

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# Modélisation multiéchelle des matériaux

Fabienne Ribeiro

# Présentation :



**Expert public en charge de l'évaluation scientifique  
du risque nucléaire et radiologique**

**Cette expertise s'appuie sur la recherche**

# Plan

1. Généralités : approches multiéchelles
2. Les principaux barreaux
3. Exemple : cas du combustible nucléaire
4. Questions ouvertes
5. Conclusions



# Généralités sur les approches multiéchelles

# Les approches multiéchelles en quelques chiffres

Nombre de publications :

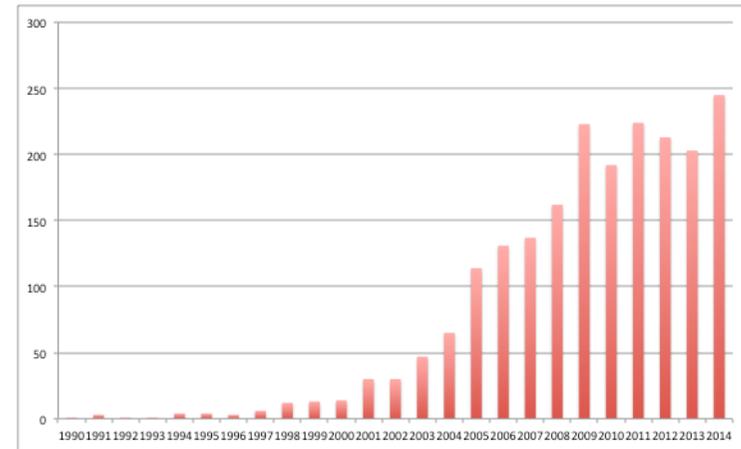
↗ depuis 2005

Journaux dédiés :

- Journal of multiscale modelling (2009)
- Multiscale modeling and simulation (2003)
- International Journal for multiscale computational engineering (2003)...

Congrès dédiés :

- Multiscale Materials Modelling (2002)
- Multiscale Modelling and simulation ICCS (2004)...



# Pourquoi cet engouement pour les approches multiéchelles ?

Matériaux technologiques == Matériaux complexes  
Essor des nanotechnologies/nanosciences

□ Performance accrues = complexité maîtrisée

→ **Besoins**

□ Progrès informatiques (et expérimentaux) : accès à des simulations de + en + complexes

→ **Moyens**

# Modéliser les propriétés des matériaux ?

Propriétés des matériaux :

- Mécaniques
- Thermiques
- Electriques
- Optiques...

→ Lien propriétés / microstructure ?

# Modéliser les propriétés des matériaux ?

## Matériaux :

- chimie (composition)
- microstructure  
(fabrication, histoire, environnement...)

## Importance des défauts :

matériaux réels  $\neq$  solide parfait périodique

# Modéliser les propriétés des matériaux ?

Deux questions principales :

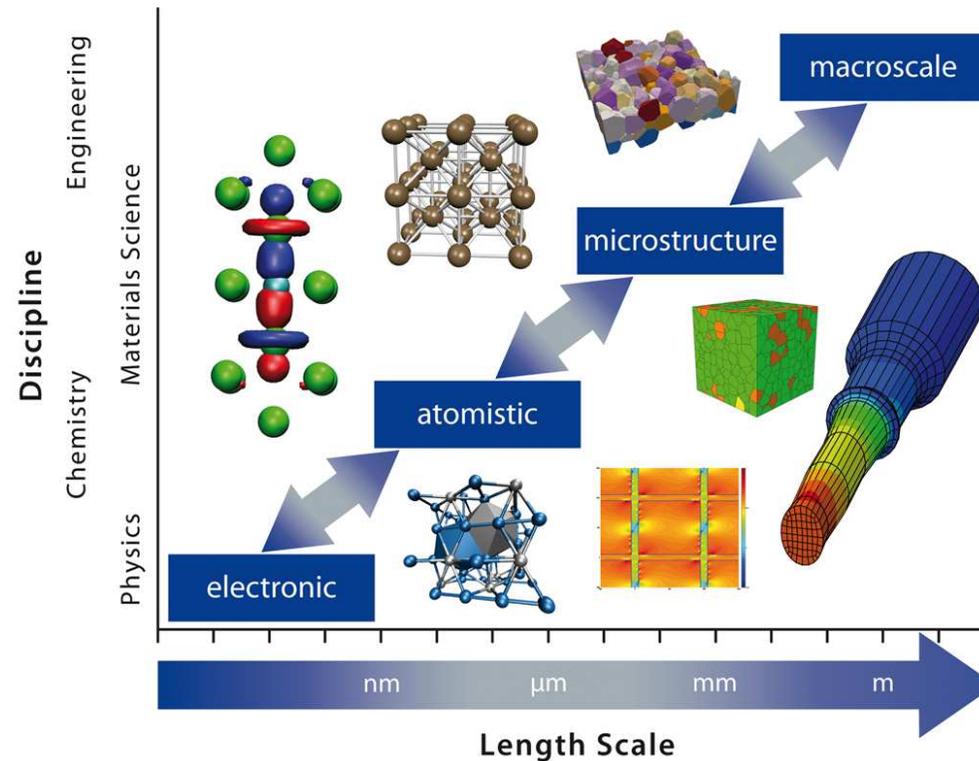
1. Lien microstructure/propriétés macroscopiques
2. Évolution temporelle de la microstructure

# Définir la modélisation multiéchelle ?

Wikipedia :

*Multiscale modeling is aimed to calculation of material properties or system behavior on one level using information or models from different levels*

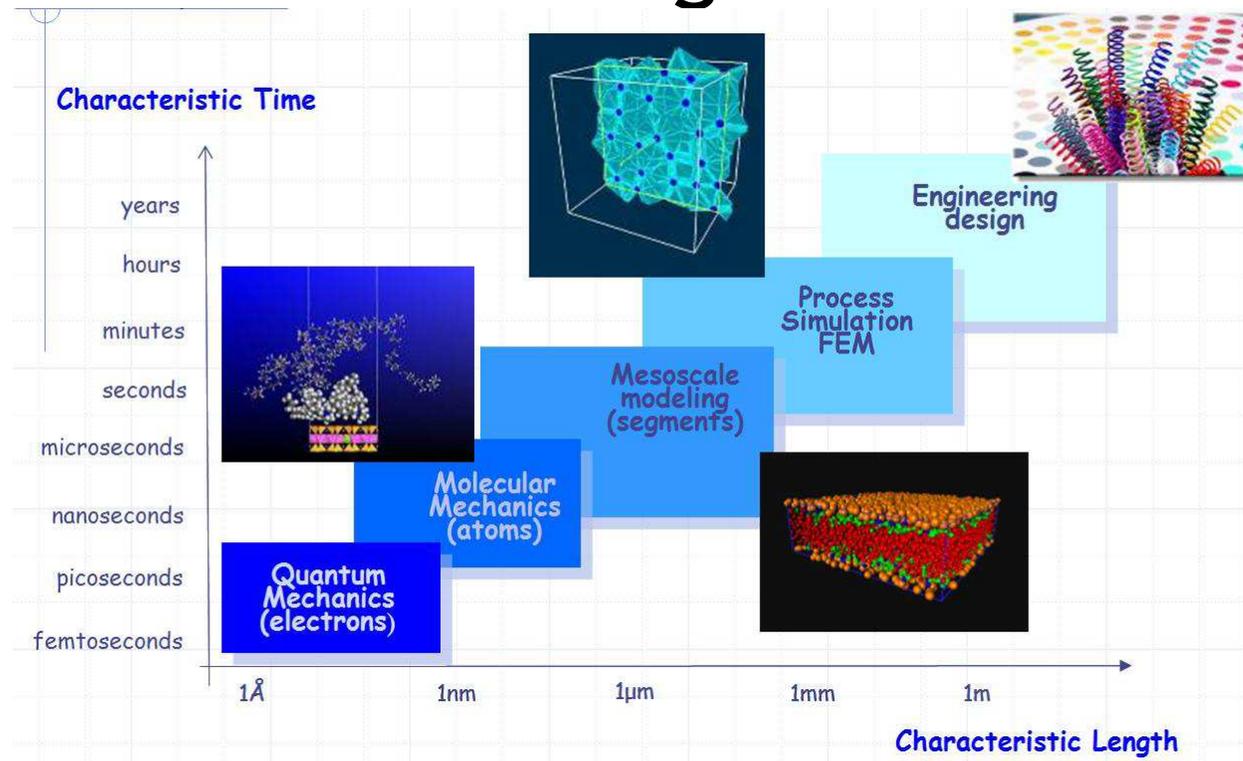
# Les approches multiéchelles en images



<http://www.icams.de>

- Nature des objets d'études différente
- Disciplines différentes (Math, Physique, Chimie, Mécanique...)

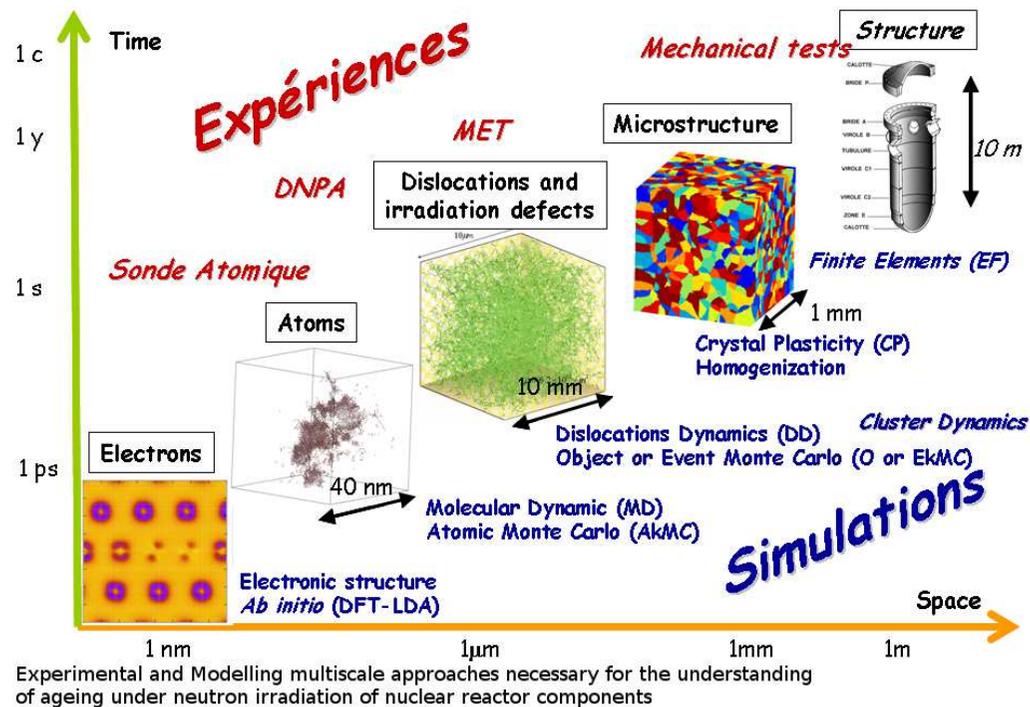
# Les approches multiéchelles en images



<http://www.mose.units.it>

- Echelles de temps et d'espace

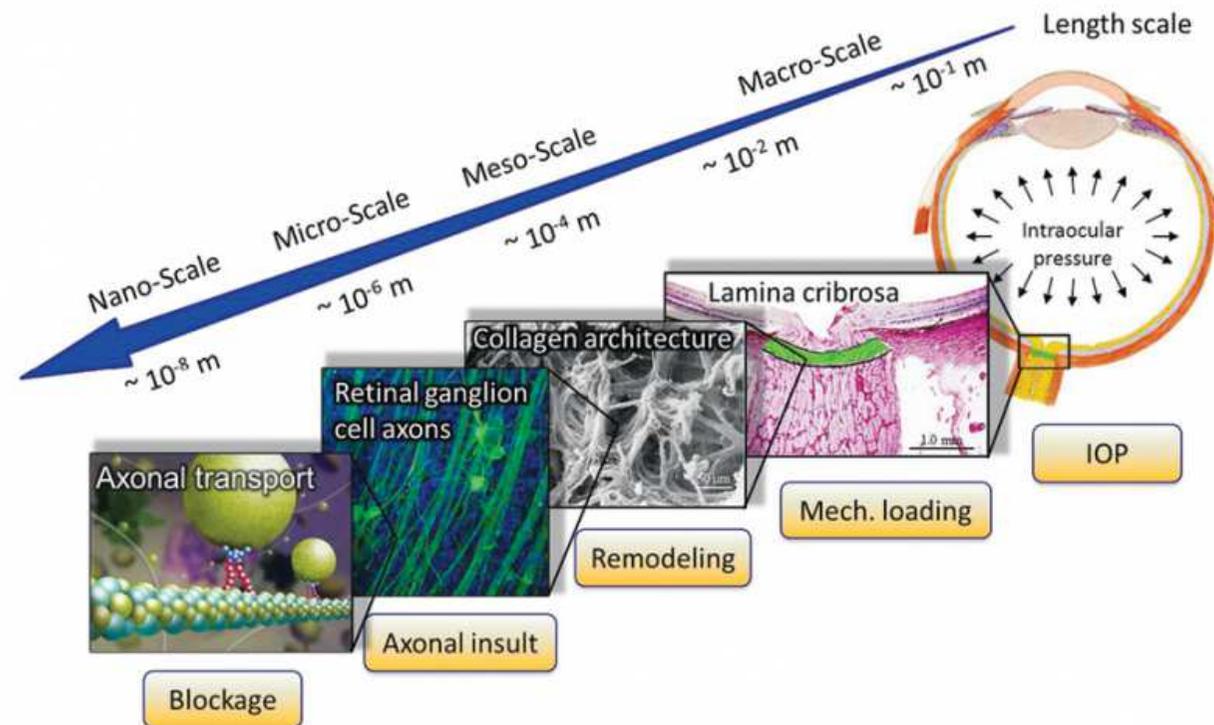
# Les approches multiéchelles en images



[mecamat2013.lmgc.univ-montp2.fr](http://mecamat2013.lmgc.univ-montp2.fr)

- Lien intrinsèque avec l'expérience

# Les approches multiéchelles en images



[biomedicalcomputationreview.org](http://biomedicalcomputationreview.org)

- Sciences de matériaux mais pas que... même en sciences économiques...

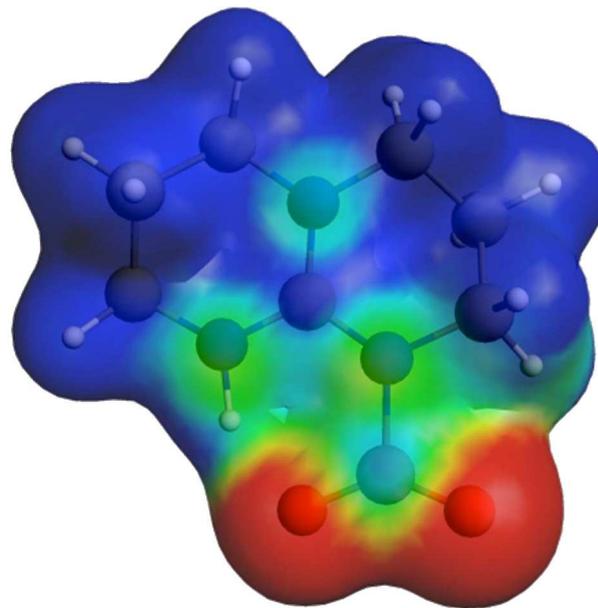


# Les principaux « barreaux »

---

Les principaux « barreaux »

Echelle électronique



# A l'échelle des électrons (quantique)

Equation de Schrödinger :

$$H_T |\phi\rangle = U |\phi\rangle$$

L'énergie interne du système peut se décomposer sous la forme suivante :

$$U = T_e + V_{ee} + V_{en} + T_n + V_{nn}$$

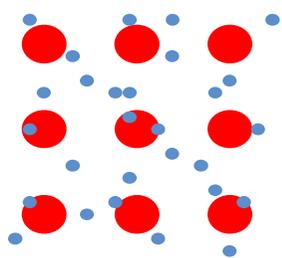
Soit un terme purement **électronique**  $T_e + V_{ee}$ , un terme **nucléaire** (lié aux mouvements et interactions des noyaux)  $T_n + V_{nn}$  et un **terme de couplage**  $V_{en}$

→ Insoluble analytiquement au delà de l'Hydrogénoïde...

→ Approximations nécessaires

# A l'échelle des électrons (quantique)

Approximation adiabatique :



On découple le mouvement  
des noyaux et des électrons

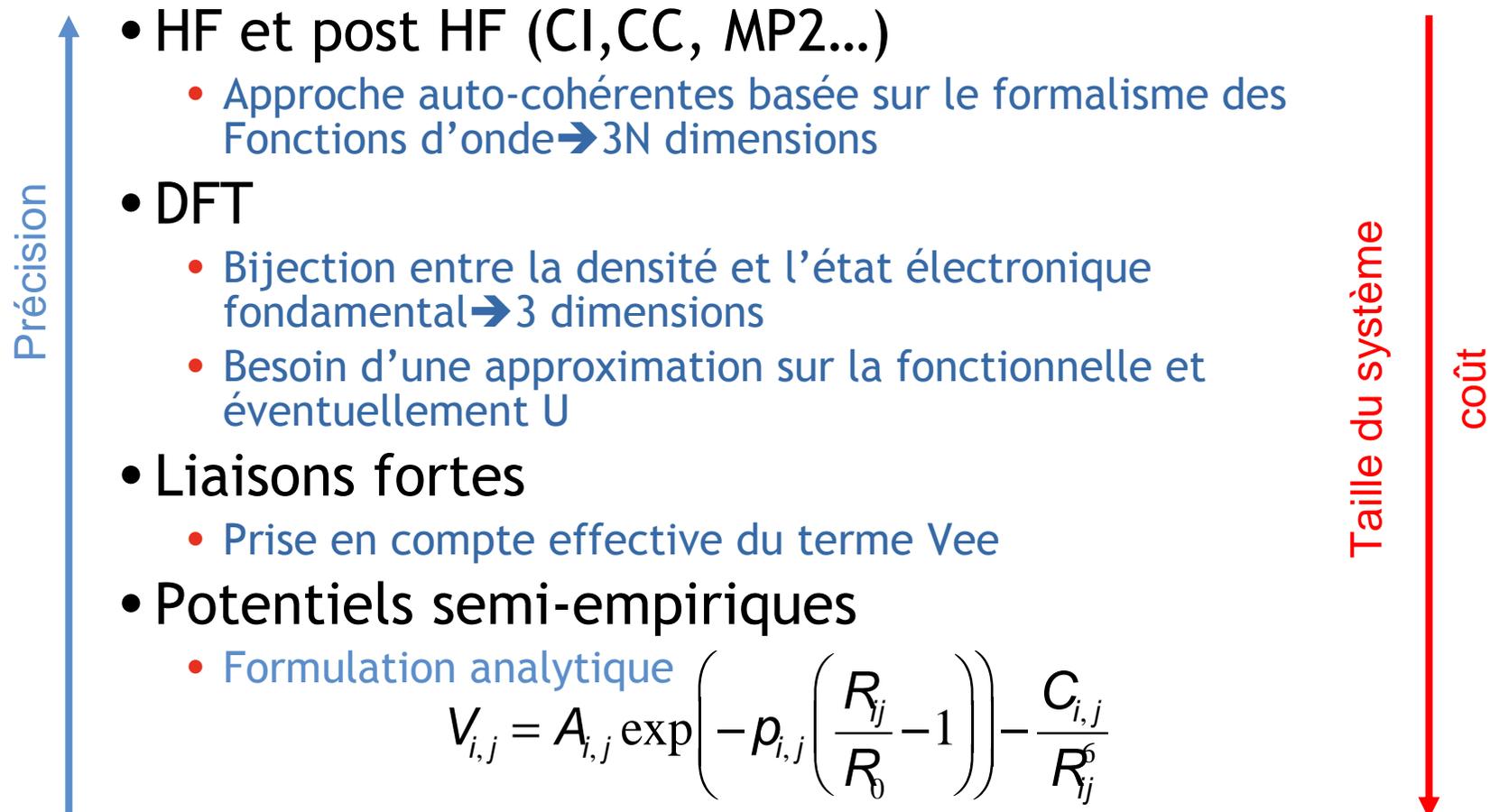
$$E_e = T_e + V_{ee} + V_{en}$$

L'énergie électronique, c'est le paysage dans lequel se déplacent les noyaux



# A l'échelle des électrons (quantique)

Méthodes de résolution : → cf. C. Delerue/C. Marinica



# A l'échelle des électrons (quantique)

**Le calcul de l'énergie électronique permet :**

- La détermination des phases stables
- La détermination des énergies de réaction chimique
- L'identification des barrières de réaction chimique ou de diffusion et donc des mécanismes
- Le calcul des propriétés optiques et élastiques d'un matériau

→ le tout à **OK** si les noyaux sont supposés fixes

→ **Besoin de thermostatique pour aller au delà**

# A l'échelle des électrons (quantique)

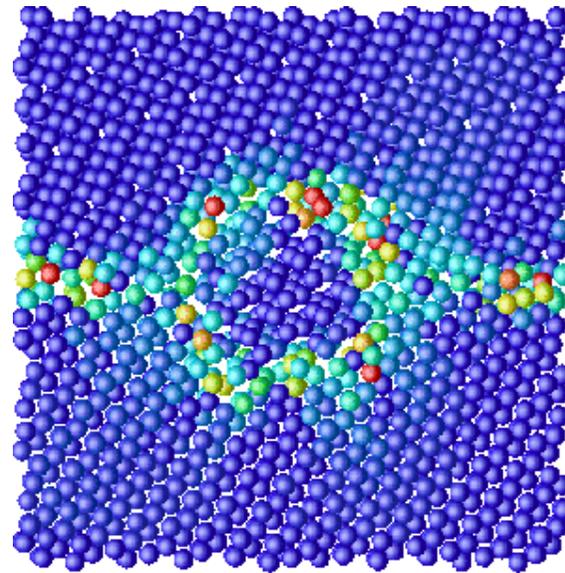
Méthode	Approximations	Avantages	Inconvénients
Hartree fock et post Hartree Fock (MP2, CC...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Approche ab initio</li> <li>• Choix d'une base de travail</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calculs très précis de la structure électronique</li> <li>• Accès à la réactivité chimique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très couteux en temps (quelques 10 d'atomes)</li> <li>• Souvent difficile à mettre en œuvre pour des solides</li> </ul>
DFT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Approche 'ab initio' (plutôt premier principe en fait)</li> <li>• Choix d'une base de travail</li> <li>• Choix d'une fonctionnelle (GGA, LDA, etc...) et éventuellement d'un terme de Hubbard U</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calculs très précis de structure électronique</li> <li>• Accès à la réactivité chimique</li> <li>• Plus rapide que HF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reste couteux en temps (quelques dizaines ou centaines d'atomes)</li> <li>• Dépendance à la fonctionnelle et à U</li> </ul>
Tight Binding (Liaison forte, Huckel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Repose sur des paramètres tabulés pour chaque éléments considérés</li> <li>• Bien adaptés pour les premières lignes de la classification périodique et les métaux de transition (seuls l'interaction entre atomes voisins est considérée et tabulée)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très rapide</li> <li>• Calcul précis de structure électronique.</li> <li>• La plupart des termes d'interactions sont déjà tabulés dans des ouvrages de référence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bien adapté aux métaux, plus délicat si on veut introduire d'autres atomes</li> </ul>
Potentiel semi-empiriques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potentiels ajustés : forme analytique fixe, potentiel à 2, 3 ou N corps.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrêmement rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potentiel a priori valide uniquement dans le domaine pour lequel il a été construit</li> <li>• Pas de réactivité chimique ou de propriétés optiques</li> <li>• Potentiel à développer pour chaque couples d'atomes</li> </ul>

↑ Précision

↓ Taille du système  
coût

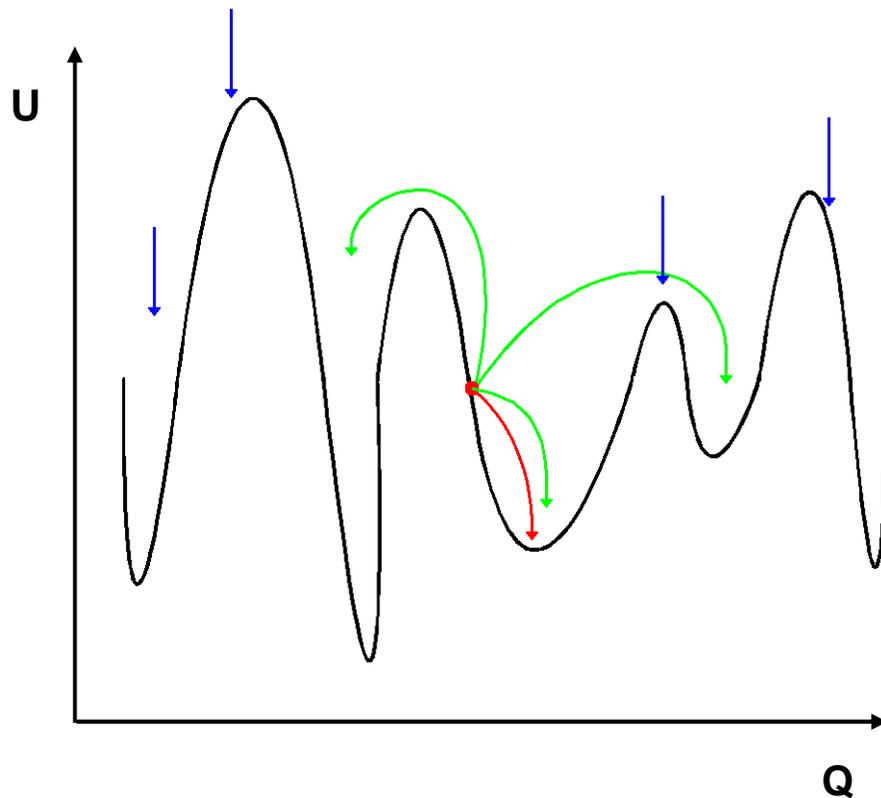
# Les principaux « barreaux »

## Echelle atomique



*lassp.cornell.edu*

# A l'échelle atomique : thermodynamique



Minimisation d'énergie →

$$\frac{\Delta U}{\Delta r_i} = 0$$

Dynamique moléculaire = approche déterministe →

$$\vec{F} = -\nabla U = m \vec{a}$$

→ *approche locale*

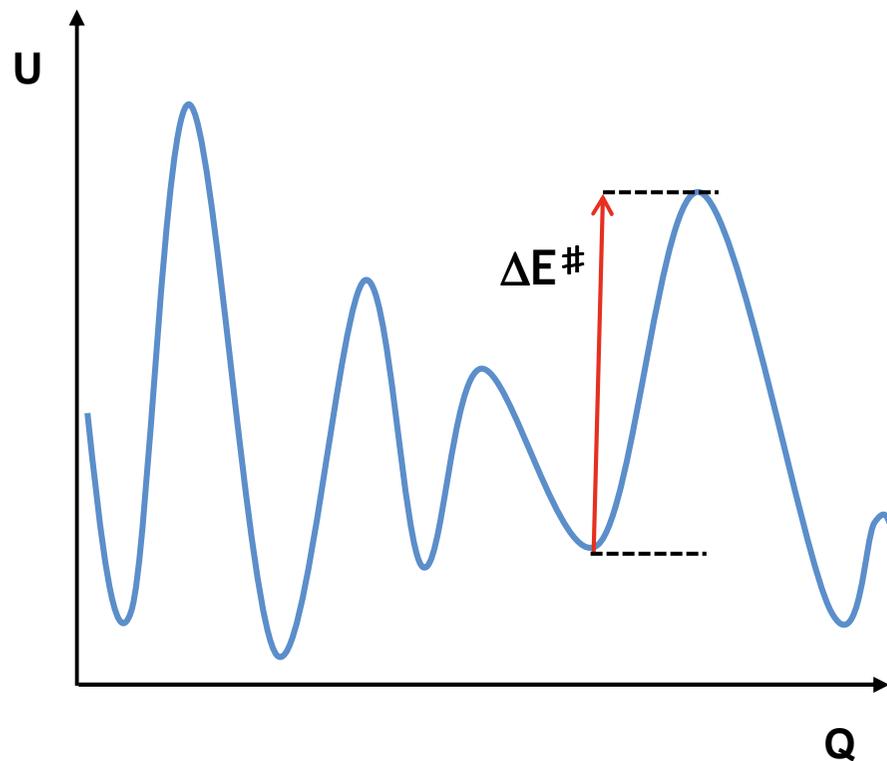
Monte-Carlo = approche probabiliste →

$$P \propto e^{\Delta U/k_B T}$$

→ *échantillonnage plus global*

→ cf. C. Marinica

# A l'échelle atomique : cinétique



→ cf. A. Heymerick/M. Nastar

## Monte Carlo Cinétique (KMC)

- Taux de transition :

$$R_{i \rightarrow j} = \omega_0 \exp\left(\frac{-E_{i \rightarrow j}^\ddagger}{kT}\right)$$

- Temps de résidence :

$$\tau_i = -\frac{\ln(r)}{\sum_{k=1}^z R_{i \rightarrow k}}$$

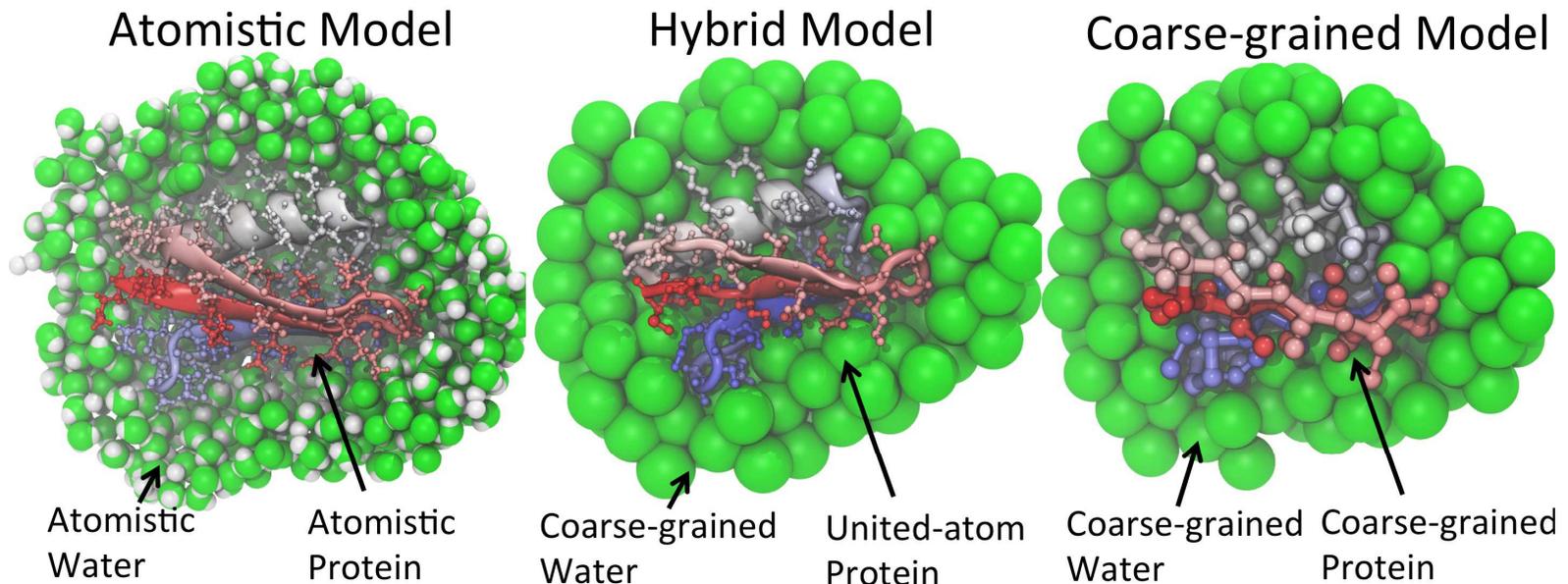
→ Besoin de recenser et calculer tous les  $R_{i \rightarrow j}$

# A l'échelle atomique

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénient
Dynamique moléculaire	Propagation de l'équation de Newton	<ul style="list-style-type: none"><li>• Accès aux données temporelles (coefficients de diffusion)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Très couteux en temps (quelques 100 000 atomes pendant quelques nanosecondes)</li><li>• Besoin de forces intramoléculaires (simple uniquement si on a un potentiel interatomique analytique)</li></ul>
Monte Carlo	Tirage aléatoire de configuration acceptées avec une statistique de Boltzman	<ul style="list-style-type: none"><li>• Plus rapide que la Dynamique moléculaire pour relaxer un système</li><li>• Possibilité de varier les stœchiométries/nombres de particules</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reste couteux en temps (Quelques 100 000 atomes)</li><li>• Pas d'approche temporelle</li></ul>
Monte Carlo Cinétique	Détermination d'un temps de résidence associé à une configuration et passage à la configuration suivante par processus élémentaire	<ul style="list-style-type: none"><li>• Très rapide</li><li>• Permet d'accéder à des échelles de temps de la s et au delà.</li><li>• Accès aux mécanismes de diffusion, précipitation, changement de phase et à leur cinétique</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Suppose une détermination a priori de tous les mécanismes élémentaires possibles et de leur énergie d'activation</li><li>• Difficile à utiliser si le système présente des petites et des grandes barrières...</li></ul>

# Au delà de l'atome...

## 1. Coarse-grained Molecular dynamic

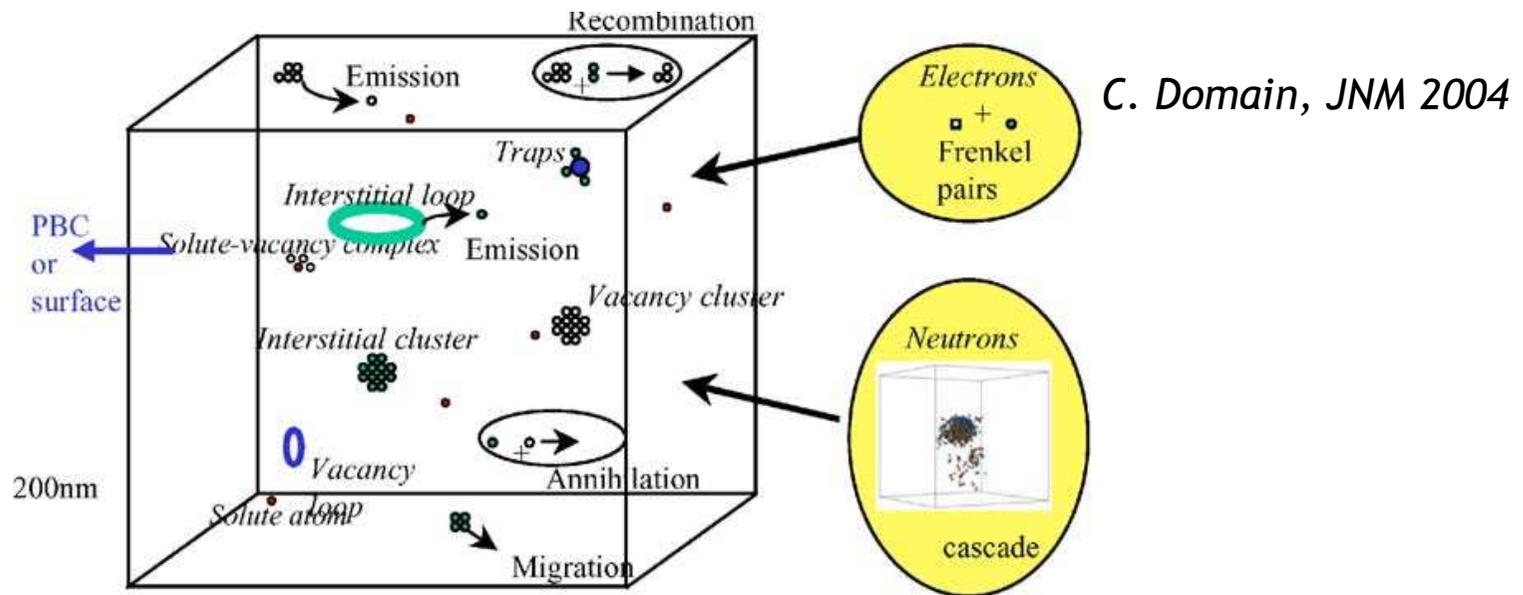


[ks.uiuc.edu](http://ks.uiuc.edu)

→ Besoin de quantifier les interactions entre les groupes d'atomes

# Au delà de l'atome...

## 2. Object/Event Kinetic Monte Carlo



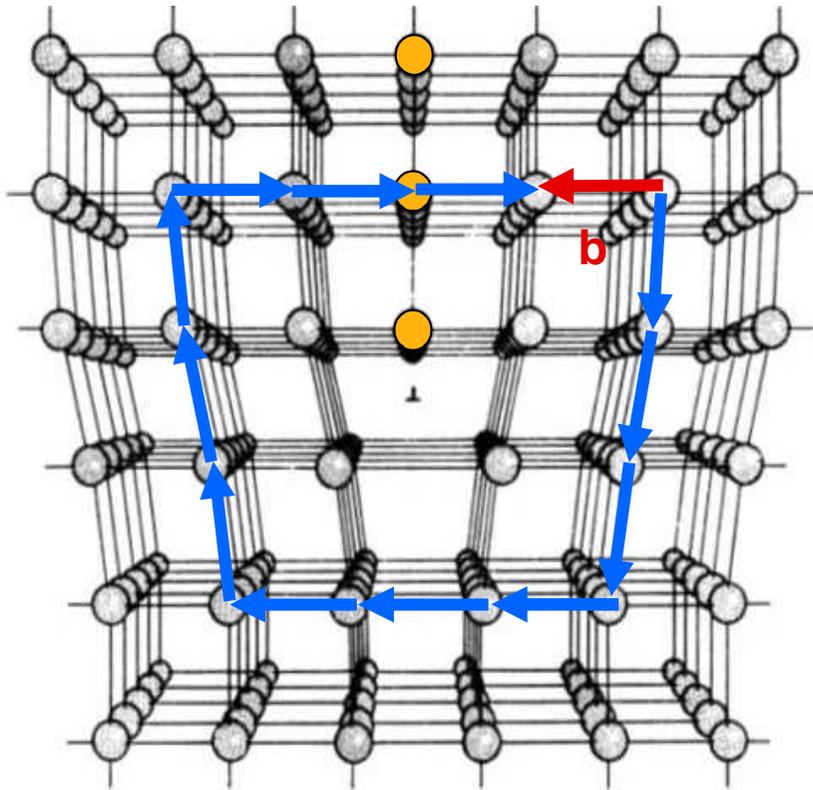
→ Besoin de lister les évènements, les objets et leur énergétique d'interaction



Les principaux « barreaux »  
Echelle micron

# À l'échelle des dislocations

Des défauts étendus importants : les dislocations

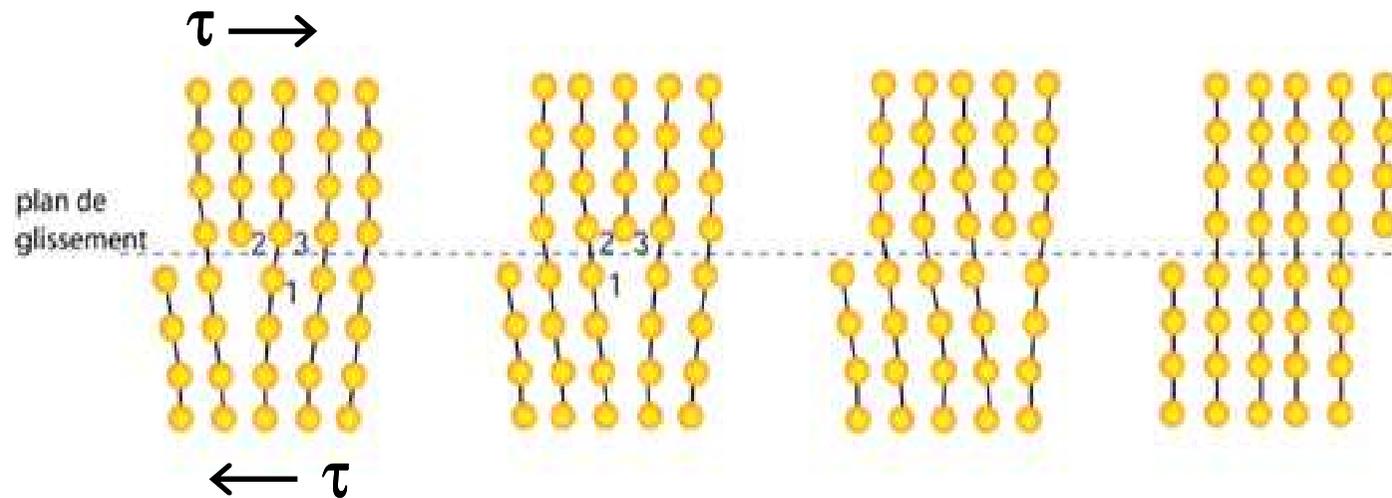


dislocation edge

- Défaut linéaire
- Potentiellement mobile

# À l'échelle des dislocations

## A l'origine de la plasticité

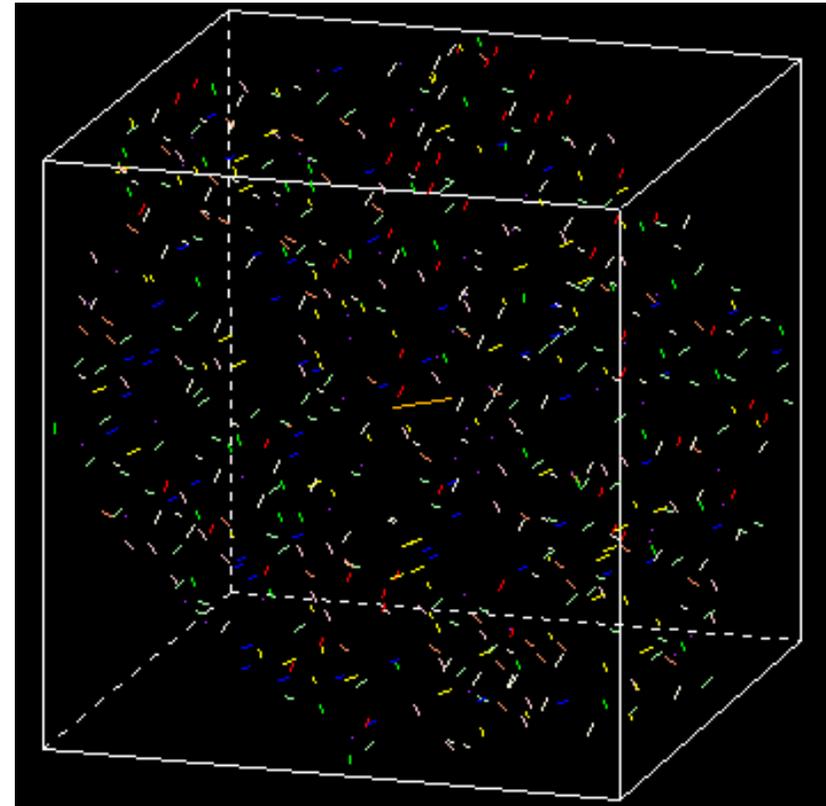


→ cf. E. Clouet

# À l'échelle des dislocations

## Dynamique des Dislocations Discrète (DDD) :

- Comportement / contrainte  
(vitesse, règle de glissement)
- Comportement / obstacle  
(surface, précipité)
- Comportement / dislocations  
(jonction, annihilation...)



[www.numodis.fr/tridis](http://www.numodis.fr/tridis)

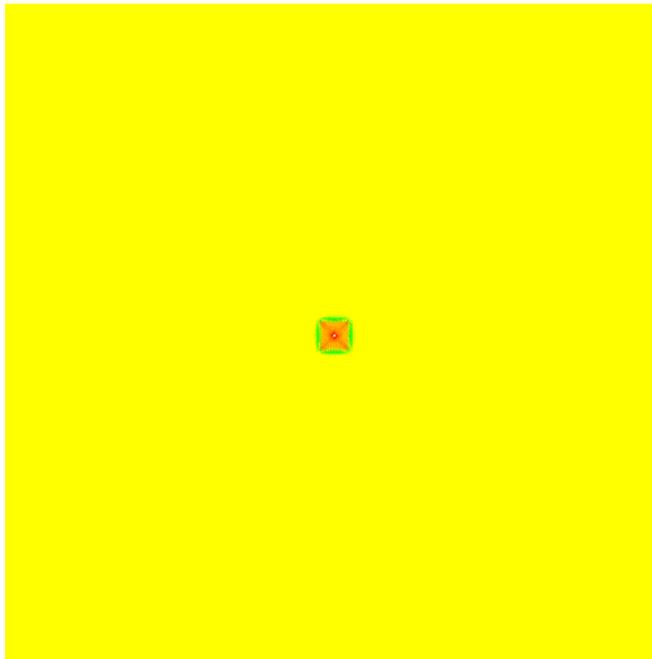
→ Identifiées par DM ou expérimentalement (MET)



**Les principaux « barreaux »**  
**Echelle mésoscopique**

# À l'échelle des grains : champ de phase

## Description du comportement des interfaces



Application :

- Solidification
- Electrodéposition
- Croissance de grains...

<http://www.ctcms.nist.gov>

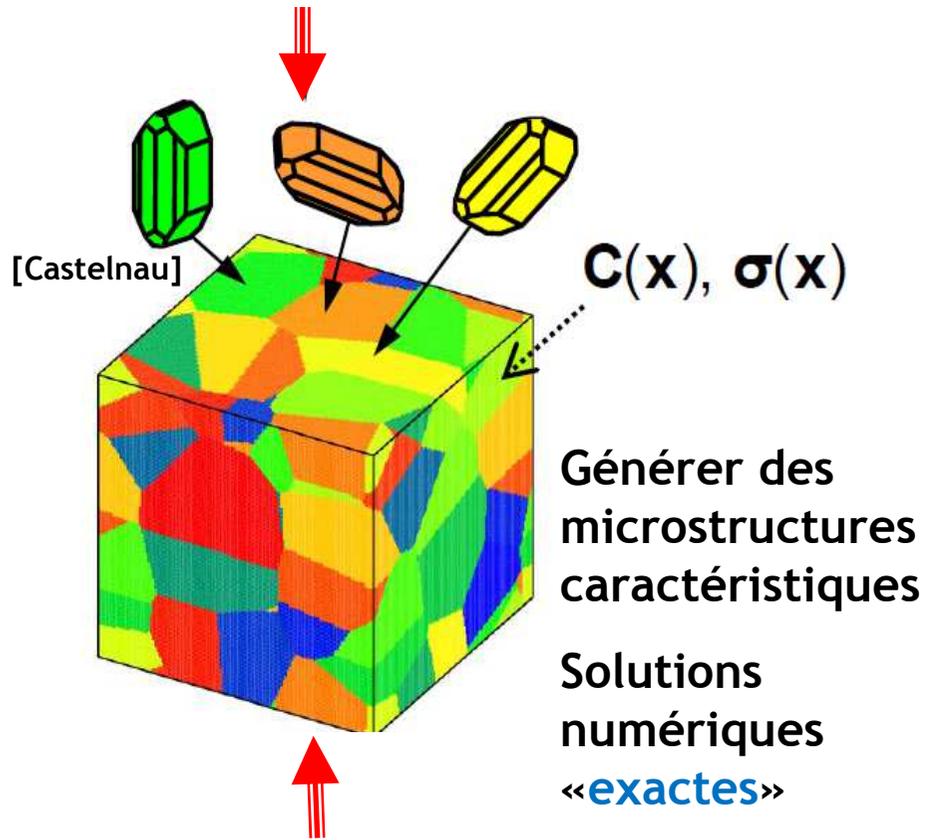
/

→ solidification d'un alliage binaire dans un mélange en surfusion

cf. L. Thuinet

# À l'échelle des grains : homogénéisation

Full-Field



Générer des microstructures caractéristiques

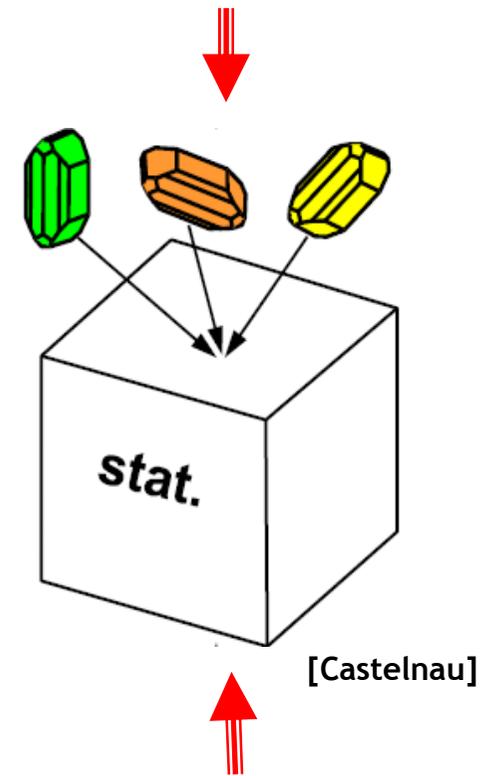
Solutions numériques «exactes»

Obtenir les champs complets de contrainte et de déformation

Méthode FFT, CPU !!

vs.

Mean-Field



Utiliser un Volume statistiquement Représentatif

Borner ou estimer le comportement effectif

Obtenir des informations moyennes sur les champs

Rapide !!

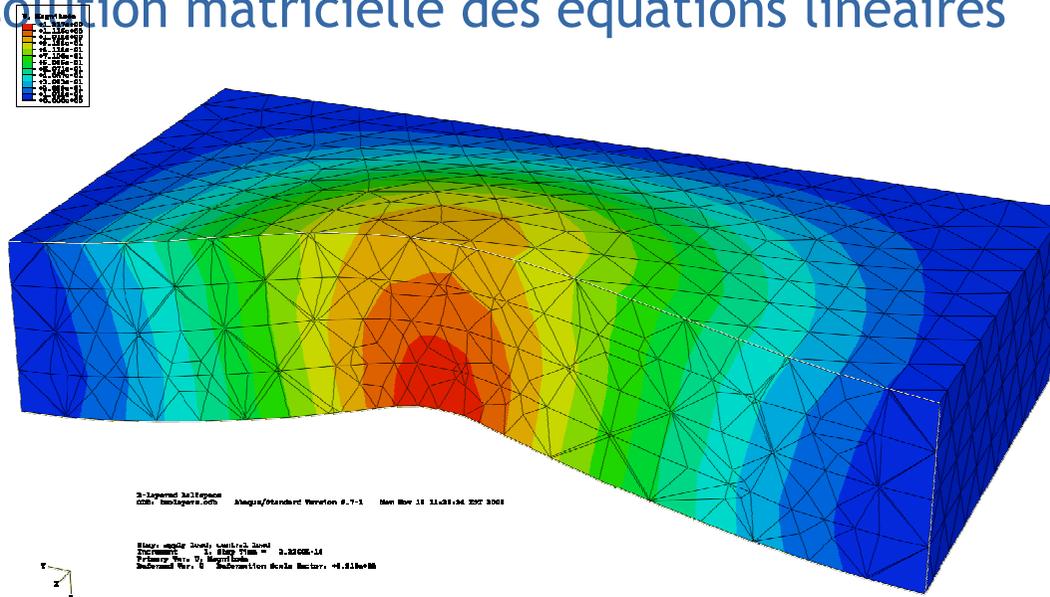


Les principaux « barreaux »  
Echelle continuum

# À l'échelle du matériaux : FEM

## Méthode des éléments finis :

1. Résolution d'équation aux dérivées partielles pour des conditions aux limites données (plus milieu infini)
2. Subdivision du systèmes en mailles élémentaires (discrétisation) : EDP linéarisée dans l'élément
3. Résolution matricielle des équations linéaires



[danielpeter.github.io](https://github.com/danielpeter)

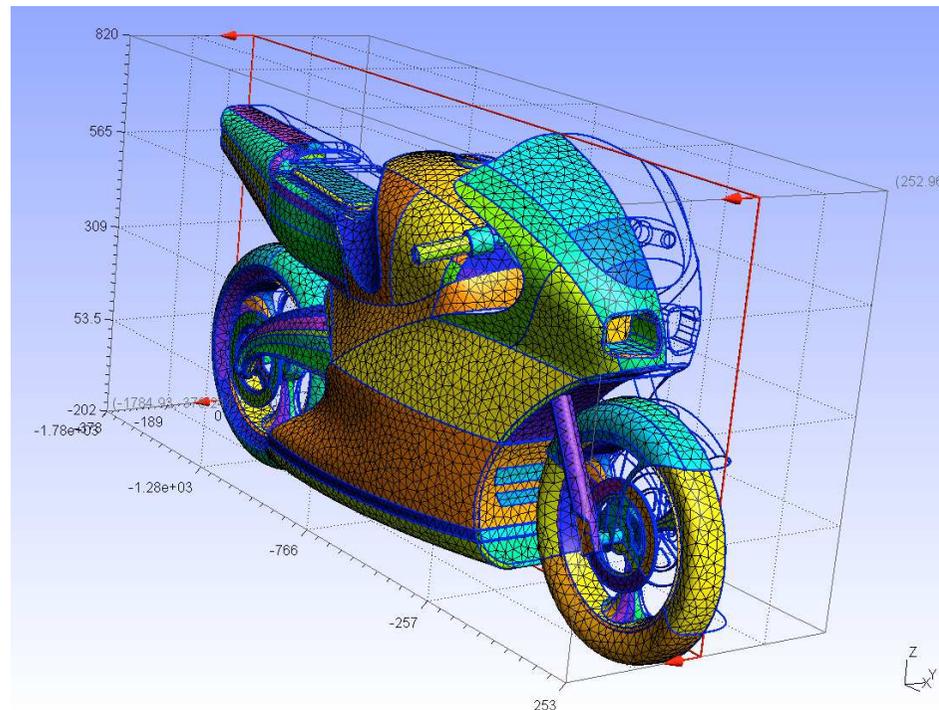


Les principaux « barreaux »  
Echelle intégrale

# À l'échelle du système industriel

## Codes de calculs intégraux

- Multiphysique
- Modèles physiques effectifs ou simple ajustement...
- Courbes enveloppes





# Les principaux « barreaux » bilan

## A chaque échelle :

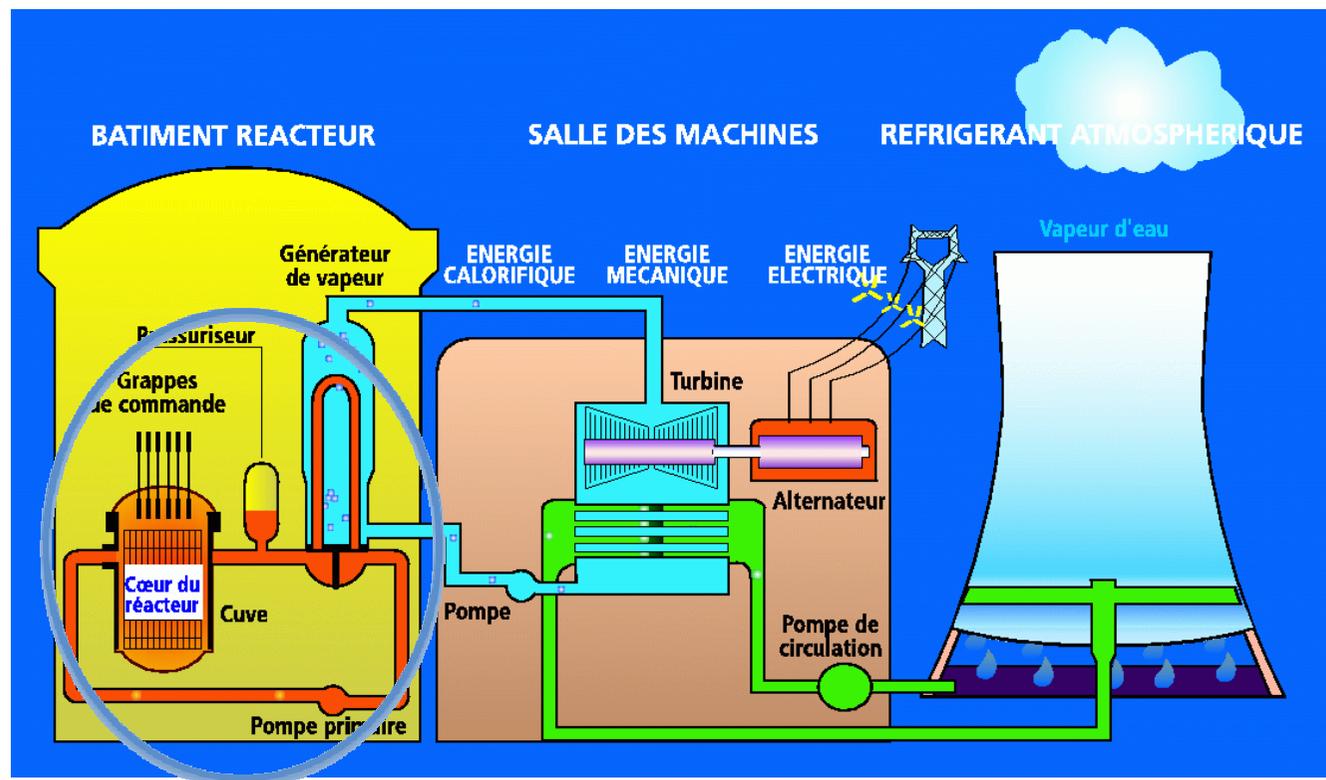
- Liste non exhaustive...
- Recouvrement entre les échelles...
- **Toujours la même idée**
  1. Choix de la « brique » physique élémentaire
  2. Détermination de la nature des interactions entre briques/ lois de comportement (provient de l'échelle inférieur)
  3. Etude du système → information effective sur l'ensemble de la population de brique



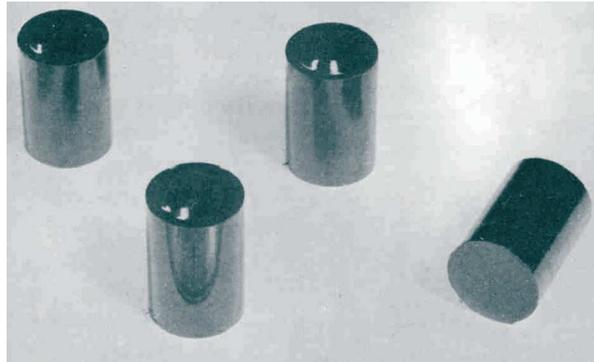
# Illustration : cas du combustible nucléaire

# Contexte général: REP

*Mission: améliorer le niveau de sûreté des installations nucléaires*



# Contexte général : matériaux étudiés



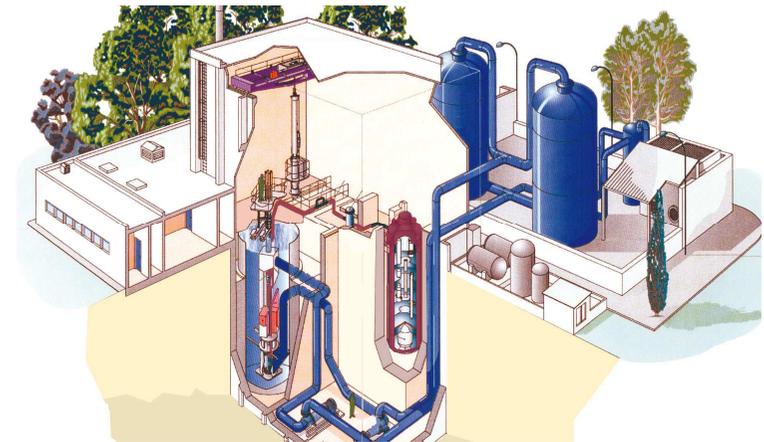
→ *cf. F. Soisson*



Intégrité des matériaux

# Contexte général : pourquoi modéliser ?

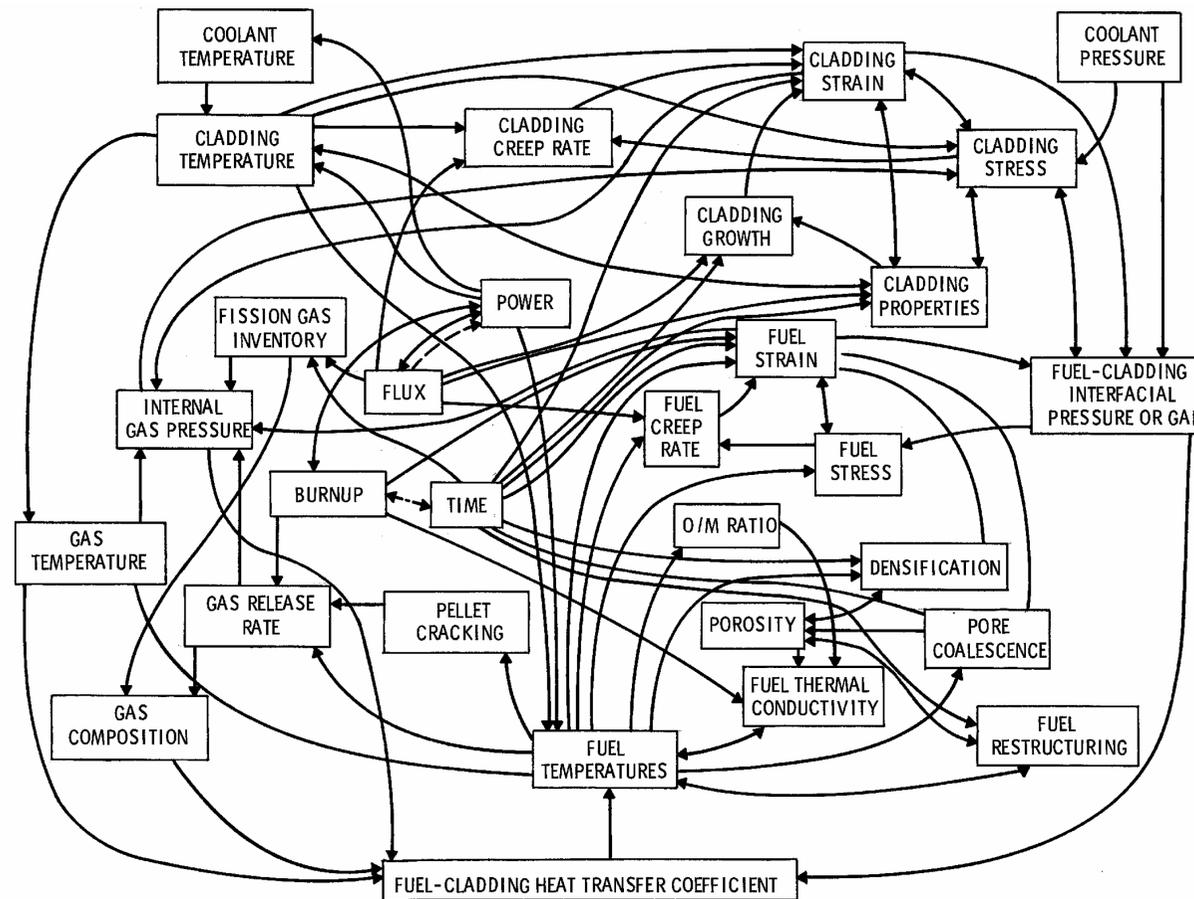
- Analyse et prédiction du comportement macroscopique des éléments :
  - *Fonctionnement normal*
  - *Conditions accidentelles*
  - *Transport et entreposage*
- Interprétation des essais expérimentaux intégraux :
  - *CABRI*
  - *NSRR-FGD*



Mais...

The CABRI facility (CEA) is a pool-type research reactor dedicated to studying Reactivity Initiated Accidents (RIA) upon a section of Highly-Irradiated fuel. This facility is used to reproduce representative conditions of such accidents.

# Contexte général : pourquoi modéliser ?



→ Besoin de codes multiphysiques !

# Contexte général : comment modéliser ?

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

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

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

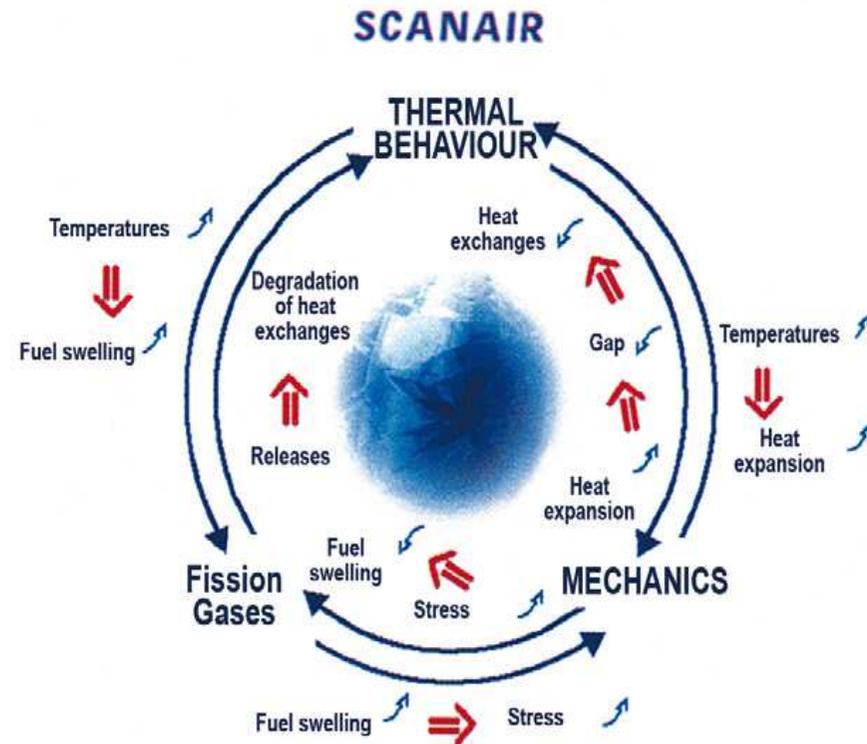
b. Extrapolation des résultats expérimentaux au cas réacteur complexe

→ Corrélations à justifier par des modèles physiques

# Contexte général : comment modéliser ?

À l'échelle du système industriel :  
Fuel performance code

- SCANAIR
- FRAPCON

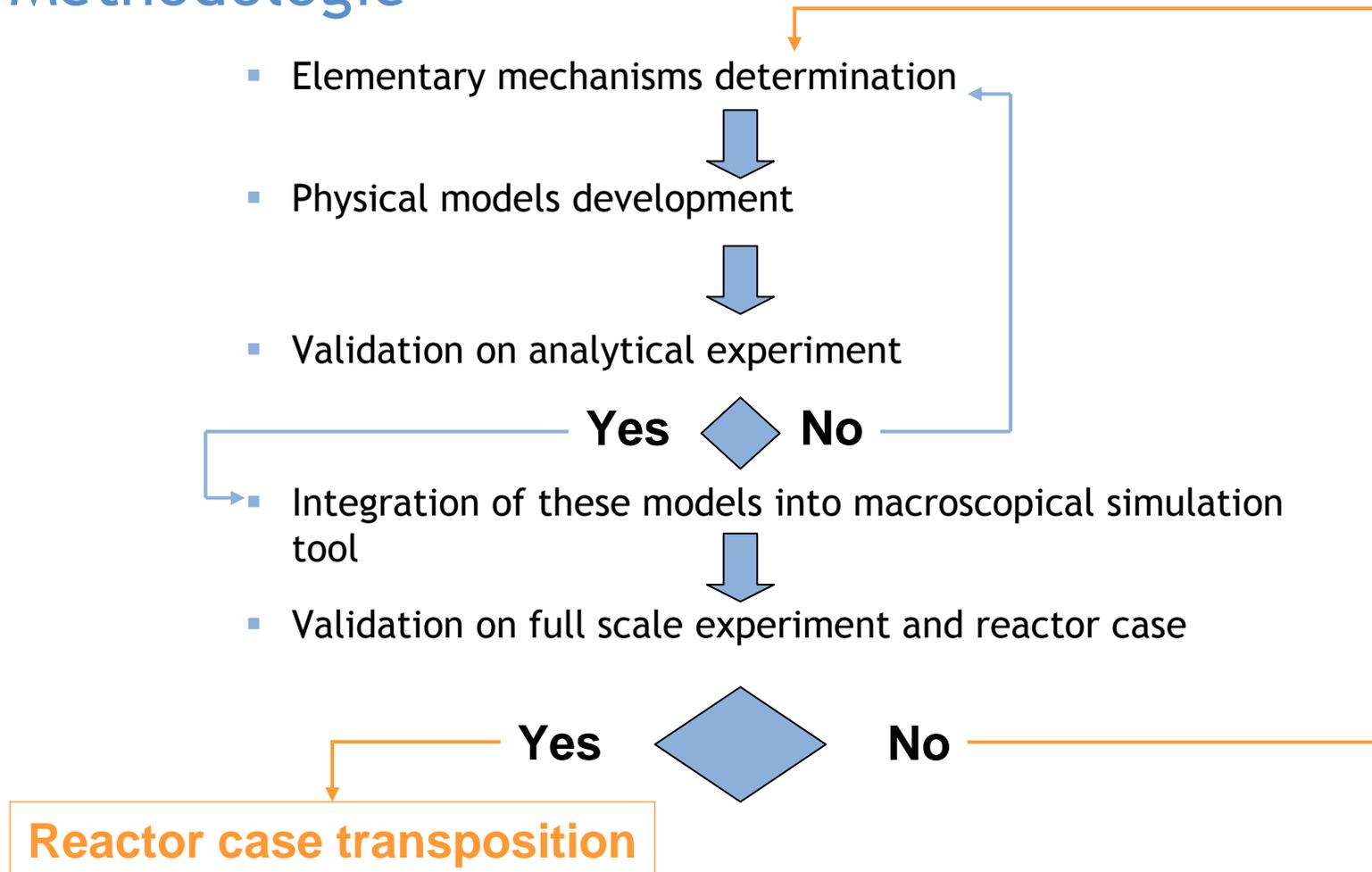


Codes Multiphysiques {

- Thermique
- Mécanique
- Evolution microstructurale (oxydation de la gaine, gaz de fission...)

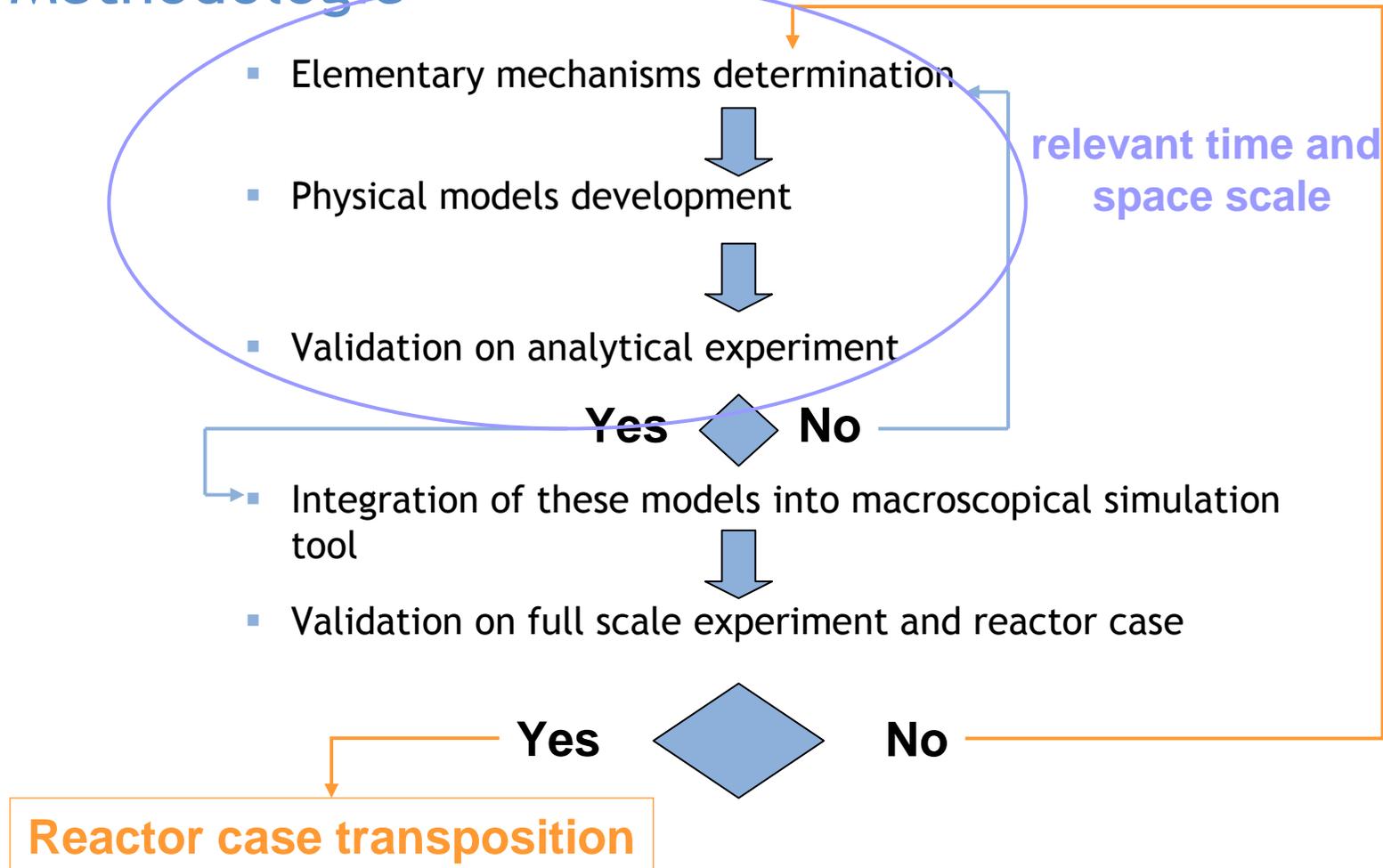
# Contexte général : comment modéliser ?

## Méthodologie



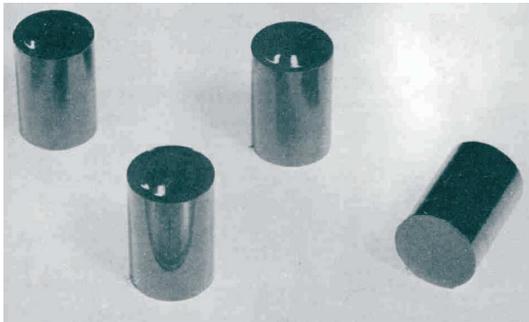
# Contexte général : comment modéliser ?

## Méthodologie



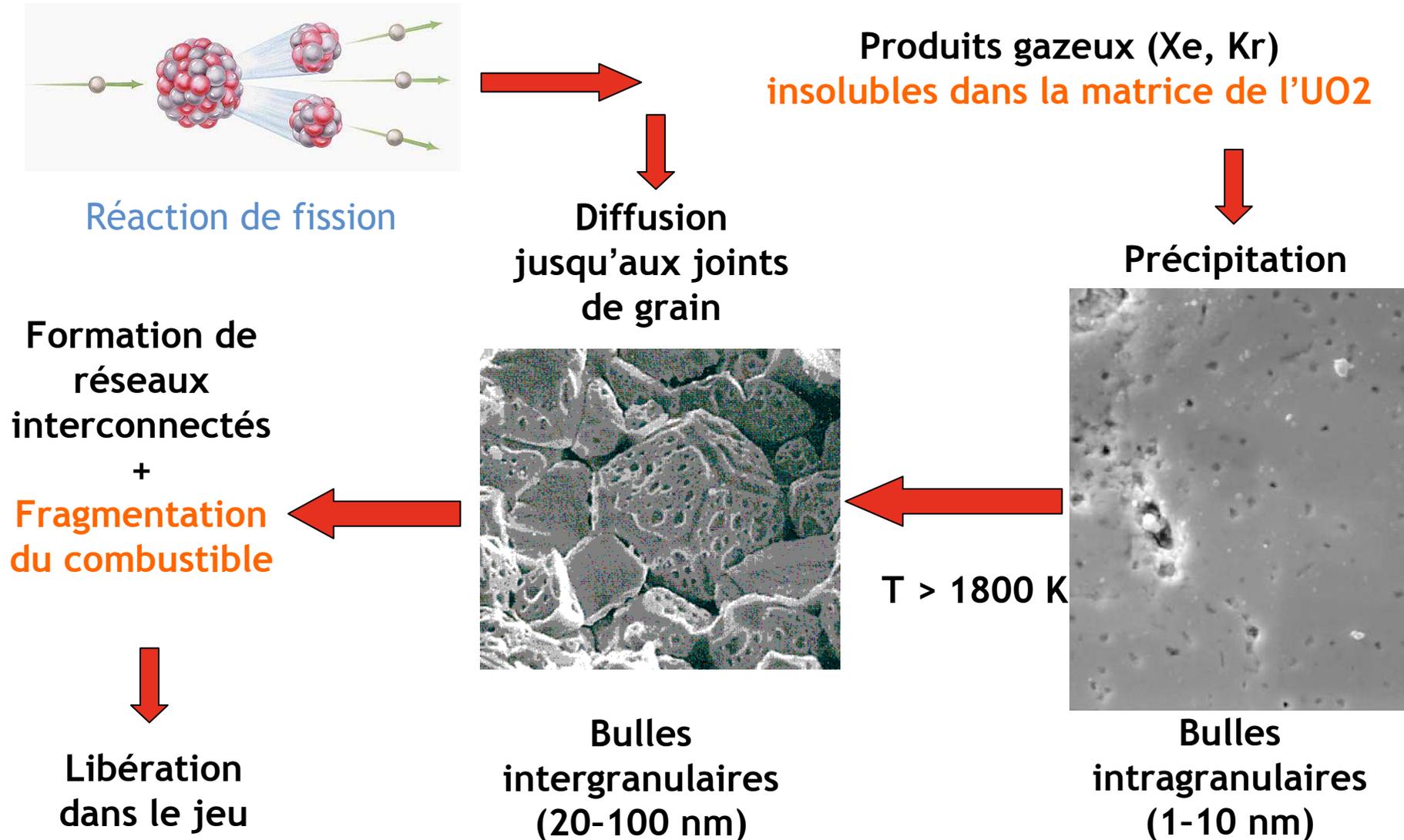
# Illustration :

*Impact de la présence de nanobulles de gaz rares sur le comportement thermomécanique d'une matrice combustible*

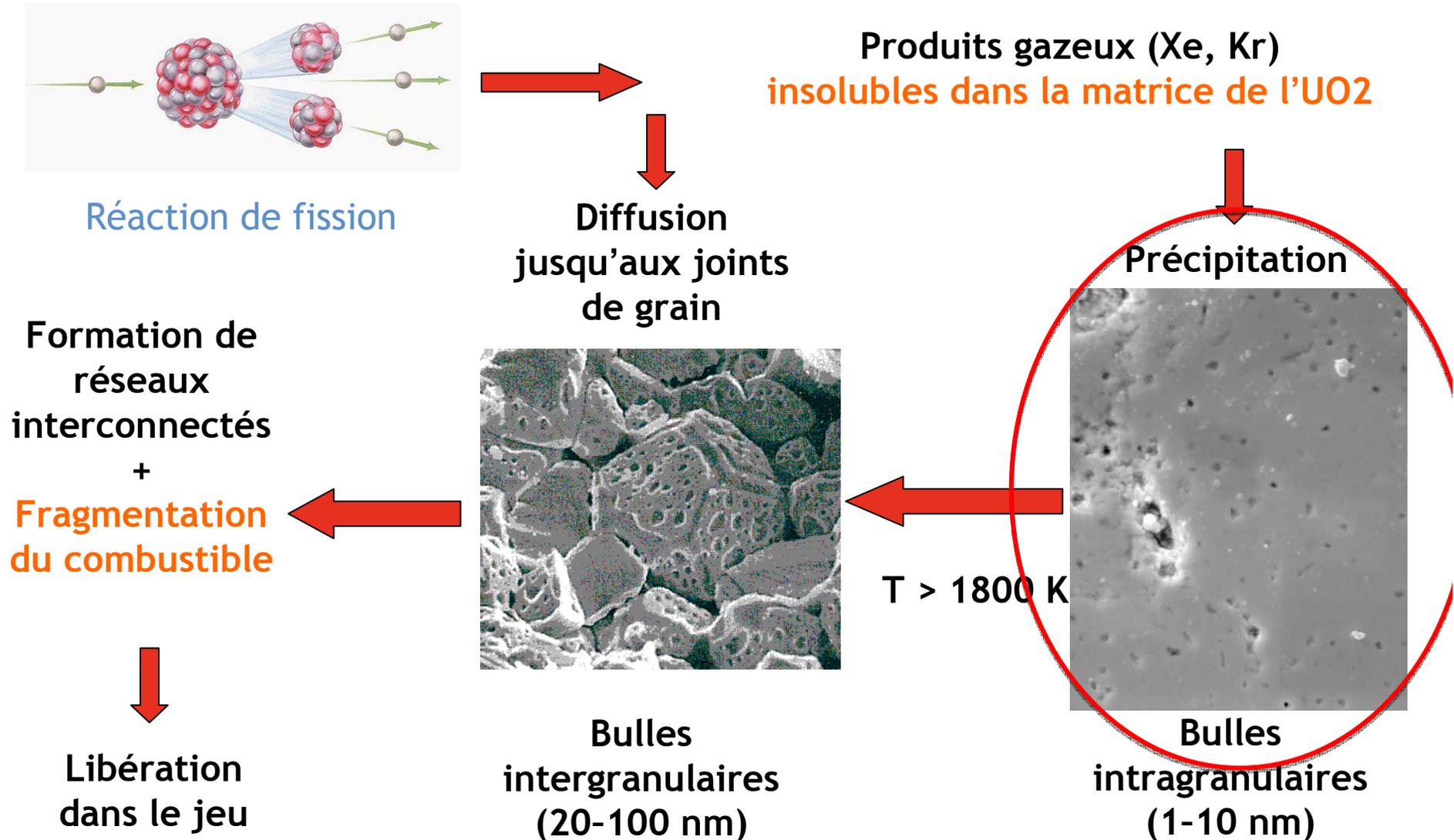


A. Jelea, M. Colbert, J. Arayro, R. Pellenq, G. Trégliá, F. Ribeiro

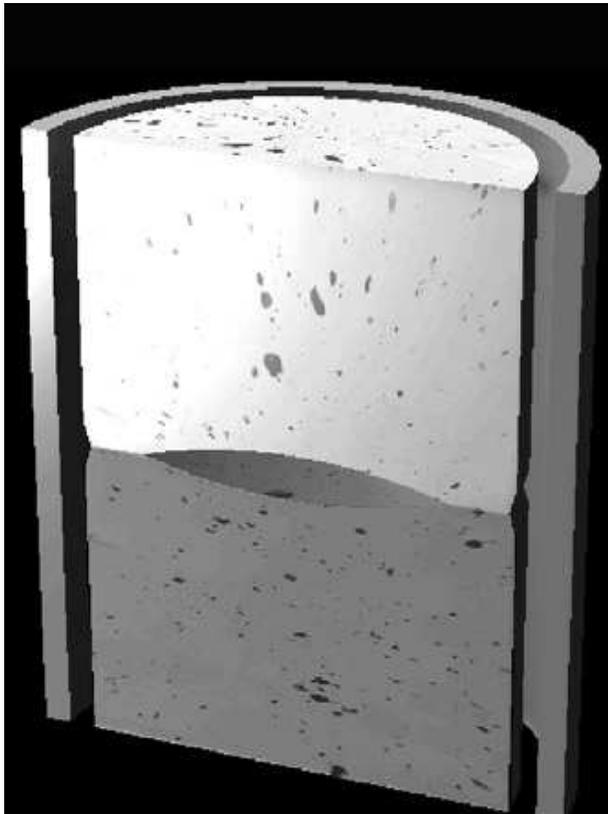
# Impact de bulles de gaz rares : origines



# Impact de bulles de gaz rares : origines



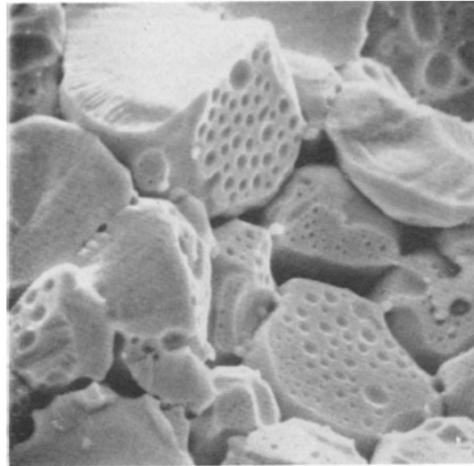
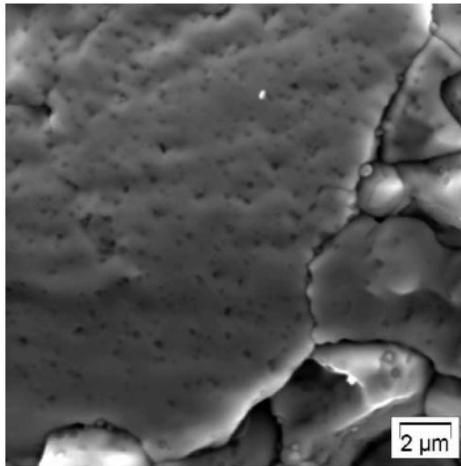
# Impact de bulles de gaz rares : objectifs



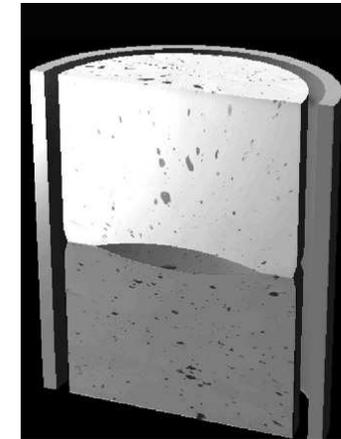
- Origine du gonflement gazeux observé en séquence accidentelle ?
- Loi de comportement thermomécanique macroscopique ?

# Impact de bulles de gaz rares : échelle mesoscopique

Prise en compte de la  
microstructure ?



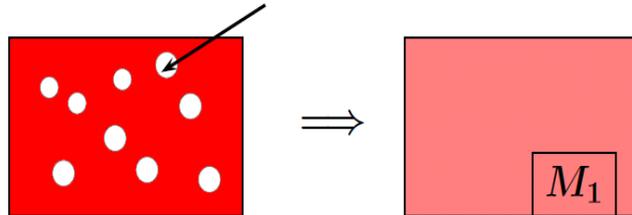
Loi de  
comportement  
thermomécanique  
macroscopique ?



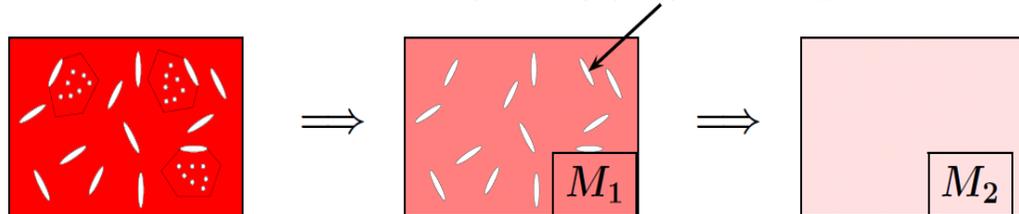
# Impact de bulles de gaz rares : échelle mésoscopique

- Homogénéisation

First scale : intragranular bubbles  
porosity  $f_b$ , pressure  $p_b$



Second scale : intergranular bubbles  
porosity  $f_e$ , pressure  $p_e$



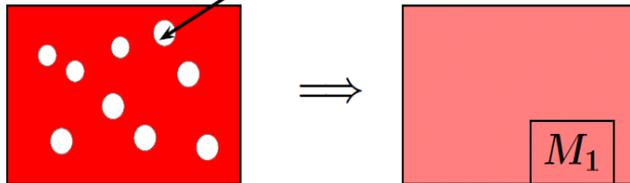
Matériau homogène équivalent  $M_2$  avec loi de comportement thermomécanique simple, dépendant des caractéristiques des porosités (forme, valeur totale, pression) et de la matrice.

*Vincent et al., International Journal of Solids and Structures, Volume 46, Issues 3–4, February 2009, Pages 480-506*

# Impact de bulles de gaz rares : échelle mesoscopique

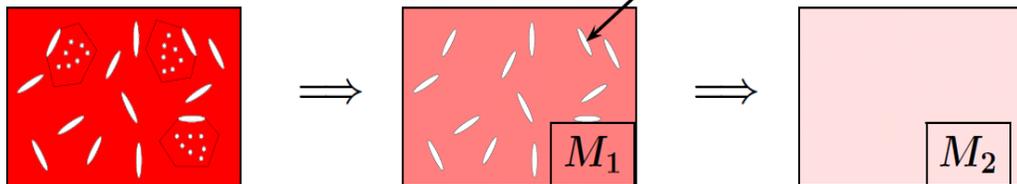
- Homogénéisation

First scale : intragranular bubbles  
porosity  $f_b$ , pressure  $p_b$



Évolution temporelle de  $f$  et  $p$  ?

Second scale : intergranular bubbles  
porosity  $f_e$ , pressure  $p_e$



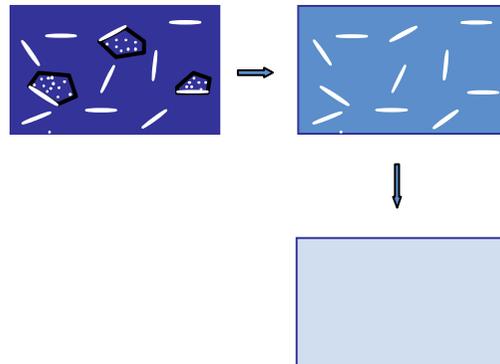
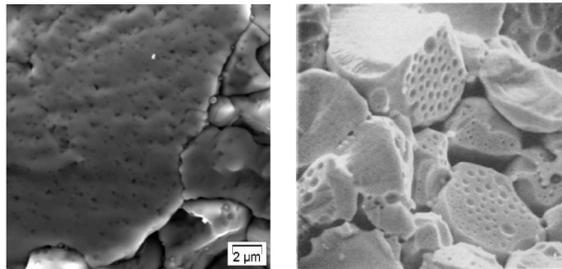
PV=NRT ?  
P=Pg-2 $\gamma$ /Rb ?

Matériau homogène équivalent  $M_2$  avec loi de comportement thermomécanique simple, dépendant des caractéristiques des porosités (forme, valeur totale, pression) et de la matrice.

*Vincent et al., International Journal of Solids and Structures, Volume 46, Issues 3–4, February 2009, Pages 480-506*

# Impact de bulles de gaz rares : échelle mesoscopique

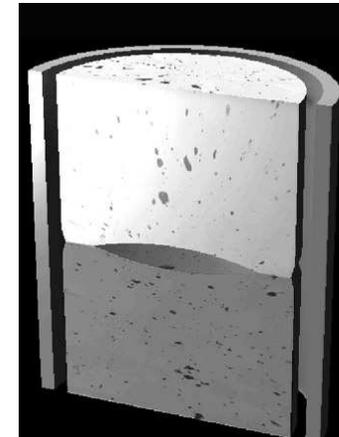
Micromécanique  
 $P ?$ ,  $n ?$ , ...



Prise en compte de  
la microstructure

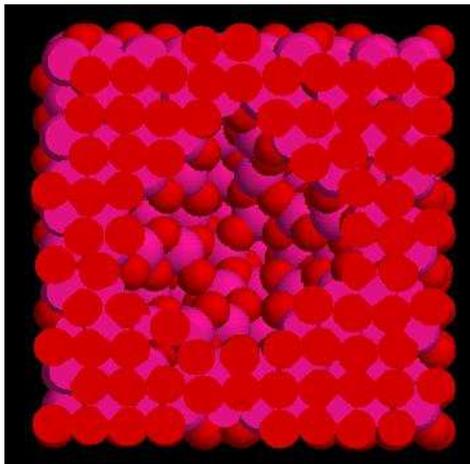
*P.G. Vincent (2009)*

Loi de  
comportement  
thermomécanique  
macroscopique ?

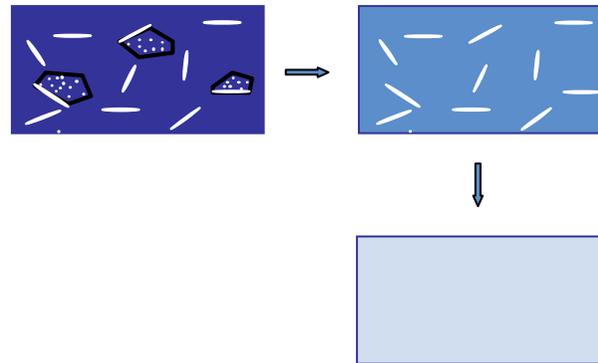
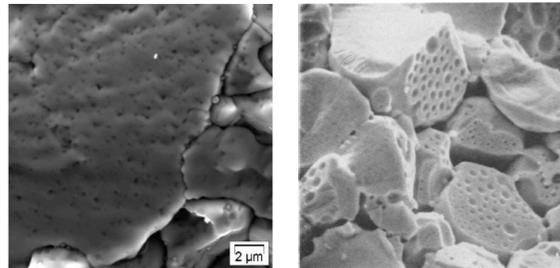


# Impact de bulles de gaz rares : approche globale

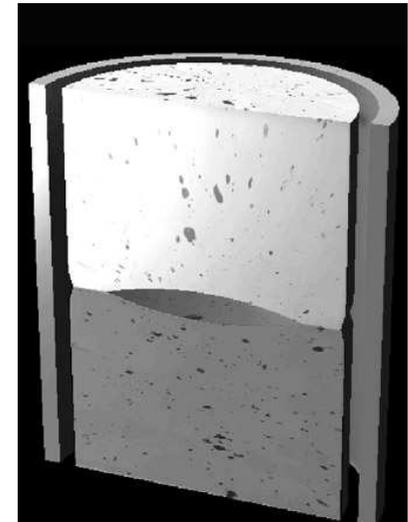
Approche  
atomistique



Micromécanique



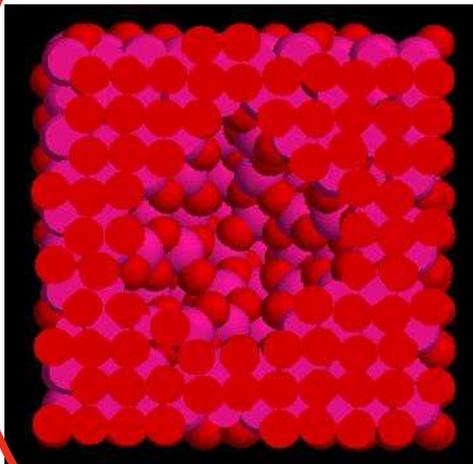
Loi de  
comportement  
thermomécanique  
macroscopique



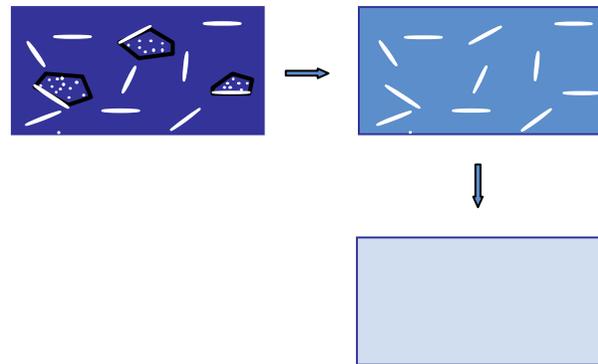
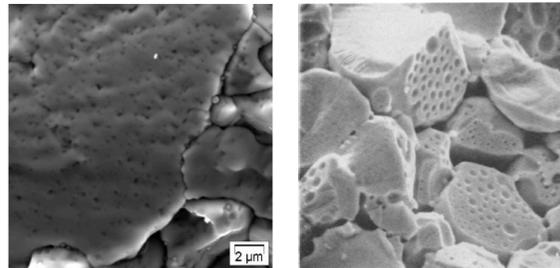
# Impact de bulles de gaz rares : approche globale



Approche  
atomistique



Micromécanique



Loi de  
comportement  
thermomécanique  
macroscopique



# Impact de bulles de gaz rares : outils

## 1. Echelle atomique, T → outils thermostostatiques

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



## 2. Modèle énergétique

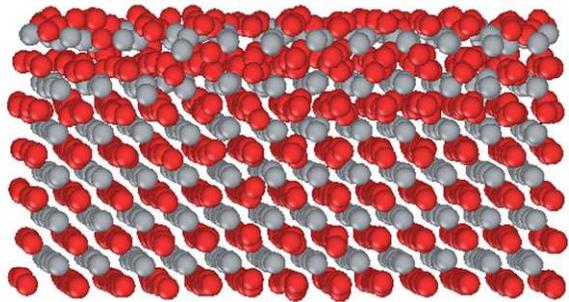
- Structure électronique pas indispensable
- Bcp d'atomes et de configurations
- Potentiels semi-empiriques (*Basak, Brearley, Grimes*)

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

# Impact de bulles de gaz rares : outils

## 1. Validation du modèle énergétique pour les surfaces:

→ Comparaison DFT et post HF



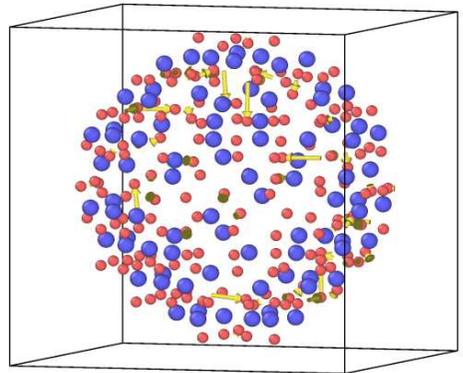
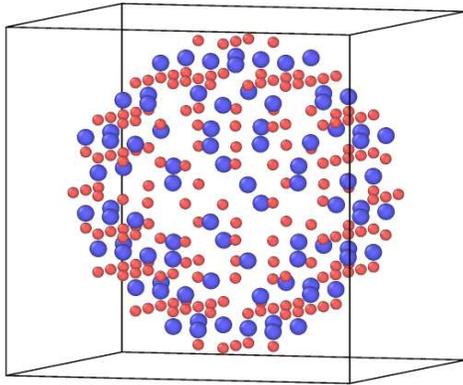
Potentiels	Catlow1	Catlow1	Meis and Gale	Jackson	Grimes
$E_{surf\_}[100]$	2.32	1.62	-0.26	2.37	2.99
$E_{surf\_}[111]$	1.19	0.91	0.86	1.19	1.48
Potentiels	Busker	Basak	Q. Mol. Dun.	Q. calculation	T.B.
$E_{surf\_}[100]$	2.81	2.22	2.01	1.04	1.82-1.95
$E_{surf\_}[111]$	1.27	1.24	0.86	0.27	0.95

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

→ Comparaison DFT/expérience (P/T)

→ Ajout d'un terme répulsif à courte portée

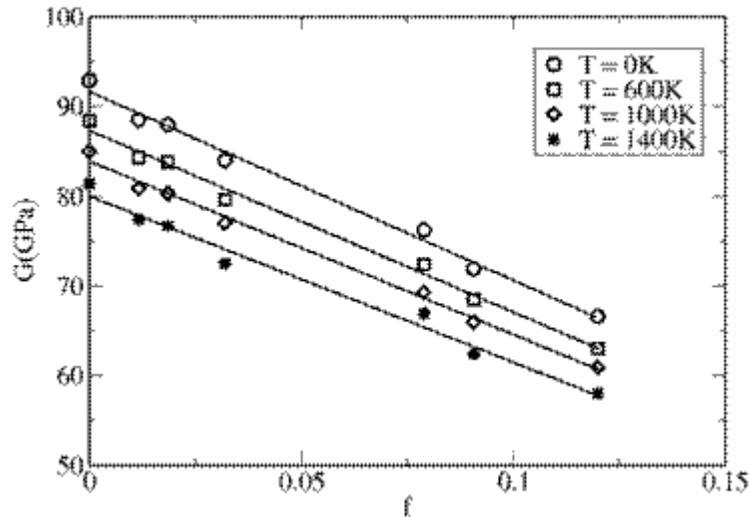
# Etude de nanocavités : relaxation de surface



Reconstruction importante  
Modification de stoechiometrie

$$V(\text{surface}) \approx V(\text{cavité})$$

# Impact de nanocavités : propriétés élastiques (DM)



$$\frac{G}{G_m} = 1 - a_G f$$

$$\frac{E}{E_m} = 1 - a_E f$$

Impact de la porosité

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

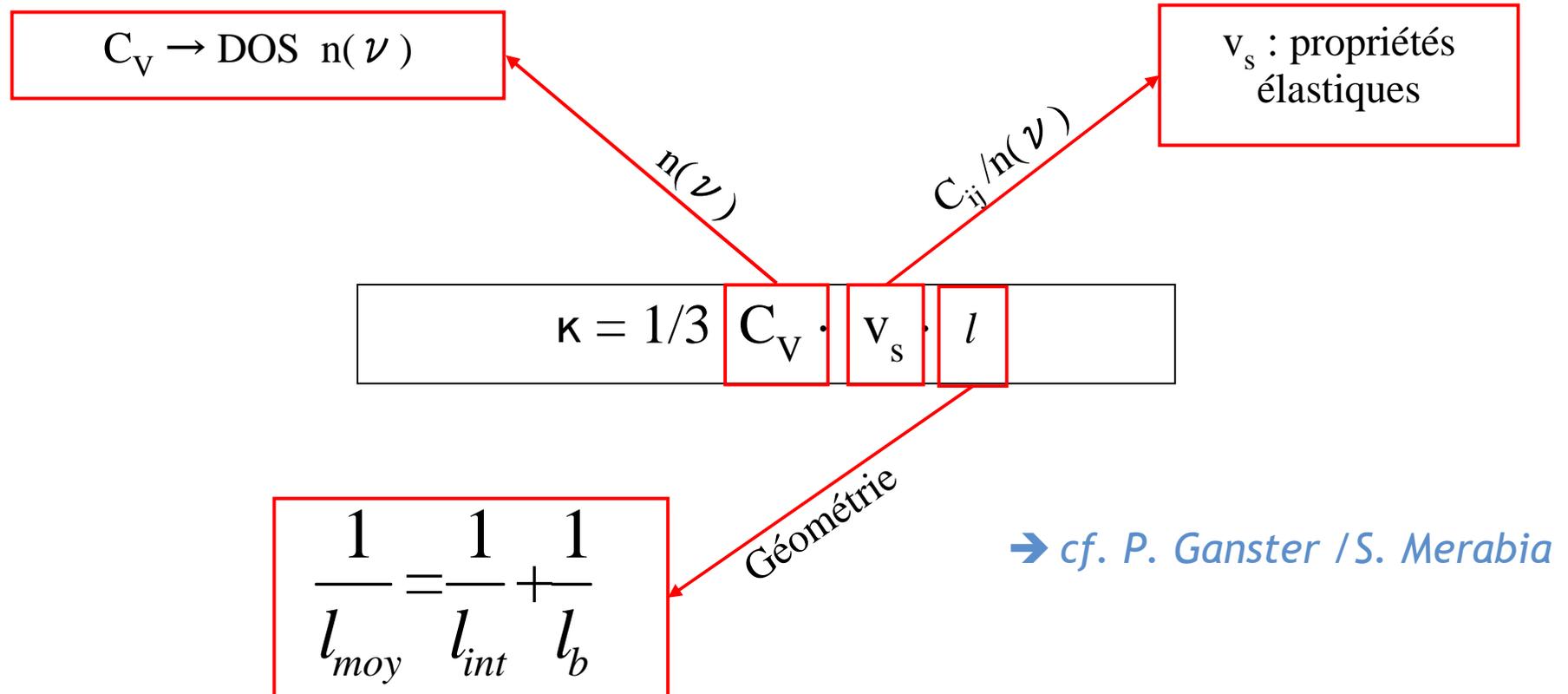
Bonne concordance avec les résultats micromécaniques et expérimentaux

Analyse plus fine de la dépendance en porosité :

→ effets de surface importants

→ prise en compte aux échelles supérieures

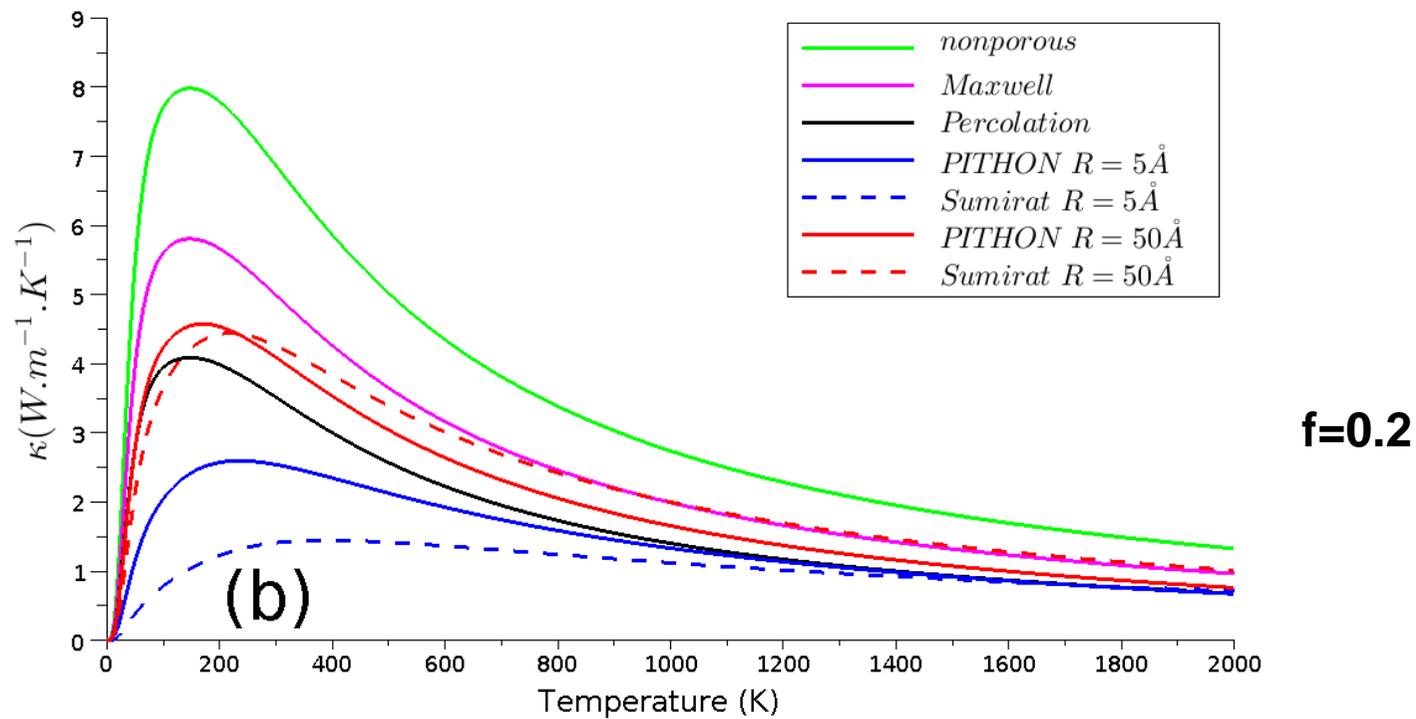
# Impact de nanocavités : propriétés thermiques (DM+Analytique)



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

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

# Impact de nanocavités : propriétés thermiques



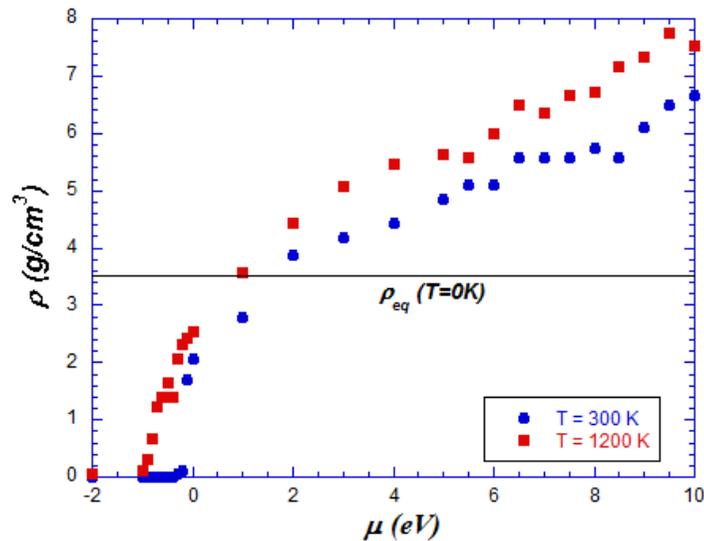
Fort impact à faible T

# Impact de bulles de gaz rares : remplissage

→ Résultats cohérents avec les données expérimentales disponibles (Xray absorption : XeXe=0.4nm)

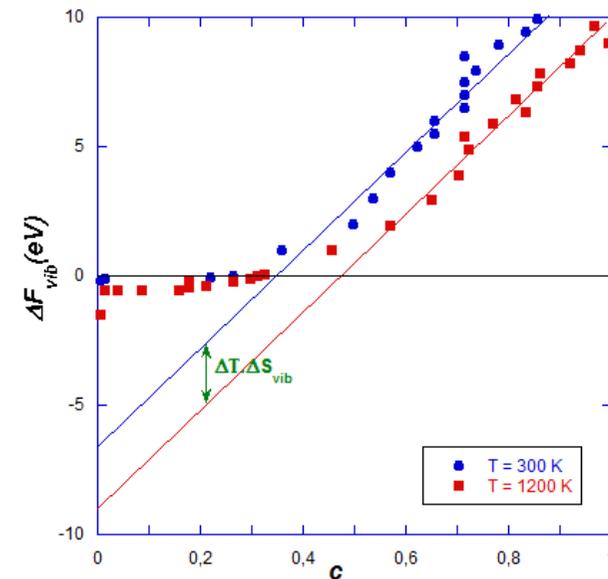
→ Transition d'un système dilué à un système dense

→ Analyse par approche de type champ moyen



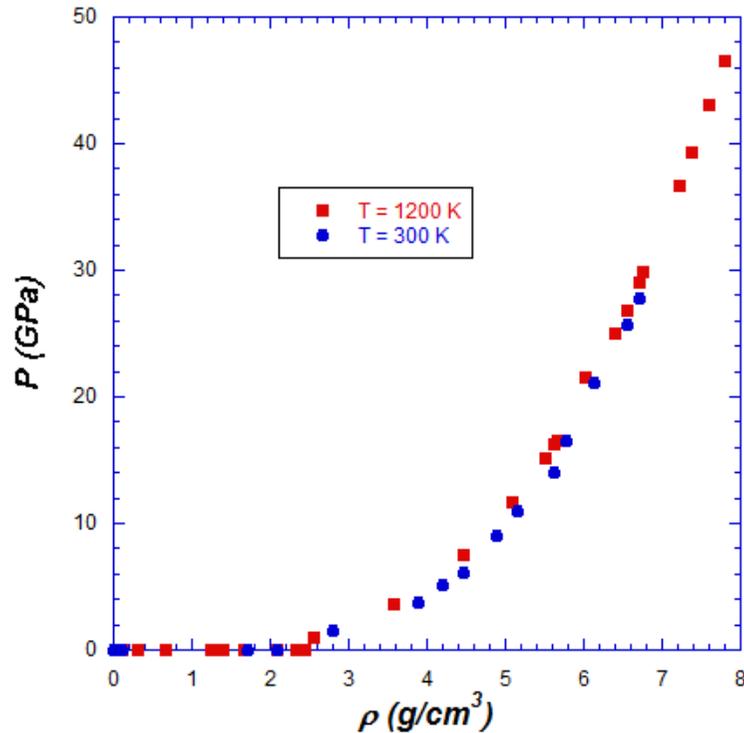
$$\frac{c}{1-c} = \exp\left(-\frac{\Delta F_{vib} - \mu}{kT}\right)$$

$$\Delta F_{vib} = cZV - T\Delta S_{vib}$$



# Impact de bulles de gaz rares : Pression

$$P_{bubble} = \left\langle \frac{N_{Xe} kT}{V} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{3V} \left( \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{1}{2} R_{ij} f_{ij} \right) \right\rangle$$



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

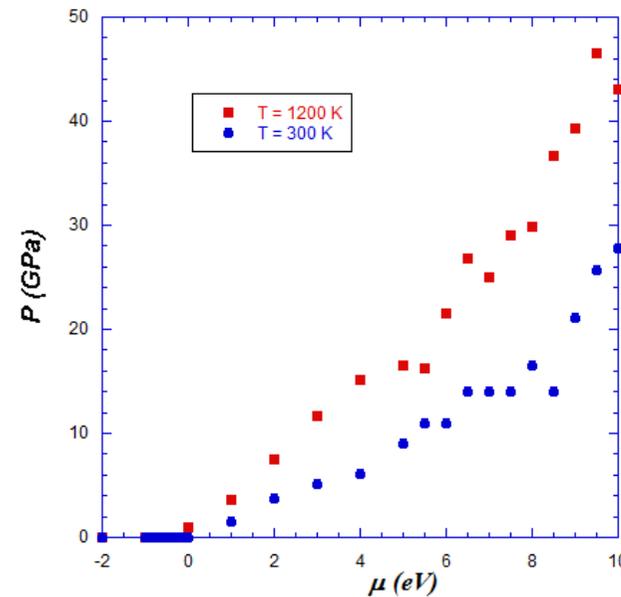
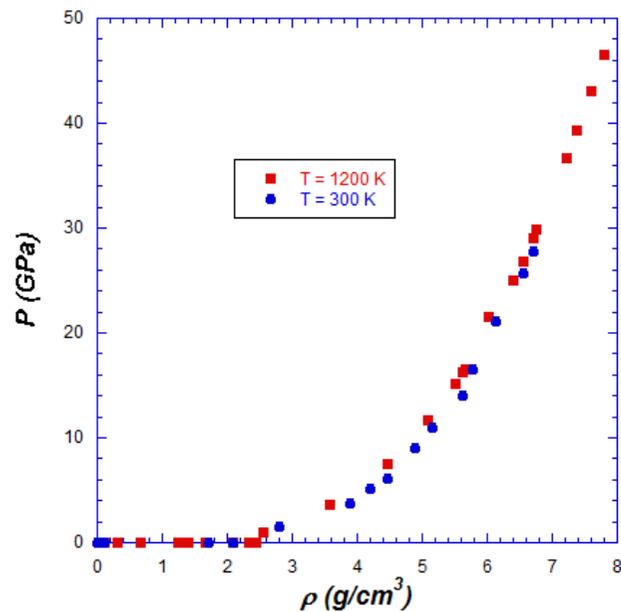
→  $P \gg NkT/V$

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

M. Colbert, G. Tréglia and F. Ribeiro, submitted to JPCM

# Impact de bulles de gaz rares : Pression

$$P_{bubble} = \left\langle \frac{N_{Xe} kT}{V} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{3V} \left( \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{1}{2} R_{ij} f_{ij} \right) \right\rangle$$

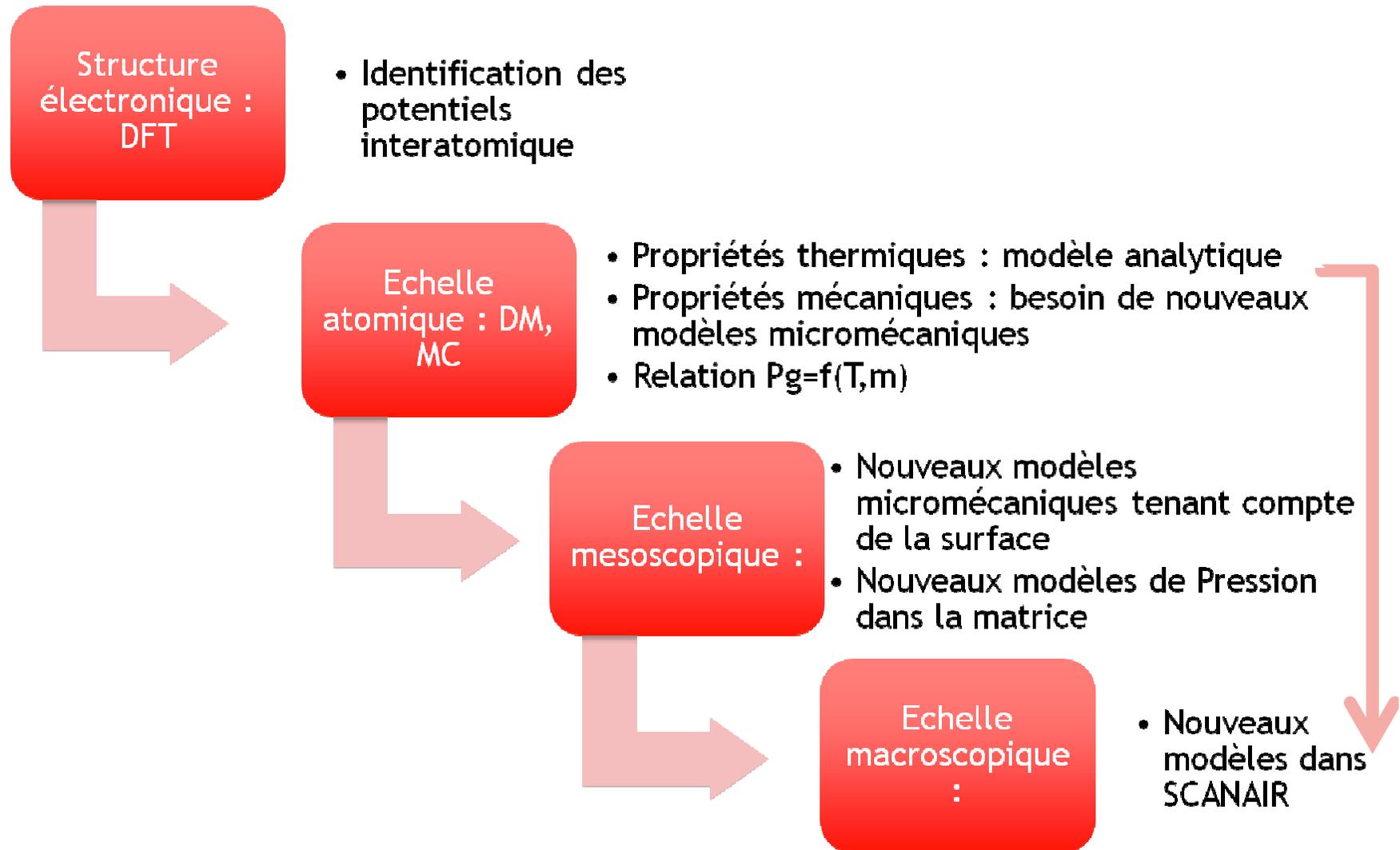


→ Facteur 2 sur la pression à potentiel chimique fixé

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

M. Colbert, G. Tréglià and F. Ribeiro, submitted to JPCM

# Impact de bulles de gaz rares : Bilan





# Questions ouvertes

# Lien avec l'expérience ?

## 1. Validation

### a. À l'échelle pertinente

- DRX, Sonde atomique,...
- MET, MEB,...
- Essais mécaniques,...

### b. À l'échelle macroscopique

- Vérification qu'il ne manque rien
- Cohérence globale de l'approche

## 2. Mais aussi Interprétation et aide à la définition !!!

### a. Identification des paramètres et mécanismes clés

# Propagation des erreurs ??

## 1. En aval : estimation de l'erreur globale

- remontée d'incertitude
- données best estimate
- approches statistiques

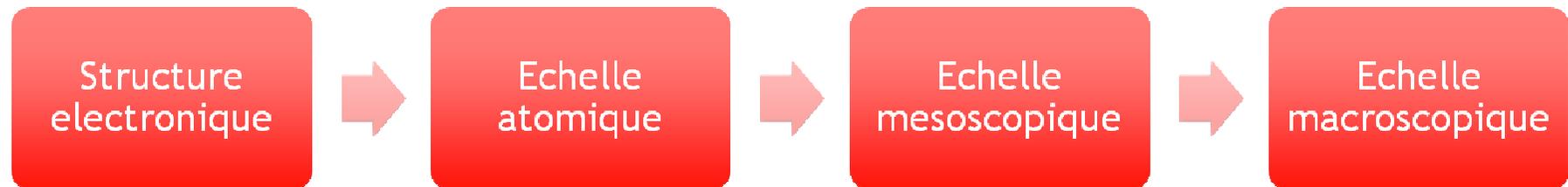
## 2. En amont : identification des points à améliorer, des facteurs prépondérants

- « plan d'expérience »

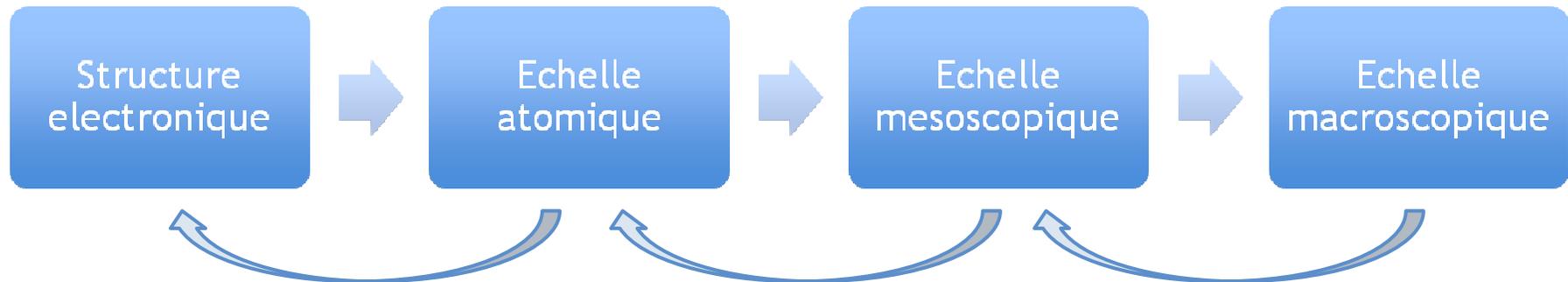
→ *cf. J. Baccou*

# Comment on relie tout ça ???

## Chaînage ?

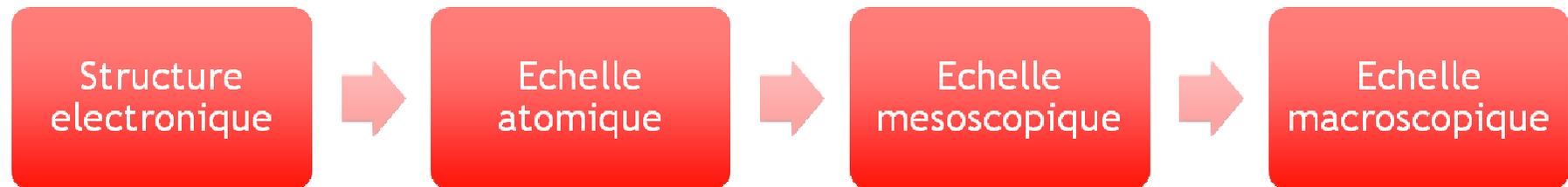


## Couplage ?



# Comment on relie tout ça ???

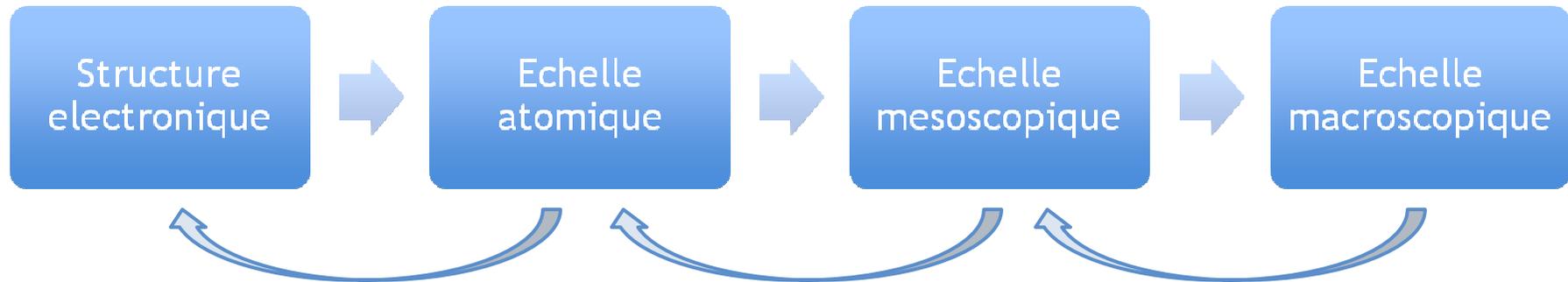
## Chaînage ?



- Echelles de temps très différentes
- Moins couteux...
- Ex: Born-Oppenheimer

# Comment on relie tout ça ???

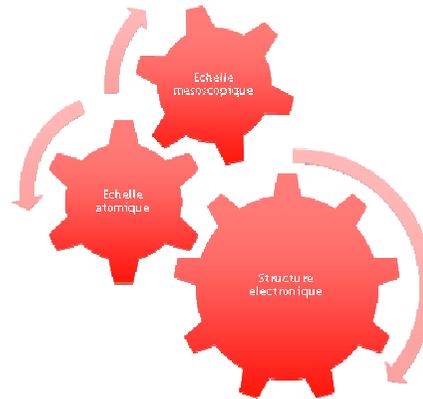
## Couplage ?



- Rétroaction nécessaire
- Très coûteux...
- Ex: Module thermique et diffusion d'espèces chimiques

# Comment on relie tout ça ???

En pratique ?

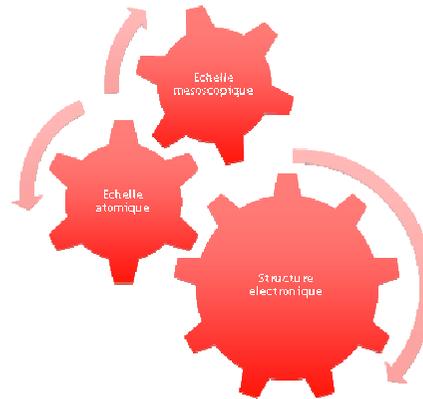


- Pas forcément barreau par barreau ni direction...
- À gérer au cas par cas...
- Ex: conductivité thermique
- **!!!!Attention à ne pas tenir compte plusieurs fois du même phénomène physique!!!!**



# Comment on relie tout ça ???

Et les flèches ?



- Données physiques (coefficients de diffusion, données thermodynamiques...)
- Modèles analytiques
- Identification des mécanismes importants



# Conclusions

- En théorie, démarche générale :
  1. Identification du phénomène physique à modéliser
  2. Identification de l'échelle cohérente avec ce phénomène
  3. Détermination des outils de modélisation à mettre en œuvre
  4. Développement éventuel des outils nécessaires
  5. Validation / confrontation expérimentale
  6. Remontée des informations à l'échelle supérieure

# Conclusions

- En pratique, beaucoup de questions :
  1. Identification du phénomène, pas toujours si simple...
    1. Ce que l'on sait
    2. Ce que l'on sait ignorer
    3. Ce qu'on ignore ignorer...
  2. Interactions avec d'autres domaines
    1. Problèmes de vocabulaires et connaissance
    2. Indispensable pour assurer la cohérence de l'approche
  3. Nature des raccordements

