

# Mise en œuvre des Matériaux-I - **Les Céramiques** -

## Introduction et structure du cours

*M. Stuer & P. Bowen*



**EPFL**



**Empa**

Materials Science and Technology

# diapos effectives: **10**  
(sans pages de gardes, questionnaires, ...)

## Sommaire

*What's on the  
- MENU -  
today ?*

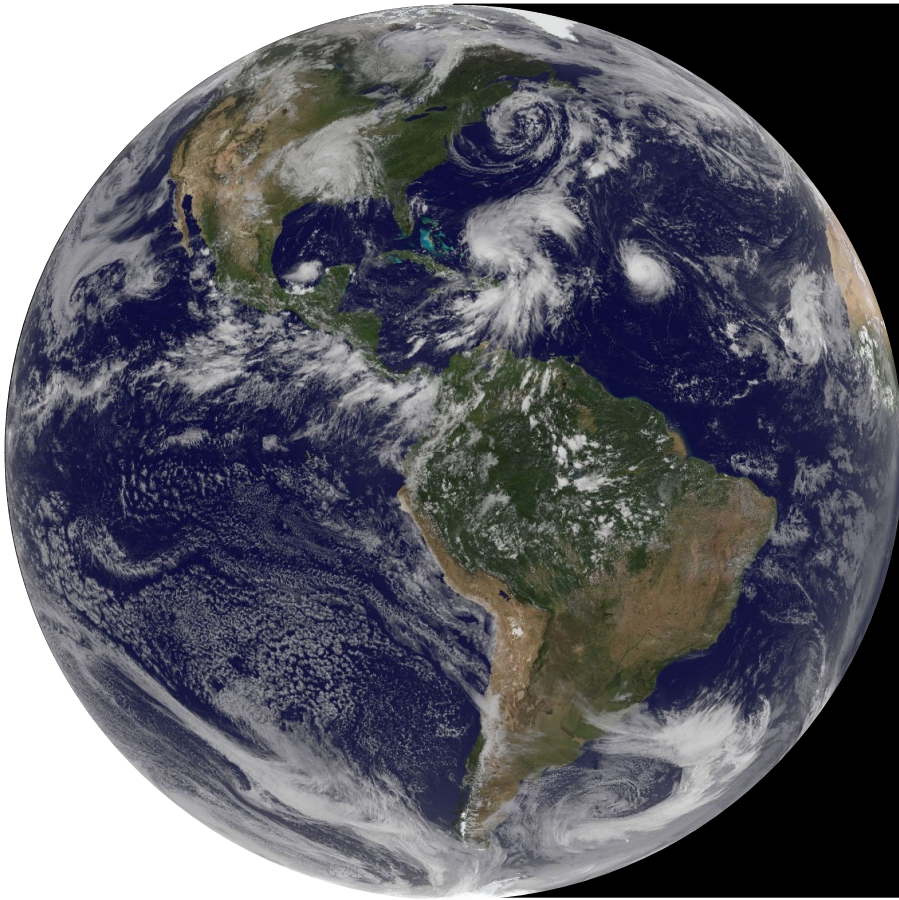


- ♦ Autoportrait MS
- ♦ Mission et motivation du cours
- ♦ Exemples d'application technologiques des céramiques
- ♦ Définition des céramiques
- ♦ Avantages/désavantages des céramiques et leur impact sur la mise-en-œuvre
- ♦ Structure et thèmes du cours
- ♦ Points d'organisation du cours

### Objectifs d'apprentissage:

- ♦ Savoir définir les céramiques
- ♦ Comprendre leur importance technologique
- ♦ Comprendre et se familiariser avec la structure et des notions terminologiques du cours

## Notre mission



- Découvrir le **monde technique des céramiques**
- Apprendre les **étapes importantes** de leur mise en forme
- Acquérir les **bons réflexes** pour mettre en œuvre et utiliser les céramiques
- Acquérir les **notions de base** pour communiquer de manière efficace avec les experts céramiques



# Examen



- Examen pendant la session en juillet 2025
- **Pour la partie céramiques:**
  - Droit à 1 page A4 (écrite à la main pas de numérique / ni photocopies)
  - Questions à choix multiples couvrant tous les thèmes du cours
  - Potentiellement 1-2 questions à développer

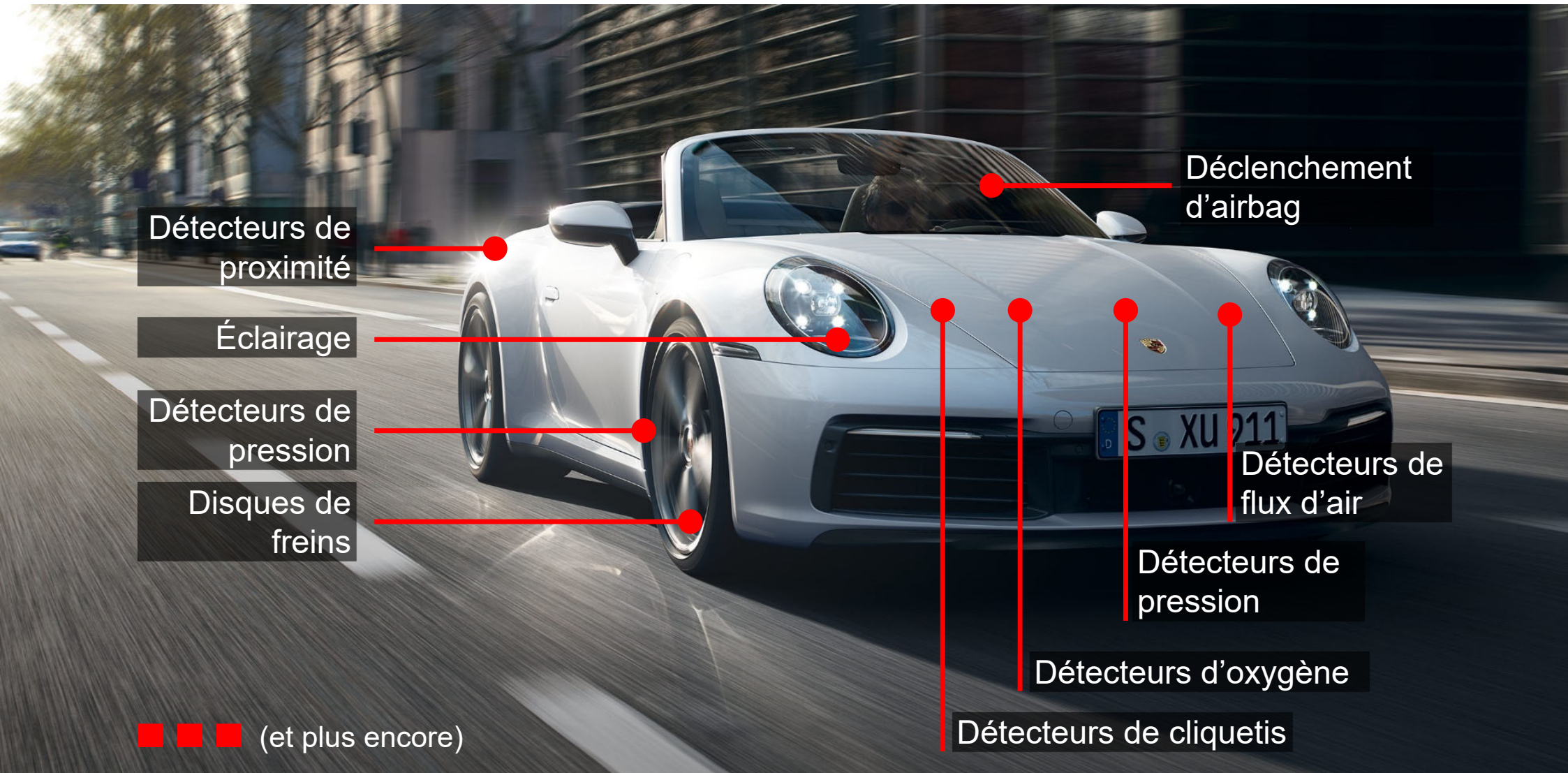


## Question courante: Pourquoi traiter les céramiques ?

- ♦ Contre question:  
Où pensez-vous retrouver les céramiques ?



## Question courante: Pourquoi traiter les céramiques ?

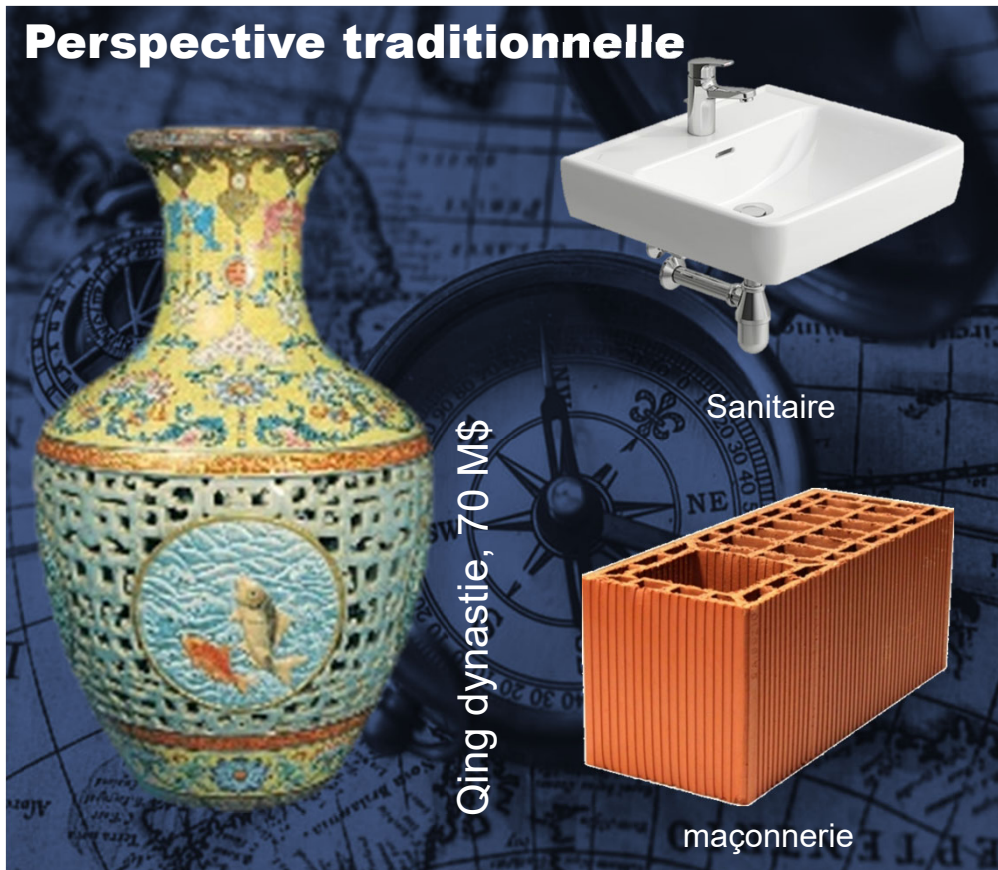




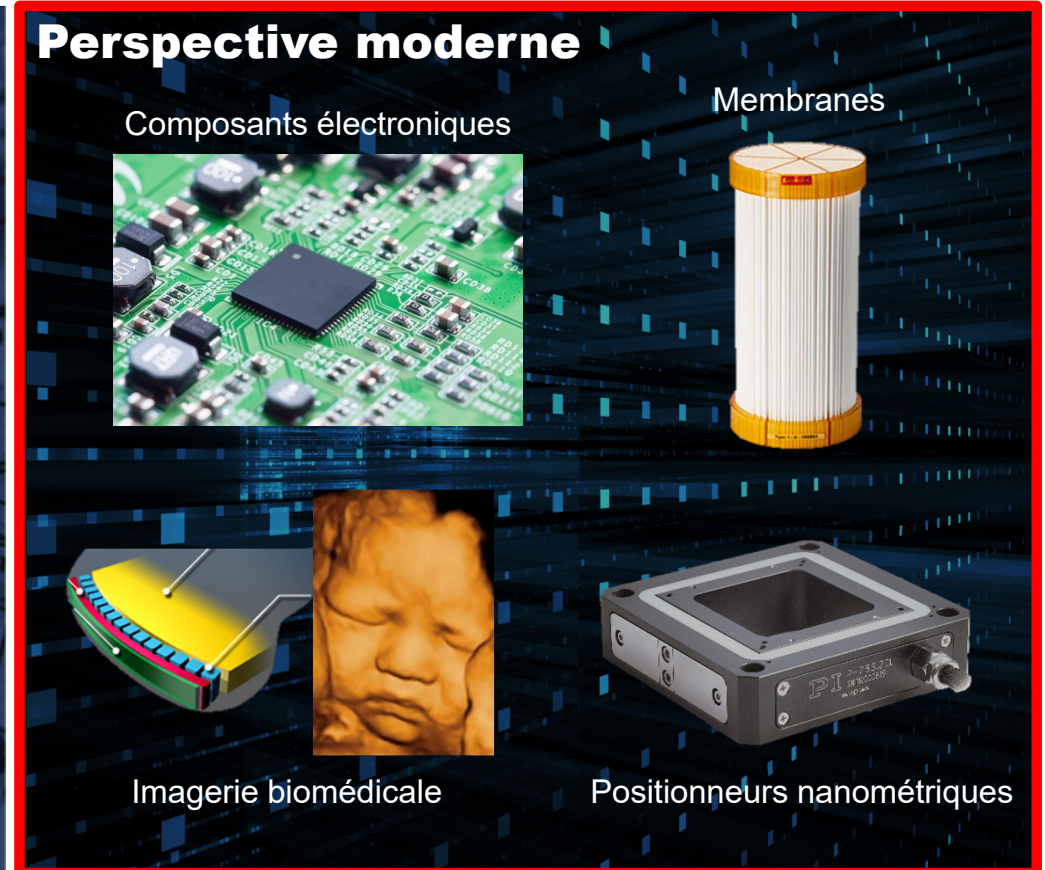
## Question courante: Pourquoi traiter les céramiques ?

- ♦ **Réponse:** Les céramiques jouent un **rôle essentiel** dans le **monde «moderne»** (et on a souvent seulement une vue traditionnelle)!

### Perspective traditionnelle



### Perspective moderne





## Comment définir les céramiques?



## Comment définir les céramiques?

- ♦ Le mot « **céramique** » vient du grec et veut dire « **argile ou terre à potier** »
  - ♦ Les céramiques sont les **matériaux non-métalliques, inorganiques!**
  - ♦ Les **plus courantes** sont catégorisées selon:
    - **Oxydes**
    - **Nitrures**
    - **Carbures**
- Ils se composent d'éléments « métalliques » ou « semi-métalliques » du tableau périodique oxydés, nitrurés ou carburés, respectivement.
- ♦ De manière simplifiée on peut donc dire que la rouille ou les « cendres de fer » sont aussi une céramique!

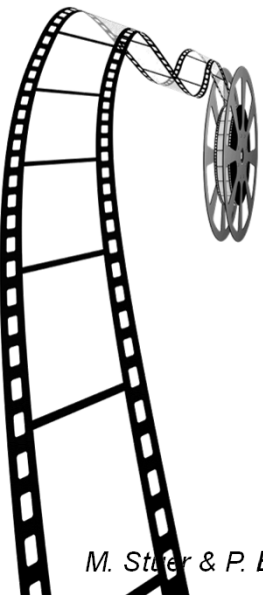


## Exemple de formation de “céramique”





## Avantages et désavantages des céramiques (simplifié)



# Avantages et désavantages des céramiques (simplifié)

Les avantages des céramiques font aussi leurs défauts:

♦ Les **avantages principaux** des céramiques sont:

- résistance à la chaleur
- résistance chimique

♦ Leurs **désavantages principaux** sont:

- Fragilité (e.g. pas/peu de plasticité)
- très haut point de fusion
- incompatibilité avec la mise en œuvre par fonte et coulé (e.g. métaux et polymères)

♦ **Conséquence:**

- **Mise en forme** via la **technologie des poudres**

(sauf couches minces (PVD, CVD, ALD, ...) → voir [Micro-331 Microfabrication technologies](#) BA5)

(N.B.: C'est cool, car les poudres jouent un rôle de plus en plus important dans plein de technologies!)



Céramiques		Énergie de liaison élevée	
Liaisons ioniques et covalentes (fortes)	$T_f$	E	Élevée
	$E$	$\alpha$	Élevé
	$\alpha$		Faible

Métaux		Énergie de liaison variable	
Liaisons métalliques (plutôt faibles)	$T_f$	E	Modéré
	$E$	$\alpha$	Modéré
	$\alpha$		Modéré

$T_f$  = Température de fusion

$E$  = Module de Young (Module d'élasticité)

$\alpha$  = Coefficient d'expansion thermique

## La technologie des poudres (contexte du cours)



**Céramiques**

**Technologie des poudres**

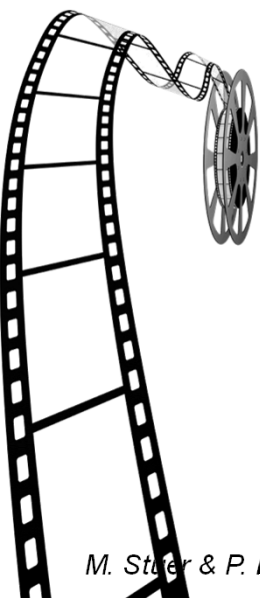
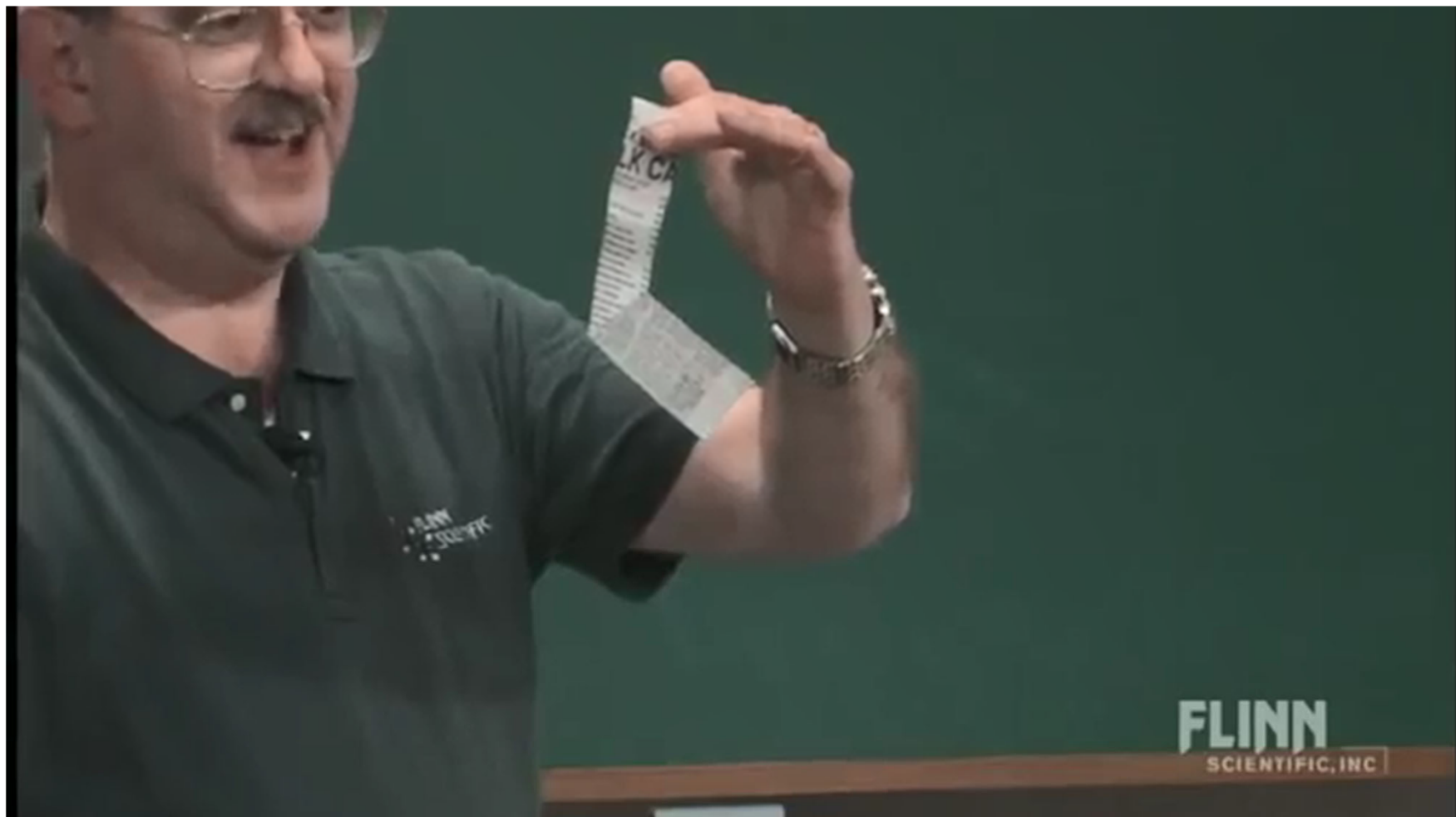
Pour le mise-en-œuvre des céramiques

- On va devoir décrire les **caractéristiques des poudres**
- Introduire l'échelle nanométrique nécessaire à **décrire les forces interparticulaires**  
(à suivre aussi en: [MICRO-530](#), [Nanotechnology](#) MA2)
- Développer les techniques nécessaires à **transformer, travailler et maîtriser les poudres**

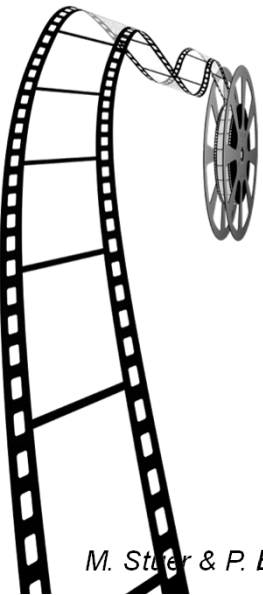
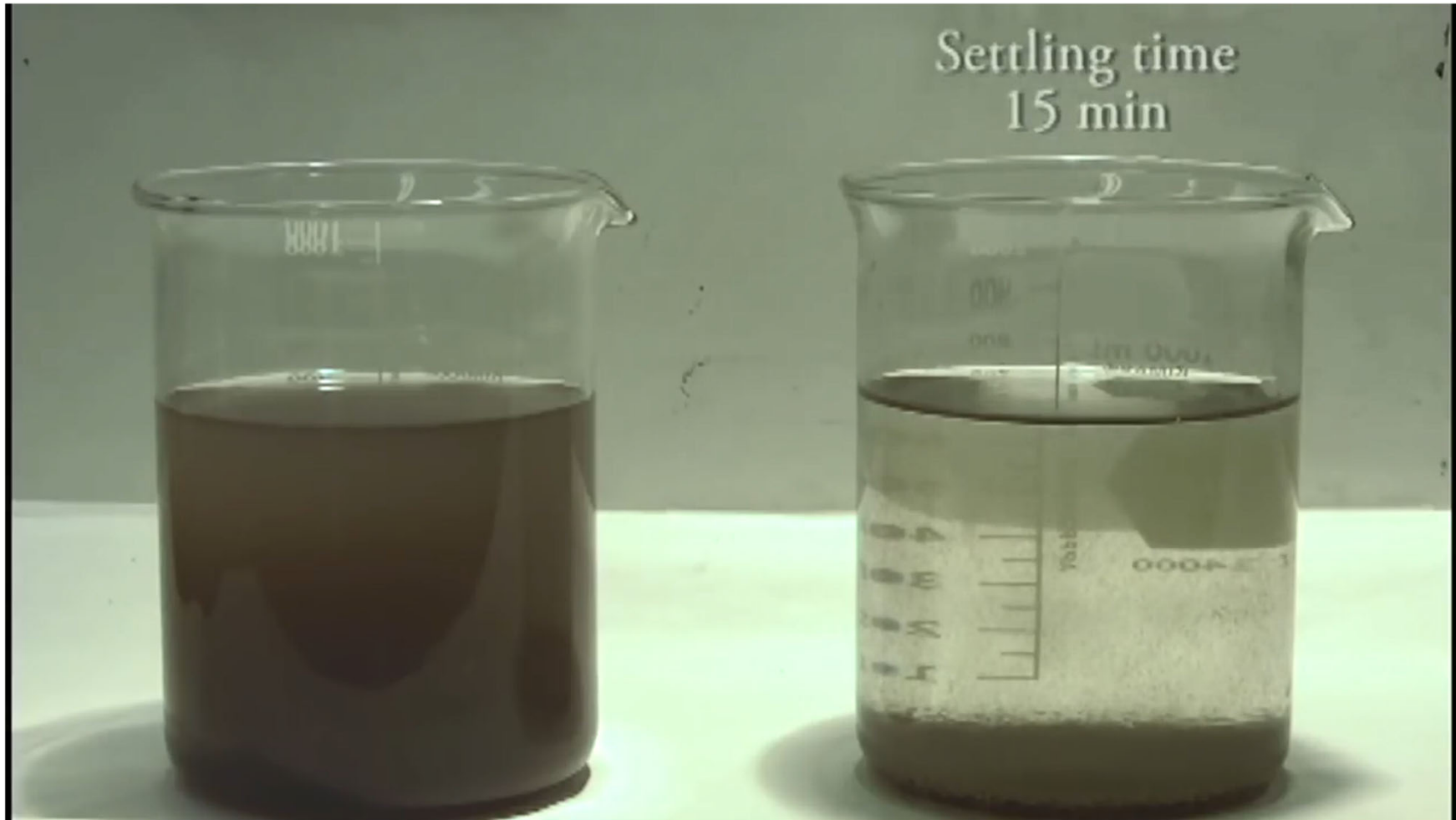
Image © [Fabian Oefner](#)



## Exemple de forces intermoléculaires attractives

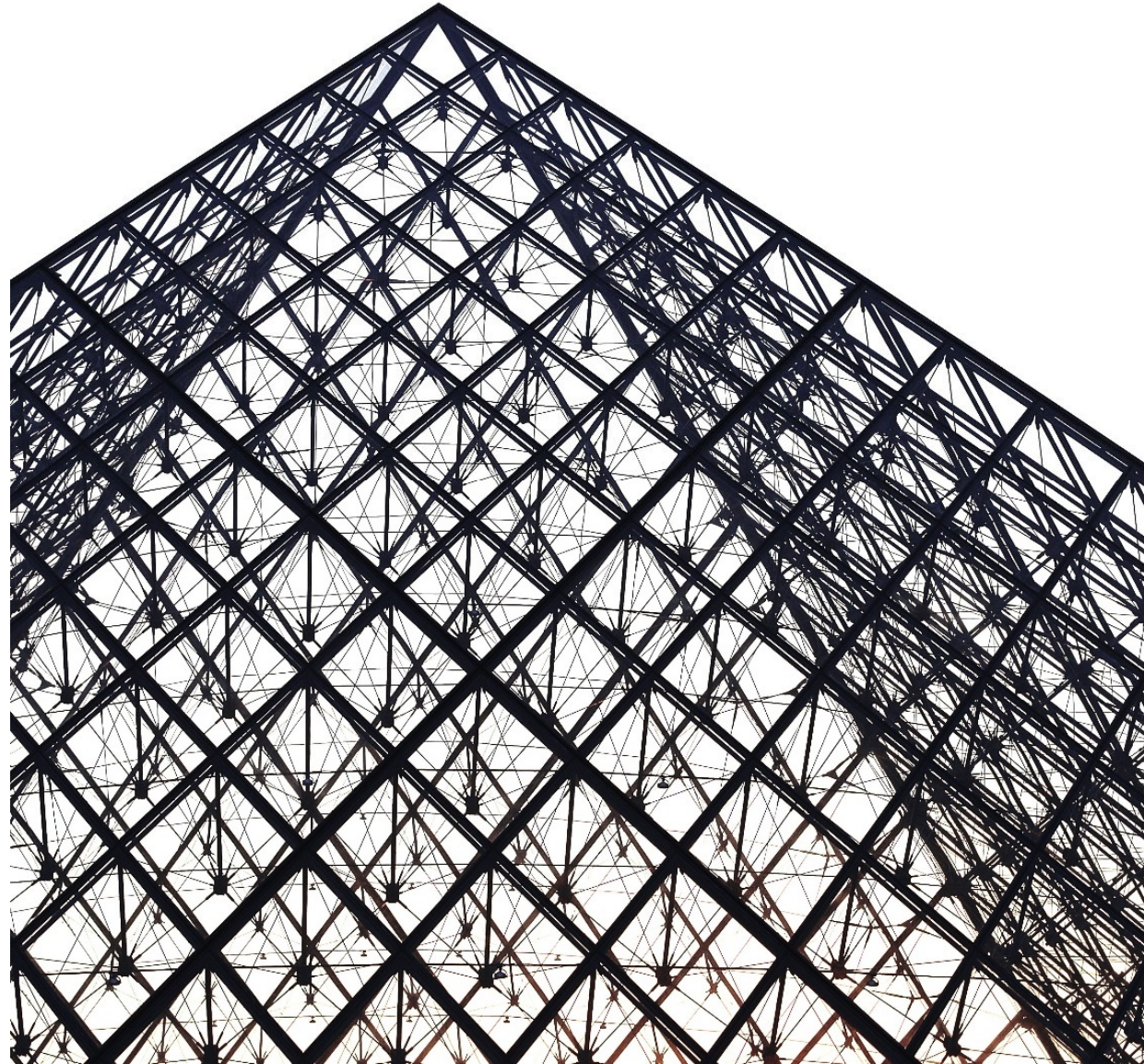


## Forces intermoléculaires causent les forces interparticulaires



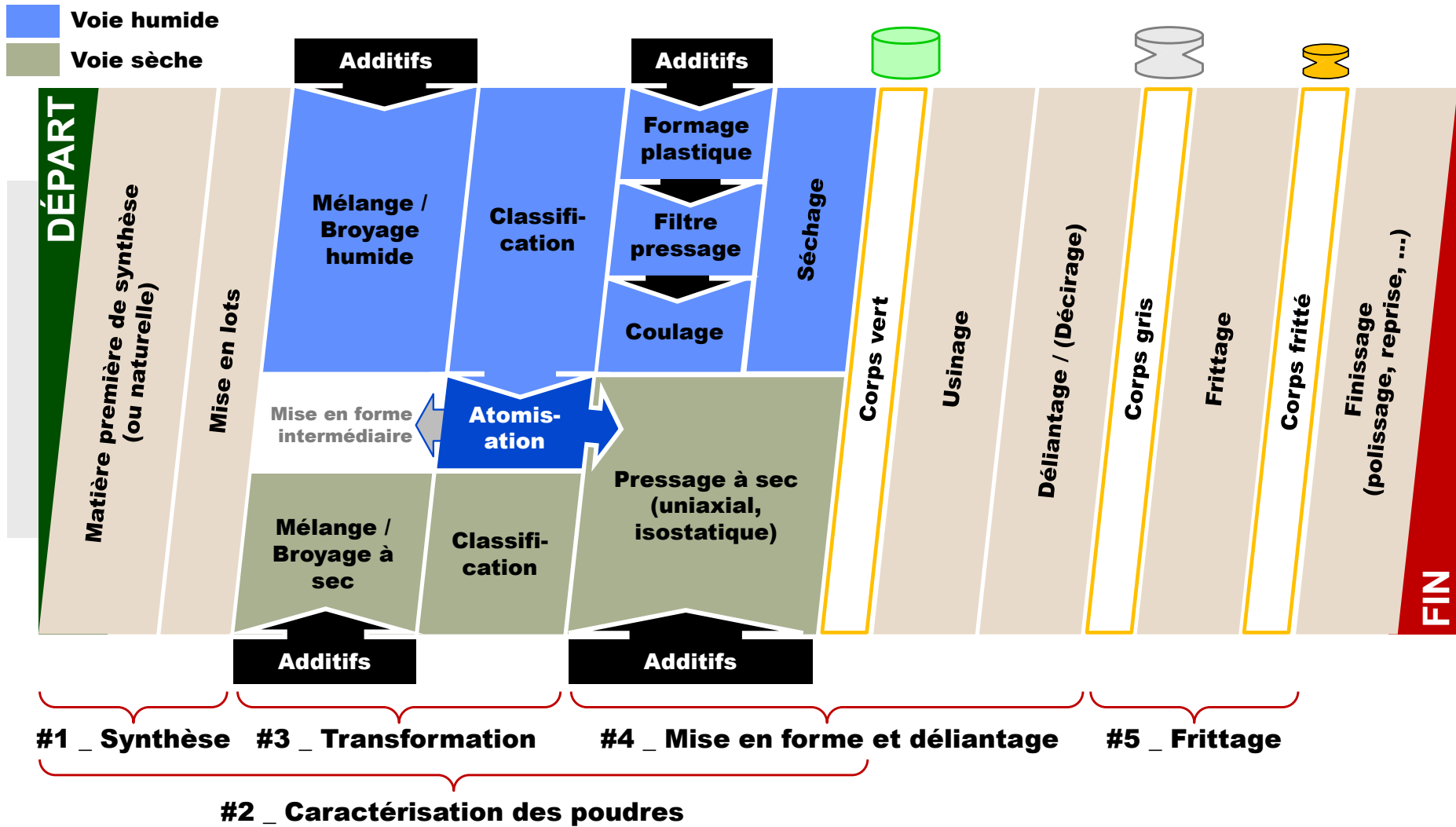
# Structure du cours

*M. Stuer & P. Bowen*





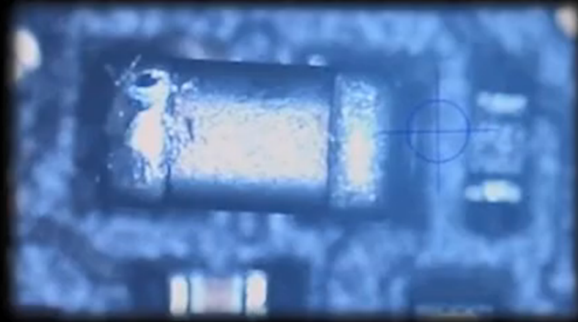
# Flux de mise-en-œuvre des céramiques et chapitres du cours



**Atomisation** = Mise de poudre sous forme de granules = Semi-produit  
**Corps vert** = Poudre mise en forme avant consolidation/densification  
**Frittage** = Consolidation et densification de la poudre par traitement thermique

Structure

# Procédé de mise en forme illustré à l'aide des électrocéramiques

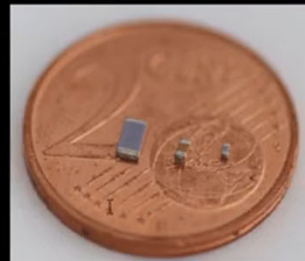


800 Kondensatoren pro Handy

Nicht nur in Handys, sondern überall ...



In vielen Größen ...



12,7 Milliarden €/Jahr  
> 1 Billion Stk./Jahr

## Les cinq grands thèmes du cours

**#1**



**Comment synthétiser des poudres ?**

**#2**



**Comment décrire et caractériser des poudres ?**

**#3**



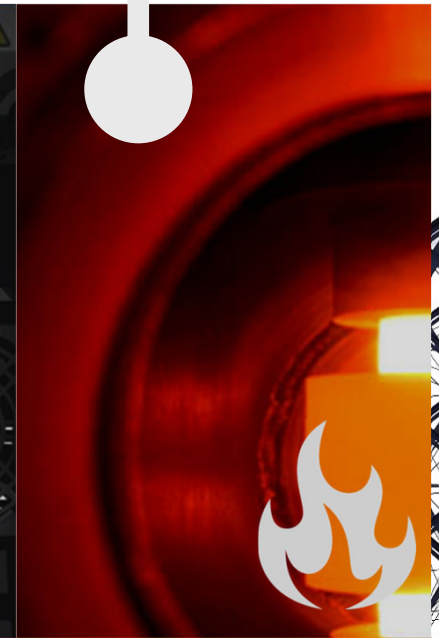
**Comment transformer et préparer les poudres ?**

**#4**



**Comment former les poudres ?**

**#5**



**Comment densifier les poudres ?**

Structure



# Les cinq grands thèmes du cours

## #1



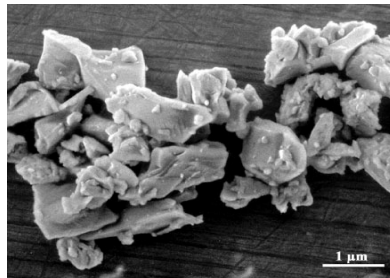
## Synthèse des poudres

*La synthèse de poudres par voie chimique ouvre les portes vers les céramiques techniques modernes*

### Objectifs d'apprentissage:

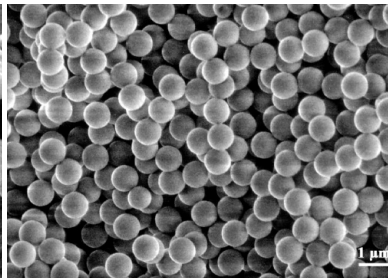
- ♦ Reconnaître les **méthodes** de synthèse des poudres usuelles
- ♦ Savoir les étapes critiques d'une **synthèse par précipitation**
- ♦ Acquérir le concept de base d'une synthèse par voie **sol-gel**

**Poudre naturelle**  
Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) - broyé



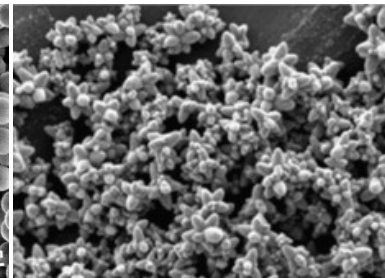
pureté basse, bon marché

**Poudre synthétique**  
Silice ( $\text{SiO}_2$ ) - précipité

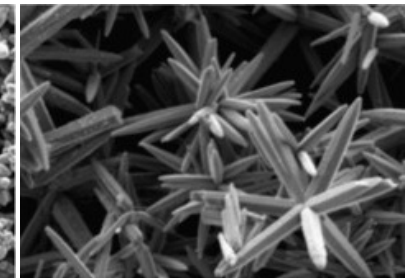


pureté élevée, chère

**Poudre de ZnO synthétique**  
Avec PAA @ pH 11.2      Avec PAA @ pH 12.5



équiaxe



fibreuse (dangereux)

# Les cinq grands thèmes du cours

#2

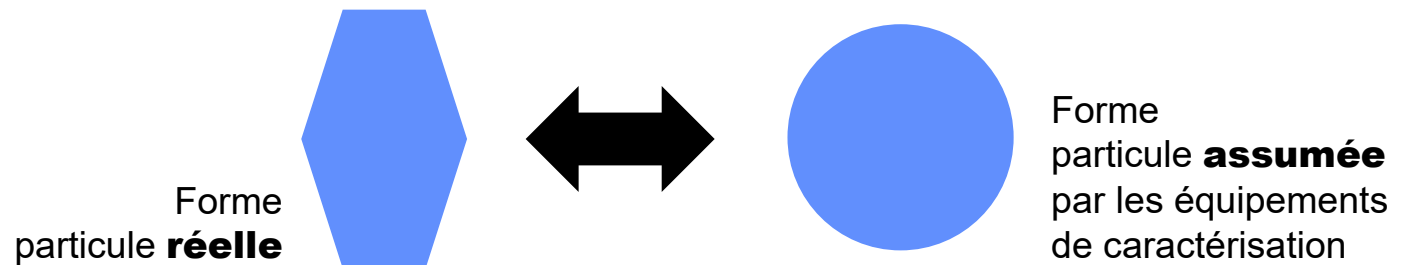


## Caractérisation des poudres

*Il faut acquérir un langage commun pour décrire et caractériser les poudres*

### Objectifs d'apprentissage:

- ♦ Connaître les **caractéristiques courantes** décrivant une **poudre**
- ♦ Comprendre les **principes de fonctionnement** des **équipements de caractérisation** courants
- ♦ Savoir **éviter/identifier** des **erreurs de mesure et d'interprétation** !





## Organisation du cours \_ questionnaires interactives

### ♦ Questions en ligne en live pendant le cours:

– **Web App:** <https://vevox.app>  
→ ID: 116-729-231

OU

– **App:** Disponible sur Android et iOS  
→ ID: 116-729-231

– Vevox donne aussi la possibilité de **poser et voter pour des questions** pendant les cours (et on pourra les traiter ensemble)

**Participez** 😊



0/1

Question slide

**Dans quel container il y a plus de masse de poudre?**



Silice naturelle  
(sable)

Silice de synthèse

Silice de synthèse



# Les cinq grands thèmes du cours

## #3



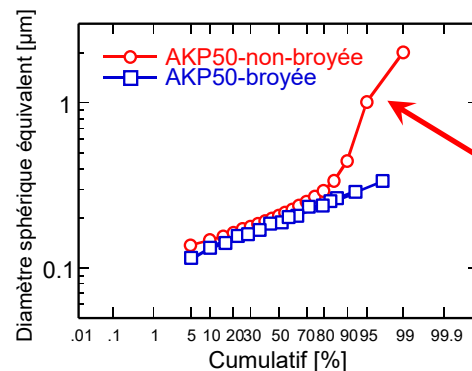
M. Stuer & P. Bowen

## Transformation des poudres

*Les étapes de transformation des poudres sont essentielles à la préparation et au succès de la mise en œuvre*

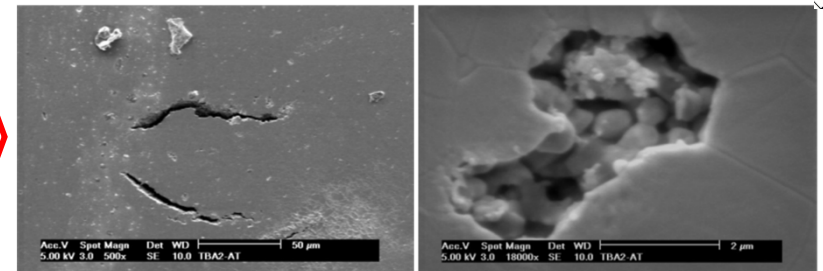
### Objectifs d'apprentissage:

- ◆ Connaître les **méthodes de transformation** des poudres courantes
- ◆ Savoir formuler et caractériser des **dispersions**  
(dispersion = particules suspendues dans un liquide, suite en [MICRO-530, Nanotechnology](#) MA2)
- ◆ **Principe** de conditionnement par **atomisation** des poudres  
(= poudres granulées)



**Agglomérats**  
(de particules)

**Défauts** micro-structuraux = mauvaises propriétés



20/02/2025

## Une dispersion n'est pas une solution

- ◆ Lorsqu'on transforme des poudres céramiques on est souvent appelé à **formuler et travailler avec des dispersions** de poudre!

### ***Dispersion:***

mélange hétérogène dans lequel au moins une phase est finement mêlée(=phase dispersée, discontinue,  $\emptyset > 1\text{nm}$ ) à une autre (=phase dispersante, continue) sans y être dissoute.

- ◆ Lorsqu'on parle d'une solution, on dissout la poudre! (On arrive plus à la séparer du liquide par tamisage/filtrage)



Photo: Liquidstories



# Les cinq grands thèmes du cours

#4

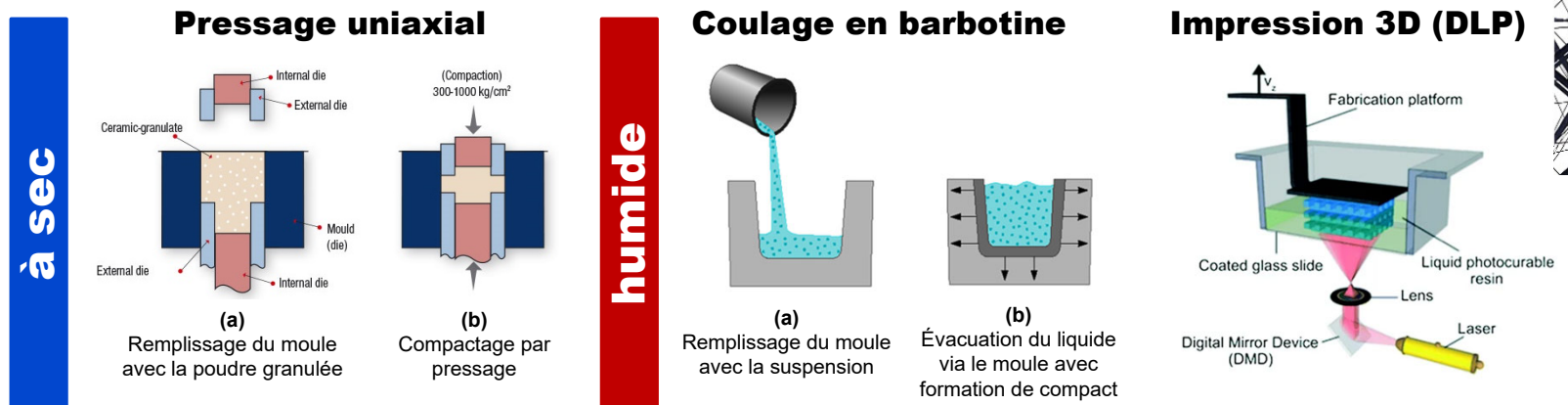


## Mise en forme des poudres

*Formage d'un objet à partir d'une poudre (= corps vert), ayant une forme proche de la forme finale et exempte de défauts*

### Objectifs d'apprentissage:

- ♦ Savoir décrire les techniques de mise en forme **courantes**
- ♦ Avoir un aperçu des nouvelles techniques de **fabrication 3D**
- ♦ Connaître les objectifs/caractéristiques importantes des **corps verts**  
(= poudre compactée mise-en-forme, non-consolidée par traitement thermique)



# Les cinq grands thèmes du cours

#5

## Déliantage et frittage des poudres

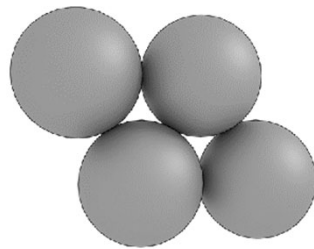
*Via traitements thermiques le corps vert est transformé en pièce céramique avec microstructure et propriétés finales*

### Objectifs d'apprentissage:

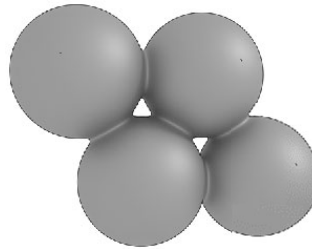
- ♦ **Étapes de frittage** de frittage des poudres
- ♦ Effets des **dopants** (= impuretés ajoutées de manière contrôlée) sur le frittage
- ♦ **Techniques de frittage** usuelles

Comment densifier les poudres ?

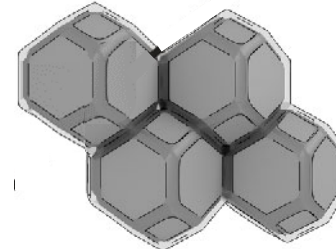
### Modèle de Coble



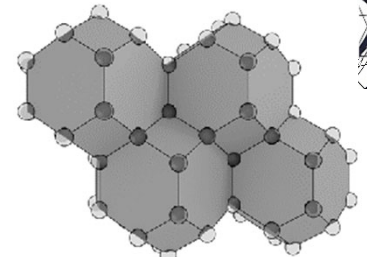
Poudre  
 $\rho_r \approx 50-60\%$



Stade **initial**  
 $\rho_r \approx 65-70\%$



Stade **intermédiaire**  
 $\rho_r \approx 70-90\%$



Stade **final**  
 $\rho_r > 90\%$



0/1

Question slide

## Quelle est la différence entre les pièces?

Il s'agit de matériaux différents

Il s'agit du même matériau avec des épaisseurs différentes

Il s'agit du même matériau avec des microstructures différentes

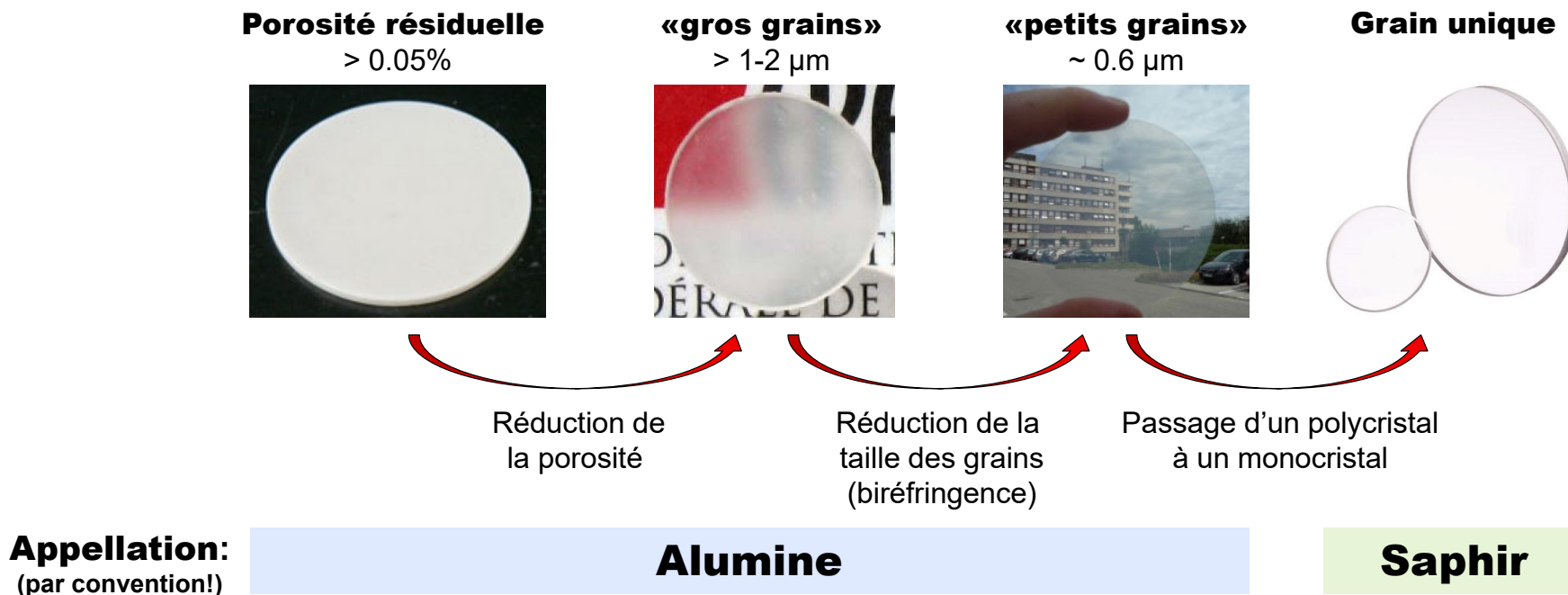
Il s'agit du même matériau à l'état amorphe et cristallin



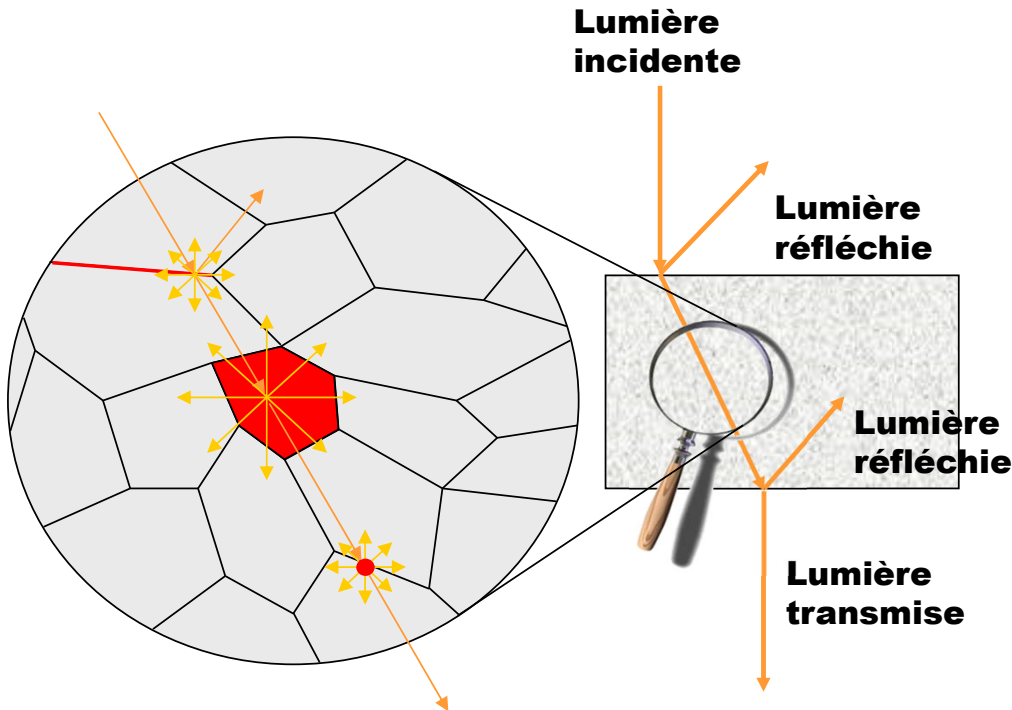


## Quelle est la différence entre les pièces? Explications

- ♦ En dehors du matériau (formule chimique), les **propriétés dépendent** fortement de sa **microstructure**. Il ne s'agit donc pas seulement de mettre en forme un matériau, mais aussi d'assurer l'atteinte de la microstructure nécessaire à sa fonctionnalité!
- ♦ **Exemple:** L'alumine (alpha) (Formule chimique:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )



# Quelle est la différence entre les pièces? Explications



## Sources de diffusion de lumière:

- Surfaces de l'échantillon
- Joints de grains
- Grains
- Pores / précipités

Transmittance en ligne maximale du saphir est 86%  
(en raison des réflexions aux surfaces)

(anglais: real in-line transmittance (RIT))

➔ Hexagonal lattice

- $n_a = n_b = 1.760$
- $n_c = 1.768$

➔ Birefringent

- $\Delta n = [0.0, \Delta n_{\max} = |n_a - n_c|]$
- $\Delta n_{\max} = 0.008$

Pour les **céramiques**

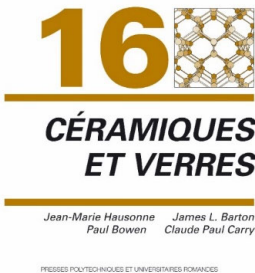
**biréfringentes** la **taille des grains** impacte non seulement les **propriétés mécaniques** mais aussi **optiques** !

# Organisation du cours

## ♦ Support du cours écrit:

TRAITÉ DES MATÉRIAUX

### Les Traités des Matériaux, vol. 16 "Céramiques et Verres"



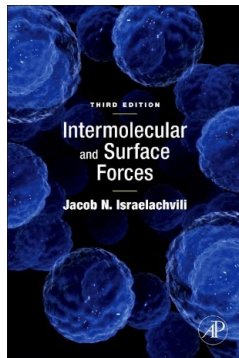
J. Barton, P. Bowen, C. Carry & J.-M. Haussonne

Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2005

(Chapitre 2)

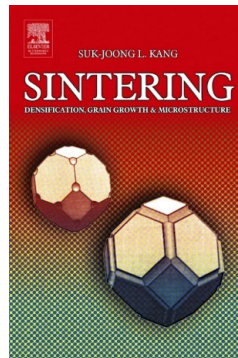
Disponible à la bibliothèque et en grande partie sur Google Books !!!

## ♦ Autres références utiles (selon affinités et vos besoins futurs):



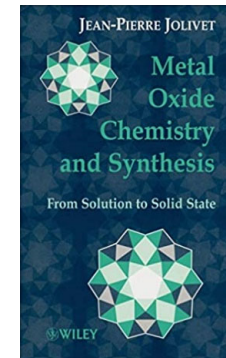
**Intermolecular and Surface forces**  
(pour spécialistes)

Jacob N. Israelachvili  
Academic Press  
3rd Edition, 2011



**Sintering:**  
Densification, Grain Growth and Microstructure

Suk-Joong L. Kang  
Butterworth-Heinemann  
1st Edition, 2004



**Metal Oxide Chemistry and Synthesis: From Solution to Solid State**

Jean-Pierre Jolivet  
Wiley  
1st Edition, 2000



## Organisation du cours

- ♦ En tout moment des questions peuvent être posées sur:
  - Moodle forum: MSE-215  
Questions posées seront traitées les lundis (moi) ou TAs/AEs à convenance
  - Étant donné que le cours suit le processus de mise-en-forme et va continuer à se servir des concepts et du langage technique acquis:

**travail continu fortement conseillé**  
(pour ne pas décrocher et profiter des leçons...)

**Enjoy**



**Partake**

## Acquis de formation et questions

What was on the  
- MENU -  
today ?



### ◆ Acquis

- Importance technologique des céramiques
- Définition et caractéristiques principales des céramiques
- Nécessité de se servir de la technologie des poudres
- Processus de mise-en-œuvre: Méthodes et étapes courantes de fabrication
- Structure du cours en rapport avec les étapes du processus de mise-en-œuvre des céramiques

### ◆ Questions

- Qu'est ce qu'une céramique?
- Pourquoi la mise en forme via poudres est la méthode d'élaboration principale?
- Quelles sont les propriétés avantageuses et désavantageuses des céramiques?