

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

Yves Bréchet

HC CEA et SIMAP-INP

Yves.brechet@cea.fr

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 » ?

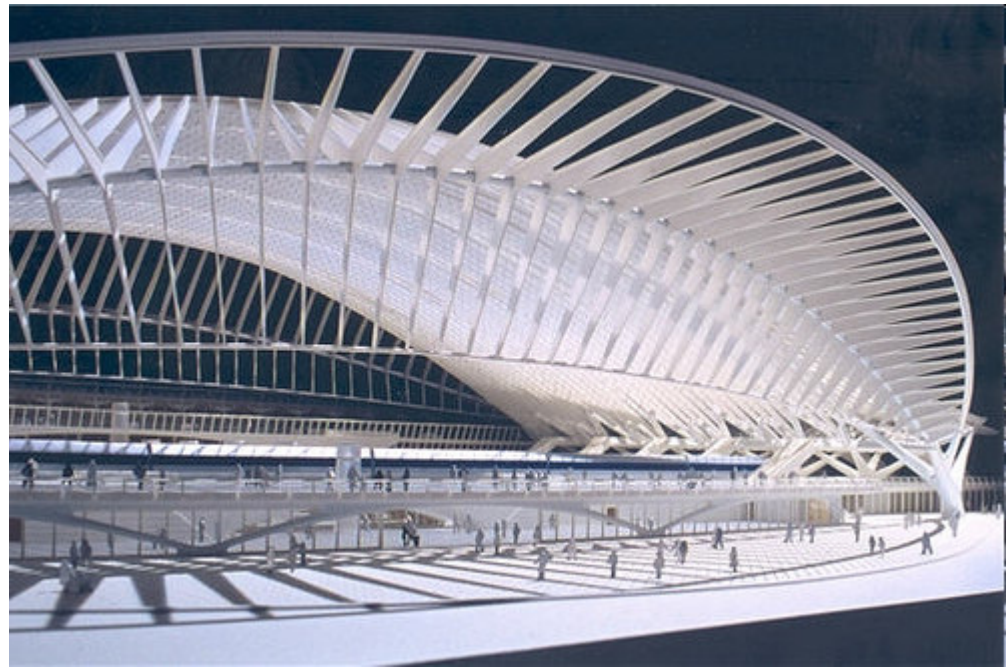
Haut fourneau et Laminoirs



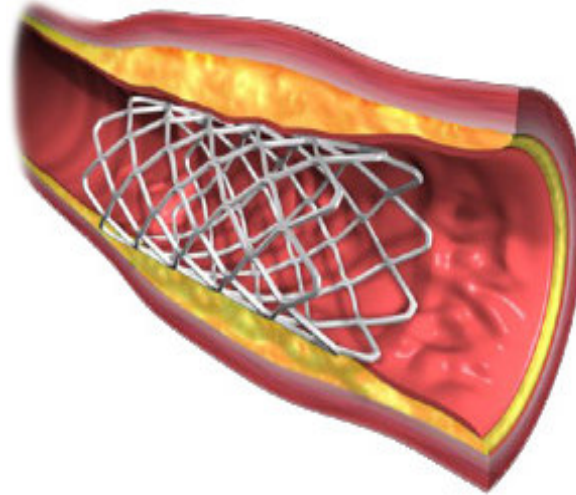
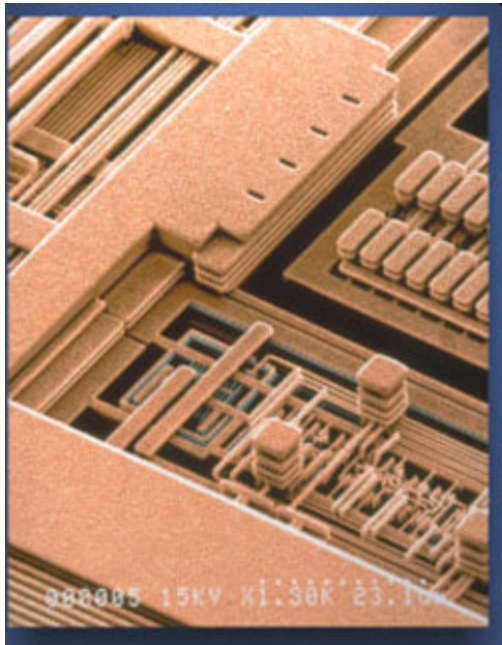
Transport: Automobile/Avion / Train



Au quotidien: de la boite boisson au bâtiment



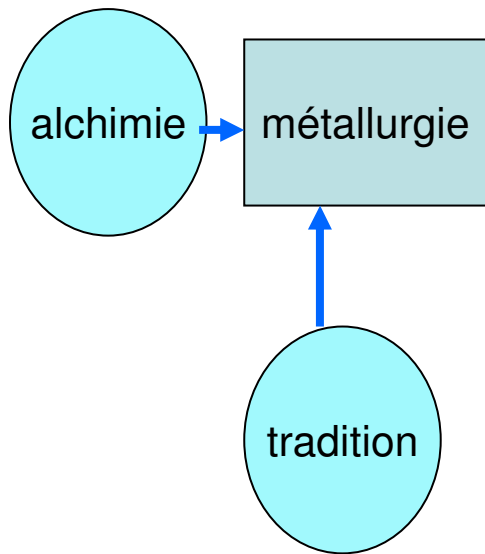
De la microélectronique au biomedical



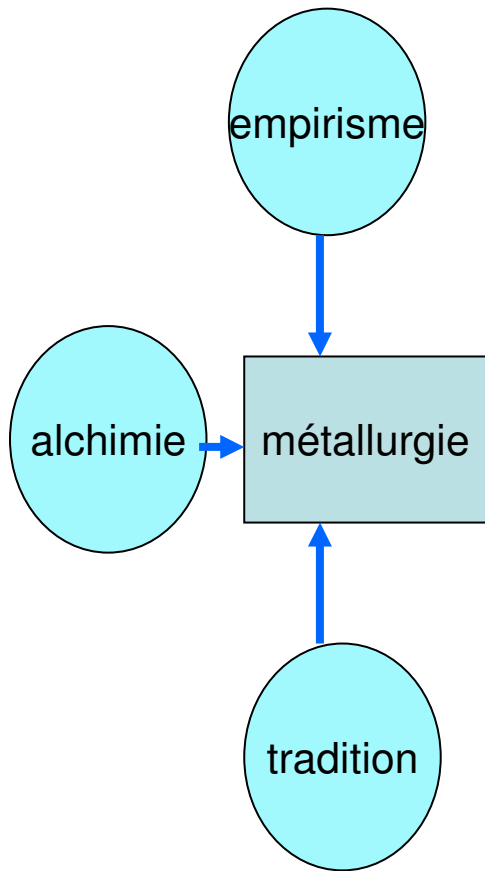
Quelques idées simples

- 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

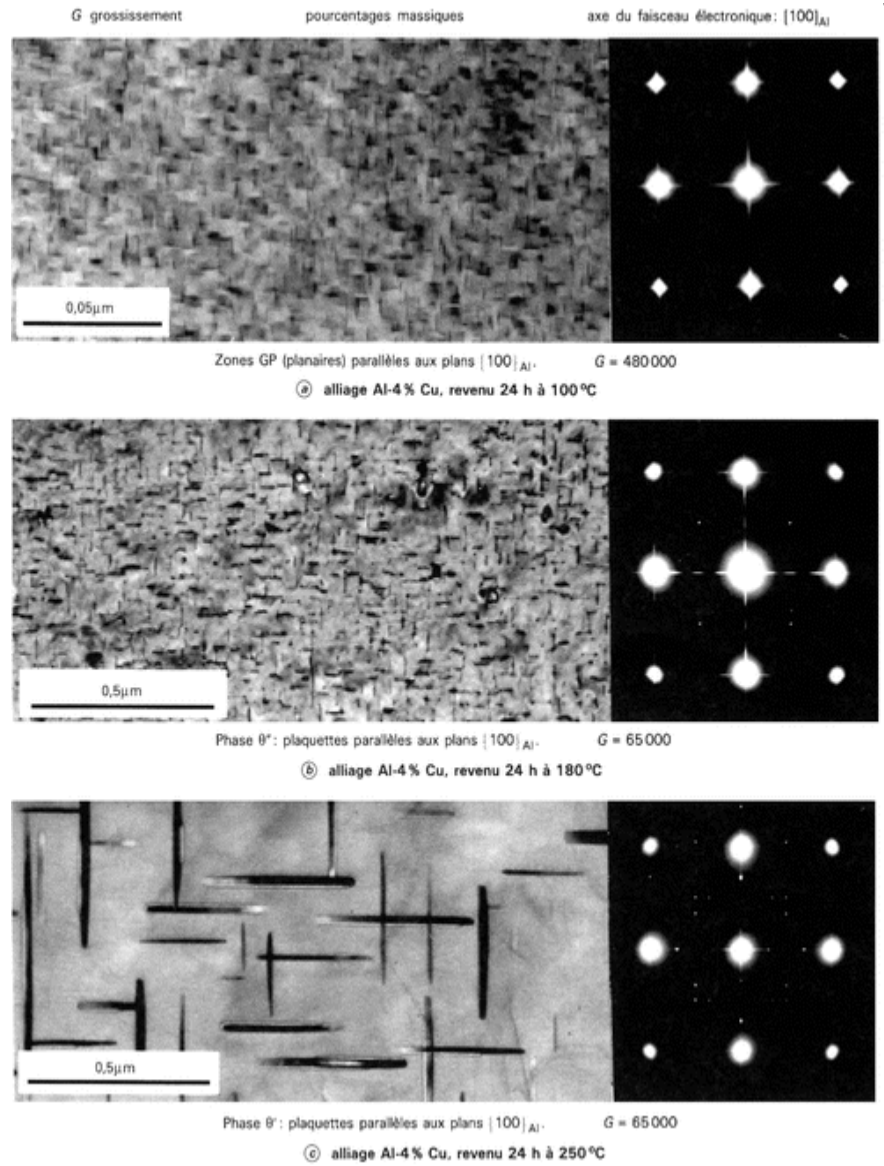
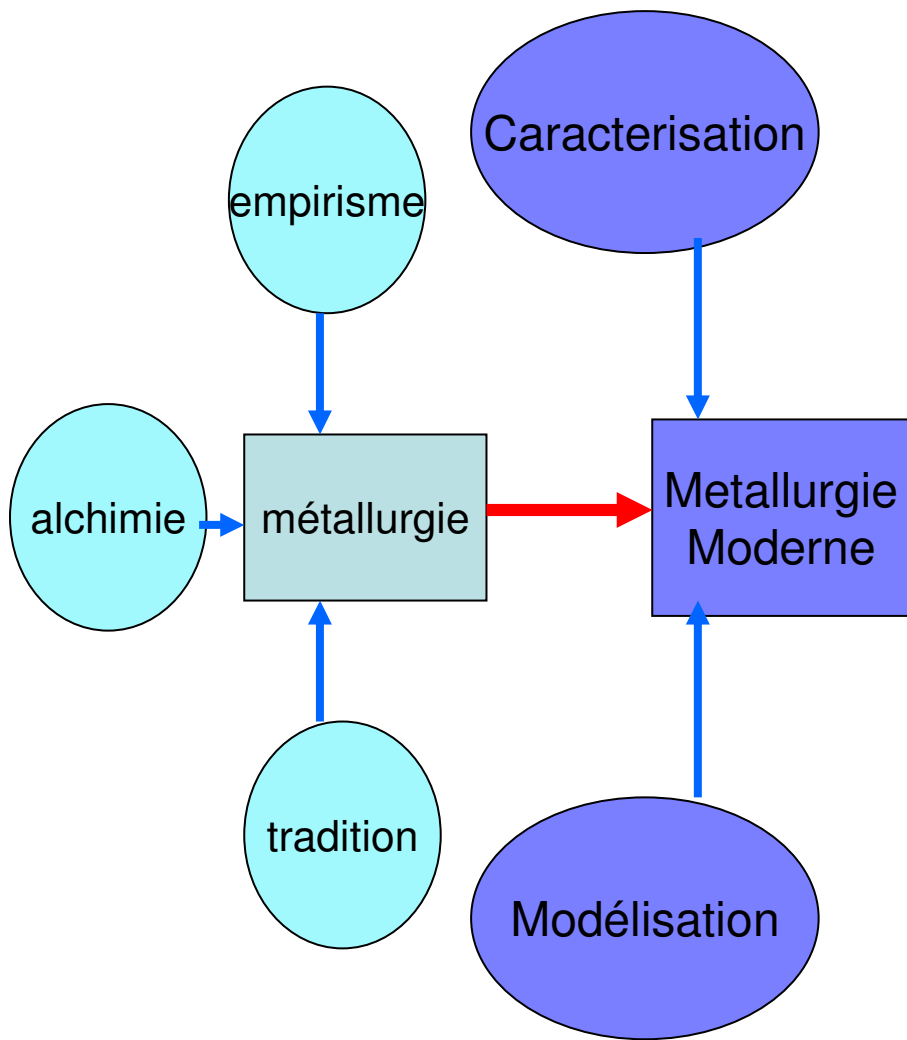
Regardons d'où nous venons

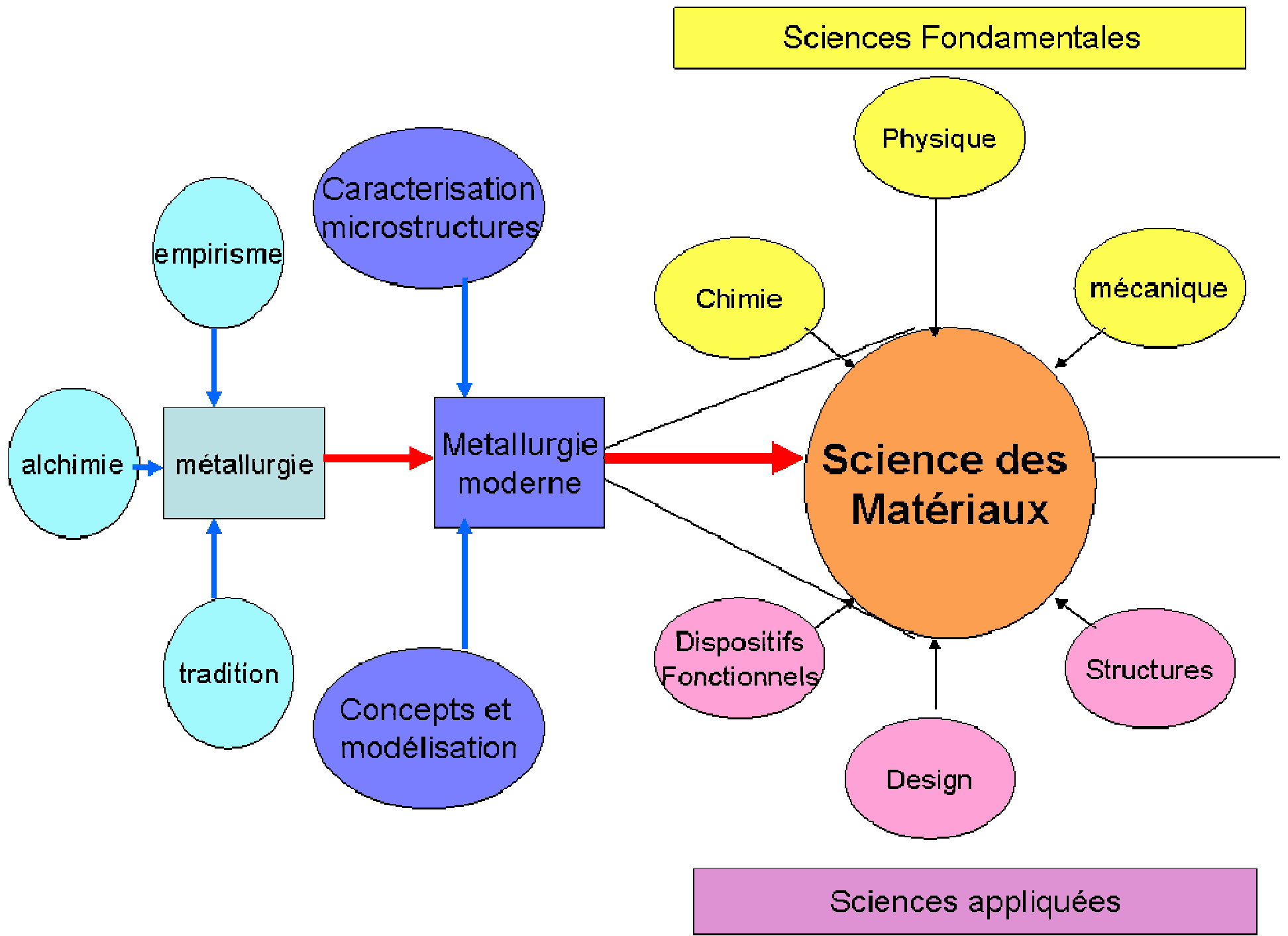


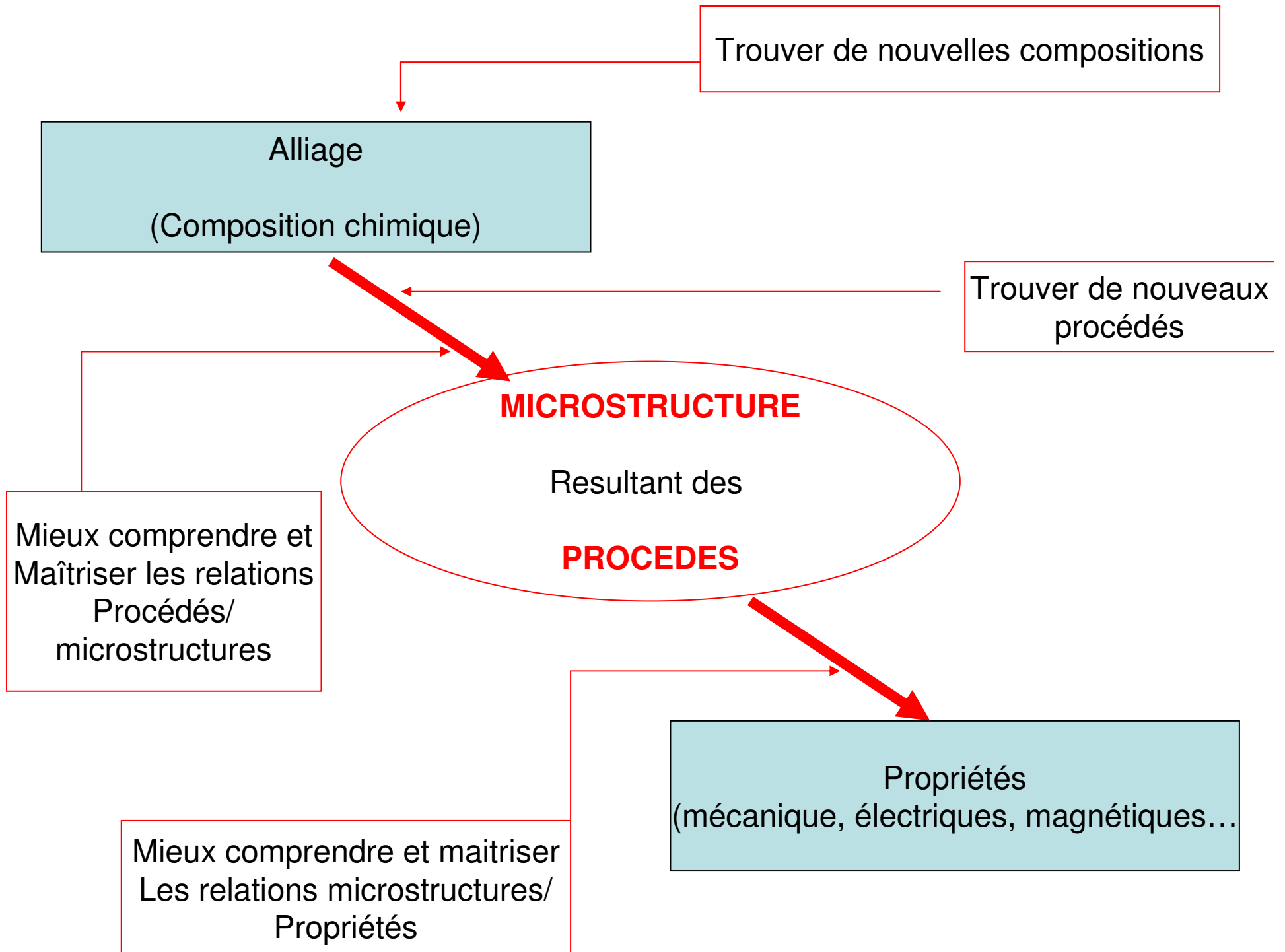
Etain Plomb (+ antimoine)



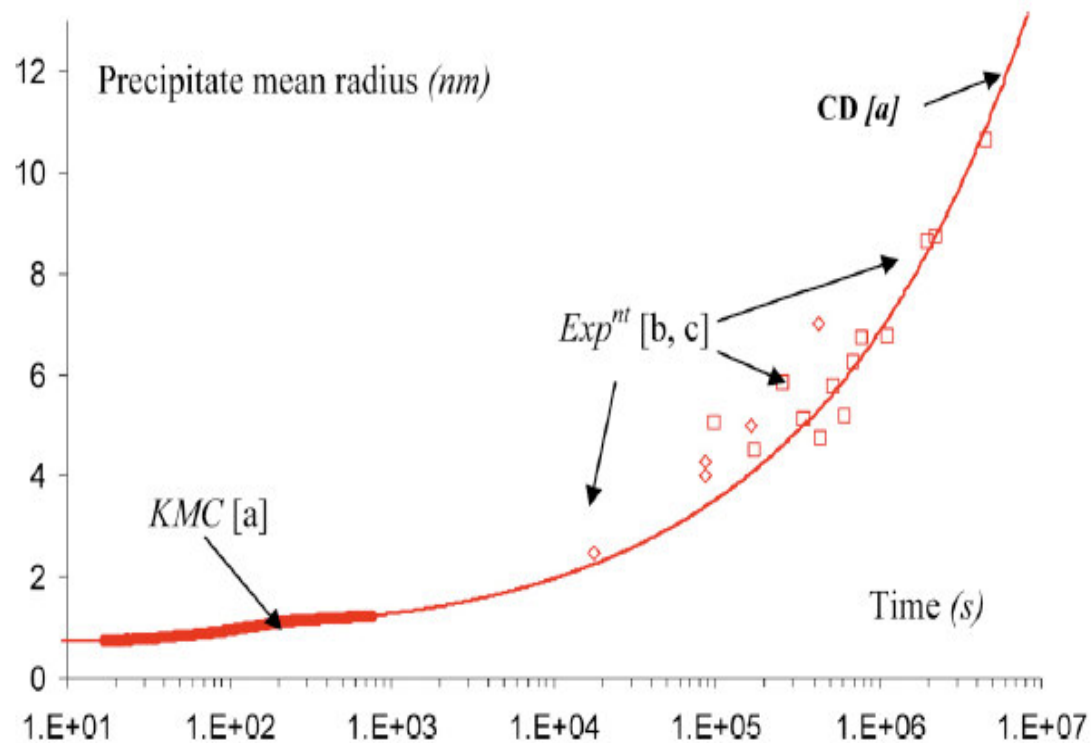
Aluminium Zinc Cuivre



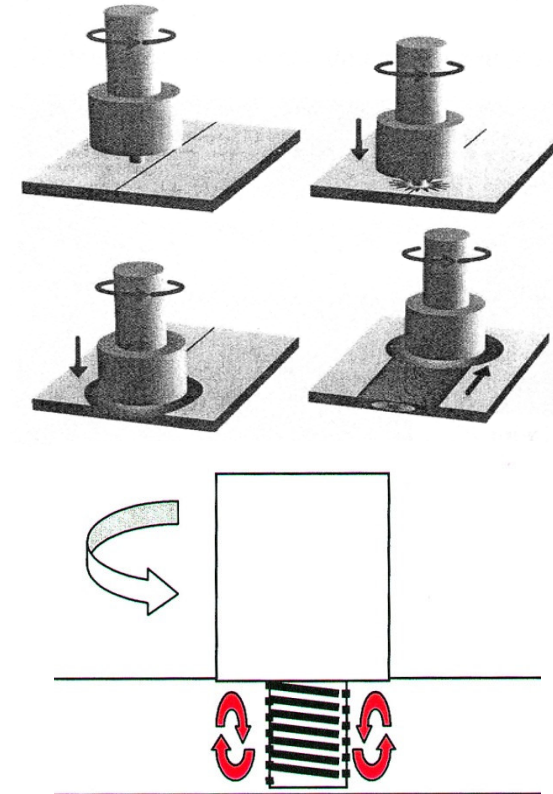




**Changement d'échelle de temps :
de la simulation en MonteCarlo Cinétique
à la Dynamique d'amas
pour décrire les premiers stades de la précipitation dans
Al-Li et Al-Zr**

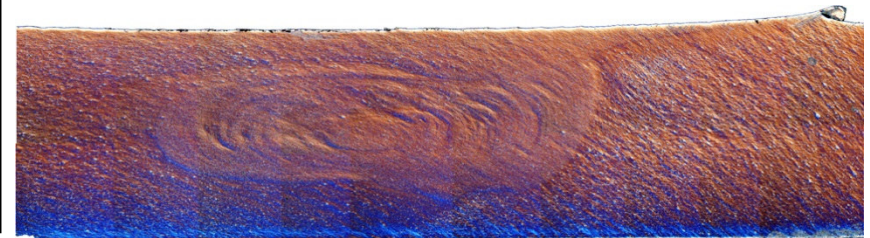


Assemblage des alliages d'aluminium: soudage FSW

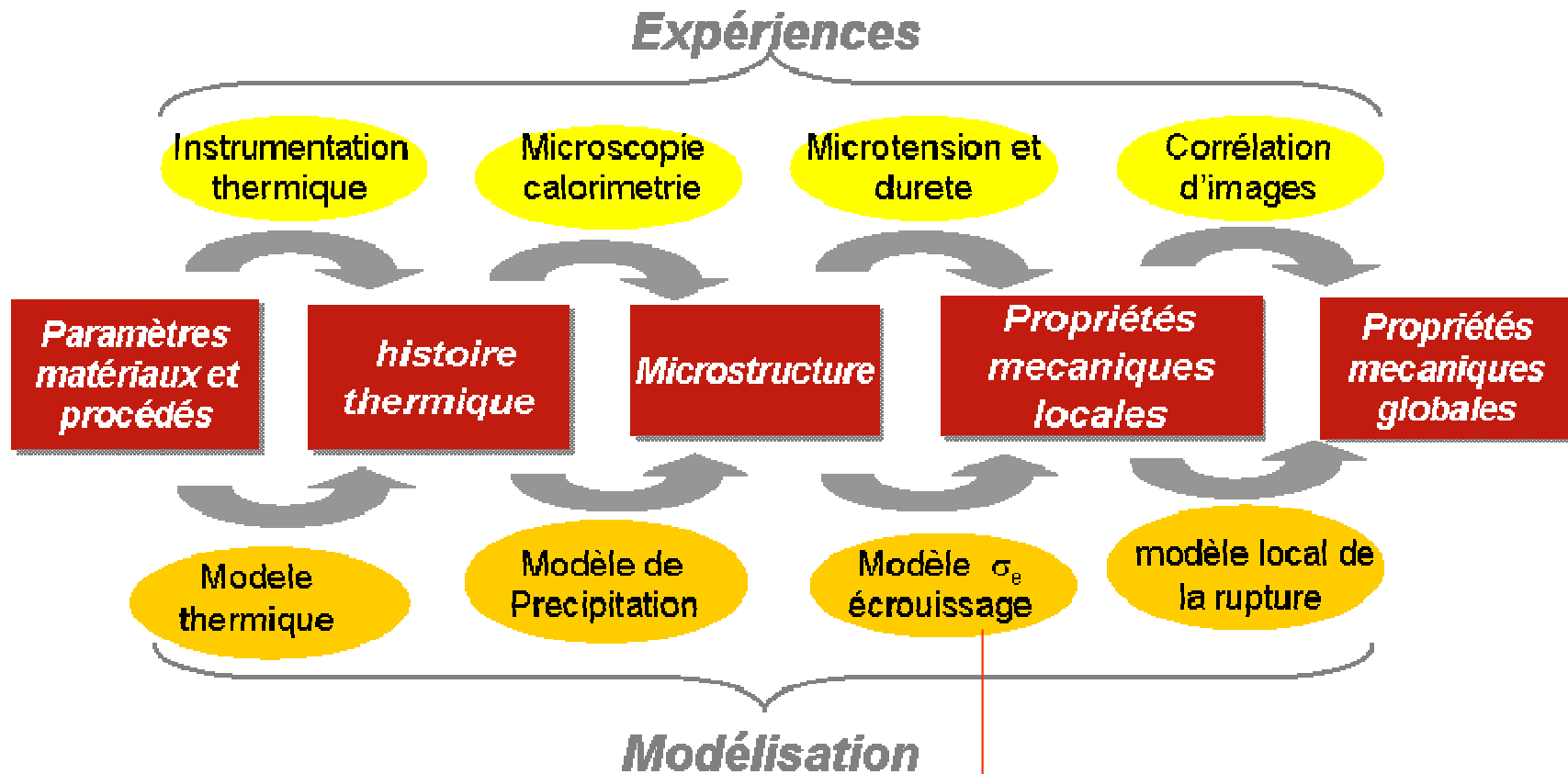


Assemblage des alliages d'aluminium

- 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**

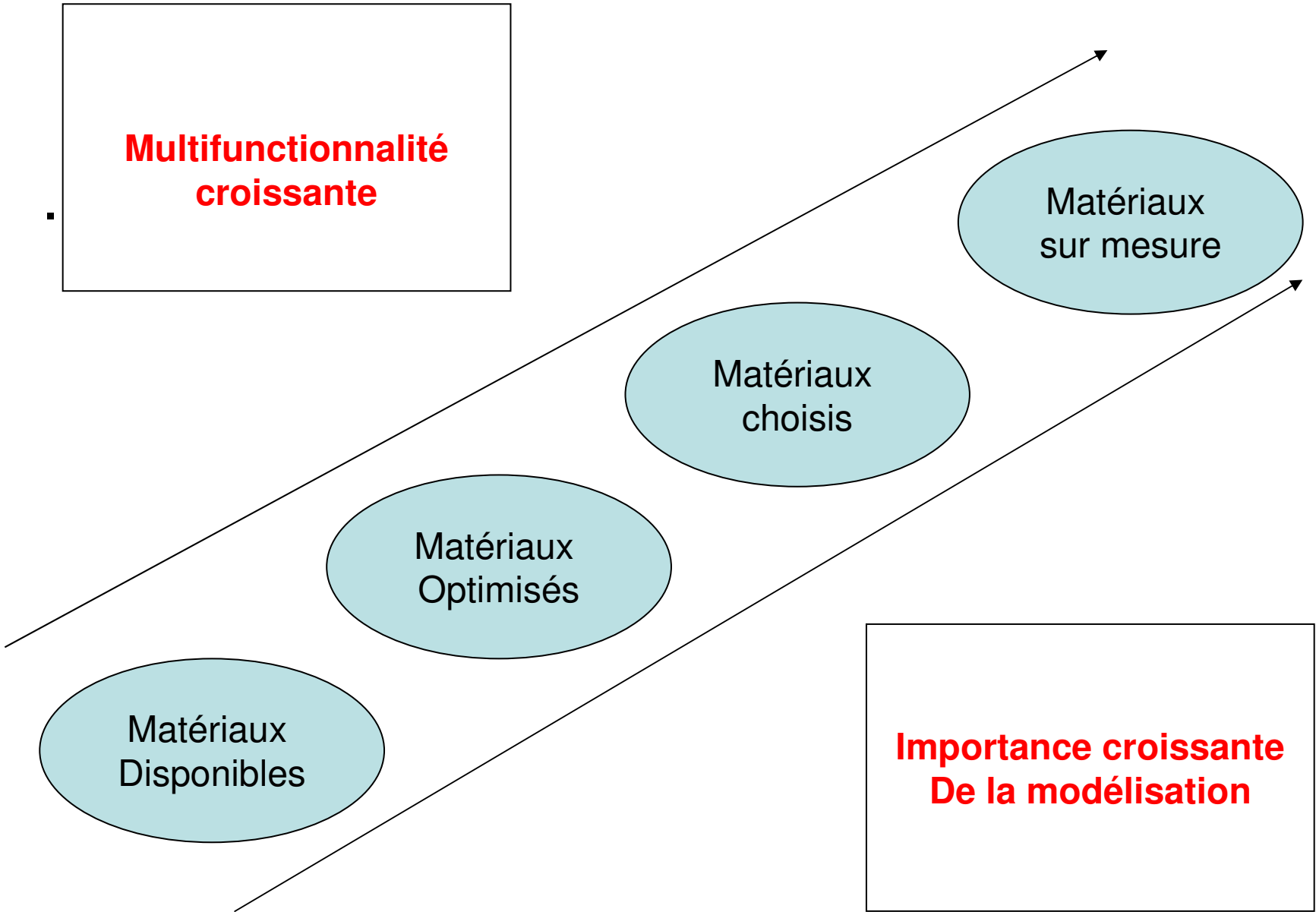
Matériaux
sur mesure

Matériaux
choisis

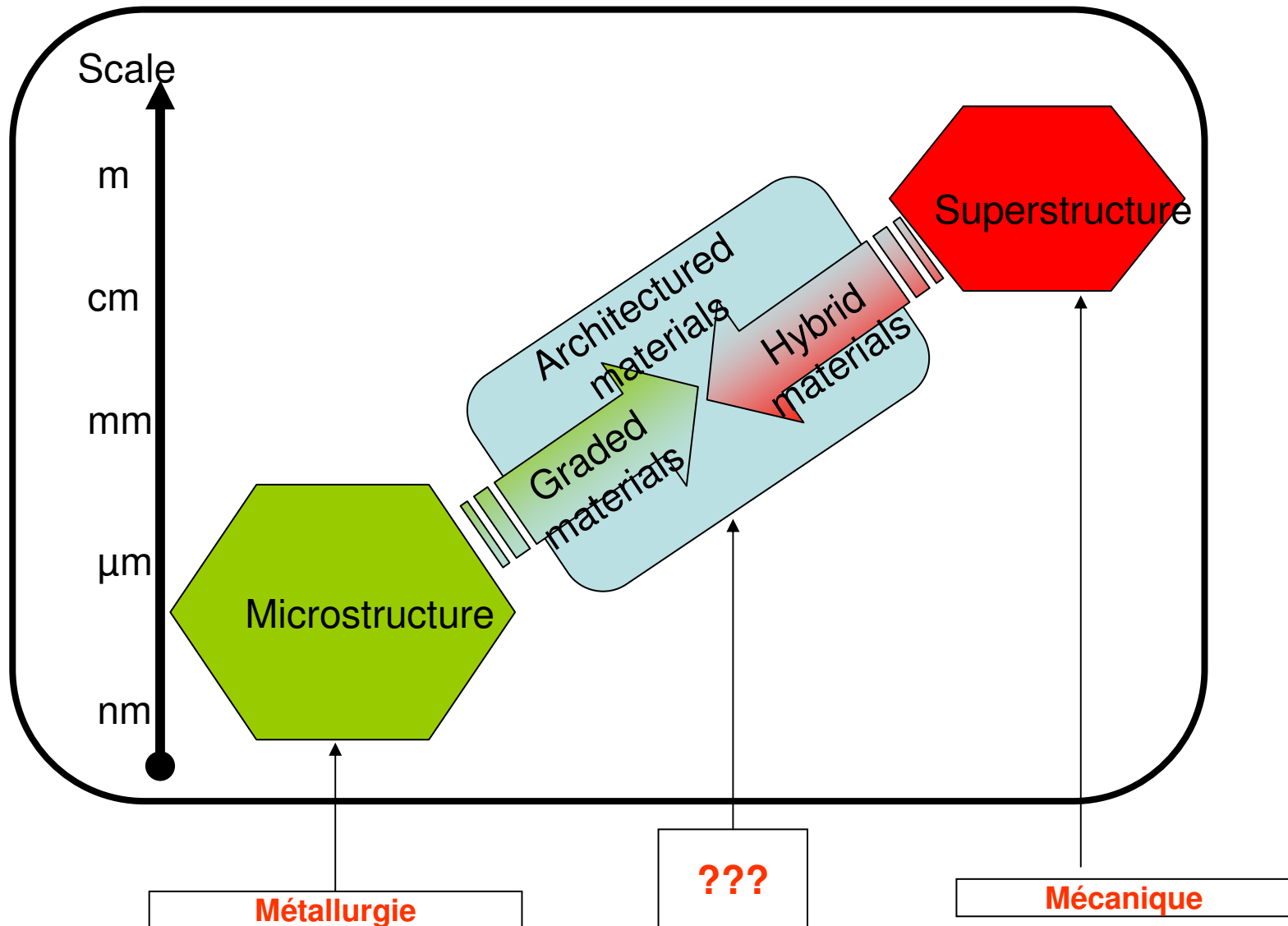
Matériaux
Optimisés

Matériaux
Disponibles

**Importance croissante
De la modélisation**

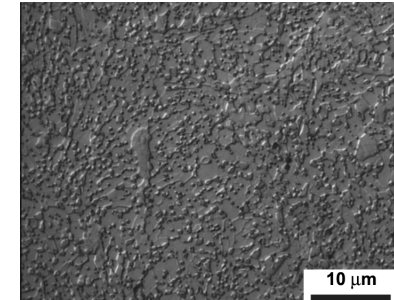
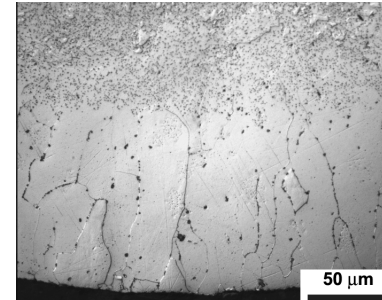
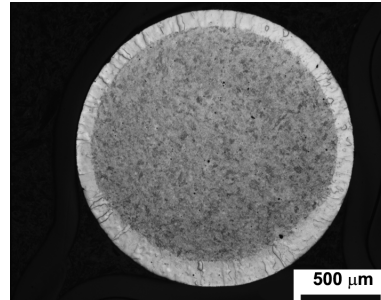


Les matériaux architecturés

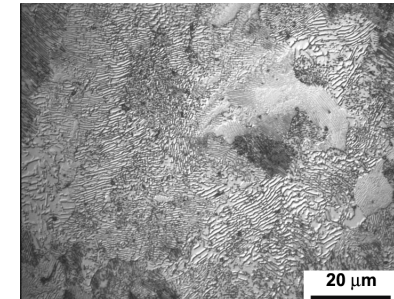
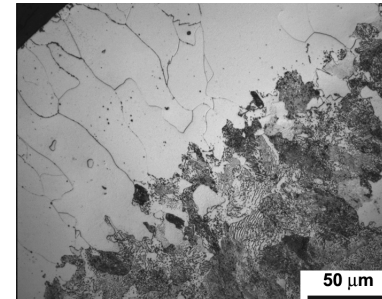
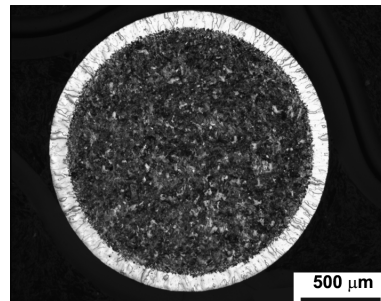


Aciers a Gradients obtenus par decarburation

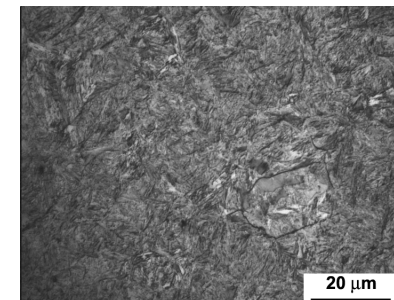
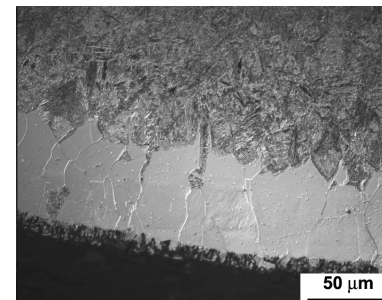
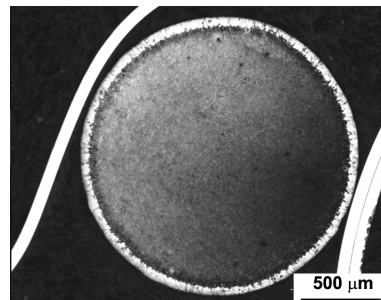
Spherodite/ferrite
CGM



Pearlite/ferrite
CGM

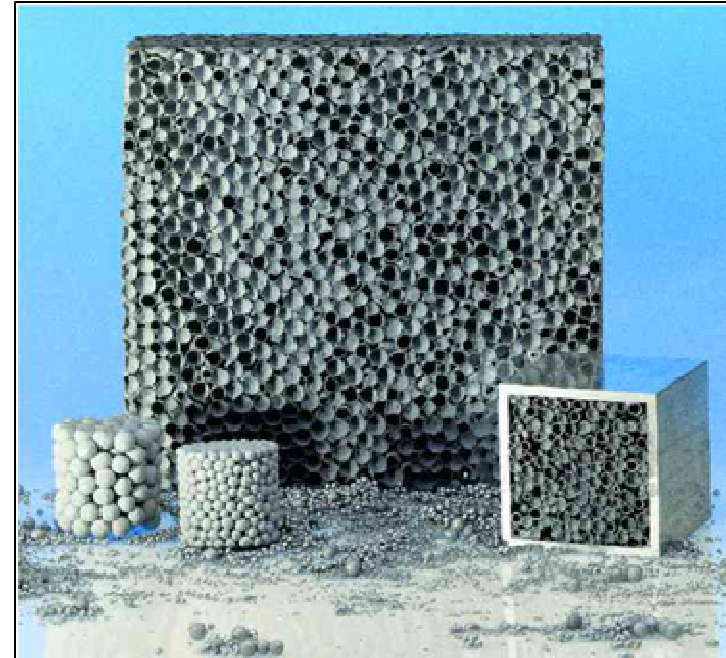
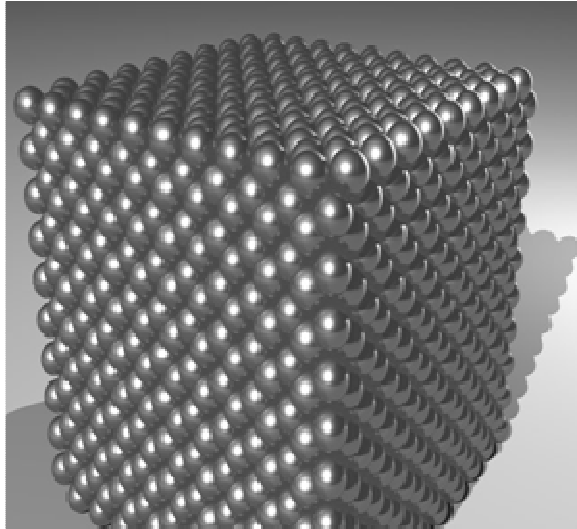


Martensite/ferrite
CGM.



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

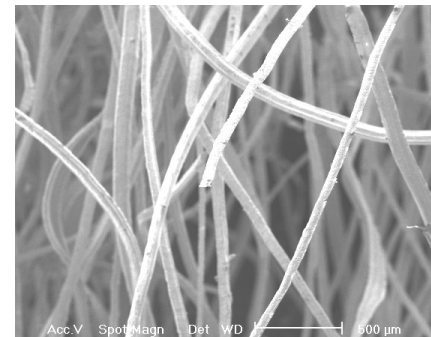
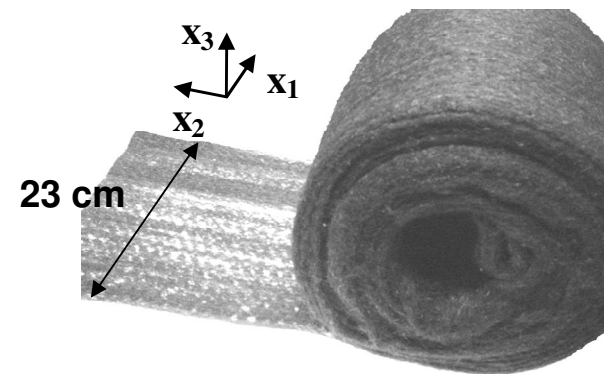
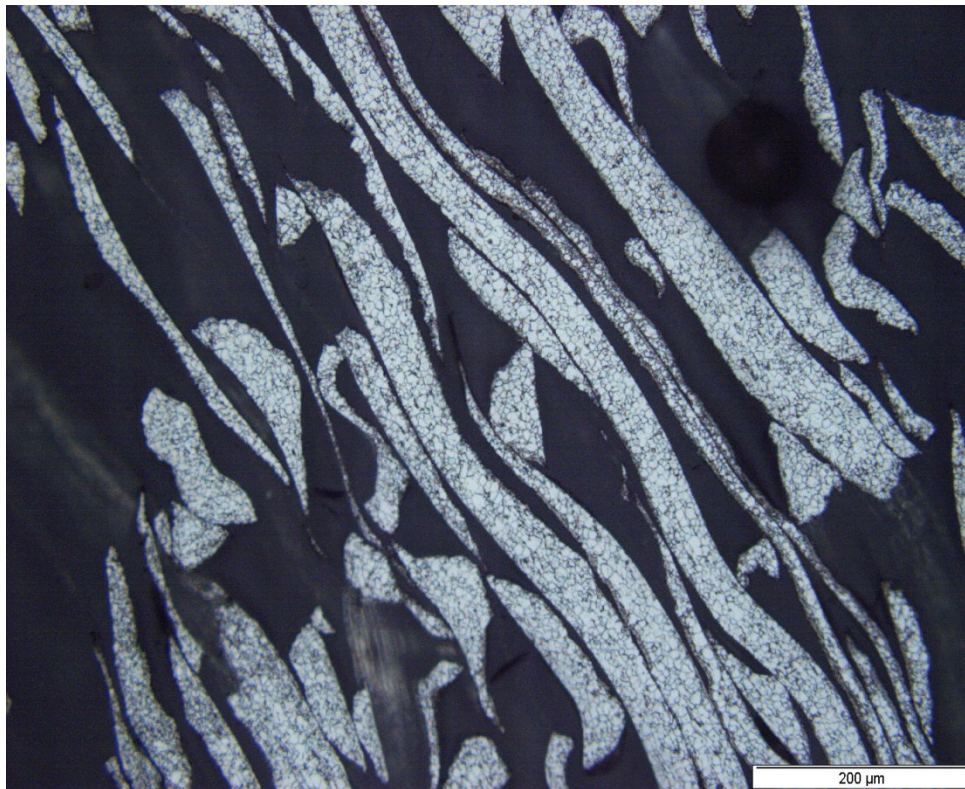
Processing

« **Taylored materials** »

Projet MAPO

Exemple : les Laines d'acier

Recristallisation???



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

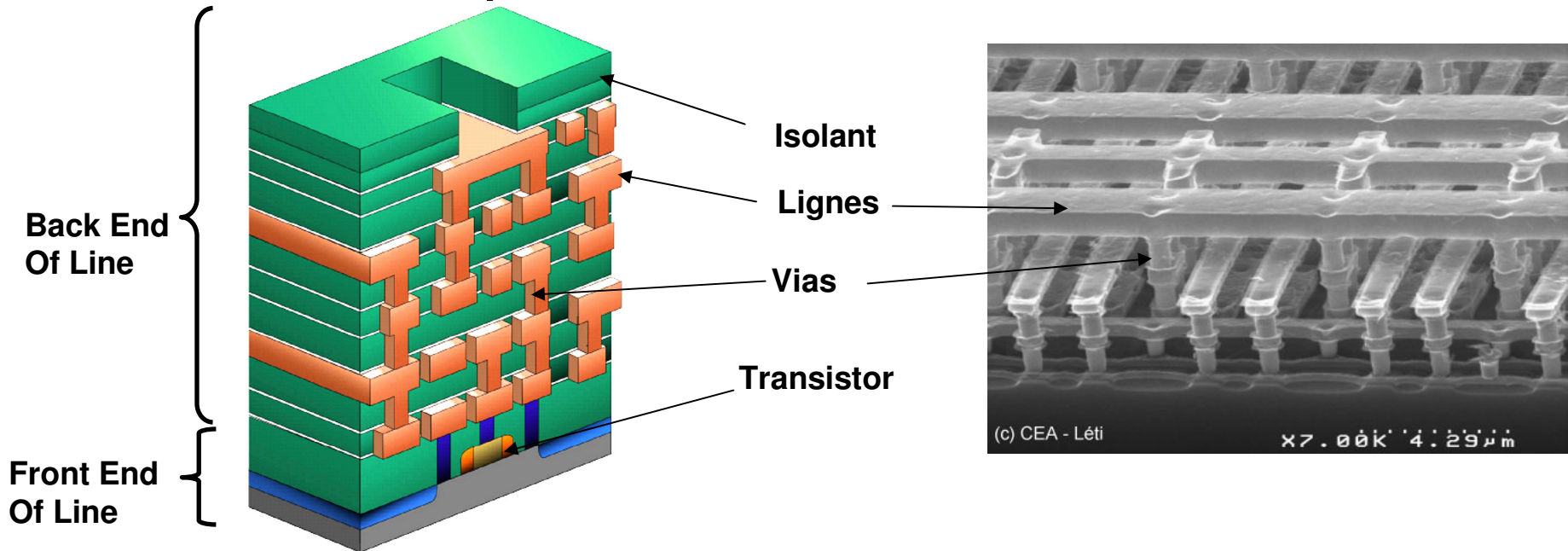
La métallurgie où on ne
l'attend pas forcément...

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



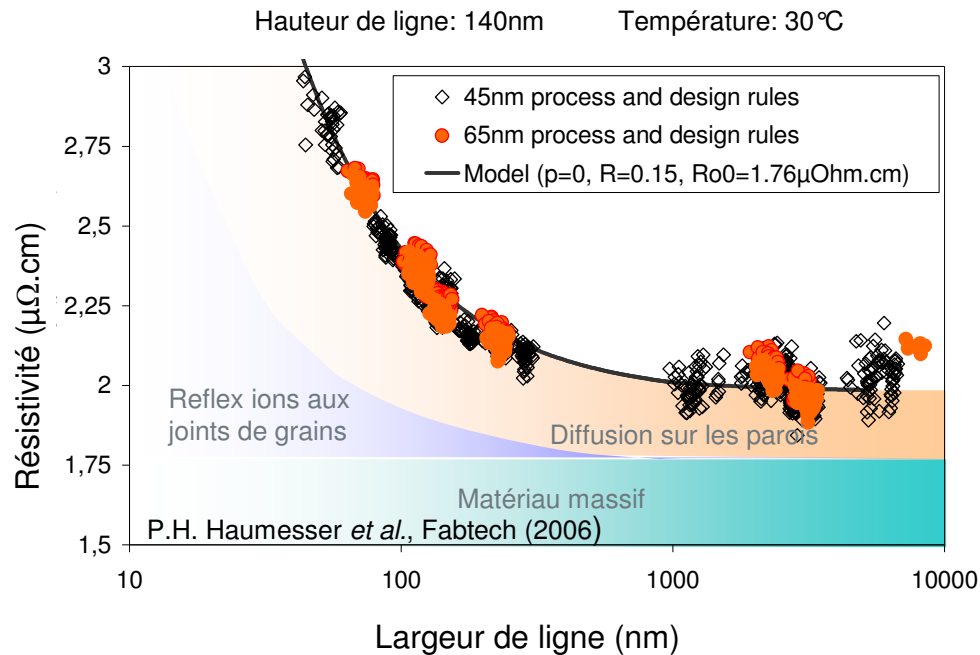
- Propriétés du conducteur :

- Faible résistivité
- Tenue à l'électromigration

→ Intégration du cuivre

Influence de la réduction des dimensions - résistivité

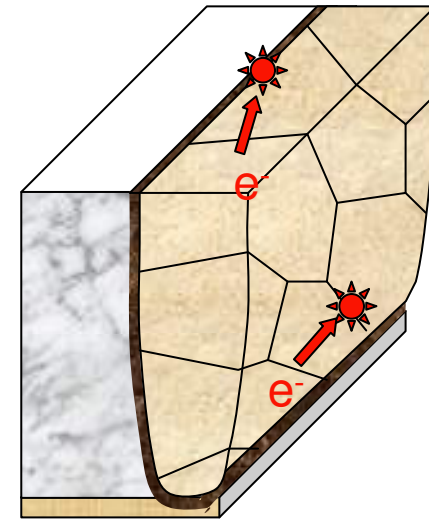
□ Augmentation de la résistivité du métal



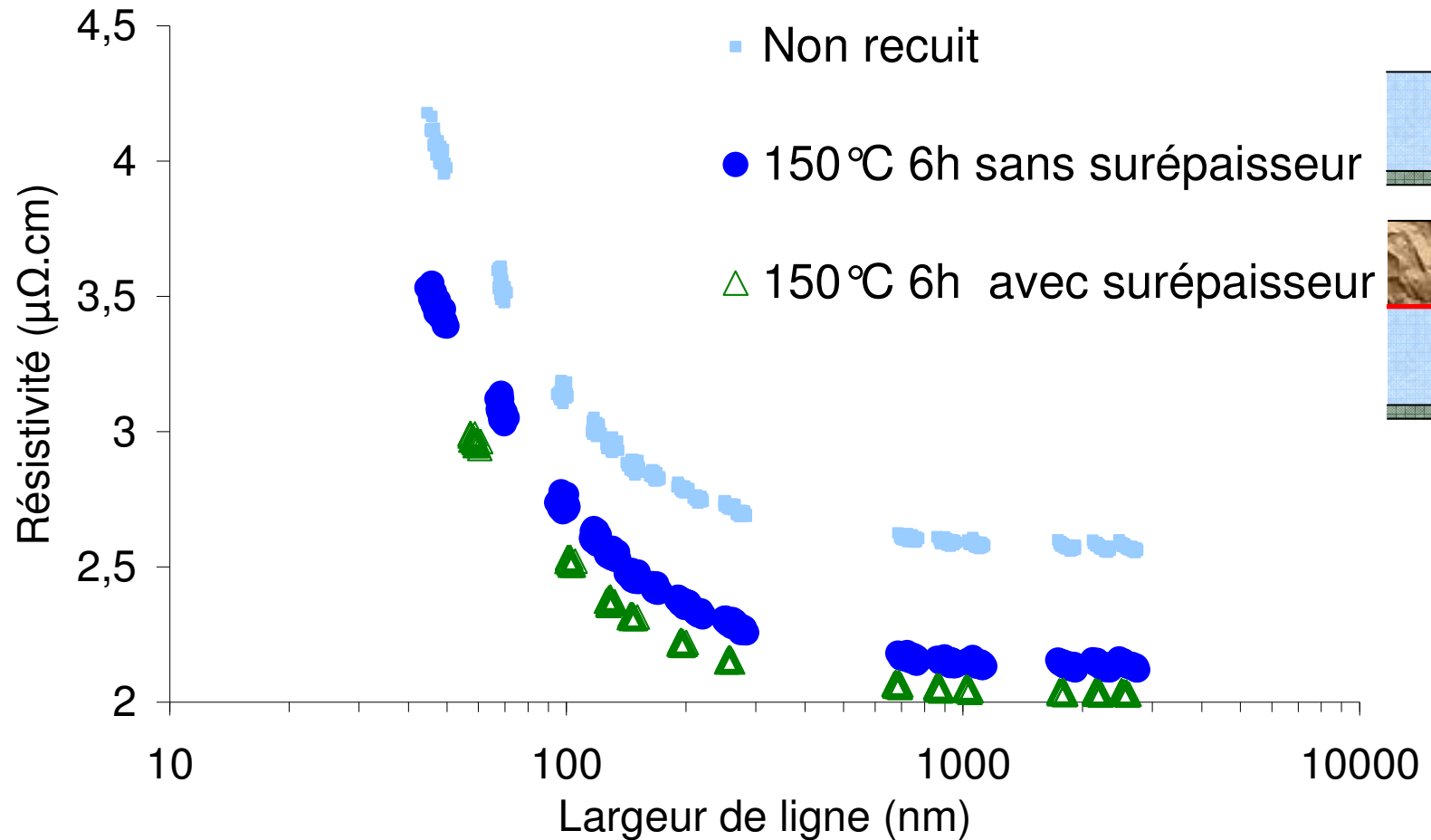
- Effet observé qd les dimensions sont proches du libre parcours moyen des e^- (~40 nm dans Cu)
- Etudes théoriques depuis 1901 (J.J. Thomson)
- Connue pour le cuivre depuis 1998 (F. Chen)

– 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

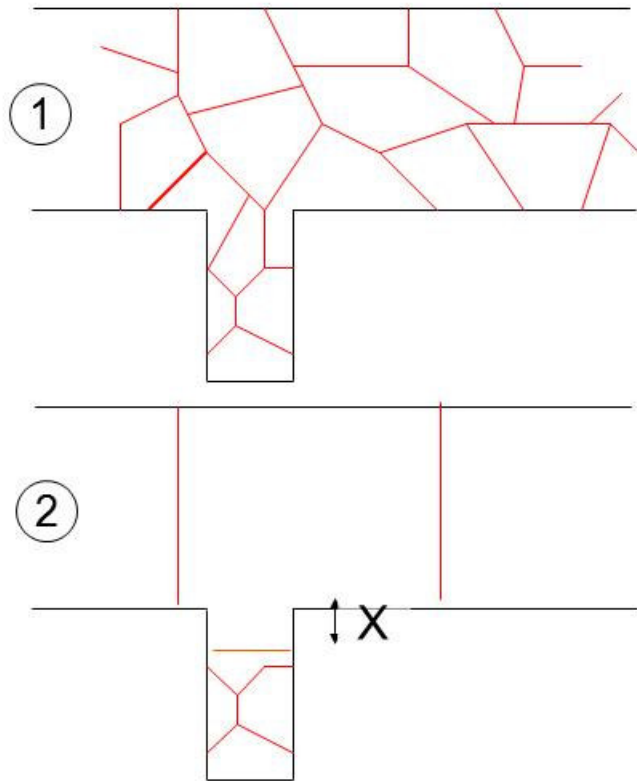


Comparaison des résistivités – T = 150 °C



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

Paramètres pertinents d'une invasion partielle ?



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

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

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

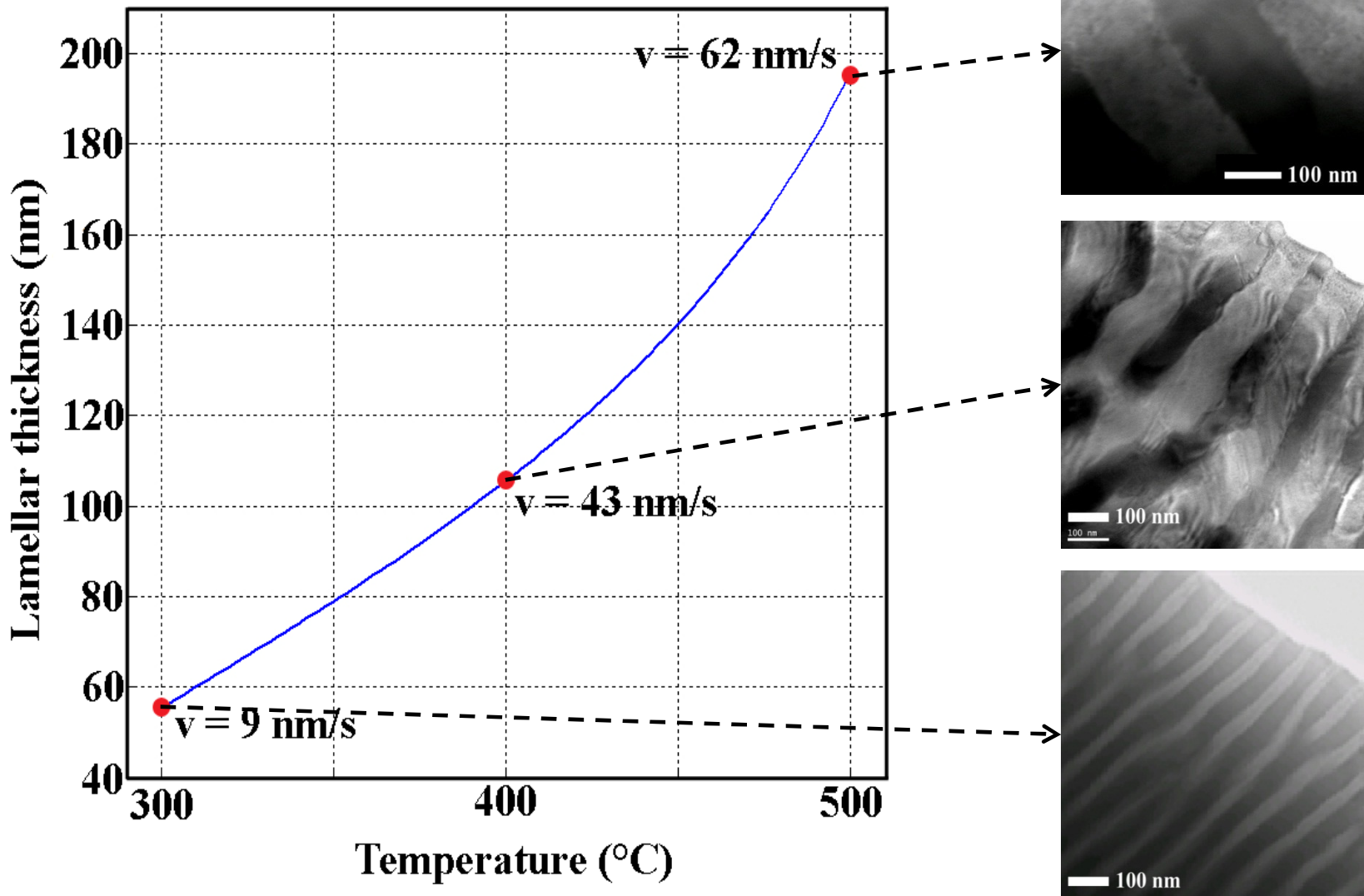
- ✓ Compétition entre la cinétique de croissance dans les lignes et dans la surépaisseur ?
- ✓ Ancrage sur les flancs de ligne ?
- ➔ Il faut déterminer mobilité et force d'ancrage de l'invasion

Développement de matériaux thermoélectriques

P.Bellanger, S.Gorsse, Y.Brechet

Développement de nanostructure dans des thermoélectriques

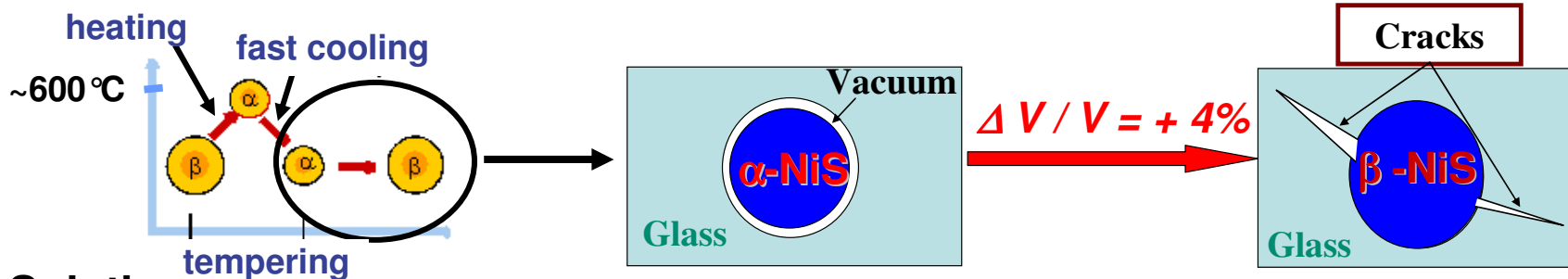
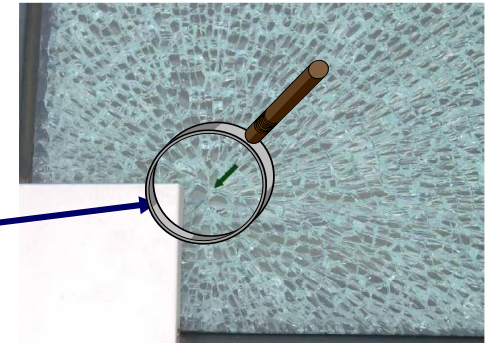
Decomposition par une réaction de **décomposition spinodale discontinue**



Eviter que les carreaux cassent ...

O.Yousfi, P.Donnadieu, Y.Brechet

Casse différée des verres : transformation des sulfures de Nickel glass



► Solution :

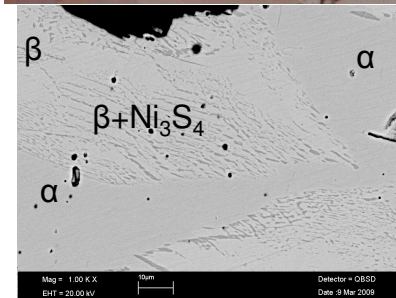
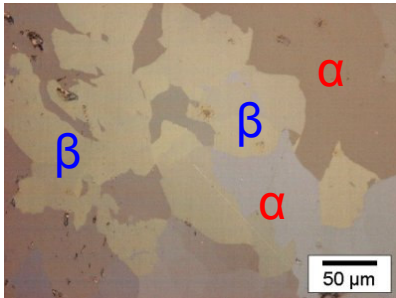
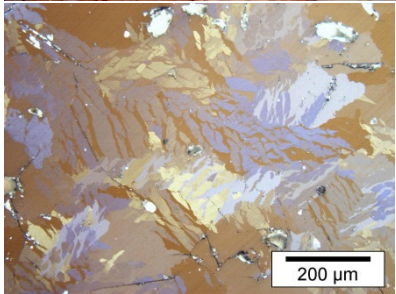
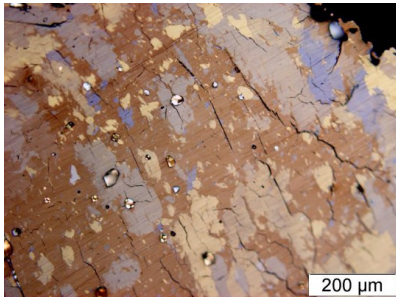
1. NiS impossible à éviter (elaboration process)
2. Une aiguille dans une botte de foin: 1inclusion/300m² (size : 50-600μm)
3. Provoquer la transformation par un traitement thermique

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/

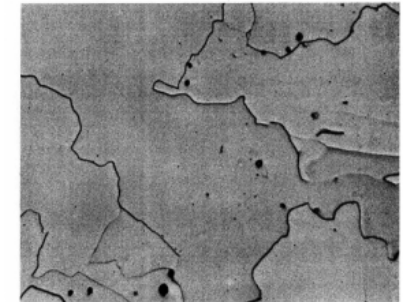
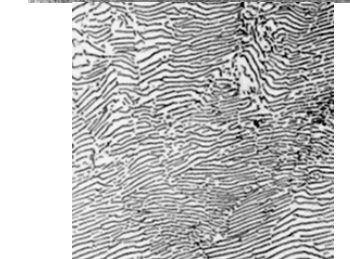
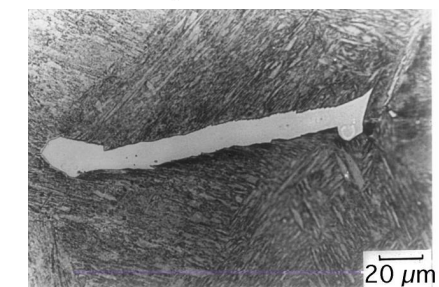
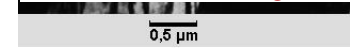


Fig. 5.80 Massive α in an Fe-0.002 wt% C quenched into iced brine from 1000 °C. (book, 8th)



α Ferrite + Fe_3C



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 vie
 - 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 crée
- 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			Transformation de phase Philippe Maugis	Mécanique de la rupture Thomas Pardoen	Pause
11:00:00					
11:30:00			Genèse des microstructures II Alphonse Finel	Mécanique aux petites échelles Marc Verdier	Discussions
12:00:00					
12:30:00		Déjeuner			Déjeuner
13:00:00		Déjeuner	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 Mangelinck	Matériaux architecturés Olivier Bouaziz		
18:00:00		Propriétés Fonctionnelles Stéphane Gorsse	Nouvelles techniques de caractérisation Eric Malre		
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		POSTERS	POSTERS		
20:00:00	diner				
20:30:00		diner			
21:00:00	FSW Anne Denquin		Banquet		
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