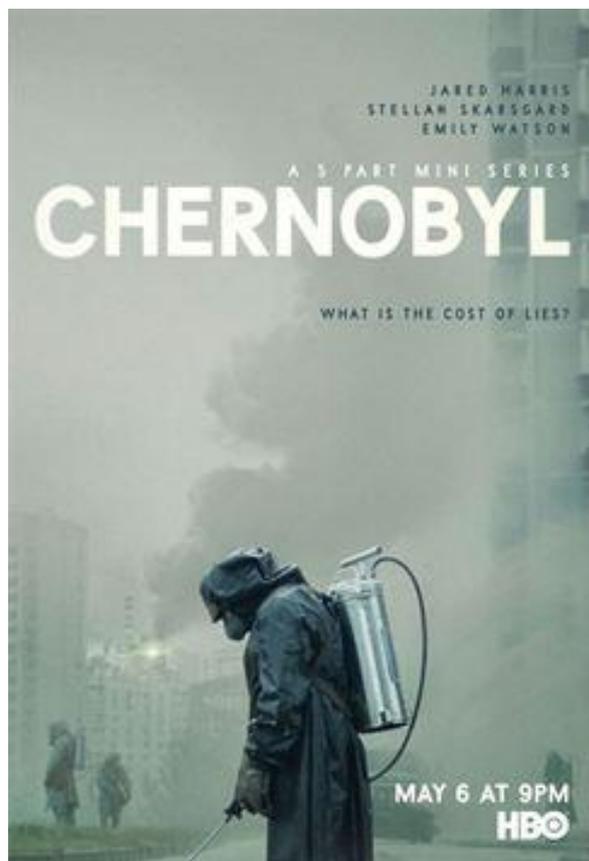


IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Codes Multiéchelles et sûreté Nucléaire : Cas du RIA



Plan :

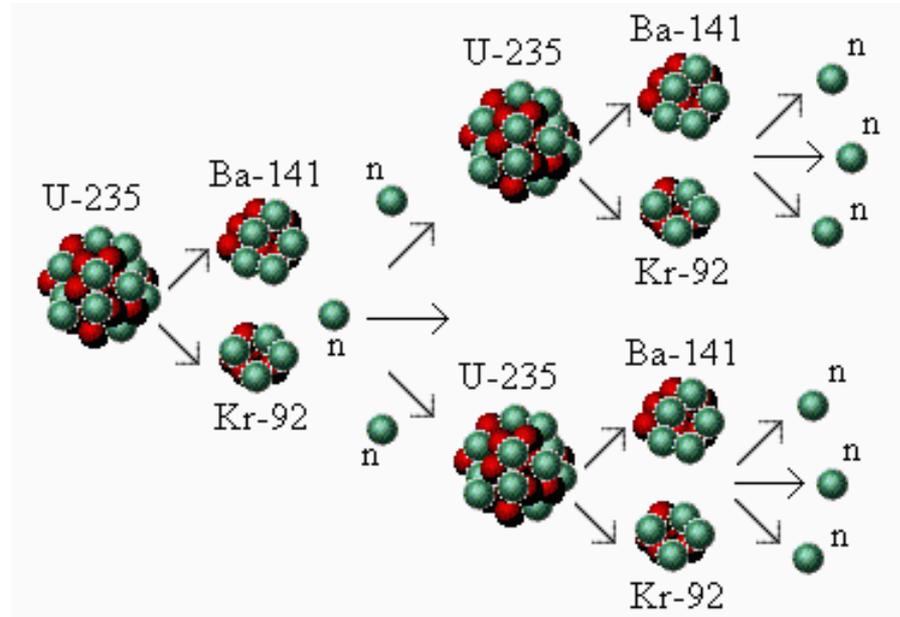
L'accident de réactivité

Construire un outil de simulation numérique ?

Conclusion : Analyse critique des approches multiéchelles

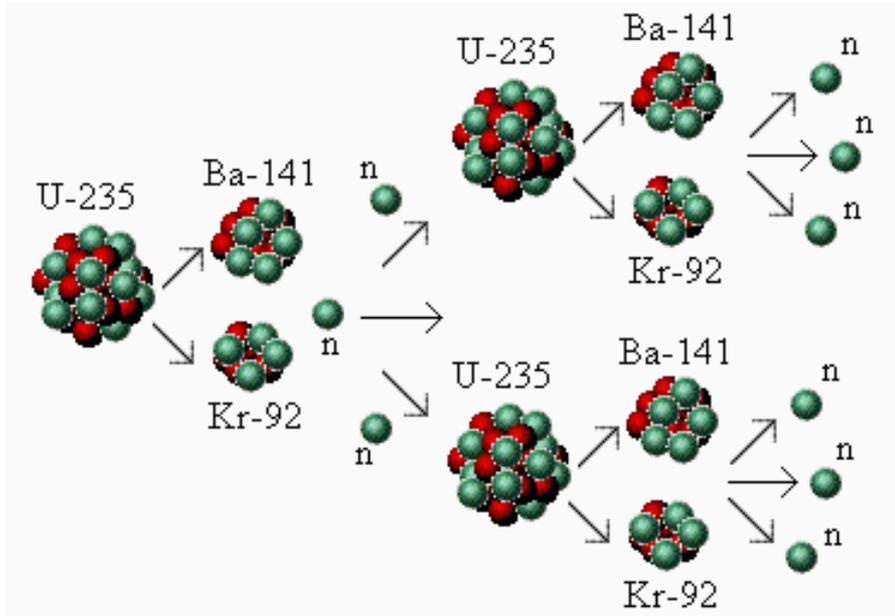
*Qu'est ce qu'un accident d'insertion
de réactivité ?*

L'Accident d'Insertion de Réactivité



≈ 2.5 neutrons par fission

L'Accident d'Insertion de Réactivité



© Jim Doyle 2000

Facteur de multiplication
neutronique k :

$$k = \frac{N_f(t+1)}{N_f(t)}$$

Réactivité ρ :

$$\rho = \frac{k-1}{k}$$

- $\rho = 0$ régime critique
- $\rho < 0$ réaction s'étouffe
- $\rho > 0$ réaction s'accélère

L'Accident d'Insertion de Réactivité

Contrôle de la réactivité dans les PWR et les BWR

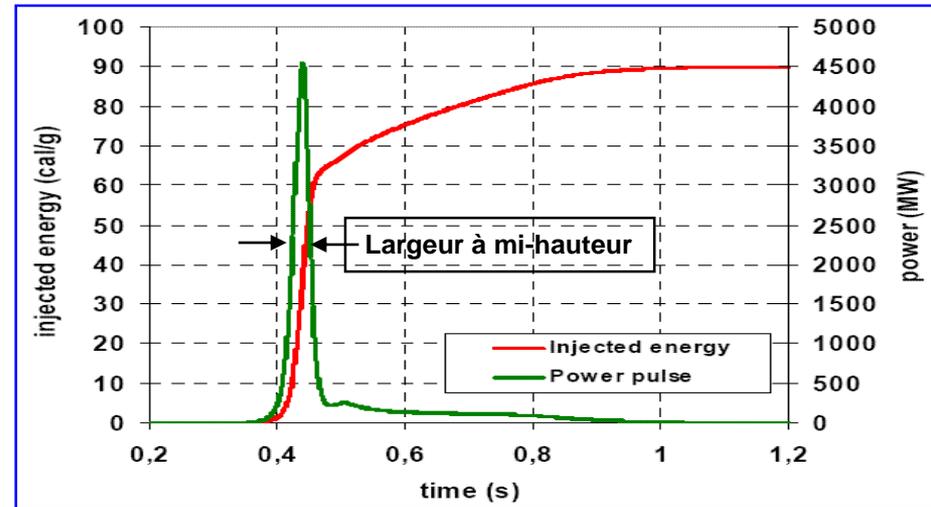
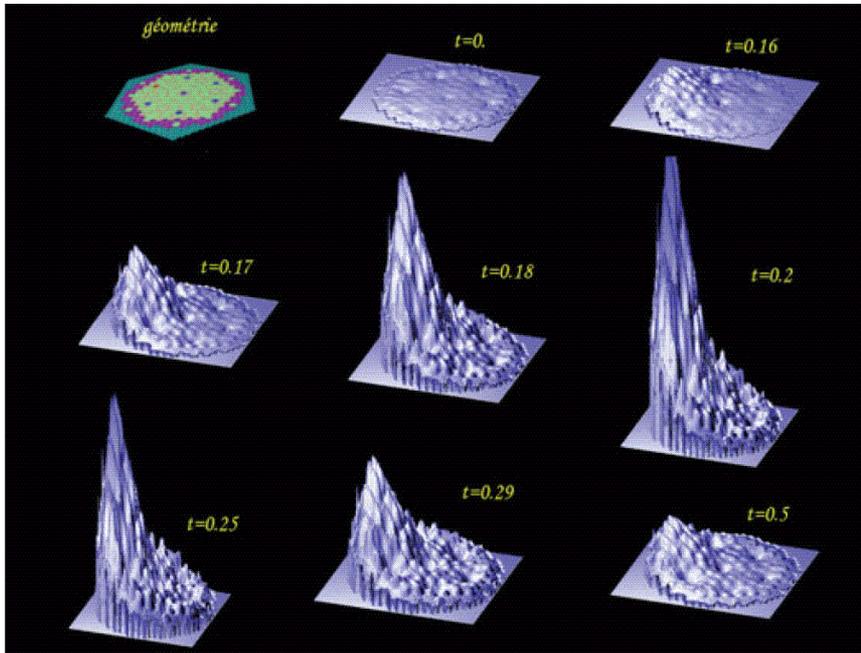
- Concentration d'acide borique
- Température et densité du modérateur
- Température du combustible
- Barres de contrôle

→ Tout dysfonctionnement d'un des systèmes de contrôles affecte la réactivité du réacteur

RIA = Reactivity Initiated Accident
Induced
Insertion

Accident de réactivité (ou excursion de puissance) : augmentation incontrôlée de la réactivité dans un cœur à l'état critique

L'Accident d'Insertion de Réactivité



$T_{\text{comb}} \nearrow \Rightarrow$ Contre réaction Doppler $P \searrow$

le transitoire de puissance dépend de :

- P(réacteur)
- Nature du coeur(enrichissement, taux de combustion, longueur des cycles, type de pastille et de gainage, ...)

L'Accident d'Insertion de Réactivité

Quelques accidents de réactivité recensés

Réacteurs de recherche :

1952 : réacteur NRX à Chalk River au Canada

1961 : réacteur SL-1 à Idaho Falls aux USA

**Pas de PWR ou
BWR**

Propulsion navale : sous-marins nucléaires russes

Year	Place	Reactor status	Cause of accident	Radionuclide release	Casualty
1965	Severodvinsk	Refuelling	Carelessness of crew (detail unavailable)	Yes	(Information unavailable)
1968	Severodvinsk	Maintenance	Rod withdrawal due to wrong cable connection	None	None
1970	Nizhny Novgorod	Under construction	Unfixed rod pushed up by strong coolant flow	Yes	(Information unavailable)
1980	Severodvinsk	Maintenance	Rod withdrawal due to disconnected safety system	Small	(Information unavailable)
1985	Chazhma Bay	Refueling	Rod withdrawal due to lift up of upper lid	Substantial	10, Many received high dose.

L'Accident d'Insertion de Réactivité : Chernobyl

Tchernobyl : RBMK
combustible enrichi à 2%
caloporteur = eau bouillante
modérateur = graphite



Essai de sûreté de l'alimentation électrique de secours

Essai réalisé après un fonctionnement à faible puissance

→ empoisonnement Xénon

→ extraction des barres

Désactivation des systèmes de refroidissement de secours

Désactivation des régulations automatiques

Fonctionnement en dehors du domaine de stabilité

Désactivation des systèmes d'arrêt d'urgence

→ non-respect des procédures (faible culture de sûreté)

Erreurs de conception vis à vis de la sûreté

Cœur de grande taille :

→ oscillations de puissance par effet Xénon

→ régulation difficile (notamment à faible puissance)

Faible rôle modérateur de l'eau :

→ réactivité positive à basse puissance par augmentation de température et effet de vide du caloporteur

Barres de contrôle :

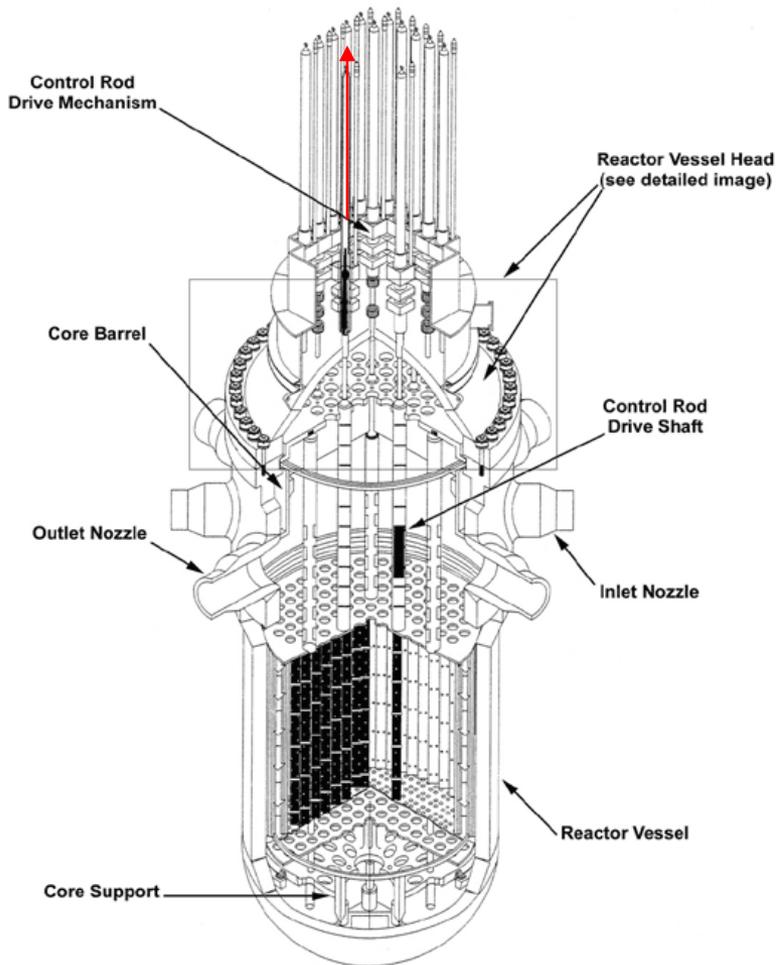
→ prolongateur en graphite des barres de B4C (réactivité positive au début de l'insertion par éjection d'eau)

→ insertion motorisée lente (complète en 20 s)

Comment lutter contre un accident d'insertion de réactivité ?

- Limiter la probabilité d'occurrence*
- Limiter les conséquences*

Limiter les conséquences : Scénario enveloppe



PWR

Ejection d'une grappe de commande
(Rod Ejection Accident)

PWR

Défaillance du mécanisme de pilotage d'une grappe
→ éjection d'une grappe due à la grande différence de pression entre la cuve et l'enceinte

Limiter les conséquences : Critères

Objectifs de sûreté

- assurer l'intégrité du circuit de refroidissement
- maintenir la refroidissabilité du cœur

Exigences de sûreté

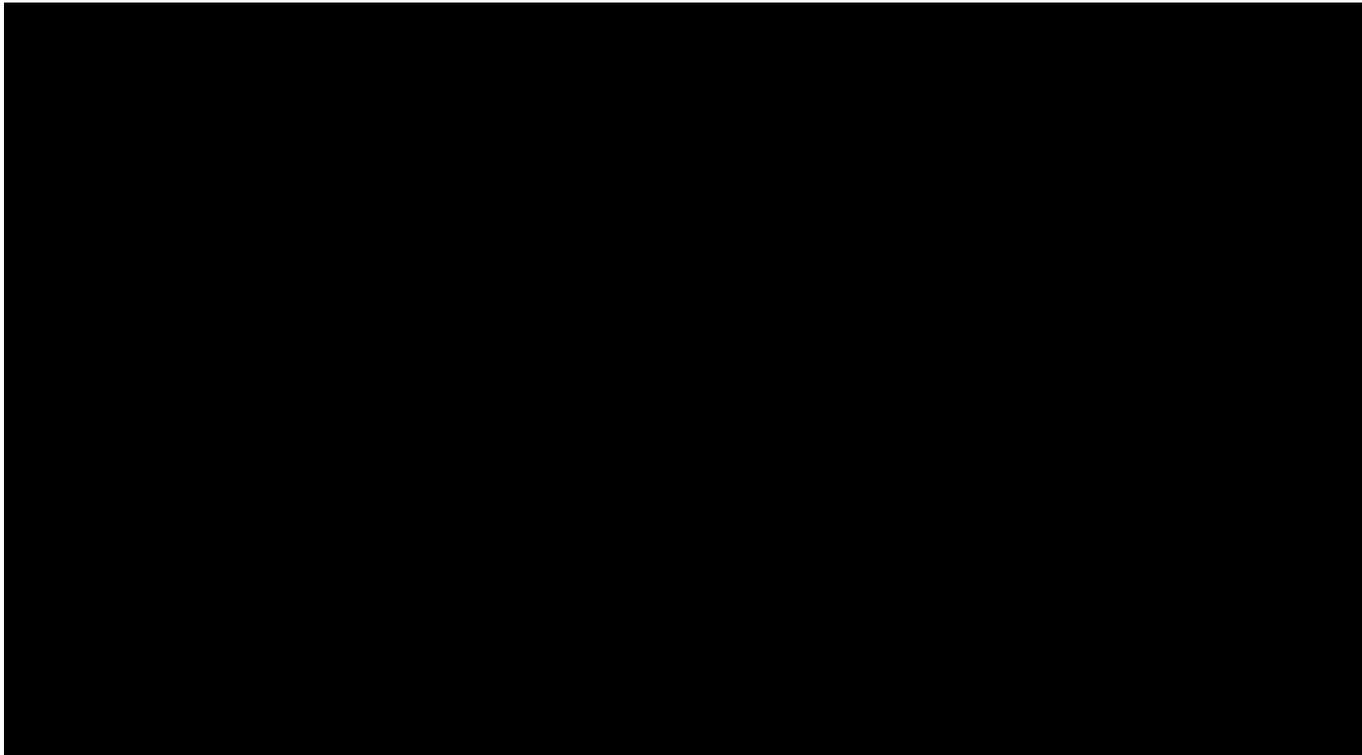
- fusion limitée du combustible
- pas de fragilisation de la gaine
- non-dispersion de combustible
- limitation du nombre de crayons affectés par la crise d'ébullition

La démonstration de sûreté de l'exploitant (EDF) doit répondre à ces exigences.

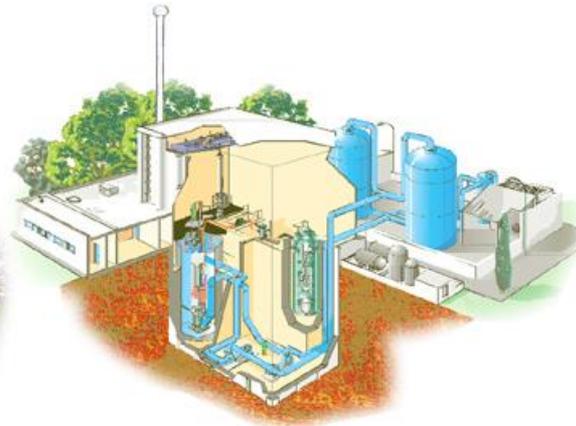
- ➔ Le respect de **critères de sûreté** doit permettre de respecter ces exigences

Comment établir ces critères ?

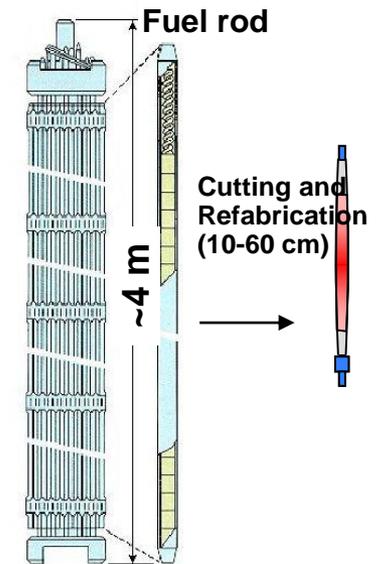
Définition de critères : voie expérimentale



Définition de critères : voie expérimentale



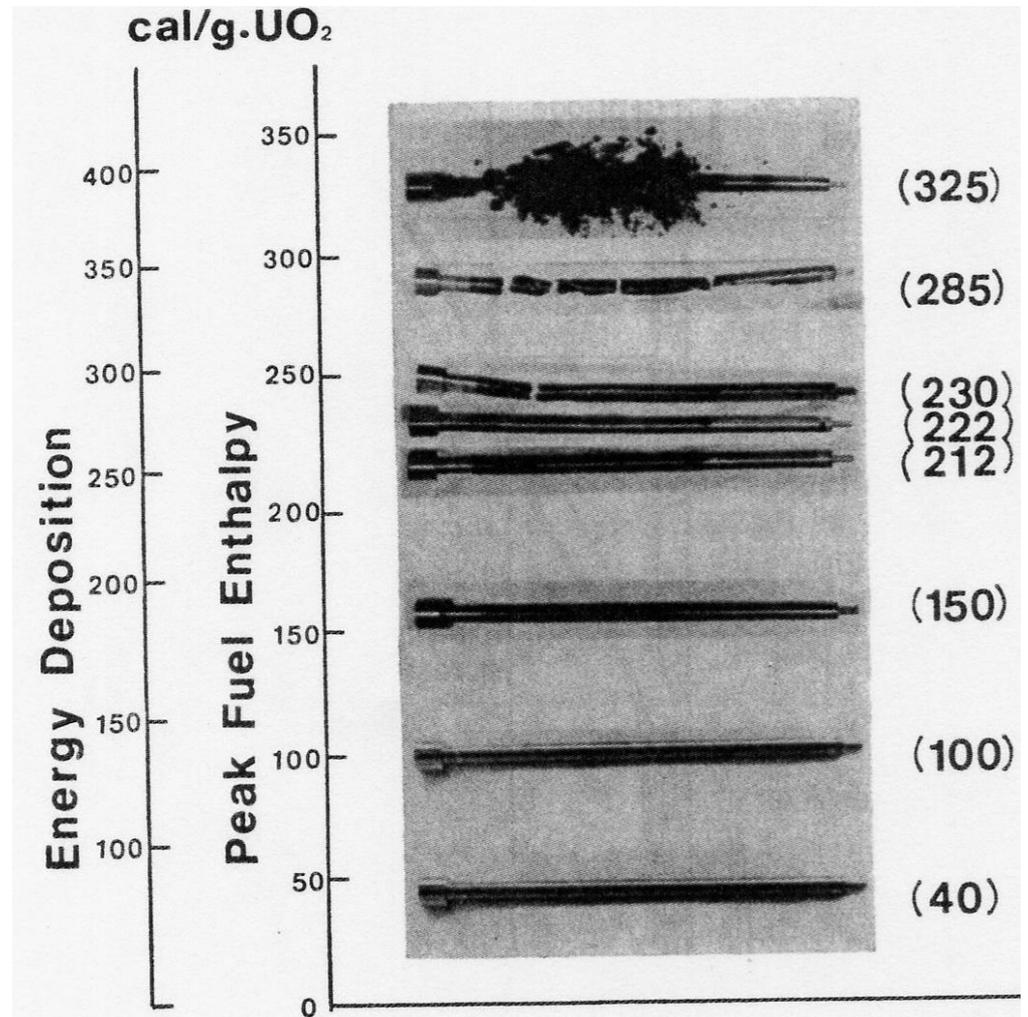
Integral test on irradiated rods



CABRI : les programmes REP-Na et CIP (2000-2010)

Définition de critères : voie expérimentale

Critère en enthalpie déposée inspiré par les essais SPERT réalisés aux USA de 1965 à 1970 pour des taux de combustion < 32 GWj/t

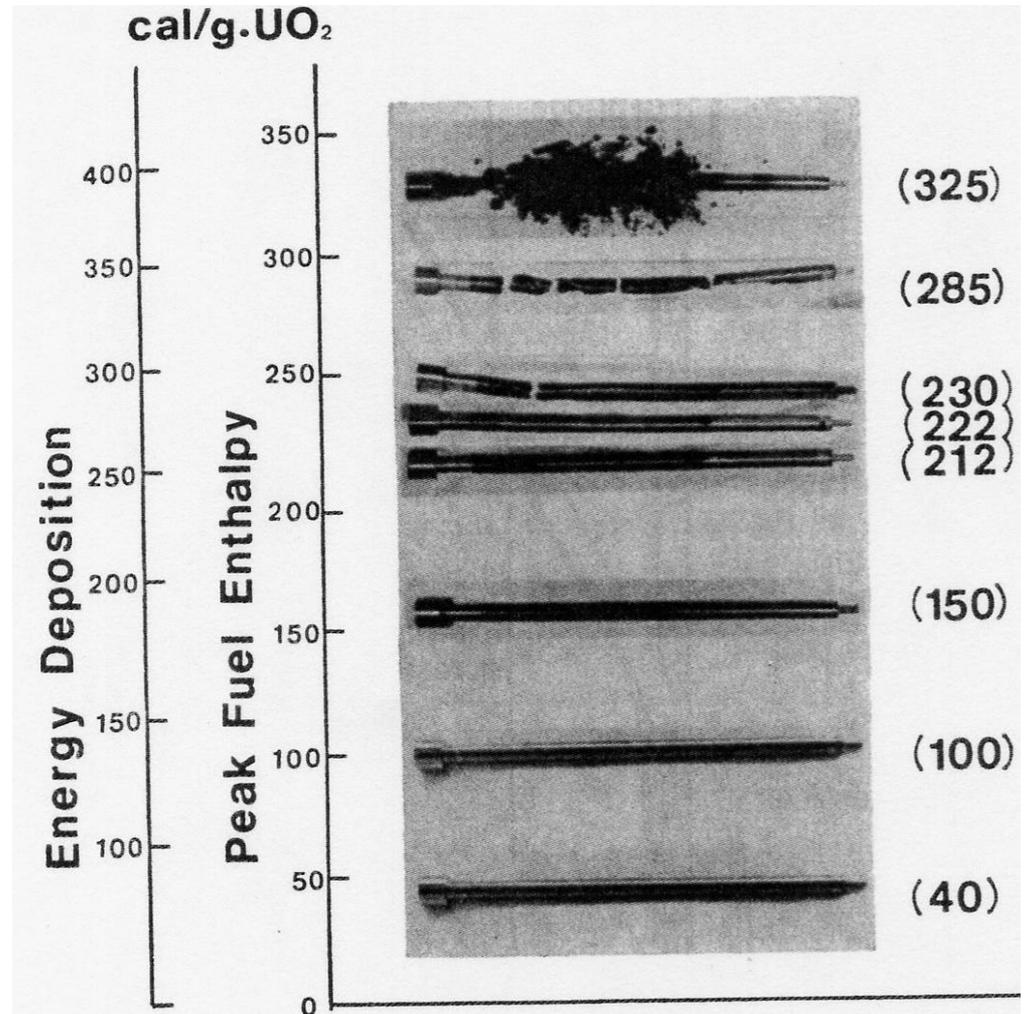


Définition de critères : voie expérimentale

Critère en enthalpie déposée inspiré par les essais SPERT réalisés aux USA de 1965 à 1970 pour des taux de combustion < 32 GWj/t

Et au delà ????

- *BU ?*
- *MOX/gainages*
- *gestions...*



Définition de critères : voie expérimentale

→ années 1990 (Post Chernobyle) : programmes expérimentaux internationaux en France (CABRI), au Japon (NSRR) et en Russie sur des combustibles à fort taux de combustion (« haut burnup » > 60 GWj/tU en 2008)

	SPERT USA	PBF USA	IGR KZ	BIGR RU	NSRR JP	CABRI FR
Test conditions						
Coolant medium	Stagnant water	Flowing water	Stagnant water	Stagnant water	Stagnant water	Flowing sodium
Coolant temperature [K]	293	538	293	293	293-353	553
Coolant pressure [MPa]	0.1	6.45	0.1	0.1	0.1	0.5
Power pulse width [ms]	13-31	11-16	600-950	2-3	4-7	9 - 75
Fuel rods tested						
Number of tests (PWR/BWR/VVER//MOX)	10 (0/10/0/0)	17 (17/0/0/0)	13 (0/0/13/0)	12 (0/0/12/0)	52 (30/16/0/6)	14 (10/0/0/4)
Burnup [MWdkg ⁻¹ HM ⁻¹]	1-32	0-6.1	47-49	47-60	20-79	33-76
Clad oxide thickness [µm]	0-65	0-5	5	3-7	4-73	10-126
Rod active length [mm]	132	≈ 1000	150	140-150	122-135	440-1000
Peak fuel enthalpy [Jg ⁻¹] (calg ⁻¹)	570-1180 (137-282)	770-1190 (185-285)	255-1051 (61-251)	481-787 (115-188)	155-657 (37-157)	343-832 (82-199)
Lowest failure enthalpy [Jg ⁻¹] (calg ⁻¹)	356 (85)	586 (140)	737 (176)	687 (164)	230 (55)	117-151 (28-36)

Définition de critères : voie expérimentale

→ années 1990 (Post Chernobyle) : programmes expérimentaux internationaux en France (CABRI), au Japon (NSRR) et en Russie sur des combustibles à fort taux de combustion (« haut burnup » > 60 GWj/tU en 2008)

	SPERT USA	PBF USA	IGR KZ	BIGR RU	NSRR JP	CABRI FR
Test conditions						
Coolant medium	Stagnant water	Flowing water	Stagnant water	Stagnant water	Stagnant water	Flowing sodium
Coolant temperature [K]	293	538	293	293	293-353	553
Coolant pressure [MPa]	0.1	6.45	0.1	0.1	0.1	0.5
Power pulse width [ms]	13-31	11-16	600-950	2-3	4-7	9 - 75
Fuel rods tested						
Number of tests (PWR/BWR/VVER/MOY)	10 (0/10/0/0)	17 (17/0/0/0)	13 (0/0/13/0)	12 (0/0/12/0)	52 (30/16/0/6)	14 (10/0/0/4)
Burnup [MWdkg ⁻¹ HM ⁻¹]	1-32	0-6.1	47-49	47-60	20-79	33-76
Clad oxide thickness [µm]	0-65	0-5	5	3-7	4-73	10-126
Rod active length [mm]	132	≈ 1000	150	140-150	122-135	440-1000
Peak fuel enthalpy [Jg ⁻¹] (calg ⁻¹)	570-1180 (137-282)	770-1190 (185-285)	255-1051 (61-251)	481-787 (115-188)	155-657 (37-157)	343-832 (82-199)
Lowest failure enthalpy [Jg ⁻¹] (calg ⁻¹)	356 (85)	586 (140)	737 (176)	687 (164)	230 (55)	117-151 (28-36)

Définition de critères : voie expérimentale

- Faible nombre d'essais
 - Pas de doublons
 - Impossibilité de tester toutes les configurations
 - Sollicitation (pulse neutronique)
 - Etat du crayon (initial + historique)
- Réacteur expérimentaux \neq REP
 - ➔ Représentativité ?

Définition de critères

- Faible nombre d'essais
 - Pas de doublons
 - Impossibilité de tester toutes les configurations → Optimisation matrice d'essais
 - Sollicitation (pulse neutronique)
 - Etat du crayon (initial + historique)
- Réacteur expérimentaux \neq REP
 - Représentativité
 - ? → transfert/analyse/interprétation

→ Besoin d'outils de
simulation/modélisation

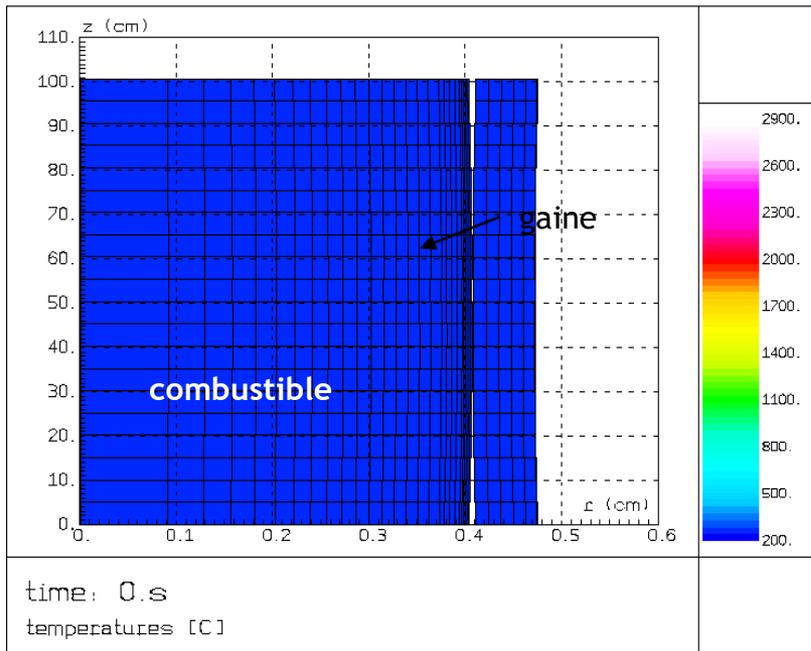
Comment construire un code de simulation adapté ?

Comment construire un code de simulation adapté ?

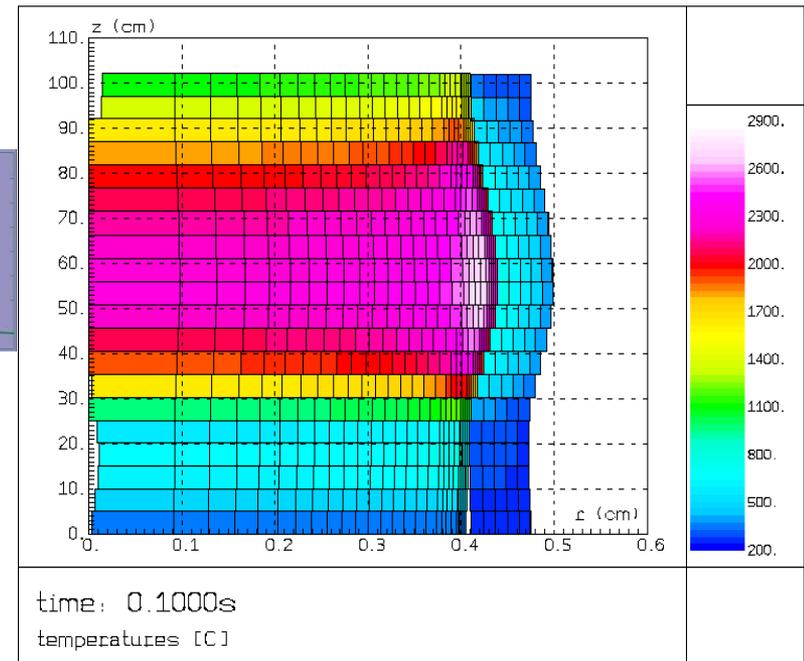
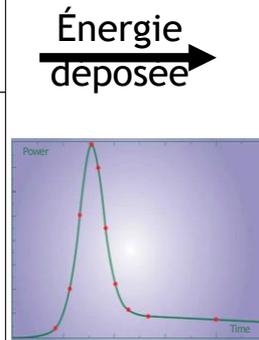
- Identifier les principaux phénomènes

Outil de simulation : Phénoménologie

Phase I : PCMI (Pellet-Clad Mechanical Interaction)



① état initial : 0%PN à chaud
(280° C, 15.5MPa)

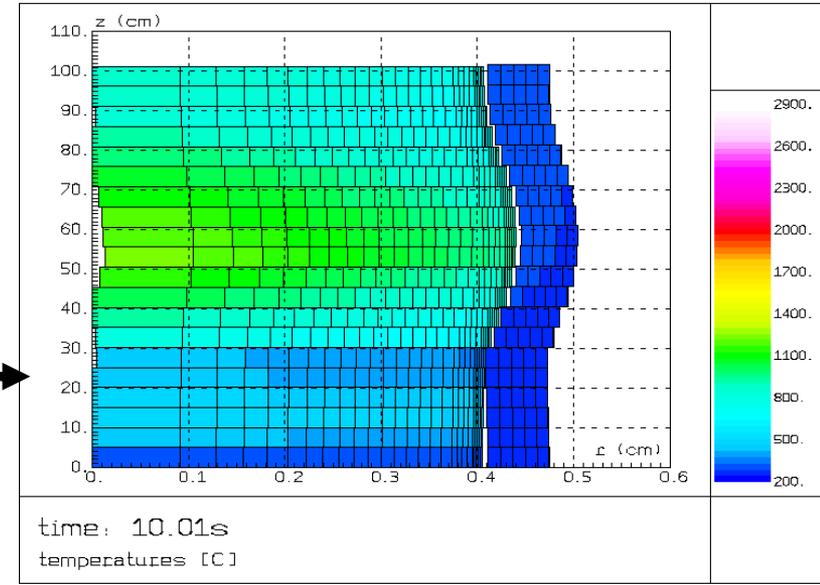
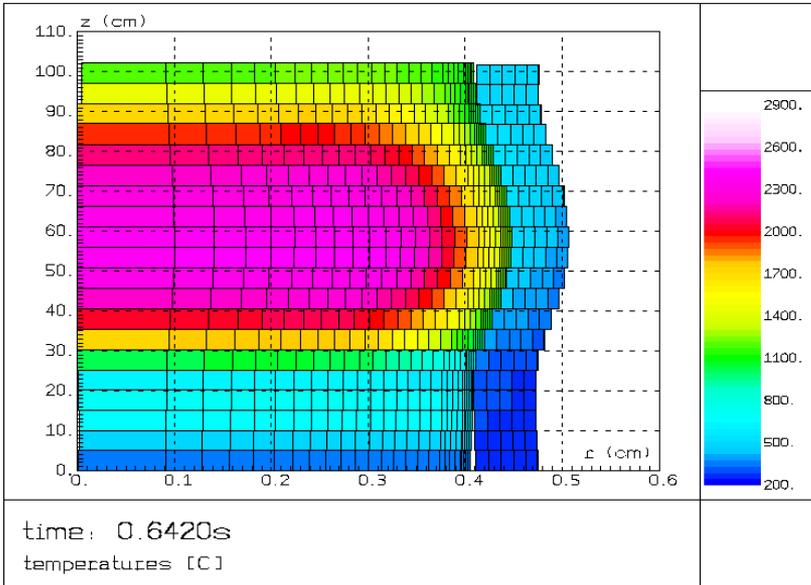


② échauffement rapide ($\sim 10^3$ à 10^4 K/s) et gonflement (1/s) du combustible alors que la gaine est encore « froide » (280° C)

Interaction mécanique pastille-gaine → Risque de rupture fragile

Outil de simulation : Phénoménologie

Phase 2 : Post-DNB (crise d'ébullition)



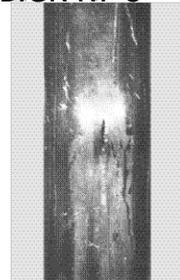
③ crise d'ébullition possible

=> $T_{\text{gaine}} > 800^{\circ}\text{C}$ → ductilité

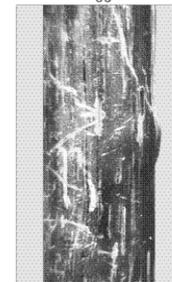
⇒ augmentation de la pression interne

=> Ballonnement

BIGR RT-8

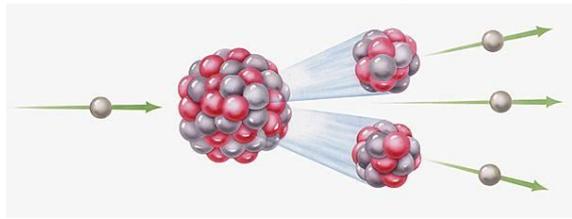


④ Remouillage



Outil de simulation : Phénoménologie

Rôle des PFs gazeux



Réaction de fission

Produits gazeux (Xe, Kr)
insolubles dans la matrice de l'UO₂

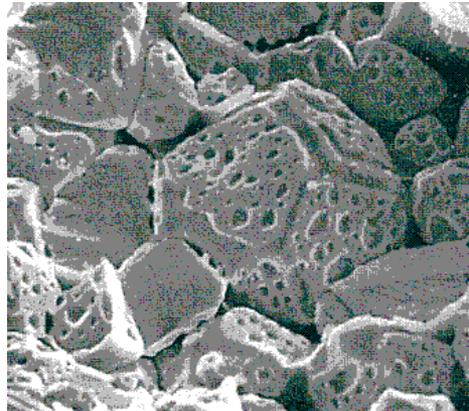


Diffusion jusqu'aux
joints
de grain



Précipitation

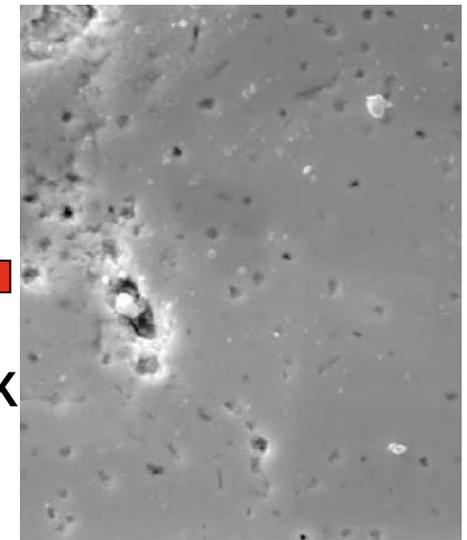
Formation de
réseaux
interconnectés
+
Fragmentation
du combustible



Bulles
intergranulaires
(20-100 nm)



T > 1800 K



Bulles
intragranulaires
(1-10 nm)



Libération
dans le jeu

Outil de simulation : Phénoménologie

Rôle des PFs gazeux

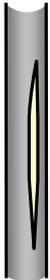
Bulles de gaz



Gonflement

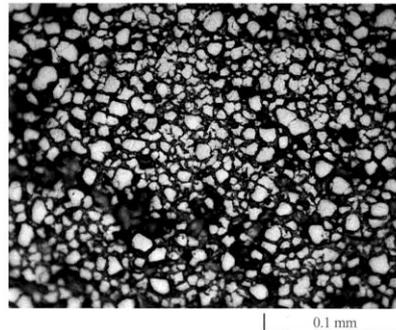
Thermomécanique

Fragmentation



Gonflement gazeux
Rupture de la gaine

TK1 test



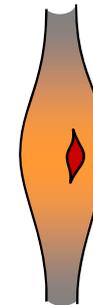
Fuel grain
boundary
decohesion after
test

gaz relâché



Pressurisation crayon

Conductivité
thermique



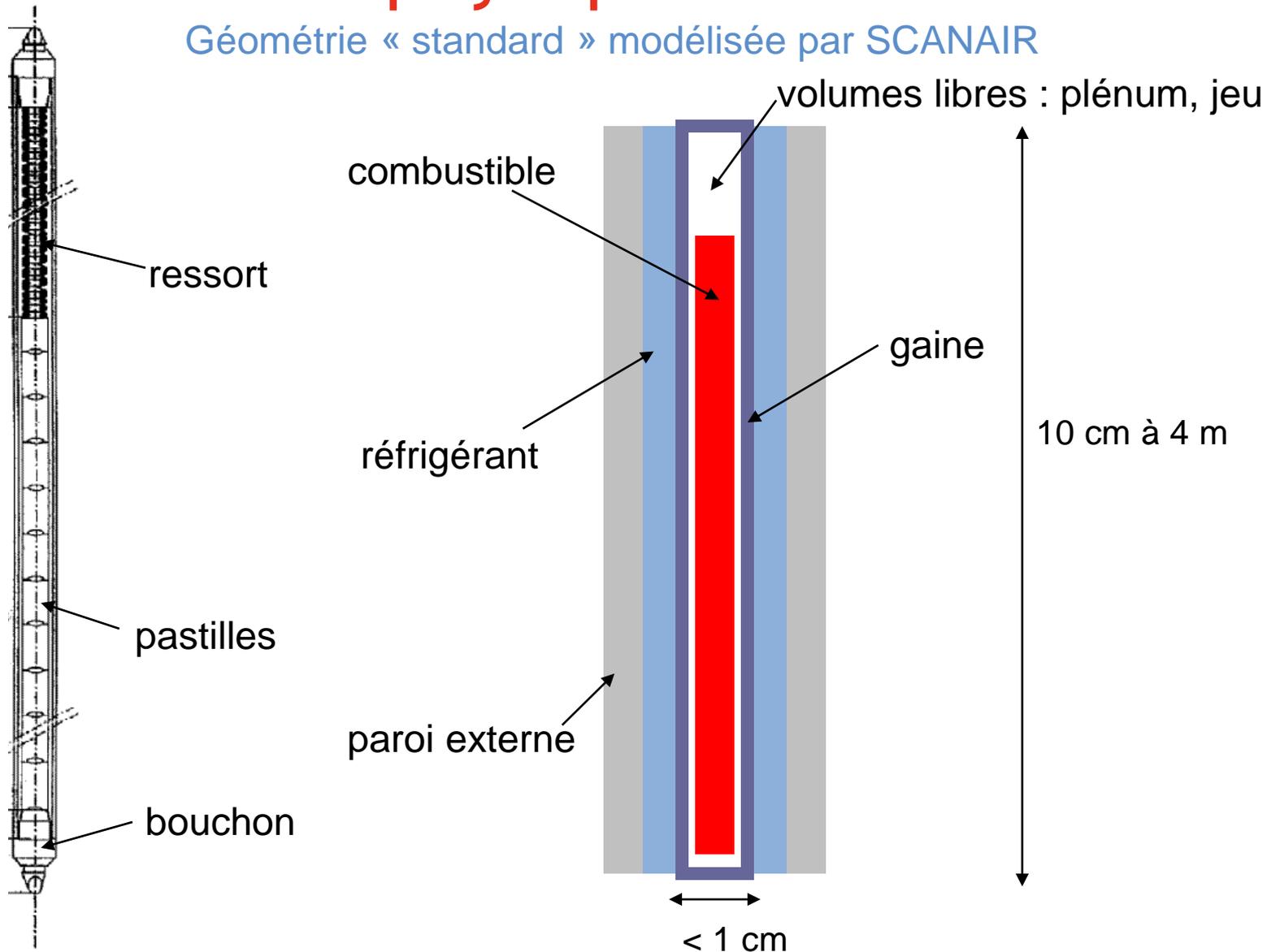
Chargement gazeux
Rupture post-DNB

Comment construire un code de simulation adapté ?

- Identifier les principaux phénomènes
- Module pour décrire ces phénomènes

Code multiphysique : SCANAIR

Géométrie « standard » modélisée par SCANAIR



Code multiphysique : SCANAIR

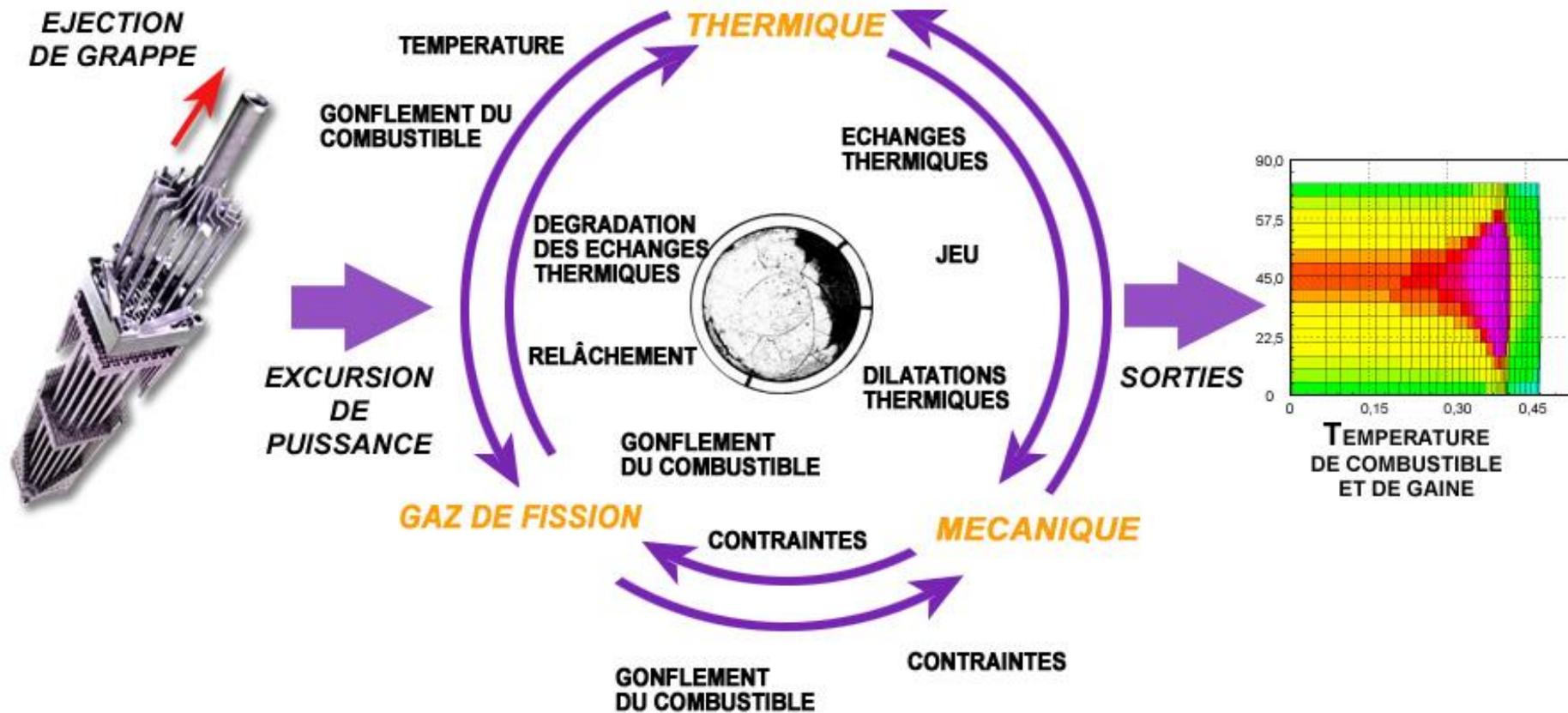
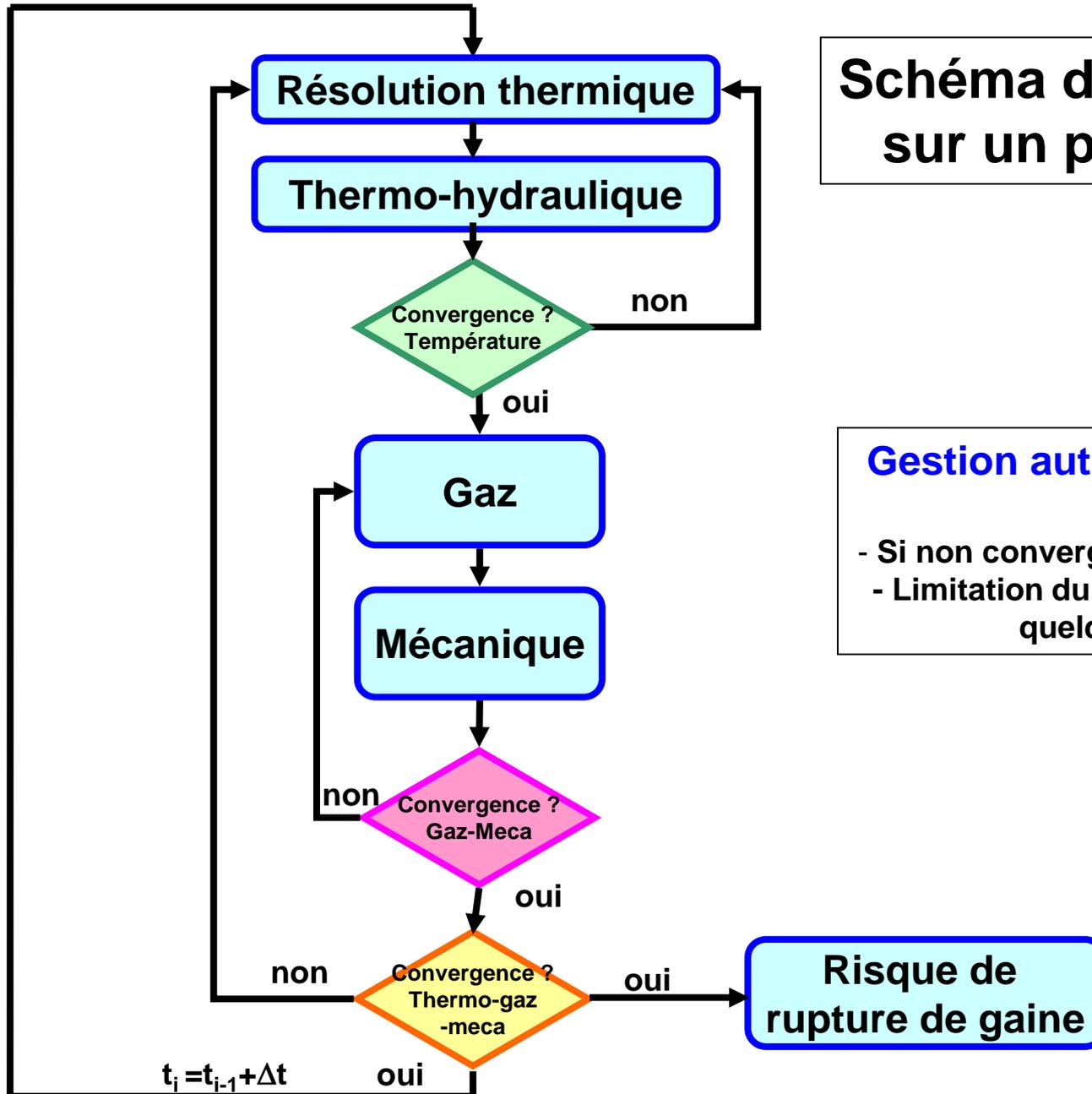


Schéma des couplages sur un pas de temps



Gestion automatique du pas de temps

- Si non convergence → réduction du pas
- Limitation du pas sur les variations de quelques grandeurs

Comment construire un code de simulation adapté ?

- Identifier les principaux phénomènes
- Modules pour décrire ces phénomènes
- Comment on nourrit les modules ?

Outils de simulation : Lois matériaux

Lois thermophysiques Matériaux (combustible/gaine)

- Mécanique, fluage
- Conductivité thermique
- Dilatation thermique
- Densité
- Capacité calorifique ...

Comportement des gaz de fission

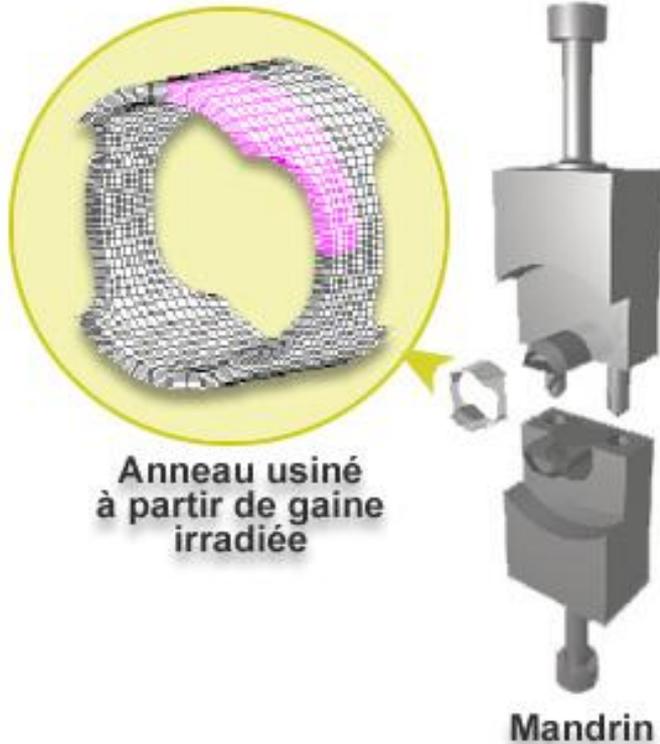
- Diffusion
- Pression
- Gonflement...

Echange thermique Gaine/eau

- Courbe d'ébullition
- Coefficients d'échange...

Code multiphysique : modules analytiques

Essais analytiques

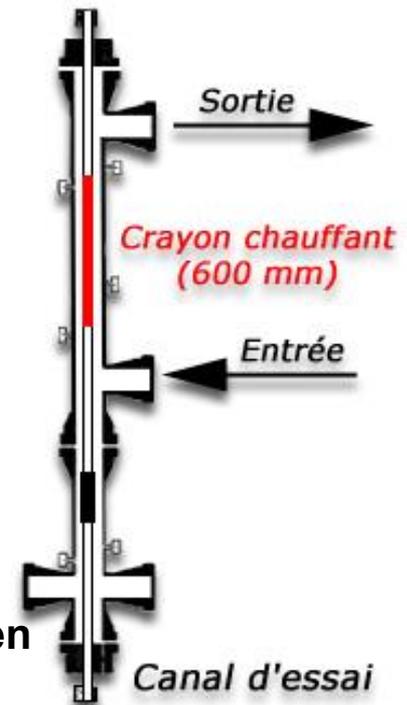


Programme PROMETRA
Caractérisation mécanique des gainages avancés (Zr4, M5, Zirlo, etc.)

Programme gaz de fission à JAERI (JAPON)
Comportement transitoire des gaz de fission pour UO₂ et MOX.
Impact sur chargement mécanique gaine.

Programme ALPS (JAERI)
Complémentarité de CABRI-CIP avec le programme ALPS
Accès à des essais ALPS en cours de négociation avec JAERI.

Programme PATRICIA
Courbe d'ébullition en transitoire rapide.
Coefficient d'échanges en ébullition et post-crise.



Outils de simulation : Lois matériaux

Lois thermophysiques Matériaux (combustible/gaine)

- Mécanique, fluage
- Conductivité thermique
- Dilatation thermique
- Densité
- Capacité calorifique ...

Comportement des gaz de fission

- Diffusion
- Pression
- Gonflement...

Echange thermique Gaine/eau

- Courbe d'ébullition
- Coefficients d'échange...

Outils de simulation : Lois matériaux

Lois thermophysiques Matériaux (combustible/gaine)

- Mécanique, fluage
- Conductivité thermique
- Dilatation thermique
- Densité
- Capacité calorifique ...

Comportement des gaz de fission

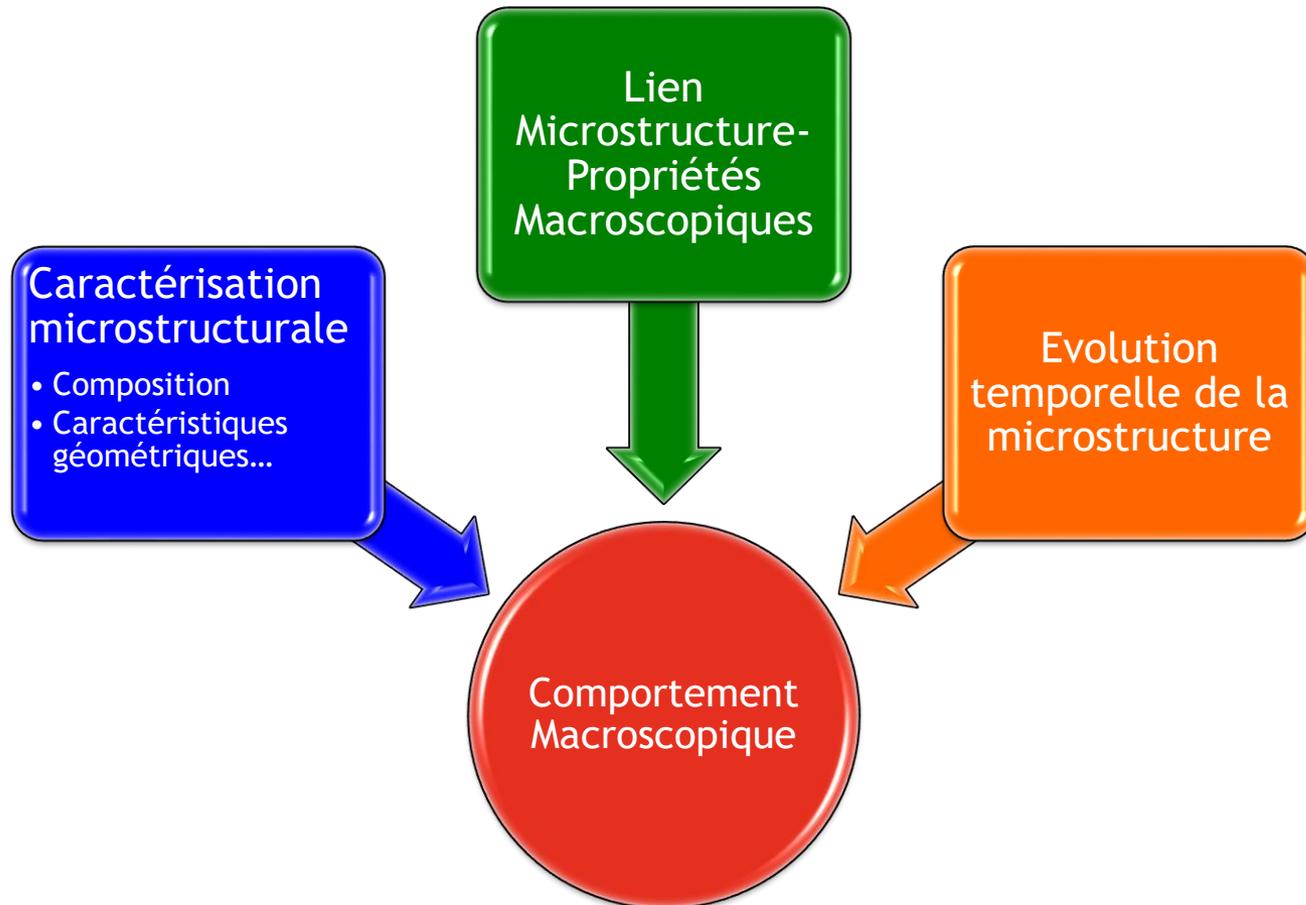
- Diffusion
- Pression
- Gonflement...

Echange thermique Gaine/eau

- Courbe d'ébullition
- Coefficients d'échange...

Fonction de la
microstructure

Outils de simulation : Lois matériaux



Outil de simulation : Lois matériaux

Limitations : utilisation de corrélations $P=f(BU), P=f(\phi)$

a. Domaine de validité : celui utilisé pour l'ajustement

- *Nouveaux matériaux ?*
- *Nouvelles situations ?*
- *Effets faibles ?*

b. Forte dispersion : prise en compte insuffisante de la microstructure

c. Données d'intérêt non accessibles directement expérimentalement

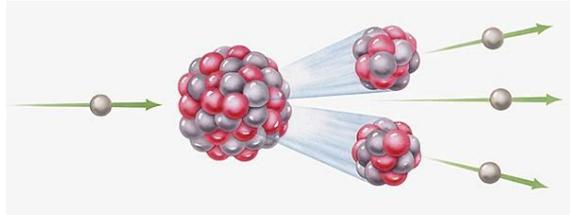
- Données post-mortem
- Effets difficiles à décorréliser
- Domaines physiques difficiles à atteindre

→ **Corrélations à justifier par des modèles physiques avancés, à l'échelle physique pertinente**

Comment construire un code de simulation adapté ?

- Identifier les principaux phénomènes
- Module pour décrire ces phénomènes
- Comment on nourrit les modules ?
- Illustration : cas des gaz rares

Impact de bulles de gaz rares : origines



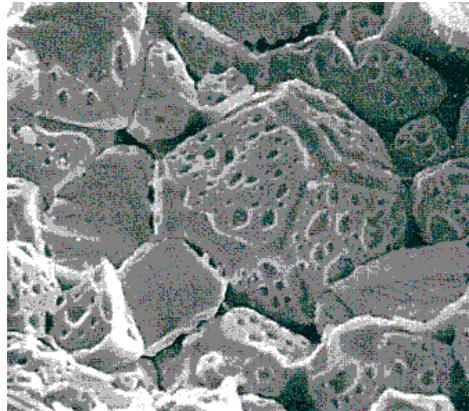
Réaction de fission

Produits gazeux (Xe, Kr)
insolubles dans la matrice de l'UO₂

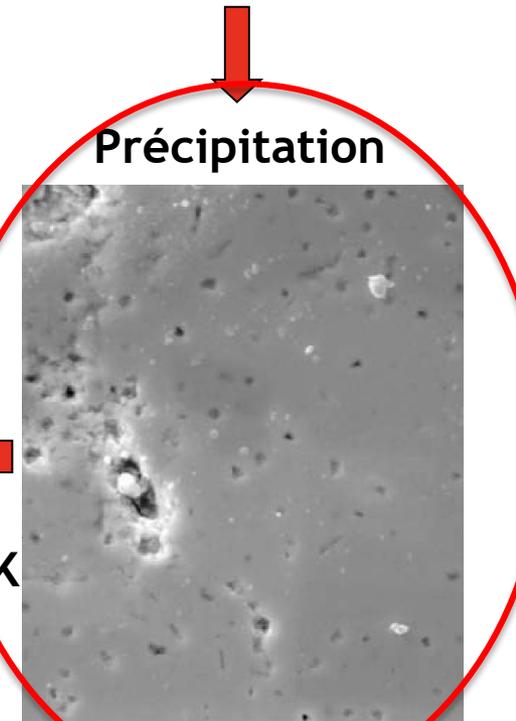


Diffusion jusqu'aux
joints
de grain

Formation de
réseaux
interconnectés
+
Fragmentation
du combustible



Bulles
intergranulaires
(20-100 nm)



Précipitation

T > 1800 K

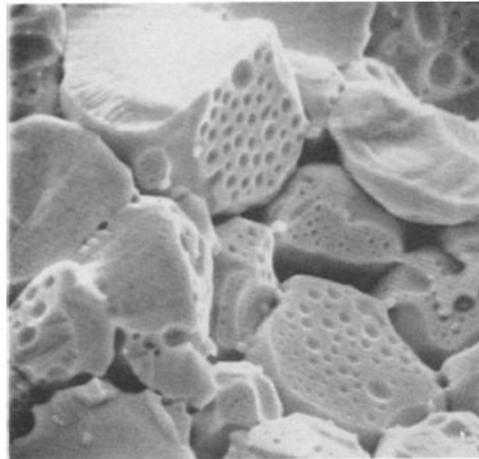
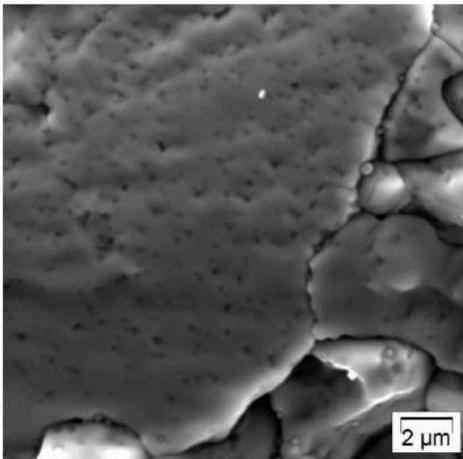
Bulles
intragranulaires
(1-10 nm)



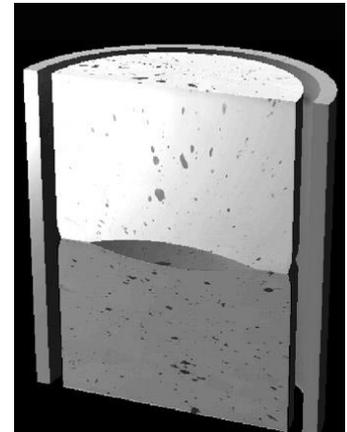
Libération
dans le jeu

Bulles de gaz rares : échelle mésoscopique

Prise en compte de la
microstructure ?



Loi de
comportement
thermomécanique
macroscopique ?



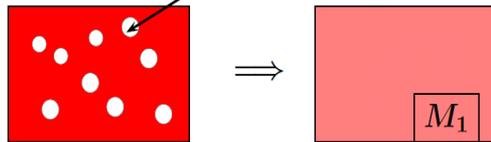
Bulles de gaz rares : échelle mésoscopique

Description de milieux inhomogènes

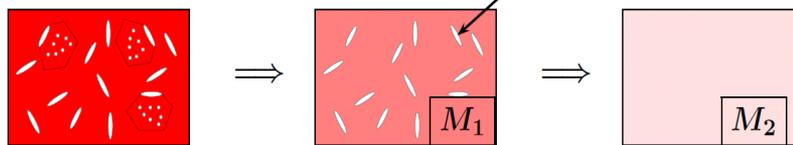
Homogénéisation → Prédire la réponse du matériau à partir de

- Microstructure
- Propriétés des phases individuelles

First scale : intragranular bubbles
porosity f_b , pressure p_b

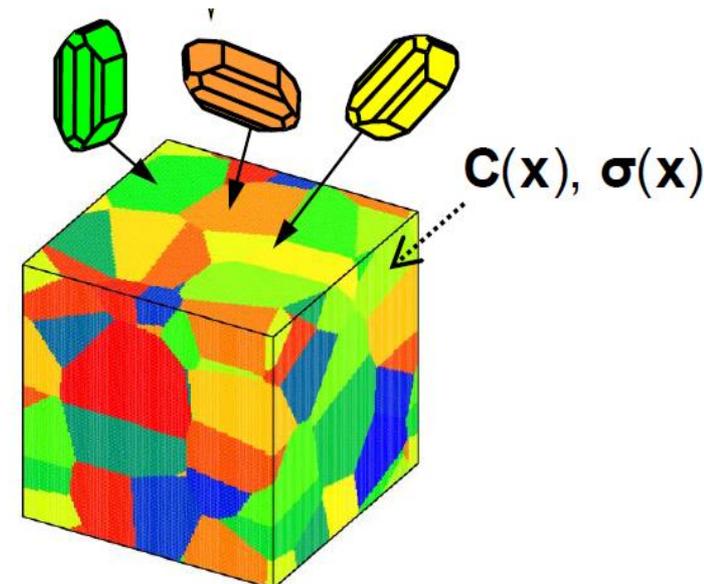


Second scale : intergranular bubbles
porosity f_e , pressure p_e



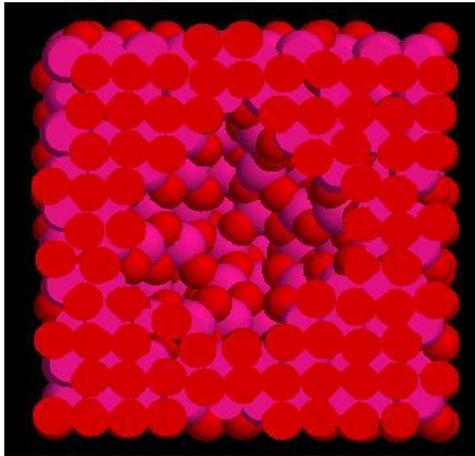
Besoin:

- Representative Volume Element
- Caractéristiques des phases et interfaces

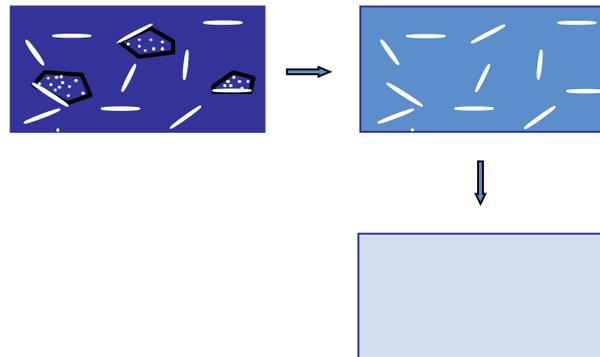
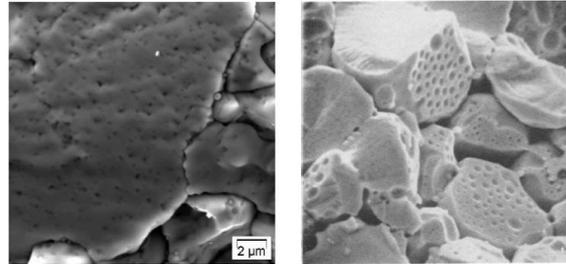


Bulles de gaz rares : approche globale

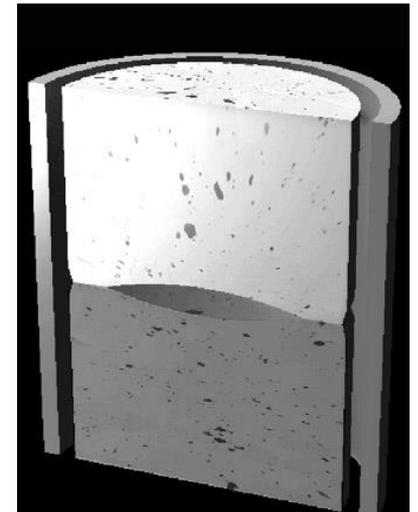
Approche
atomistique



Micromécanique



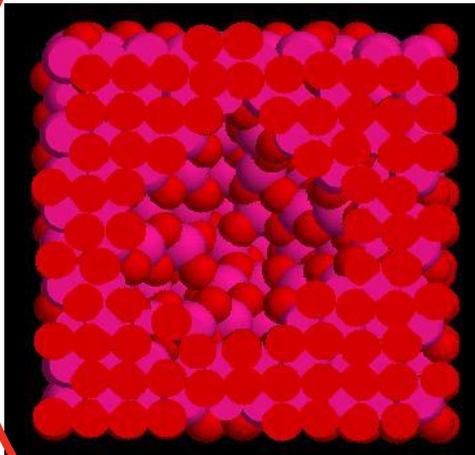
Loi de
comportement
thermomécanique
macroscopique



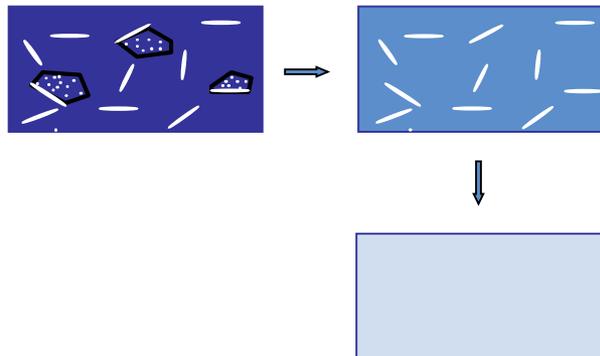
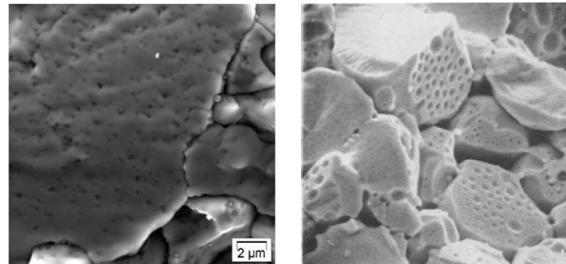
Bulles de gaz rares : approche globale



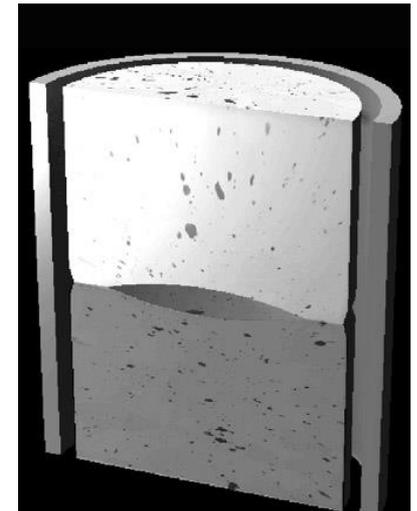
Approche
atomistique



Micromécanique



Loi de
comportement
thermomécanique
macroscopique

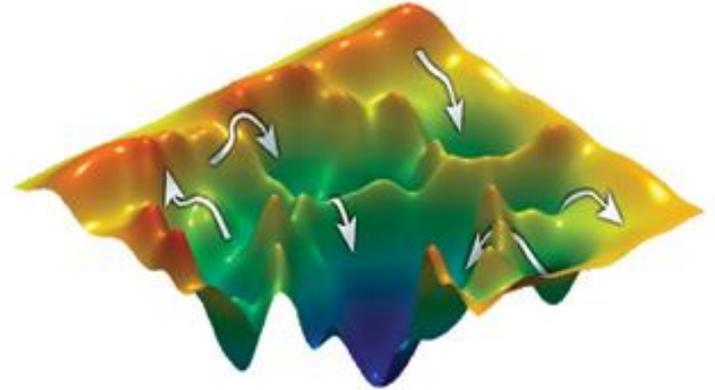


Impact de bulles de gaz rares : outils

Détermination des outils pertinents → Première étape

1. Outils thermostostatiques

- a. Minimisation d'énergie
- b. Dynamique moléculaire
- c. Monte Carlo (N,V,T), (μ ,V,T)...



2. Modèle énergétique

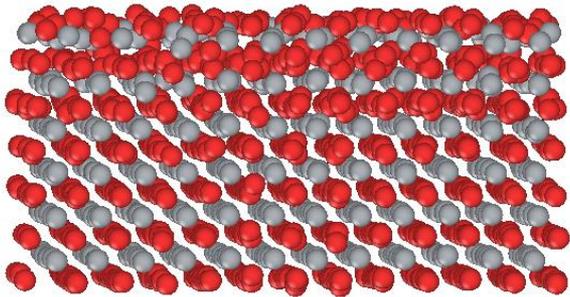
- a. Potentiels semi-empiriques (*Basak, Brearley, Grimes*)

$$V_{i,j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 R_{ij}} + A_{i,j} \exp\left(-\frac{R_{ij}}{\rho}\right) - \frac{C_{i,j}}{R_{ij}^6} + D_{i,j} \left(1 - \exp\left(b(R_0 - R_{ij})\right)\right)^2 - 1$$

Impact de bulles de gaz rares : outils

1. Validation du modèle énergétique pour les surfaces:

→ Comparaison DFT et post HF



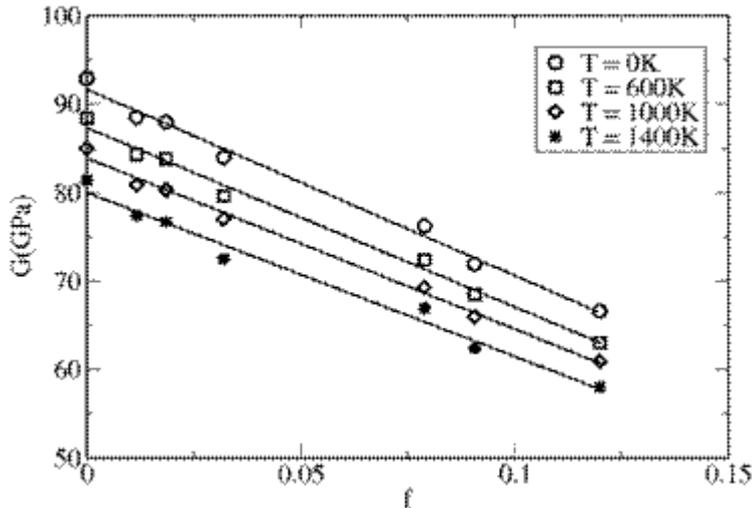
Potentiels	Catlow1	Catlow1	Meis and Gale	Jackson	Grimes
$E_{surf}_{[100]}$	2.32	1.62	-0.26	2.37	2.99
$E_{surf}_{[111]}$	1.19	0.91	0.86	1.19	1.48
Potentiels	Busker	Basak	Q. Mol. Dun.	Q. calculation	T.B.
$E_{surf}_{[100]}$	2.81	2.22	2.01	1.04	1.82-1.95
$E_{surf}_{[111]}$	1.27	1.24	0.86	0.27	0.95

2. Validation du potentiel d'interaction Xe/U, Xe/O

→ Comparaison DFT/expérience (P/T)

→ Ajout d'un terme répulsif à courte portée

Bulles de gaz rares : mécanique



$$\left. \begin{aligned} \frac{G}{G_m} &= 1 - a_G f \\ \frac{E}{E_m} &= 1 - a_E f \end{aligned} \right\} \text{Impact de la porosité}$$

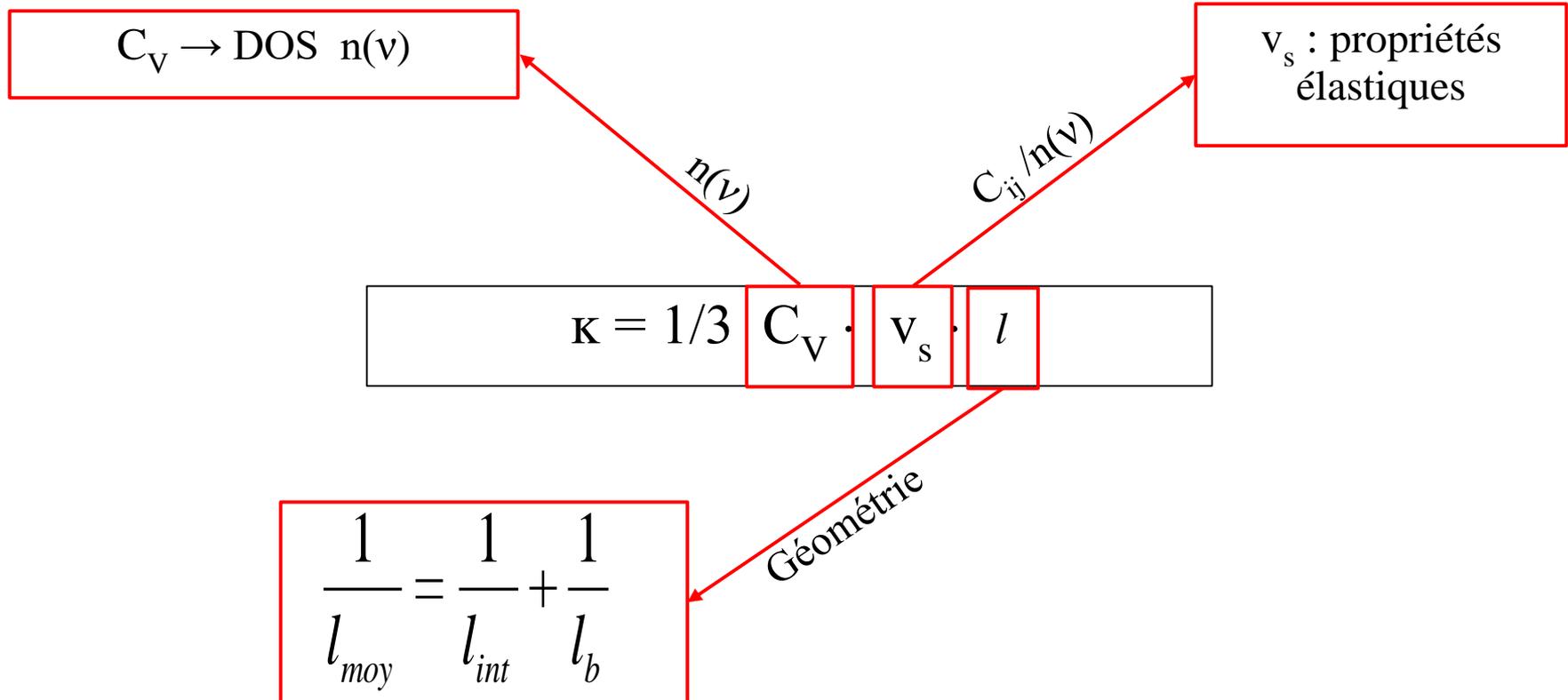
$$\left. \begin{aligned} G_m(T) &= c_G + b_G T + a_G T^2 \\ E_m(T) &= c_E + b_E T + a_E T^2 \end{aligned} \right\} \text{Impact de la température}$$

Bonne concordance avec les résultats micromécaniques et expérimentaux

Analyse plus fine de la dépendance en porosité :

→ effets de surface importants
→ prise en compte aux échelles supérieures

Bulles de gaz rares : thermique

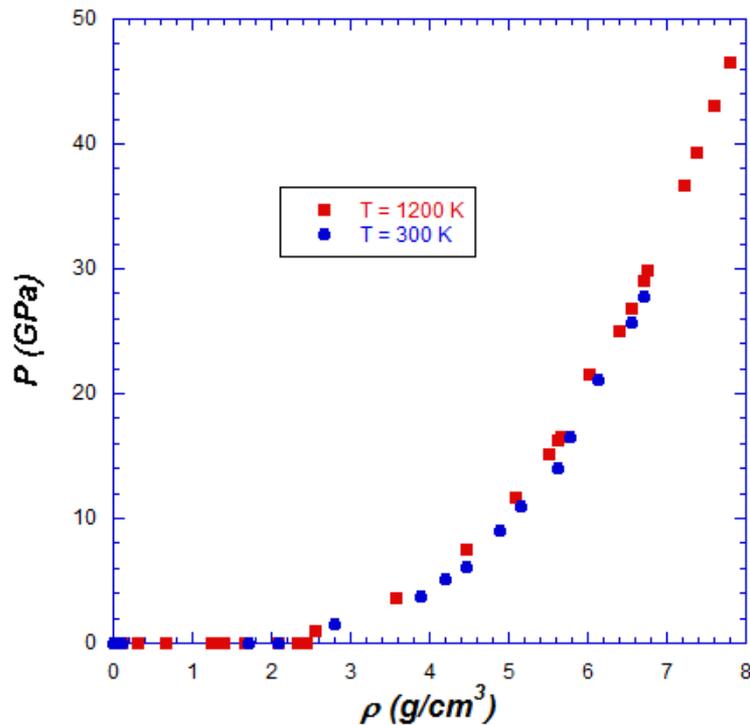


→PITHON : Expression ANALYTIQUE $\kappa = f(T, \rho, r_b)$

M. Colbert, F. Ribeiro and G. Trégia, JAP, 115, 034902 (2014)

Bulles de gaz rares : Pression

$$P_{bubble} = \left\langle \frac{N_{Xe} kT}{V} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{3V} \sum_i \sum_j \left(\frac{1}{2} R_{ij} f_{ij} \cdot \dot{\theta} \right) \right\rangle$$



→ Pas d'effet de la température sur la pression à densité constante

→ $P \gg NkT/V$

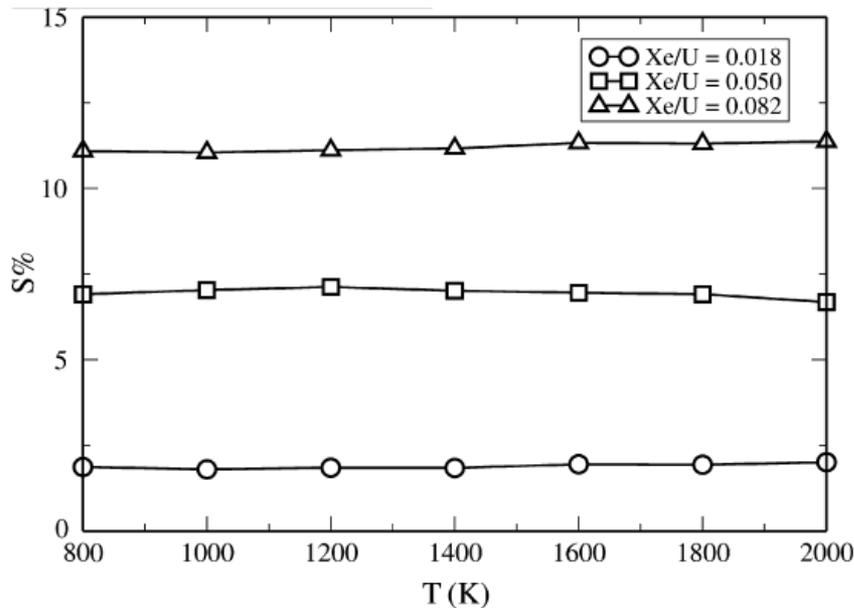
→ Equation d'état de Carnahan-Starling modifiée et implémentée dans SCANAIR

A. Jelea, K.J-M. Pellenq and F. Ribeiro, JNM, 444 (2014)

M. Colbert, G. Trégliã and F. Ribeiro, JPCM (2018)

Bulles de gaz rares : Pression

$$P_{bubble} = \left\langle \frac{N_{Xe} kT}{V} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{3V} \sum_i \sum_j \frac{1}{2} R_{ij} f_{ij} \right\rangle$$



→ Pas d'effet de la température sur le **gonflement** à densité constante

→ $P \gg NkT/V$

→ Equation d'état de Carnahan-Starling modifiée et implémentée dans SCANAIR

A. Jelea, R.J-M. Pellenq and F. Ribeiro, JNM, 444 (2014)

Impact de bulles de gaz rares : Bilan

Structure
électronique :
DFT

- Identifications Potentiels Interatomiques
- Grandeurs thermo/cinétiques

Impact de bulles de gaz rares : Bilan

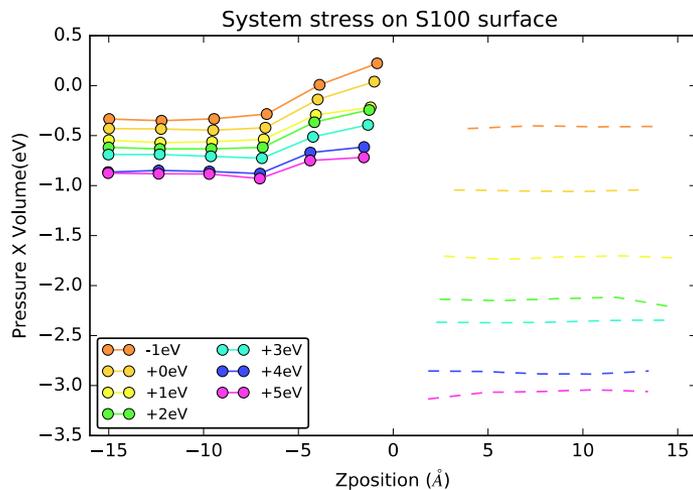
Structure électronique :
DFT

- Identifications Potentiels Interatomiques
- Grandeurs thermo/cinétiques

Echelle atomique :
DM, MC

- Effets Surface
- Conductivité thermique Nanoporeux
- $P_g = f(T, \mu)$
- $P_m = f(T, \mu)$

$$\kappa \simeq \kappa^0 [1 - (\alpha_{Max} + \alpha_\lambda + \alpha_{Cv}) f]$$



Impact de bulles de gaz rares : Bilan

Structure électronique :
DFT

- Identifications Potentiels Interatomiques
- Grandeurs thermo/cinétiques

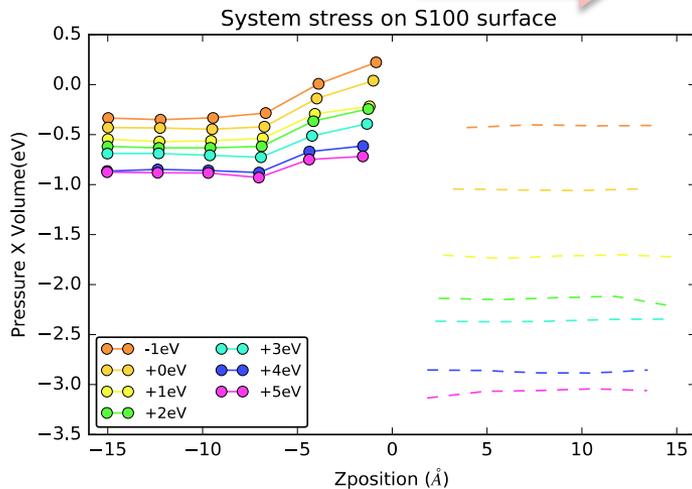
Echelle atomique :
DM, MC

- Effets Surface
- Conductivité thermique Nanoporeux
- $P_g=f(T,\mu)$
- $P_m=f(T,\mu)$

$$\kappa \simeq \kappa^0 [1 - (\alpha_{Max} + \alpha_\lambda + \alpha_{Cv}) f]$$

Echelle mesoscopique :
Micro-mécanique

- *Développements en cours*



Impact de bulles de gaz rares : Bilan

Structure électronique :
DFT

- Identifications Potentiels Interatomiques
- Grandeurs thermo/cinétiques

Echelle atomique :
DM, MC

- Effets Surface
- Conductivité thermique Nanoporeux
- $P_g = f(T, \mu)$
- $P_m = f(T, \mu)$

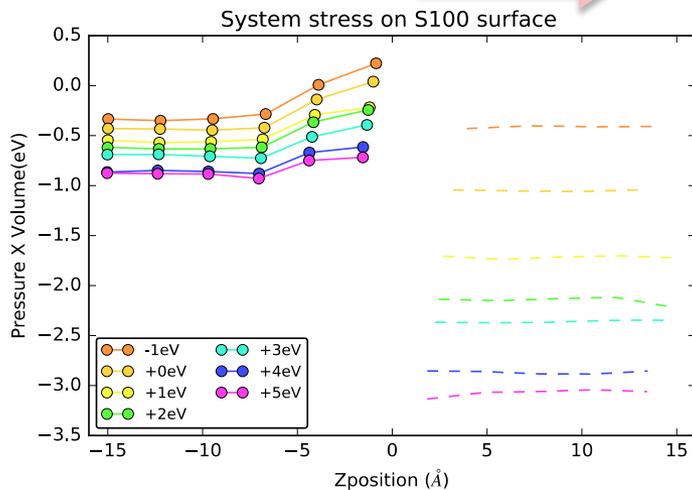
$$\kappa \simeq \kappa^0 [1 - (\alpha_{Max} + \alpha_\lambda + \alpha_{Cv}) f]$$

Echelle mesoscopique :
Micro-mécanique

- *Développements en cours*

Echelle macroscopique :

- Modèles SCANAIR

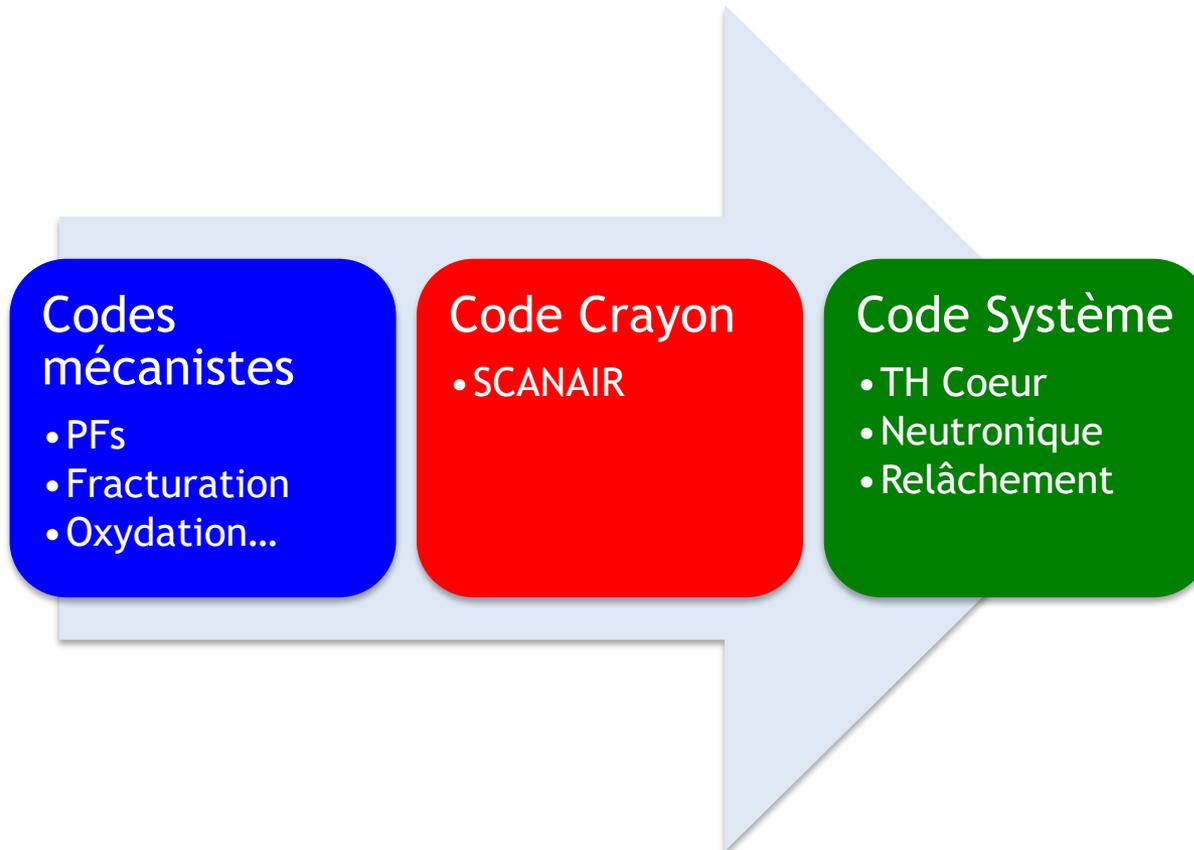


Comment construire un code de simulation adapté ?

- Identifier les principaux phénomènes
- Module pour décrire ces phénomènes
- Comment on nourrit les modules ?
- Illustration : cas des gaz rares
- En pratique...

En pratique : 1 code → des codes

- Ensemble d'outils de simulation de précisions variables



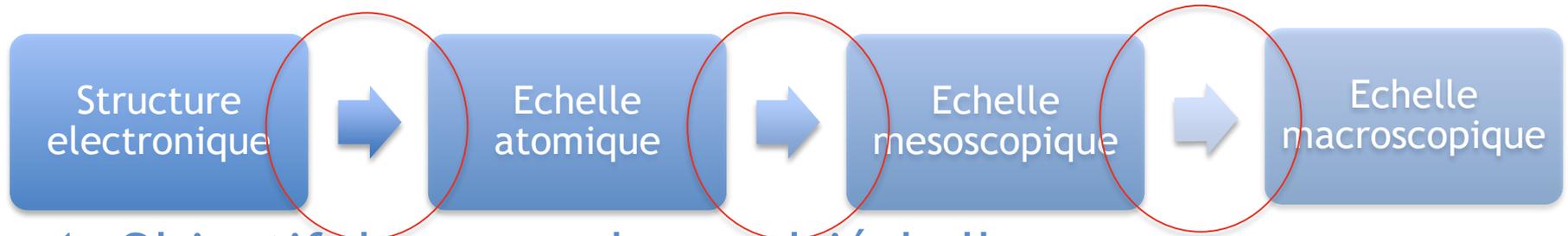
En pratique : 1 code → des codes

- Correspondent à des usages variés
 - Support à l'expertise
 - Interprétation / préparation d'expérience
 - Pérennisation des connaissances

En pratique : 1 code → des codes

- Correspondent à des usages variés
 - Support à l'expertise
 - Interprétation / préparation d'expérience
 - Pérennisation des connaissances
- Répondent à des contraintes variées...
 - Coût numérique
 - Conservatisme ou Best Estimate ?
 - Validation ?

En pratique : 1 outil = 1 code + validation



1. Objectif des approches multiéchelles :

- a. Prédicative
- b. Fiable

2. Comment les valider ?

- a. Chaque échelle : données de référence
 - Echelle inférieure
 - données expérimentales pertinentes
- b. Globale ?
- c. Importance des interfaces

→ Quantification et propagation des incertitudes ??

***Conclusion : Analyse critique des
approches multiéchelles***

Analyse critique des approches multiéchelles

1. Apport

- Identification de mécanismes/phénomènes
- Approche Hi2Low : loi de comportement

$$\mathcal{F}(X, Y) = \sum_i a_i X^i + \sum_j b_j Y^j + \sum_{i,j} C_{ij} X^i Y^j + \dots$$

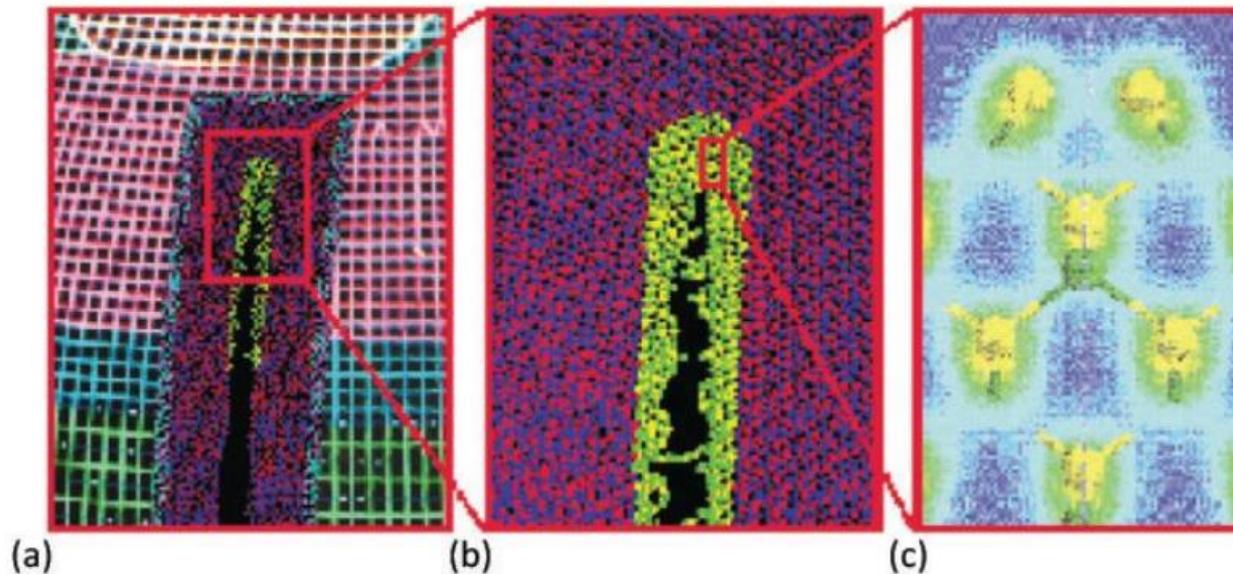
- Paramètres ?
- Variables ?
- Forme de la loi ?

→ *Prédictivité*

Analyse critique des approches multiéchelles

2. Mise en oeuvre :

- MMM hiérarchique/approches hybrides



- 8 Illustration of a hybrid FE, MD, and QM simulation of fracture: *a* system described by FEM outside region of crack tip, whereas in *b* the non-linear region near the crack is handled with the MD method, and *c* a QM approach is used around the crack tip region where bonds break or reform. Reproduced with permission from Fig. 20 in Ref. 174

Elliott, International Material Review ,2011

Analyse critique des approches multiéchelles

3. Cohérence globale de l'approche ?

a. Lois de comportement / lois matériaux

- Dans chaque module
- Parfois lois implicites...
- En franchissant les échelles...

b. Niveau de précision

- Homogène entre les modules
- Compensations d'erreurs !!! (Effectivité cachée...)
- Coût \Leftrightarrow enjeu

→ analyse de sensibilité

c. Prise en compte 1 et 1 seule fois de chaque phénomène

Analyse critique des approches multiéchelles

4. Multiphysique/multiéchelle → Multicompétences

a. Spécialistes modélisation

- Matériaux
- Mécaniques
- Thermiques...

b. Spécialistes expérimentateur

- validation
- Exploitation des données disponibles

c. Spécialistes numériques

- Développeurs/vérificateurs
- Experts sciences des données

→ **Communication !!!**

Conclusion

- Approches multiéchelle en sûreté nucléaire
 - Pourquoi?
 - Comment?
 - Cas particulier : données...

Merci beaucoup !