

Du matériaux à la structure, quelques méthodes récentes (ou pas !) de simulation

Frédéric Feyel

Responsable du pôle Modélisation &
Simulation

Safran – CRT

ONERA



→ Ce que vous n'allez pas voir

- Des discussions hyper techniques sur les caches, le parallélisme, l'hyperthreading, etc.
- De l'architecture soft C++
- Des résultats de calcul énormes

Devant des
mécaniciens

→ Ce que vous allez voir

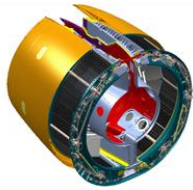
- De la modélisation
- Des méthodes

Devant des
informaticiens

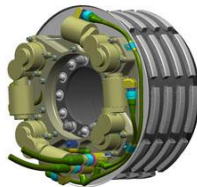
L'INNOVATION AU CŒUR DU GROUPE

→ L'INNOVATION AU COEUR DE TOUS LES PRODUITS DU GROUPE

- Technologies - architectures - procédés



*Inverseur A380 à
commande électrique*



*Frein carbone à
commande électrique*



Ventilation A380



*Gyroscope résonnant
hémisphérique*



Caméra thermique



Aube fan RTM tissées 3D



Equipements Félin



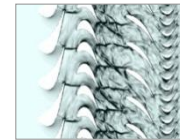
Autodirecteur MICA



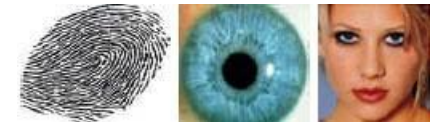
*Tuyère, chambre et aubes de
turbine en matériaux CMC*



*Contrefiche composite 3D
train B787*



*Simulations
complexes*



*Reconnaissance
biométrique*

AU CŒUR DE LA STRATÉGIE

1,8 milliard
d'euros en
2013

D'investissements dans la recherche et développement en 2013, soit plus de 12 % du chiffre d'affaires

plus de 21 %
des effectifs du Groupe

Représente la R&D soit 450 docteurs et près de 150 doctorants travaillant chez Safran

800
Brevets

Déposés par Safran en 2013

UNE AMBITION ACCRUE POUR LA R&T ...

→ **Années 1990 : le Groupe = \sum de ses parties**

- Le Groupe est une collection de sociétés aux interactions réduites. Elles développent leur stratégies produit et pilotent leur R&T indépendamment les unes des autres. La fécondation croisée reste l'exception : création du business freins carbone à partir des technologies de la propulsion solide

→ **Années 2010 : Safran $\geq \sum$ de ses parties**

- Le Groupe s'organise pour tirer partie de la mutualisation et des synergies: création de la direction Matériaux et Procédés, de Safran Electronics...
- Avec la direction de l'innovation, il se dote de la capacité à conduire des projets d'innovation en rupture aux interfaces des sociétés: EGTSTM electric taxiing system, Silvercrest.

→ **Années 2030 : Safran $\geq \geq \sum$ de ses parties**

- La R&T joue un rôle structurant dans la stratégie de déploiement du Groupe que ce soit en termes d'opportunités de business ou de localisation

→ **Le centre de R&T : base de pilotage technologique du Groupe dans une perspective internationale**

UN ANCRAGE ACADEMIQUE SOLIDE

- **4 laboratoires de recherche mixtes** (investissement mixte Safran/CNRS + d' autres sociétés)
 - LCTS de Bordeaux (composites thermostructuraux)
 - CERFACS de Toulouse (mécanique des fluides et combustion)
 - GIP-GERAILP à Arcueil (utilisation industrielle des lasers de puissance)
 - SHEFFIELD en Grande-Bretagne (advanced manufacturing)

- **14 pôles de recherche externe structurels** (long terme)
 - ONERA
 - CNRS (10)
 - IVK (Belgique)
 - CENAERO (Belgique)

- **Des réseaux de recherche étendus**
 - Combustion avancée : depuis 2002, 40 thèses dans 15 laboratoires
 - Méthodes avancées en mécanique : depuis 2003, 107 thèses dans 50 laboratoires
 - Réduction du bruit : en partenariat avec Airbus, Dassault, Airbus Helicopters, 30 laboratoires associés

- **A l'international**
 - Russie : CIAM, VIAM,...
 - USA : Georgia Tech, Stanford et VirginiaTech

... AU SEIN D'UN ENVIRONNEMENT D'INNOVATION OUVERTE

→ REGROUPER :

La direction R&T du Groupe et
les équipes du centre R&T

Des capacités de plateaux d'innovation
ouvertes avec les fournisseurs

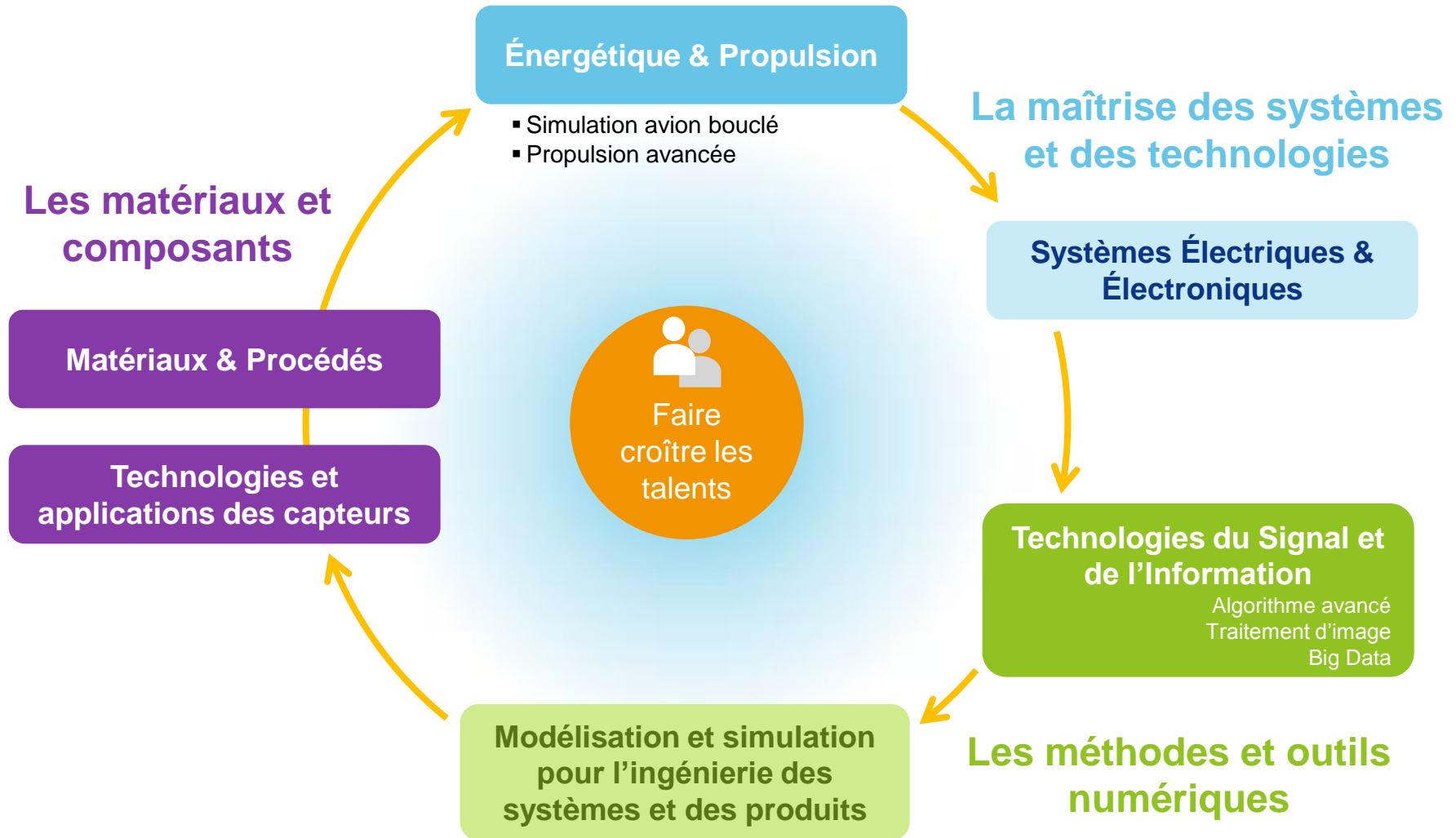
La direction de l'Innovation et
plateaux projets associés

Des partenariats avec le monde
académique

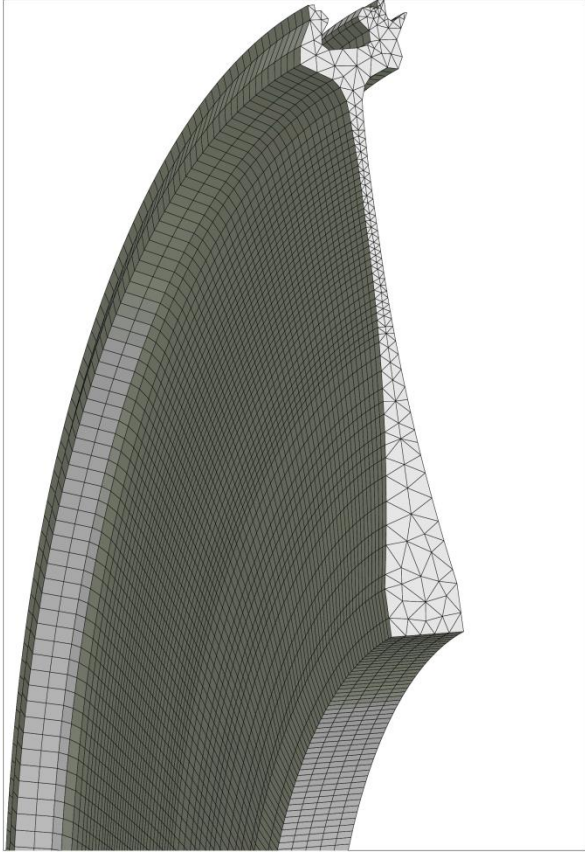
SUR UN SITE UNIQUE, IMPLANTÉ DANS L'ENVIRONNEMENT DE PARIS-SACLAY,

PÔLE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE DE PREMIER PLAN MONDIAL

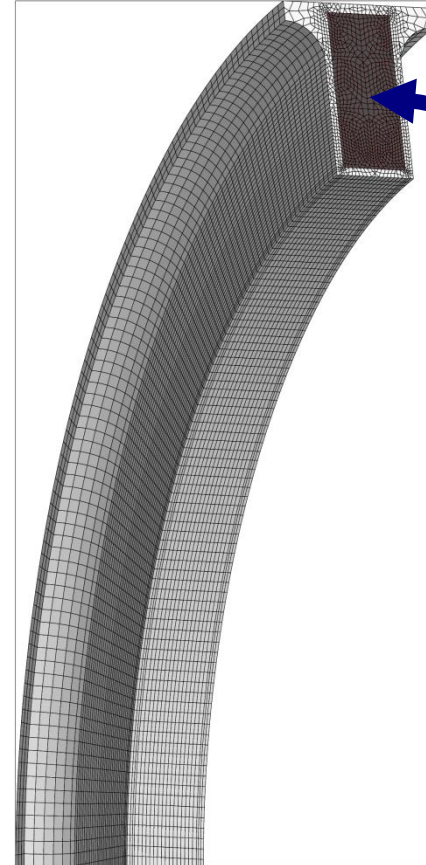
LE CENTRE DE R&T – STRUCTURATION EN 6 PÔLES



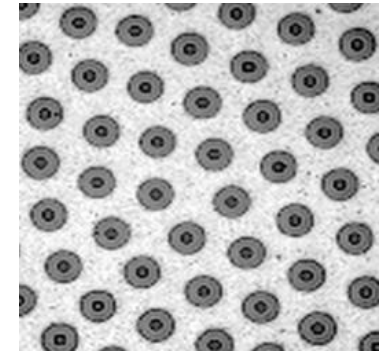
DISQUES MONOBLOC



Disque de turbine classique



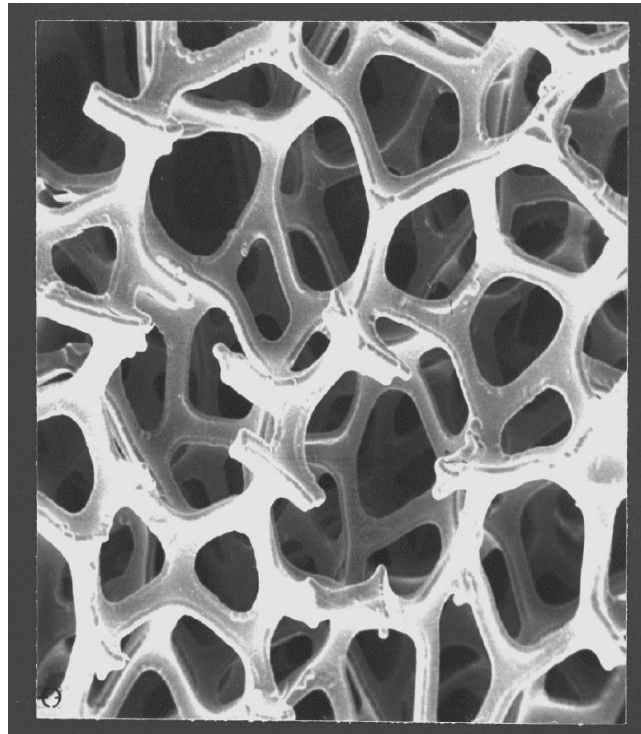
renfort SiC/Ti



BLING (BLaded rING),
Réduction de poids > 50%

MOUSSES MÉTALLIQUES

Nickel



200 μm (Dillard, 01)

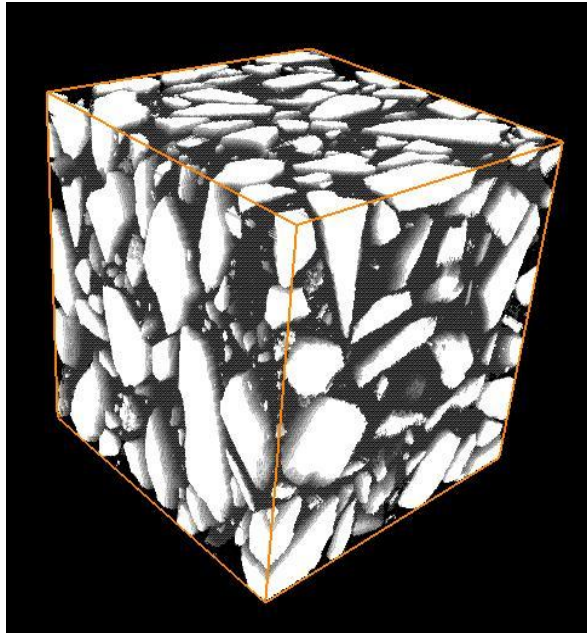
Aluminium



Fort contraste mécanique de phases

BÉTONS

Local



Macro



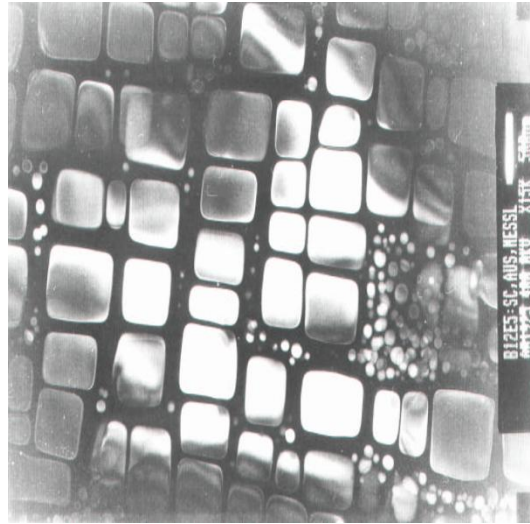
Large microstructure

ALLIAGES MÉTALLIQUES



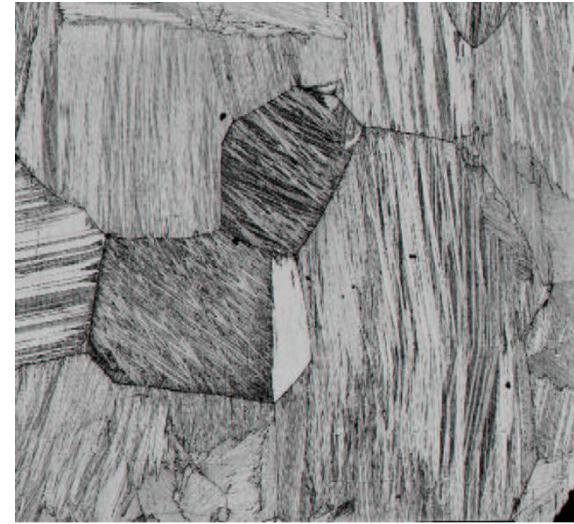
(Jousset, 99)

**Ti6242
(one grain)**



(Espié, 97)

Ni Single Cristal

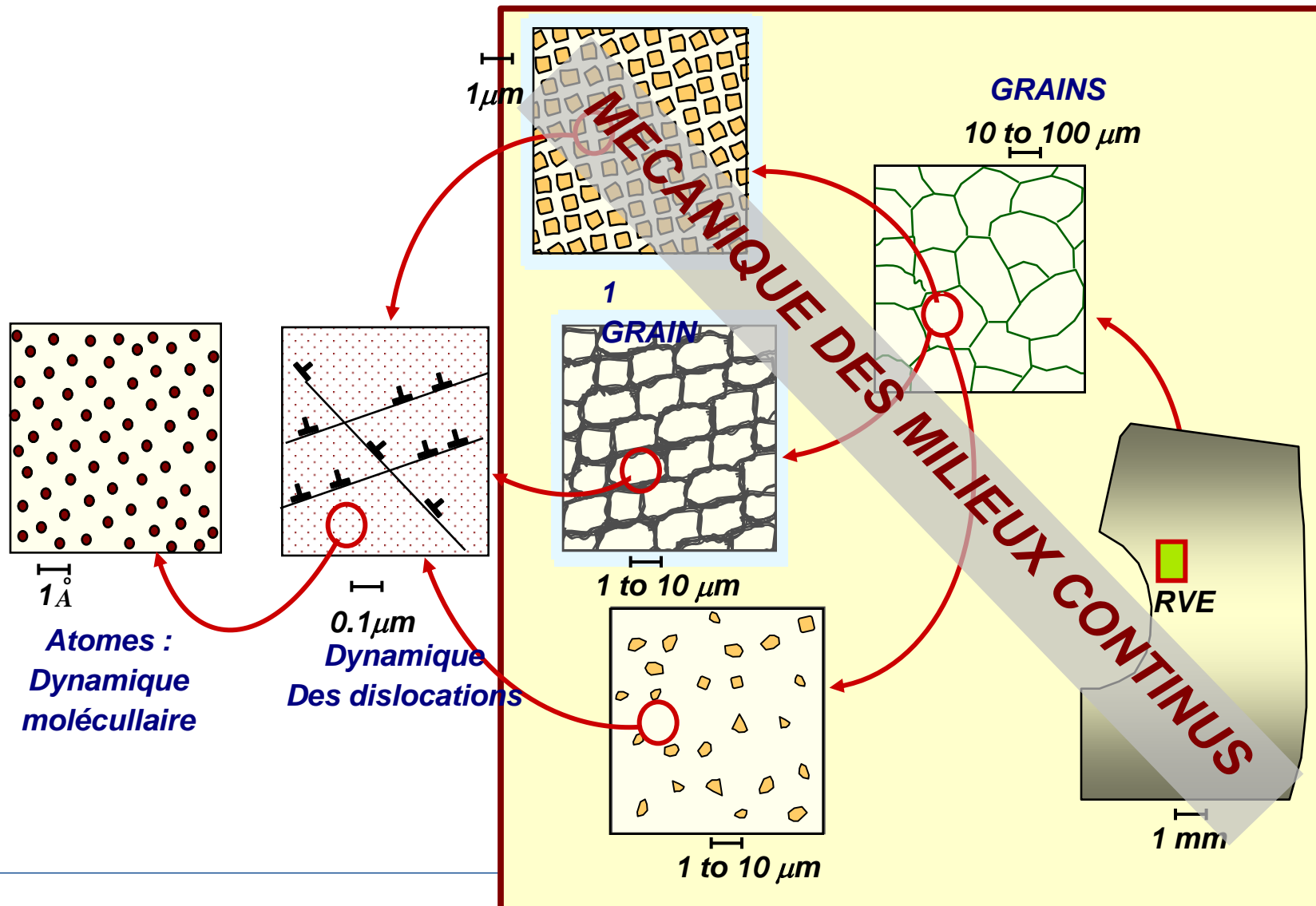


(Gourgues, 99)

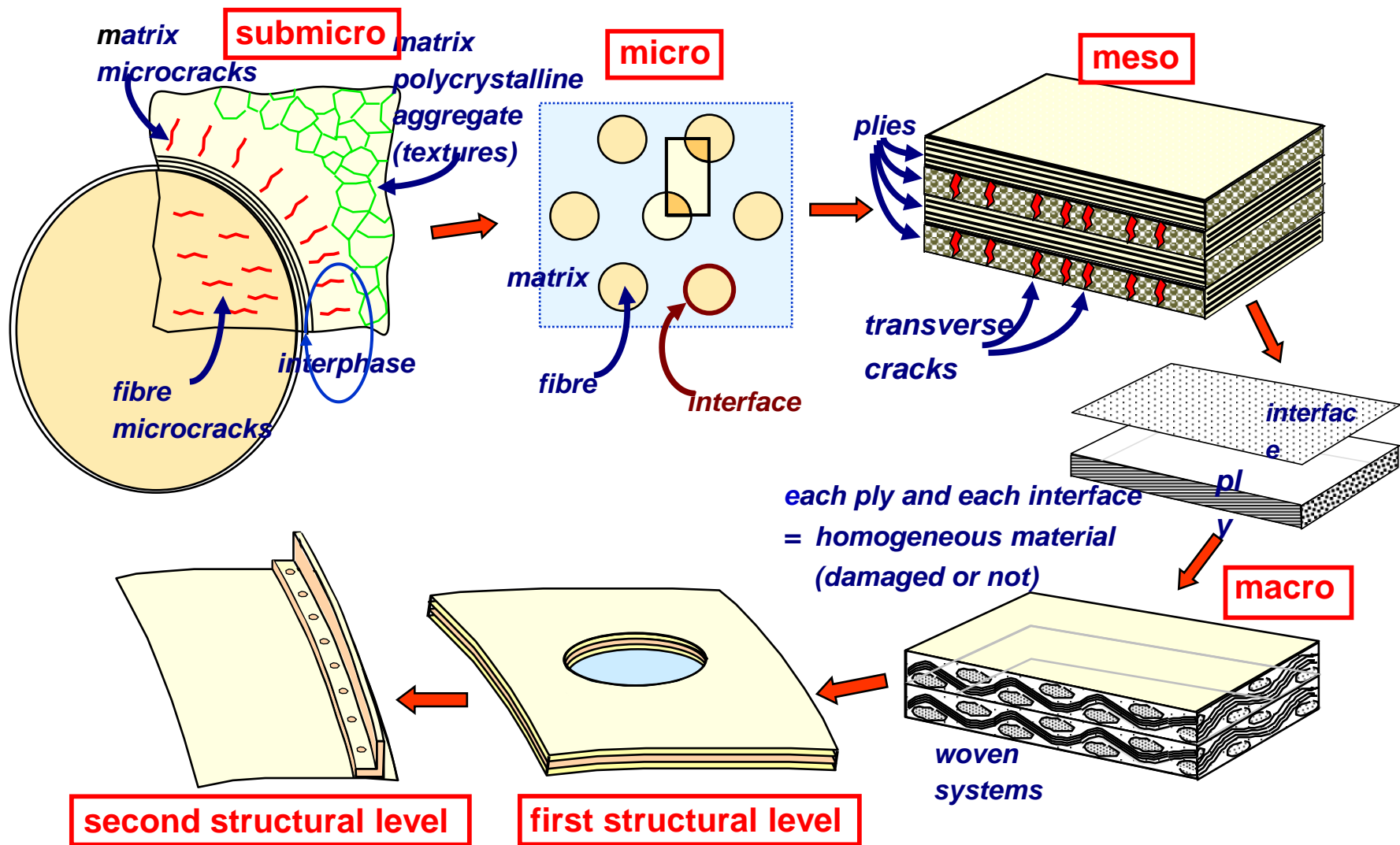
**Cu Zn Al
(shape memory alloy)**

Microstructures complexes

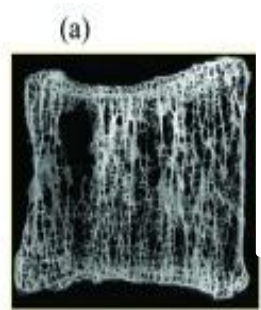
DES ÉCHELLES SPATIALES DIVERSES



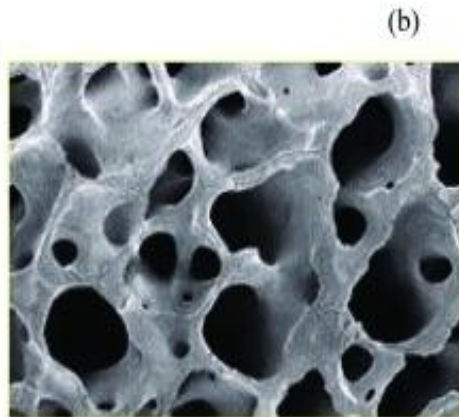
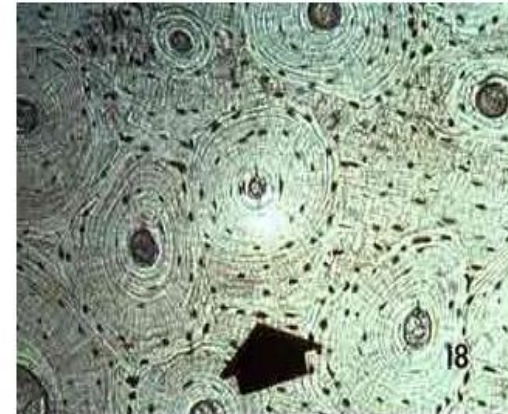
DES ÉCHELLES SPATIALES DIVERSES



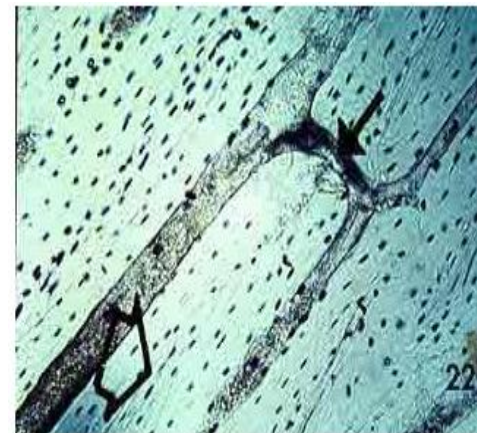
DES ÉCHELLES SPATIALES DIVERSES

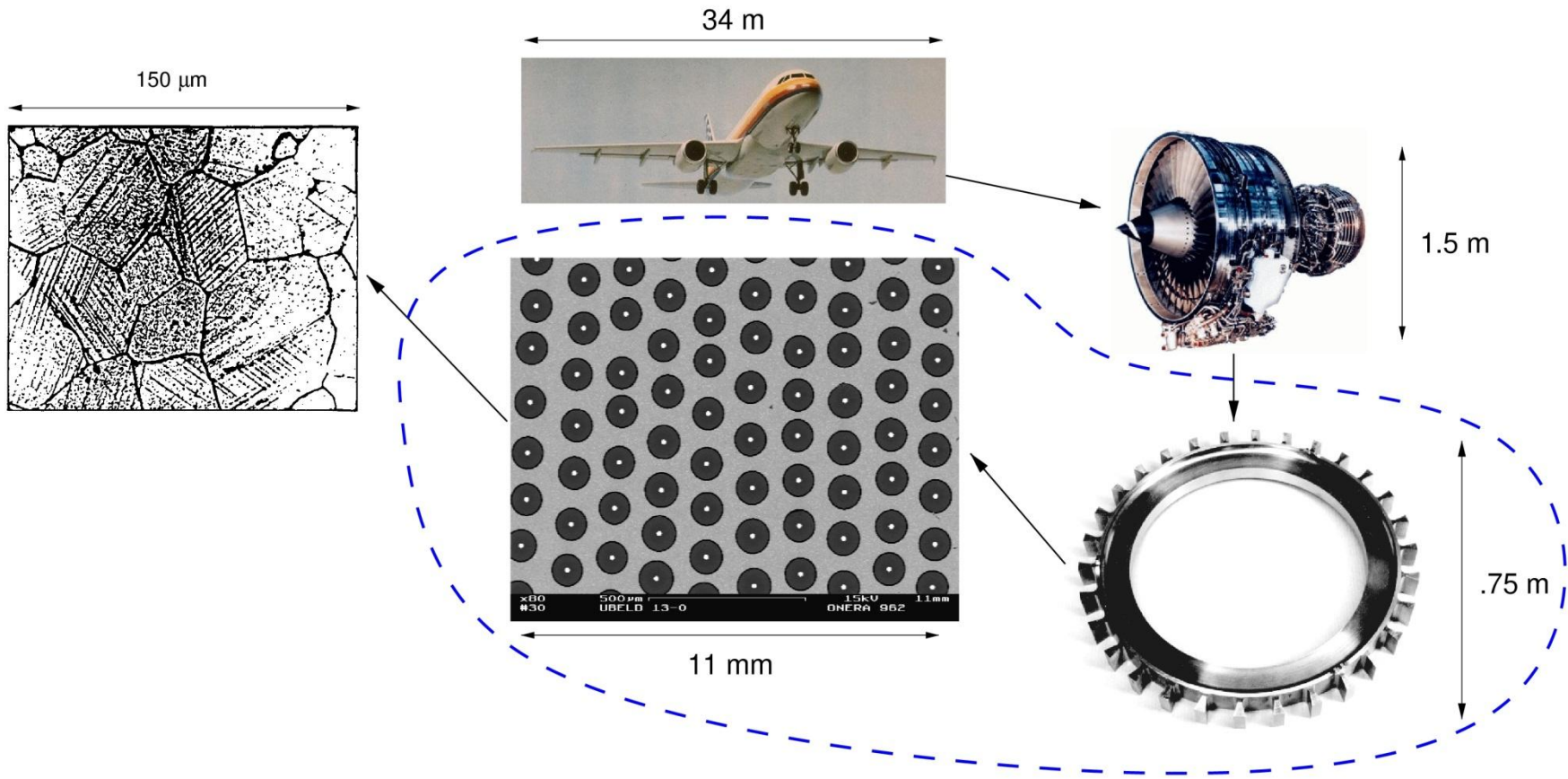


Transverse



Longitudinal





HOMOGENÉISATION

- **Idée naturelle : moyenner l'échelle micro...**
- **...pour construire des lois phénoménologiques macro**
- **« Cacher » l'échelle micro : Représentativité statistique**

- **Notion de Volume Élémentaire Représentatif (VER / RVE)**

ET DES LONGUEURS ASSOCIÉES

Hétérogénéité

h

RVE

l

Eprouvette

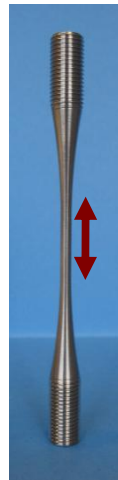
L_{exp}

Chargement

L_{app}

Structure

L



L_{exp}

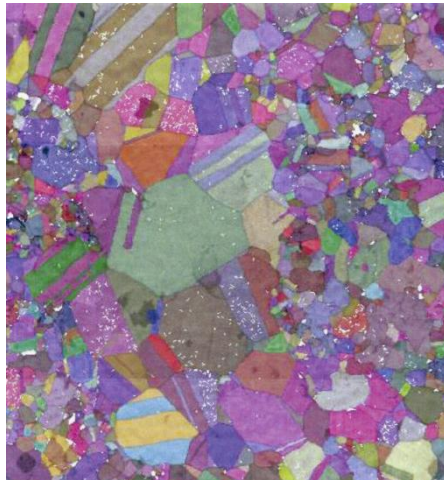


En général : $h < l < L_{exp} < L, L_{app}$

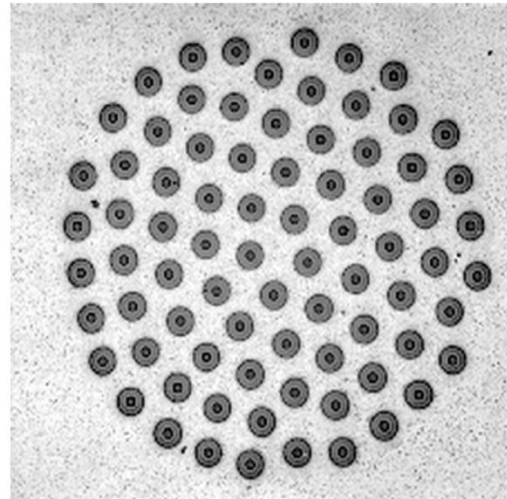
Souvent, il faut : $h \ll l \ll L, L_{app}$

RVE ?

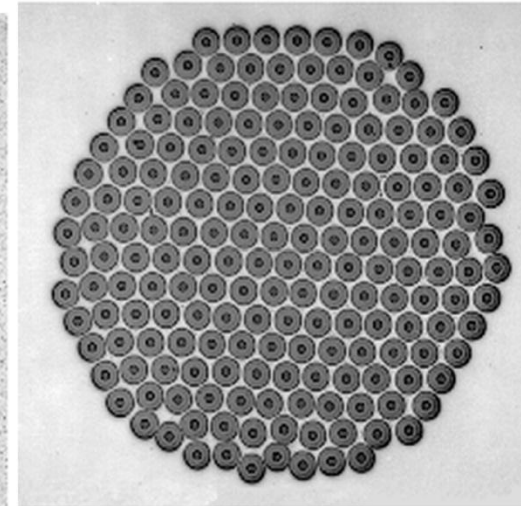
Choix du RVE ?



Aléatoire



Régulier



Géométrie, morphologie
Non-linéarités
Mécanique des milieux
continus

Suffisamment grand pour être représentatif

Suffisamment petit pour ne pas être influencé par les gradients mécaniques macro

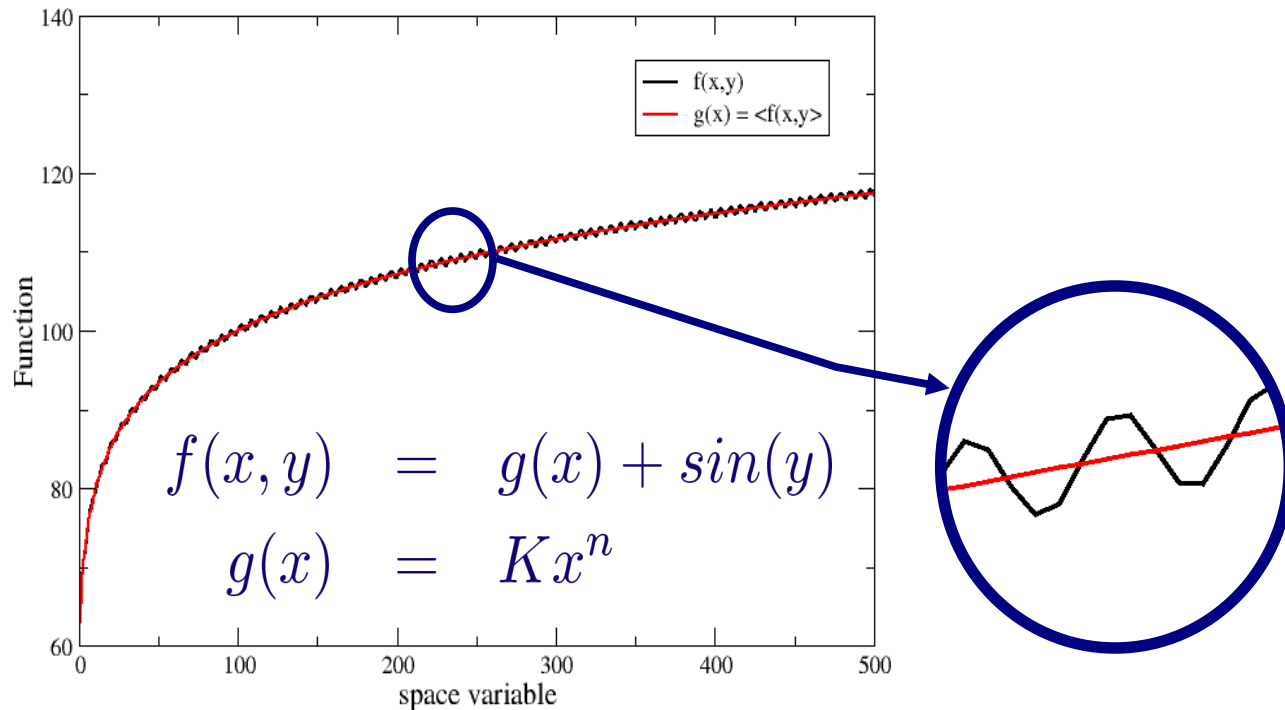
Hyp. 1: Séparation des échelles

Hyp. 2: Petits gradients macro

SÉPARATION DES ÉCHELLES

Macroscopique

$$\underline{\epsilon}(x, y) = \underbrace{\underline{E}(x)}_{\text{Lent}} + \underbrace{\underline{\epsilon}'(y)}_{\text{Rapide}}$$
$$\underline{\sigma}(x, y) = \underbrace{\underline{\Sigma}(x)}_{\text{Lent}} + \underbrace{\underline{\sigma}'(y)}_{\text{Rapide}} \text{ Micro.}$$



HOMOGÉNÉISATION

Echelle macro :

Contrainte $\underline{\underline{\Sigma}}$ (tenseur d'ordre 2)

Déformation $\underline{\underline{E}}$

Rigidité

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \underline{\underline{L}} : \underline{\underline{E}}$$

Echelle micro :

Contrainte $\underline{\underline{\sigma}}$

Déformation $\underline{\underline{\epsilon}}$

Moyenne spatiale

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \underline{\underline{\sigma}} \, dv$$

RÉSULTAT THÉORIQUE

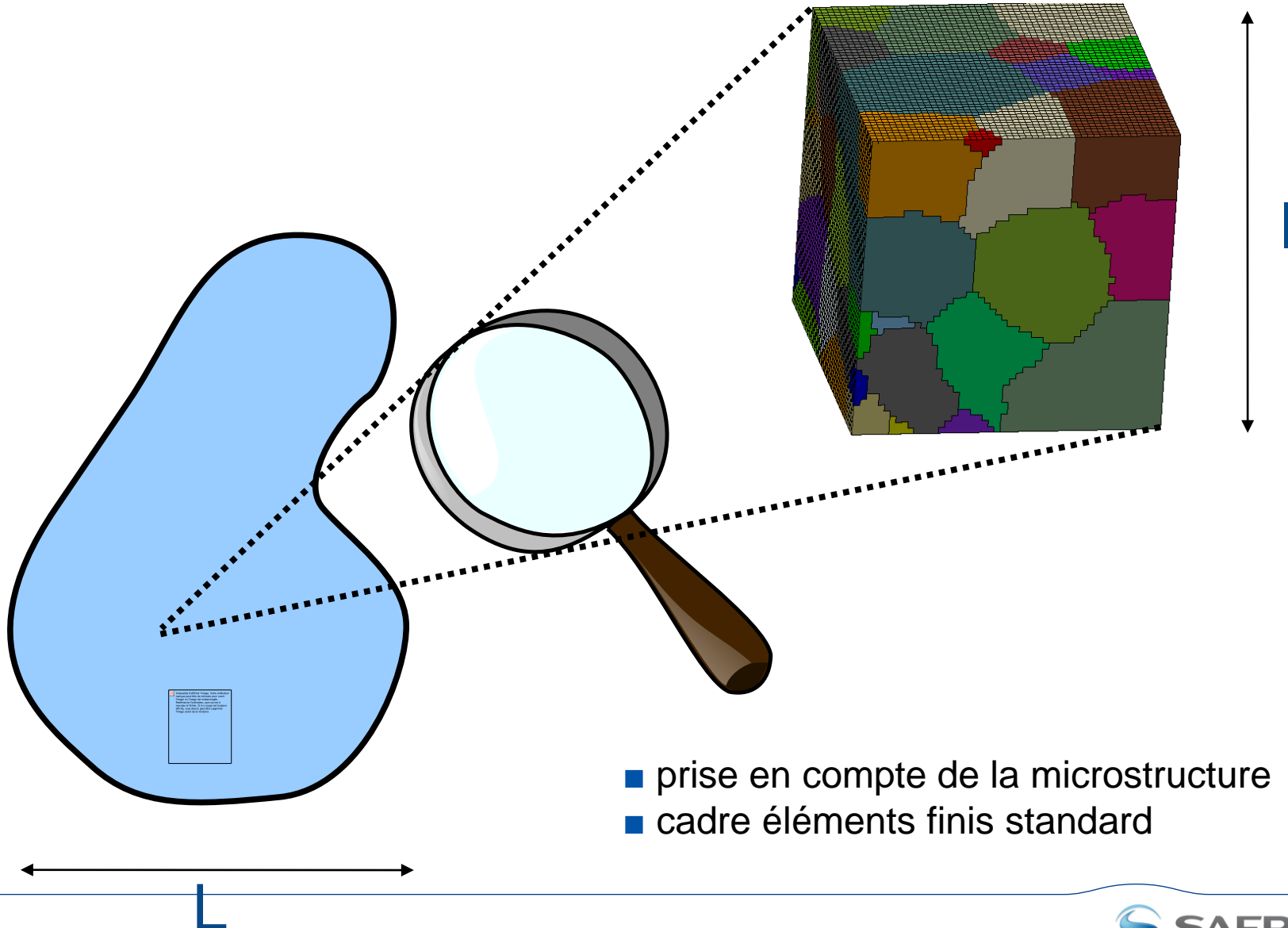
Dans les hypothèses suivantes :

- **Élasticité linéaire**
- **Séparabilité des échelles**

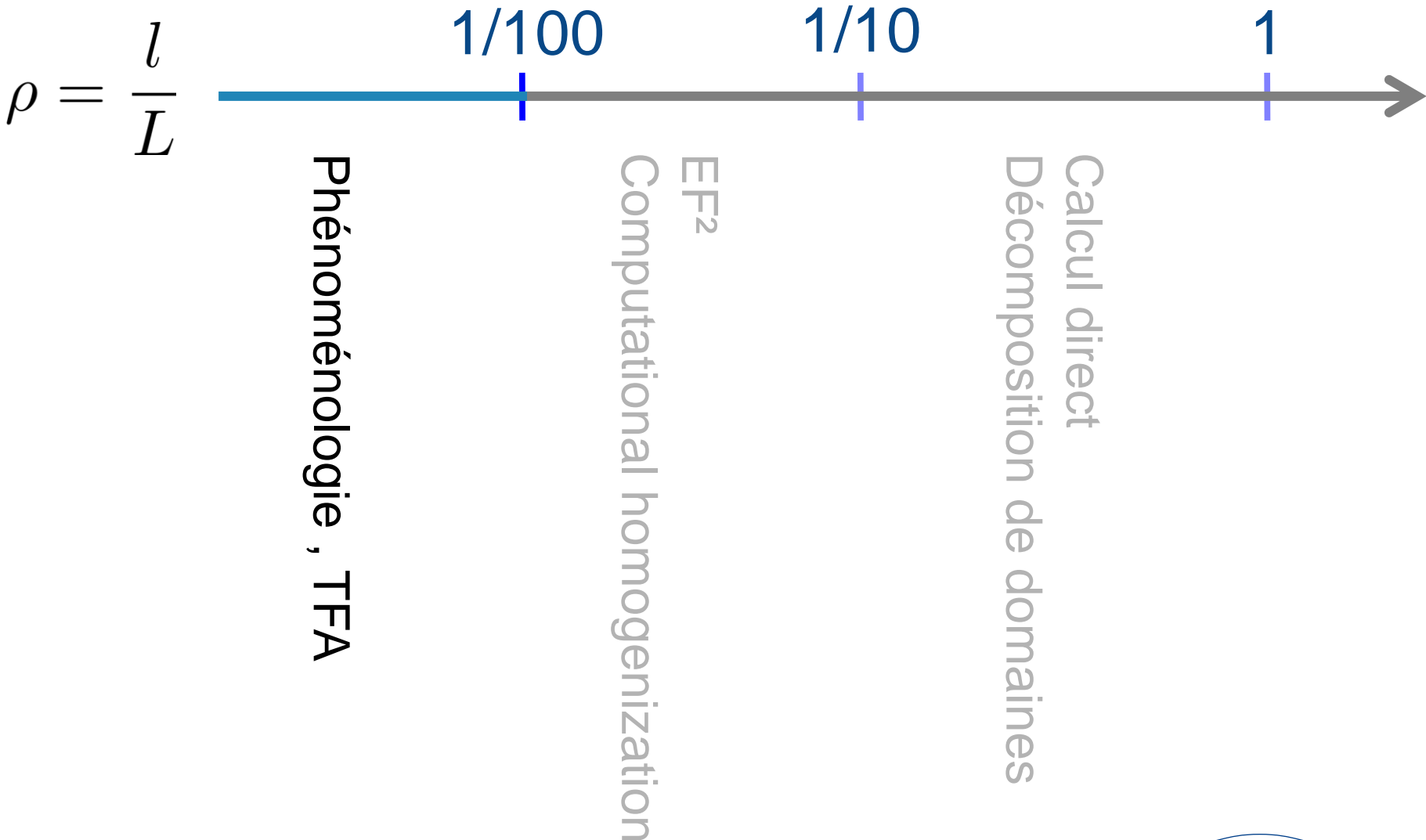
Alors :

- **On peut peut passer à la limite (faire tendre y/x vers 0) dans le problème initial**
- **La solution *homogène* est un problème linéaire**

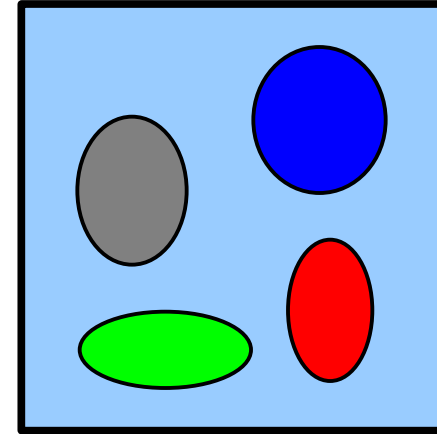
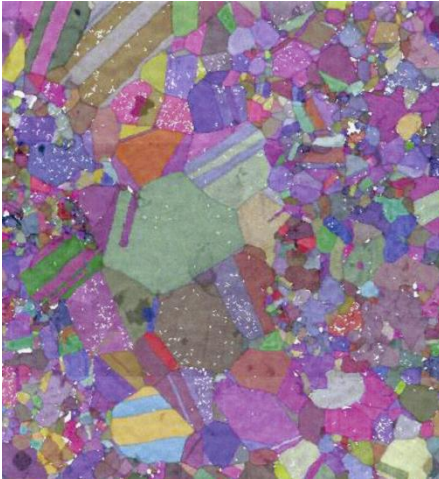
L'OBJET DU DÉBAT



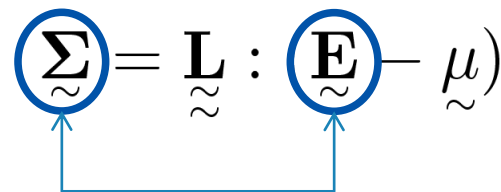
UNE CLASSIFICATION : TAILLE DU VER



MODÈLES À CHAMPS MOYENS



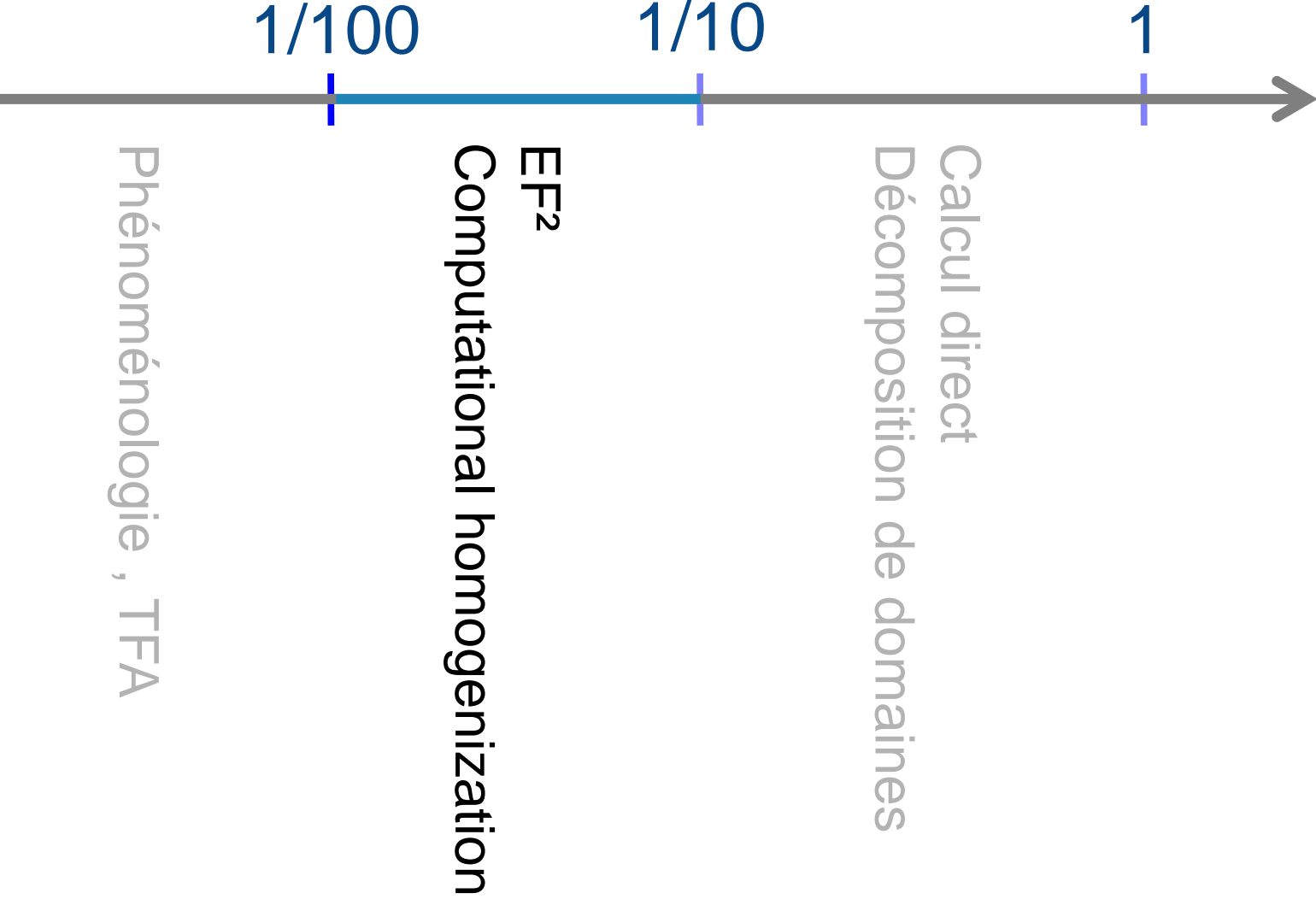
$$\underline{\underline{\sigma}}_{\mathbf{r}}(x) = \underline{\underline{\mathbf{L}}}_{\mathbf{r}} : (\underline{\underline{\epsilon}}_{\mathbf{r}}(x) - \underline{\underline{\mu}}_{\mathbf{r}}(x))$$

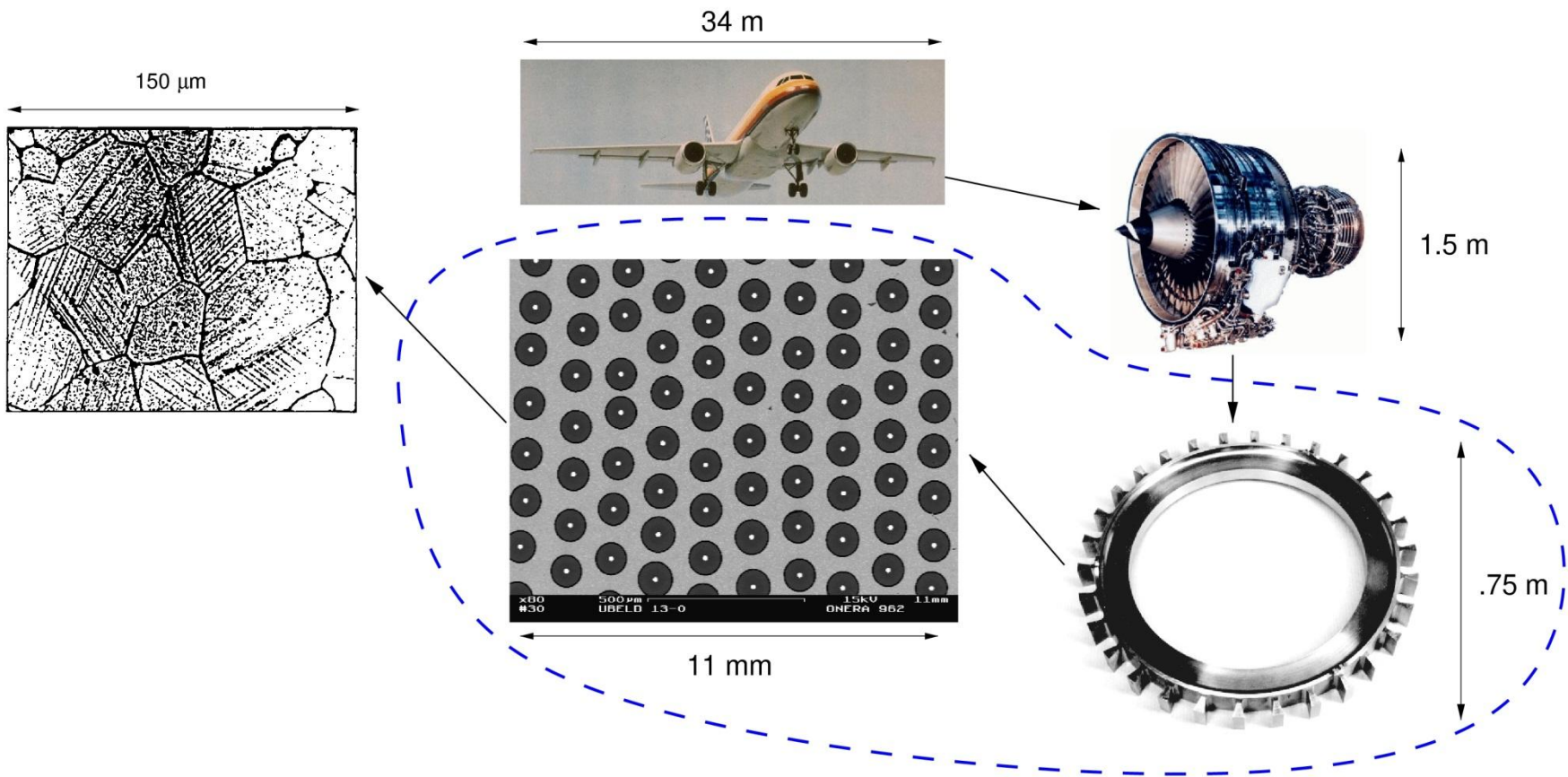
$$\underline{\underline{\Sigma}} = \underline{\underline{\mathbf{L}}} : (\underline{\underline{\mathbf{E}}} - \underline{\underline{\mu}})$$


MODÈLES A CHAMPS MOYENS

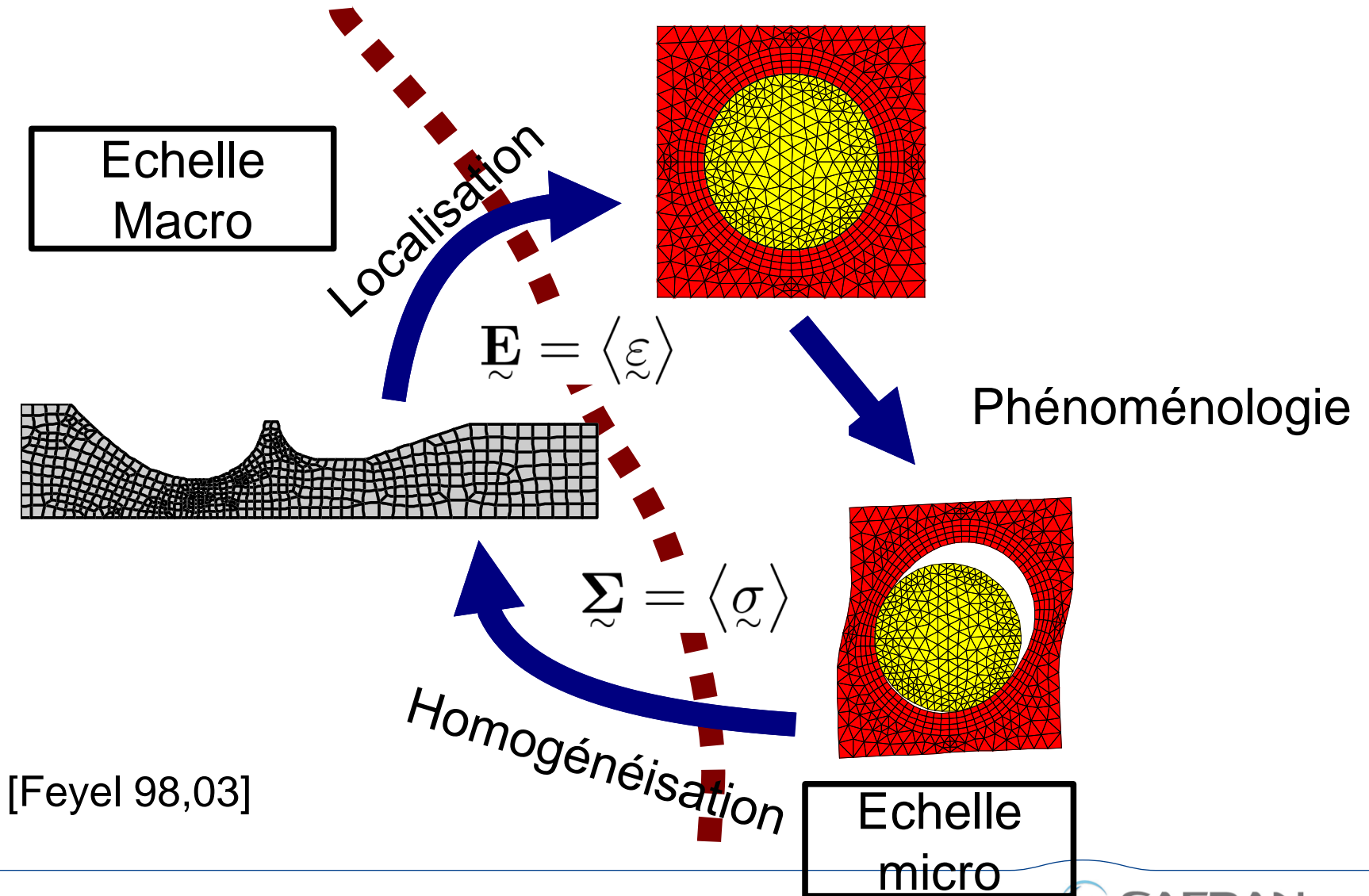
- Il existe une gamme de modèles de complexité croissante
- Notamment des méthodes n-TFA dans lesquels les champs sont non-uniformes par phase (champs postulés en fonction du problème)
- Tous ces modèles du point de vue calcul reviennent à de gros systèmes différentiels locaux en espace, à grand nombre de paramètres
 - Donc cadre classique des méthodes de parallélisme en non-linéaire
 - Difficulté de conditionnement
 - Equilibrage des charges
- Ces approches échouent lorsque le comportement est trop fortement non-linéaire et localisé à l'échelle micro, eg endommagement micro

UNE CLASSIFICATION : TAILLE DU VER





MÉTHODES FE²



→ Pas d'hypothèse sur le comportement local

→ Pas de loi de comportement à l'échelle macro

→ $N_{\text{macro}} \times N_{\text{pg}}$ calculs EF micro simultanés

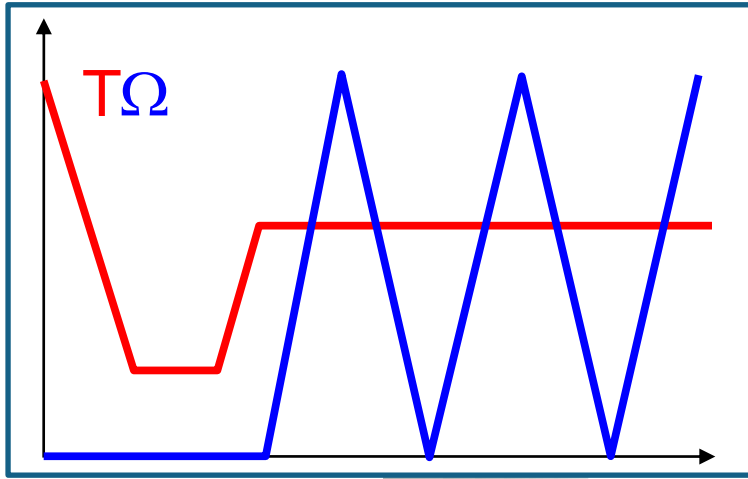
- HPC indispensable
- On commence à se dire que ces approches pourraient servir à quelque chose
 - Si on les couple aux techniques de réductions de modèles automatiques

→ Question cruciale de l'équilibrage de charge

→ Extension possible vers plus de 2 échelles : Fe^n , $n > 2$

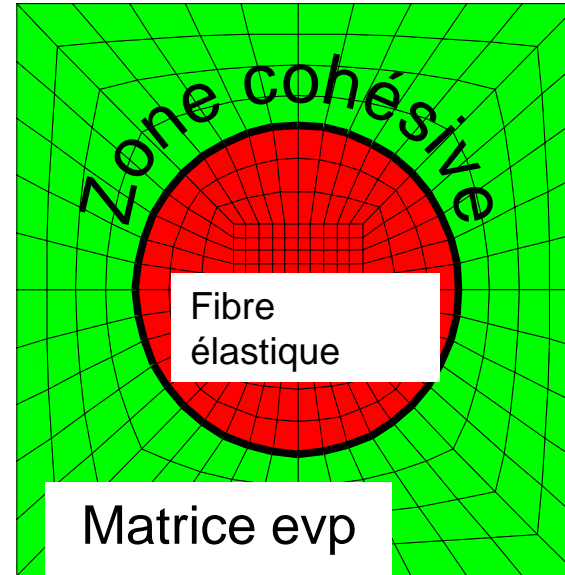
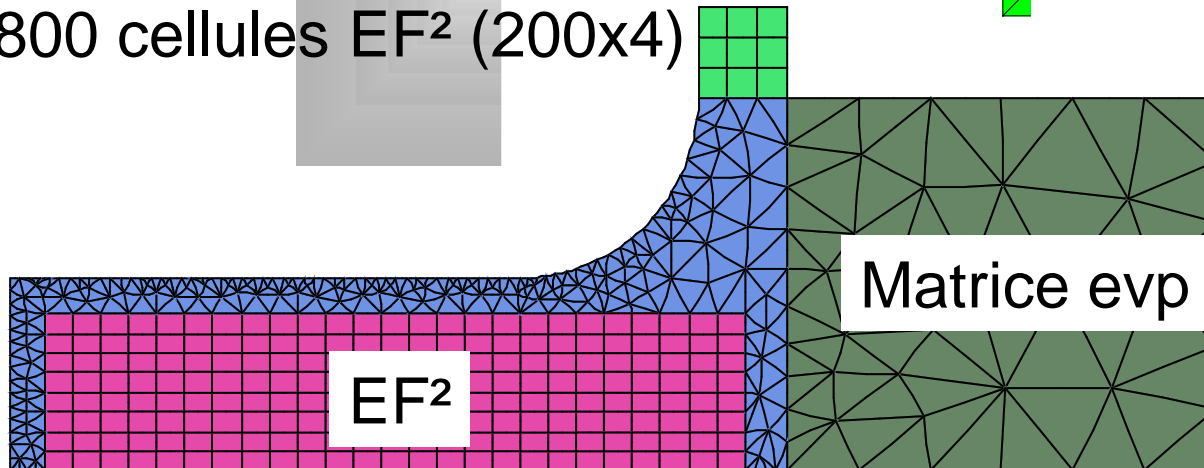
→ Fonctionne aussi quand les hétérogénéités sont assez grosses → milieux généralisés

EXEMPLE ACADÉMIQUE FE²



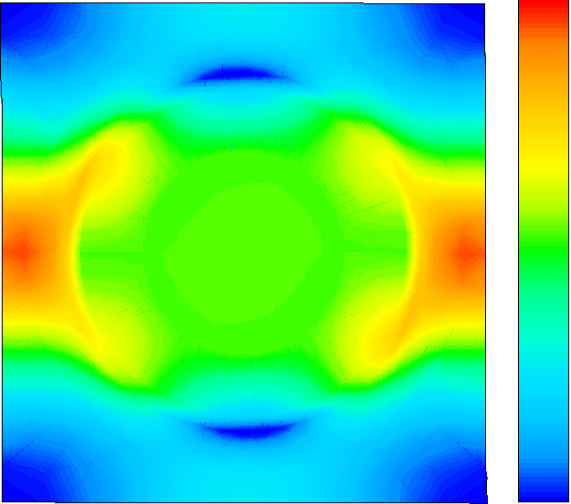
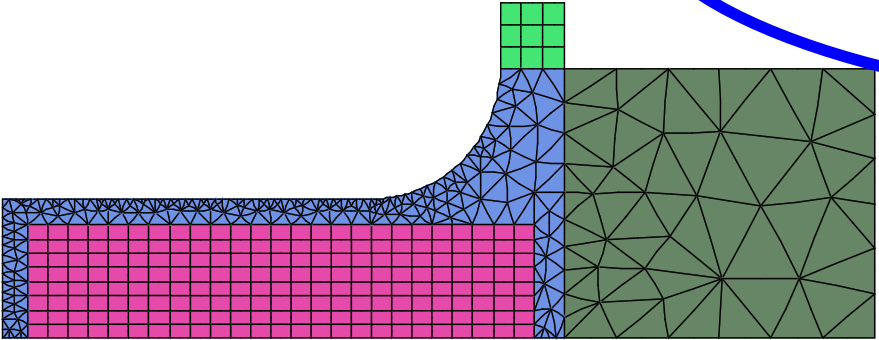
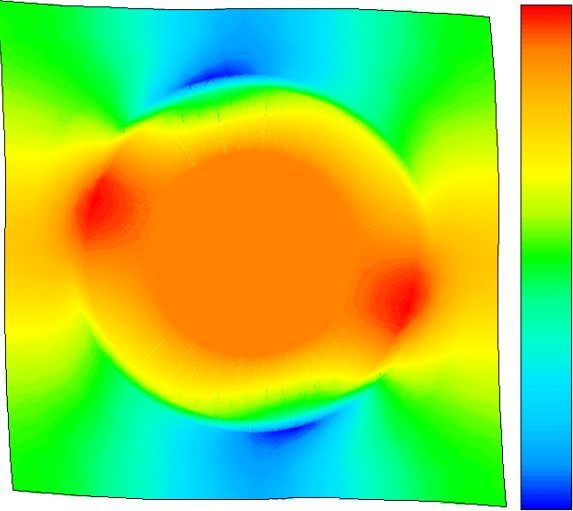
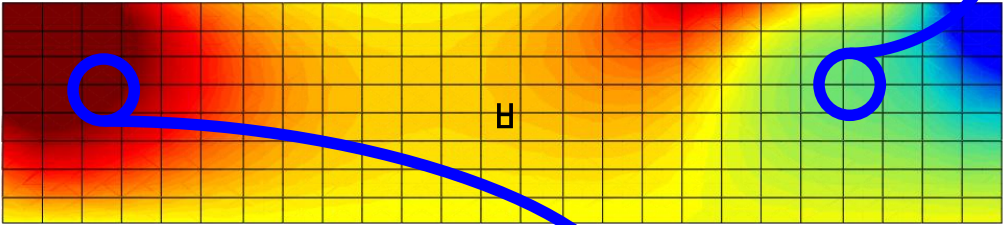
3206 ddls

800 cellules EF² (200x4)

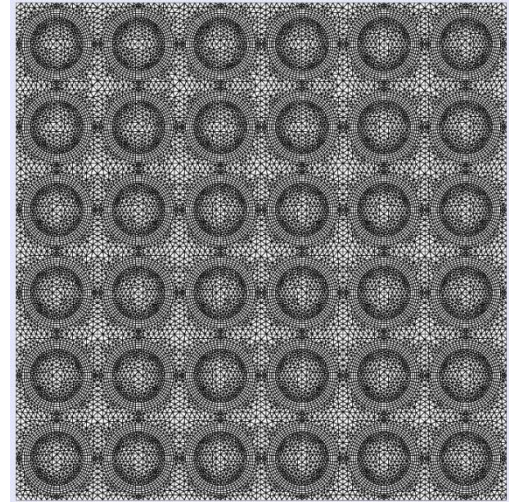
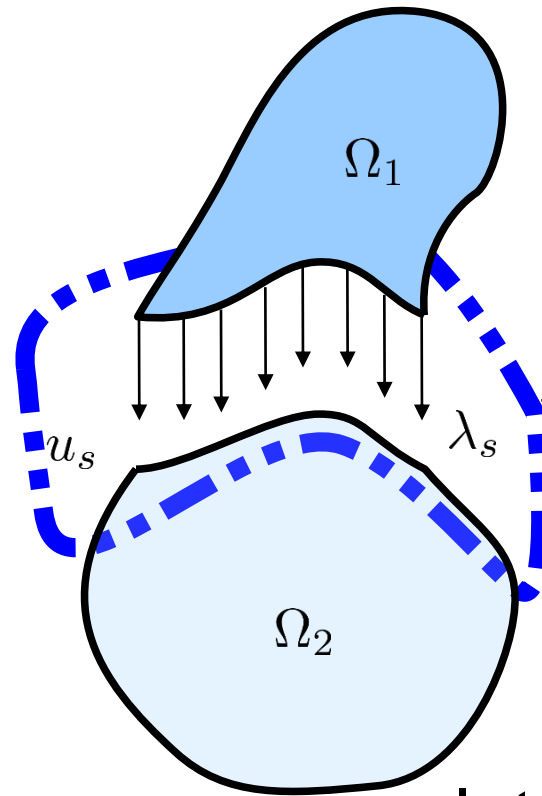
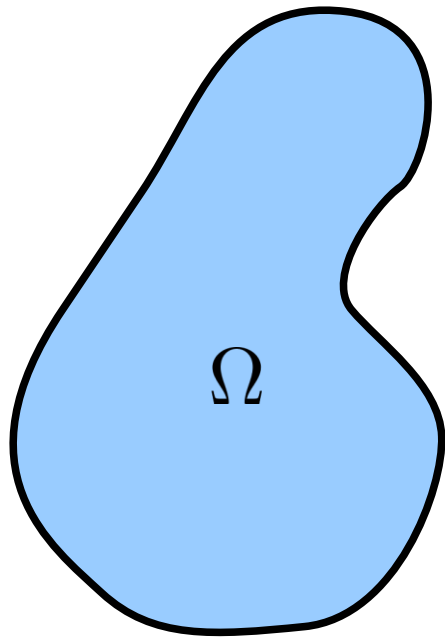


882 ddls
482 éléments

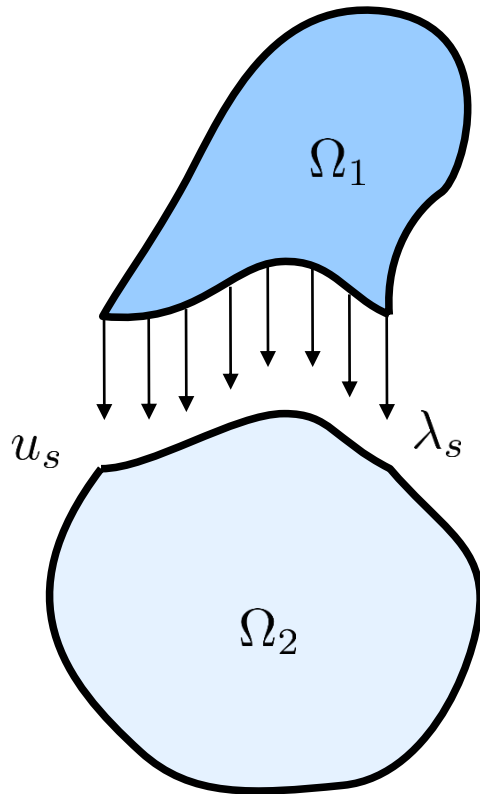
$$J_2(\tilde{\Sigma})$$







Interface parfaite



$$\begin{cases} \Sigma_s L^{(s)} \lambda^{(s)} & = & 0 \\ \Sigma_s B^{(s)} u^{(s)} & = & 0 \end{cases}$$

Equilibre

Continuité

$$K^{(s)} u^{(s)} = f^{(s)} + \lambda^{(s)}$$

→ En pratique,

- Le problème **local** est résolu de manière exacte (directe)
- Le problème **condensé** est résolu de manière itérative

$$K^{(s)} u^{(s)} = f^{(s)} + \lambda^{(s)}$$

$$\begin{cases} \sum_s L^{(s)} \lambda^{(s)} = 0 \\ \sum_s B^{(s)} u^{(s)} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i \\ f_b + \lambda_b \end{bmatrix}$$

Élimination des ddl internes

$$\boxed{(K_{bb} - K_{bi}K_{ii}^{-1}K_{ib})} \cdot u_b = \boxed{(f_b - K_{bi}K_{ii}^{-1}f_i)} + \lambda_b$$

Schur primal S_p b_p

Primale : Inconnue du problème : u_b

FETI / Duale : Inconnue du problème : λ_b

$$\begin{cases} u = \overset{\text{Pseudo-inverse}}{\boxed{K}}^+ (f + B^t \lambda_b) + \overset{\text{Noyau}}{\boxed{R}} \alpha \\ R^t (f + B^t \lambda_b) = 0 \end{cases}$$

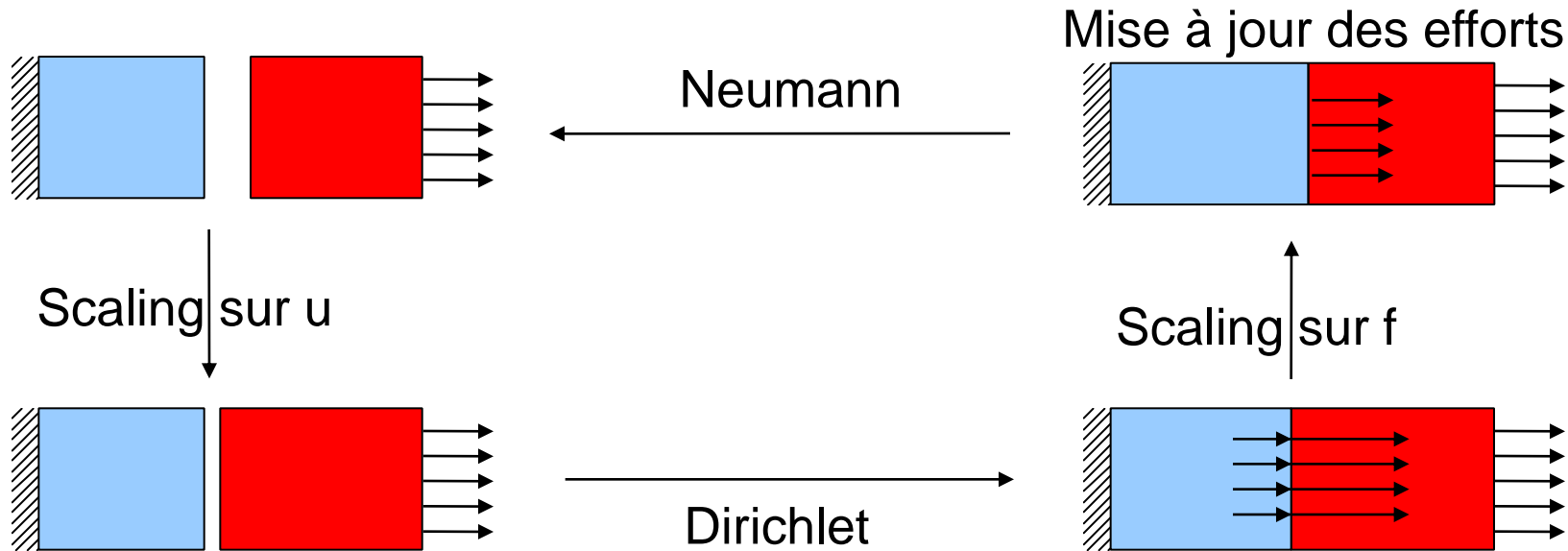
Soit le système en (λ, u)

Schur dual

$$\begin{pmatrix} B.K^+.B^t & B.R \\ R^t.B^t & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_b \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -B.K^+.f \\ -R^t.f \end{pmatrix}$$

Hors de question d'assembler ces systèmes !

Début du FETI / dual



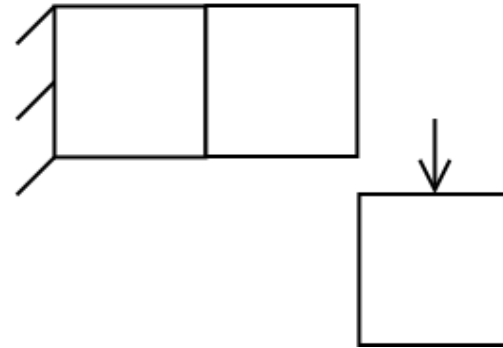
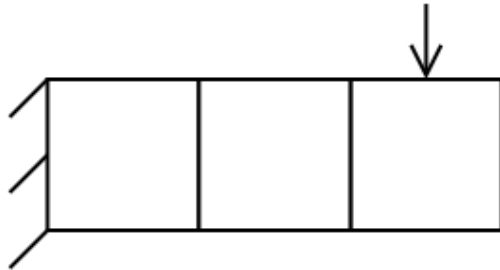
Début du primal

MULTI-ÉCHELLES ?

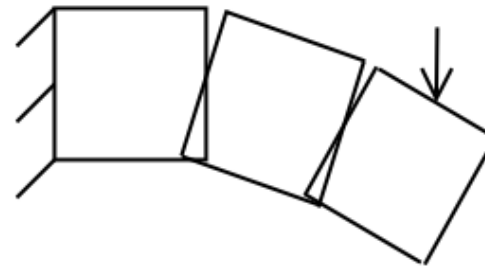
- Introduction d'une échelle « grossière » / « macro »
- Décomposition de la solution
- Orthogonalité

GRILLE GROSSIÈRE MINIMALE

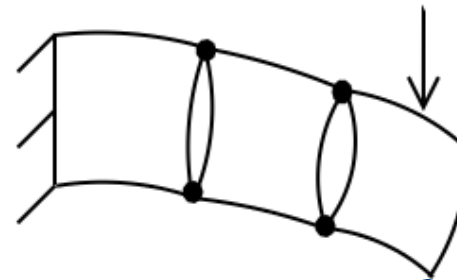
Sous-domaines flottants



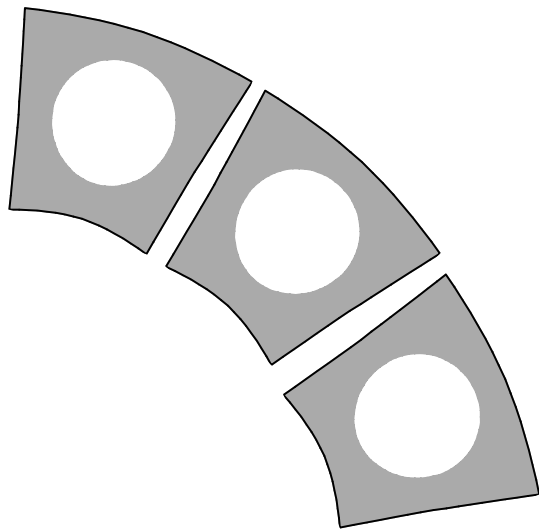
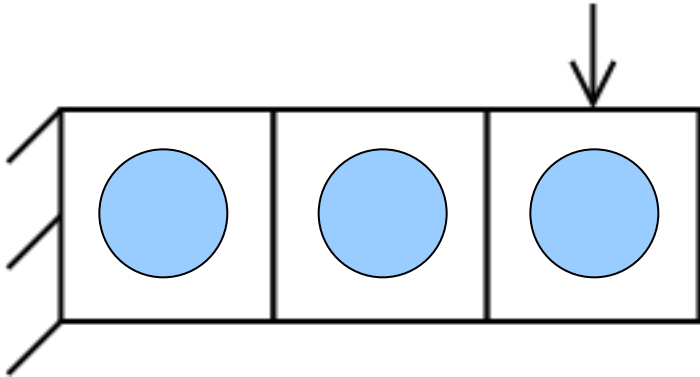
Elimination par projection



Elimination par continuité aux coins



AJOUT D'UN PRÉCONDITIONNEUR « MÉCANIQUE » FE2 [BELYTSCHKO 08] [KACZMARCZYK 10]



$$\underline{\mathbf{q}} = \underline{\tilde{\mathbf{q}}} + \underline{\mathbf{q}'}$$

Grande longueur d'onde

Petite longueur d'onde

