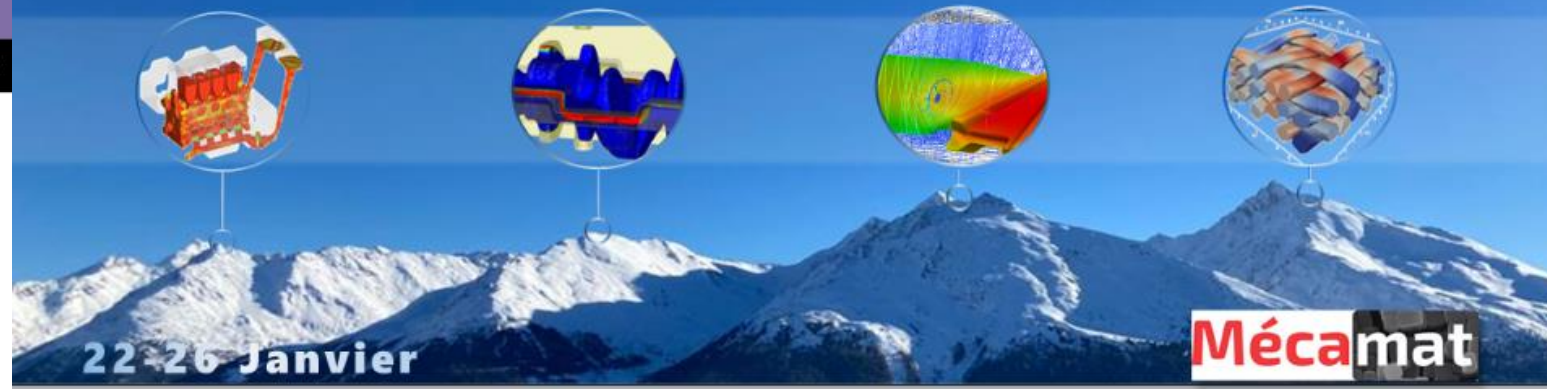




Les procédés d'atomisation au service de la poudre

Lucas DEMBINSKI

Maître de Conférences, UTBM-ICB/CO2M



➤ Les poudres pourquoi ?

- Définition.
- Echelle.

➤ Les procédés disponibles.

- Principes
- Caractéristiques.

➤ Résultats :

- Composition.
- Granulométrie.

➤ Un peu de sécurité.

➤ Conclusions.

➤ UTBM.

➤ ICB-CO2M.

➤ Les poudres pourquoi ?

- Définition.
- Echelle.

➤ Les procédés disponibles.

- Principes
- Caractéristiques.

➤ Résultats :

- Composition.
- Granulométrie.

➤ Un peu de sécurité.

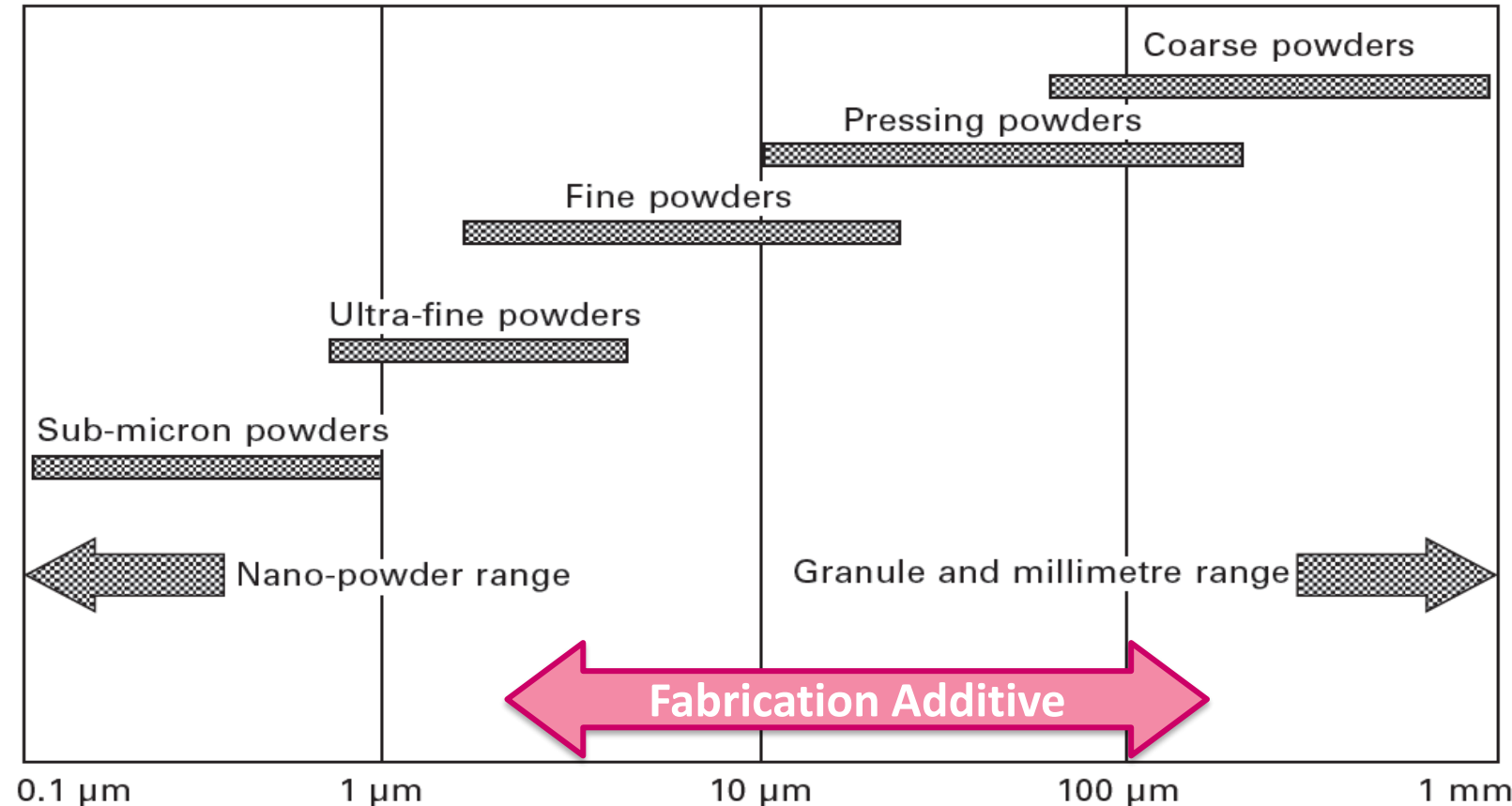
➤ Conclusions.

➤ UTBM.

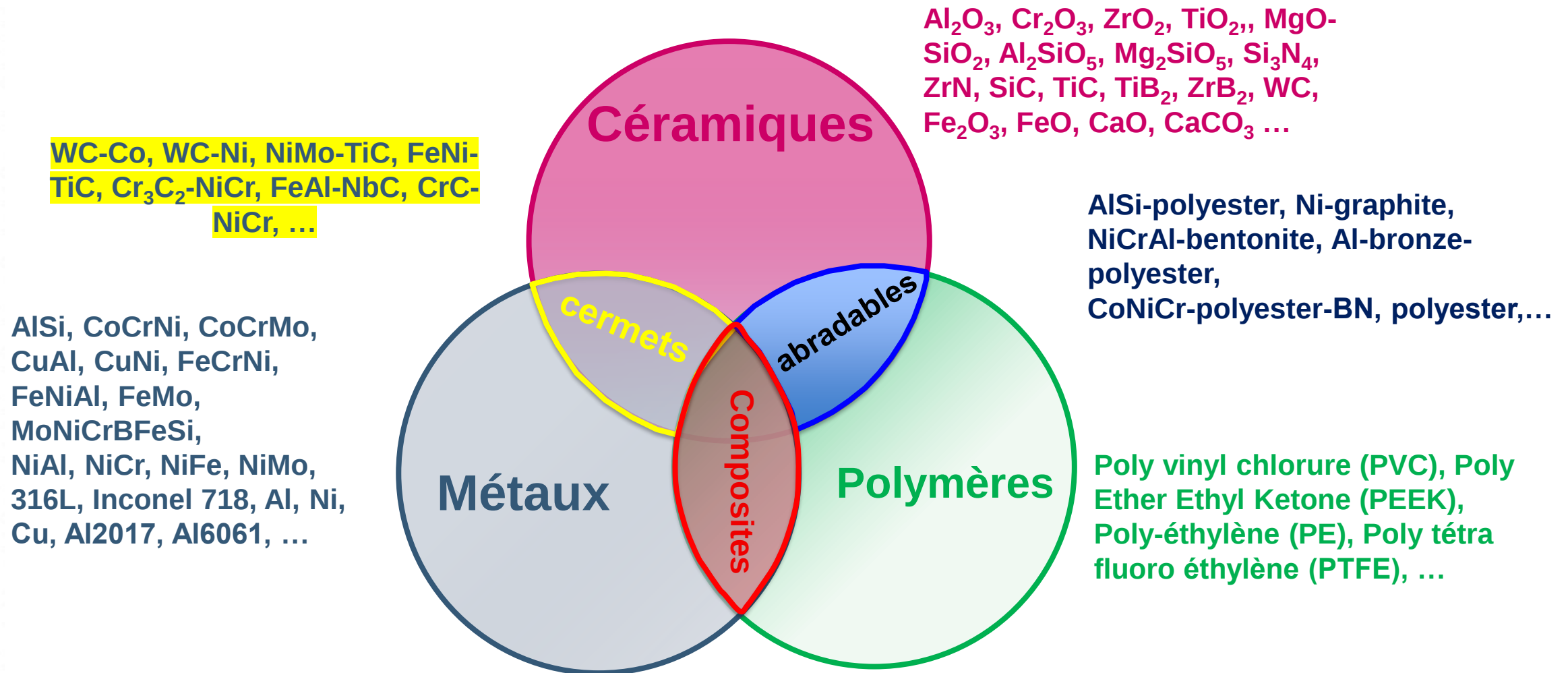
➤ ICB-CO2M.

► Poudre :

- Matériau réduit sous forme de petites particules de tailles variables.
- Matériau pulvérulent.

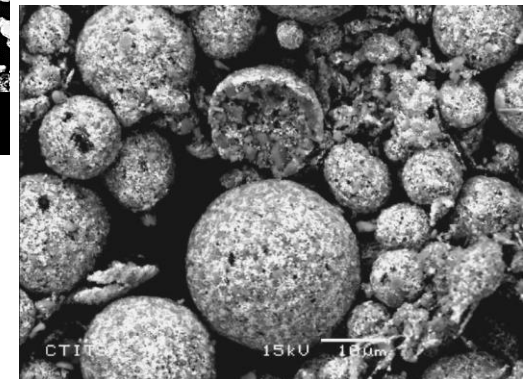
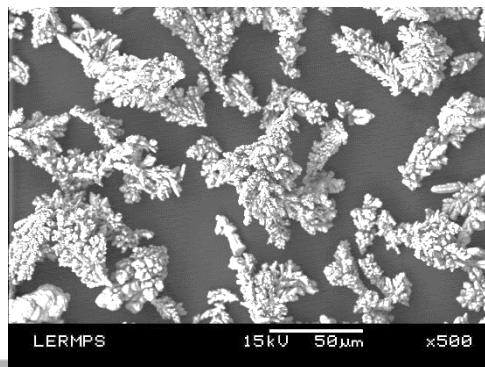
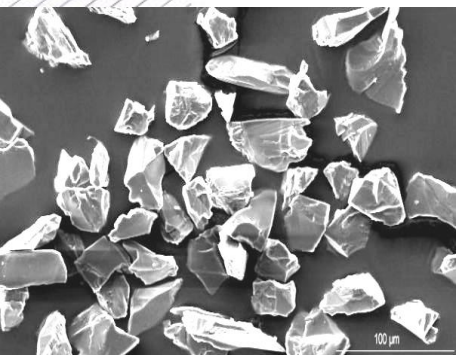
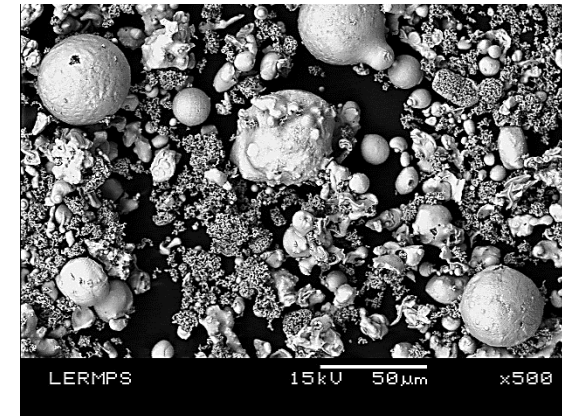
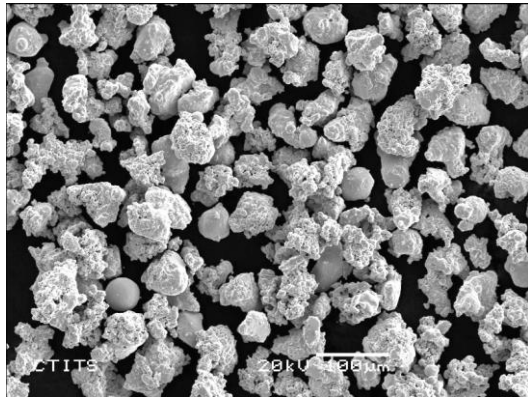
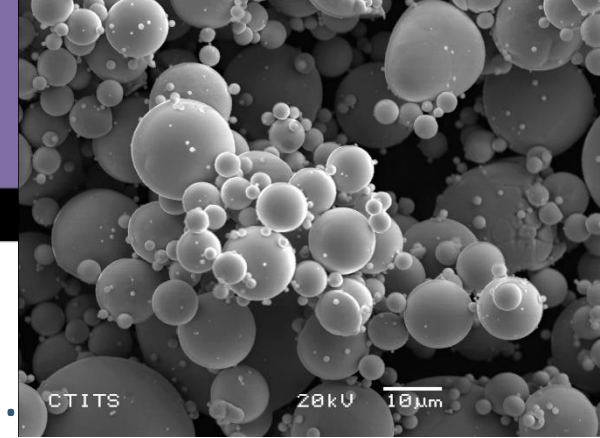


► Un procédé adapté à la nature du matériau.



► Un procédé adapté à la nature du matériau.

- Céramiques : broyage, agglomération séchage, fusion broyage.
- Plastiques : polycondensation, pulvérisation, broyage.
- Métalliques : broyage, réduction chimique, électrolyse, **atomisation eau/gaz.**



► Un phénomène Physique

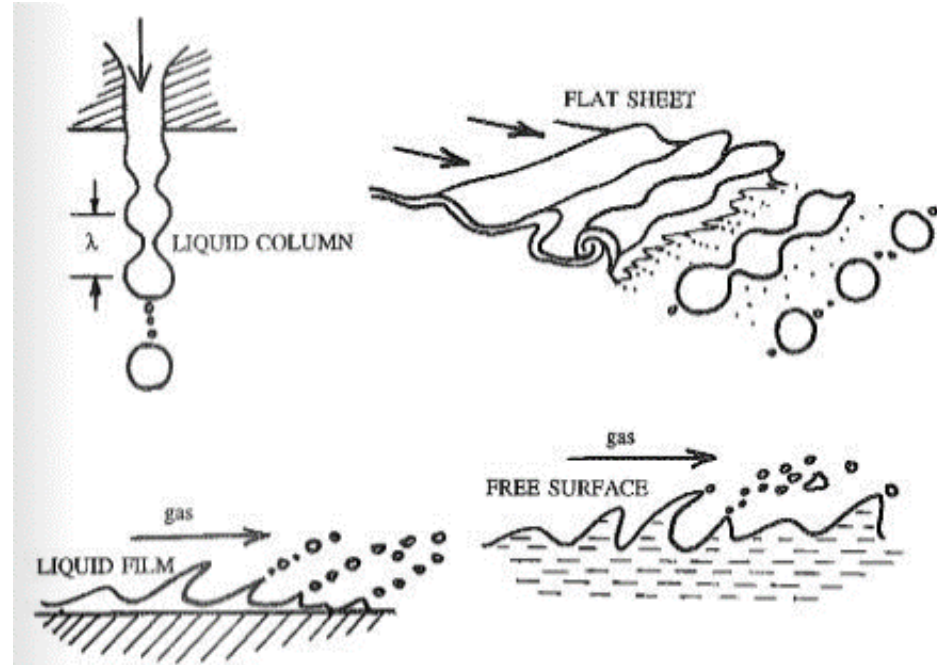
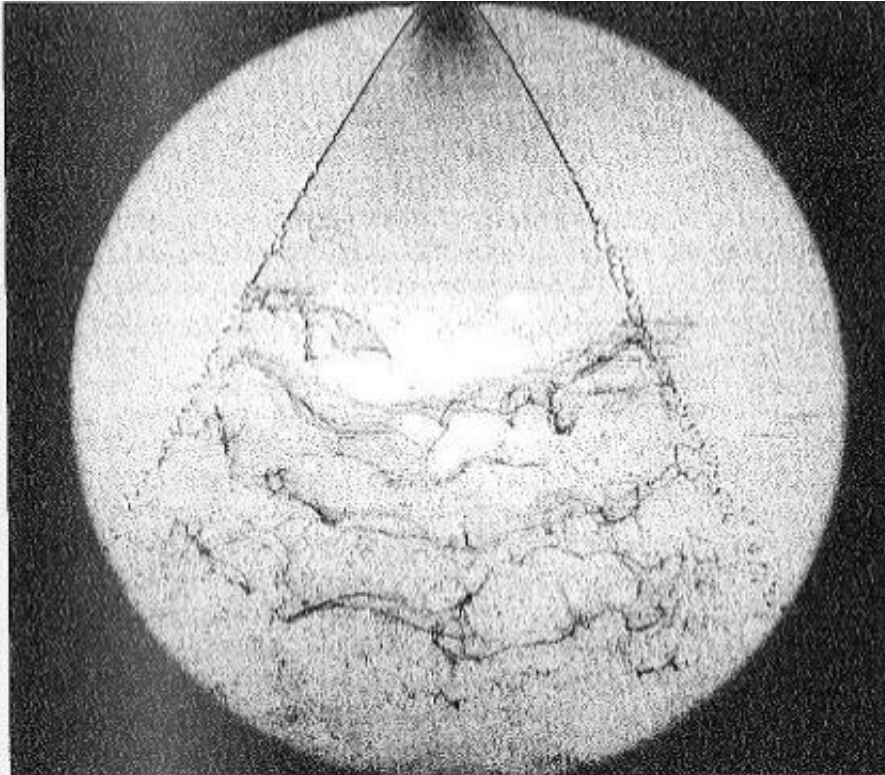
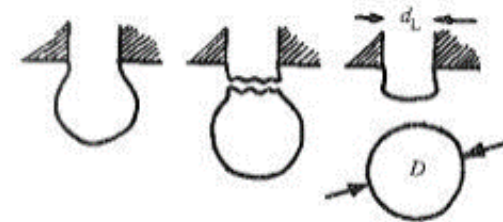
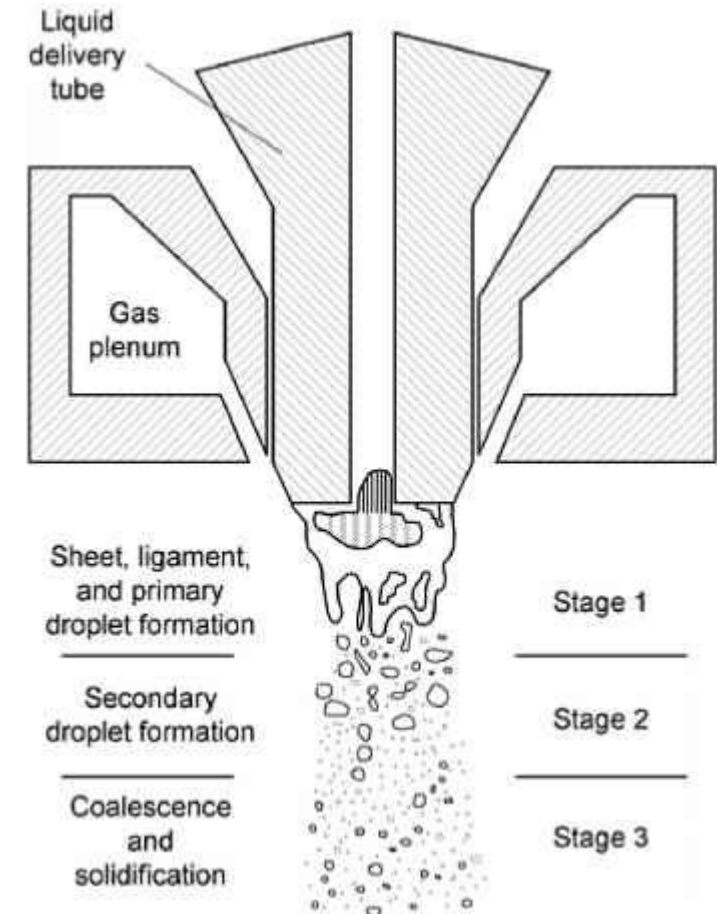
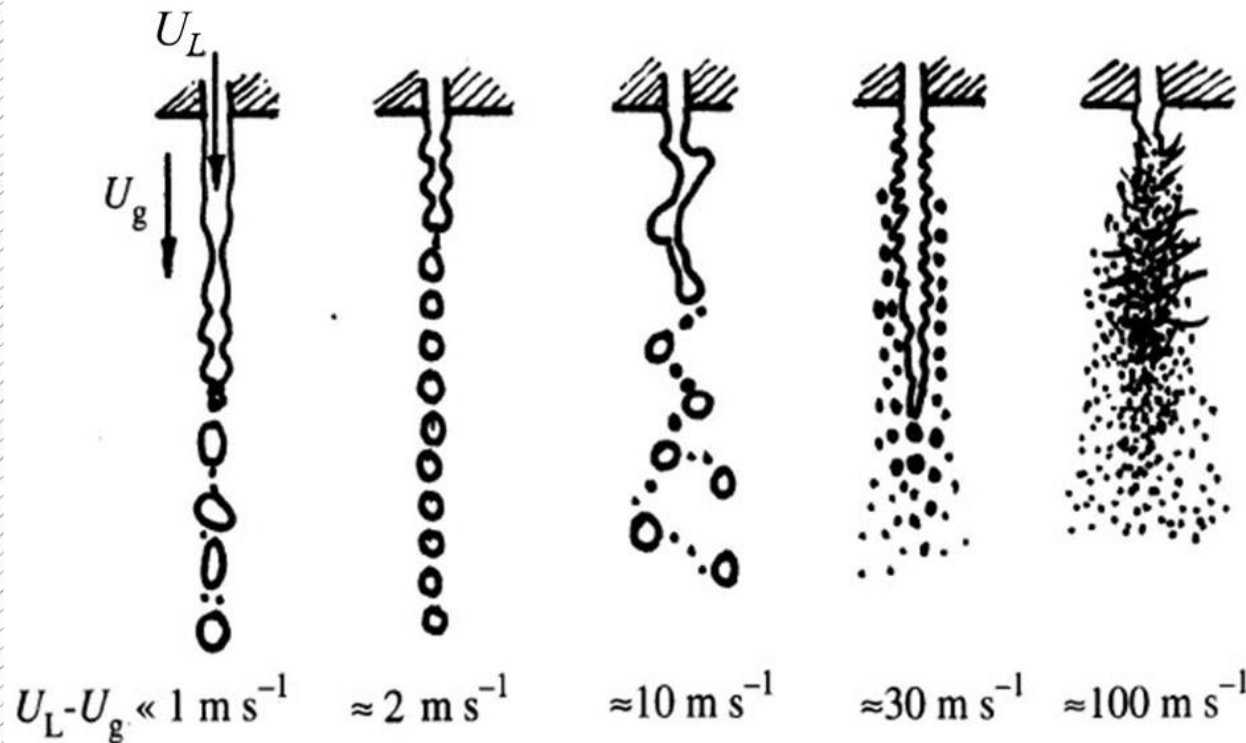


Fig. 2.8 Fundamental atomization modes.



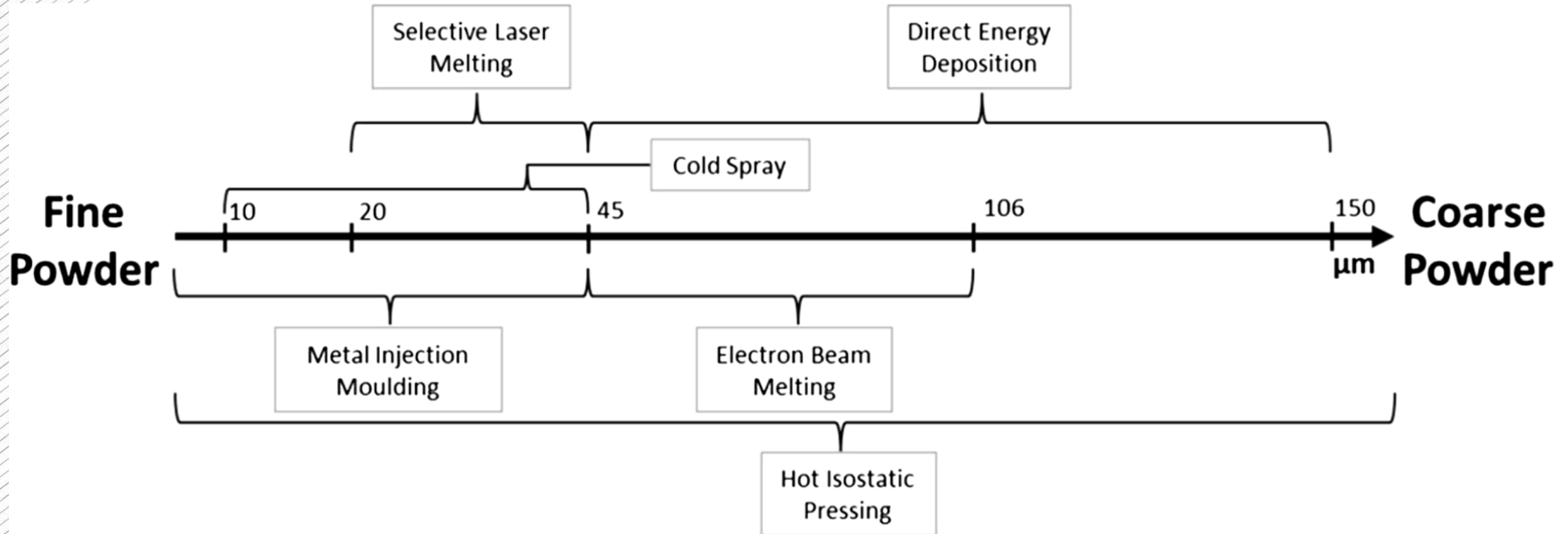
► Un phénomène Physique dépendant de la vitesse du fluide.



Les poudres pour les procédés de métallurgies des poudres

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Quelle taille utilisée ?



Les poudres pour les procédés de métallurgies des poudres

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

Typical criteria	Thermal Spray	Direct Metal Deposition	SLM/EBM*	MIM	HIP
Size	+	=	=	-	+
	<150 µm	From 45 up to 125 µm	0 to 63 µm (SLM) 45 to 106 µm (EBM)	< 25µm	< 500 µm
PSD	-	=	-	-	-
	5-45 µm 20-53 µm 10-90 µm 45-90 µm 45-150 µm	45-90 µm 45-106 µm 45-125 µm	0-15 µm 10-45 /53/63 µm 15-53 µm 45-90 µm* 45-106 µm*	< 10 µm < 15 µm < 25 µm	25-150 µm 45-150 µm 0-500 µm
Morphology	=	=	-	=	-
	Spherical	Spherical	Spherical		Spherical
Powder Density	+	+	-	=	=
Flowability	-	-	=	+	-
Porosity	=	-	=	-	=
Moisture	=	=	-	-	=

« Poudres métalliques pour la fabrication additive » Aubert&Duval
J. Lecadet Décembre 2016

➤ Les poudres pourquoi ?

- Définition.
- Echelle.

➤ Les procédés disponibles.

- Principes
- Caractéristiques.

➤ Résultats :

- Composition.
- Granulométrie.

➤ Un peu de sécurité.

➤ Conclusions.

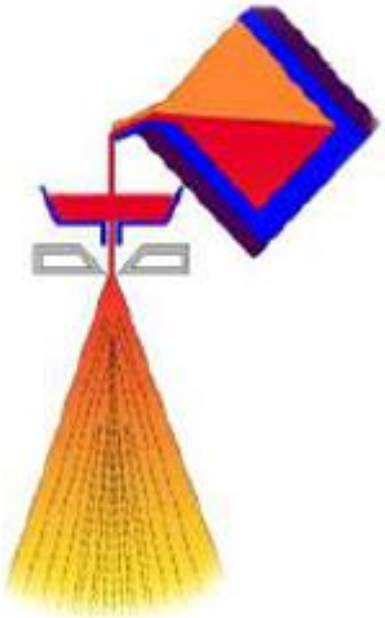
➤ UTBM.

➤ ICB-CO2M.

Les poudres en fabrication additive

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

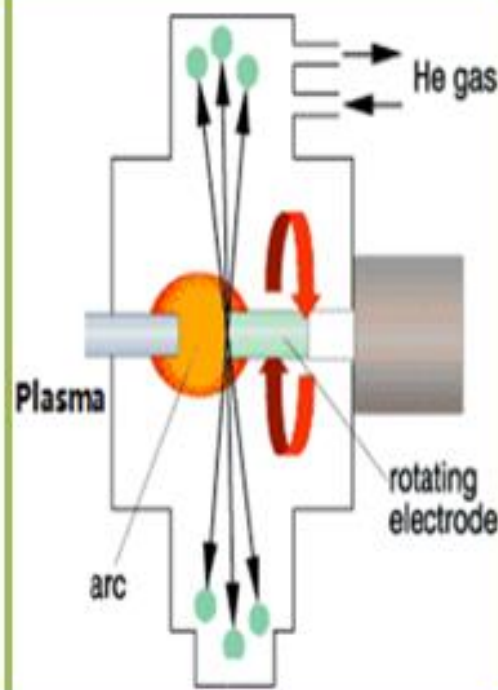
► Les principaux procédés.



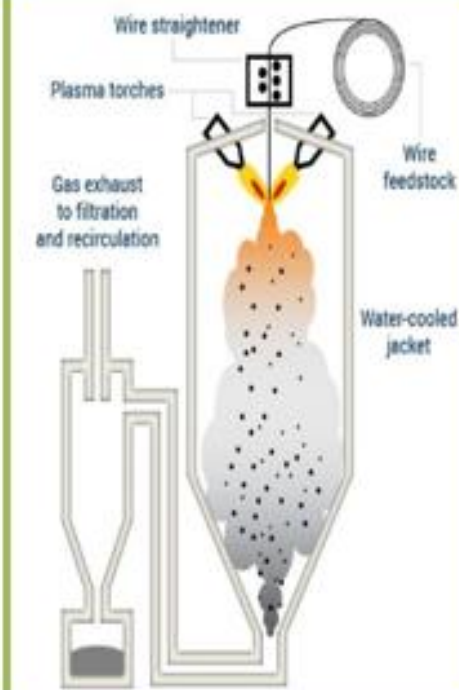
Free-Fall



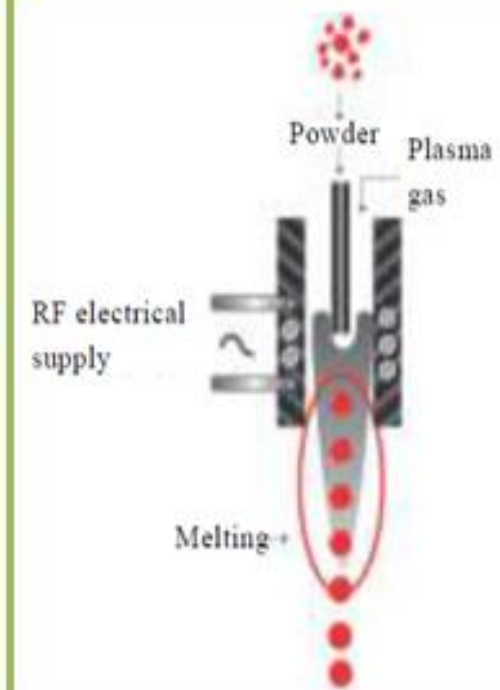
EIGA



PREP



Plasma



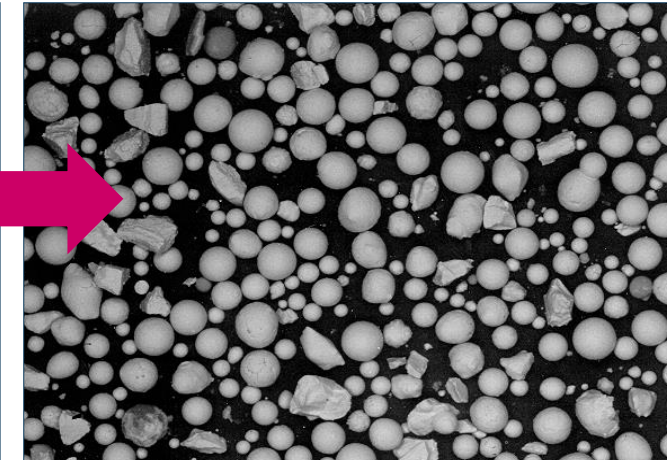
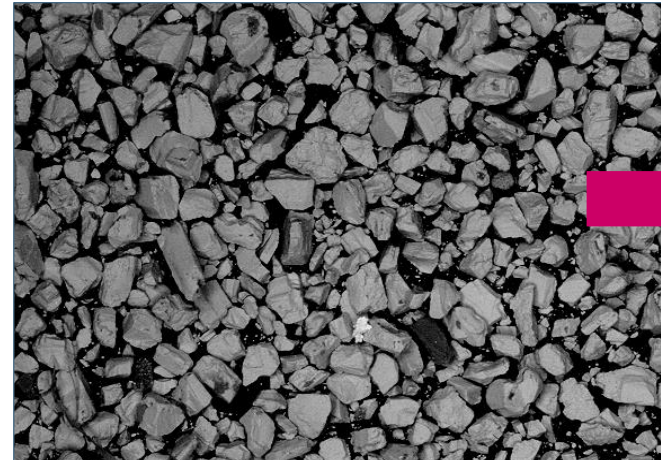
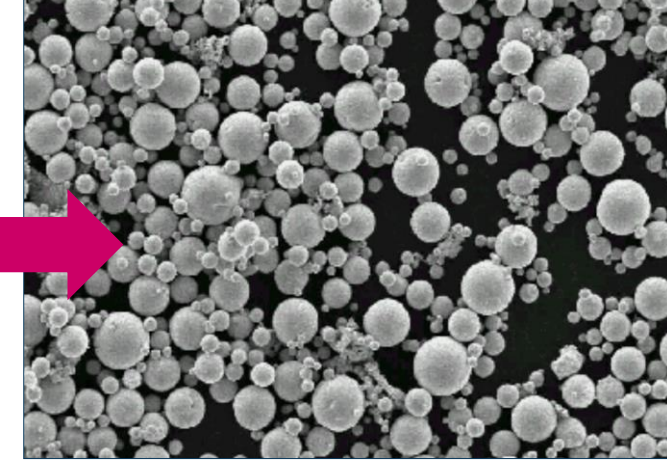
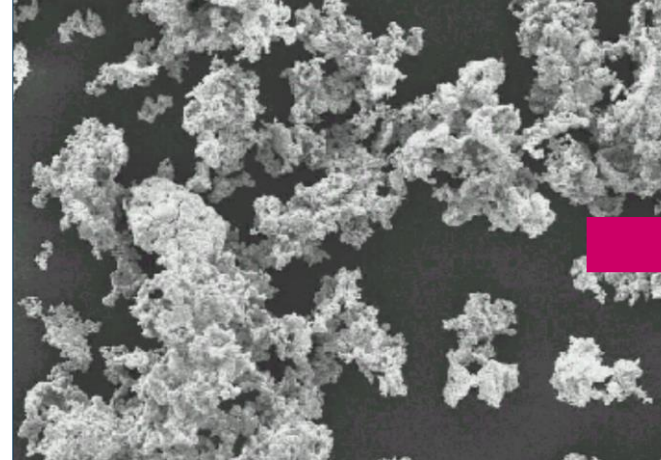
Sphéroïdisation

Les poudres pour les procédés de métallurgies des poudres

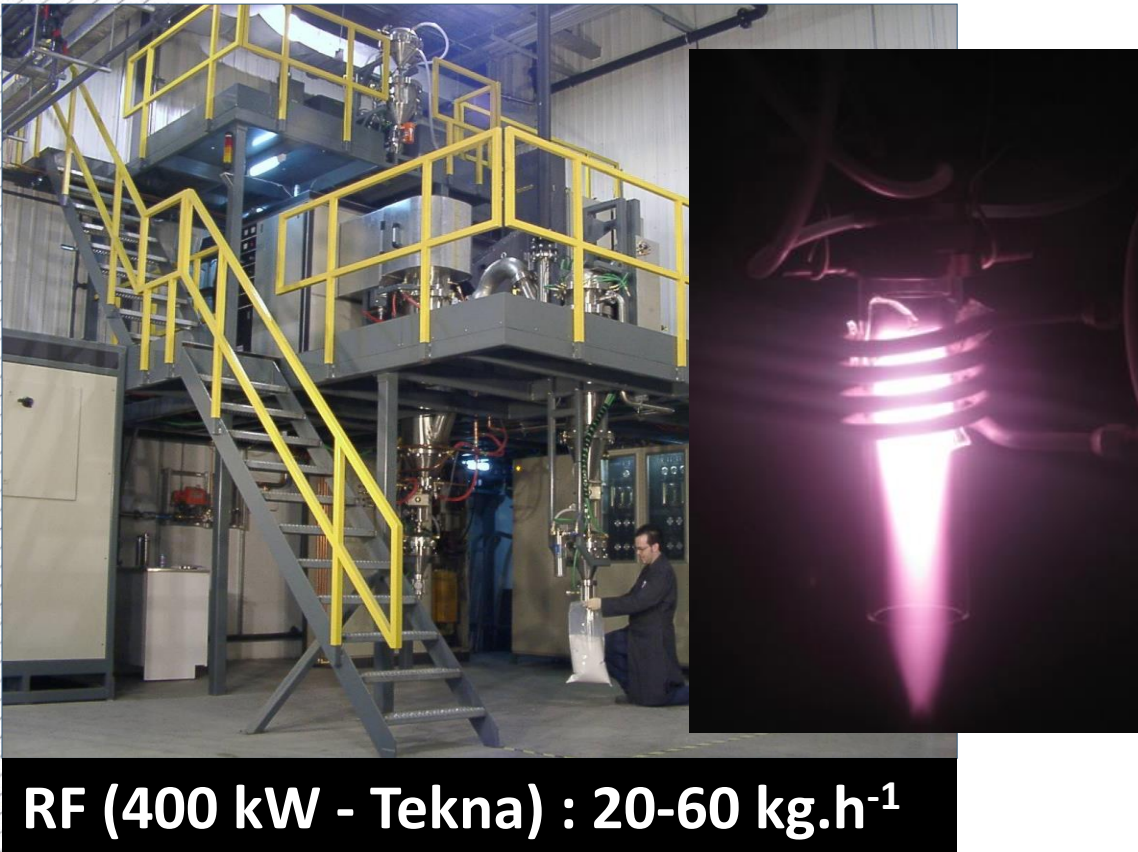
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Le procédé de sphéroïdisation

Rhénium : $T_f = 3180^\circ\text{C}$



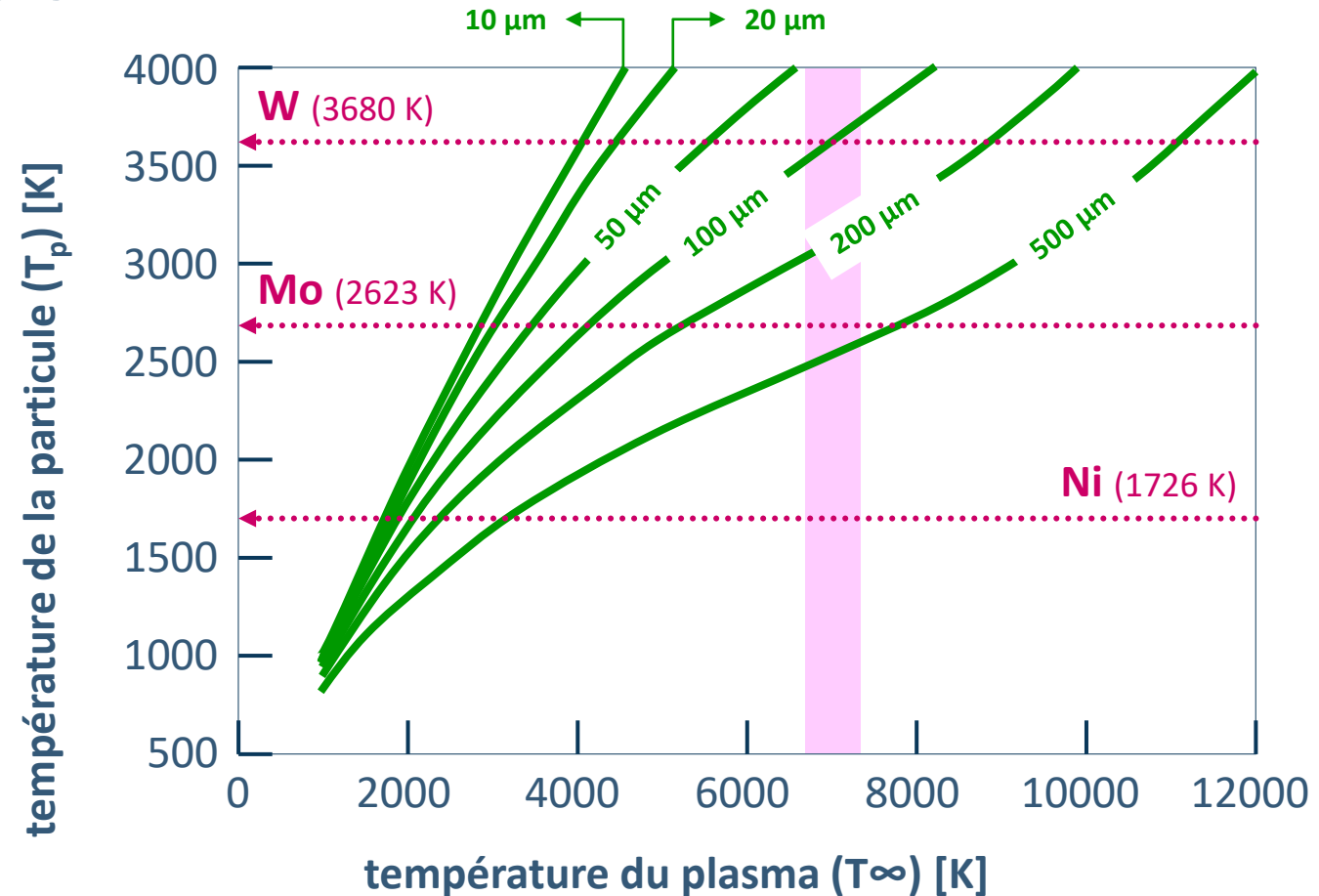
Zircône : $T_f = 2700^\circ\text{C}$



RF (400 kW - Tekna) : 20-60 kg.h⁻¹

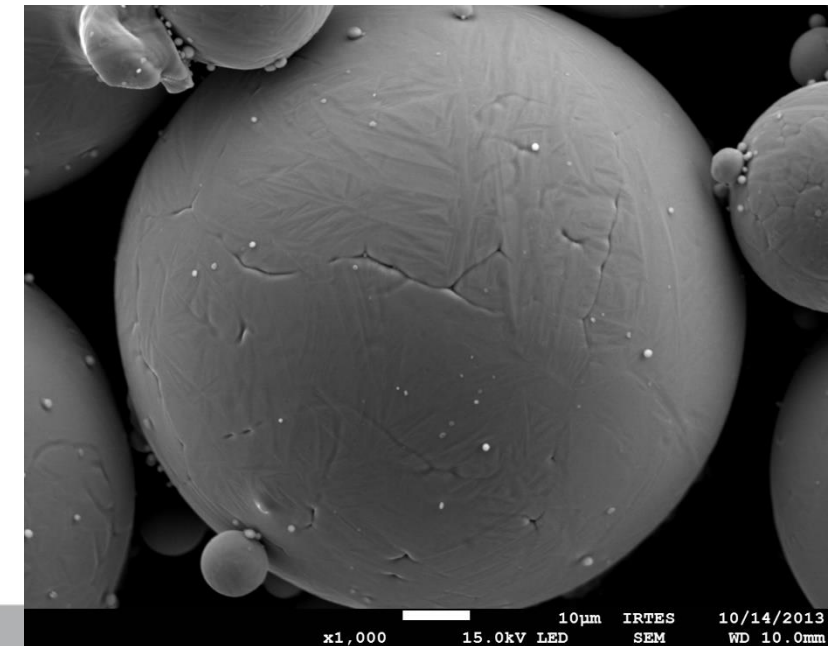
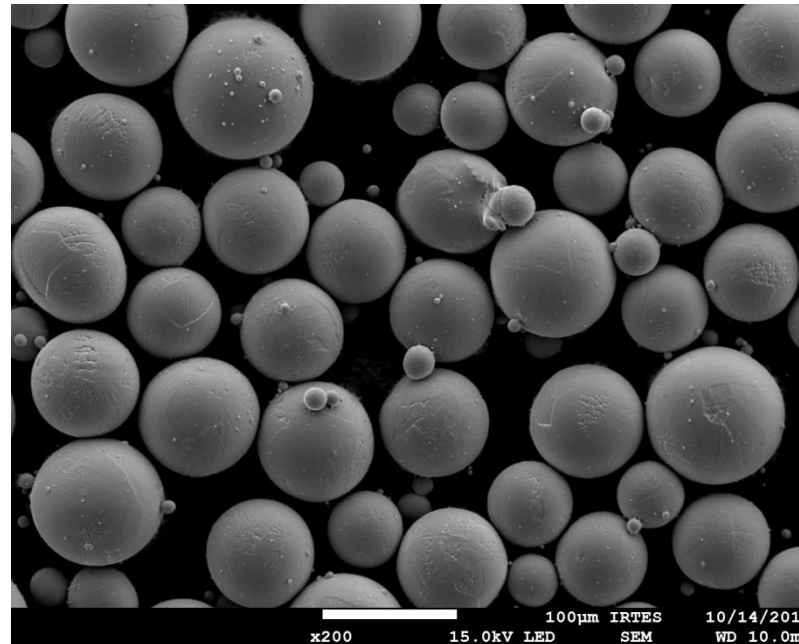
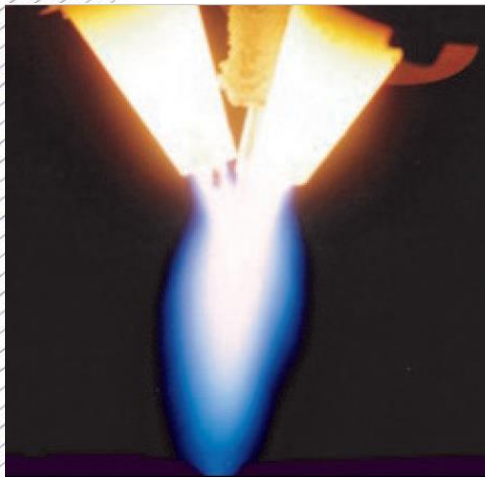
► Le procédé de sphéroïdisation

- Rayonnement des particules négligeable.
- Pour les matériaux réfractaires.
- Temps de séjour à adapter.
- Poudre au départ.



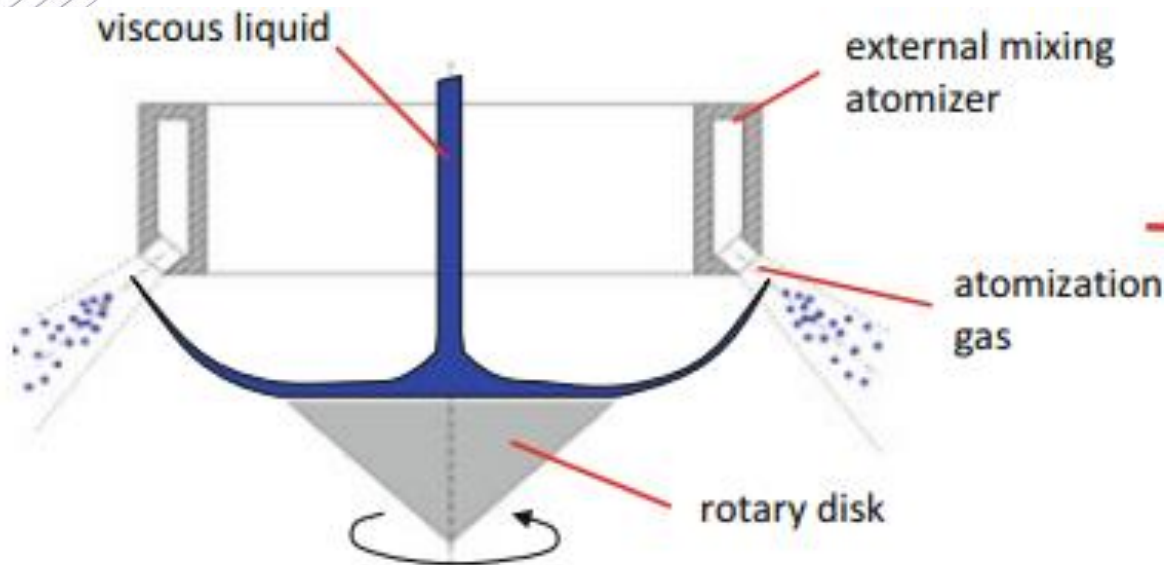
► Atomisation par plasma

- Poudre parfaitement sphérique avec $\approx 100\%$ sans satellite
- Fil au départ : calibre
- Pureté.
- Maîtrise de la taille.
- Pas de porosité



► Centrifugation à disque : « PREP »

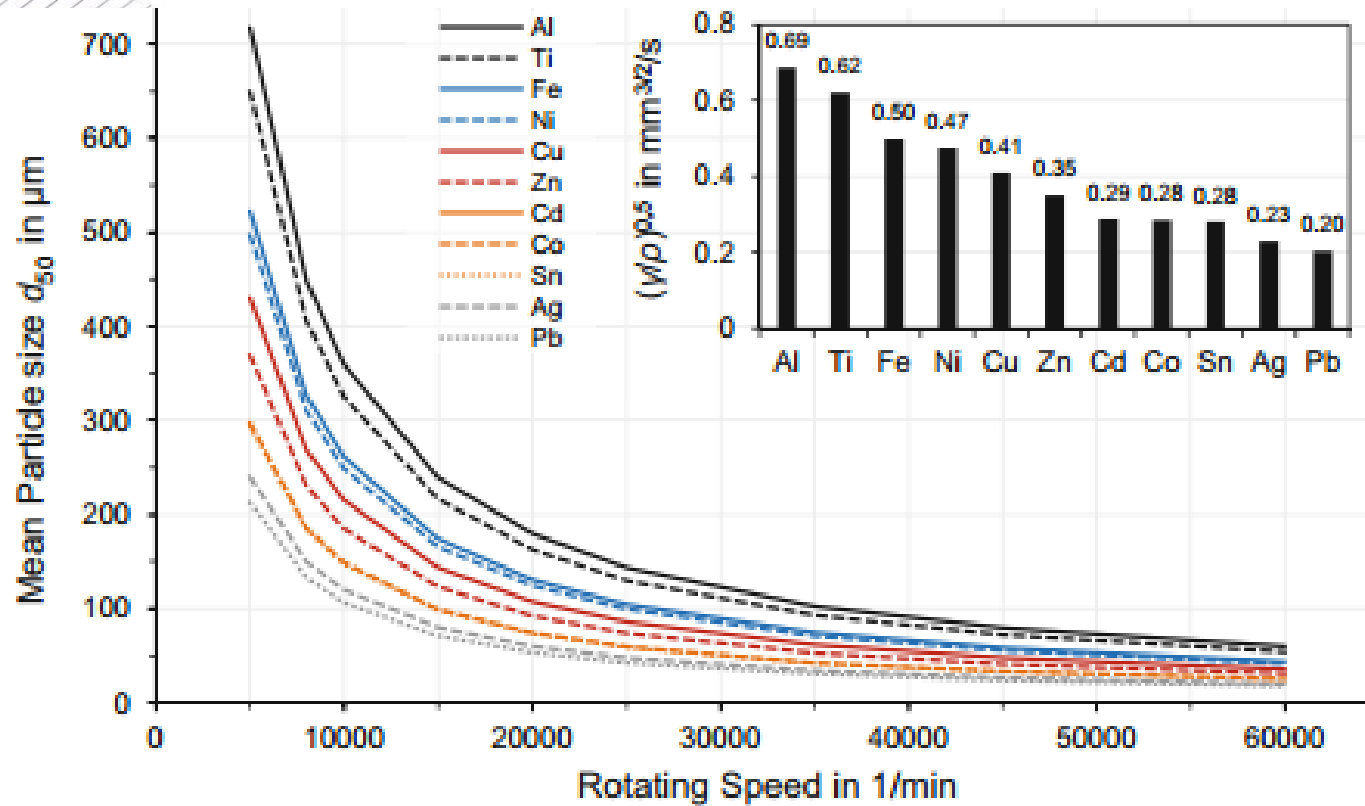
- Poudre parfaitement sphérique avec 98% sans satellite.
- Taux d'oxygène <100ppm.
- Granulométrie resserrée 25-45 μm ou 20-38 μm .



L'atomisation au gaz : les procédés

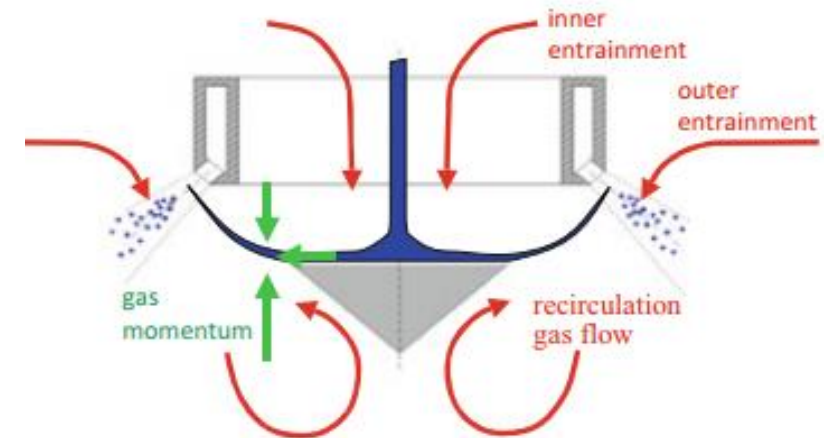
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► La centrifugation



► Paramètres

- Vitesse de rotation: 5 à 100 000 $\text{tr}.\text{min}^{-1}$
- Diamètre du disque: 5 à 30 mm
- Granulométrie D_{50} : 50 à 250 μm
- Débit matière: 5 à 18 $\text{kg}.\text{min}^{-1}$
- Débit de matière inférieur à 50 $\text{kg}.\text{min}^{-1}$, possibilité de multiplier le nombre de réacteurs.

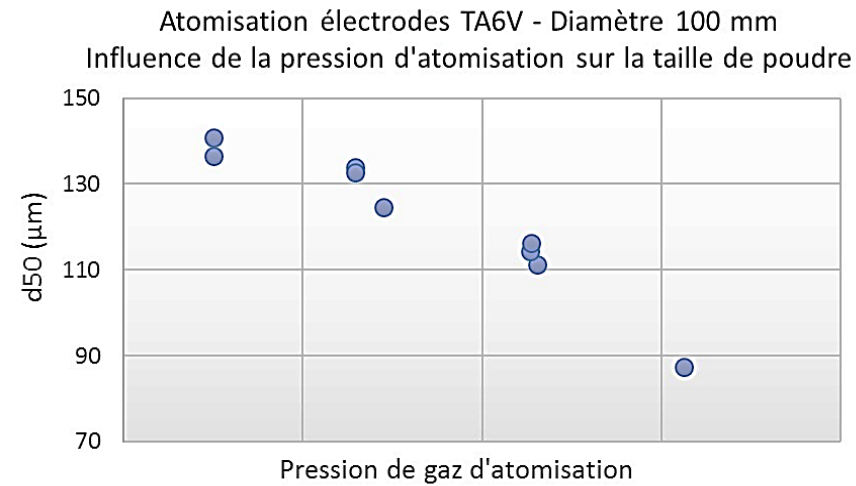
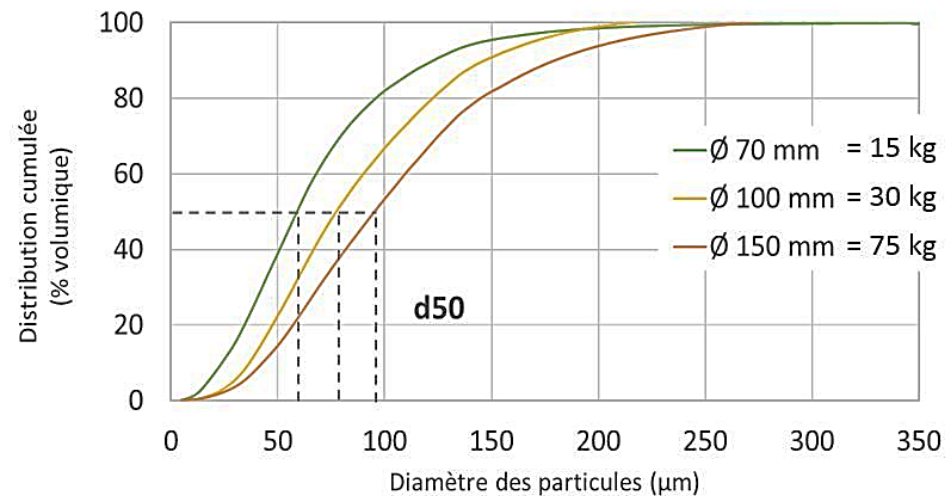
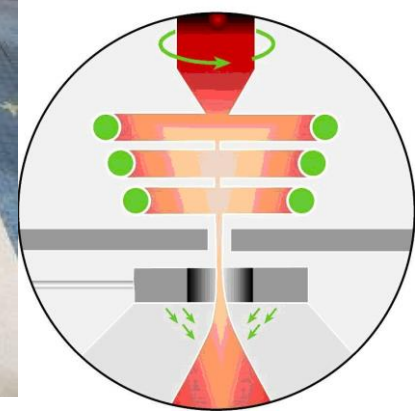


L'atomisation au gaz : les procédés

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

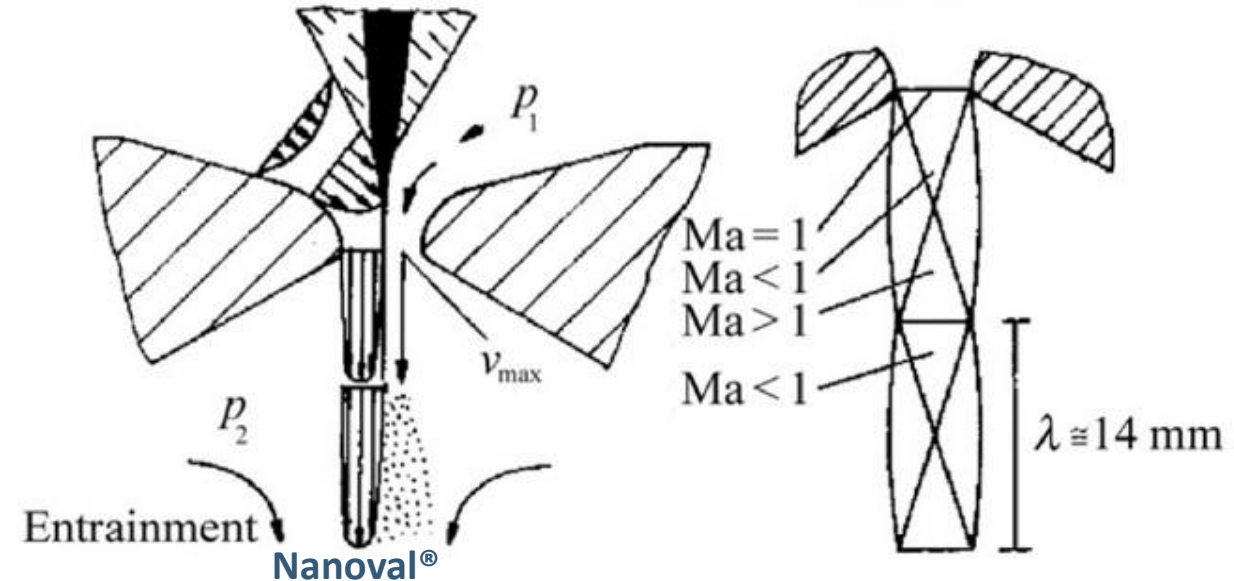
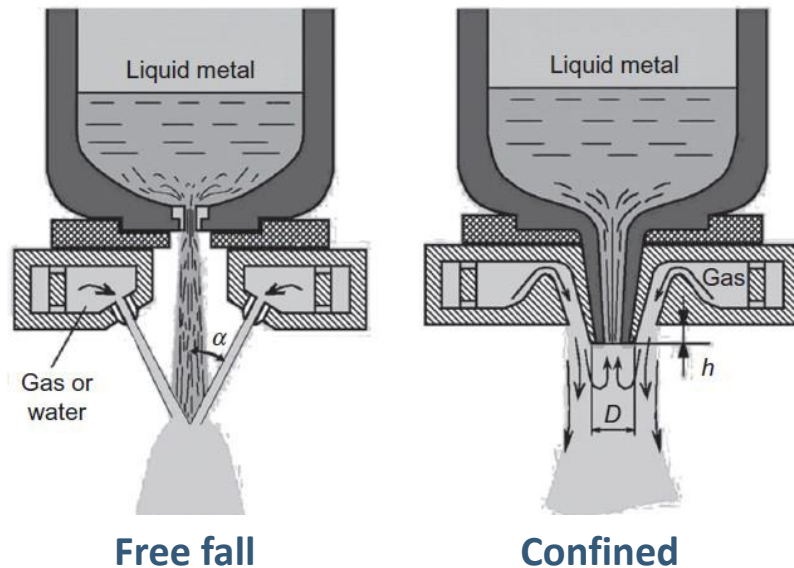
▶ Avec une électrode : « EIGA »

- Electrode à la « bonne » composition
- Pas de ségrégation dans la matière
- Poudre $D_{50} > 40 \mu\text{m}$
- Atomisation semi-continue



► Avec un creuset : « mode Free-Fall »

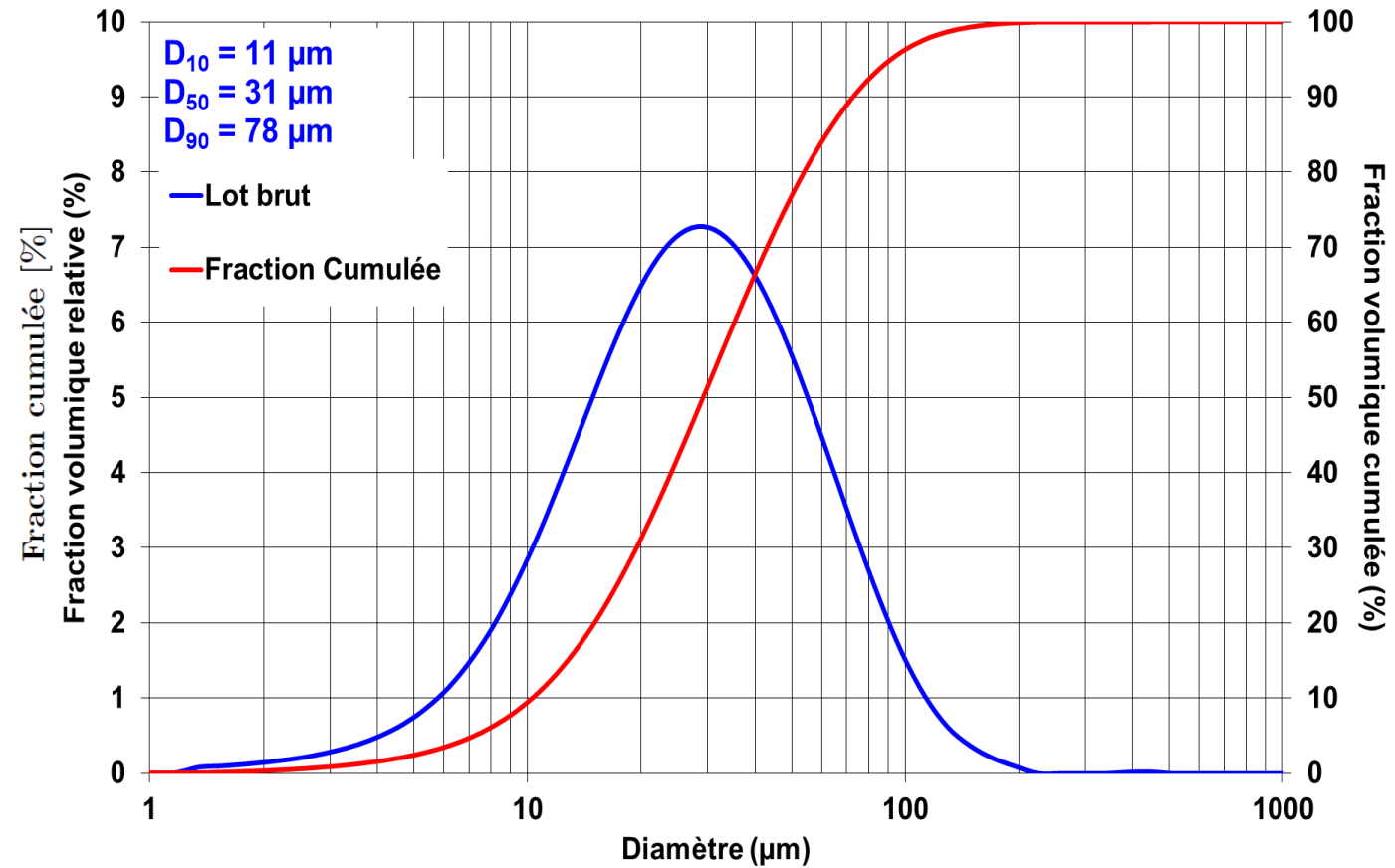
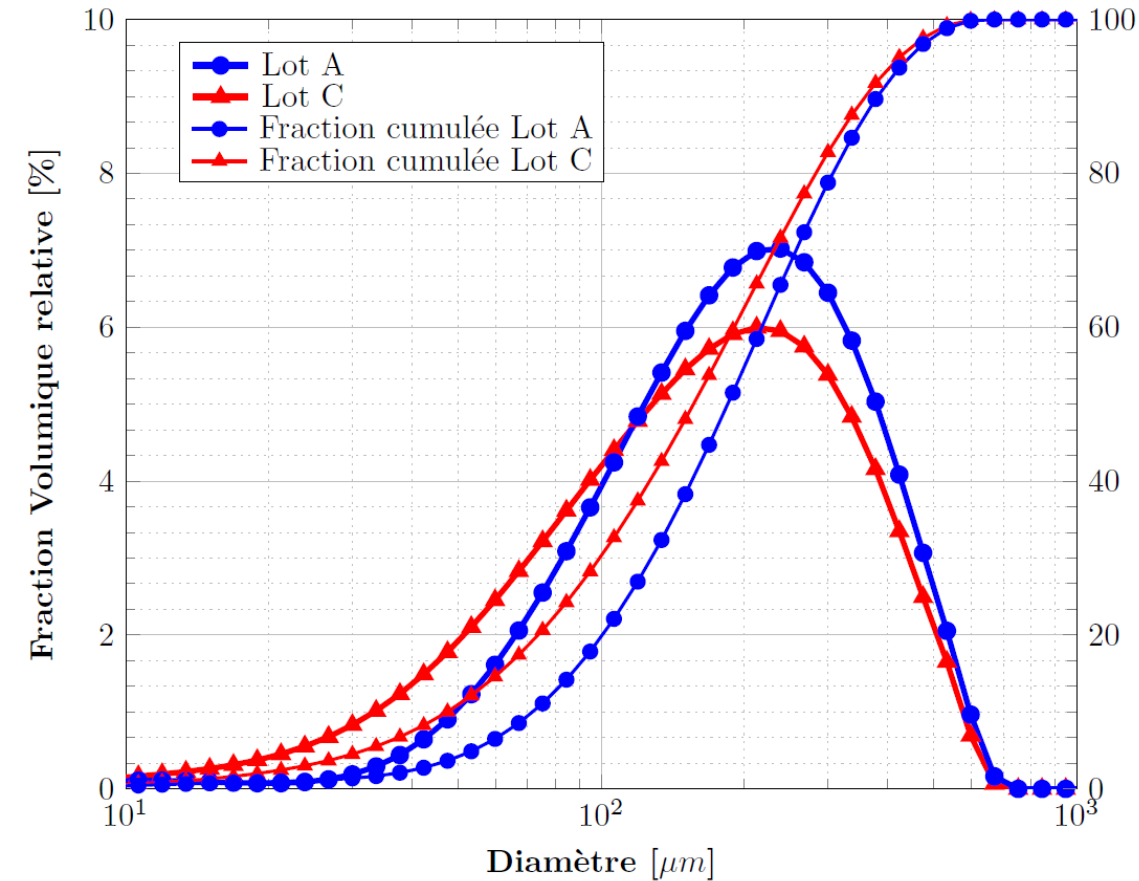
- Alimentation avec un creuset.
- Poudre : qqes $\mu\text{m} > D_{50} > 500 \mu\text{m}$.
- Atomisation semi-continue ou continue.
- Différentes configurations de buses d'atomisation



L'atomisation au gaz : les procédés

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

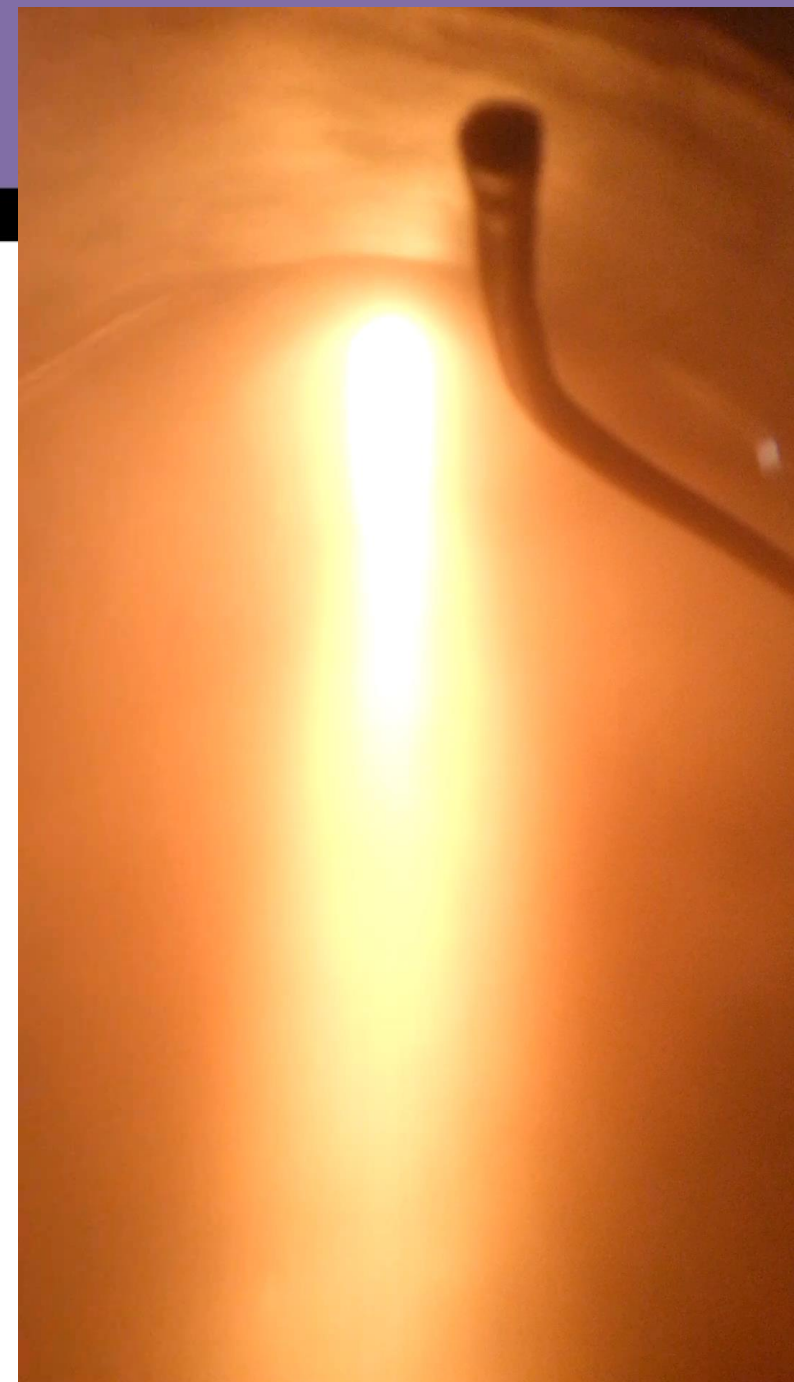
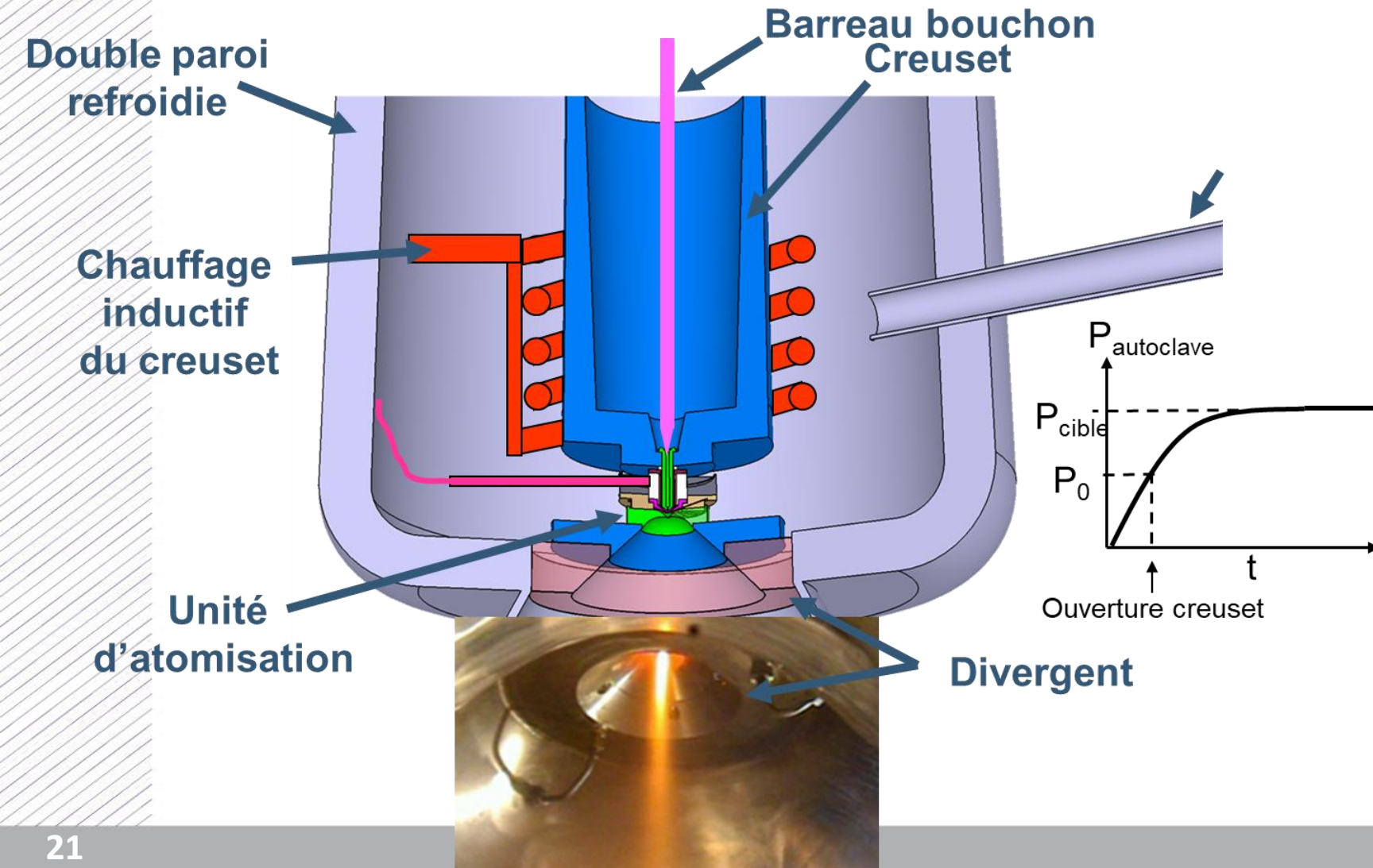
▶ Avec un creuset : « Free-Fall »



L'atomisation au gaz : les procédés

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

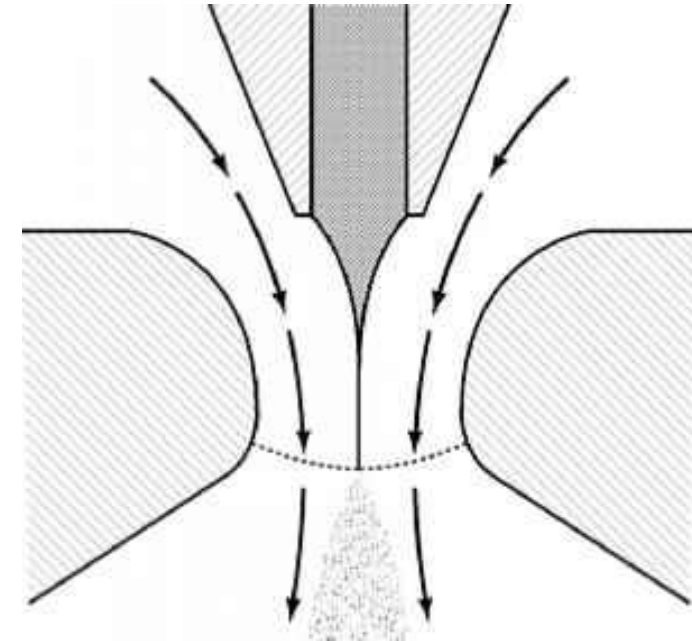
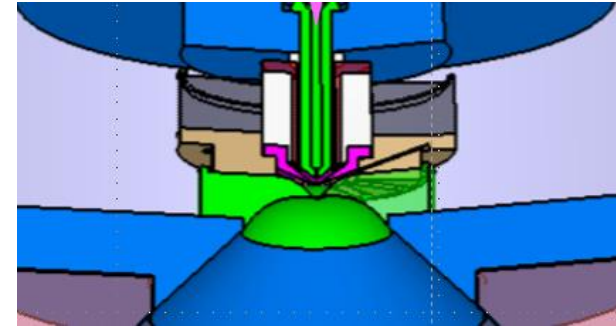
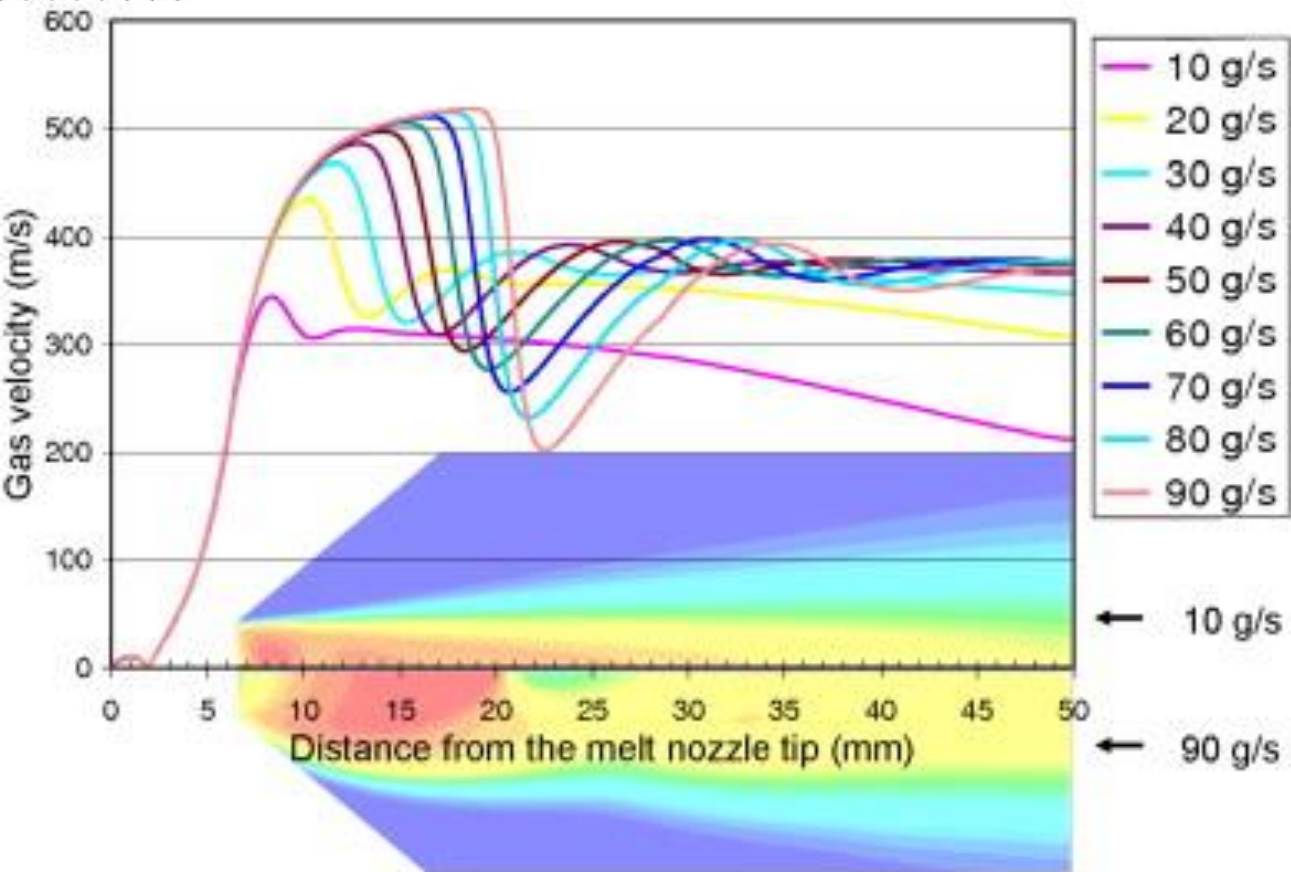
► Avec un creuset : « Free-Fall de type Nanoval® »



L'atomisation au gaz : les procédés

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Avec un creuset : « Free-Fall de type Nanoval® »



► Les poudres pourquoi ?

- Définition.
- Echelle.

► Les procédés disponibles.

- Principes
- Caractéristiques.

► Résultats :

- Composition.
- Granulométrie.

► Un peu de sécurité.

► Conclusions.

► UTBM.

► ICB-CO2M.

Suivi en fonction des étapes.

Elément en % massique	12-05051, lot 12100301PAI316L	REFERENCE Norme NF EN 10088-1
Al	<0.01	-
Co	0.18 ± 0.04	-
Cr	16.50 ± 0.50	16.5-18.5
Cu	0.57 ± 0.02	-
Fe	Base	-
Mg	<0.01	-
Mn	1.34 ± 0.04	≤2.00
Mo	2.11 ± 0.06	2.00-2.50
Nb	<0.01	-
Ni	10.54 ± 0.31	10.0-13.0
P	0.035 ± 0.020	0.045 max
Si	0.23 ± 0.01	≤1.00
Ti	<0.01	-
V	0.10 ± 0.02	-
W	0.07 ± 0.01	-
C	0.023 ± 0.002	≤0.03
S	0.023 ± 0.002	≤0.015 ou 0,030 en fn de l'application
N	0.047 ± 0.005	-
O	0.088 ± 0.002	≤0.11

Elément en % massique	CoCrMo matière première coulée N° 13753, lot G635/15	Poudre lot N° 12091201PCoCr	Composition requis
Al	<0,010	<0,010	-
Co	Solde	Solde	Solde
Cr	28.3 ± 0,9	28.6 ± 0,9	28-30
Fe	<0,10	<0,10	<0,5
La	<0,010	<0,010	-
Mn	0,45 ± 0,01	0,44 ± 0,01	<1
Mo	5,55 ± 0,17	5,68 ± 0,17	5-6
Nb	<0,020 ± 0,002	<0,010 ± 0,001	-
P	<0,010 ± 0,001	<0,020 ± 0,002	<0,1
Ni	<0,05	<0,05	<0,1
Si	0,77 ± 0,02	0,88 ± 0,02	<1
Ti	<0,010	<0,010	-
V	<0,010	<0,010	-
W	<0,010	<0,010	-
C	0,002 ± 0,001	0,004 ± 0,002	<0,02
S	<0,003 ± 0,001	<0,003 ± 0,001	<0,1

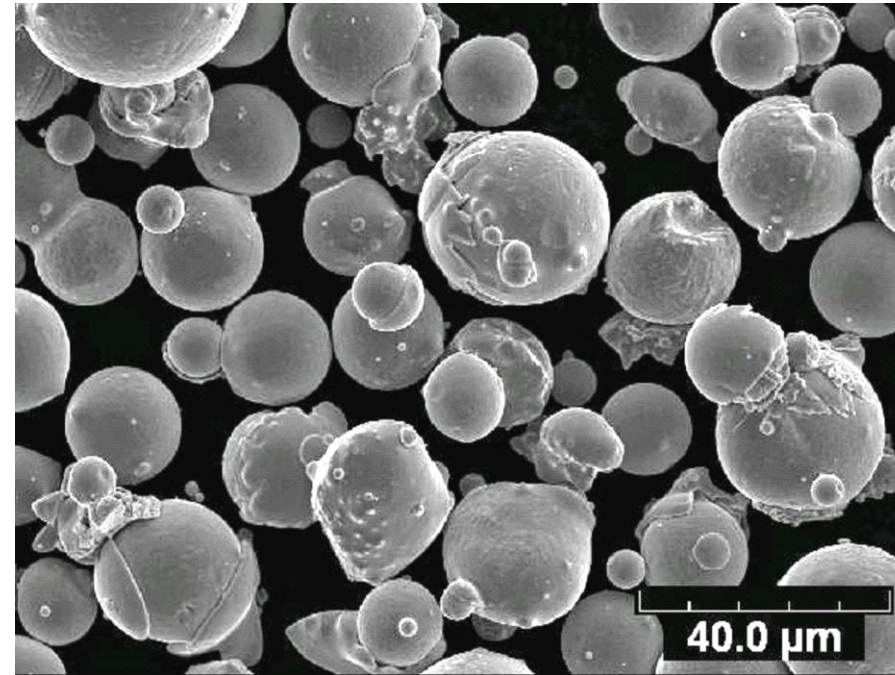
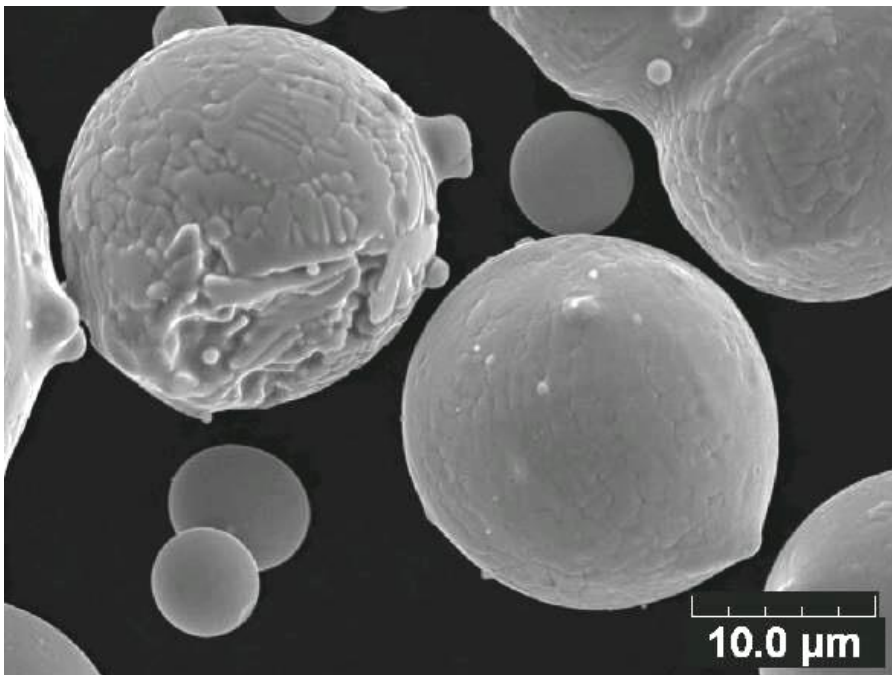
Résultats : composition

Premier exemple

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Son importance après transformation de la poudre.

	Poudre 1	Poudre 2	Technique d'analyse
C (% massique)	0,008	0,65	Combustion
d10 (µm)	17,3	13,6	Granulométrie laser
d50 (µm)	24,2	29,2	
d90 (µm)	48,4	44,1	



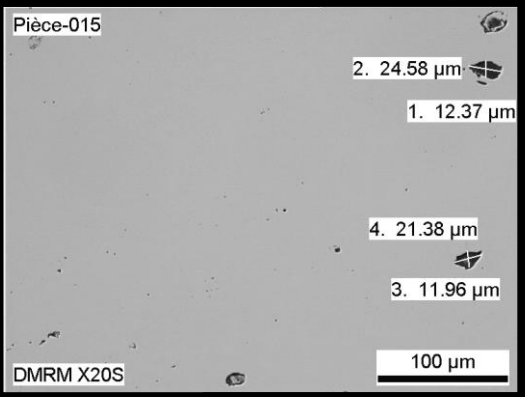
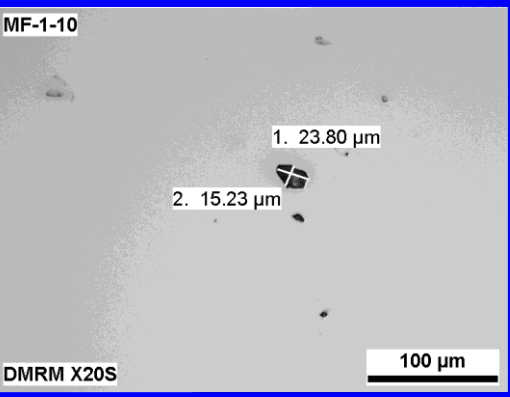
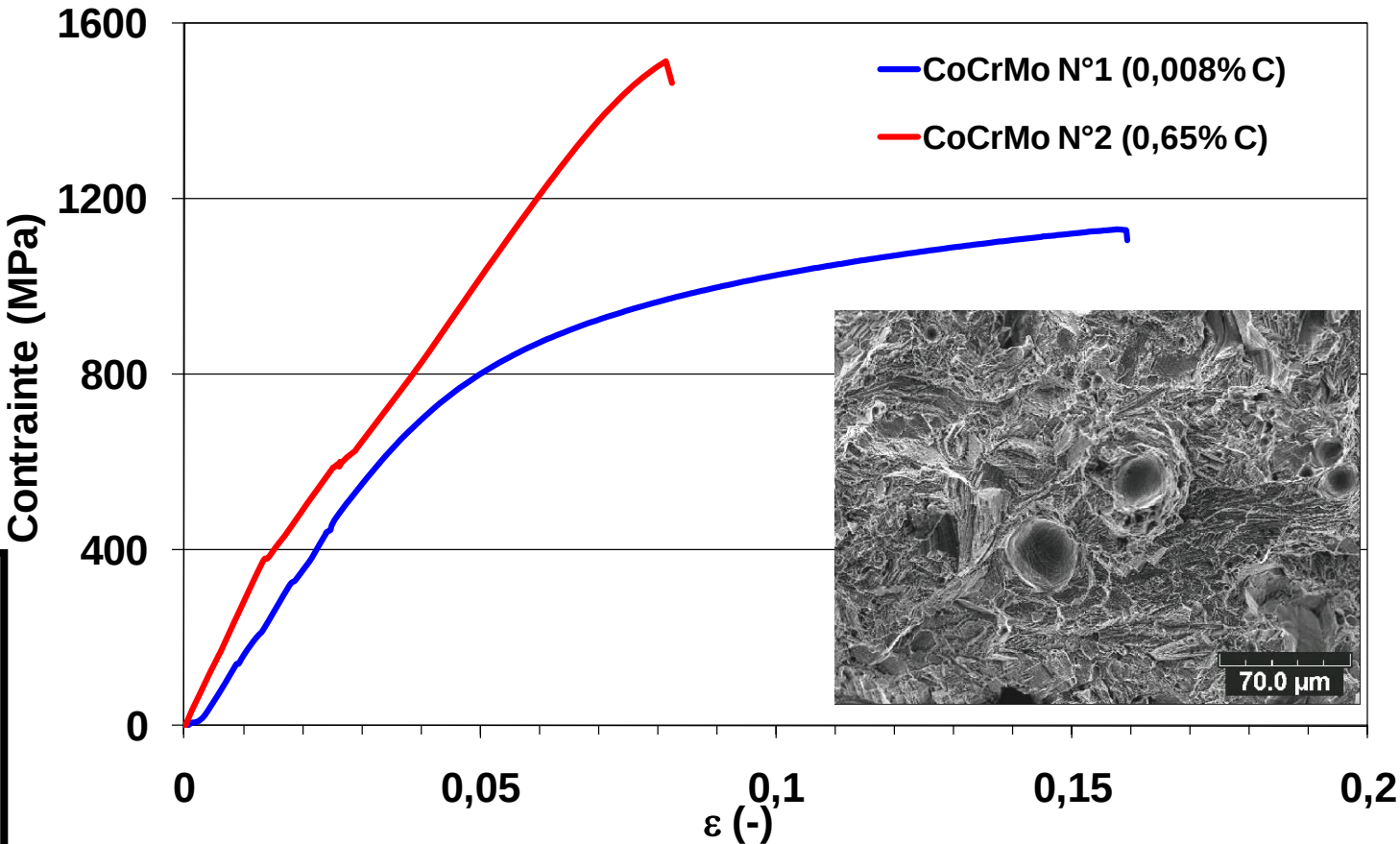
Résultats : composition

Premier exemple

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Son importance après transformation de la poudre.

	CoCrMo 1	CoCrMo 2
C (% massique)	0,008	0,65
Module d'Young (GPa)	221 ± 17	231 ± 3
Résistance maximale (Rm) (MPa)	1151 ± 27	1514 ± 35
Résistance à la rupture (Rr) (MPa)	1137 ± 42	1464 ± 56
Allongement total à la rupture (mm)	4,26 ± 0,32	1,90 ± 0,20
Allongement total à la rupture (%)	17,0 ± 1,3	7,70 ± 0,70



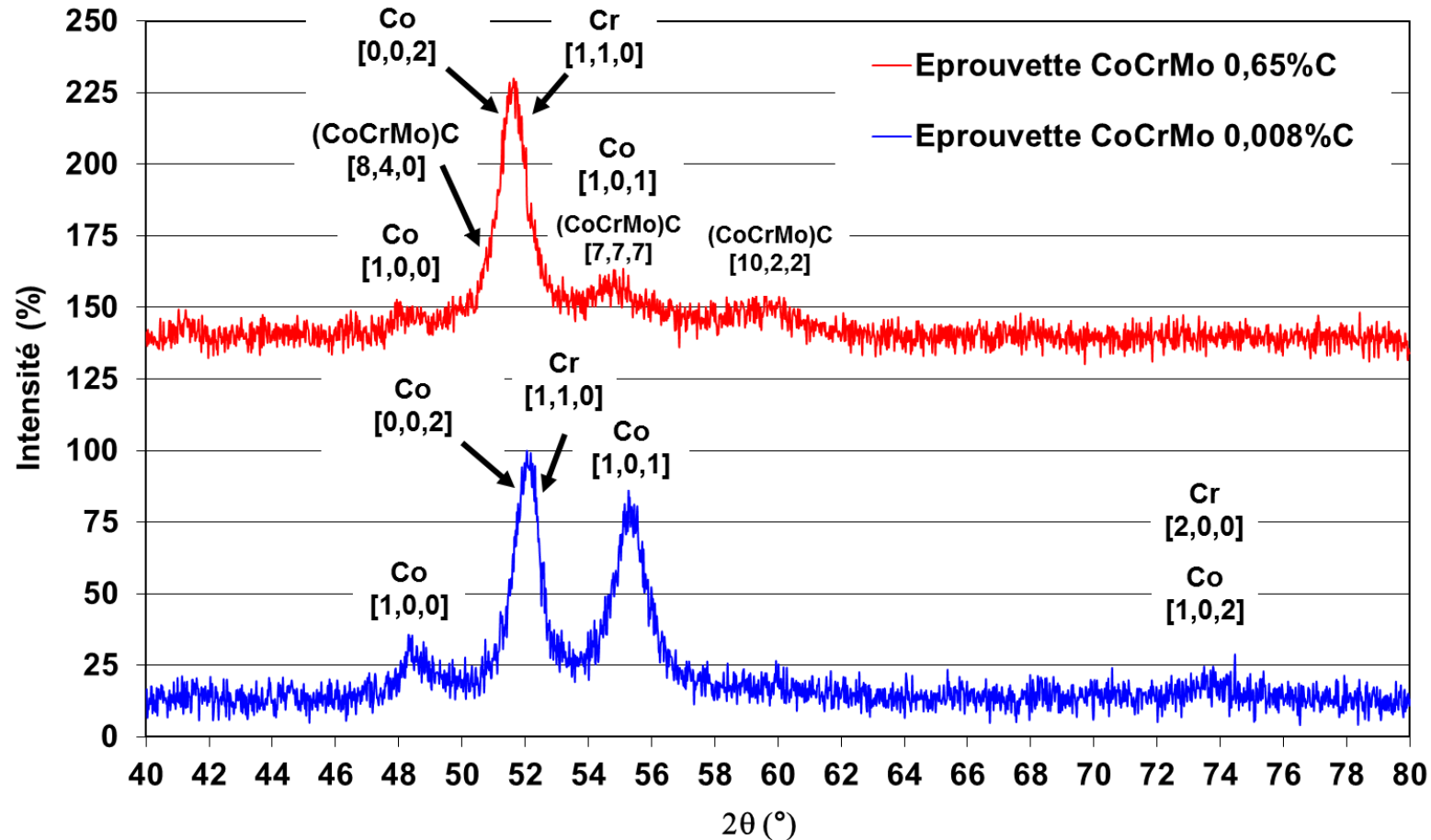
Résultats : composition

Premier exemple

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Existence d'une phase riche en carbone de type $X_{23}C_6$

► $X = (Cr_{0,77}Co_{0,15}Mo_{0,08})_{23}C_6$

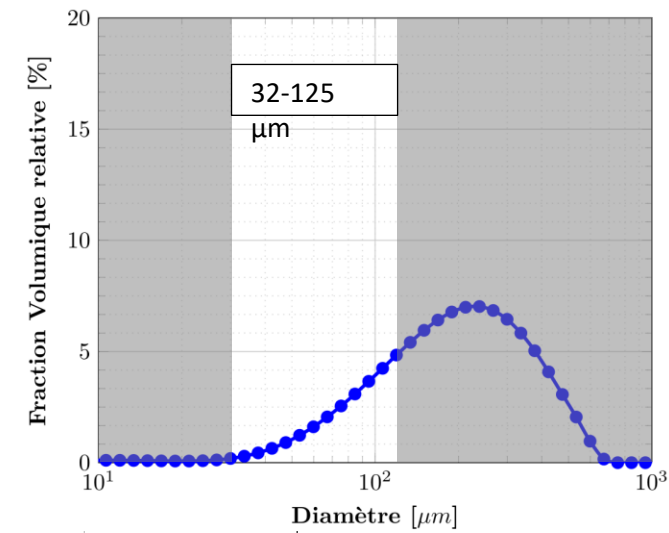
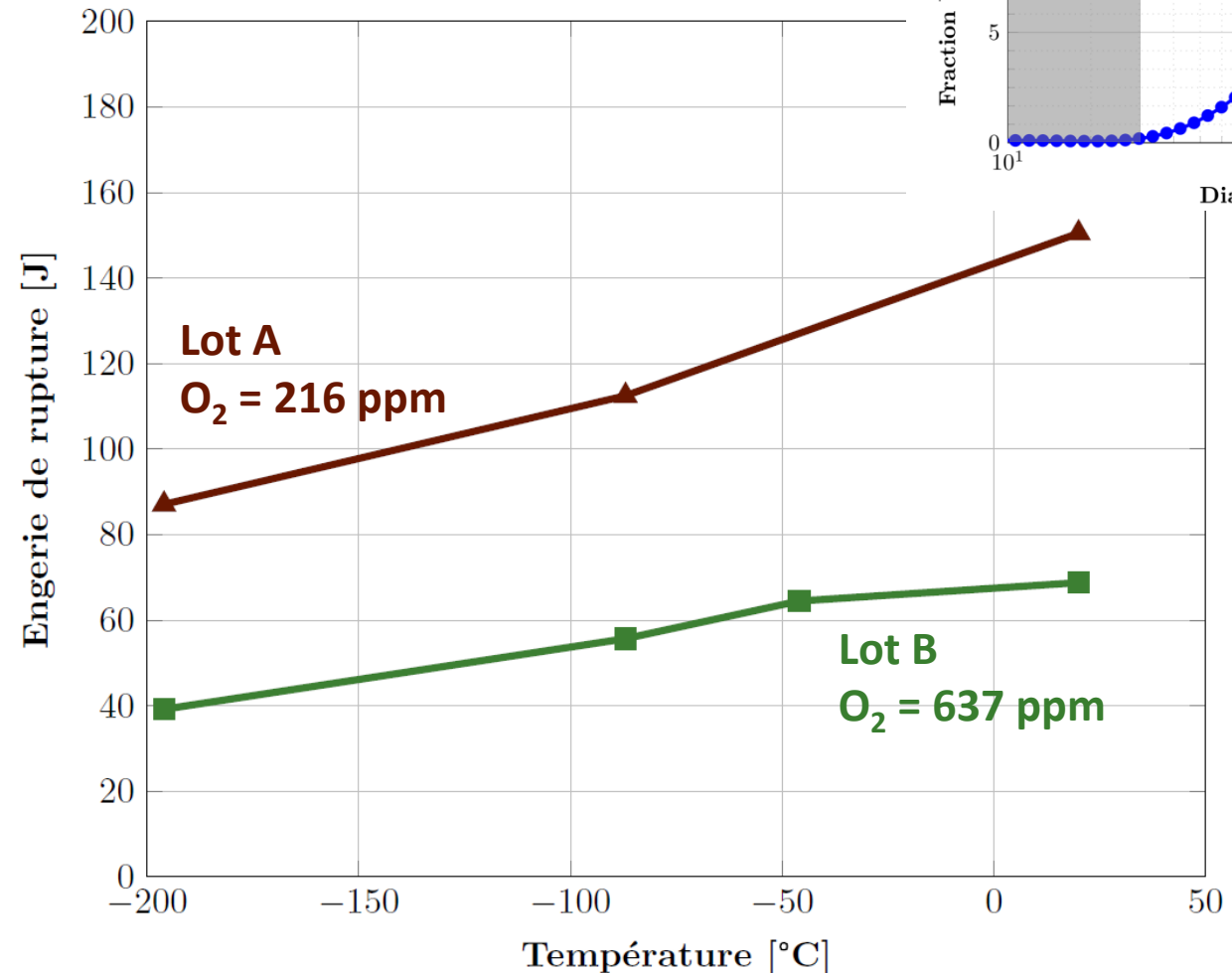
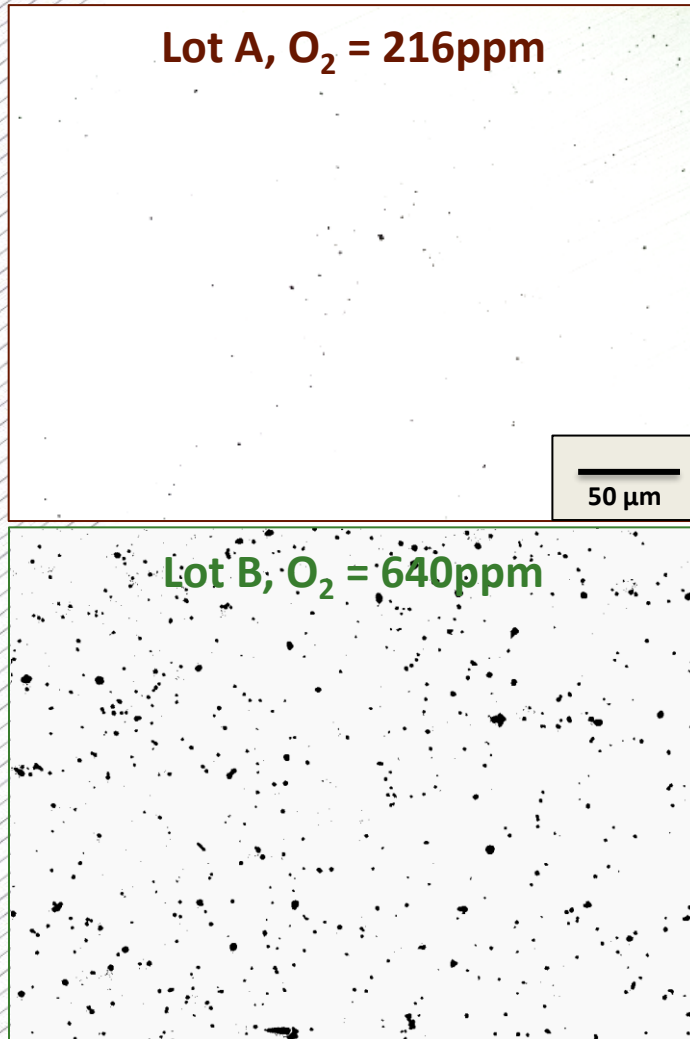


Résultats : composition

Deuxième exemple : O₂

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Poudre 316L : résilience en CIC



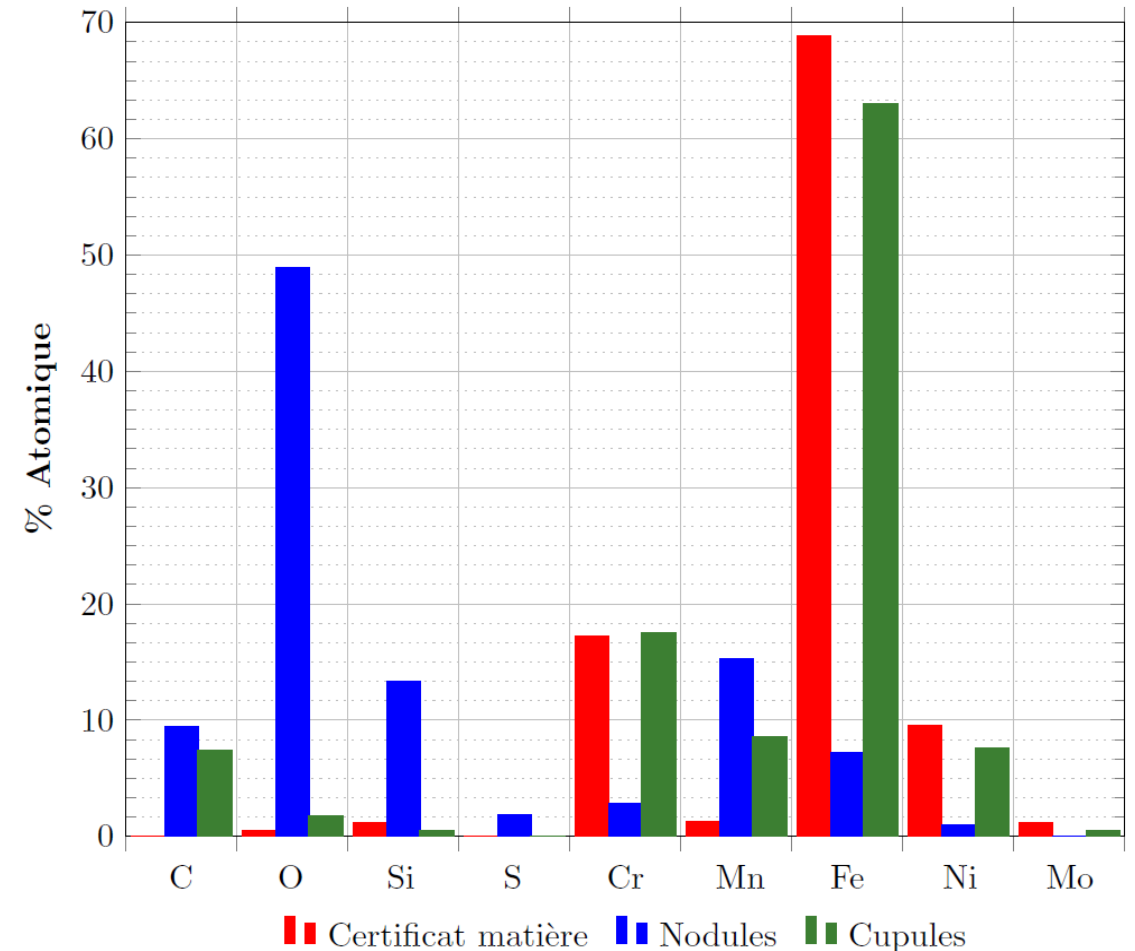
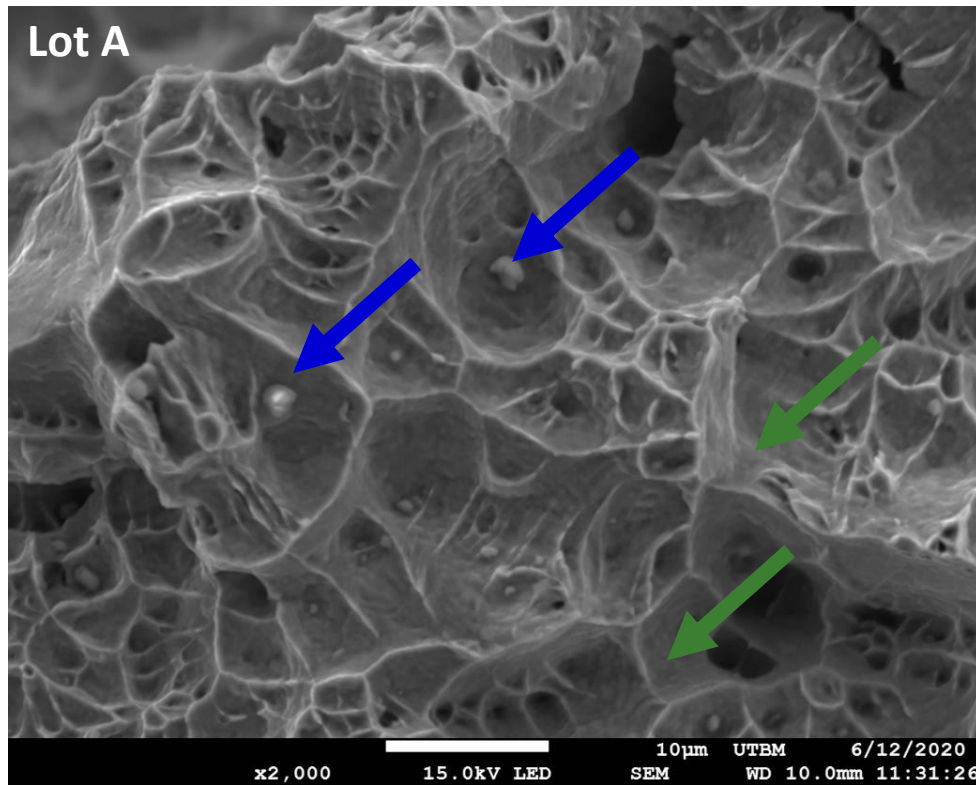
Thèse Benoit FLEISCHMANN, Influences du procédé d'atomisation et du matériau précurseur sur les mécanismes de compaction et les propriétés métallurgiques de pièces élaborées par CIC.

Résultats : composition

Deuxième exemple : O₂

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Poudre 316L : Présence de nodules composés de manganèse, silicium, oxygène et carbone.

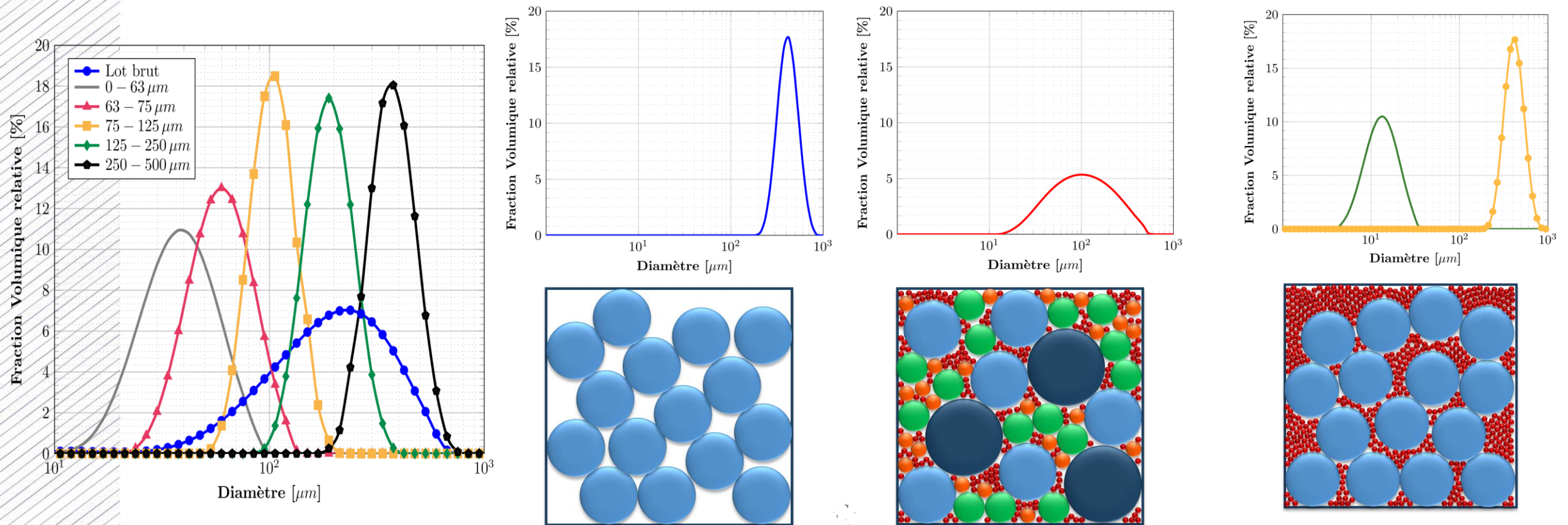


Résultats : Granulométrie

Application à la CIC

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Lot brut ou pas ? Mélange de poudre ?.

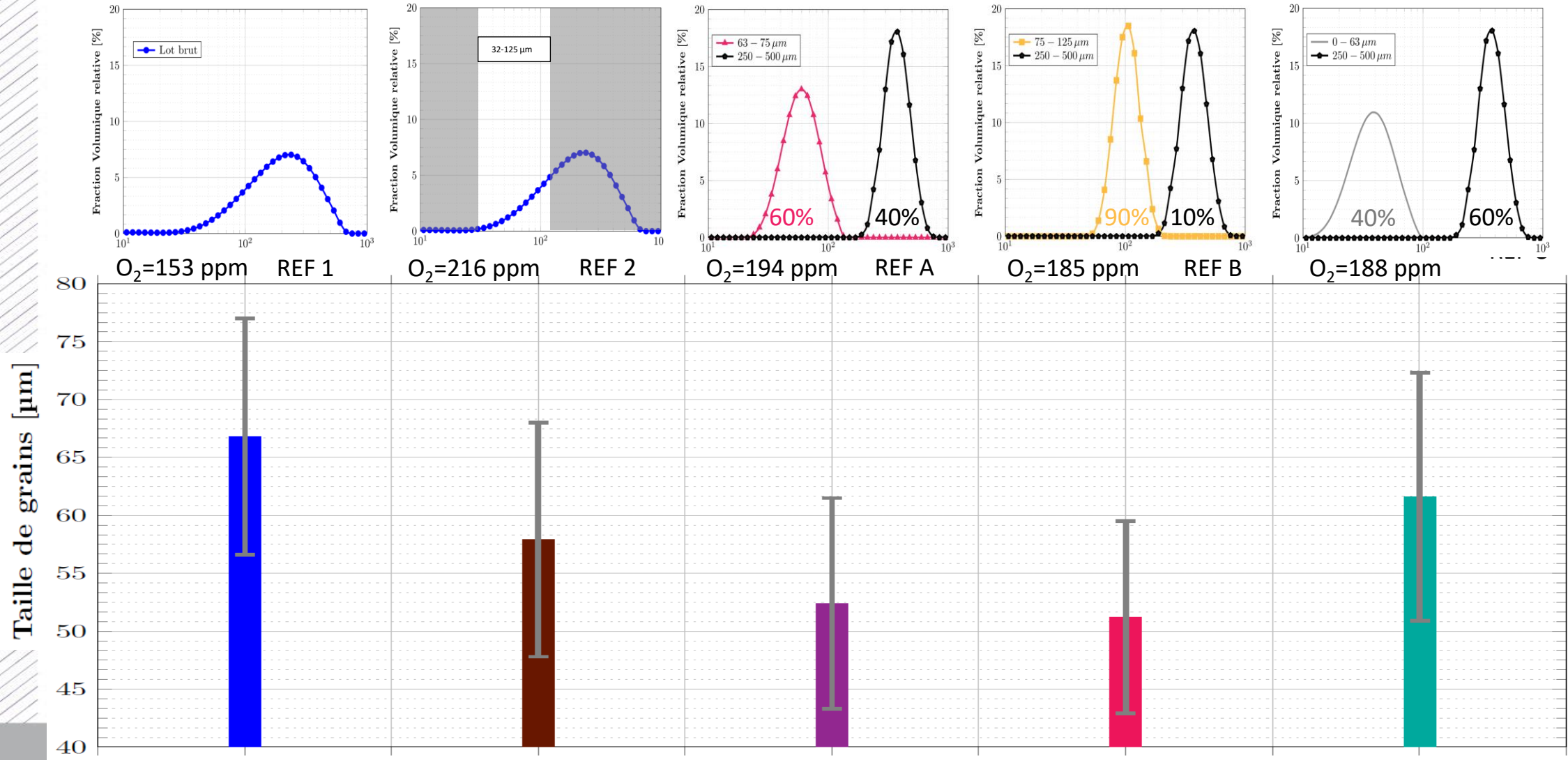


Résultats : Granulométrie

Application à la CIC

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Peu d'influence de la granulométrie sur la taille de grain.

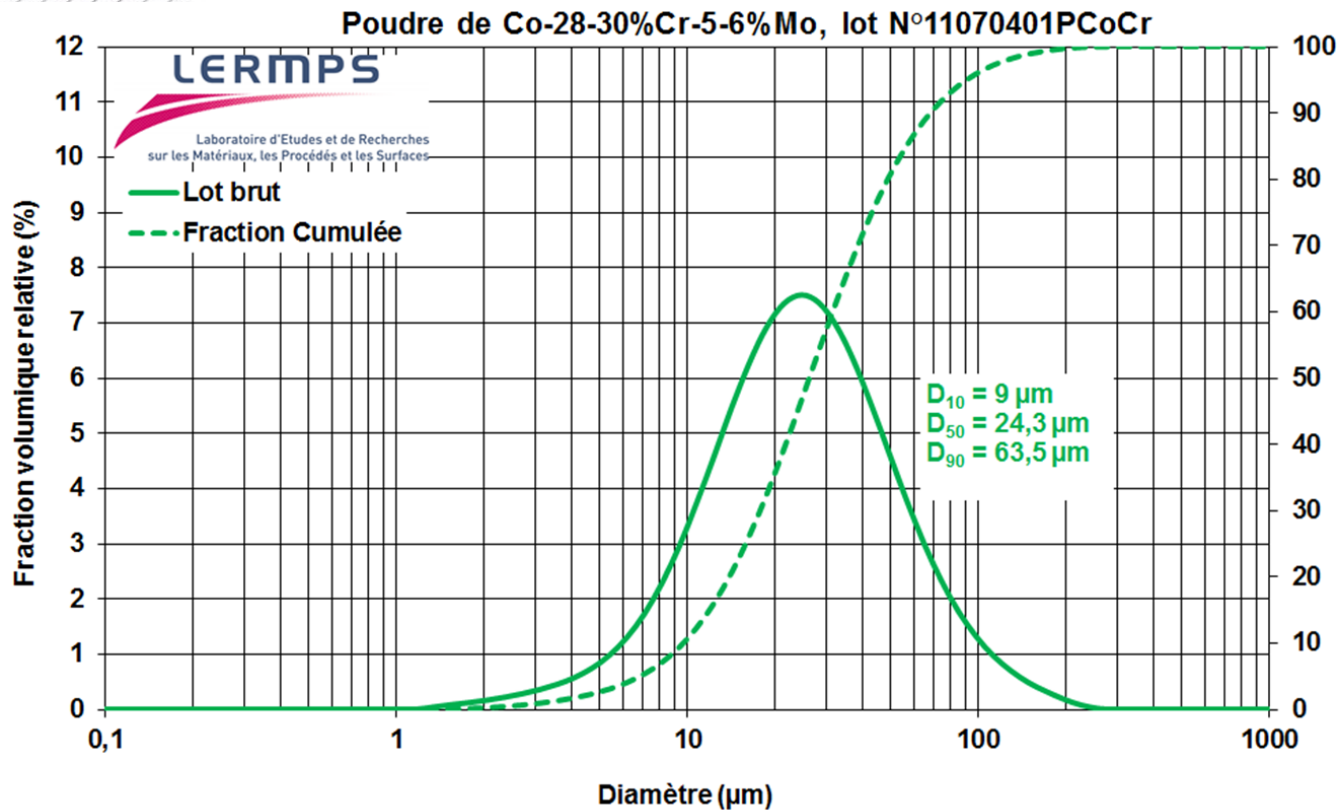


Résultats : Granulométrie

Quelques repères :

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► Distribution de la poudre



► Distribution granulométrique : d_{10} , d_{50} et d_{90}

► Fraction volumique cumulée :

- d_{10} : 10% du lot en volume < à la valeur de d_{10}
- d_{50} : 50% du lot en volume < à la valeur de d_{50}
- d_{90} : 90% du lot en volume < à la valeur de d_{90}

► Si $\frac{d_{50}}{d_{10}} \approx \frac{d_{90}}{d_{50}}$:

- distribution homogène : équilibrée

► Si $\frac{d_{90}}{d_{50}} = \sigma < 3,5$: Lot de poudre resserré

► De même avec $\sigma' = \frac{d_{90} - d_{10}}{d_{50}}$

- Avec $0,5 < \sigma' < 1,2$

► Lot de poudre conforme à la spécification si à minima 80% en volume des particules de poudres est compris entre les bornes d_{10} et d_{90} .

- NF EN ISO 14232-1, Projection thermique - Poudres - Partie 1 : caractérisation et conditions techniques de livraison.

► Les poudres pourquoi ?

- Définition.
- Echelle.

► Les procédés disponibles.

- Principes
- Caractéristiques.

► Résultats :

- Composition.
- Granulométrie.

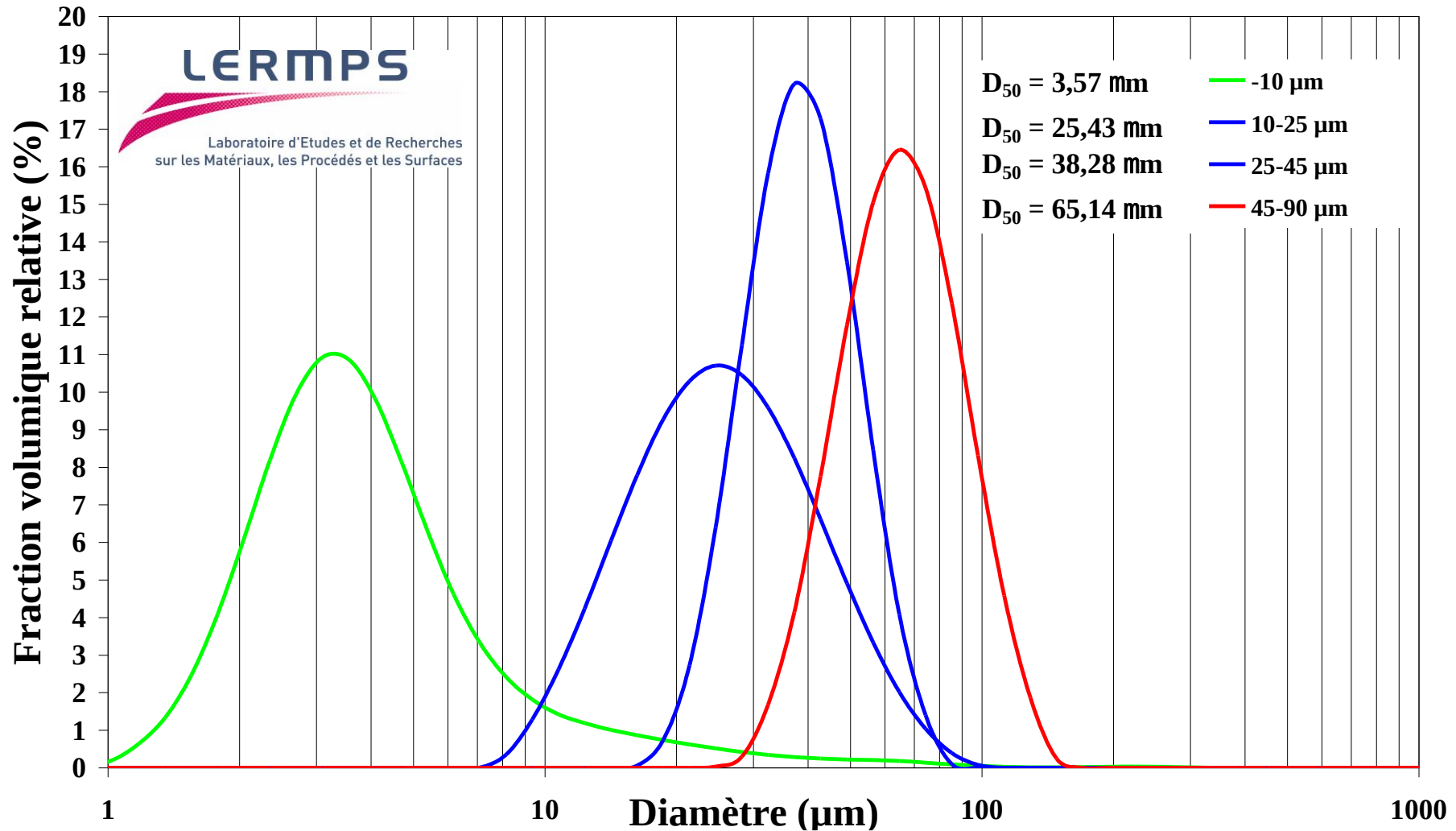
► Un peu de sécurité.

► Conclusions.

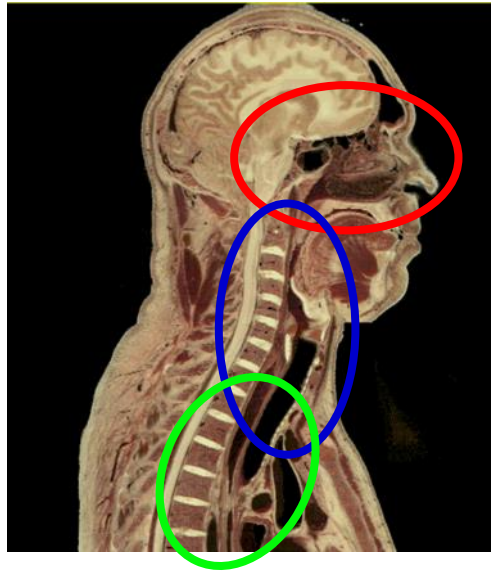
► UTBM.

► ICB-CO2M.

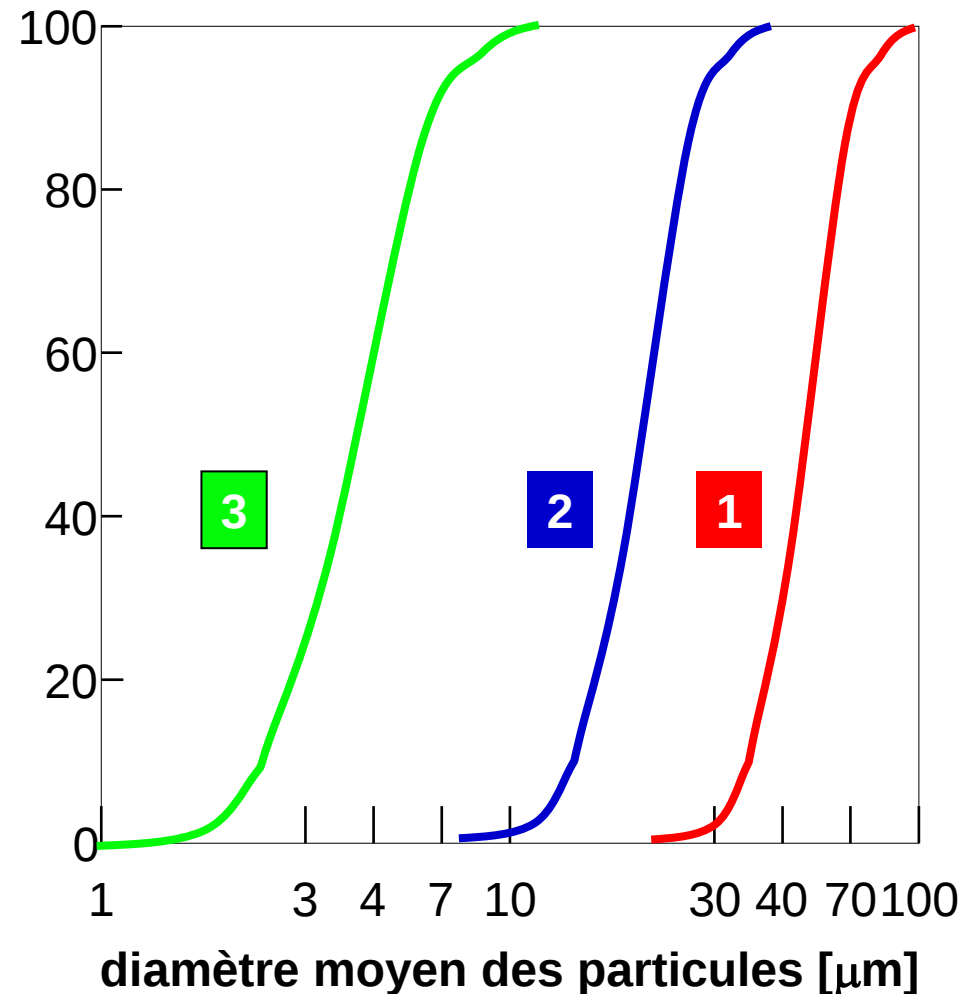
► Distribution de la poudre



► Distribution de la poudre



- 1** arrêt dans le pharynx
- 2** dépôt dans la trachée et les bronchioles
- 3** diffusion dans les alvéoles pulmonaires (très toxique)



► Incontournable...

► But :

- protéger de l'inhalation de particules
- éviter des risques graves ou chroniques à l'opérateur liés à la manipulation de poudres

► Les deux principales catégories sont les masques :

- À épuration d'air
- À adduction d'air

► Ne pas oublier une bonne ventilation du local avec système d'aspiration et de filtration.



Masque à épuration d'air



Masque à adduction d'air

► Quand l'utilisateur est susceptible de voir la poudre, il doit être équipé :

- Masques
- Vêtement de protection (blouse)
- Gants en latex ou nitrile
- Chaussures de sécurité



► Chaque procédé d'élaboration de poudre est unique.

- Création d'alliages « in situ » ou non.
- Morphologie et taille des particules.

► Ne pas de focaliser sur un procédé

- Analyser les capacités en fonction du besoin.
- Attention à la perte des éléments « légers » Al, Mg, Li, ...

► Ne pas se fermer sur une granulométrie.

► Caractéristiques de la poudre en fonction de

- Sa composition.
- Sa taille : coulabilité.

Même les poudres les plus communes sont surprenantes !

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



Freier Schuss.
TÜV SÜD Adrien Bisel

► Les poudres pourquoi ?

- Définition.
- Echelle.

► Les procédés disponibles.

- Principes
- Caractéristiques.

► Résultats :

- Composition.
- Granulométrie.

► Un peu de sécurité.

► Conclusions.

► UTBM.

► ICB-CO2M.

L'UTBM, en général

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

- L'UTBM forme des ingénieurs rapidement opérationnels, particulièrement adaptables aux évolutions de la technologie et aux mutations de la société.
- Ses formations s'appuient sur les activités de recherche et sur la valorisation.
- Créée en 1999, l'UTBM est un établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel.
- Membre du réseau des universités de technologie
- Née du regroupement de deux établissements d'enseignement supérieur
 - l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Belfort (1962) et l'Institut Polytechnique de Sevenans (antenne de l'UTC implantée à Sevenans en 1985).
- 9 Spécialités Ingénieurs
- **Formation :**
 - 7 Mentions de Master
 - 12 spécialités de Doctorats
 - 620 Matières enseignées
 - ≈ 200 Enseignants et enseignants chercheurs
 - 2800-3000 Etudiants
 - ≈ 300 Publications scientifiques
 - 260-270 Projets de recherche

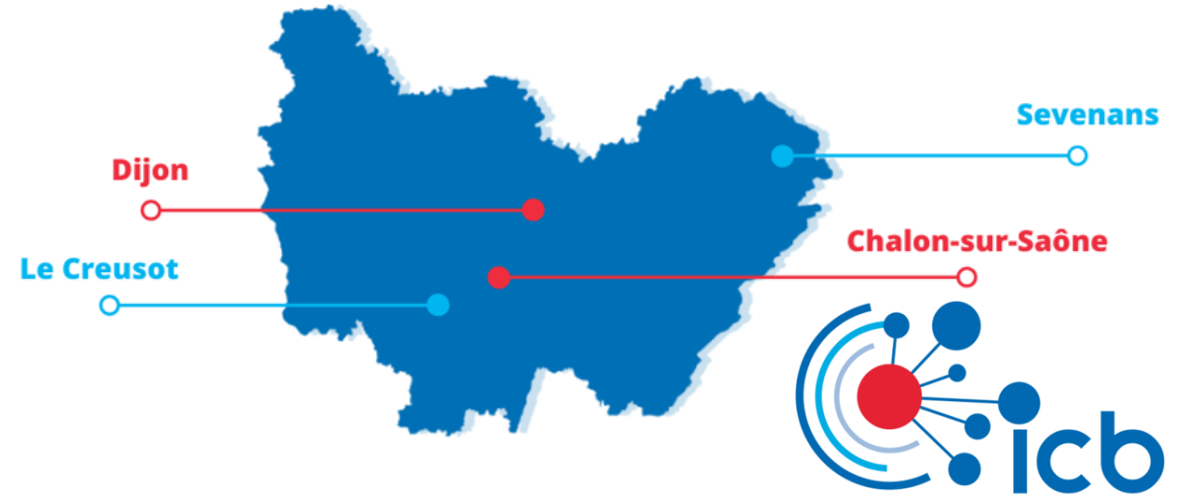


Le Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB)

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

► 304 personnes multi départements et régions

- ≈ 300 membres
- 177 permanents
- 103 Enseignants chercheurs
- 21 Chercheurs CNRS
- 25 ITA CNRS
- 28 Personnels techniques universités
- 119 Contractuels
- 10 Post-doctorants
- 89 Doctorants
- 10 IT / Chercheurs ressources propres
- ≈ 10 à 20 Chercheurs invités / an



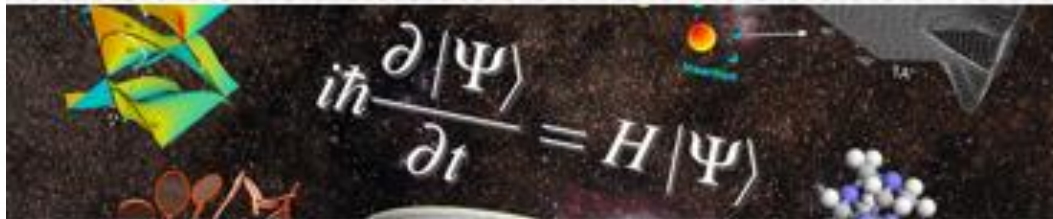
 BUDGET ANNUEL MOYEN



~ **150** PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES / AN (en moyenne)

► Les départements

Interactions et Contrôle Quantiques



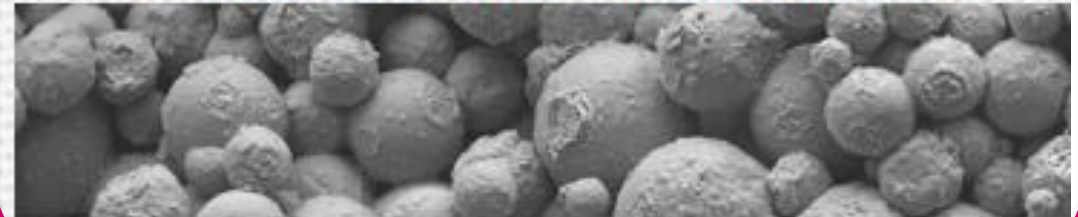
Photonique



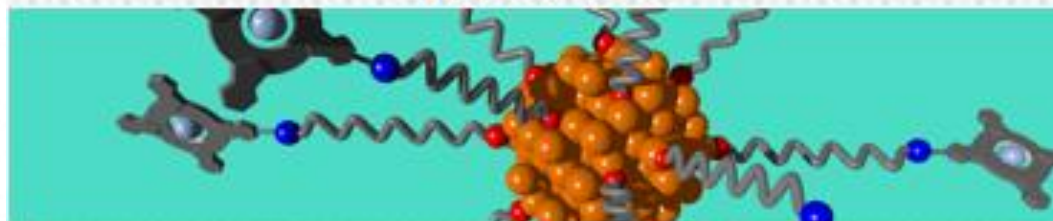
Conception, Optimisation et Modélisation en Mécanique



Procédés Métallurgiques, Durabilité, Matériaux



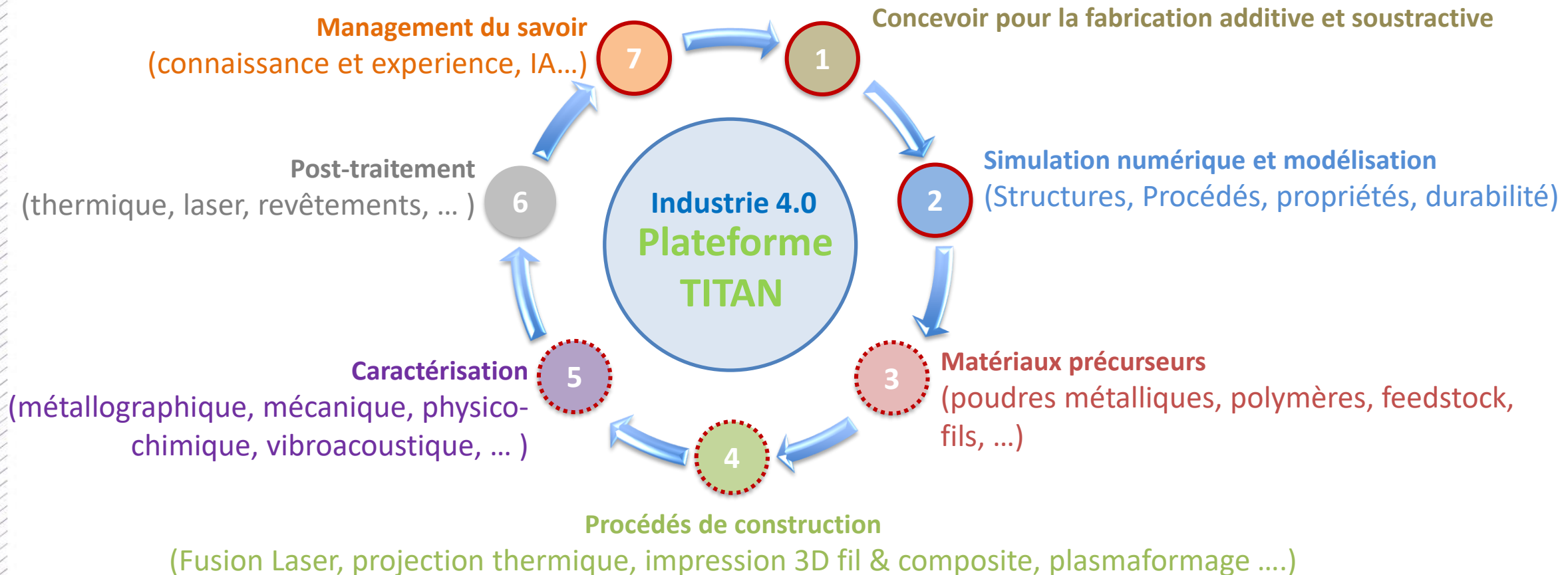
Nanosciences



Interfaces



► Un schéma pluridisciplinaire fédéré autour d'une plateforme d'activités et de recherche.



► Le département c'est :

- 35 enseignants chercheurs / ingénieurs / techniciens / administratifs.
- 15 doctorants.

► Notre ADN :

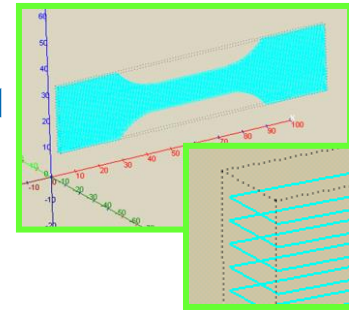
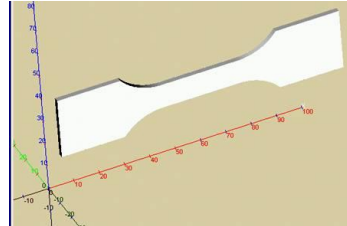
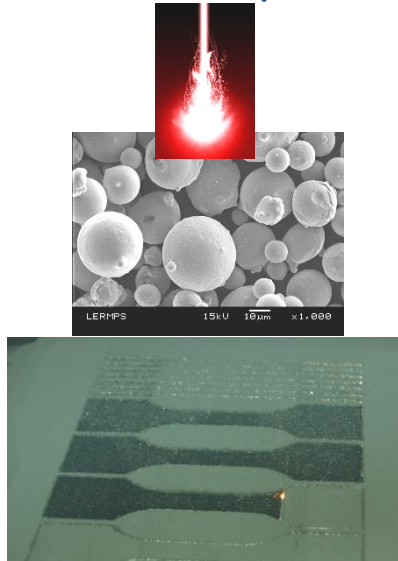
- Une conception avancée de systèmes mécaniques :
- La modélisation et l'optimisation numérique en mécanique.
- De la mécanique quantique pour les algorithmes quantiques : couplage thermo-physique et optimisation des systèmes thermiques ».
- Les Transferts de chaleur et couplages.
- L'information quantique pour l'intégration à l'échelle nanométrique des protocoles de communication.
- L'optimisation des procédés de fabrication.

► Une axe recherche transversal dédié :

- Aux méthodes et outils pour une conception orientée fabrication additive 3D, impression 4D à base de matériaux intelligents,
- A la vibro-acoustique pour la caractérisation de pièces obtenues par fabrication additive.
- Aux grandes déformations par chocs de hautes énergies.

► Une autre vision des choses !

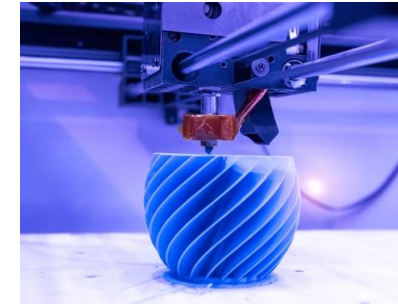
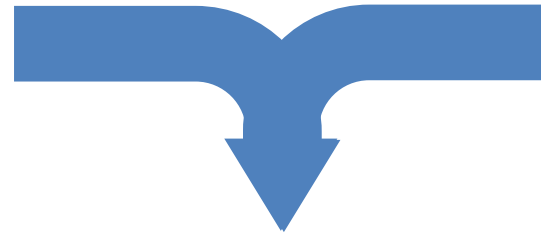
FUSION METAL



POLYMERE



ALTERNATIVE



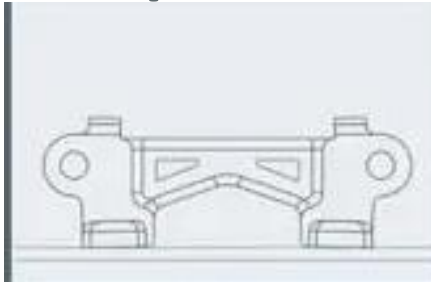
Matériau chargé en poudres
Une succession d'étapes du procédé

► Acronymes utilisés :

- BMD : Bound Metal Deposition
- Mex : Metal Extrusion
- MFFF : Metallic Fused Filament Fabrication.
- HMEx : Hot Metal Extrusion.

► Un rapide synoptique : 4 étapes clés !

Préparation



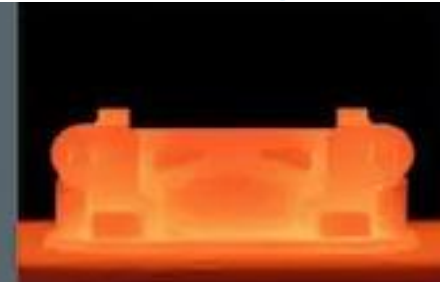
Impression



Déliantage



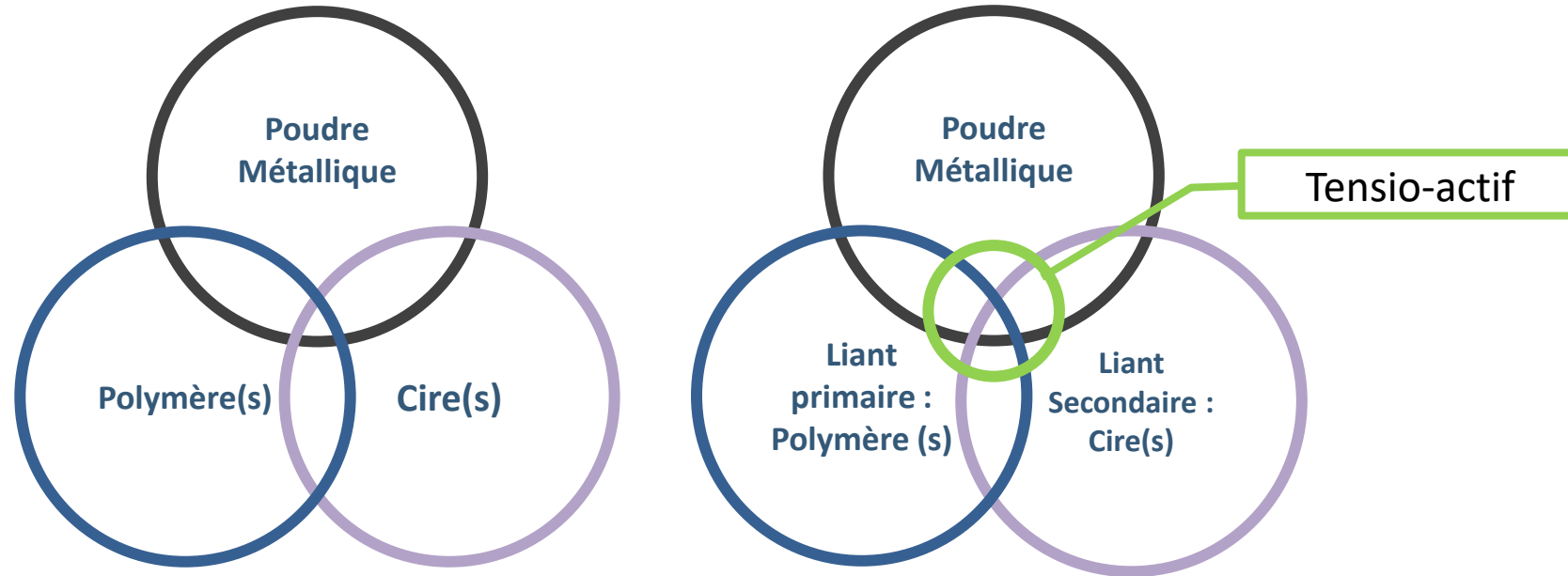
Frittage



Maîtrise du matériau d'apport et des étapes déliantage/frittage : **Projet "PAN"**



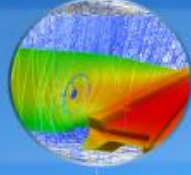
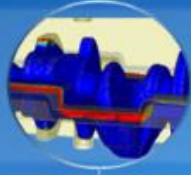
► Analyse des composants présents dans le matériau.



L'additif tensio-actif [...] a été ajouté pour faciliter le mouillage de la poudre avec le polymère.

Colloque National Aussois 2024

Simulation & instrumentation des Procédés de Fabrication



22-26 Janvier

Méca**mat**

Merci pour votre attention

Lucas DEMBINSKI

Maître de Conférences, UTBM-ICB/CO2M

lucas.dembinski@utbm.fr

03 84 56 32 06

yoann.danlos@utbm.fr



Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

ICB UMR CNRS 6303

icb.u-bourgogne.fr