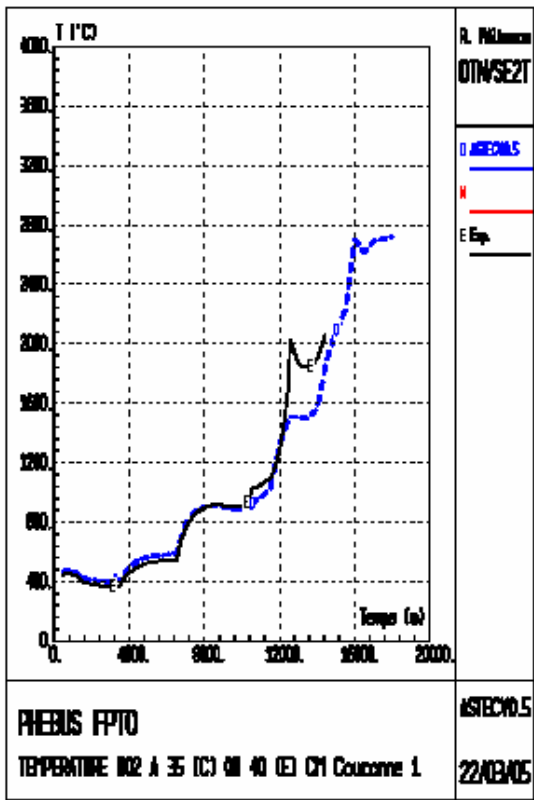
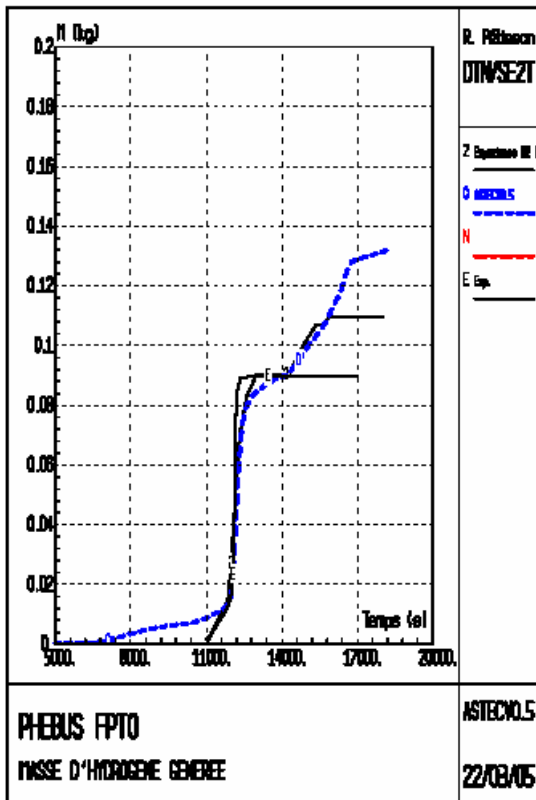
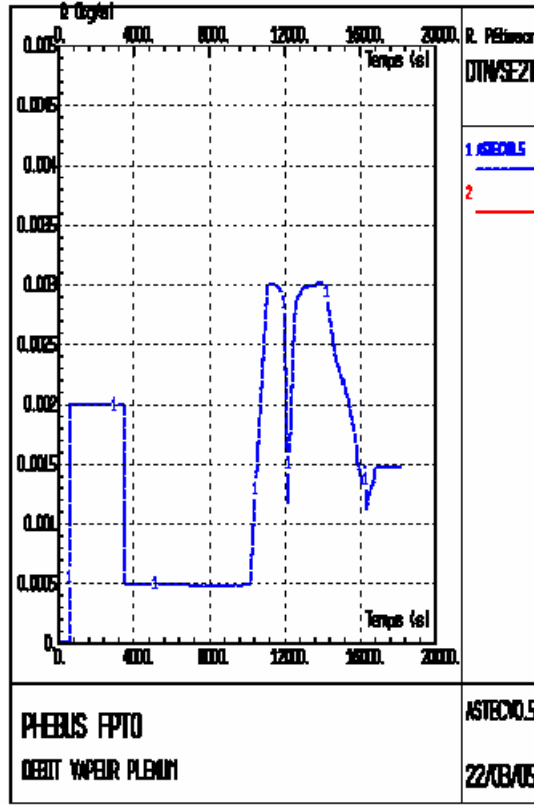
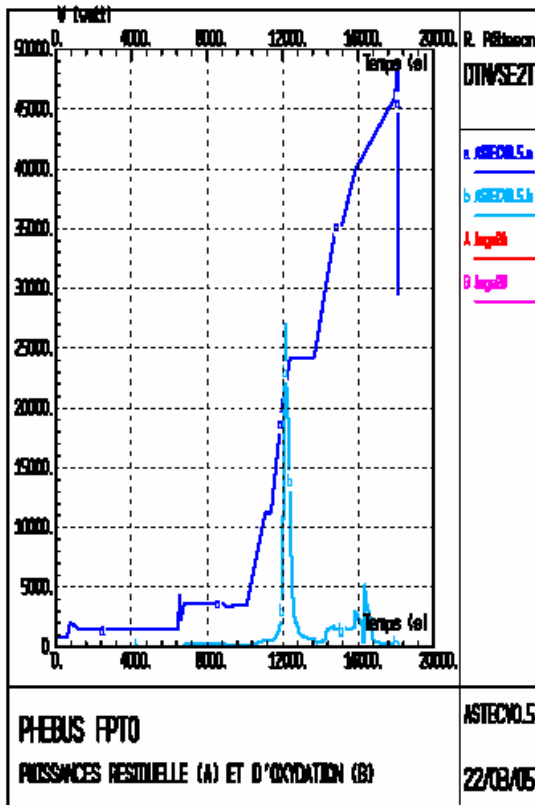


figure n°2 : scénario de l'essai PHEBUS FPT0



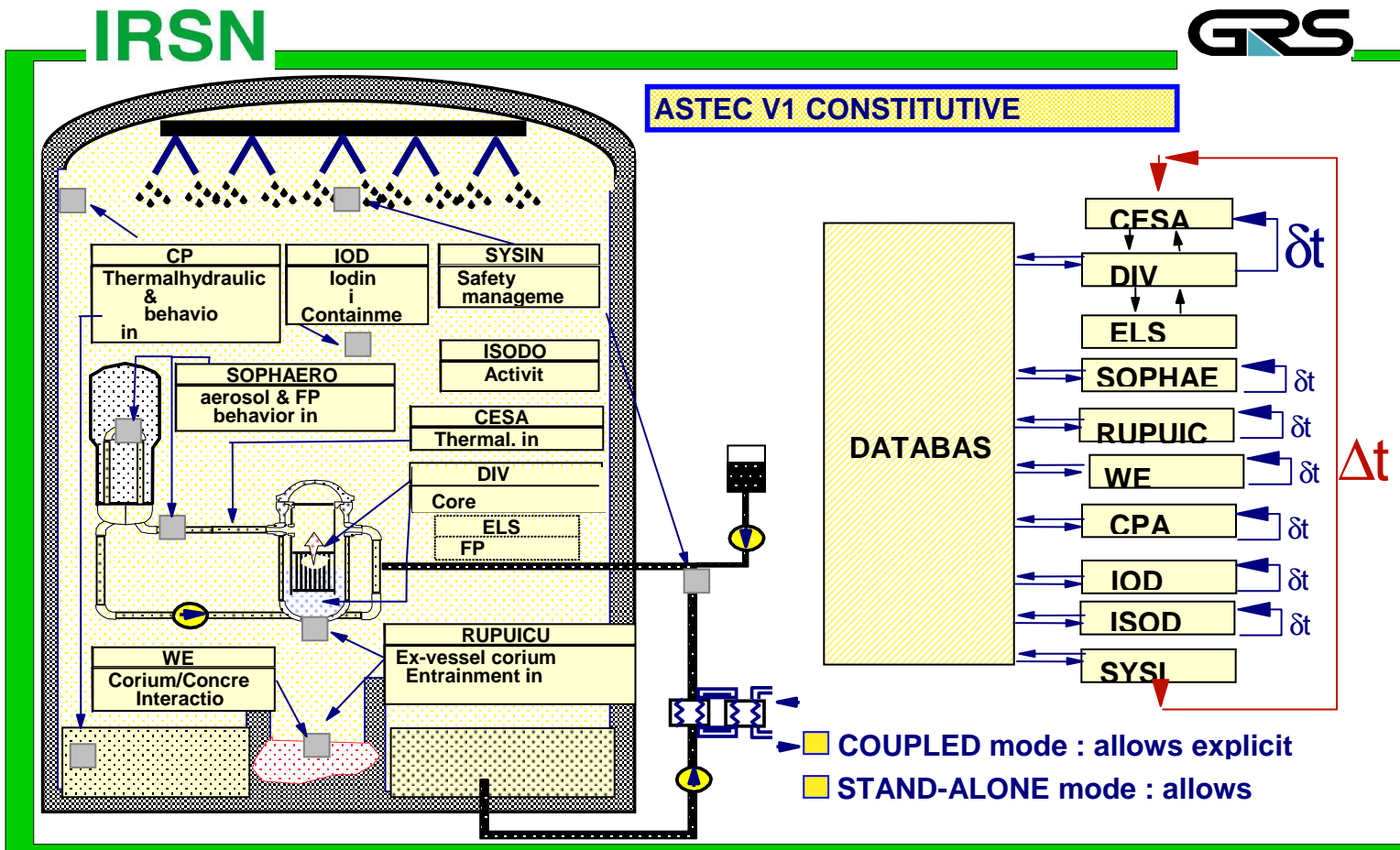
### CHRONOLOGY OF THE DEGRADATION (Hypothesis)





## CODE ASTEC V1 : Une évolution des codes scénario vers des codes plus mécanistes

Pour palier les limitations de VULCAIN (problèmes de l'initialisation des données au travers du code CATHARE, circuit simple phase, ...), un nouveau code à vu le jour : ASTECV1 :



Ce code est Développé par l'IRSN (SEMAR) et GRS. Il est constitué par un ensemble de codes dédiés à la représentation des phénomènes caractéristiques dans un accident sévère (exemple : relâchement de PF : sopharos) qui sont connectés et synchronisés entre eux .

Ce développement est accompagné d'un gros effort de validation.



Les principaux changements portent sur le remplacement

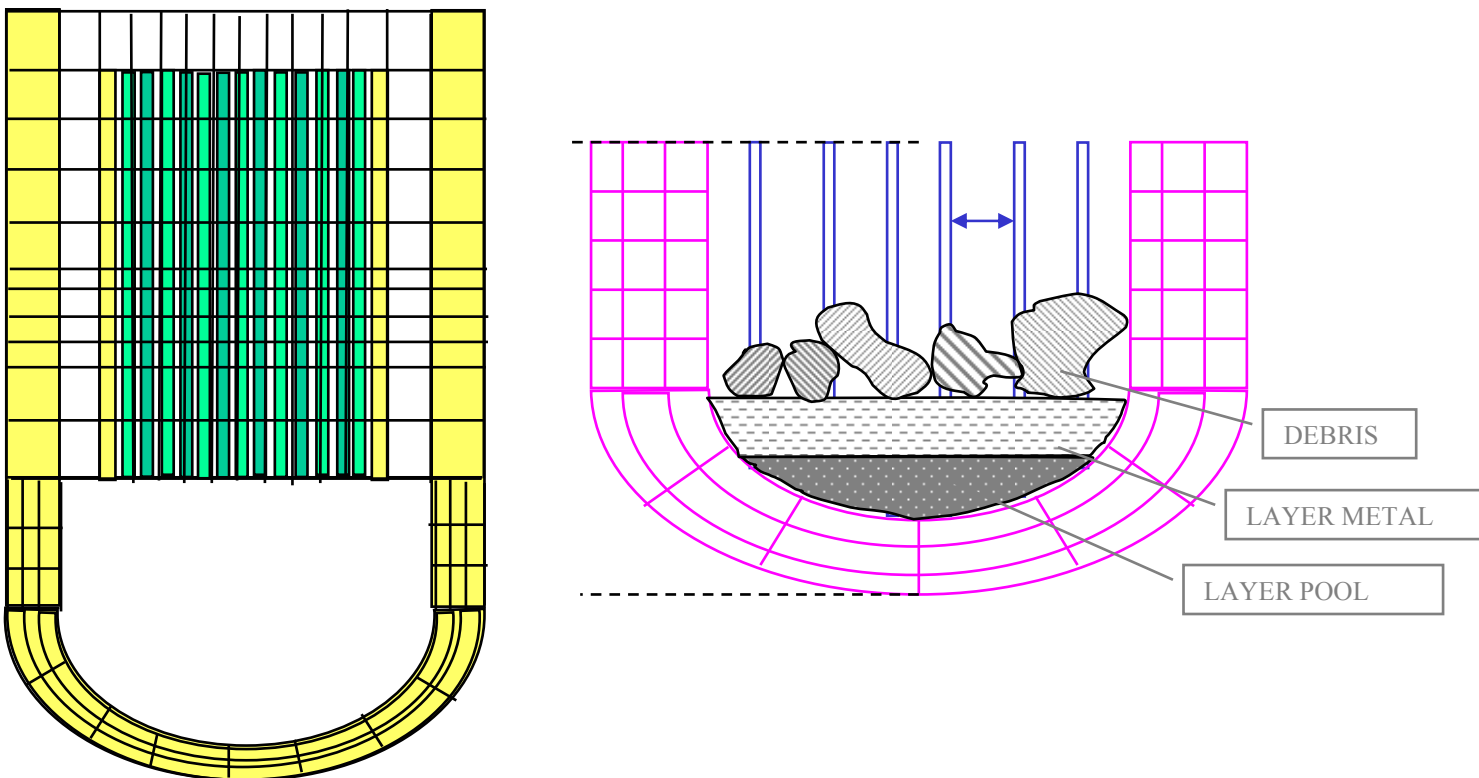
❶ du module décrivant la thermohydraulique cœur et circuit de Vulcain par CESAR (Simplification de CATHARE). Ce module est caractérisé par :

- Thermohydraulique diphasique (eau liquide + gaz ( vapeur + H<sub>2</sub>))
- Modèle à 5 équations (2 équations de masse, 2 équations d'énergie, 1 équation de quantité de mouvement pour le gaz, et un modèle de 'drift flux' pour le liquide. Les variables principales sont la pression totale et la pression partielle de H<sub>2</sub>, l'enthalpie du liquide et de la vapeur.
- Discrétisation en volumes (avec niveau d'eau gonflée) pour le cœur et les circuits avec des jonctions entre ces volumes.

CESAR calcule la thermohydraulique du cœur et des circuits primaire et secondaire pendant le permanent initial et intervient dans les phases 1 et 2 (sauf le cœur) de dégradation

- ➔ PHASE 1 : NO DEGRADATION, NO OXIDATION IN VESSEL
- ➔ PHASE 2 : DEGRADATION AND OXIDATION IN VESSEL
- ➔ PHASE 3 : CORIUM IS IN THE CAVITY

❷ du module de dégradation du cœur par DIVA basé sur ICARE2 mais avec des modèles plus simples et plus rapides ( plus des modèles spécifiques). Le cœur est représenté par un ensemble de plusieurs canaux liquide 1D et par une modélisation 2D de l'écoulement de gaz. Le corium dans le plénum inférieur est représenté par un moule point à 3 couches (débris, oxyde métallique liquide, oxyde). A termes ce module sera remplacé par ICARE

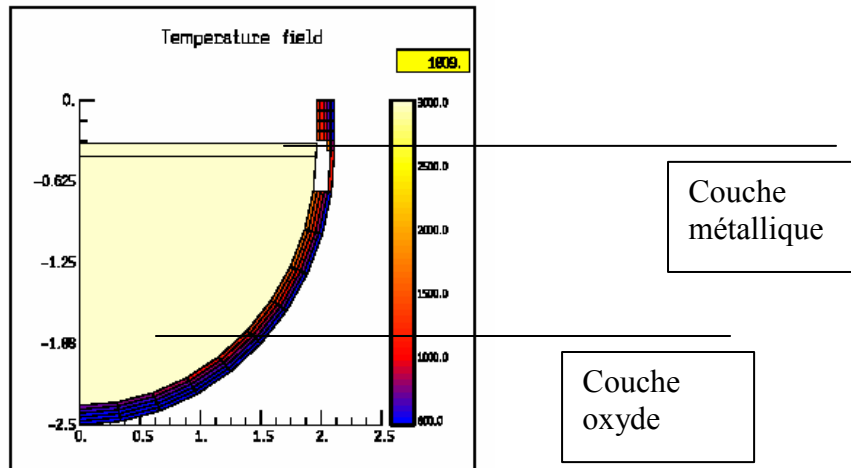


Un exemple de maillage DIVA et un exemple de modélisation du corium en fond de cuve.

## Introduction de PHYSICO-CHIMIE dans les calculs scénario d'accidents graves.

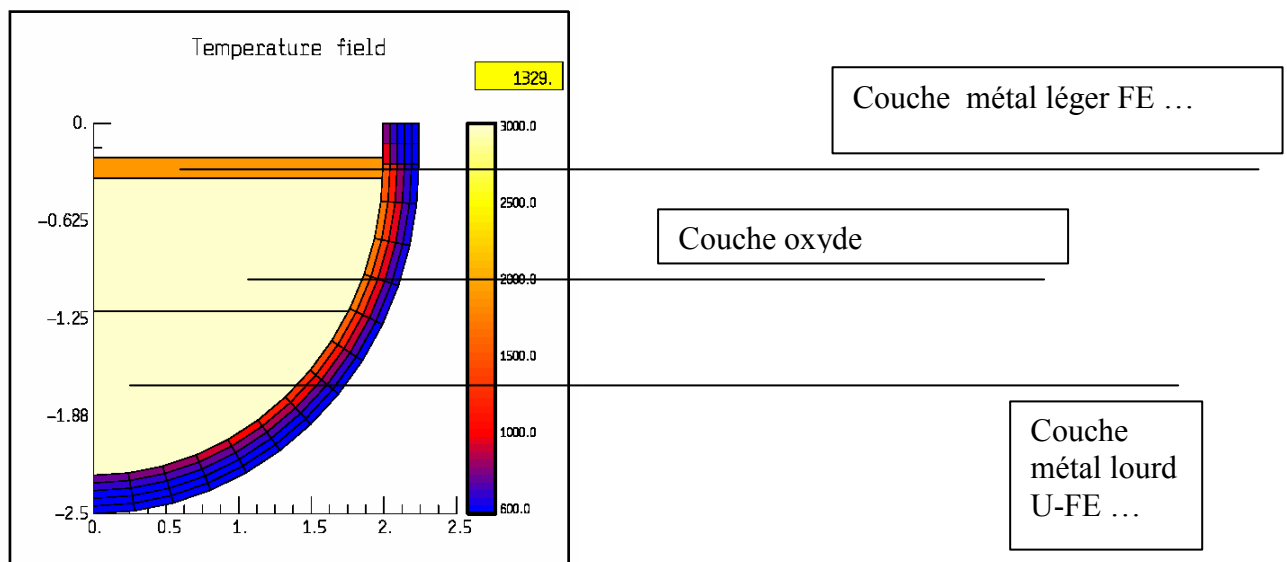
Par exemple, dans la situation corium en fond de cuve, la modélisation des codes de scénario accidents graves supposait que, dans la situation de référence, le bain de corium en fond de cuve était constitué d'une couche d'oxyde surmontée d'une couche métallique. Suivant l'épaisseur de la couche, on pouvait assister à un phénomène de concentration de flux suivant l'épaisseur de la couche métallique.

Exemple de calcul DIVA avec effet de concentration de flux : sur un calcul réacteur avec une couche initiale de métal de 5cm



Ce cas est peu probable car la masse de métal disponible et probable dans un accident grave correspond à une épaisseur bien supérieure à 5cm.

La thermodynamique et les essais MASCA ont montré une autre situation d'équilibre :



Pour une situation de concentration de flux sur la couche supérieure, la masse totale de métal devient beaucoup plus grande (car du Fe se trouve dans la couche inférieure).

## LES CODES MECANISTES

Par opposition aux codes globaux (VULCAIN, MAAP, ASTECV1), les codes mécanistes (ou best-estimate) répondent aux exigences suivantes:

- modèles transitoires
- modélisation fine des phénomènes (modèles 1D, 2D voire 3D, diphasique)

La complexité des phénomènes et le manque de possibilité de qualification rend difficile l'écriture de tels codes pour les accidents graves.

On peut citer par exemple:

Le code ICARE2 (CEA/IPSN, réf.10): modélisation mécaniste du cœur en accident grave :

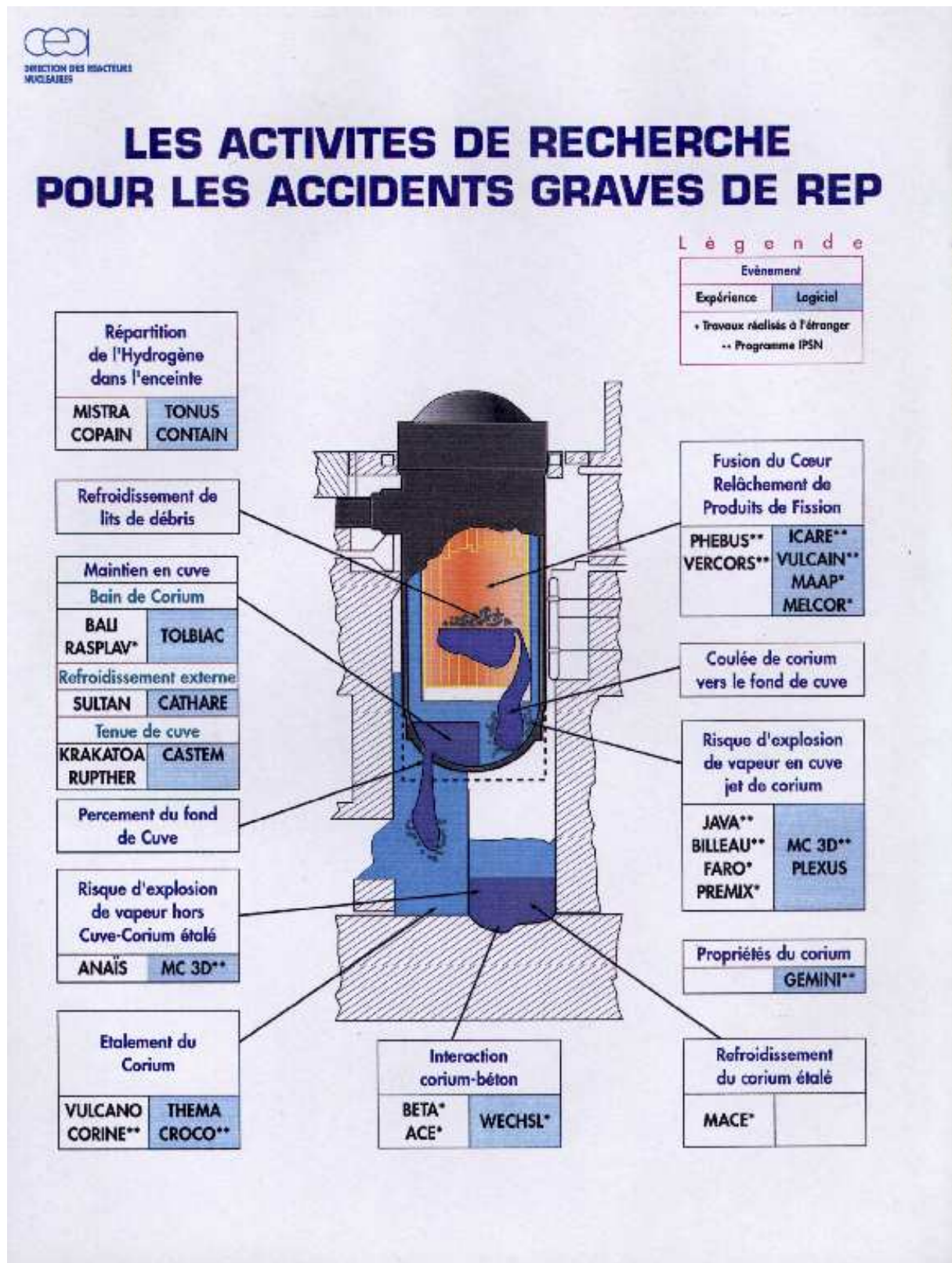
- . traite les coulées continues de matériaux (avec PF)
- . traite finement les interactions chimiques
- . couplage avec CATHARE pour calcul réacteur.

Le code SCDAP/RELAP5 (USA, réf. 14): code mécaniste de référence Américain

Les codes mécanistes + généraux :  
SIMMER

Les codes mécanistes appliqués  
MC3D

## REP: PROGRAMME DE RECHERCHE



Très nombreux phénomènes physiques et conditions extrêmes (T, nucléaire)

- ☞ connaissance des phénomènes: expériences spécifiques
- ☞ exploitation des connaissances: logiciels de simulation

## Un exemple de code mécaniste : MC3D

MC3D est un code dédié à la problématique de l'interaction corium eau (FCI) qui peut conduire à l'explosion de vapeur.

La situation peut se produire quand un corps chaud ( le corium) rentre en contact avec un réfrigérant froid ( l'eau dans ce cas)

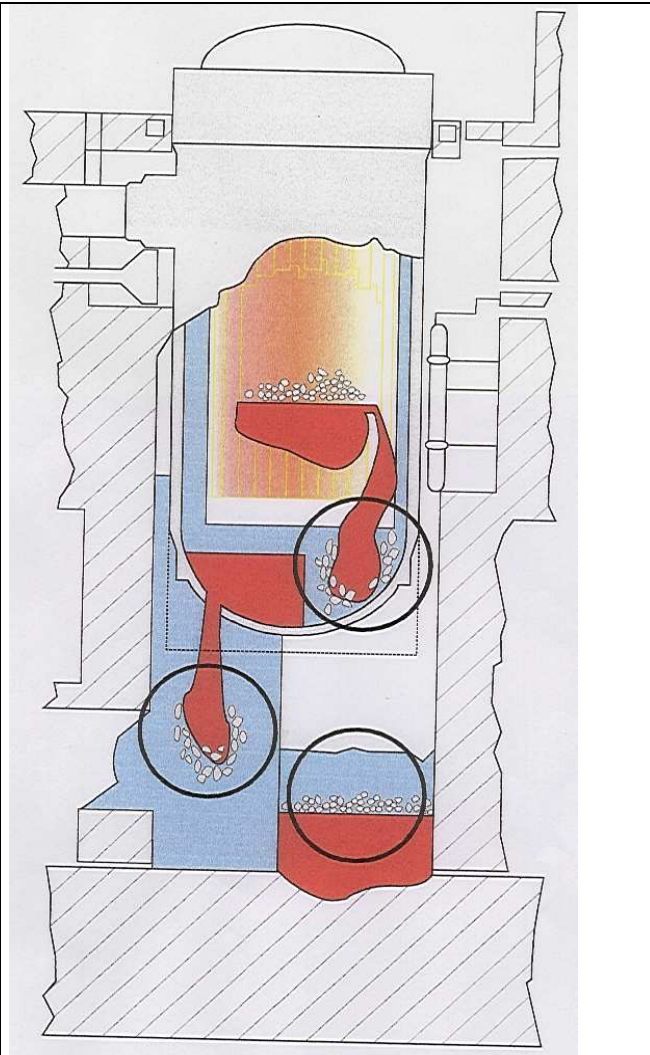
Ce phénomène peut également se produire dans l'industrie quand certains matériaux atteignent des températures élevées, mais les conséquences sont limitées et la parade consiste souvent à changer le process.


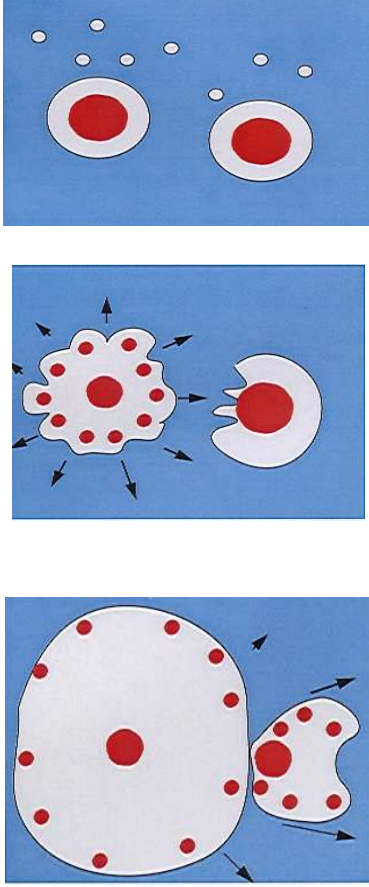
On distingue les situations en cuve et hors cuve.

Historiquement on a essayé d'utiliser des modèles point ou 1D pour essayer de prédire les conséquences d'une telle interaction mais les phénomènes sont extrêmement couplés et les contre réactions nombreuses ce qui rend délicate l'utilisation de ces outils.

On distingue 3 phases :

- Le prémélange
- Le déclenchement
- L'explosion



<p><b>Le prémélange :</b>                  Un jet de corium chaud (3000K) tombe et rentre en contact avec de l'eau. Il se crée alors un film de vapeur.</p> <p>Les instabilités à l'interface du film produisent des gouttes de corium qui se détachent et qui vont se fragmenter en gouttes plus fines ...</p> <p>Au contact des gouttes de corium, il y a une forte vaporisation et, suivant l'écart entre la température de l'eau et sa température de saturation, une forte condensation.</p> <p>L'échelle de temps est [1,10s]                  La taille des gouttes est (1 cm)                  La hauteur d'eau est (1m)</p>	
<p><b>Le déclenchement</b></p>	<p>Phase mal décrite et stochastique</p>
<p><b>L'explosion</b>                  Sous l'effet d'un déclencheur extérieur (trigger) par exemple une onde de pression                  La situation stable d'une goutte de corium dans de l'eau peut se transformer en une situation instable :</p> <p>Fragmentation fine (hydrodynamique ou thermique).</p> <p>Suivie d'une phase d'expansion</p> <p>L'échelle de temps est [0.001]                  La taille des fragments est [0,05 à 0.1 mm]</p>	

L'objectif de MC3D est de prédire correctement la répartition des espèces et leurs caractéristiques (exemples : diamètre des gouttes de corium, température des gouttes, vitesse de la vapeur) dans une géométrie réacteur (phase de prémélange) puis de regarder l'effet d'une perturbation locale (trigger) sur cette répartition ( phase d'explosion).

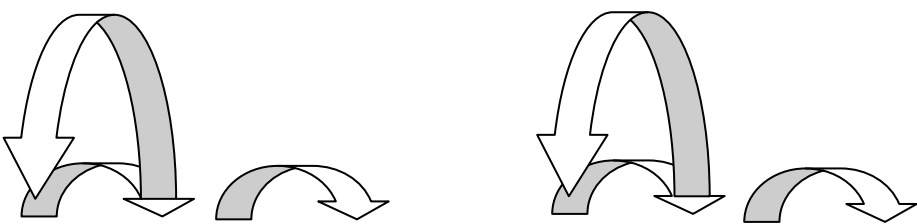
MC3D est un code :

- Eulérien
- Multichamps
- Multi composants

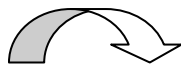
Compte tenu des échelles de temps très différentes entre l'explosion et le prémélange, il y a 2 applications : une pour le prémélange et l'autre pour l'explosion. Par contre, ces 2 applications partagent le même noyau de résolution numérique.

Les principales caractéristiques de la méthode sont :

- Volumes finis , schéma décentré amont
- Résolution semi implicite,



	Eau liquide	Vapeur	H2	Corium jet	Corium gouttes	Corium fragment
<b>PREMELANGE</b>						
Masse	X	X	X	X	X	X
Mouvement	X	X		X	X	(Eau liquide)
energie	X	X		X	X	Eau liquide
<b>EXPLOSION</b>						
Masse	X	X	X		X	X
Mouvement	X	X			X	X
Energie	X	X			X	X



Transfert de masse

En plus de ces équations de bases,

- on ajoute des équations supplémentaires si nécessaire .  
Par exemple , on ajoute une équation d'aire interfaciale des gouttes de corium.

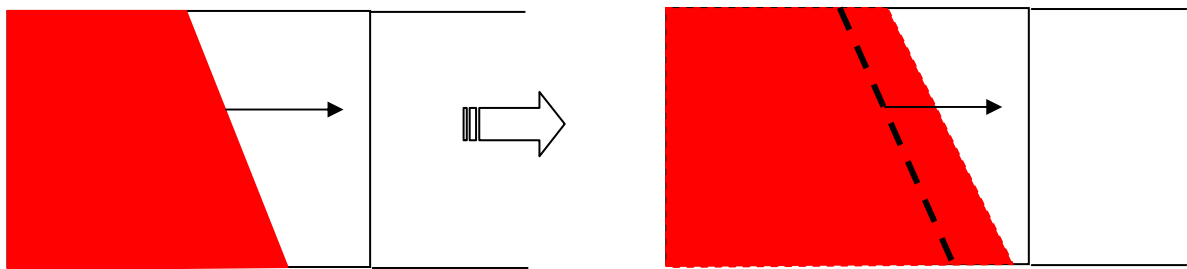
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot A \vec{V}_d = \Gamma_{A,drop \rightarrow drop} + \Gamma_{A,jet} + \Gamma_{A,drop \rightarrow cont}$$

Fragmentation des gouttes

Fragmentation du jet en gouttes

Agglomération des gouttes dans le jet

- On met en place des méthodes de localisation des espèces plus sophistiquées (méthode VOF pour le corium sous forme de jet) c.a.d que l'on déplace l'interface du jet dans la maille au lieu de déplacer la quantité de jet dans la maille.



Méthode de suivi d'interface

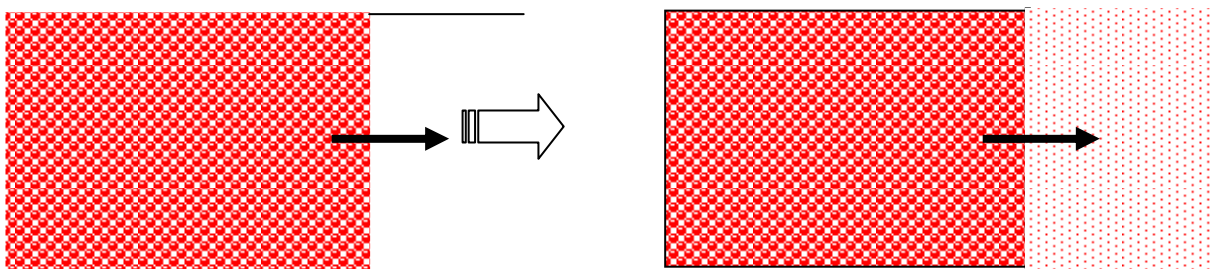


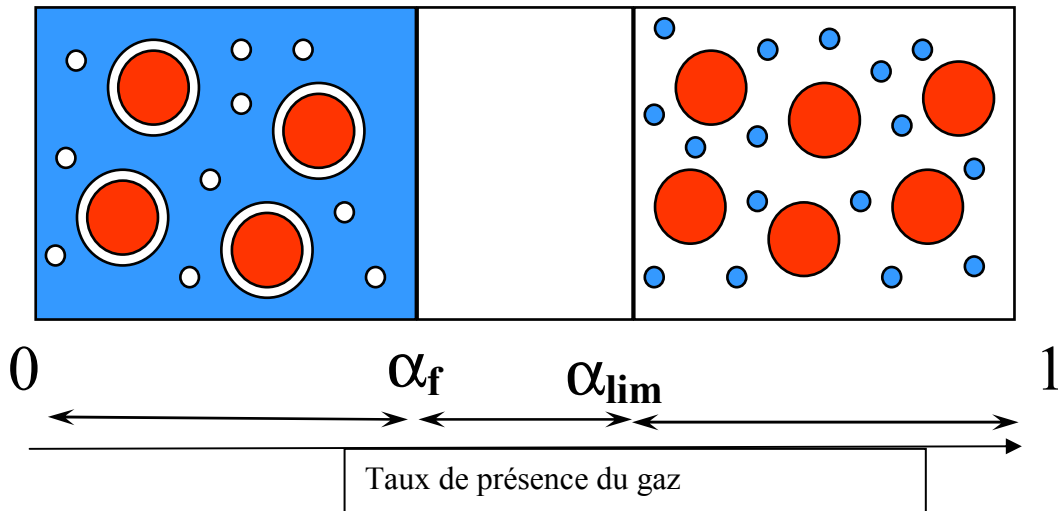
Schéma classique de transport

La méthode VOF est plus satisfaisante pour le transport d'une espèce continue mais elle est plus lourde à mettre en œuvre et pose des problèmes dans son utilisation en 3D axisymétrique. Les calculs de prémélange avec un jet sont donc limités au 2D.



Les principales difficultés dans l'écriture de ce type d'outils sont :

- dans la définition des régimes d'écoulement (la carte d'écoulement) ; c'est à dire pouvoir prédire suivant les caractéristiques du milieu sa configuration (par exemple écoulement à bulles, écoulement de gaz avec des gouttes de liquide, écoulement en lit de débris ...)



- dans les lois constitutives ; c'est à dire : les lois de frottements entre les espèces pour les équations de quantité de mouvement, les lois de transferts thermiques entre les espèces pour les équations d'énergie.  
par exemple utilisation de loi de frottement entre les gouttes de corium et le réfrigérant qu'il soit sous forme monophasique (gaz) ou diphasique (mélange eau-gaz voir problème de la carte d'écoulement).

Exemple d'équation de quantité de mouvement pour les gouttes:

Accumulation

Effet de la gravité

Frottement sur le liquide

eq. 1  $\alpha_d \rho_d \frac{\partial \vec{V}_d}{\partial t} + \alpha_d \rho_d (\vec{V}_d * \nabla \vec{V}_d) = -\alpha_d \vec{\nabla} P + \alpha_d \rho_d \vec{g} - Ks \vec{V}_d + Kif_{ld} (\vec{V}_l - \vec{V}_d) + Kif_{gd} (\vec{V}_g - \vec{V}_d) - (\Gamma_{jet \rightarrow drop}) \cdot (\vec{V}_j + \vec{V}_{rj}) + P_{sol}$

Transport

Frottement sur la vapeur

Transfert de quantité de mouvement lors de l'arrachement des gouttes du jet

Terme empêchant les gouttes solides de s'accumuler

- dans les termes de transferts entre les espèces (les termes d'évaporation et de condensation pour le réfrigérant, de production d'hydrogène, de fragmentation du jet en gouttes, de fragmentation des gouttes ... ) pour les équations de masse mais aussi pour les équations de quantité de mouvement et d'énergie.

Exemple d'équation de masse pour la vapeur :

$$\text{eq. 2} \quad \frac{\partial \alpha_v \rho_v}{\partial t} + \text{div}(\alpha_v \rho_v \vec{V}_v) = -\Gamma_{lv}^{b/d} - \Gamma_{lv}^{film} - \Gamma_{v \rightarrow NC}$$

Transport

Consommation de H<sub>2</sub>O vapeur pour faire du H<sub>2</sub>

Evaporation ou condensation autour des gouttes d'eau ou des bulles de vapeur (résultat d'un bilan sur l'interface)

Production de vapeur autour des gouttes de corium en film boiling résultat d'un bilan sur l'interface

- Dans les lois d'état (propriétés physiques). Le principal problème se pose pour le réfrigérant (eau) pour lequel il faut des lois « quantitativement » satisfaisantes pour les zones avec des points de mesure et « qualitativement » satisfaisantes en dehors de ces points de mesure :  
Par exemple Au dessus de 800C, la conductivité thermique de l'eau.
- D'un point de vue numérique, par les phases résiduelles.  
Par exemple comment traiter le terme  $W \frac{\partial W}{\partial z}$  pour une espèce qui n'existe pas sur tout le domaine.

Ce qui implique un grand nombre de lois à mettre en application.

**Mais**

**Ces lois n'ont pratiquement jamais été établies pour les gammes de pression, de vitesse, de température (voire de taille) sur lesquelles nous travaillons. De plus, compte tenu de la durée du transitoire et de son agitation, les écoulements ne sont jamais établis et les déséquilibres sont nombreux.**

**Les corrélations doivent être basées sur de l'analyse physique et il faut faire attention aux effets de l'expérience, sans quoi, la transposition au cas réacteur est impossible.**

Il faut donc construire des validations

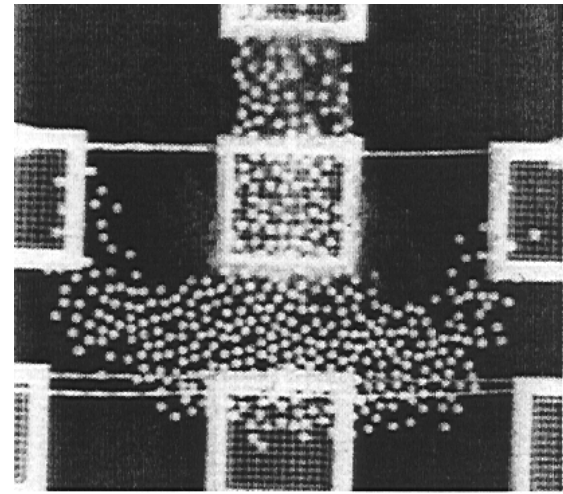
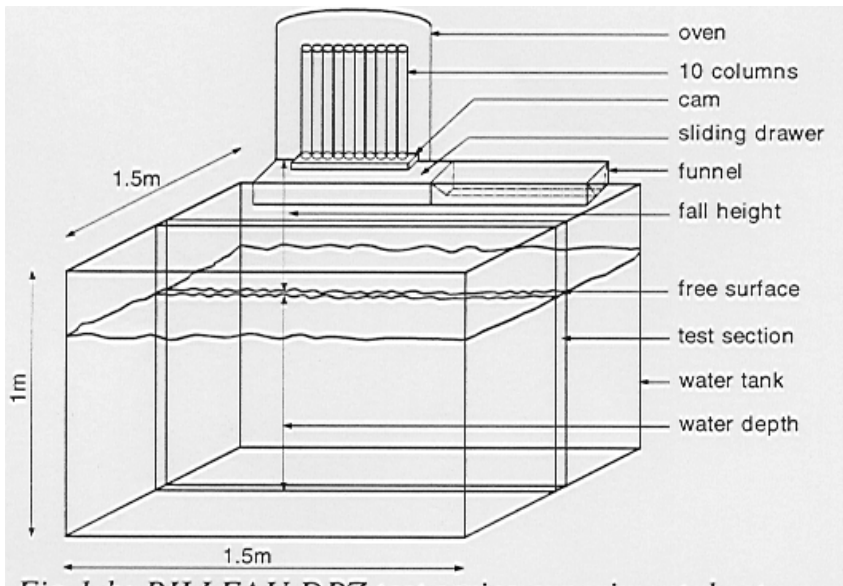
- sur des phénomènes plus « unitaires » (par exemple les expériences BILLEAU de chute de billes chaudes ou froides dans de l'eau froide ou proche de la saturation). Cependant, même sur ces phénomènes simplifiés l'interprétation est difficile ;
- sur des phénomènes plus globaux (par exemple les expériences FARO ou KROTOS).

La matrice de validation prémélange :

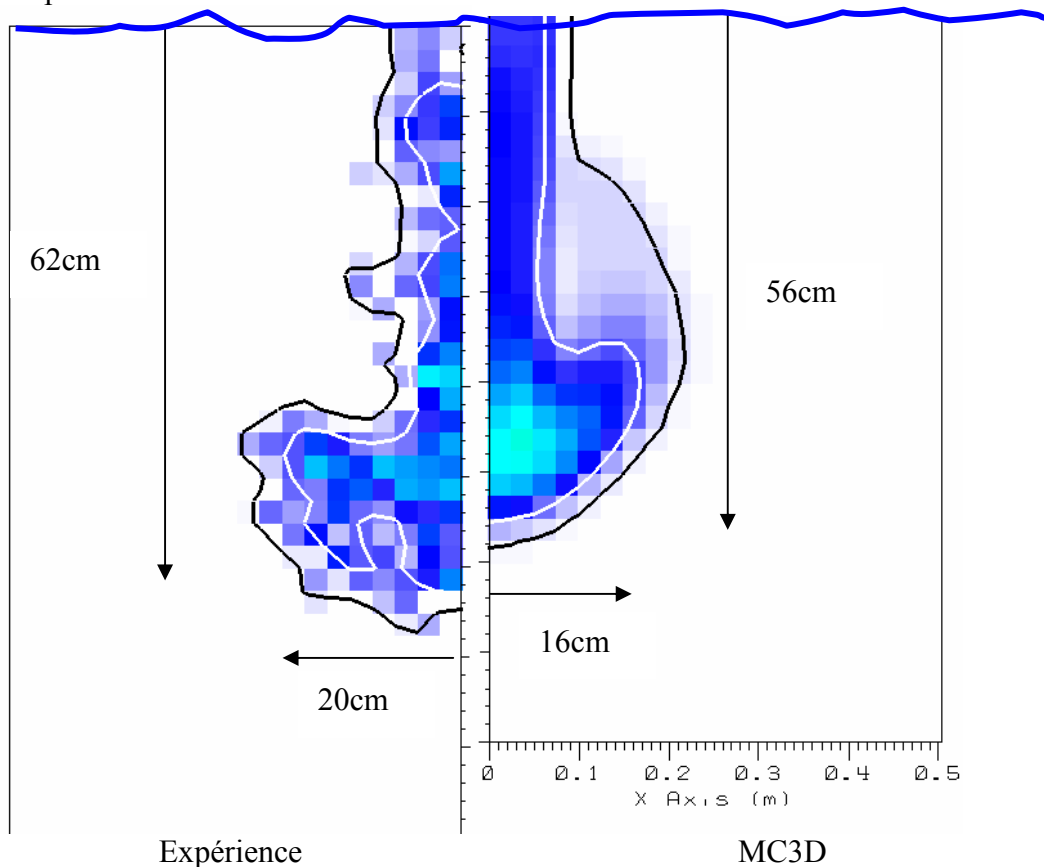
	<b>BILLEAU</b>	<b>QUEOS</b>	<b>FARO</b>	<b>PREMIX</b>
<b>COMPANY</b>	CEA	FzK	JRC ISPRA	FzK
<b>MATERIAL</b>	MARBLES		JET	
	STEEL, GLASS, ZrO <sub>2</sub>	Mo, ZrO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe
<b>MATERIAL TEMPERATURE</b>	300-2200K	300-2300K	3200K	2600K
<b>LIQUID TEMPERATURE</b>	SUBCOOLED OR SATURATED	SUBCOOLED OR SATURATED	SUBCOOLED OR SATURATED	SATURATED (0.1 MPa)

Nous allons étudier deux exemples de validation :

exemple de validation BILLEAU



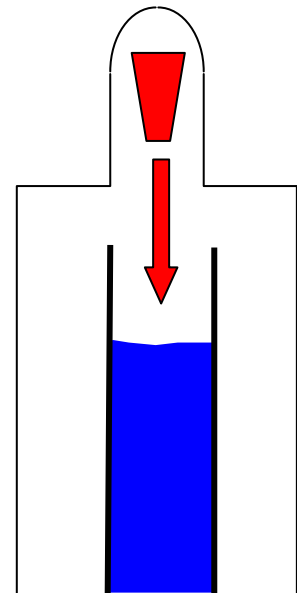
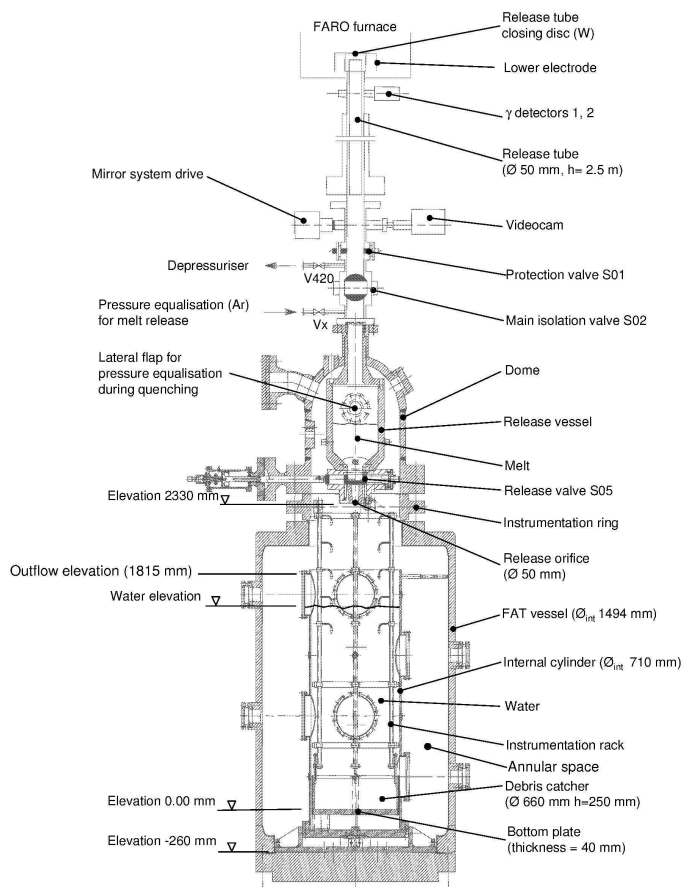
Exemple de résultats :



Carte de taux de gouttes et lignes d'iso valeur de taux de gouttes 1% (noire) et 5% (blanche)  
 Au temps experience de 0.8s ( soit environ 0.6s après la pénétration dans l'eau)  
 Chute de billes chaude en ZrO2 de 1cm dans de l'eau froide à 20°C essai BILLEAU DPZ11

Les résultats avec des billes en zircone sont satisfaisants avec cependant une tendance à sous estimer la largeur du nuage et à placer trop de billes au centre. Les résultats avec des billes en verre (donc plus légères) sont moins bons.

Exemple 2 : FARO 28. C'est un essai où on fait tomber pendant 6s 200 kg de corium (80%UO<sub>2</sub>-20%ZrO<sub>2</sub>) fondu dans un réservoir de 1.44m de haut rempli d'eau (à saturation) La pression est de 5bars. Le réservoir est fermé.



Plan de l'expérience FARO28

Schéma de principe

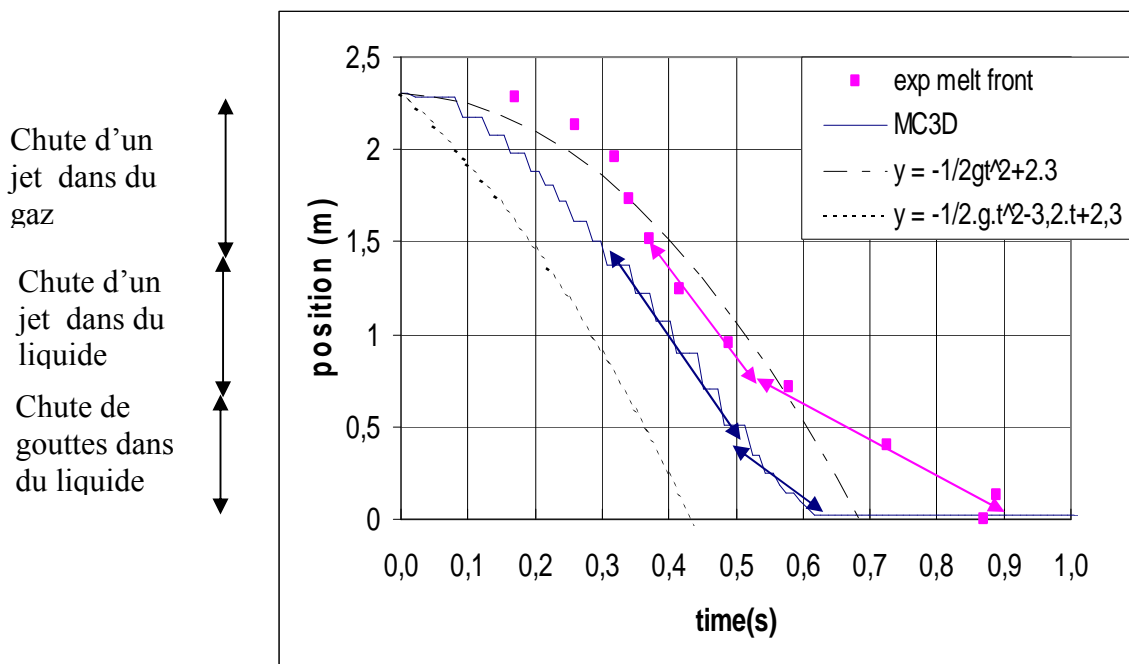
Il y a de nombreuses mesures de pression, de température, de niveau d'eau dans le réservoir intérieur et dans le réservoir extérieur ...

Cet essai date de 1998. Il a été réalisé à ISPRA (JRC). Il a été choisi depuis pour servir de cas test pour une action OCDE nommée SERENA et destinée à faire l'état de l'art sur la modélisation des expériences en prémélange d'une part et des expériences en explosion d'autre part puis sur les applications réacteur.

Les essais FARO ont mis en évidence une production d'hydrogène durant le transitoire. La cause exacte de cette production est inconnue ou plus exactement aucun des phénomènes physiques (dissociation de l'eau, sur oxydation de  $UO_2$  en  $U_3O_8$ ) pouvant être responsables de cette production ne peut expliquer l'importance de cette production pendant l'essai. Par contre dans les calculs MC3D, nous disposons d'un modèle paramétrique capable d'associer la production d'hydrogène avec une production d'aire inter faciale de gouttes. On peut analyser les résultats en se focalisant sur la pénétration du corium, sur les masses et la répartition des espèces en fin de transitoire, sur la pression dans l'enclume sur l'énergie extraite du corium.

### Pénétration du corium :

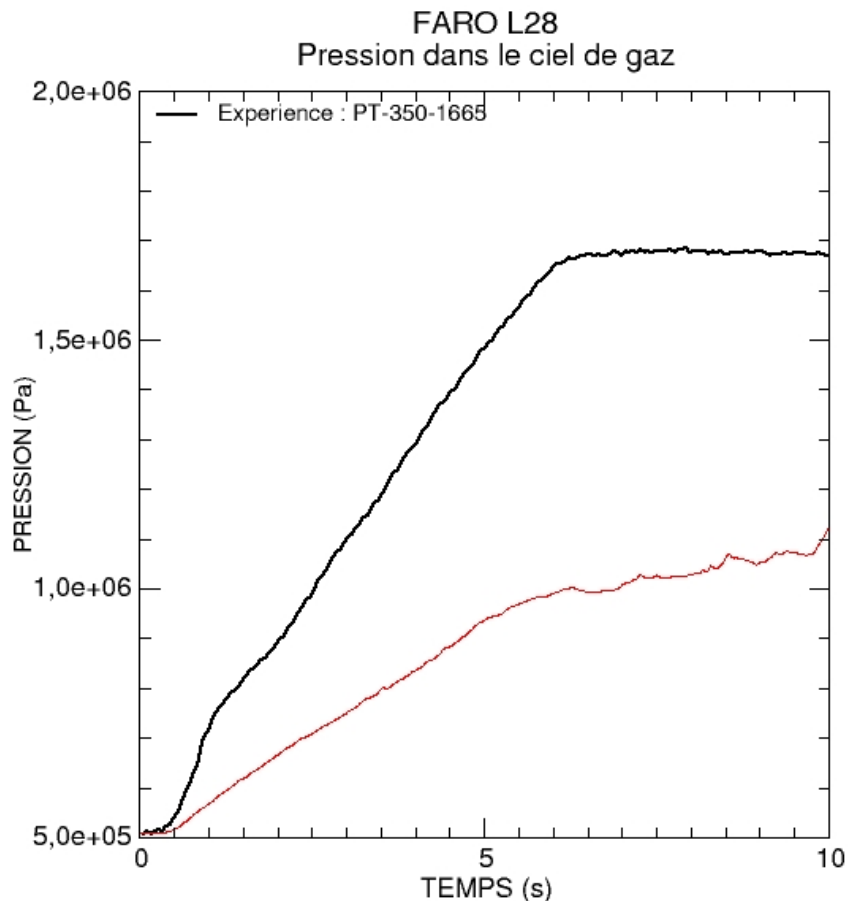
L'expérience et le calcul sont décalés de 0.08s



La vitesse de chute du corium sous forme de jet est satisfaisante dans le liquide et dans le gaz, mais la longueur de rupture du jet (distance entre le niveau initial d'eau et le point où tout le jet est transformé en gouttes) est trop grande. Après la rupture, les gouttes chutent trop vite dans le liquide par rapport à l'expérience.

Pourtant dans l'expérience BILLEAU avec des billes de zircone de 1cm, la chute des billes lourdes étaient correctement décrite.

Les masses de corium sous forme de débris (gouttes solidifiées), de corium continu (appelé cake dans l'expérience) sont satisfaisantes. La masse d'hydrogène est globalement retrouvée. La masse de liquide dans le réservoir intérieur et le réservoir extérieur est bien décrite. La masse de vapeur est sous estimée. Ceci a un impact direct sur la pression :



En opposition au «manque» de vapeur, on obtient des niveaux d'eau gonflés trop importants avec MC3D (c'est à dire une présence trop importante de vapeur dans le liquide). La vapeur semble donc trop « liée » au liquide. Ce défaut de vapeur a également un impact très important sur l'énergie transférée du corium vers le réfrigérant.

## CONCLUSION SUR LES CODES MECANISTES

D'une manière générale, les codes mécanistes appliqués aux accidents graves travaillent aux limites des connaissances de la physique. Dans ces domaines où les expérimentations sont très difficiles à réaliser et les lois constitutives sont souvent utilisés en dehors de leur plage de validité. Ces codes sont donc nourris de lois pas toujours très précises dans les domaines où elles sont employés mais les codes non mécanistes font obligatoirement des raccourcis plus douteux encore.

Leur base de qualification est fondamentale pour la confiance qu'on peut leur accorder. Leur utilisation permet cependant de mieux prendre en compte certains effets et le plus souvent de décrire plus correctement les phénomènes clés que les codes point ou simplifiés.

## LES RNR: RAPPEL NEUTRONIQUE

Pour les réacteurs à neutrons rapides surgénérateurs (réf.11), type Super-Phénix

### Réaction de base:



### Surgénération:

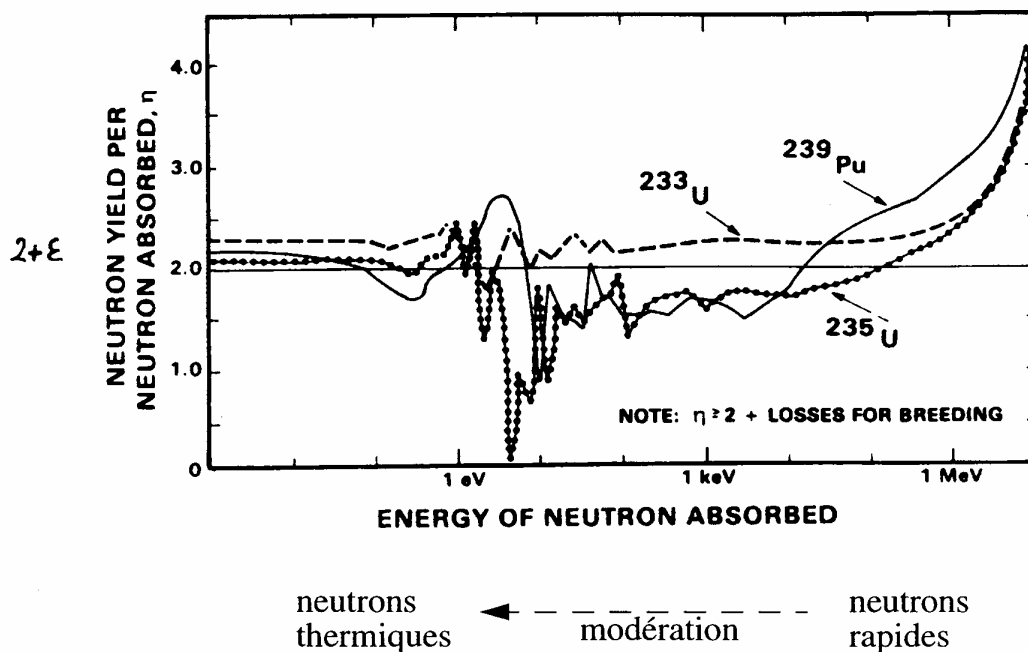
les  $\nu$  neutrons deviennent:

1 neutron pour entretien de la réaction

$1+\epsilon$  neutron pour transformer  $1+\epsilon$  noyau fertile en  $1+\epsilon$  noyau fissile

le reste est perdu (fuites, absorptions non fissiles...)

⇒ utilisation de neutrons rapides pour maximiser le nombre de neutrons utiles (d'où pas de modérateur type eau)





## **Conséquences sur les cœurs de RNR:**

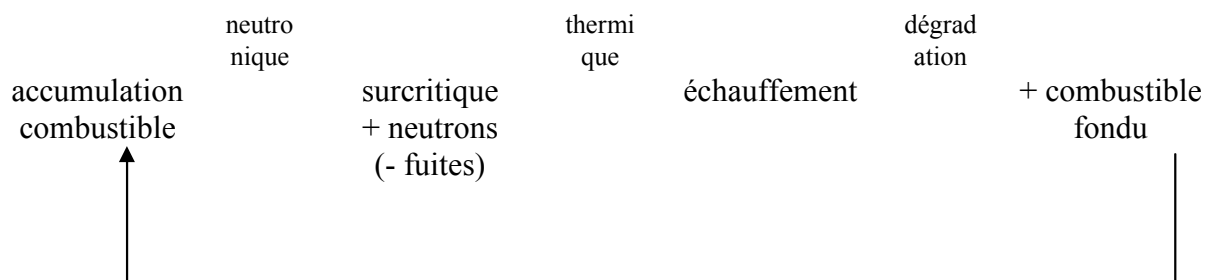
- . cœur compact (pour limiter les fuites neutroniques)
  - . combustible très enrichi en noyaux fissiles, de 20 à 30% (3% pour REP), pour compenser la section efficace d'absorption très faible des neutrons rapides
- ⇒ très forte puissance spécifique cœur ( $300 \text{ MW} / \text{m}^3$ )
- ⇒ refroidissement par sodium liquide et grande surface d'échange

## Couplage neutronique / dégradation du cœur:

. le cœur n'est pas dans sa configuration la plus critique (contrairement aux REP)

. la puissance spécifique très élevée

⇒ emballement en cas d'accident suivant le schéma:



☞ couplage très fort neutronique / dégradation de cœur

☞ cinétique dégradation très rapide (< 1 seconde), = explosion

Exemples d'influence de la dégradation sur la neutronique:

- dilatation des assemblages                      criticité ➡
- taux de vide du réfrigérant                      criticité ➤
- mélange d'acier dans bain corium              criticité ➡

Seul le couplage de tous ces phénomènes permet de calculer une évolution raisonnable de l'accident => SIMMER

☞ difficulté pour obtenir un code fin d'accident grave RNR

## LES RNR: SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES

Un exemple de scénario 'maximum' peut être le suivant:

### Initiateur:

- arrêt des pompes primaires sans chute des barres de contrôle
- ou bouchage total instantané au bas d'un assemblage cœur

⇒ Arrêt écoulement sodium, vaporisation locale du sodium = perte de réfrigérant, fusion d'un assemblage.

### Phase primaire:

- concentration locale de combustible
  - ⇒ sur-criticité, excursion primaire de puissance peu énergétique
- dégagement des produits de fission

⇒ pic local de puissance et de pression

⇒ dispersion partielle du combustible (éjecté hors du cœur)

(fin scénario possible si retour à sous-criticité à ce stade)

### Phase de transition:

- bouchage éventuel des canaux par lequel le combustible peut s'échapper
- recompaction locale de combustible
  - ⇒ excursion secondaire de puissance, croissance d'un bain de corium
  - ⇒ vaporisation de combustible et d'acier
- vaporisation de sodium ?

i

⇒ formation dans le cœur d'une bulle gaz à haute température et pression

### Phase de détente mécanique (expansion)

Cette bulle se détend et met la piscine de sodium en mouvement

⇒ impact mécanique du sodium sur la cuve

⇒ la cuve résiste-t-elle au choc?

## LES RNR: Ecriture de codes de calcul

### Rappel cas des REP:

Evolution de la dégradation avancée du cœur et de bain de corium relativement linéaire (hors renoyage)

⇒ modélisation possible par un code simplifié avec une validité raisonnable.

### Situation pour les RNR:

- Evolution de la géométrie de cœur fortement non linéaire
- Couplage nécessaire avec code neutronique fin

⇒ peu d'intermédiaire possible entre calculs 'à la main' (analyse conservatrice très pénalisante) et codes mécanistes fins

⇒ développement de codes mécanistes et spécialisés par phase d'accident:

- SAS4A pour la phase primaire
- SIMMER pour la phase de transition et de détente
- codes de mécanique pour la cuve

Nous présentons ci après le niveau de modélisation atteint par le code SIMMER 3

## UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE: SIMMER 3

### **SIMMER 3 (réf.12) est un code:**

- eulérien, implicite
- multichamp (1 structure, 2 liquides, 1 gaz)
- multicomposant (plusieurs composants par champ)
- couplé à un calcul fin de neutronique

### **Objectifs:**

- Résoudre les équations dynamiques des fluides (masse, QdM, énergie) en tri-phasique (2 liquides + 1 gaz)
- Résoudre les équations thermiques pour les structures
- En 2D

### **Historique du programme SIMMER:**

- SIMMER 1 et 2 développé à Los Alamos (USA) depuis 1974
- AFDM (Los Alamos)
- SIMMER 3 en cours de développement à PNC (Japon)  
coopération Japon (PNC)- CEE (KfK, CEA) pour la qualification
- SIMMER 4 en 2009

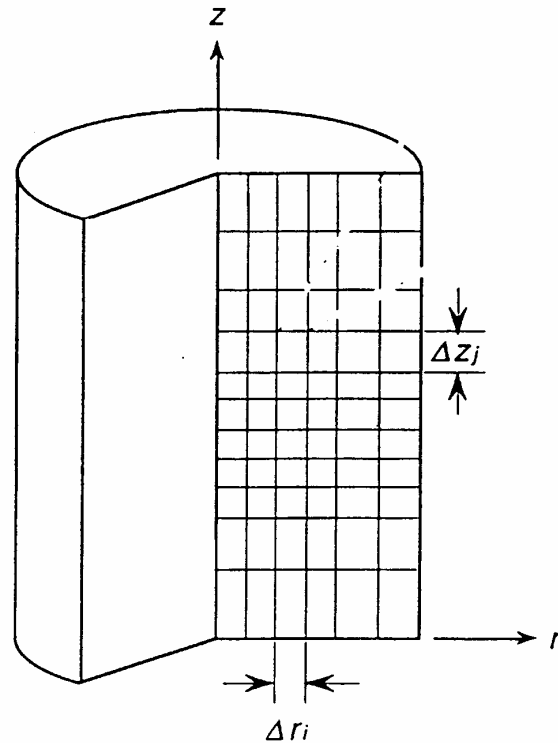
### **Conditions initiales d'un calcul:**

Toutes les valeurs initiales peuvent être imposées sur tout le maillage.

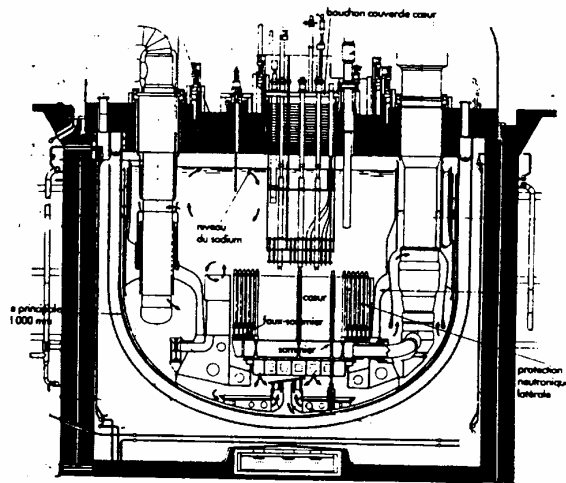
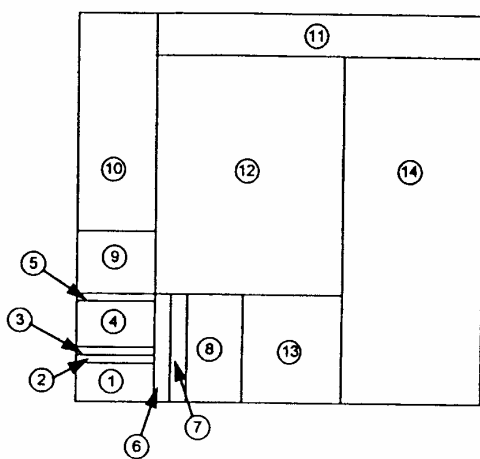
- ⇒ permet d'initialiser un calcul sur un état non stationnaire
- ⇒ poursuite possible de calculs SAS4A de phase primaire

### SIMMER 3: géométrie, maillage

#### Maillage r-z:

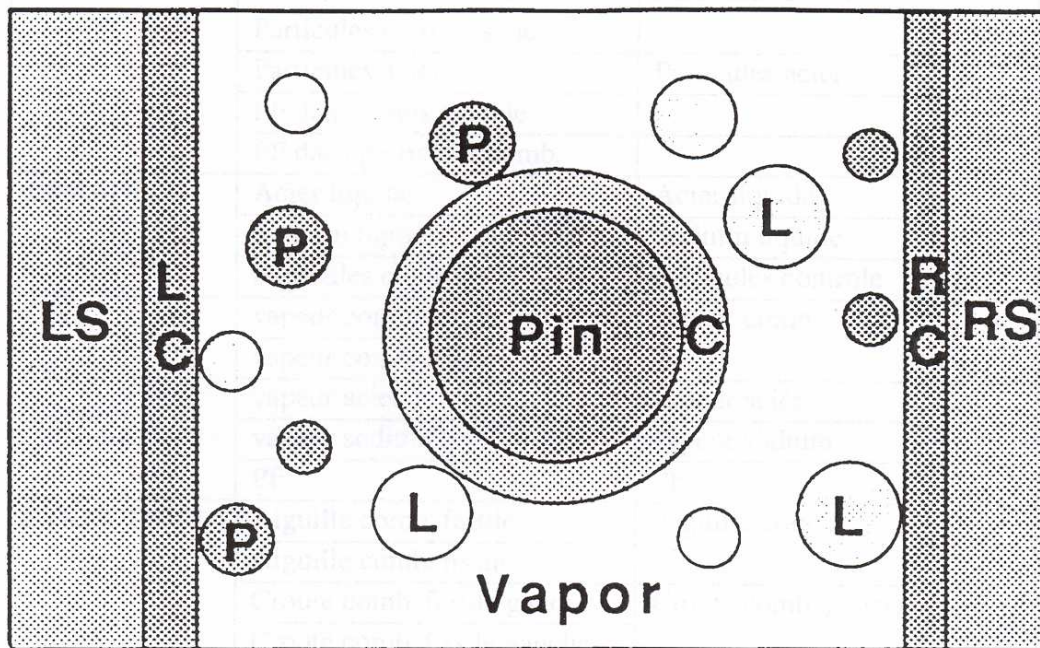


#### Exemple de géométrie Super-Phénix:



géométrie calculée (14 zones)

géométrie réelle

**SIMMER 3: schéma des composants dans une maille**

Les phases et structures traitées dans une maille sont:

Pin	combustible aiguille	LS	structure gauche
C	Gaines (cladding)	LC	croûte gauche
RS	structure droite	P	particules
RC	croûte droite	L	liquides

remarques:

- les structures sont optionnelles, pour les zones réacteur en sodium par exemple
- pour le combustible, on distingue fertile / fissile pour couplage à la neutronique

**SIMMER 3: champs et composants**

<b>champ</b>	<b>composant massique</b>	<b>composant énergétique</b>
LIQUIDE 1	Comb. fertile liquide	Comb. liquide
	Comb. fissile liquide	
	Particules comb. fertile	Particules comb.
	Particules comb. fissile	
	Particules acier	Particules acier
	PF dans comb. liquide	
PF dans particules comb.		
LIQUIDE 2	Acier liquide	Acier liquide
	Sodium liquide	Sodium liquide
	Particules contrôle	Particules contrôle
GAZ	vapeur comb. fertile	vapeur comb.
	vapeur comb. fissile	
	vapeur acier	vapeur acier
	vapeur sodium	vapeur sodium
	PF	PF
STRUCTURE	Aiguille comb. fertile	Aiguille comb.
	Aiguille comb. fissile	
	Croute comb. fertile gauche	Croute comb. gauche
	Croute comb. fissile gauche	
	Croute comb. fertile droite	Croute comb. droite
	Croute comb. fissile droite	
	Gaine	Gaine
	Surface Canwall gauche	Surface Canwall gauche
	Interieur Canwall gauche	Interieur Canwall gauche
	Surface Canwall droite	Surface Canwall droite
	Interieur Canwall droite	Interieur Canwall droite
	Barre controle	Barre controle
<b>3 eq. QdM</b>	<b>27 eq. conserv. masse</b>	<b>16 eq. d'énergie</b>

<b>3 vitesses</b>	<b>27 masses</b>	<b>16 temp. + P</b>
-------------------	------------------	---------------------

( $V_{\text{structure}} = 0$ )  
(comb. = combustible)



### **SIMMER 3: équations de base**

SIMMER 3 résout les équations de base pour tous les constituants:

masse  
quantité de mouvement (sauf structures supposées immobiles)  
énergie

⇒ ces équations font apparaître tous les termes d'échange entre chaque couple de constituants pouvant être en contact

(42 contacts possibles)

(échanges de masse, quantité de mouvement, énergie)

= 30 vaporisation/condensation et 20 fusion/solidification

SIMMER 3 résout également 9 équations de transport d'aire interfaciale (surface de contact entre deux constituants: gouttes dans liquide ou gaz, particules, bulles)

⇒ modélisation essentielle puisqu'elle fournit les 42 surfaces d'échanges binaires.

☞ **toute la 'physique' est à introduire à ce niveau**

☞ **TRES complexe, mais permet de suivre l'état des connaissances**

Le système est complété par les équations d'état (EOS)

(Elles sont modifiables par l'utilisateur, pour transformer par exemple le sodium en eau dans le calcul d'expériences simulantes)

## **Termes sources de l'équation de transport d'aire interfaciale:**

### Pour les bulles:

- nucléation
- fragmentation par Weber
- fragmentation par turbulence
- coalescence
- transfert de masse

### Pour les gouttes en écoulement dispersé:

- flashing
- fragmentation par Weber
- coalescence
- transfert de masse

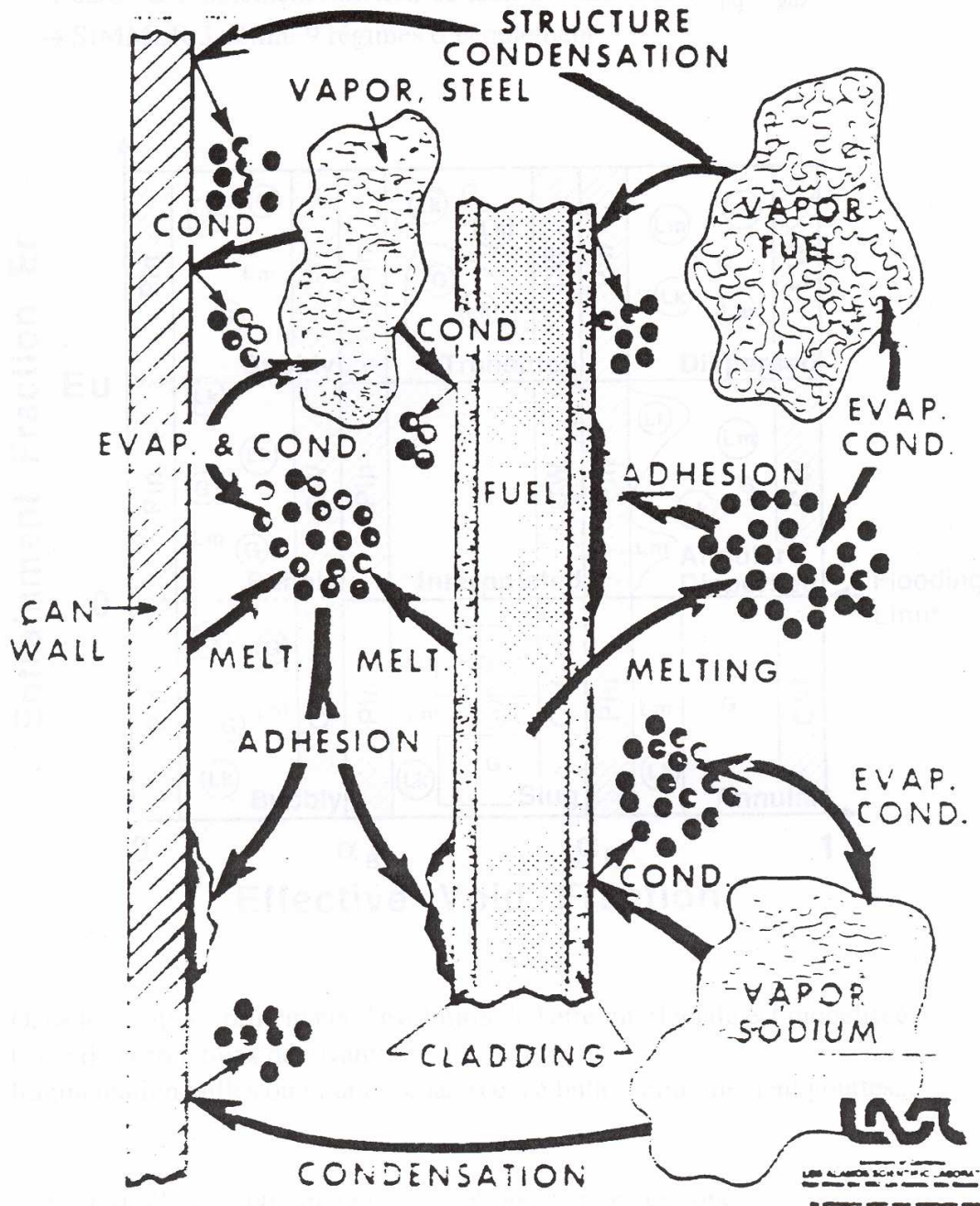
### Pour les gouttes dans un liquide continu:

- fragmentation par turbulence
- fragmentation par Weber
- coalescence
- transfert de masse

**=> 'plate forme' pour suivre l'état de l'art**

### SIMMER 3: illustration des échanges de masse à modéliser

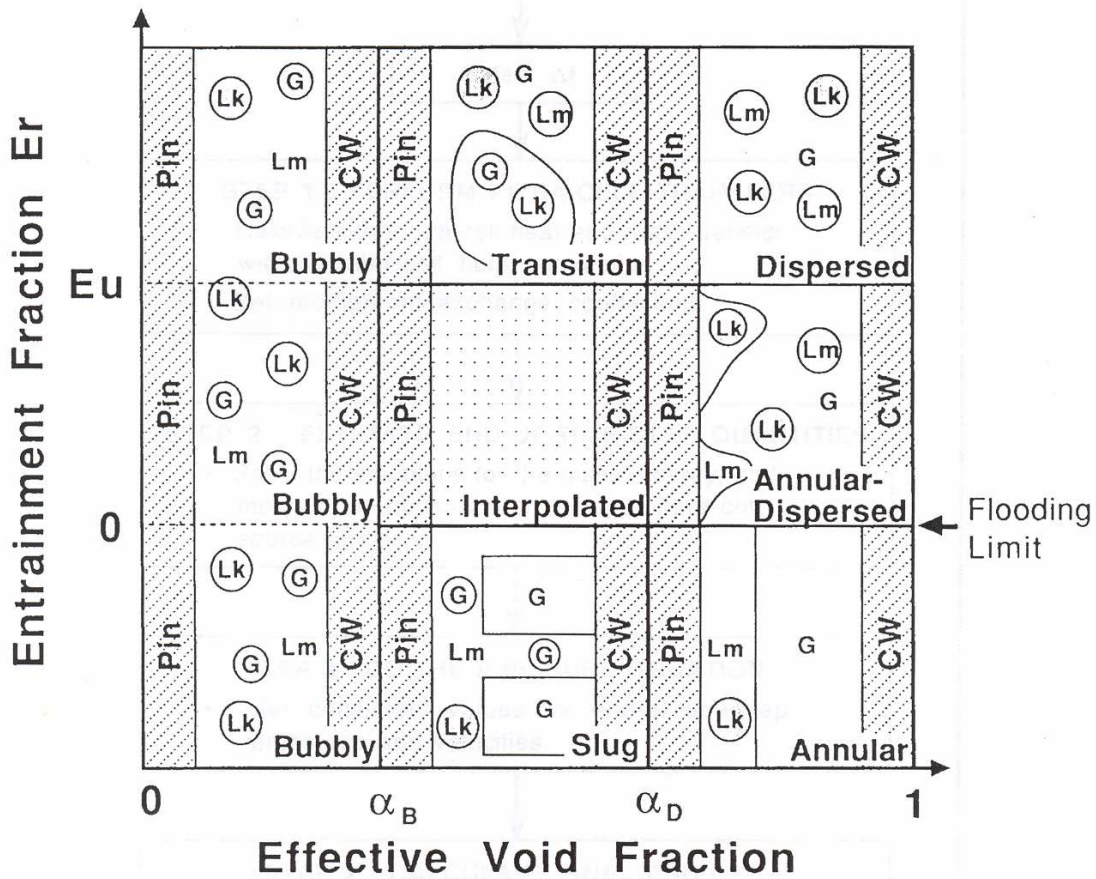
(exemple issu de SIMMER 2, avec un seul champ liquide, en phases dispersées)



### SIMMER 3: un problème clé: les régimes d'écoulement

Pour modéliser l'évolution des aires interfaciales (surfaces de contact):

- ⇒ cartes d'écoulement fonction du taux de vide et de  $(V_{liq}-V_{gaz})$
- ⇒ SIMMER 3 définit 9 régimes d'écoulement

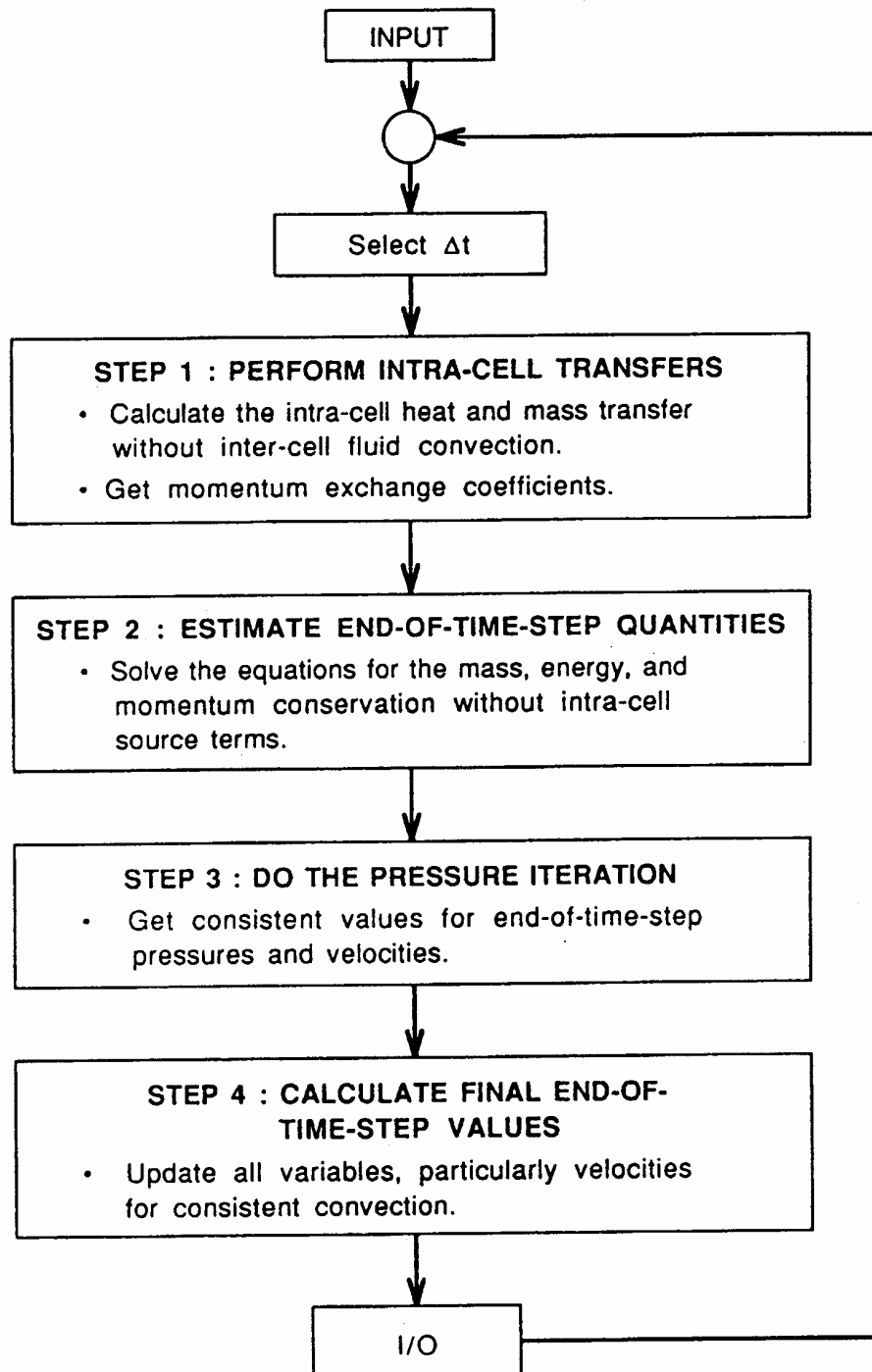


Dans les régimes principaux, l'évolution de l'aire interfaciale est modélisée à l'aide de corrélations décrivant: fragmentation bulles ou gouttes, coalescence bulles, entrainement gouttes...

+ interpolation (purement mathématique!) entre ces zones

### SIMMER 3: résolution des équations

Une méthode en 4 étapes a été développée, résumée par:



NB: tous les termes de transfert (masse, QdM, e) sont calculés au step 1 (évaporation/condensation, gel/fusion...)

### SIMMER 3: calculs

Les lois de fermeture ne peuvent être présentées ici, vu leur complexité.

#### Mais:

Ce code permet de calculer tous les phénomènes intervenant lors de la phase de transition d'un accident.

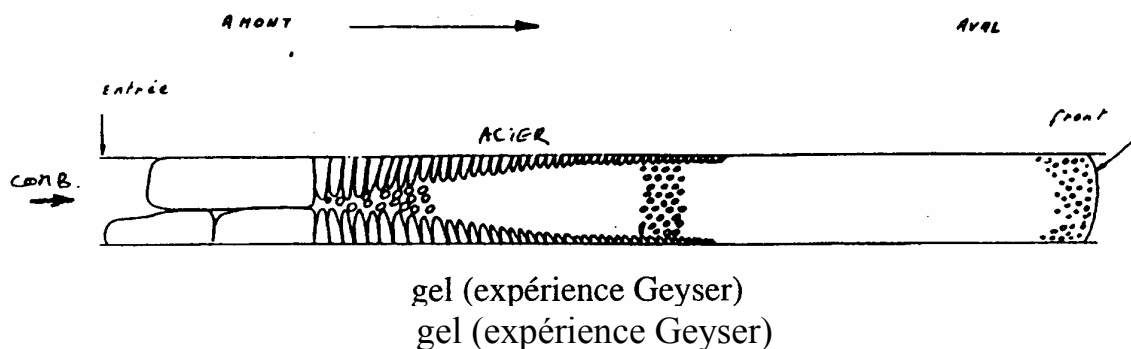
Cependant, les incertitudes restent fortes, étant donné le manque de connaissance des lois régissant:

- évolution des aires interfaciales,
- connaissance des coefficients d'échange

#### temps de calcul:

Il est très important, même sans la neutronique

(ex: calcul de gel sur 50 mailles,  $t_{\text{réel}} < 1$  seconde  $\Leftrightarrow t_{\text{calcul}} > 10$  heures)

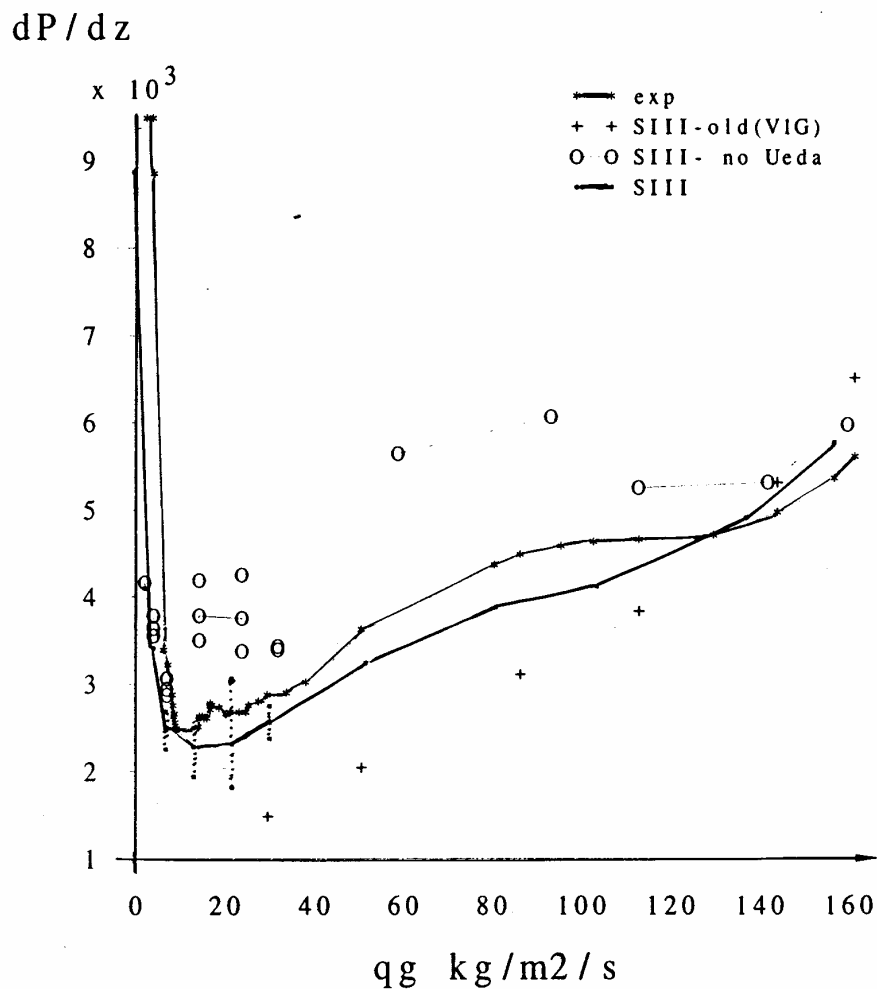


### SIMMER 3: exemples de résultats

#### Calcul expérience LOTUS

Tube vertical (23m, diamètre 31.8mm)

Écoulement eau/air (à bulles -> annulaire), température ambiante



LOTUS: gradient de pression en fonction du débit d'air - Exp./Simmer

Calcul Simmer = test de la modélisation du transport d'aire interfaciale.

La version standard de Simmer III prédit bien les différentes configurations d'écoulement selon le débit d'air.

La transition par l'écoulement à bouchon est satisfaisante (calcul oscillant).

Le débit de film liquide en écoulement annulaire est bien prédit.

### **SIMMER 3: exemples de résultats**

#### **Calcul de la phase de détente pour le réacteur CRBR avec SIMMER 2**

Démarche:

- étude paramétrique: identification des 25 paramètres les plus sensibles
- choix aléatoire de 15 combinaison de ces paramètres
  - ⇒ 15 calculs intégraux donnant une marge d'incertitude
  - ⇒ énergie cinétique suite à la détente d'une 'bulle' combustible à haute température et pression
  
- ⇒ risque potentiel / gravité accident

Comparaison avec un calcul maximum = détente isentropique

⇒ gain d'un ordre de grandeur sur le risque



## REFERENCES

1. Boulanger F. et al, 1998, 'Système ASTEC, code VULCAIN, version 7.1, note de présentation des modèles'  
Note technique CEA/DRN/DTP/SMTH/LM2/97-23
2. Renault C. - Maillat A. ,1993, 'ESCADRE mod0 General presentation and overview'.  
Note technique CEA/IPSN/DRS/SEMAR/93-46  
(including a copie of: C. Renault - A. Maillat, ESCADRE mod0 and its validation.  
CSARP Meeting, May 3-7 1993 Bethesda, Maryland, USA)
3. Boulanger F. - Bassi C., 1999, 'Validation of the Vulcain Thermal Hydraulics Code for PWR Severe Accidents'.  
A para'tre, Proc. of NURETH'9, San Francisco, CA, USA, 3-8 Octobre 99.
4. Krischer W. - Rubistein MC. The PHEBUS fission product project (PF)  
CEA - CEC. Elsevier applied science
5. Veteau JM. et al, 1986, 'Programme PERICLES, essais de renoyage à basse pression d'un assemblage complet de réacteur à eau pressurisée'.  
Note technique CEA/DRN/DTP/SETh/LES/86-5
6. Hagrman DL., 1982, 'MATPRO - Materials properties models for severe core damage analysis'.  
EG&G Idaho Inc - report EGG-CDD-5801-May 1982
7. Kim K. - Olander D., 1988, 'Dissolution of uranium dioxide by molten zircalloy. Part I & II'  
J. of Nuclear Materials, vol. 154, pp 85-115.
8. Hofmann P. et al, 1989, 'Reactor core materials interactions at very high temperatures'  
Nuclear Technology, vol. 87, pp 146-186.
9. Basque G. et al, 1994, 'Système ESCADRE, code VULCAIN, version 6.2, dossier de cas tests'  
Note technique CEA/DRN/DTP/STR/LML/94-263
10. Gonzalez et al, 1993, 'Status of ICARE2 V2 code and overview of its validation'  
NURETH6, October 5-8 1993, Grenoble, France
11. Waltar A. - Reynolds A., 'Fast breeder reactors'  
Pergamon Press Ed. 1981
12. Kondo S. et al, 1992, 'Simmer III, an advanced computer program for LMFBR severe accident analysis'  
Proc. of the int. conf. ANP'92, Vol 4, pp40.
13. Coste P. - Tobita Y., 1998, 'Two phase channel flow modelling of Simmer III'  
Proc. of the ICMF'98, Lyon, 8-12 Juin 1998.
14. Lee Y., 1998, 'SCDAP/RELAP5/mod 3.2 - Code manual'  
US NRC Report NUREG/CR-6150.