

**La métallurgie est partout...  
Comment peut elle  
apparaître quelque part?**

**Yves Bréchet**

**HC CEA et SIMAP-INP**

[Yves.brechet@cea.fr](mailto:Yves.brechet@cea.fr)

[Yves.brechet@grenoble-inp.fr](mailto:Yves.brechet@grenoble-inp.fr)

# Plan de l'exposé

- Vous avez dit « métallurgie »?
- Regardons d'où nous venons...
- La métallurgie où on ne l'attend pas forcément...
- « Apparaître quelque part... »
- Conclusions

**Vous avez dit « Métallurgie » ?**

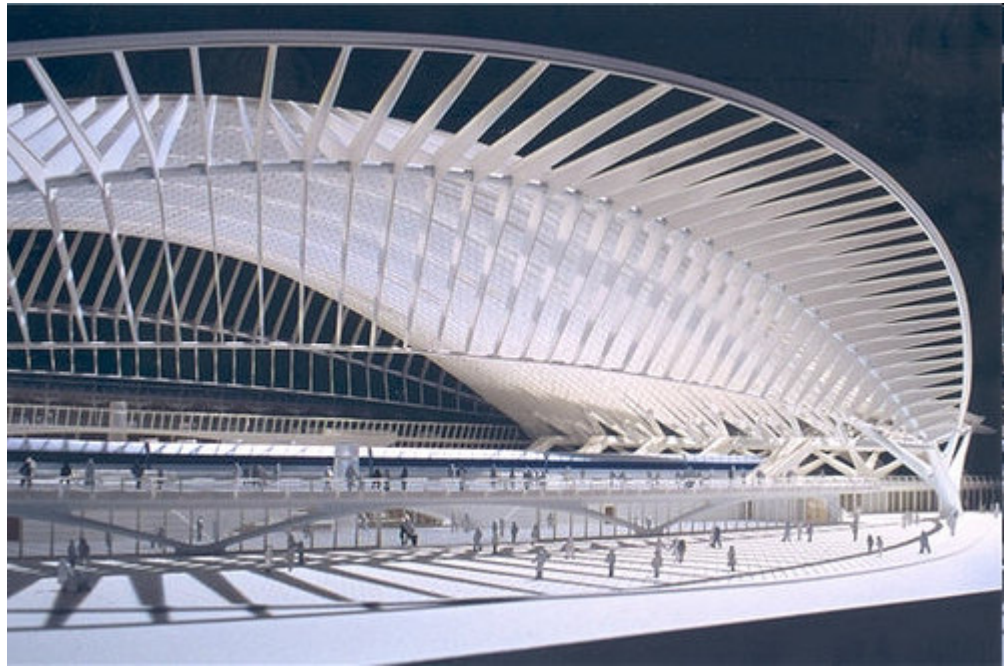
# Haut fourneau et Laminoirs



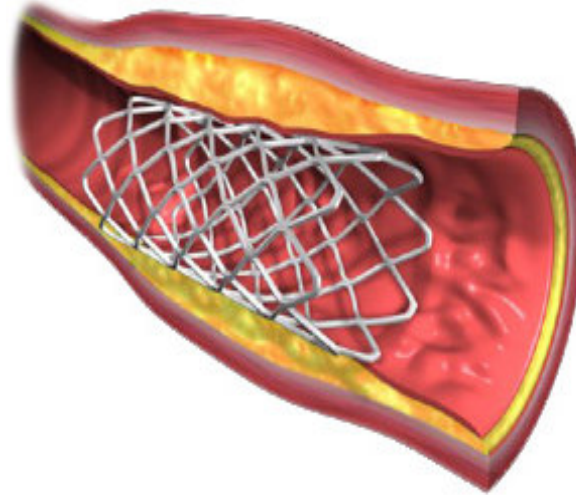
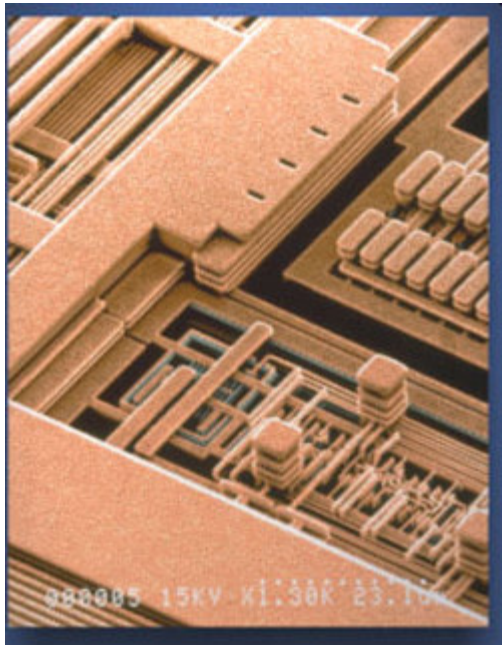
# Transport: Automobile/Avion / Train



# Au quotidien: de la boîte boisson au bâtiment



# De la microélectronique au biomedical

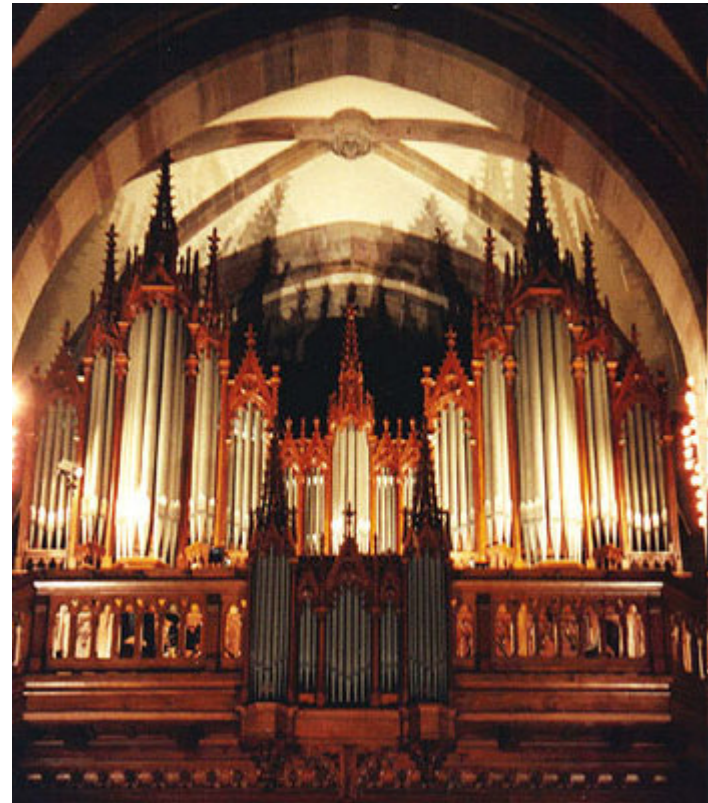
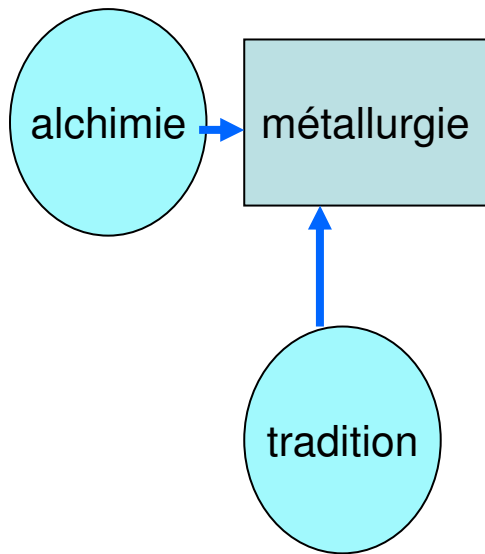


# Quelques idées simples

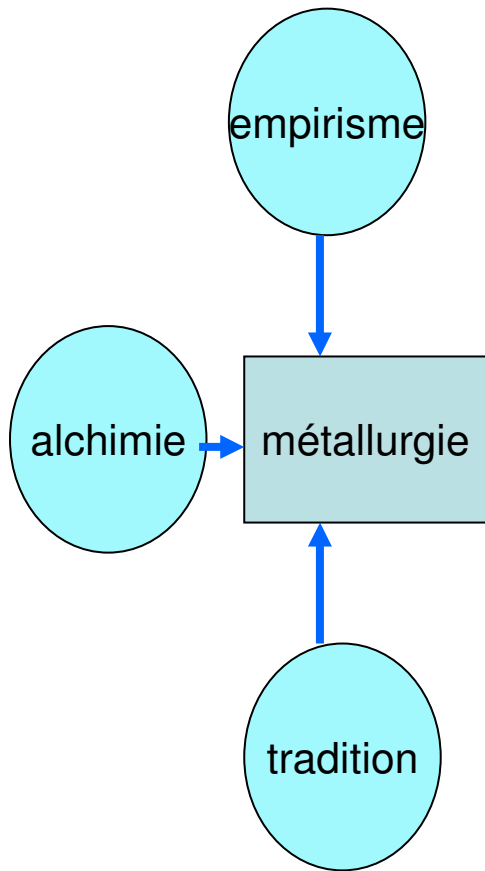
- Les métaux et alliages apparaissent dans tous les domaines industriels impliquant la maîtrise de la matière
- Une compétition féroce existe entre les différents métaux, mais aussi avec les autres matériaux
- La recherche de la performance ( allègement des structures, augmentation des rendements des moteurs, miniaturisation des dispositifs...) conduit à une évolution des alliages
- Les exigences applicatives conduisent à comprendre les procédés de mise en œuvre et leur incidence sur les propriétés
- Cette évolution passe par le développement de modèles, en étroite relation avec l'expérimentation
- Le développement de modèles prédictifs , les questions de changement d'échelle de temps et d'espace, les besoins d'extrapolation fiable, nécessitent de résoudre des questions scientifiques fondamentales



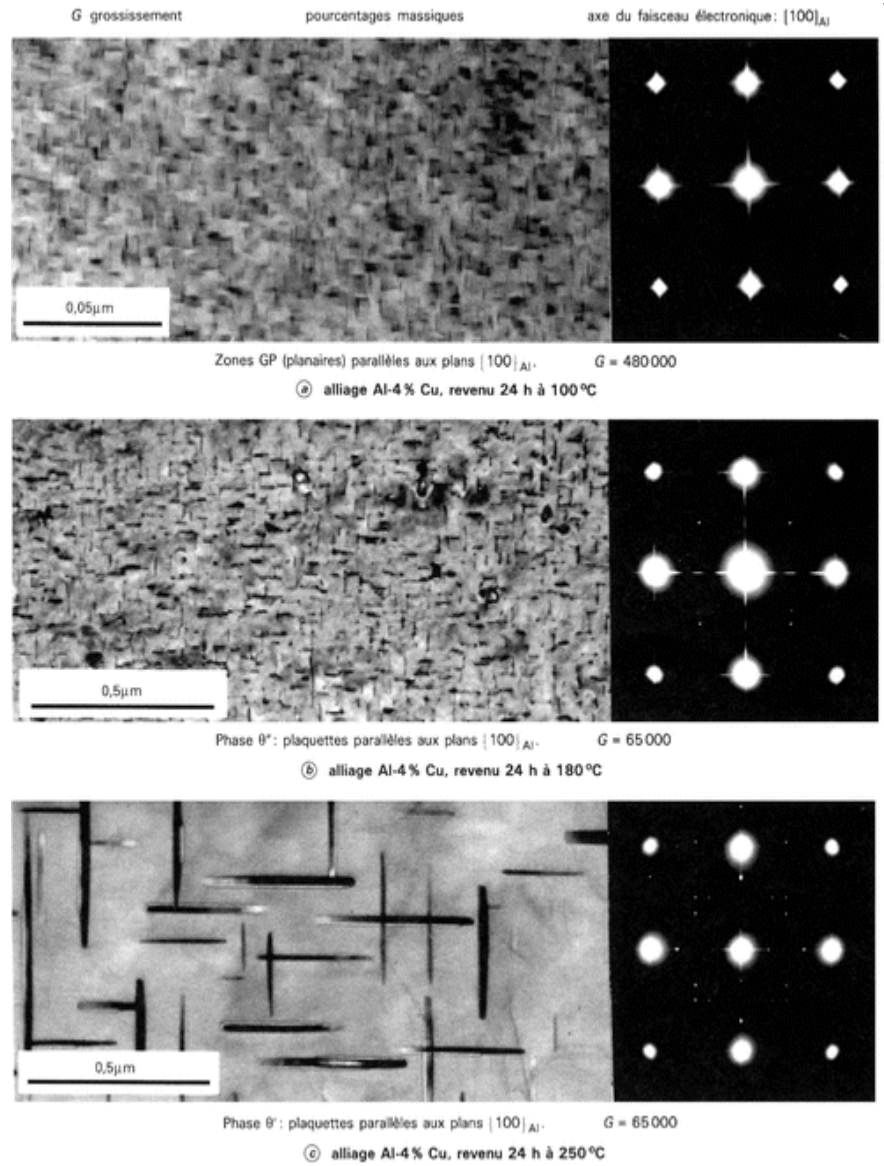
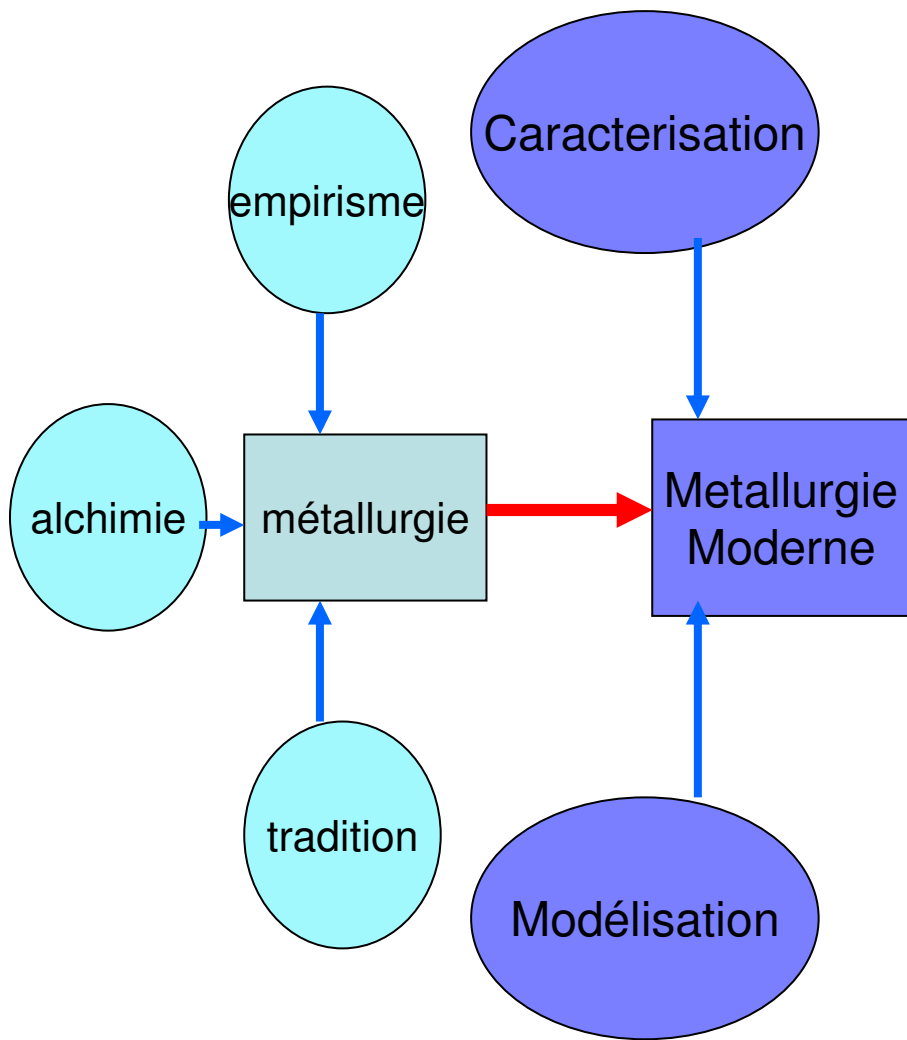
**Regardons d'où nous venons**

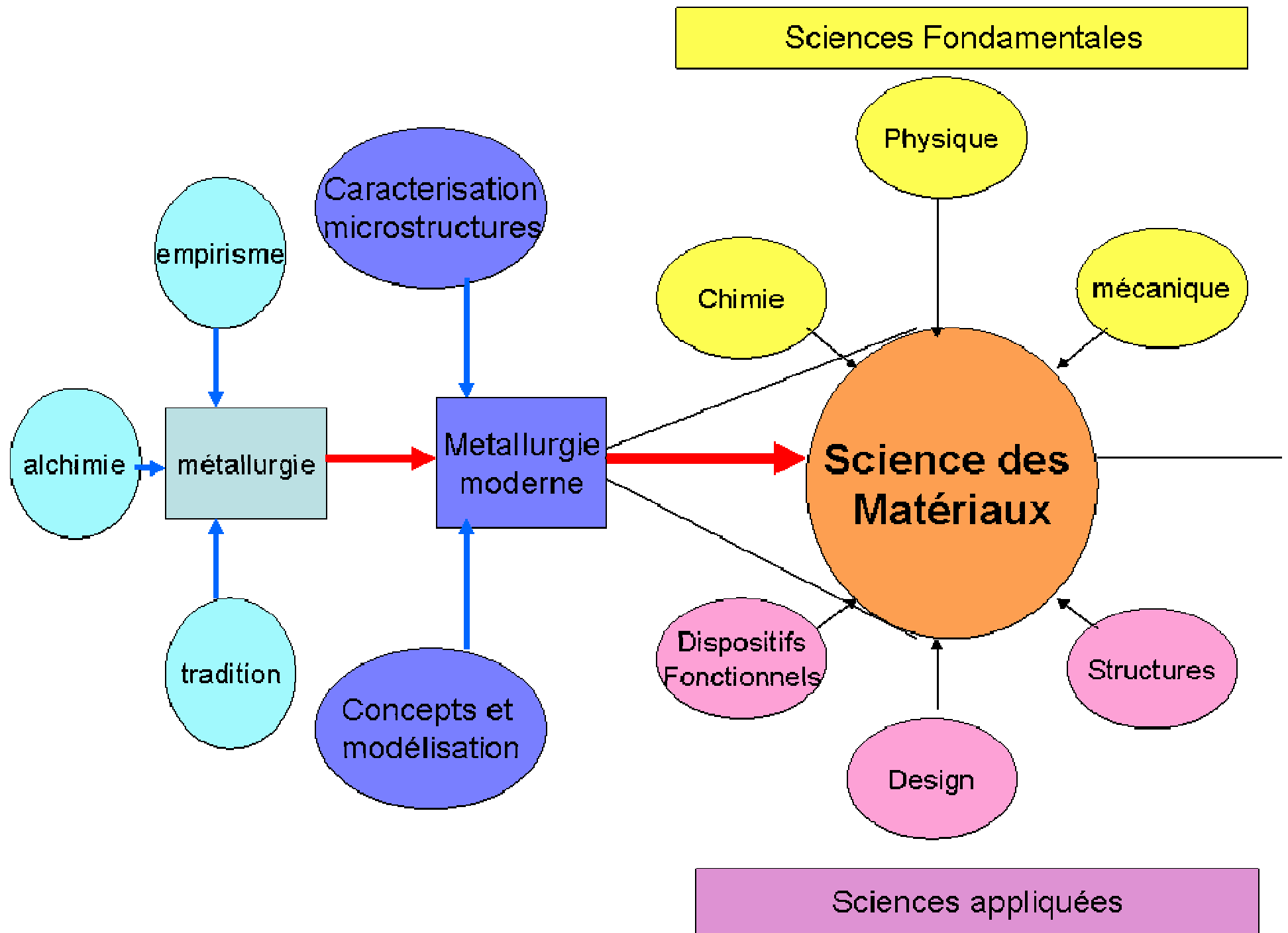


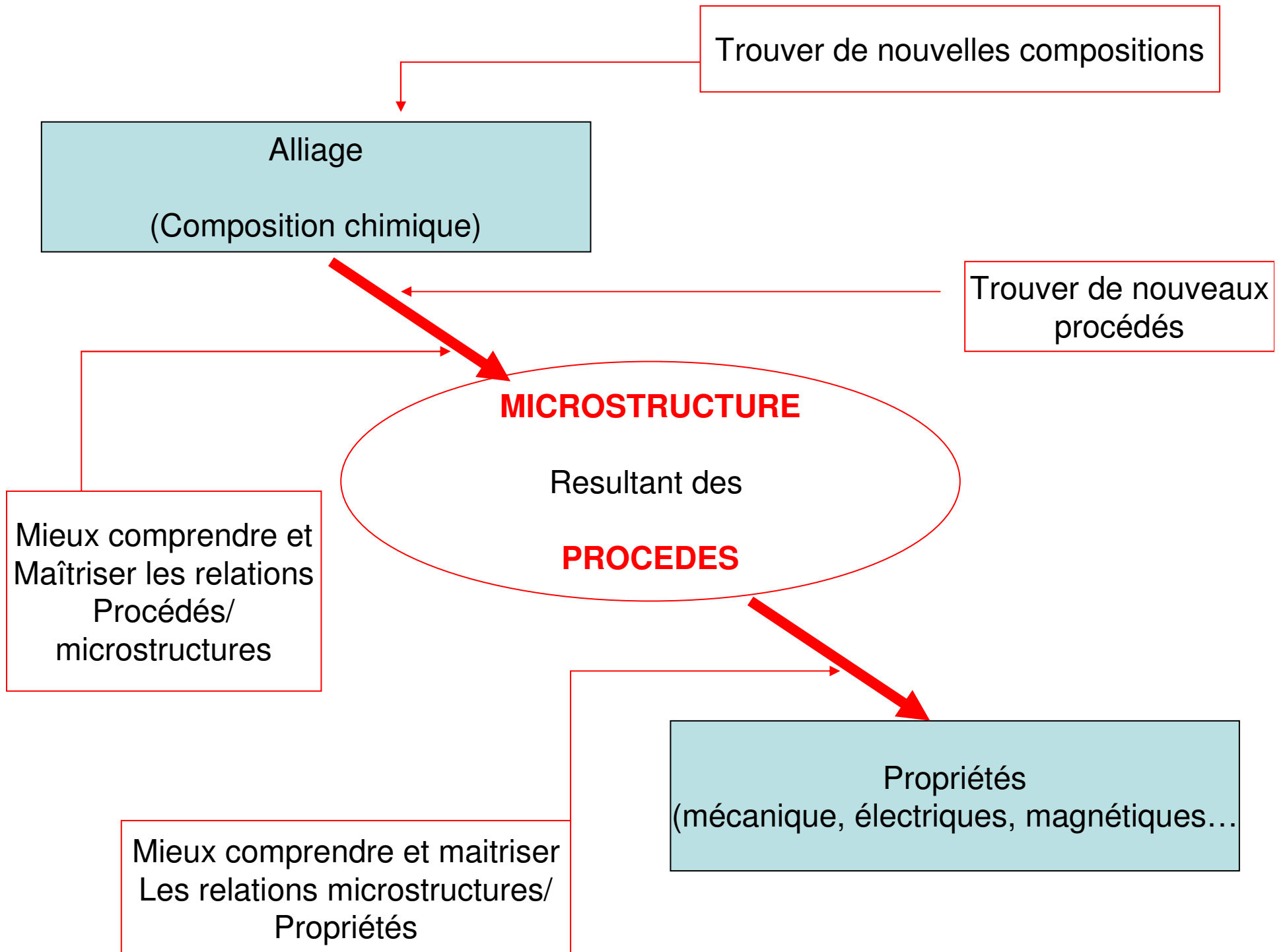
Etain Plomb (+ antimoine)



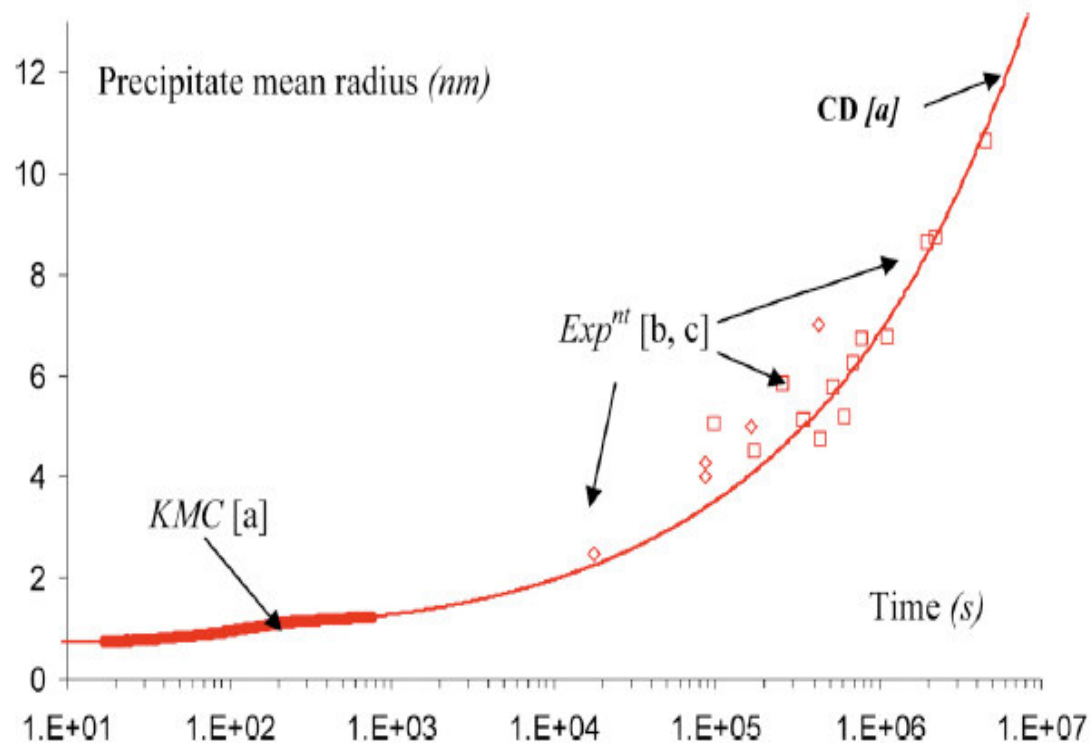
Aluminium Zinc Cuivre



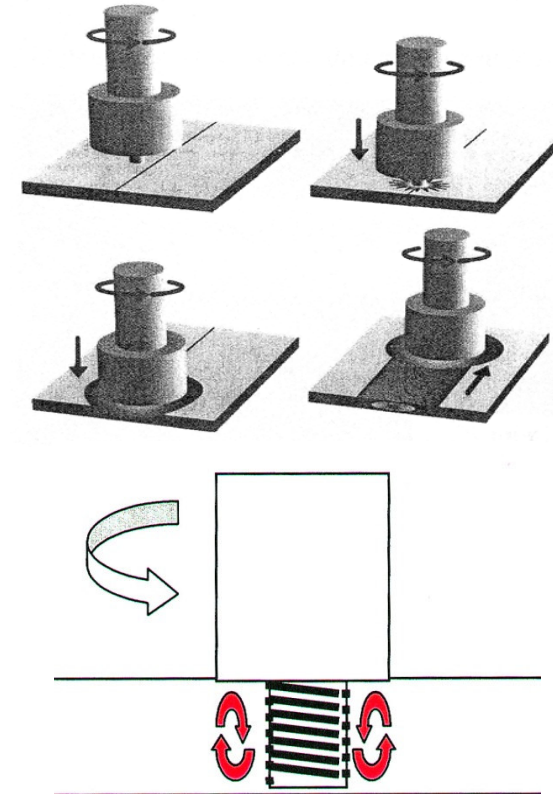




**Changement d'échelle de temps :  
de la simulation en MonteCarlo Cinétique  
à la Dynamique d'amas  
pour décrire les premiers stades de la précipitation dans  
Al-Li et Al-Zr**

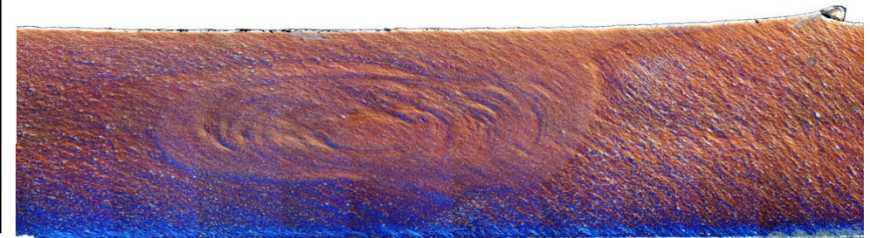


# Assemblage des alliages d'aluminium: soudage FSW



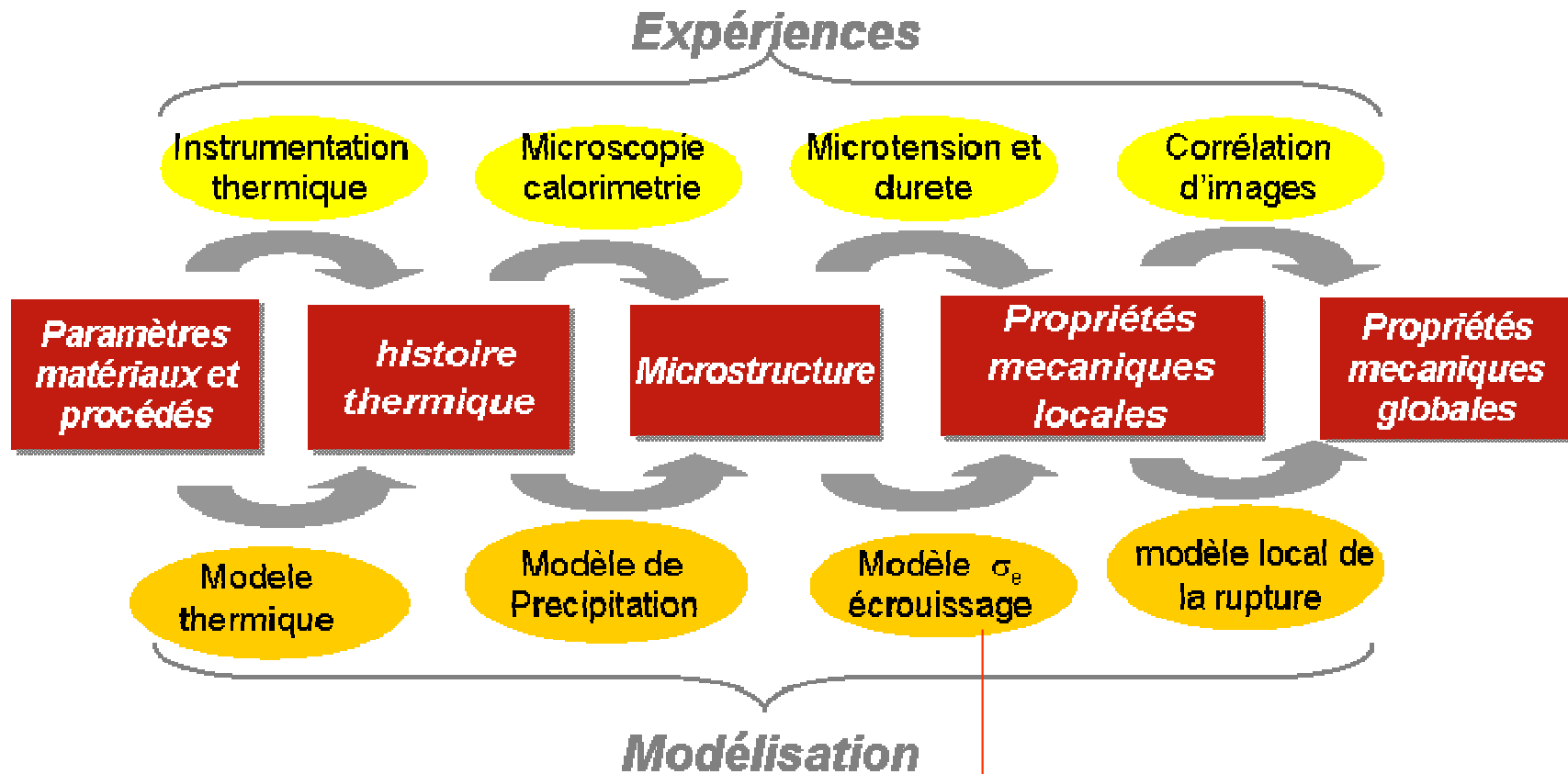
## Assemblage des alliages d'aluminium

- Assemblage mécanique:  
concentration de contraintes
- Soudage conventionnel:  
inclusions d'alumine  
affaiblissement local des prop.





# Modélisation intégrée : adaptation et chainage des modèles classiques



Quelle est l'influence de l'état de précipitation sur Les composantes cinématiques et isotropes de l'écrouissage des alliages ?

**Multifonctionnalité  
croissante**

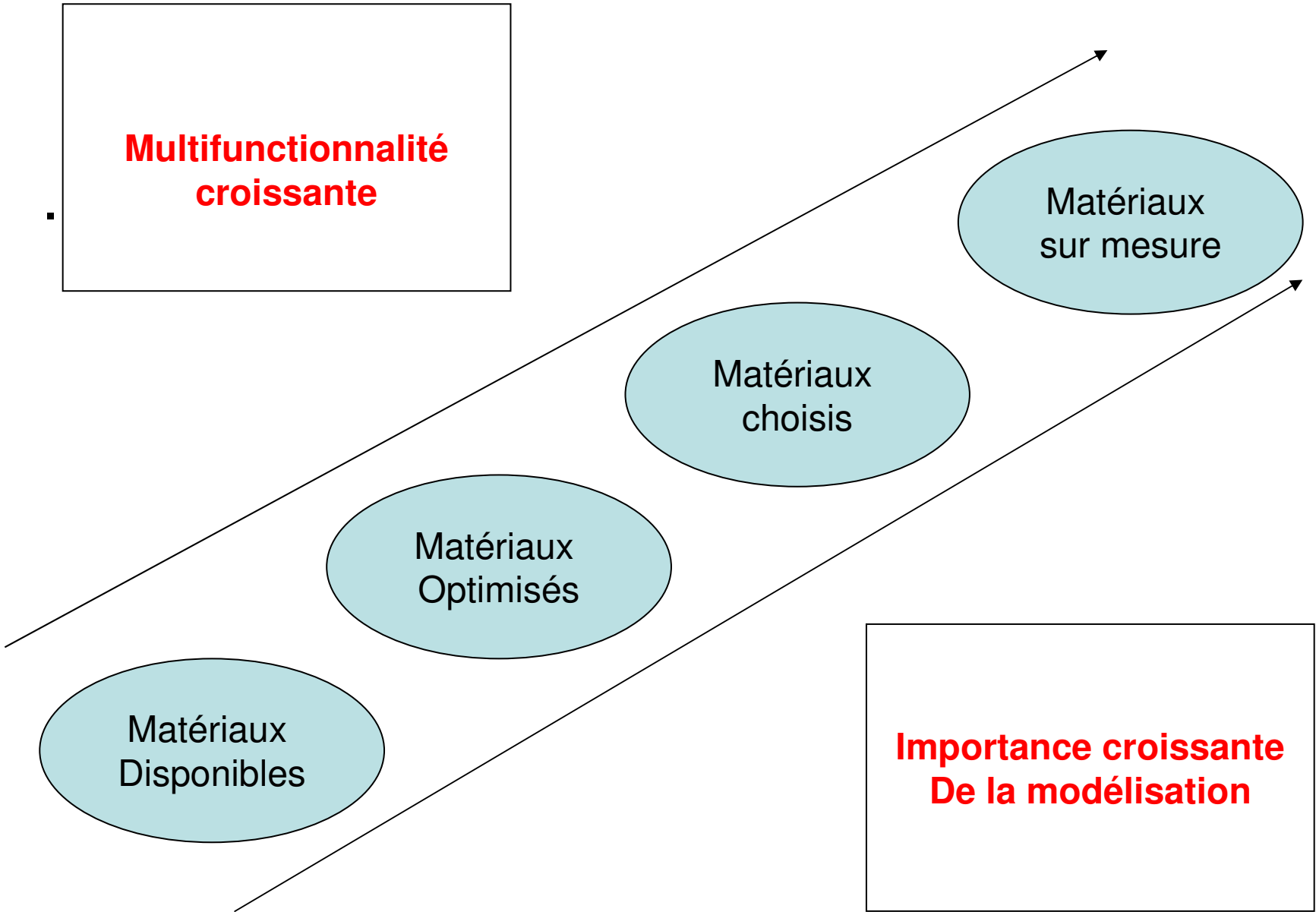
Matériaux  
sur mesure

Matériaux  
choisis

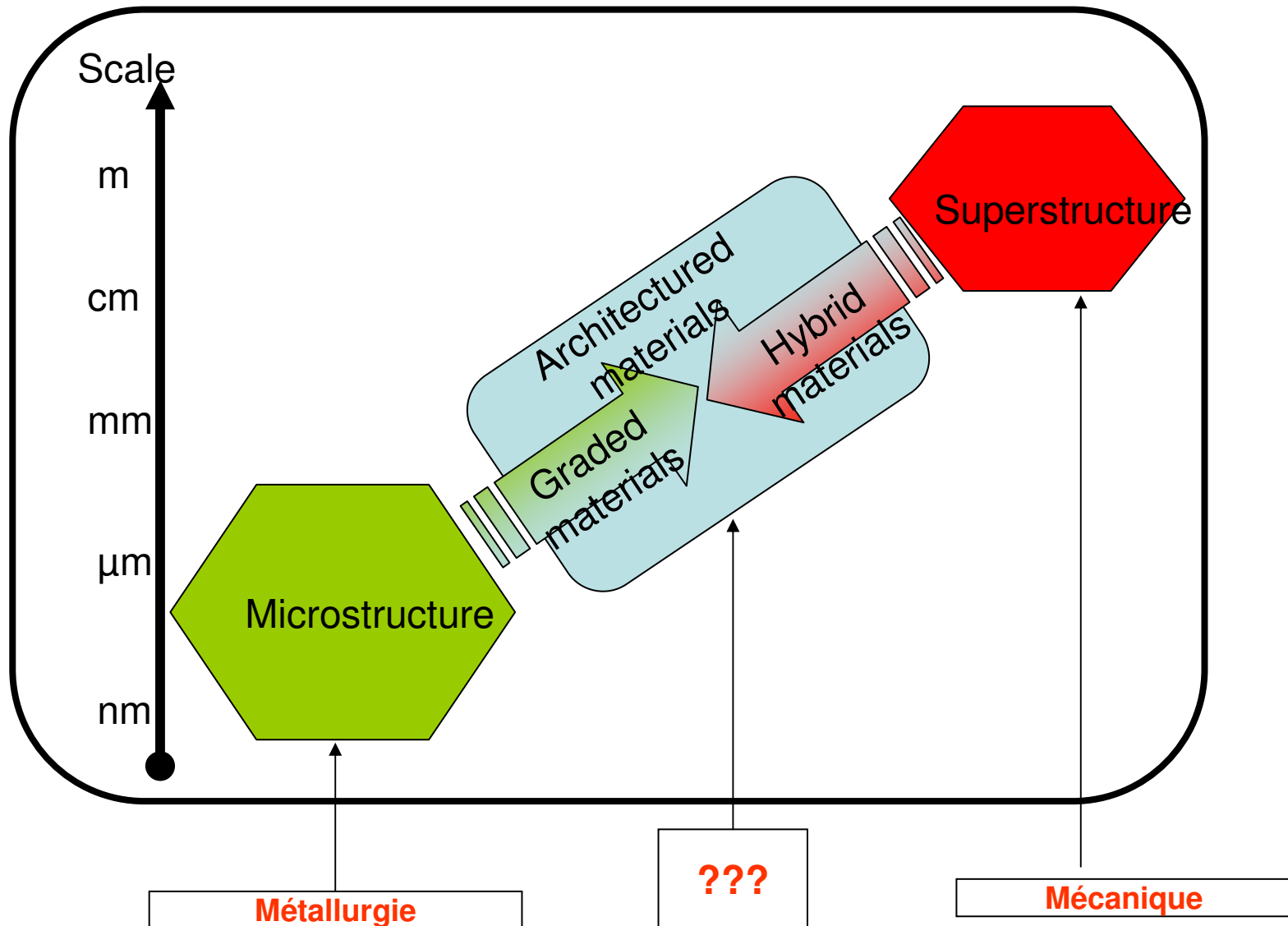
Matériaux  
Optimisés

Matériaux  
Disponibles

**Importance croissante  
De la modélisation**

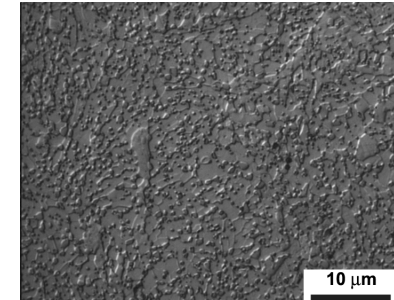
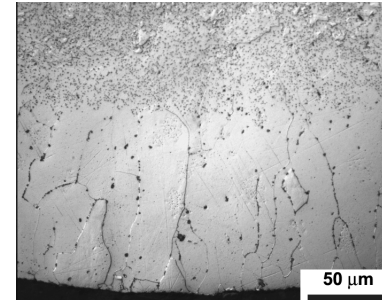
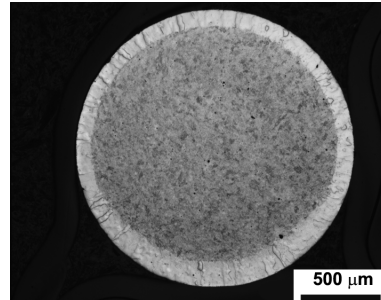


# Les matériaux architecturés

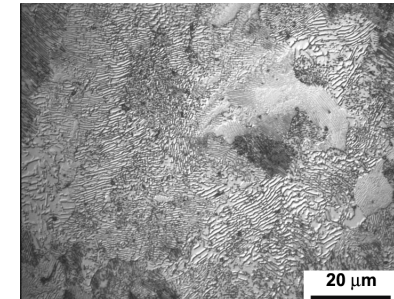
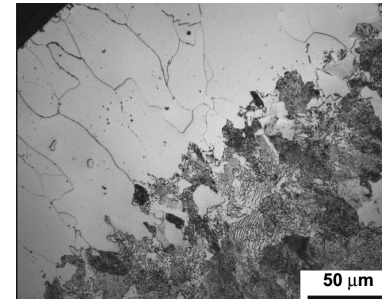
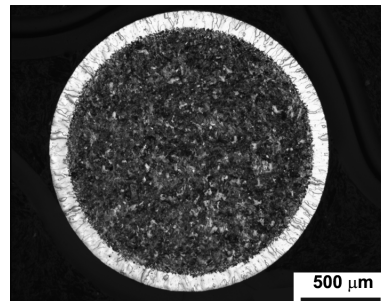


# Aciers a Gradients obtenus par decarburation

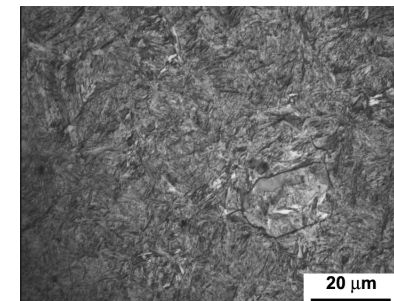
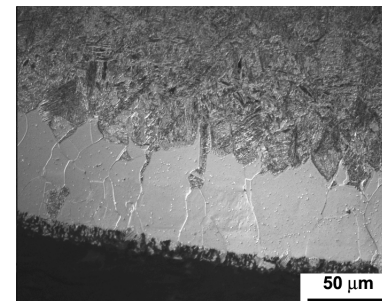
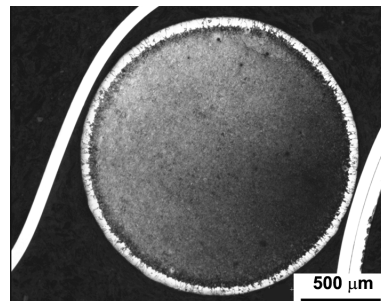
Spherodite/ferrite  
CGM



Pearlite/ferrite  
CGM

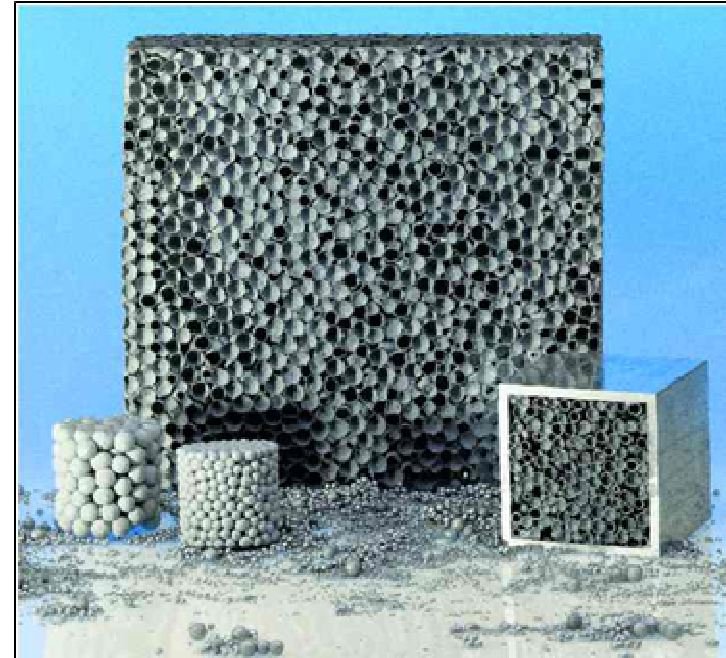
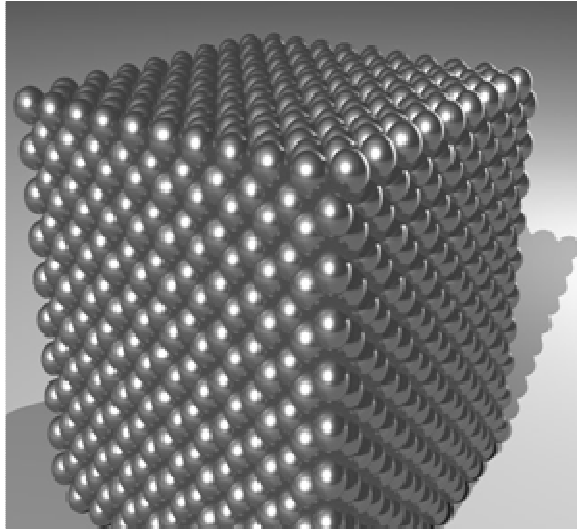


Martensite/ferrite  
CGM.



Hatem Zurob, Dave Embury, Bechir Chehab, Post Doc McMaster (2008)

# Reduction du bruit des avions



## Modelling

Acoustics (Biot Allard model)  
Mechanics (FEM calculations )

## Optimising

Materials geometry  
Component dimensions  
Constitutive materials choice

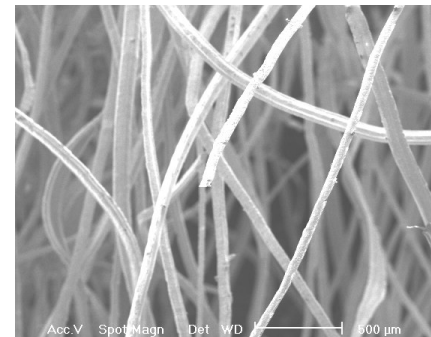
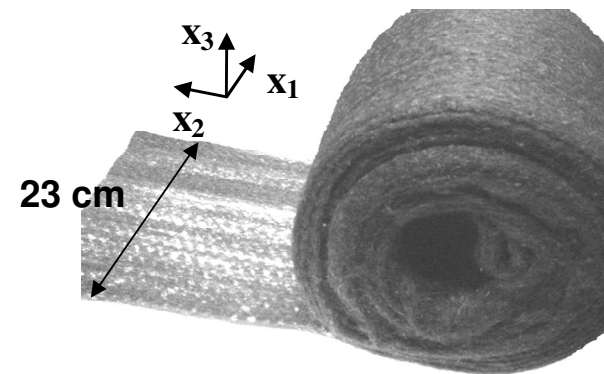
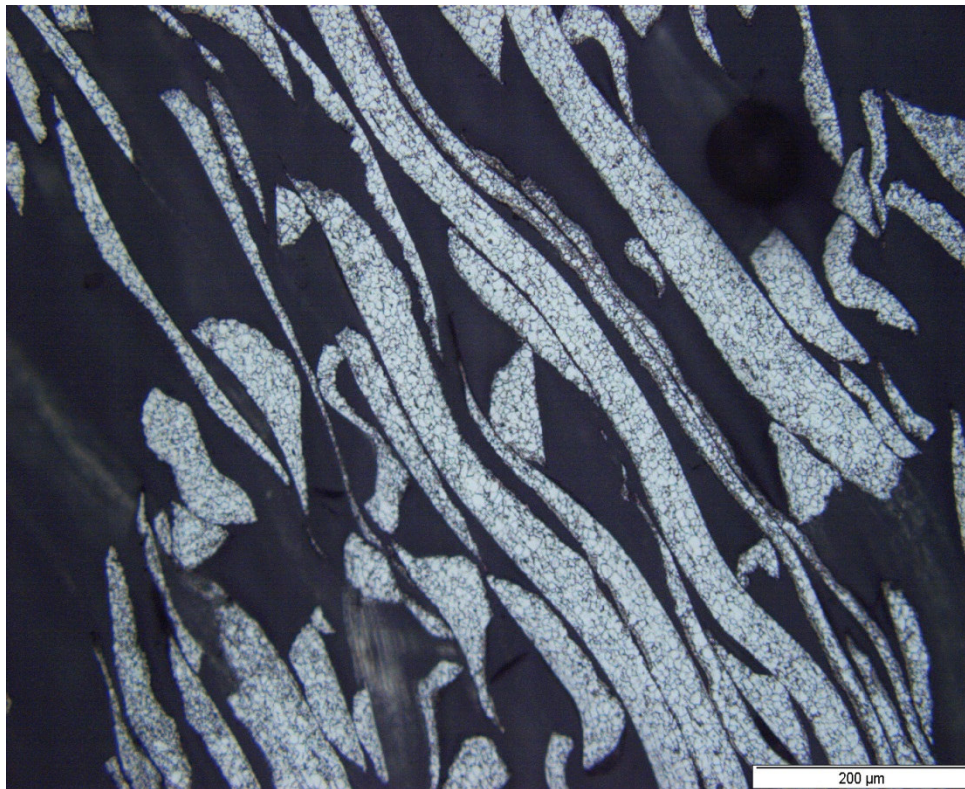
## Processing

« **Taylorred materials** »

Projet MAPO

# Exemple : les Laines d'acier

Recristallisation???



Steel Wool , J.Ph.Masse, PhD Grenoble (2009)

La métallurgie où on ne  
l'attend pas forcément...

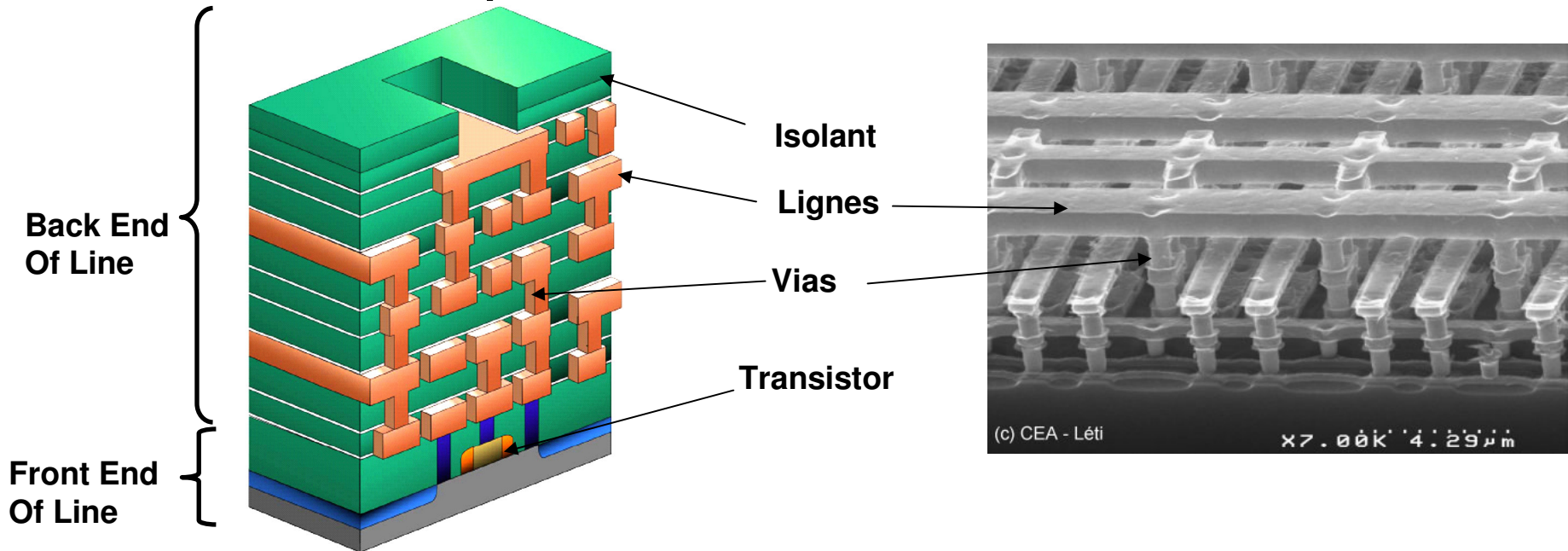
# Contrôle de la résistivité des interconnexions

V.Carreau, S.Maitrejean, M.Verdier, Y.Brechet



# Description d'un circuit intégré

- Vue en coupe d'un circuit



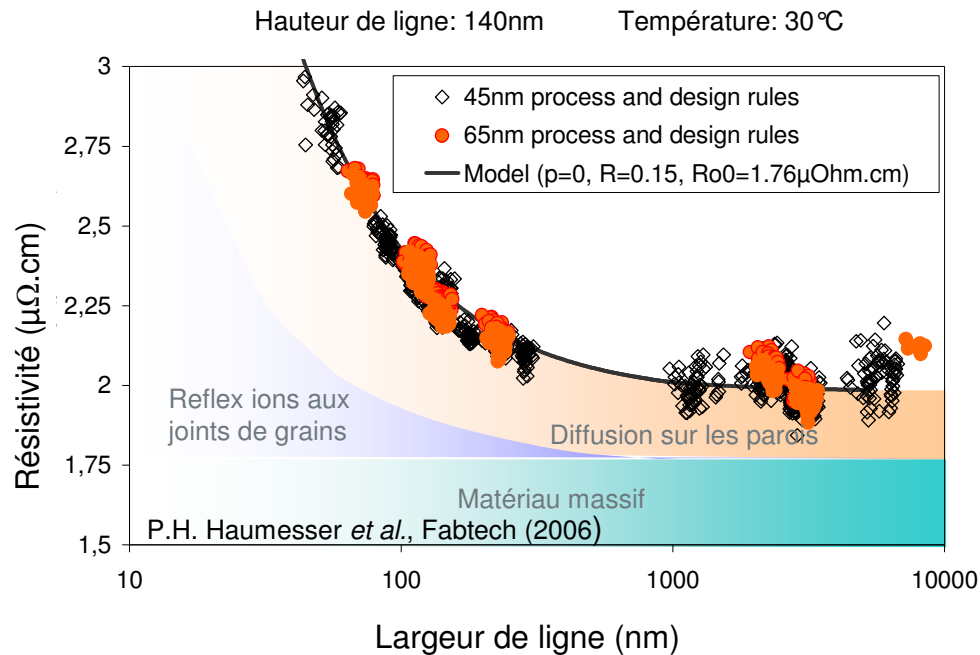
- Propriétés du conducteur :

- Faible résistivité
- Tenue à l'électromigration

→ Intégration du cuivre

# Influence de la réduction des dimensions - résistivité

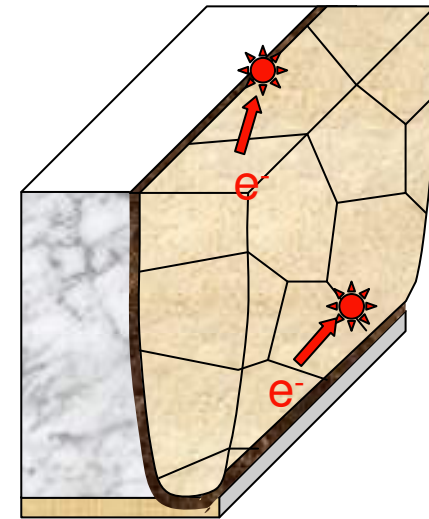
## Augmentation de la résistivité du métal



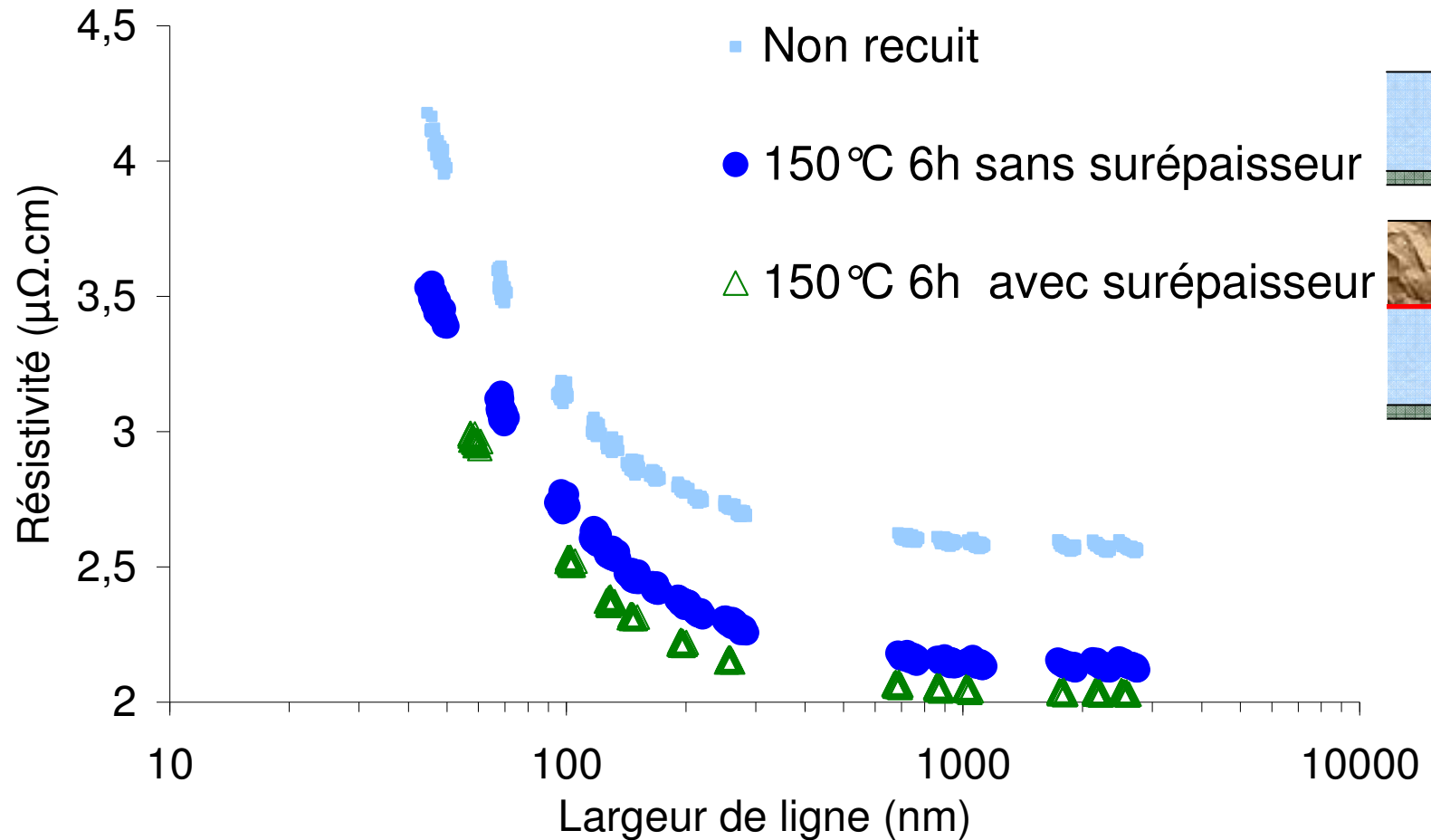
- Effet observé qd les dimensions sont proches du libre parcours moyen des  $e^-$  (~40 nm dans Cu)
- Etudes théoriques depuis 1901 (J.J. Thomson)
- Connue pour le cuivre depuis 1998 (F. Chen)

### Contributions supplémentaires à la résistivité

- Diffusions électroniques sur les impuretés
- Diffusions électroniques sur les flancs de ligne
- Réflexions des électrons sur les joints de grains

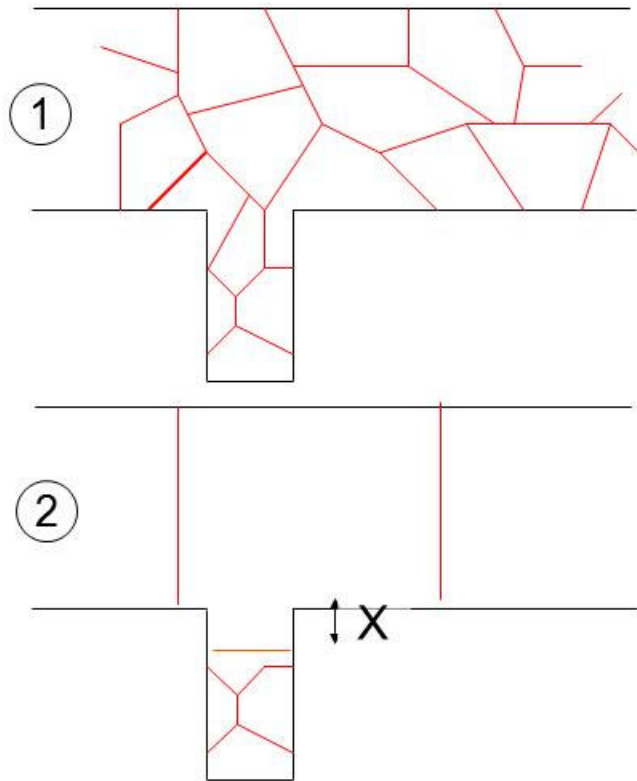


# Comparaison des résistivités – T = 150 °C



✓ Recuit avec surépaisseur :  $\rho$  plus petite  $\rightarrow$  plus grande taille de grain

# Paramètres pertinents d'une invasion partielle ?



$$\frac{dR_{GB}}{dt} = \alpha_{GB} M \left( \frac{\Gamma_b}{R_{GB}} - \frac{\Gamma_b}{R_{GB\infty}} \right)$$

$$\frac{dr_{GB}}{dt} = \alpha_{GB} m \left( \frac{\gamma_b}{r_{GB}} - \frac{\gamma_b}{r_{GB\infty}} \right)$$

$$\frac{dX}{dt} = \alpha_{GB} m \left( \frac{\gamma_b}{r_{GB}} - \frac{2\Delta\gamma}{w} \right)$$

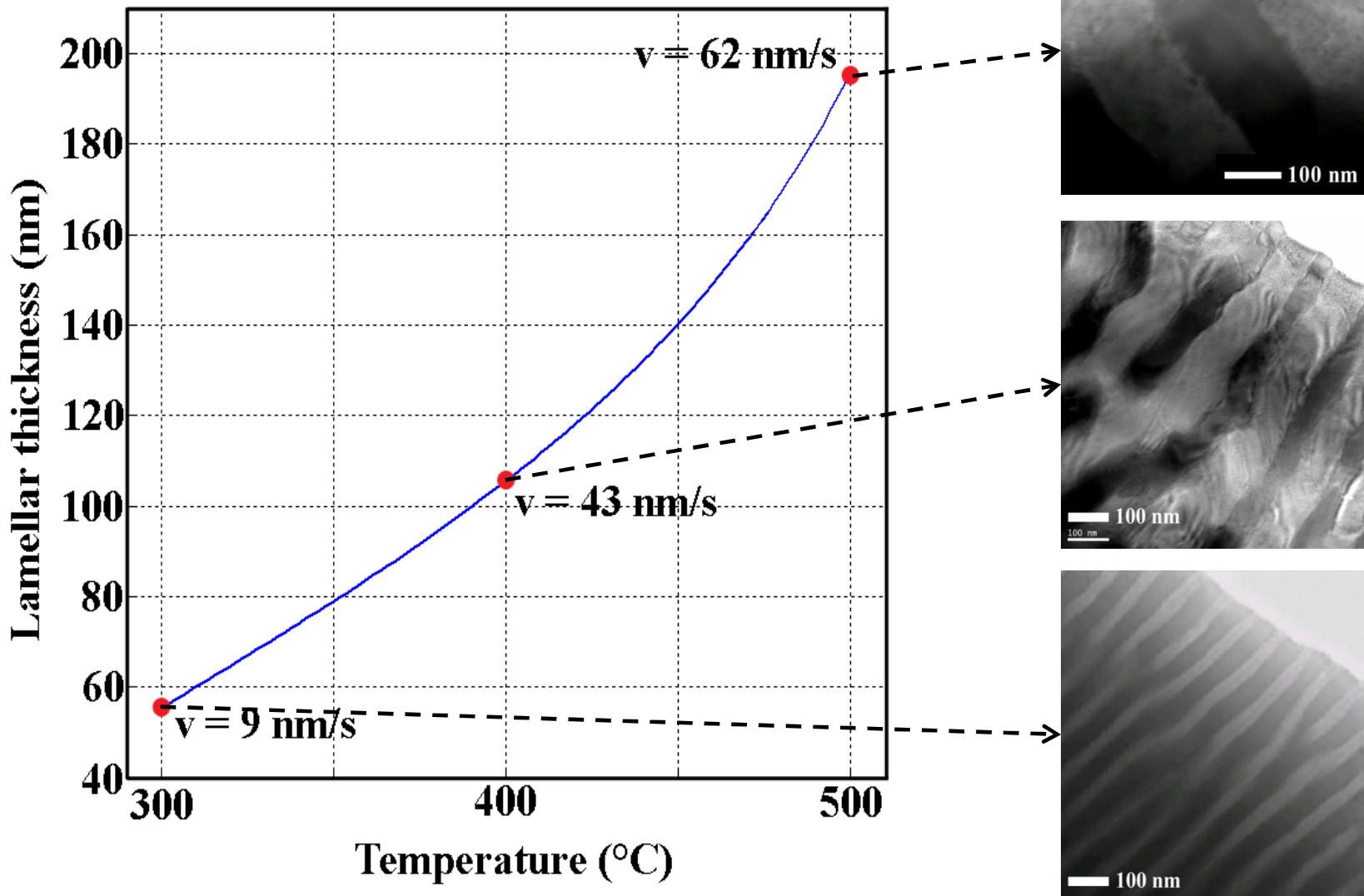
- ✓ Compétition entre la cinétique de croissance dans les lignes et dans la surépaisseur ?
- ✓ Ancrage sur les flancs de ligne ?
- ➔ Il faut déterminer mobilité et force d'ancrage de l'invasion

# Développement de matériaux thermoélectriques

P.Bellanger, S.Gorsse, Y.Brechet

# Développement de nanostructure dans des thermoélectriques

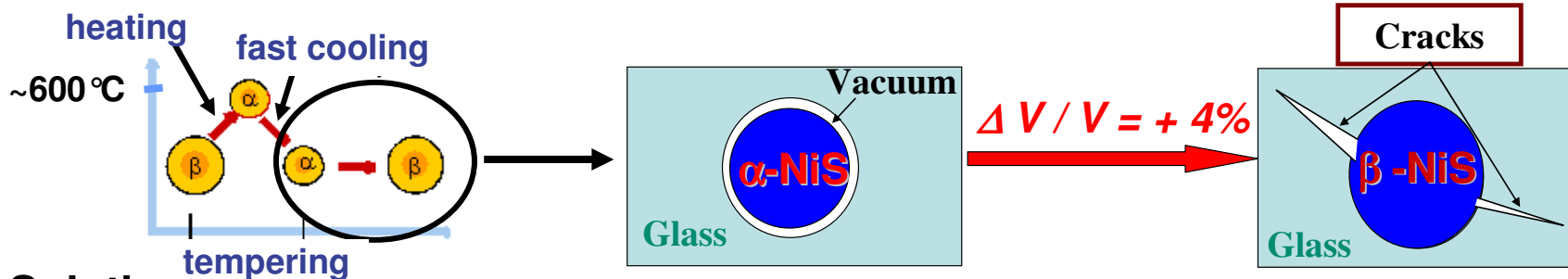
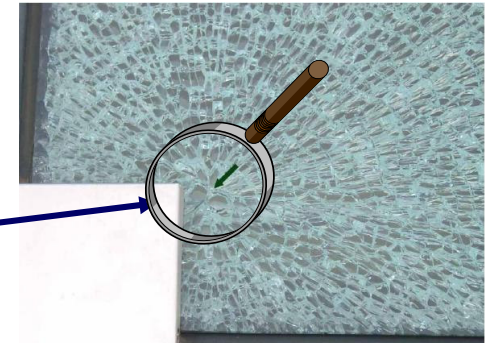
Decomposition par une réaction de **décomposition spinodale discontinue**



# Eviter que les carreaux cassent ...

O.Yousfi, P.Donnadieu, Y.Brechet

# Casse différée des verres : transformation des sulfures de Nickel glass



## ► Solution :

1. NiS impossible à éviter (elaboration process)
2. Une aiguille dans une botte de foin: 1inclusion/300m<sup>2</sup> (size : 50-600μm)
3. Provoquer la transformation par un traitement thermique

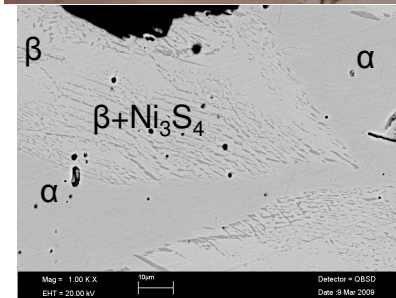
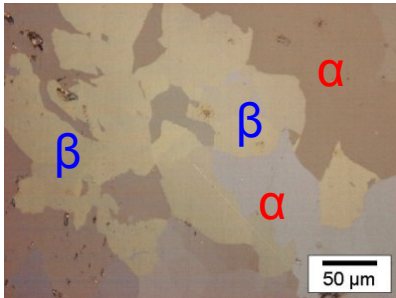
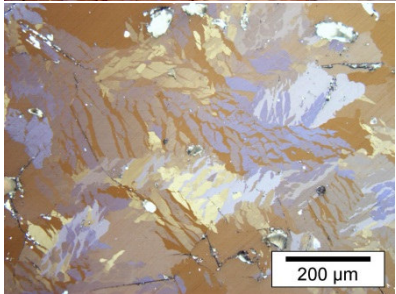
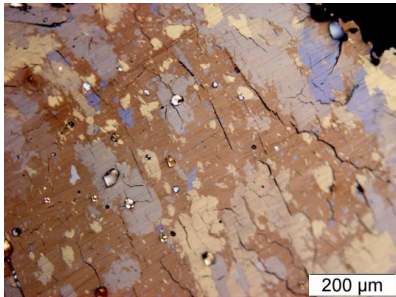
**Industrial solution: HST**



# Parallel with Fe-C system

Ni-S

Fe-C



Globular	Massive
Lamellar	Upper bainite
Block & coarse lamellar	Allotriomorphe ferrite
Lamellar $\beta + \text{Ni}_3\text{S}_4$	Pearlite

33/

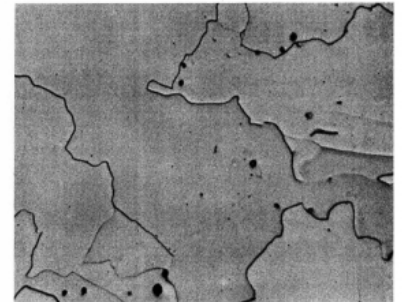
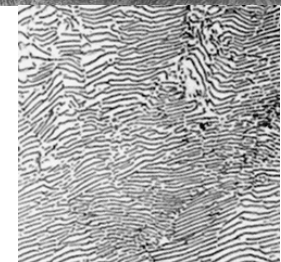
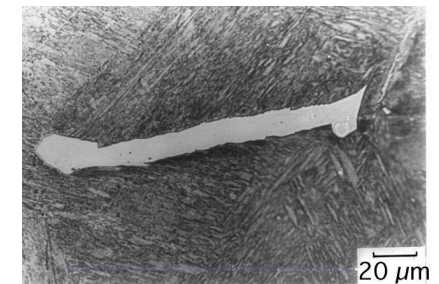


Fig. 5.80 Massive  $\alpha$  in an Fe-0.002 wt% C quenched into iced brine from 1000 °C. (book, 8th)



$\alpha$  Ferrite +  $\text{Fe}_3\text{C}$   
0,5  $\mu\text{m}$



Apparaître quelque part...

## « Métallurgie » et « Science des Matériaux »

- la Métallurgie est la BASE de la science des matériaux
- les évolutions ne peuvent être masquées par les effets de mode
- le besoin industriel est évident: chez les producteurs, chez les utilisateurs
  
- c'est une composante indispensable de tous les domaines d'excellence de l'industrie française et pourtant un aspect négligé de la « politique industrielle » de ce pays
- c'est un « thermomètre » de la tendance à la « désindustrialisation » qui fragilise puis détruit notre économie
  
- La situation devient sérieusement problématique
  - o En terme de vieillesse
  - o En terme de formation
  - o En terme de recherche publique et industrielle

**Il est URGENT de réagir avant qu'il ne soit trop tard pour le faire!!!**

# Le Parcours du combattant

- 
- la sonnette d'alarme : **le rapport RST des Académies**
- Y a-t-il un pilote dans l'avion? **Ou est passée la métallurgie ???**
- Groupe de travail au MESR
  - Structurer et Fédérer la recherche et la formation en mettant en place un réseau de compétences s'appuyant sur trois piliers
  - Impliquer les industriels dans la durée
  - Créer un « **Comité d'orientation national** »
    - Définition de programmes pluriannuels de recherche
    - Quantification des besoins de recrutement des entreprises et organismes de recherche
    - Définition des programmes de formation
- Le Comité d'orientation National est créé
- Le travail reste à faire...

**Vers les nouveaux  
« éléments de métallurgie physique »**

	lundi 22 octobre	mardi 23 octobre	mercredi 24 octobre	jeudi 25 octobre
08:00:00	Installation	Diffusion dans les solides Alain Porlaviole	Changement d'échelle : du grain à la structure Brigitte Bacroix	Question ouverte en Solidification Philippe Jarry
08:30:00				Question ouverte en laminage Pierre Monmibonnet
09:00:00		Genèse des microstructures I Alexis Deschamps	Couplage Mécanique environnement Eric Andrieu	Table ronde : Technologies majeures à conserver et verrous Jean-Hubert Schmitt Serge Grattard
09:30:00				
10:00:00		Pause	Pause	
10:30:00				Pause
11:00:00		Transformation de phase Philippe Maugis	Mécanique de la rupture Thomas Pardoen	
11:30:00				Discussions
12:00:00		Genèse des microstructures II Alphonse Finel	Mécanique aux petites échelles Marc Verdier	
12:30:00		Déjeuner		Déjeuner
13:00:00		Déjeuner		
13:30:00	Introduction			
14:00:00	Procédés d'élaboration Jean-Pierre Bellot	Apports de la physique des solides, calculs ab initio Francois Willaime	Grandes déformations Laszlo Toth	
14:30:00				
15:00:00	Procédés de traitement Sabine Denis	La corrosion Roland Oltra	Irradiation Philippe Pareige	
15:30:00				
16:00:00	pause	pause	pause	
16:30:00	Couplage mécanique recristallisation Franck Montheillet	Le changement de phase liquide-solide Charles-Andre Gandin	Matériaux cellulaires Luc Salvo	
17:00:00			La fatigue André Bignonnet	
17:30:00	Couplage mécanique transformaton de phases Elisabeth Gautier	Diffusion microelectronique Dominique Mangelinx	Matériaux architecturés Olivier Bouaziz	
18:00:00		Propriétés Fonctionnelles Stéphane Gorsse	Nouvelles techniques de caractérisation Eric Maire	
18:30:00	Dynamique des dislocations Marc Fivel	Contraintes résiduelles Vincent Kloseck		
19:00:00		Fabrication additive Samuel Kenzari	Milieux semi-solides Michel Suery	
19:30:00	dîner	POSTERS	POSTERS	
20:00:00				
20:30:00		dîner	Banquet	
21:00:00	FSW Anne Denquin			
21:30:00		POSTERS		
22:00:00				
22:30:00				

## Une entreprise pour la décennie à venir...

- Organiser une **série d'écoles annuelles** sur des sujets à la fois ciblés et assez « amples »
- Editer une **série de volumes + CD** pouvant servir à la formation initiale, au niveau chercheur, à la formation continue
- **Mettre en réseau** ( site web de thésards et de sujets de thèses, cours mutualisés, enseignements à distance, ...)

**Conclusion**





**La métallurgie est dynamique, variée, et indispensable, la communauté des métallurgistes ne DOIT PAS être un chœur de pleureuses....**

**La communauté a survécu aux machin-zan-ex, elle doit se mobiliser dans la durée pour un objectif commun**

**Elle DOIT se structurer, on ne PEUT pas aller en ordre dispersé**