

LES CODES D'ACCIDENTS GRAVES: DEGRADATION DU COEUR

Gilles RATEL
CEA/ Grenoble
Département de Technologies Nucléaires
Service d'études Thermohydrauliques et
Technologiques

plan

- **LES REACTEURS A EAU PRESSURISEE (REP)**
 - **SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES**
 - **UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN**
 - physique de dégradation du cœur
 - exemple de calcul
 - **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**

REP : SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES

Suppose des défaillances multiples et en séquence des systèmes de sauvegarde

- **Exemple de scénario haute pression: TMLB**

1. pertes des alimentations électriques \Rightarrow Arrêt d'urgence
arrêt des pompes primaires et secondaires
2. perte alimentation de secours secondaires
perte de la source froide = secondaires des générateurs de vapeur
(GV)

puissance résiduelle évacuée par vaporisation de l'eau \Rightarrow La vapeur est évacuée par la soupape pressuriseur, le circuit reste en pression à 170bar.

dénoyage du cœur, circuit primaire monophasique vapeur (eau + H₂)

si pas d'action corrective (retour d'eau) conduit à la fusion du cœur

Synthèse

- **Accident graves : Suppose des défaillances multiples et en séquence des systèmes de sauvegarde.**
- **REP : cinétique lente (unité : 1h). Thermohydraulique OK mais**
 - **REP = physicochimie joue un rôle => couplage lent mais « puissant ».**
 - **Ex : oxydation Puissance ↑, dissolution Tfusion ↓**
- **Phénomènes à haute température avec des masses importantes.**
 - **Expérience difficile à cause de la température et des masses**
 1. **=>phénomène à décrire sont difficiles à connaître avec précision ... Donc on a écrit des « logiciels scénario », rapides, permettant de décrire un scénario complet (rapidement) et pouvant être (étant) couplés à une approche probabiliste.**
 2. **=> Effets de taille (x10,x100,x1000). Donc on a écrit des Codes mécanistes qui à partir des équations de la mécanique des fluides sur des maillages (donc en local avec des moyennes) vont décrire un (des) phénomène(s) (plus ou moins) complètement.**
- **RNR: cinétique rapide (unité : 1s).**
 - **RNR la clef Couplage thermohydraulique - neutronique . Donc on a écrit SIMMER, Code mécaniste avec module thermohydraulique - neutronique permettant de décrire de nombreux constituants.**
 - **Les remarques 1 et 2 restent exactes.**

REP : SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES

- **Exemple de scénario basse pression: AF**
 1. 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 + H₂)
si pas d'action (retour d'eau) conduit à la fusion du coeur

REP : SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES

- **Évolution 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 H₂, recombinaison des matériaux fondus...)
- formation d'un bain de corium liquide dans le cœur (U-Zr-O-AlC-Fe...)
- coulée du bain vers le fond de cuve, rupture cuve?

REP : SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES

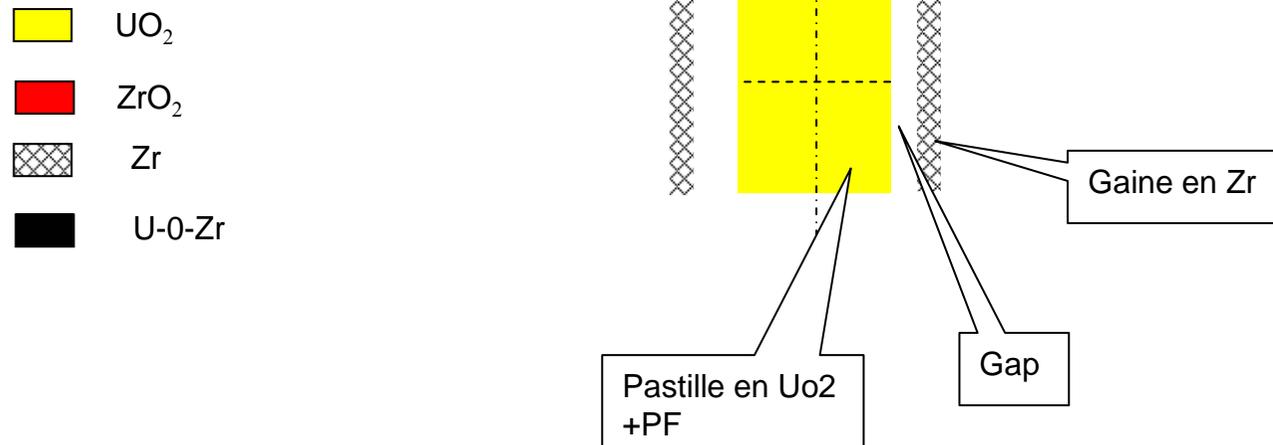
- **Contexte accidents graves REP:**
 - cinétique lente (>1 heure) car puissance résiduelle faible et risques limités d'explosions
 - neutronique simple (puissance = f(temps,masse))
- **But modélisation:**
 - prédire cinétique (quand le corium rompt-il la cuve?)
 - influence des actions correctives (par exemple: influence d'un renoyage)

REP : Modélisation des accidents graves

- **Difficultés pour modélisation:**
 - grand nombre de phénomènes à traiter, ces phénomènes sont couplés (donc interagissent les uns sur les autres)
 - géométrie du cœur variable (assemblages, débris, bain...)
 - phénomènes multiphasiques (solide - liquide - gaz) avec des échelles très grandes

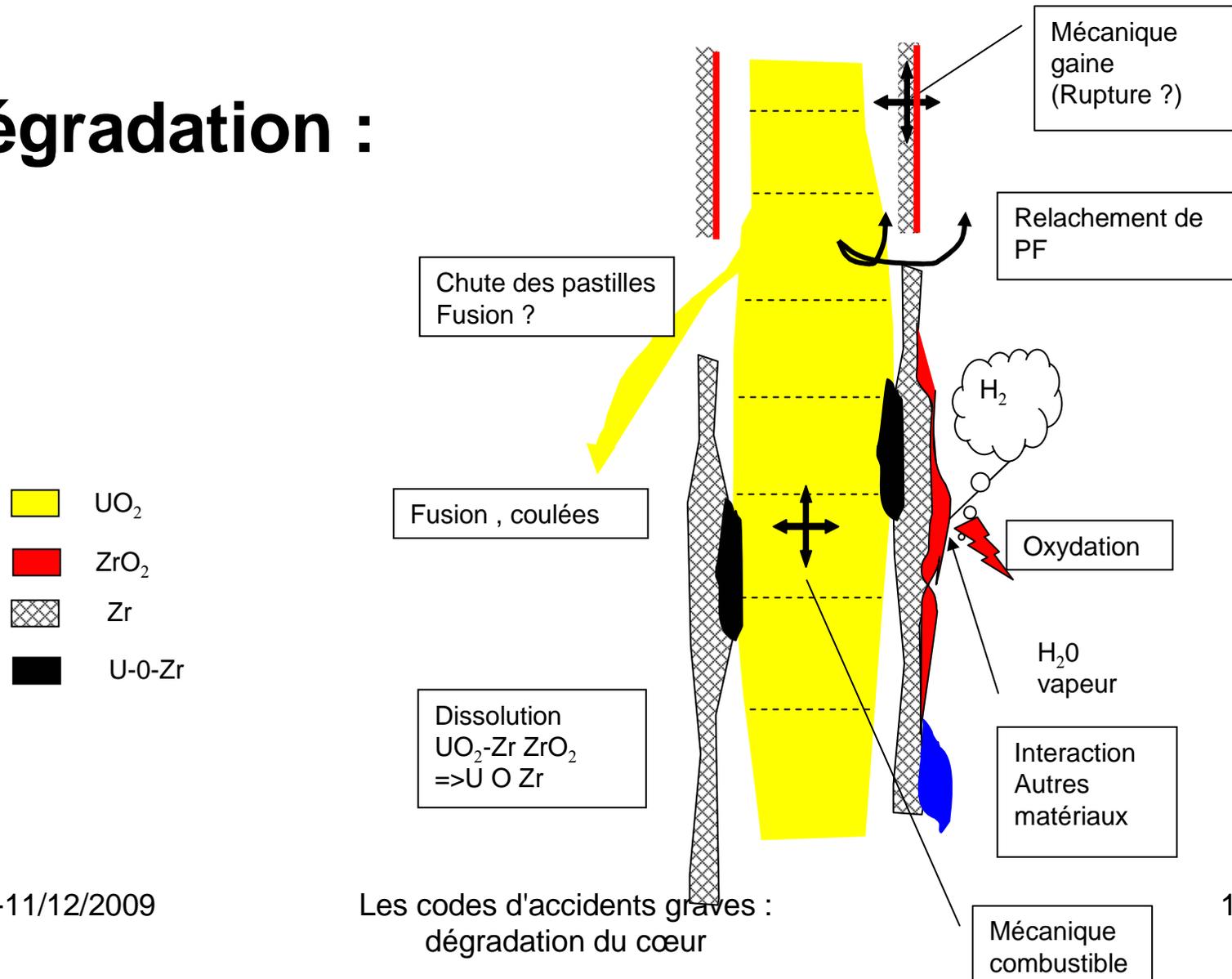
REP : Modélisation des accidents graves exemple de la dégradation d'un crayon

- **État initial :**



REP : Modélisation des accidents graves exemple de la dégradation d'un crayon

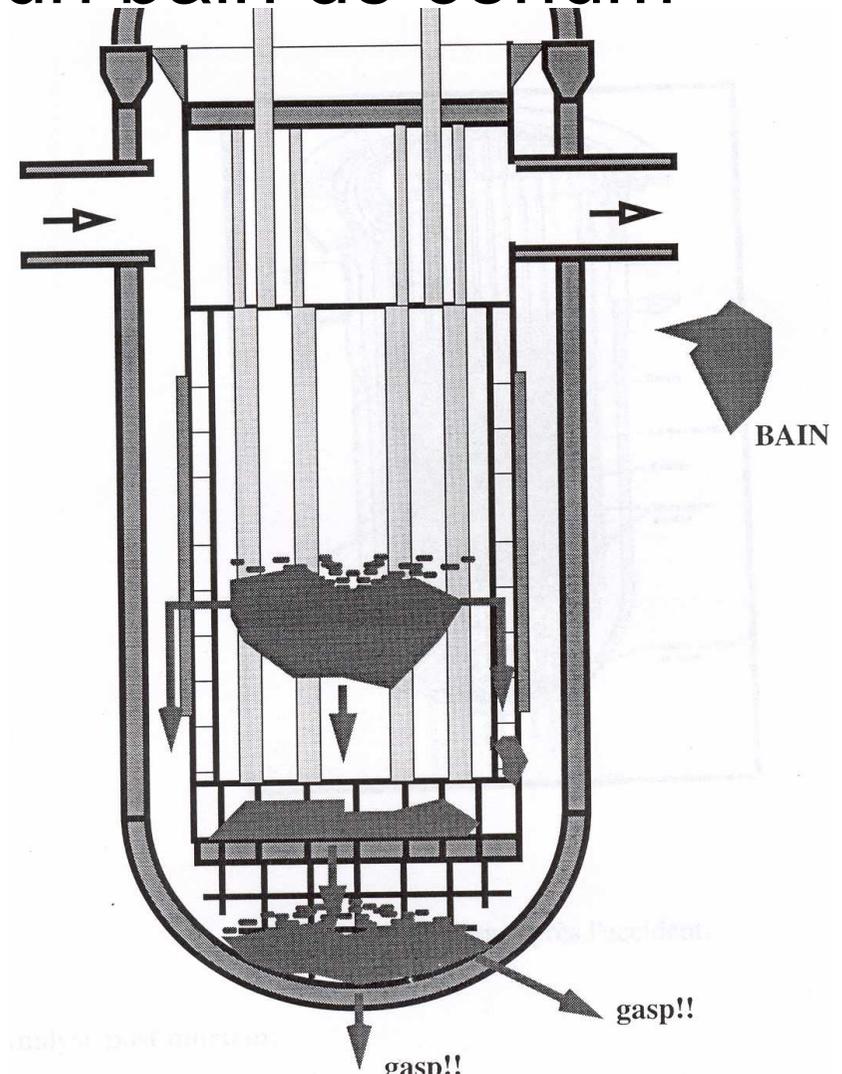
- **dégradation :**



REP : Modélisation des accidents graves

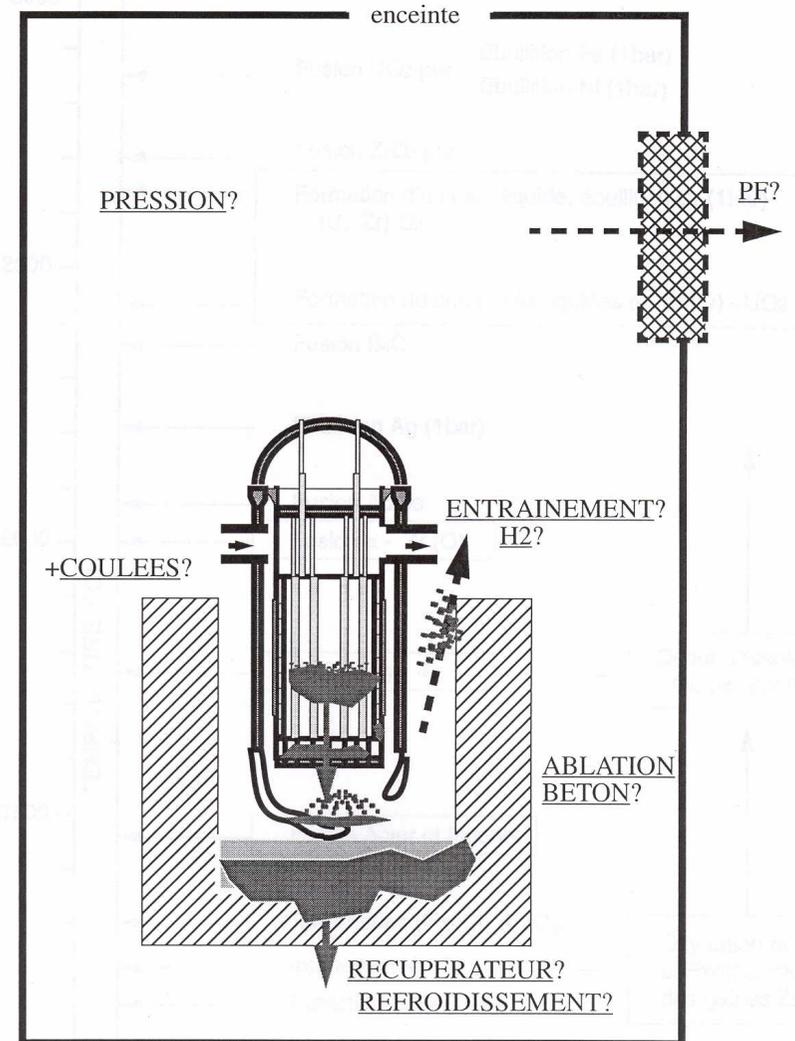
exemple de l'évolution d'un bain de corium

- **Dégradation avancée :**
 - 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...)



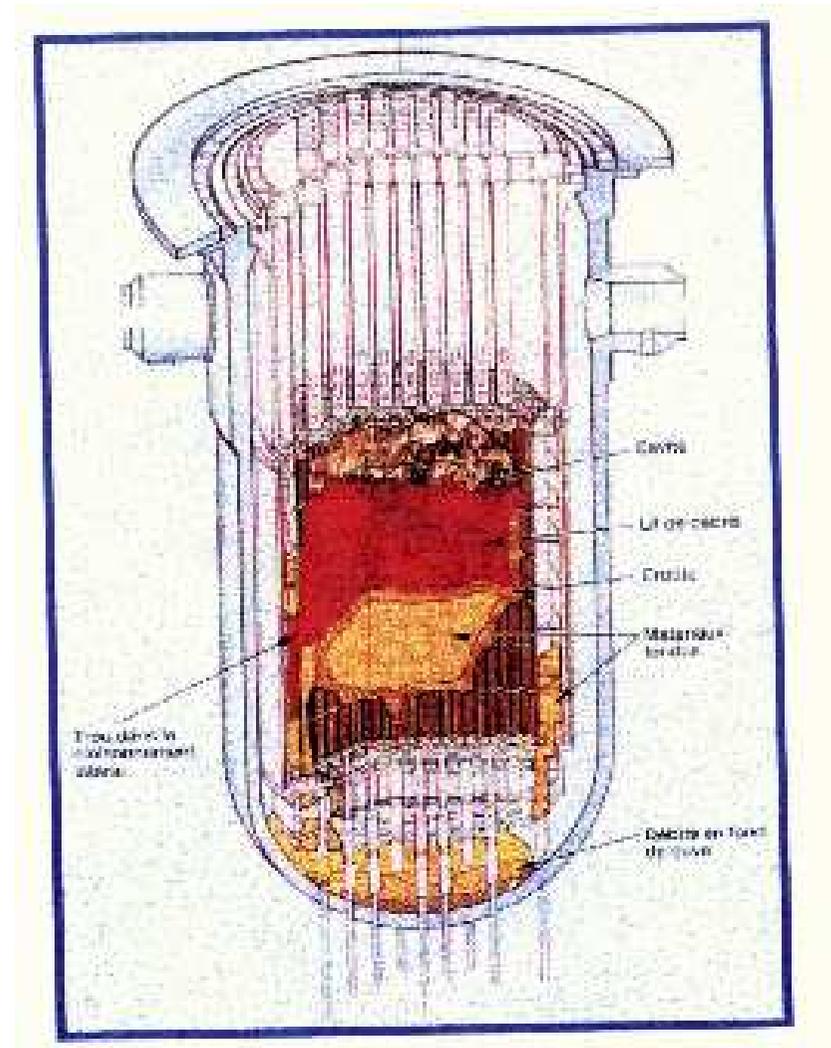
REP : Modélisation des accidents graves problématique hors cuve

- **Dégradation hors cuve :**
 - Explosion de vapeur thermique et dynamique d'un bain
 - Intecaction corium béton
 - DCH
 - Risque H2



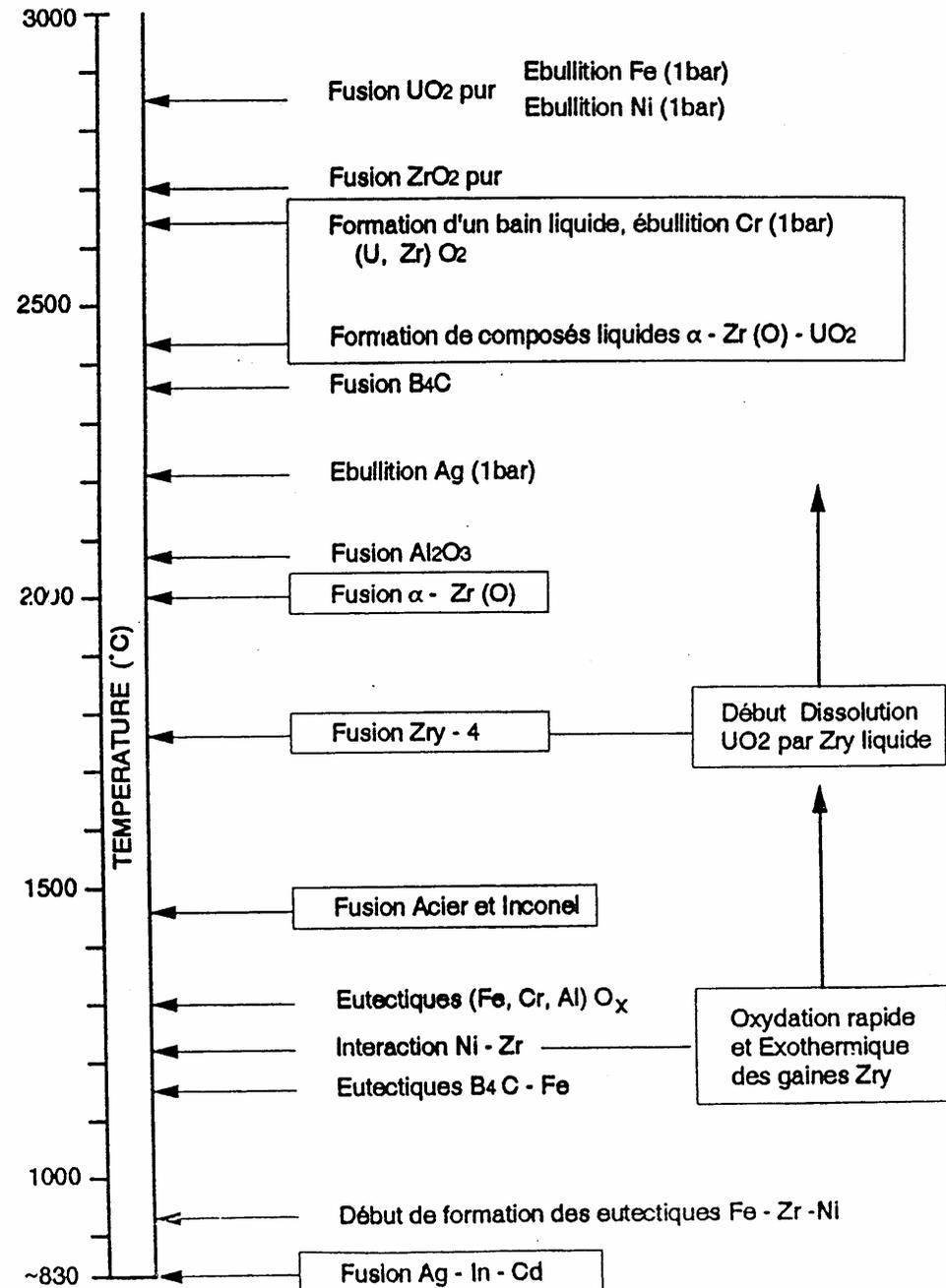
REP : ACCIDENT DE Three Mile Island (USA, 1979)

- 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.



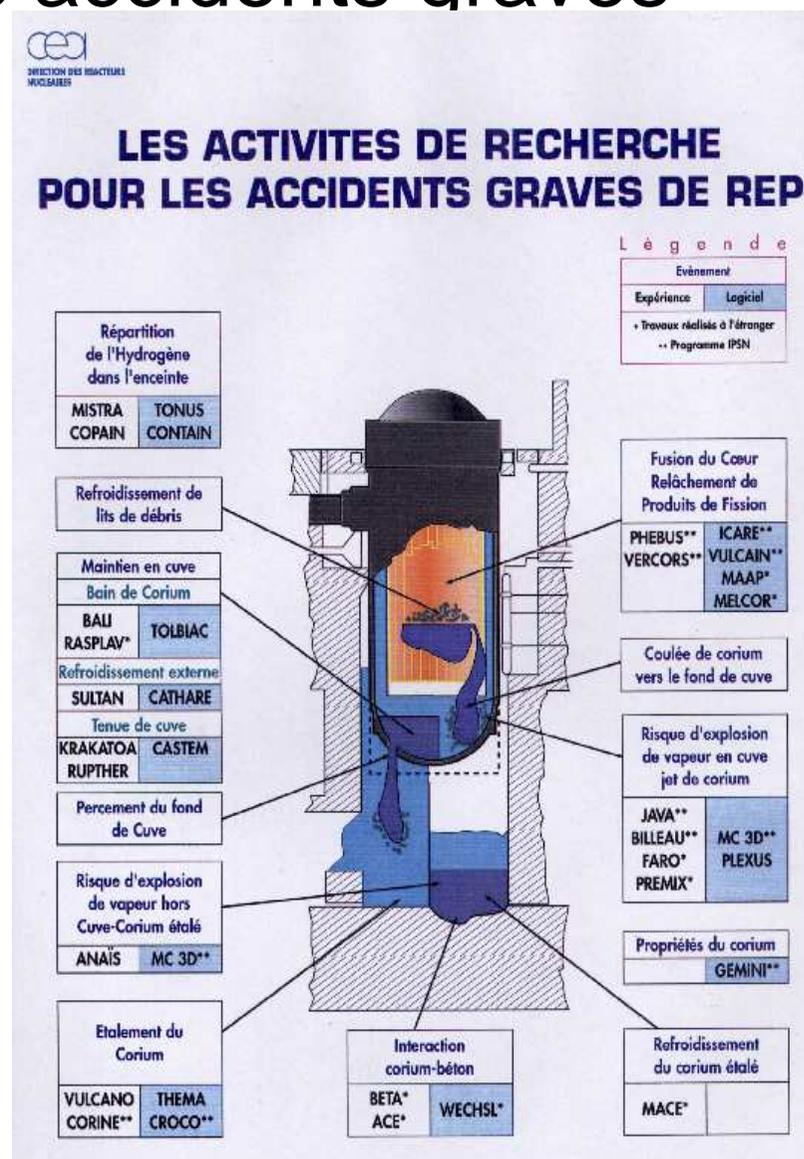
REP : échelle de température

- Une échelle de température très étendue marquée par
 - des fusions,
 - des ébullitions
 - des « emballement de réactions
 - des dissolutions (interaction)



REP : Modélisation des accidents graves

- La prise en compte de ces phénomènes est importantes :
 - Exemple :
 - Dissolution UO₂Zr (mélange ternaire)
 - Sans : UO₂ fond à 3100K
 - Avec on peut trouver UO₂ fondu à partir de 2100K
 - Mode de relocalisation (en chandelle ,par création d'un bain)
 - En chandelle alimentation progressive du fond de cuve
 - Avec bain coulée du bain en fond de cuve
- Détermine deux approches pour les logiciels
 - **Approche mécaniste :**
 - Étude de phénomène spécifique (MC3D, TOLBIAC,...)
 - Étude du scénario complet (ICARE) mais sans critère de temps de calcul
 - **Approche code scénario**
 - Étude du scénario complet avec des temps calculs courts
 - Compromis sur la modélisation / rapidité des calculs



REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **Il y a plusieurs codes de scénario accidents graves,**
 - Vulcain (première génération), ASTEC V1, ASTECV2 (deuxième génération)
 - MAAP 3 ... 4
 - Melcor ...

Mais ils partagent les mêmes objectifs et les difficultés de la modélisation et de la qualification => Quelques phénomènes clefs dans Vulcain

- **Code développé par DRN/DTP pour l'IPSN (IRSN) depuis 1985.**
- **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 (tcalcul << tréel)
 - 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 (IPSN)

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **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 (H₂O+H₂) dans le circuit primaire
- Les conditions initiales (pression, niveaux...) sont fournies par le calcul de la phase initiale du scénario (CATHARE par exemple).
 - ASTEC intègre un outil qui permet de calculer les phases initiales (CESAR) mais qui n'est utilisé que pour les instants initiaux dans la dégradation du cœur (mais calcule le reste du circuit en th.diphase).
 - Thermohydraulique 2φ du circuit peut redevenir importante retour d'eau //GV // bouchon d'eau.
 - Thermohydraulique 2φ du cœur importante pour le dénoyage et le renoyage.

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **Géométrie modélisée, maillage:**
 - Fortes Disparités axiale et radiale=>maillage 2D
- **Importance des propriétés physiques**

Gestion des matériaux: UO₂, Zr, ZrO₂, A-I-C, B₄C, Acier

Masse, enthalpie

surfaces d'échanges

concentration des sous-matériaux

produits de fission

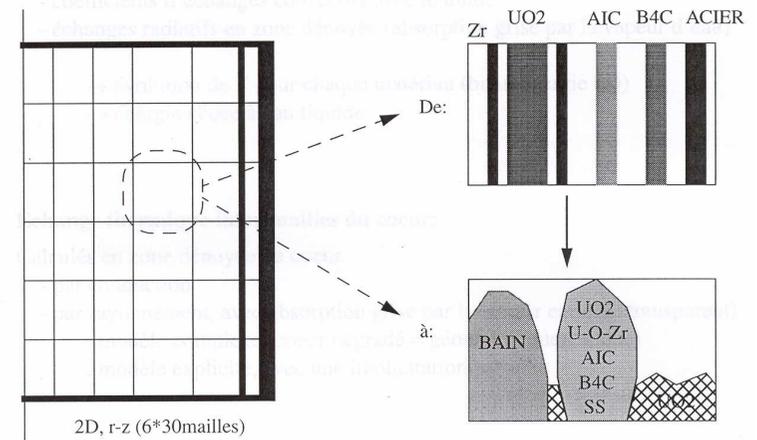
sont gérés par matériau, par maille et lors des mouvements (« par décret » /code mécaniste)

Propriétés physiques: Cp, ρ, T_{fusion}, L...

issues de MATPRO (réf.6), f(temp.),

Attention aux Interactions à forte

température : exemple UOZr



REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **Échanges 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
- **Échanges thermiques 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 implication partielle
 - Modèle nécessaire

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **Oxydation du Zr : $\text{Zr} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2 \text{H}_2$**
- ☞ **exothermique** (emballement réaction) avec production d'hydrogène.
 - calcul de la réaction en fonction de la surface de contact Zr / eau et couche intermédiaire de 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.
- Cinétique étudiés pour des géométries crayons....,
- mais Comment un bain de corium (3000K) s'oxyde-t-il (cinétique) ? Idem débris très chauds, renoyés

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **Dissolution de UO₂ et ZrO₂ par Zr**

Si Zr liquide en contact avec UO₂ ou ZrO₂
dissolution avec formation d'un matériau ternaire
U-O-Zr

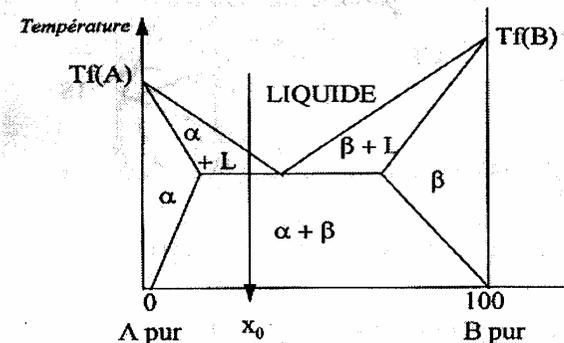
- modèle basé sur travaux de Kim&Olander et Hofmann

- **Matériau ternaire U-O-Zr**

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

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

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



REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

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

Dans une maille, si un matériau est 100% fondu

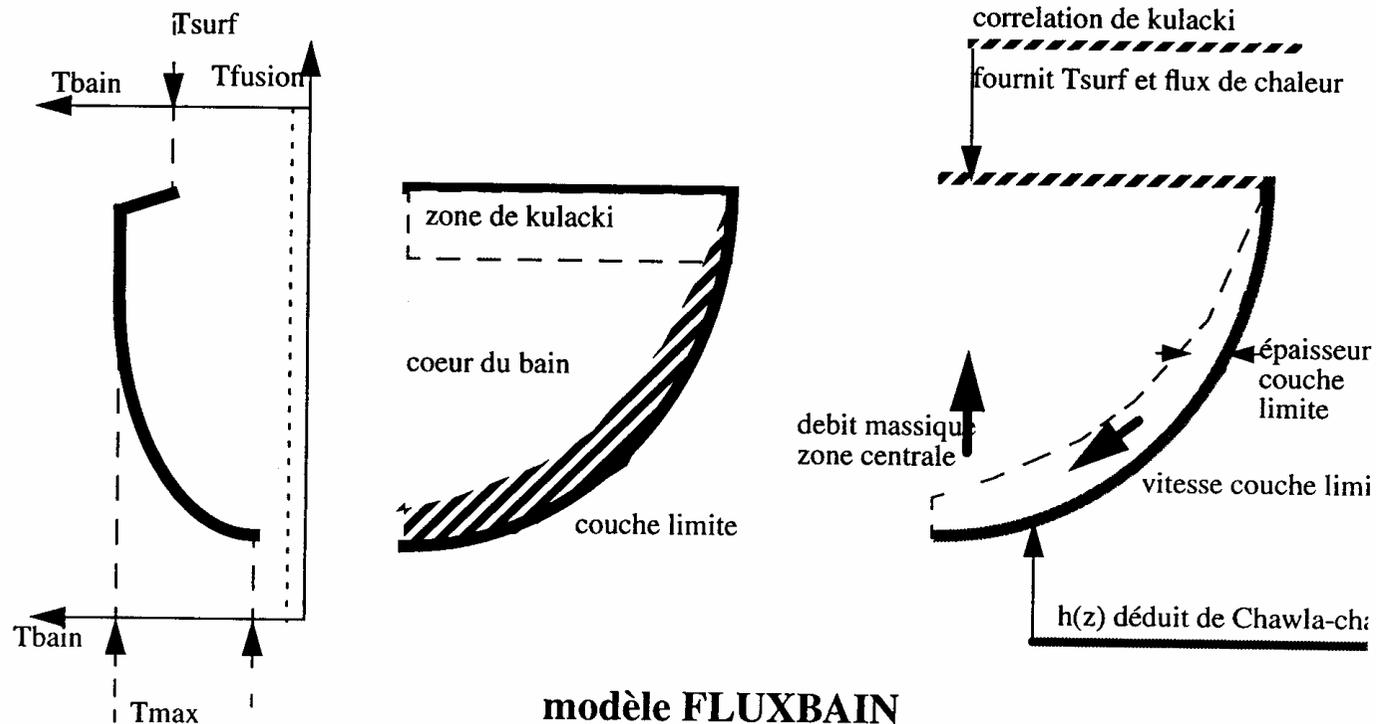
- coulée en « bougie »,
- chute verticale intégrale jusqu'à une maille suffisamment froide ou pleine, sans échange thermique.

- **Écroulements de pastilles UO₂:**

- Si les pastilles UO₂ ne sont plus maintenues (gainés Zr fondues...): chute verticale sous forme de débris UO₂.
- gestion des mouvements verticaux discontinus, sans échanges thermiques (pas de coulées continues, ni d'étalement)

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- bain de corium dans le cœur
- Transposition des études sur des bains en cuve



REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **bain de corium dans le cœur**

Si matériaux 100% liquides dans une maille pleine:

hypothèse de bain de composition homogène (UOZr + AIC + B4C + 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

- Flux de chaleur = $h(Z) \cdot s \cdot (T_{\text{bain}} - T_{\text{liquidus}})$

- Flux maximum en haut du bain. C'est le bain de corium qui répartit la puissance et donc gère son évolution et donc sa progression.

- par coulées gravitaires et étalement (modèles très simplifiés)

- Difficultés liés au maillage et à la **géométrie quelconque de bain**

- couplage avec le reste du cœur par échanges thermiques

- coulées du bain:

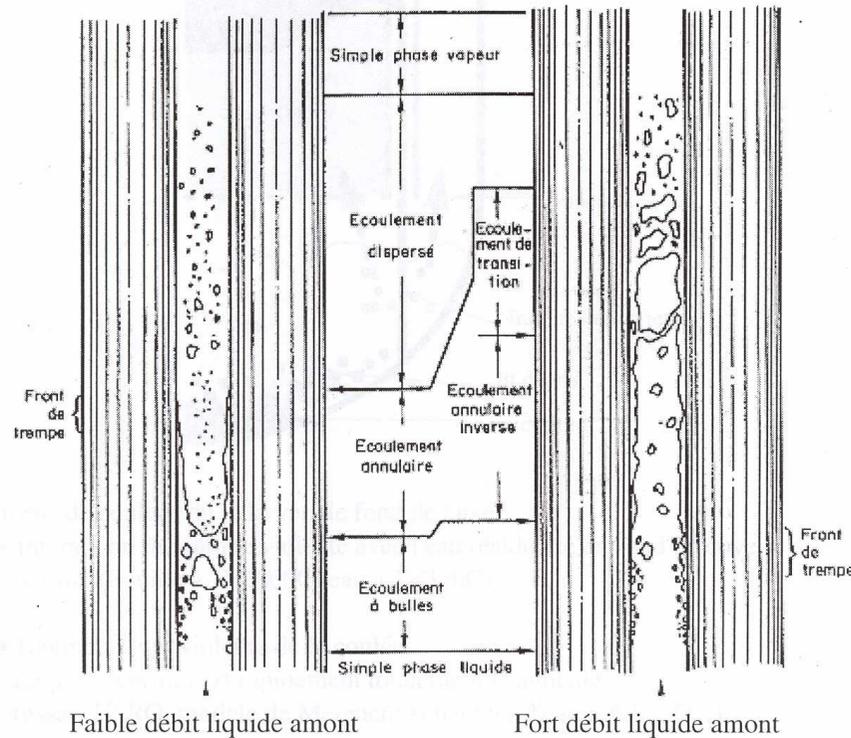
- latéralement quand le bain atteint les structures périphériques du cœur

- par le bas (chute du cœur) quand le bain atteint la plaque support cœur

☞ **Évolution du bain et coulées vers le fond de cuve**

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **renoyage du cœur**



REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: 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

On obtient un coefficient d'échange équivalent

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) et sur les essais QUENCH (FZK) : T jusqu'à 2000 C

Modèle étendu au renoyage de bains (sans qualification)

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: VULCAIN

- **fragmentation des coulées de corium / eau**

Par comparaison à MC3D code mécaniste

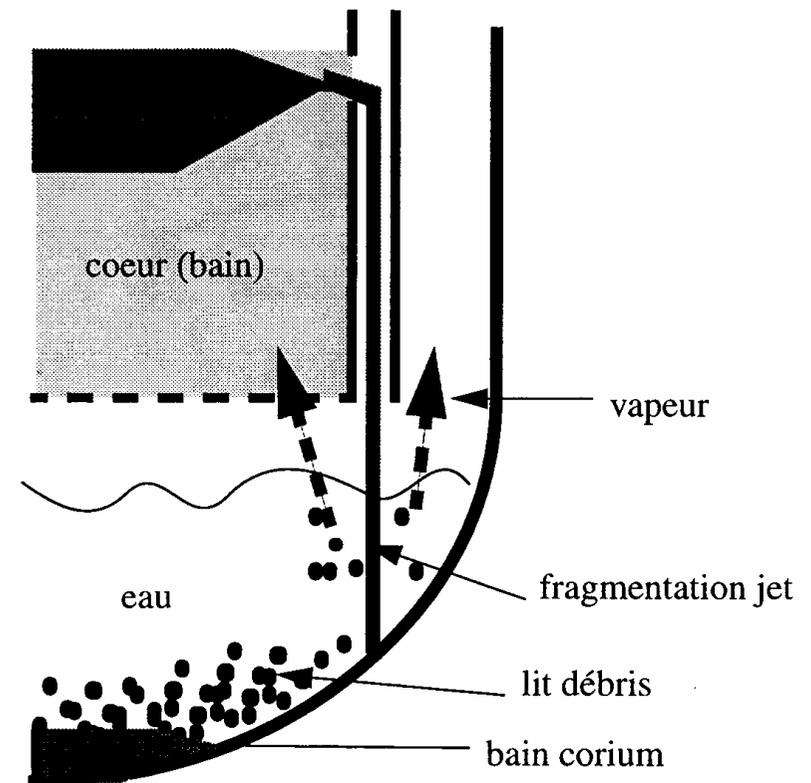
En cas de coulées du bain vers le fond de cuve, interaction thermique violente avec l'eau résiduelle en fond de cuve (corium liquide à $T > 2800\text{C}$, eau à $T < 350\text{C}$) fragmentation violente de la coulée. Le jet de corium est rapidement totalement fragmenté

- $L_{\text{jet}} = 5 \cdot V_{\text{jet}} \cdot D_{\text{jet}}$ (Meignen_essai FARO)

- Diamètre des particules de corium : 3mm

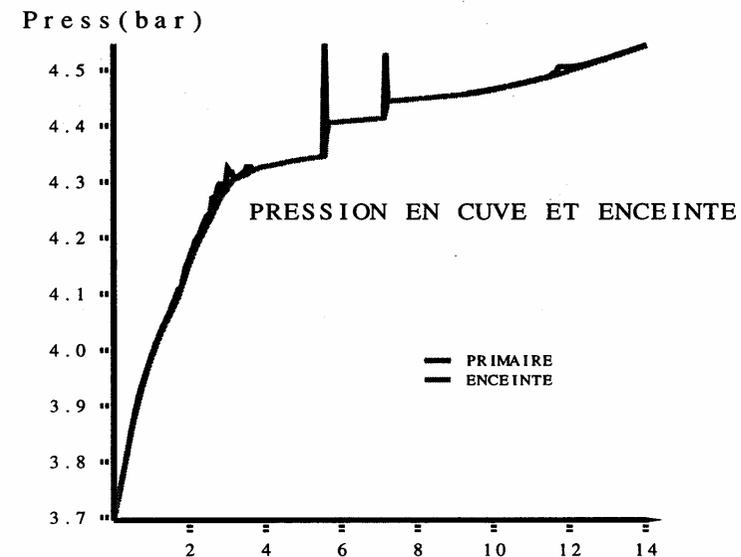
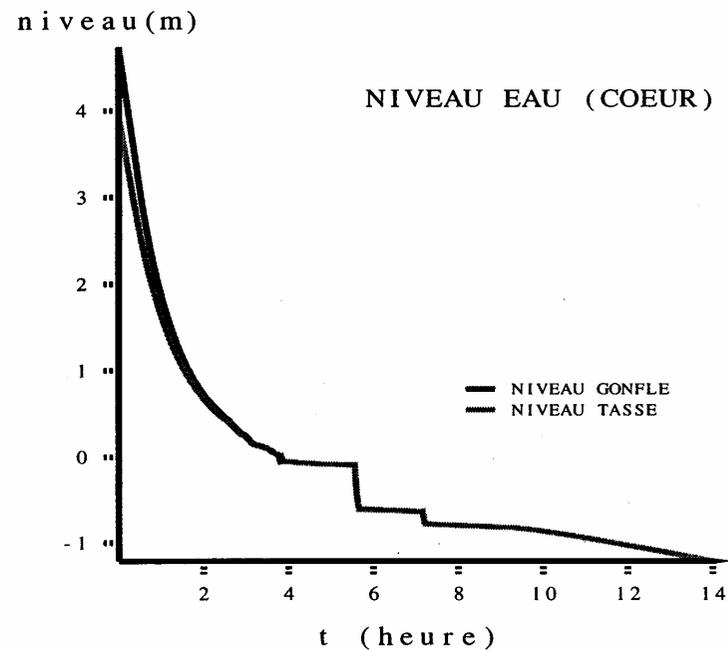
⇒ très grande surface d'échange, une production de vapeur très intense, Pic de pression primaire, risque mécanique

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

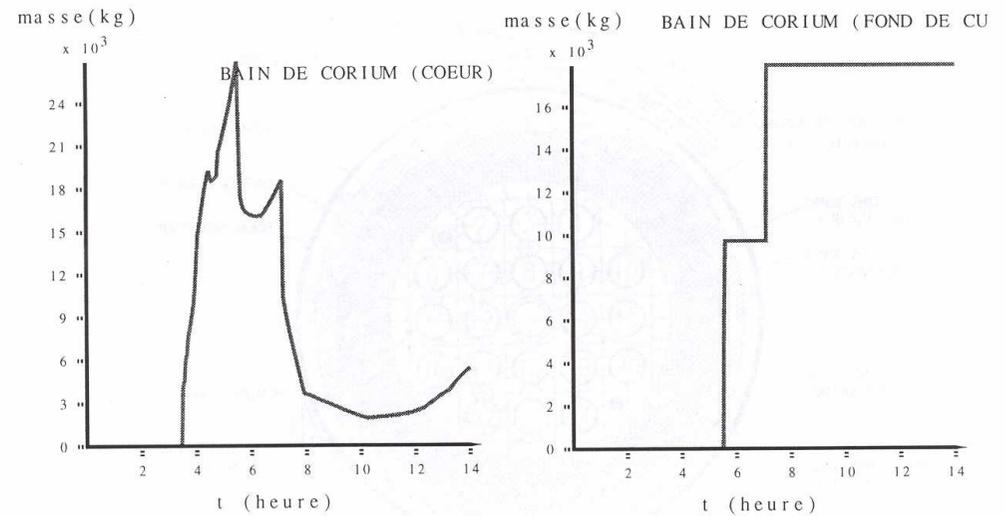
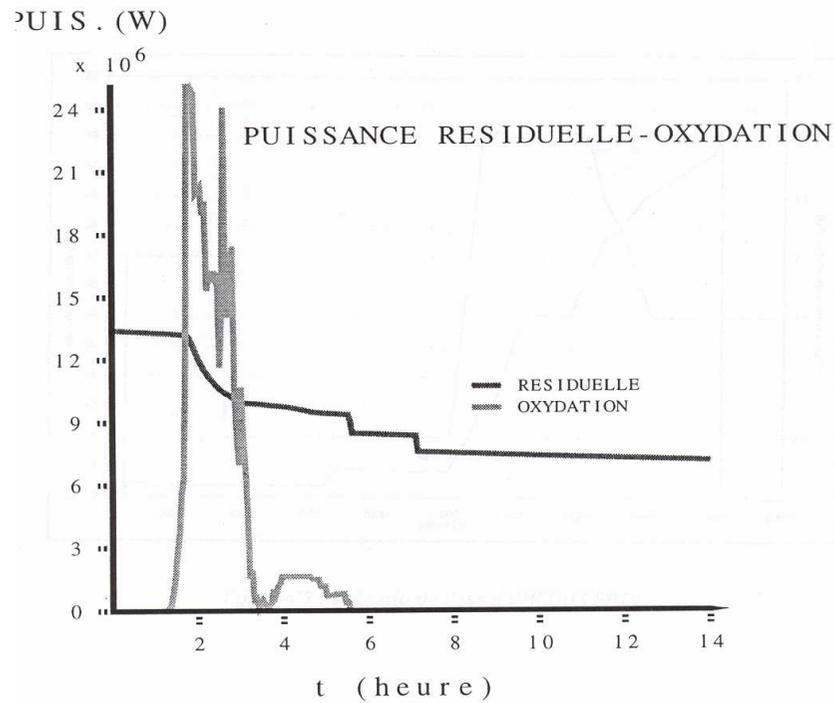
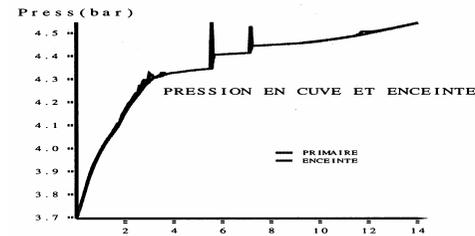
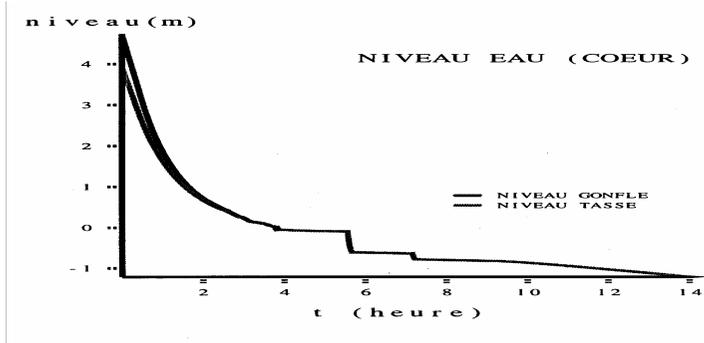


REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL VULCAIN

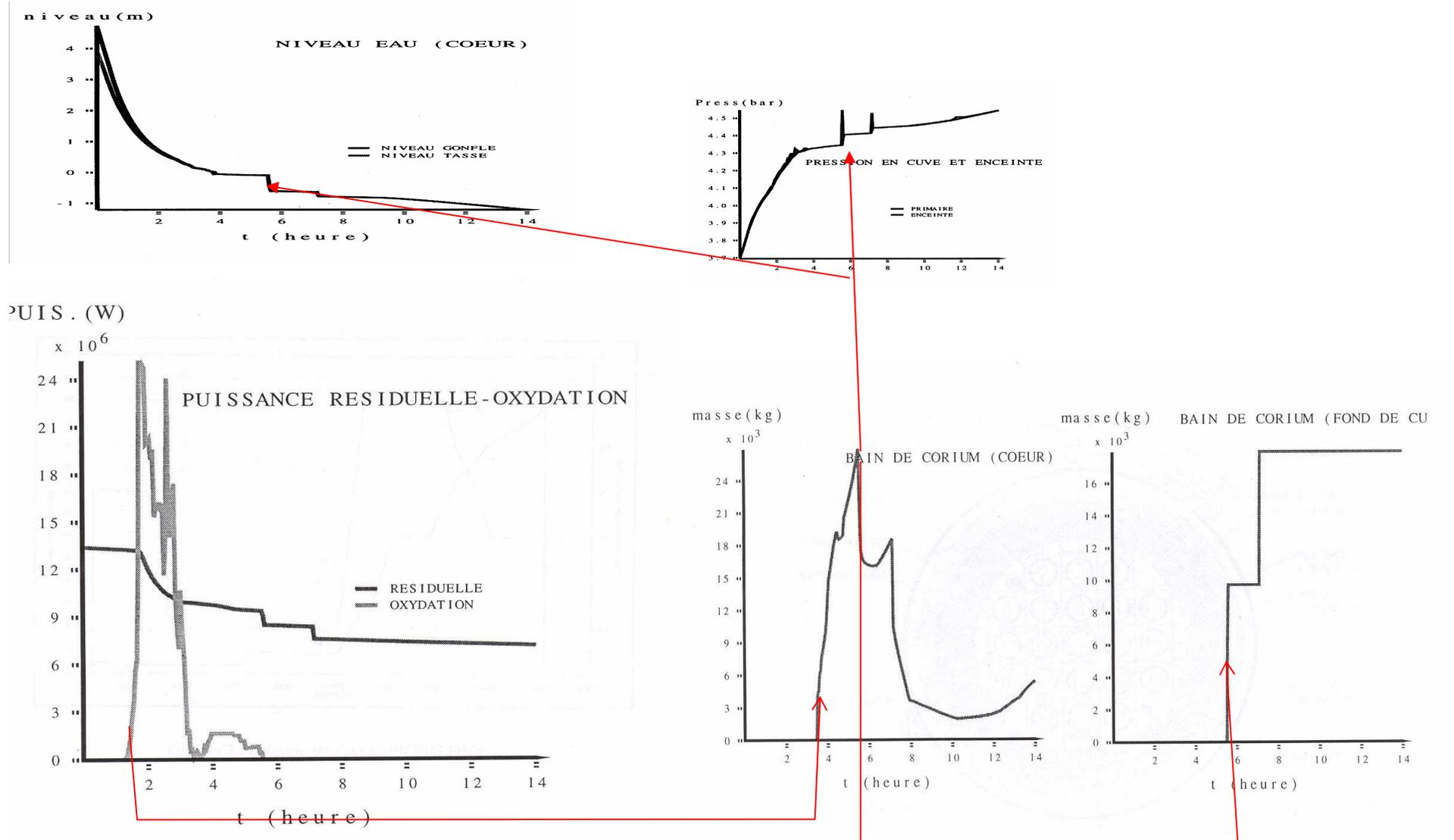
- **scénario AF** : grosse brèche sur circuit primaire + défaillance des circuits



REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL VULCAIN



REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL VULCAIN



INSTN 7-11/12/2009

Les codes d'accidents graves :
dégradation du cœur

30

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL VULCAIN

CALCUL de qualification PHEBUS FPT0

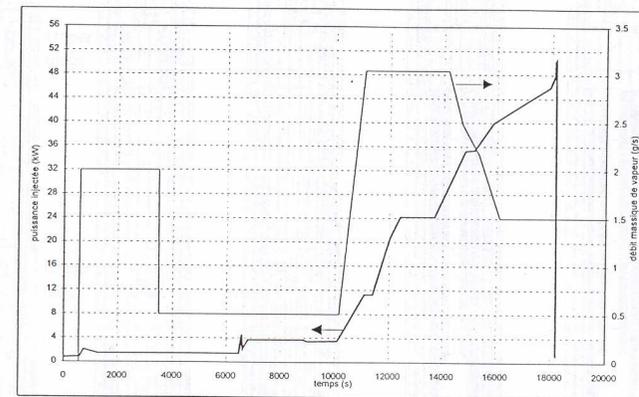
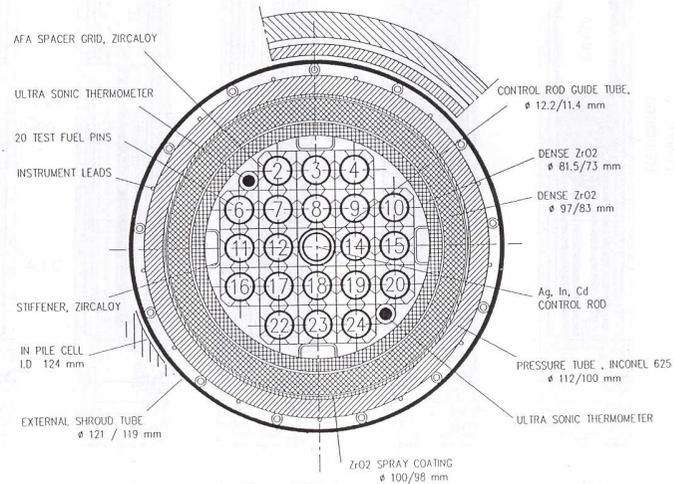
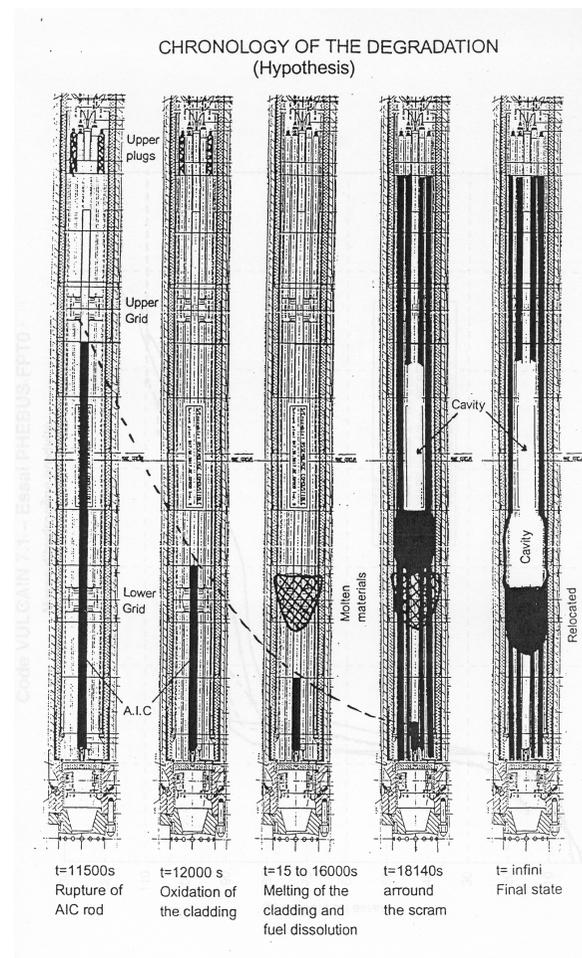


figure n°2 : scénario de l'essai PHEBUS FPT0

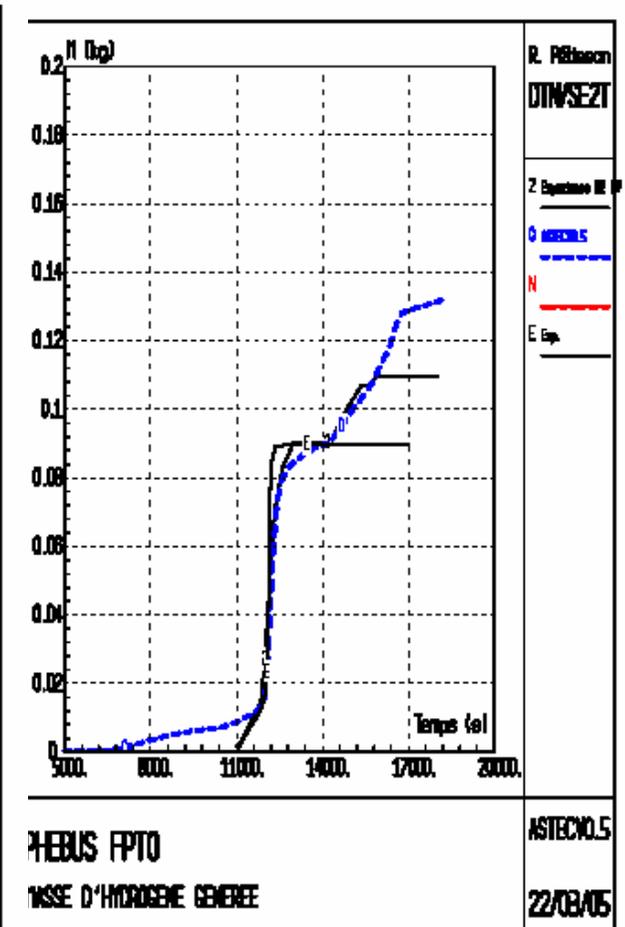
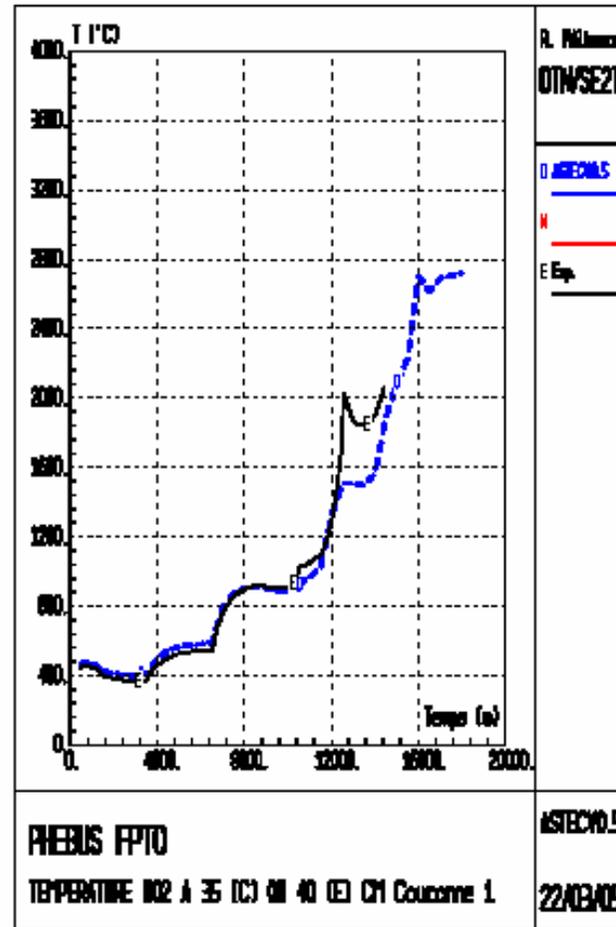
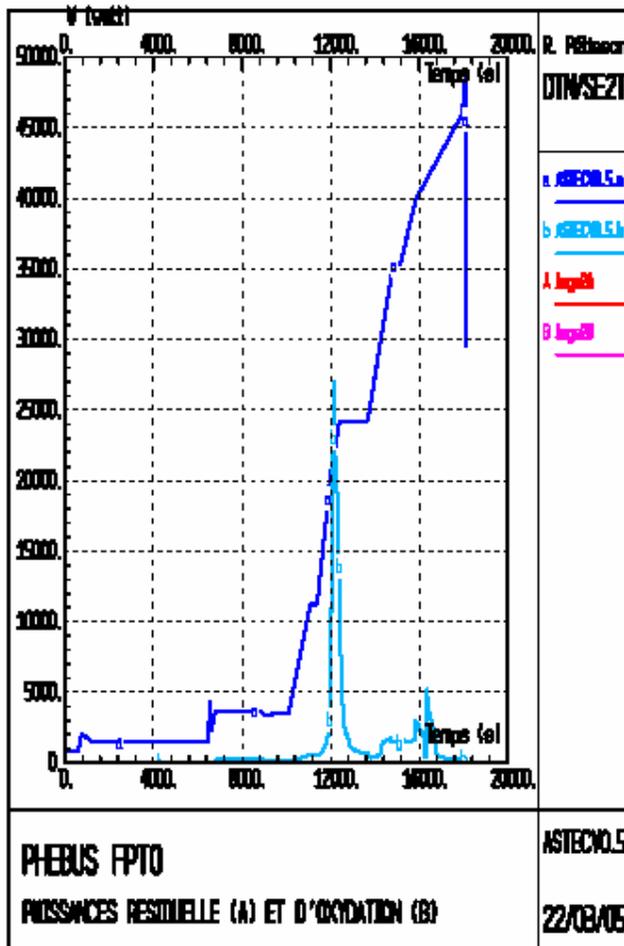
REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL VULCAIN

CALCUL de qualification PHEBUS FPT0



REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL VULCAIN

CALCUL de qualification PHEBUS FPT0

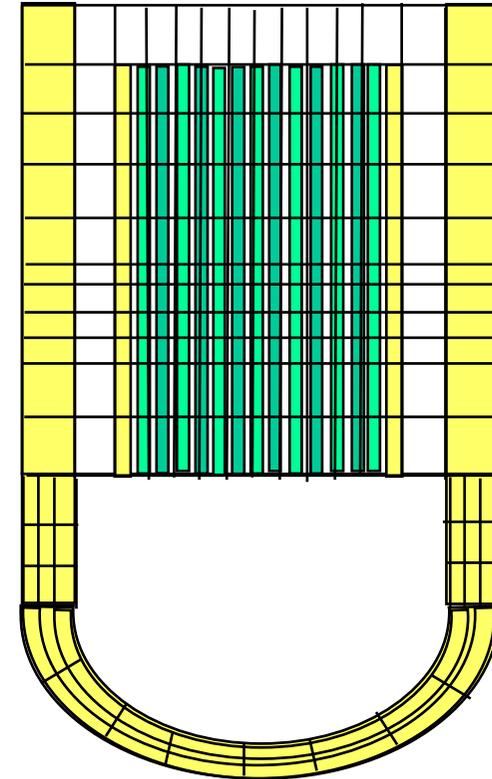


REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: ASTEC

- Les principaux changements :
 - 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 + H₂))
 - 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 H₂, 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

REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: ASTEC

- Les principaux changements :
 - 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

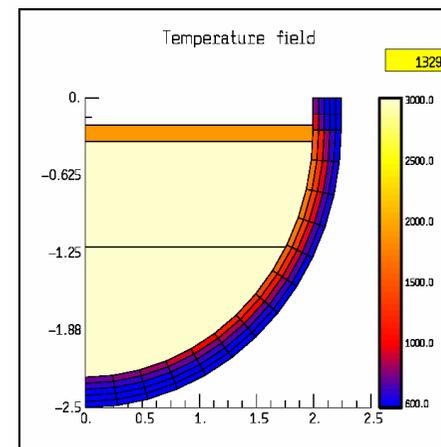
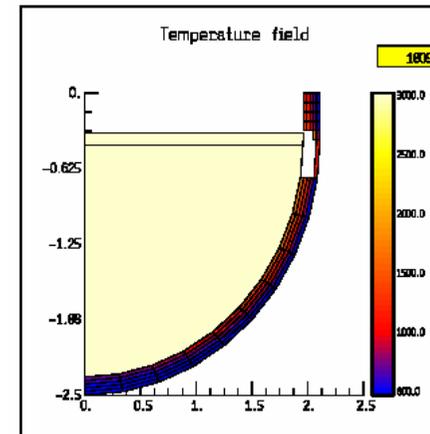


REP : UN EXEMPLE DE CODE GLOBAL: ASTEC

- Apports de la R&D : physico-chimie dans le traitement du corium en fond de cuve.

En fond de cuve, lacune de miscibilité => dissociation $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ et Acier Zr non oxydé

 - Le mélange d'Oxyde est plus lourd que les métaux
 - Donc on met les oxydes au fond (dissipation de la puissance) et les métaux au dessus. Si la masse de métal est faible, il y a un risque de «focussing effect» et de percement de la cuve
- Essai Masca : dissociation $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ -et Acier U et Zr
 - Le mélange d'Oxyde peut être plus léger que les métaux
 - Donc une part du métal peut être sous les oxydes => réduit la masse de métal en surface et accroît le risque de percement



REP : LES CODES MECANISTES

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

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

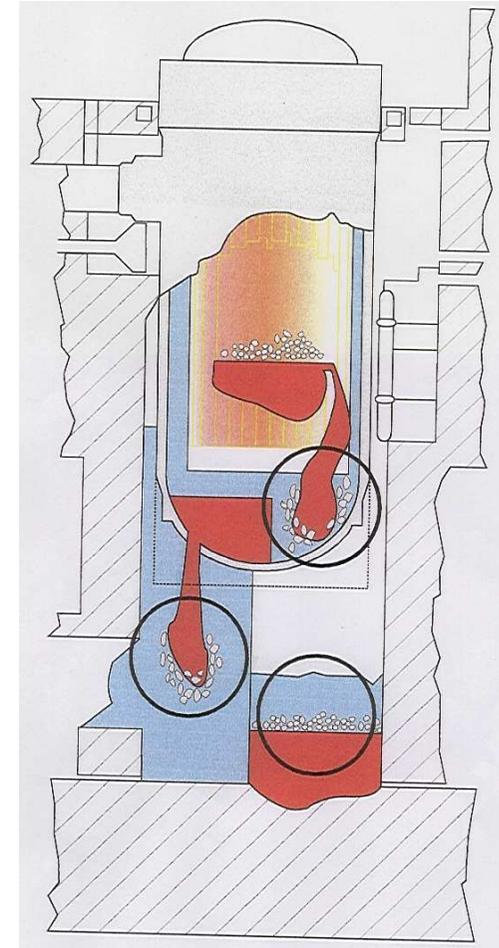
La complexité des phénomènes et le manque de possibilité de qualification rend difficile l'écriture de tels codes pour les accidents graves.

On peut citer par exemple:

- Le code ICARE2 (CEA/IRSN, 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 : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

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



REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

Le prémélange :

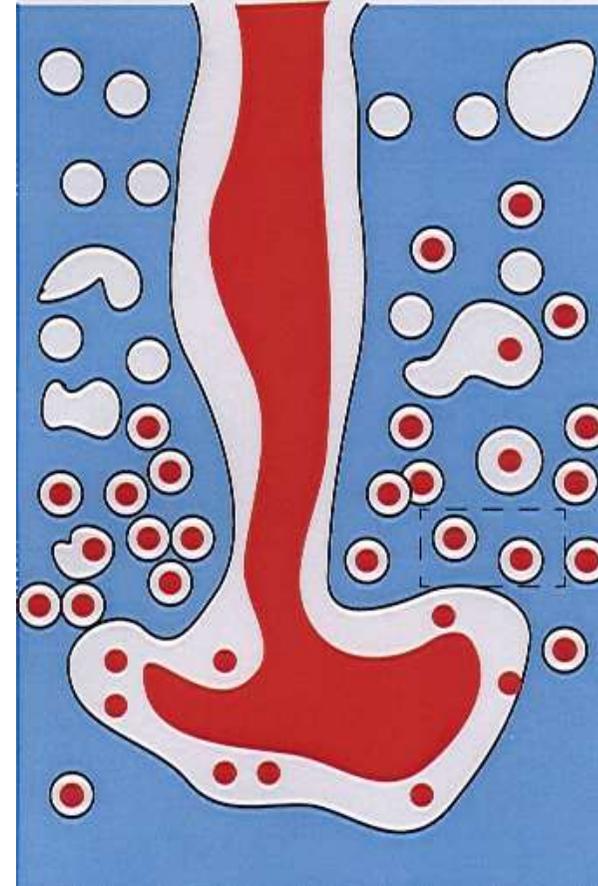
- Un jet de corium chaud (3000K) tombe et rentre en contact avec de l'eau. Il se crée alors un film de vapeur.
- Les instabilités à l'interface du film produisent des gouttes de corium qui se détachent et qui vont se fragmenter en gouttes plus fines ...
- Au contact des gouttes de corium, il y a une forte vaporisation et, suivant l'écart entre la température de l'eau et sa température de saturation, une forte condensation.

L'échelle de temps est [1,10s]

La taille des gouttes est (1 cm)

La hauteur d'eau est (1m)

Le déclenchement Phase mal décrite et stochastique

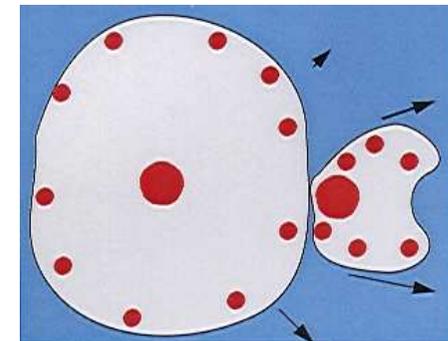
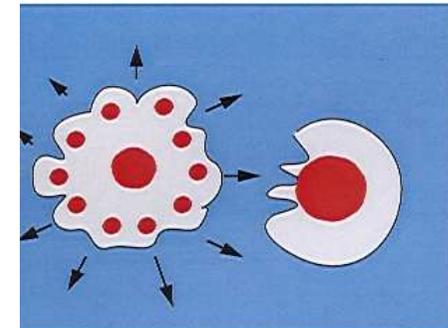
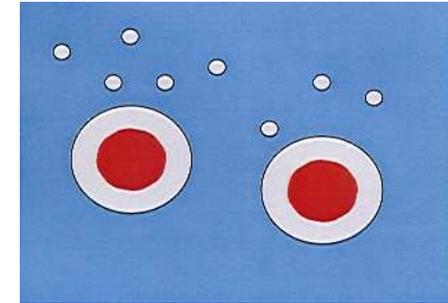


REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

L'explosion :

Sous l'effet d'un déclencheur extérieur
(trigger) par exemple une onde de pression

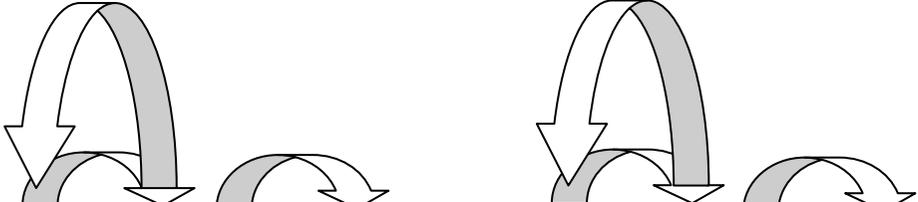
- La situation stable d'une goutte de corium dans de l'eau peut se transformer en une situation instable :
- Fragmentation fine (hydrodynamique ou thermique).
- Suivie d'une phase d'expansion
- L'échelle de temps est [0.001]
- La taille des fragments est [0,05 à 0.1 mm]



REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

MC3D est un code :

- Eulérien
- Multichamps
- Multi composants

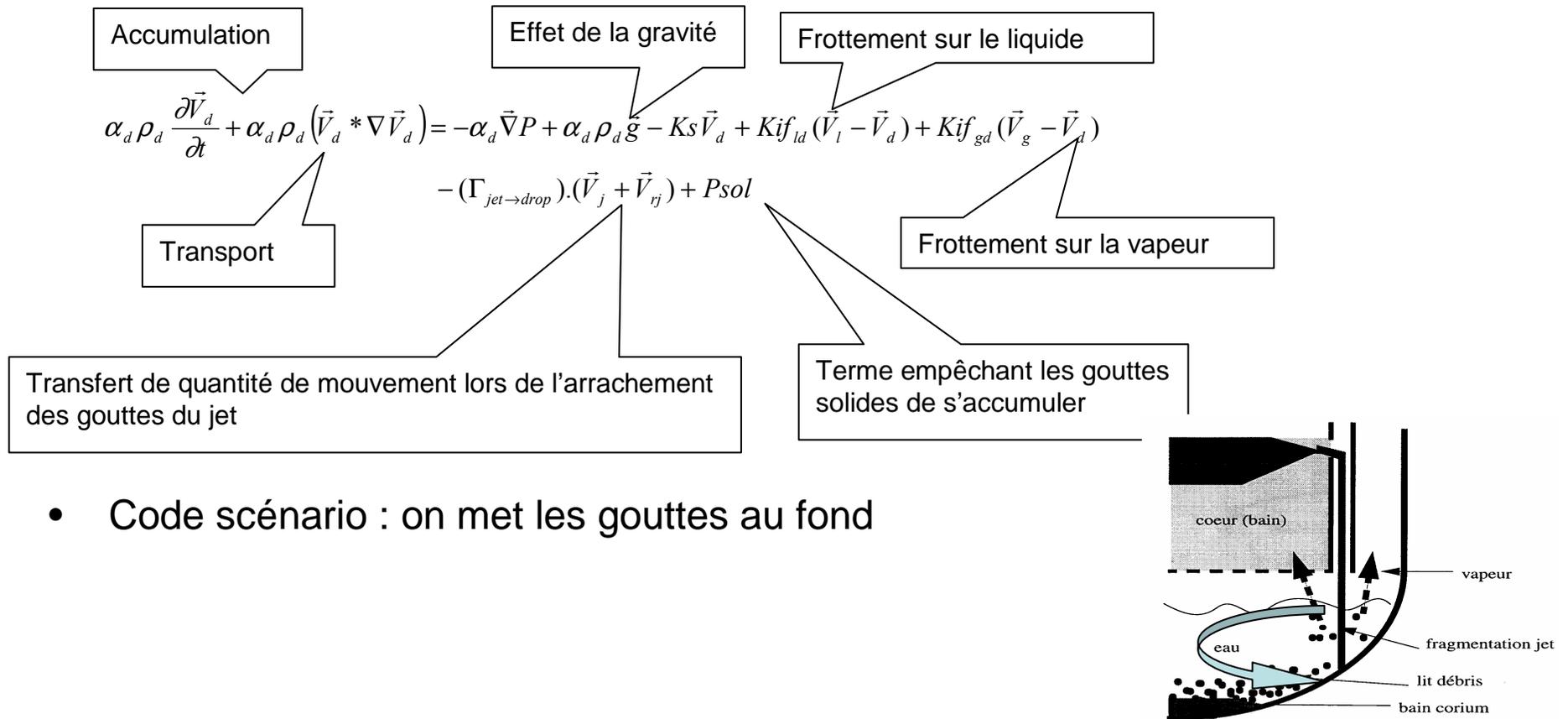


	Eau liquide	Vapeur	H2	Corium jet	Corium gouttes	Corium fragment
PREMELANGE						
Masse	X	X	X	X	X	X
Mouvement	X	X		X	X	(Eau liquide)
energie	X	X		X	X	Eau liquide
EXPLOSION						
Masse	X	X	X		X	X
Mouvement	X	X			X	X
Energie	X	X			X	X



Différence code scénario/code mécaniste

- Code mécaniste : on calcule la trajectoire moyennes **des** « gouttes » sur chaque maille.



- Code scénario : on met les gouttes au fond

REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

- Équations supplémentaires : aire interfaciale

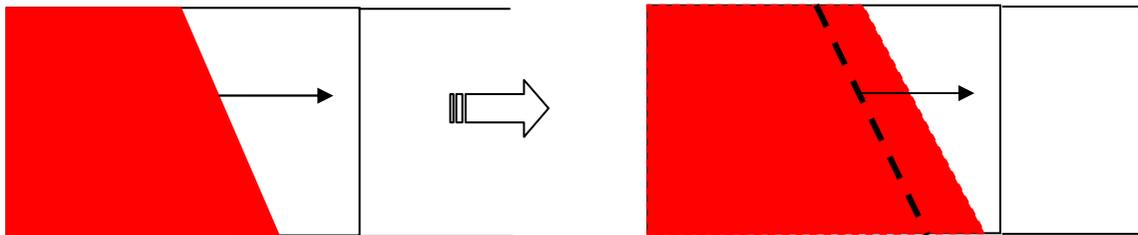
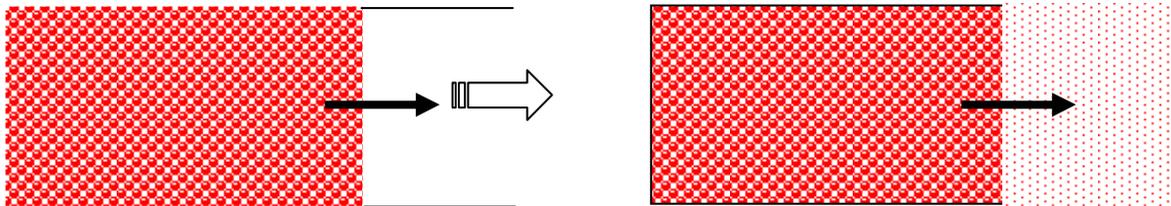
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot A \vec{V}_d = \Gamma_{A, drop \rightarrow drop} + \Gamma_{A, jet} + \Gamma_{A, drop \rightarrow cont}$$

Fragmentation des gouttes

Fragmentation du jet en gouttes

Agglomération des gouttes dans le jet

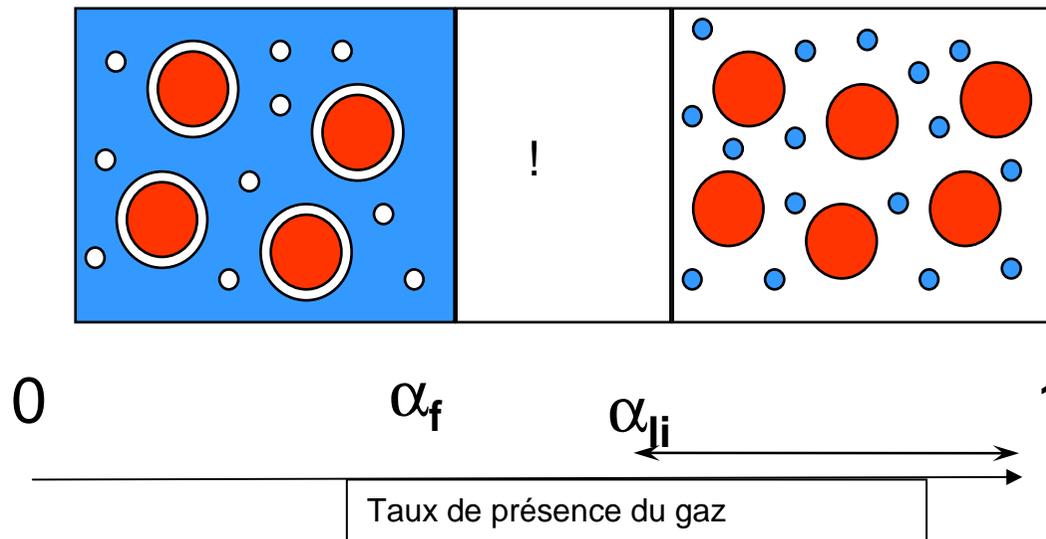
- Des modélisation supplémentaires



Méthode VOF pour la Phase corium continu

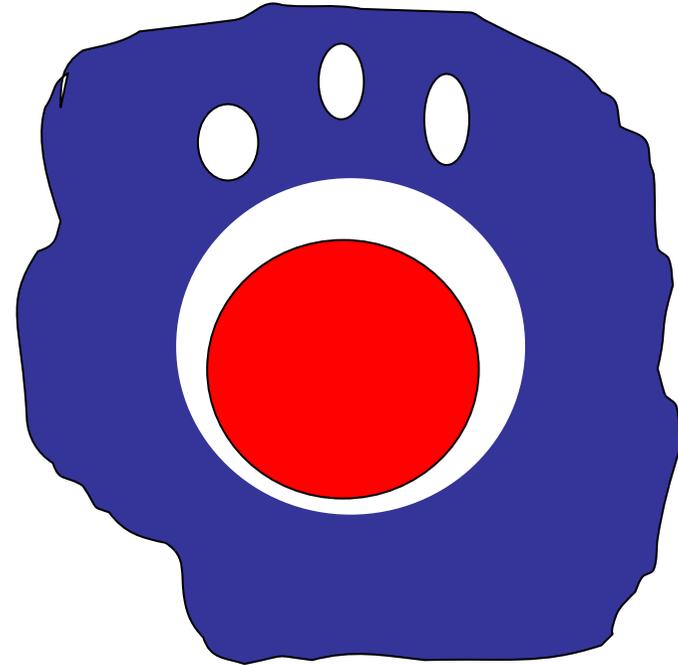
REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

- Carte d'écoulement



REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

- Des lois constitutives , Exemple :
- Transfert de chaleur autour d'une goutte
 - Film boiling
 - EPSTEIN HAUSER
 - TREPAM
 - Entre l'eau et l'interface près de la goutte
 - Entre l'eau et l'interface loin de la goutte
 - Entre l'eau et l'interface dans les bulles
 - Entre la vapeur et les interfaces
 - Radiatif autour de la goutte
- Les Bilans thermiques sur les interfaces fournissent les débits de liquide vapeur



Ces lois n'ont pratiquement jamais été établies pour les gammes de pression, de vitesse, de température (voire de taille) utilisées. De plus, compte tenu de la durée du transitoire et de son agitation, les écoulements ne sont jamais établis et les déséquilibres sont nombreux.
=> Identifier les phénomènes clefs. Si nécessaire faire des expériences.

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.

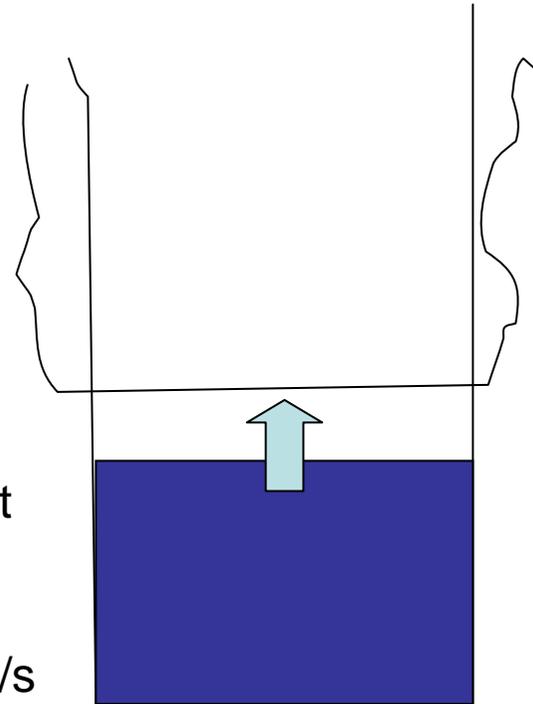
REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

- Des expériences spécifiques
 - Exemple TREPAM

Fil chauffé (40 μ m à 200 μ m)
2000K

Eau entre 20 ET T_{sat}
Entre 1b et 250b

V eau 0.2m/s et 20m/s



- Fournit une corrélation // EH (1900K, 5m/s), Mais ne répond pas à des questions comme la répartition de l'énergie entre le chauffage direct du liquide et la production de vapeur.

REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

- 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).

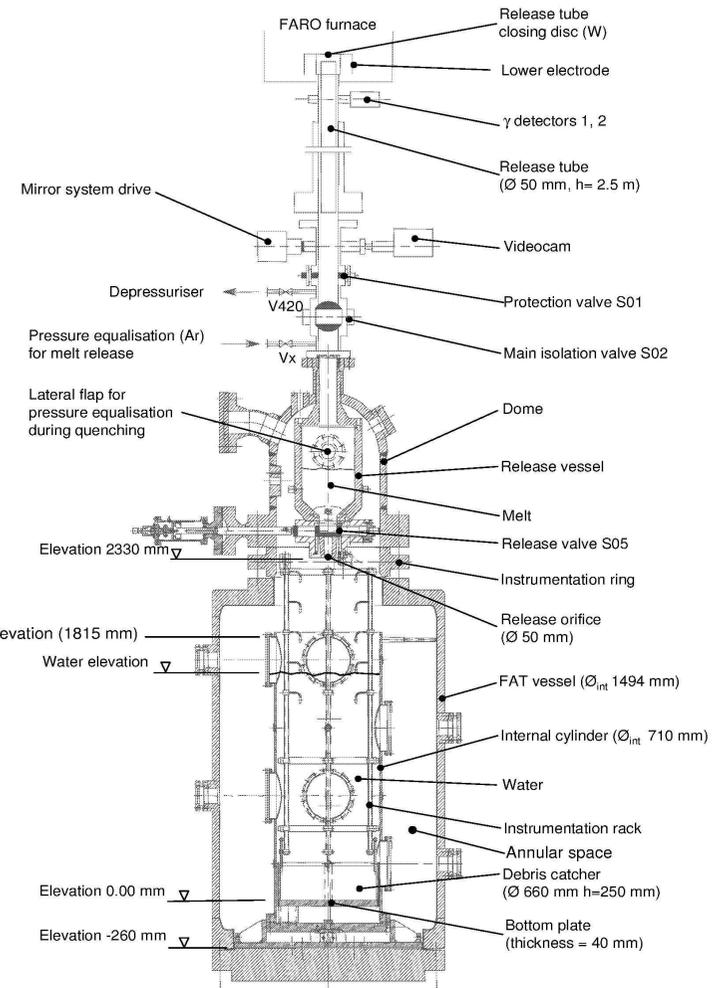
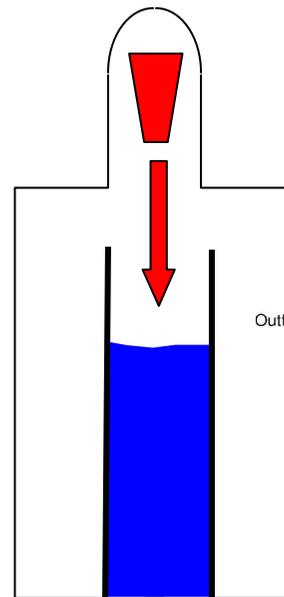
Matrice
Prémélange

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

REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

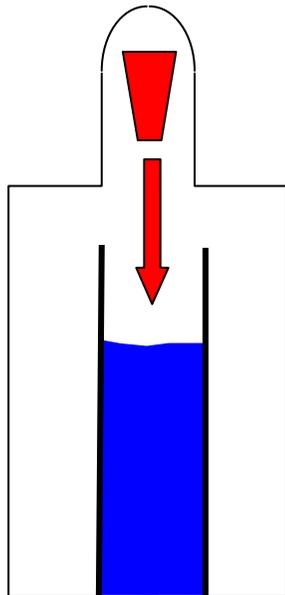
- Exemple de validation : FARO28

Instrumentation
En Pression
En température

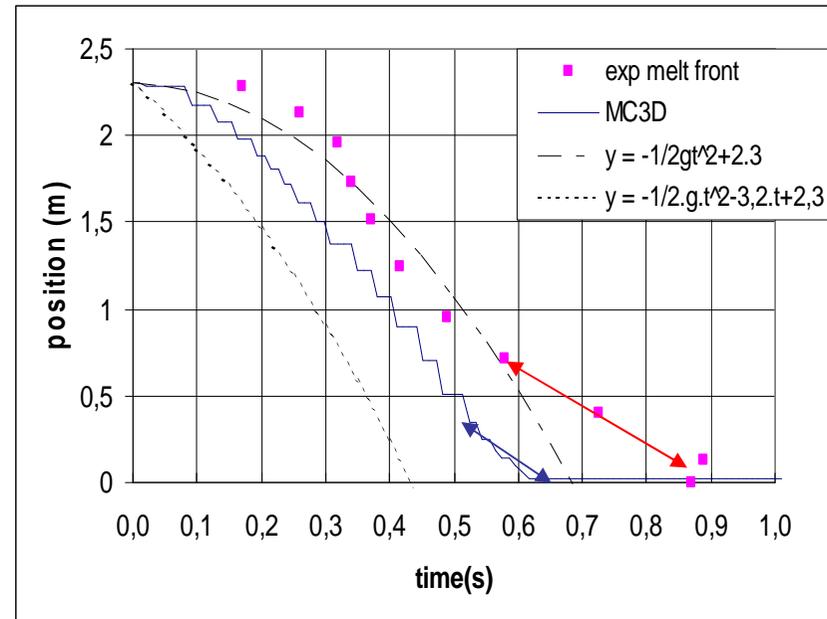


REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

- Exemple de validation : FARO28



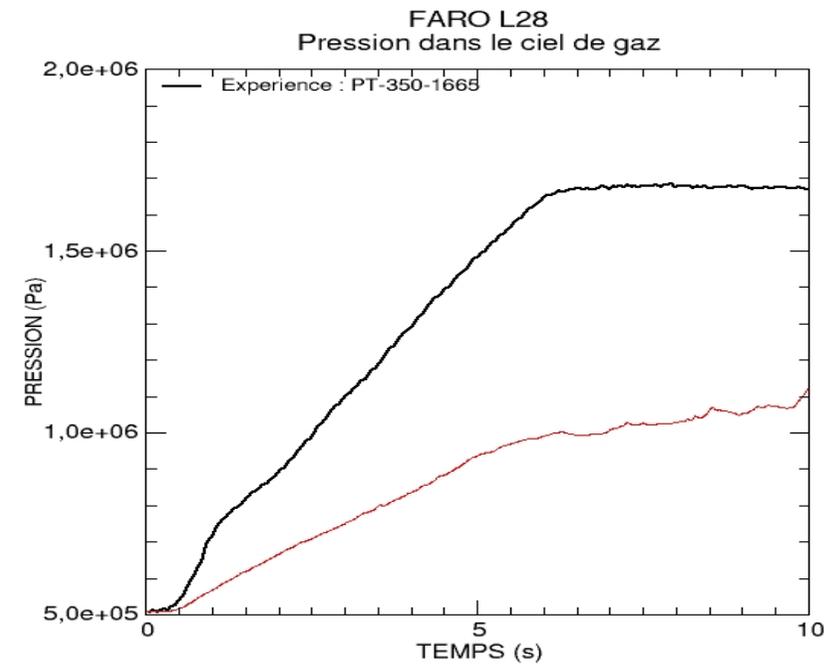
Chute d'un jet dans du gaz
Chute d'un jet dans du liquide
Chute de gouttes dans du liquide



Fragmentation du jet pas assez forte dans MC3D

REP : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE : MC3D

- Exemple de validation : FARO28



Pression dans le réacteur trop faible avec MC3D

liés à des niveaux gonflés trop important : carte d'écoulement

REP

- Code mécaniste // code scénario
 - Dans les domaines d'utilisation, 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.

RNR

- Pour les réacteurs à neutrons rapides surgénérateurs type Super-Phénix, phenix ... ASTRID.
- **Réaction de base:**
1 neutron + 1 noyau fissile \rightarrow neutrons + 2 noyaux
- **Surgénération:**
les n 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)

RNR

Conséquences sur les cœurs de RNR:

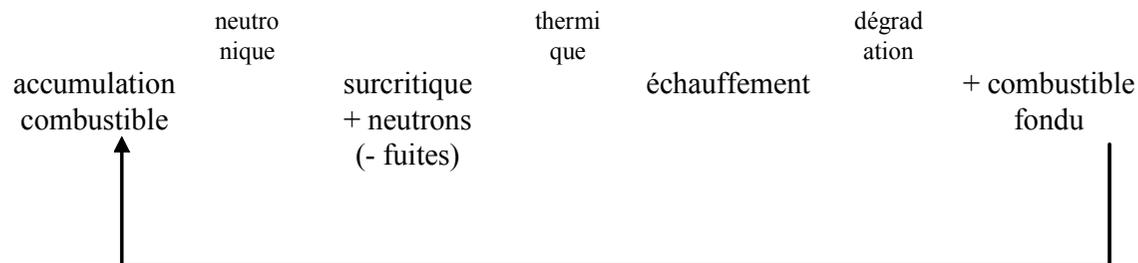
- cœur compact (pour limiter les fuites neutroniques)
- combustible très enrichi en noyaux fissiles, de 20 à 30% (3% REP), pour compenser la section efficace d'absorption très faible des neutrons rapides
- très forte puissance spécifique cœur (300 MW / m³)
- refroidissement par sodium liquide et grande surface d'échange

RNR

Couplage neutronique / dégradation du cœur:

- le cœur n'est pas dans sa configuration la plus critique (\neq REP)
- la puissance spécifique très élevée

emballement en cas d'accident suivant le schéma:



couplage très fort neutronique / dégradation de cœur
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

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.

RNR : SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES

- **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 ?
 - ⇒ 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?

RNR : SCENARIOS D'ACCIDENTS GRAVES

Pour les REP: Évolution de la dégradation avancée du cœur et de bain de corium relativement linéaire et lente (hors renoyage) ⇒ modélisation possible par un code simplifié avec une validité raisonnable.

Situation pour les RNR:

Évolution de la géométrie de cœur fortement non linéaire.

Couplage nécessaire avec code neutronique fin

⇒ peu d'intermédiaire possible entre calculs 'à la main' (analyse conservative 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

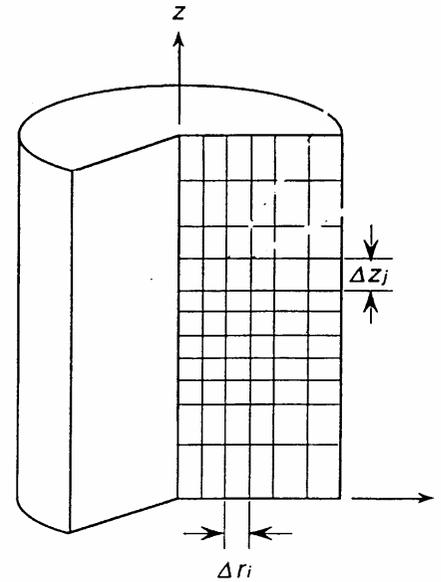
RNR : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE: SIMMER 3

SIMMER 3 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 (SIMMER 4 en 3D)
- **Historique du programme SIMMER:**
 - SIMMER 1 et 2 développé à Los Alamos (USA) depuis 1974
 - AFDM (Los Alamos)
 - SIMMER 3 (4) en cours de développement à PNC (Japon)
- coopération Japon (PNC)- CEE (FZK, CEA) pour la qualification
- Renouveau de l'intérêt pour RNR au CEA => Équipe SIMMER ↑

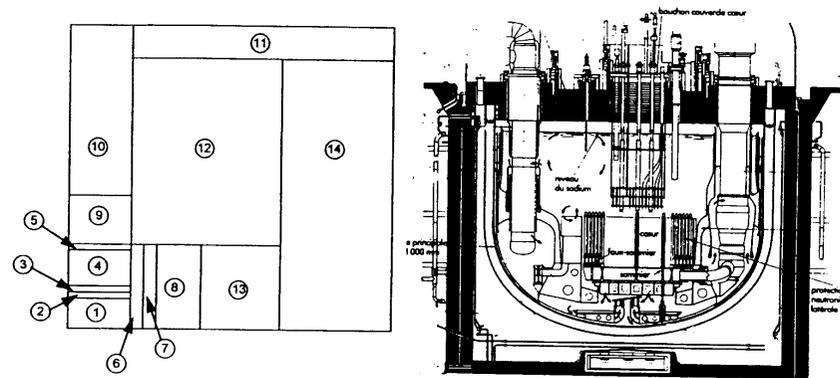
RNR :

Maillage r-z:



SIMMER 3

Exemple de géométrie Super-Phénix:



géométrie calculée (14 zones)

géométrie réelle

RNR :

champ	composant massique	composant énergétique
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
3 éq. QdM	27 eq. conserv. masse	16 éq. d'énergie

3 vitesses	27 masses	16 temp. + P
-------------------	------------------	---------------------

($V_{\text{structure}} = 0$)

(comb. = combustible)

RNR : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE: SIMMER 3

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
- 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). Cette modélisation est essentielle puisqu'elle fournit les 42 surfaces d'échanges binaires.

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

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

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

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

RNR : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE: SIMMER 3

Exemple : 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

RNR : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE: SIMMER 3

Exemple de Validation :

expérience LOTUS

Tube vertical (23m, diamètre 31.8mm)

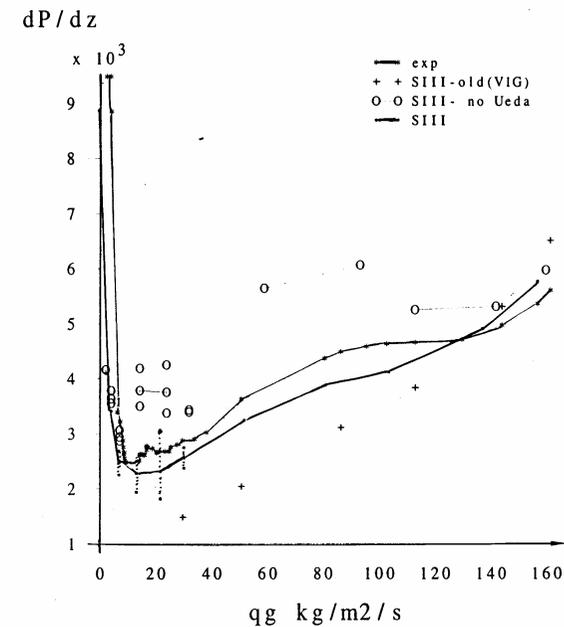
Écoulement eau/air (à bulles -> annulaire),

température ambiante

Calcul Simmer permet de tester 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.



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

RNR : UN EXEMPLE DE CODE MECANISTE: SIMMER 3

On retrouve les mêmes problématiques que pour l'exemple de code mécaniste dédié MC3D.

- lois constitutives
- carte d'écoulement
- Équation d'aire interfaciale
- ...

Mais avec plus de lois et plus génériques (exemple Flashing dans SIMMER//MC3D)

- **L'effort de développement est très grand.**
- **L'effort de qualification est aussi très grand.**

Outil obligatoire pour les RNR