



**Maîtrise de la fabrication additive de pièces
métalliques de grandes dimensions par *Metal
Binder Jetting* (MBJ) pour l'industrie
mécanique**

Thomas CHENY

Encadrant académique : Christophe COLIN

Encadrant industriel : Benoit VERQUIN, CETIM

Laboratoire de recherche : Centre des Matériaux, MINES Paris - PSL

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1) Etapes du procédé

2) Atouts et points durs du
Metal Binder Jetting

3) Système de mise en
couche et paramètres clés

4) Impact des paramètres sur la compacité
des pièces à vert

5) Lien entre compacité et écarts
aux cotes CAO

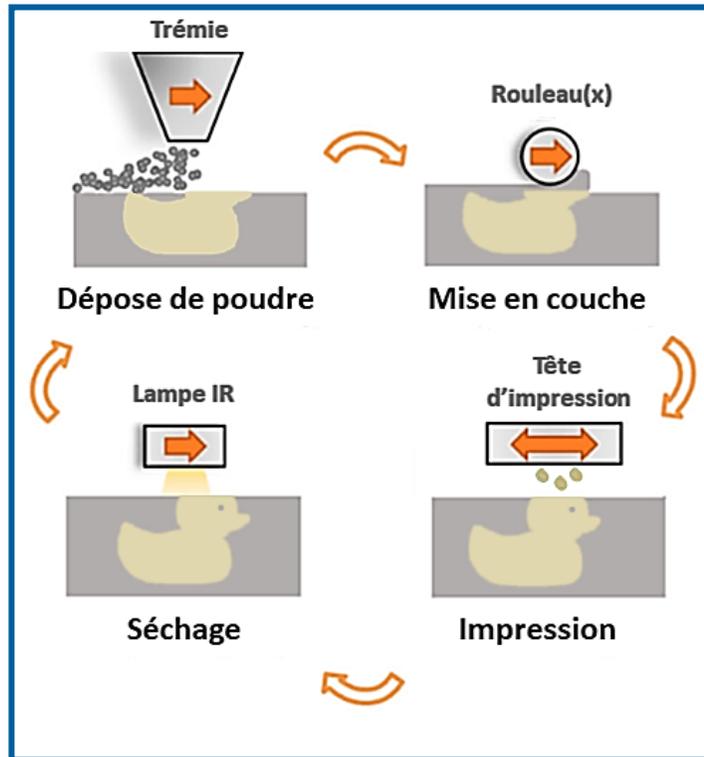
6) Infiltration et tenue mécanique
des pièces à vert

Conclusion

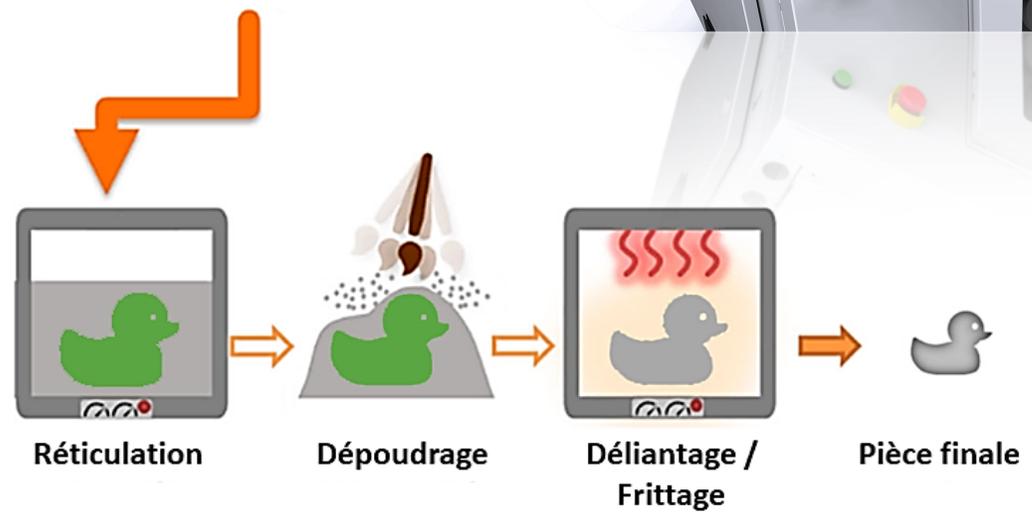
LES ÉTAPES DU PROCÉDÉ

Procédé de fabrication additive

- Indirect || Couche par couche || Sans fusion



ExOne Innovent+



Lores et al., 2019

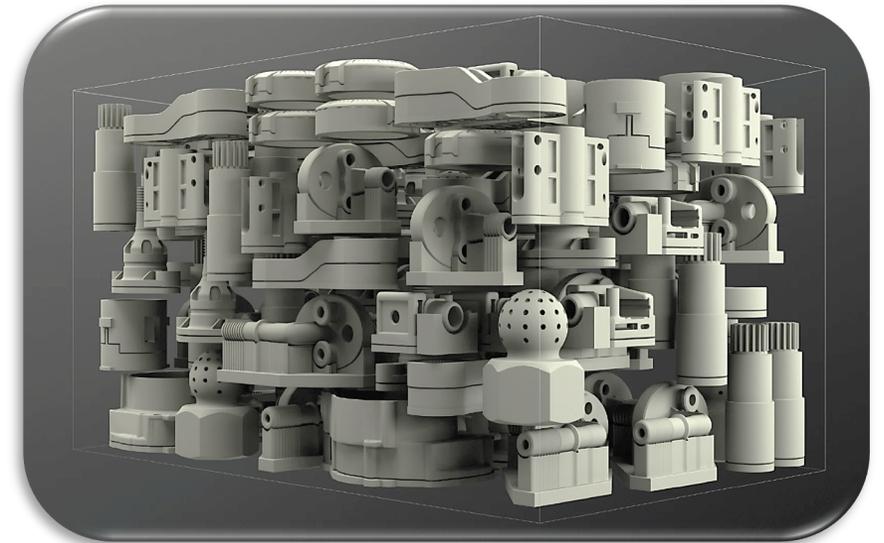
LE METAL BINDER JETTING (MBJ)

✓ Ses atouts :

- Géométries complexes & sans supports de fabrication
- Grande variété de matériaux
- Pas d'atmosphère inerte ni de laser lors de l'impression
- Pas ou peu de contraintes thermiques résiduelles
- Possibilité d'impressions étagées → amélioration de la productivité vers de la moyenne série

✗ Ses faiblesses actuelles :

- Manque de maîtrise des évolutions dimensionnelles à chaque étape du procédé
- Faible tenue mécanique des pièces avant frittage
- Pièces de petites dimensions et peu massives
- Résidus carbonés après déliantage

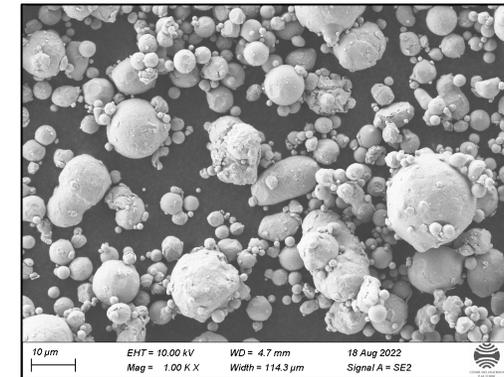
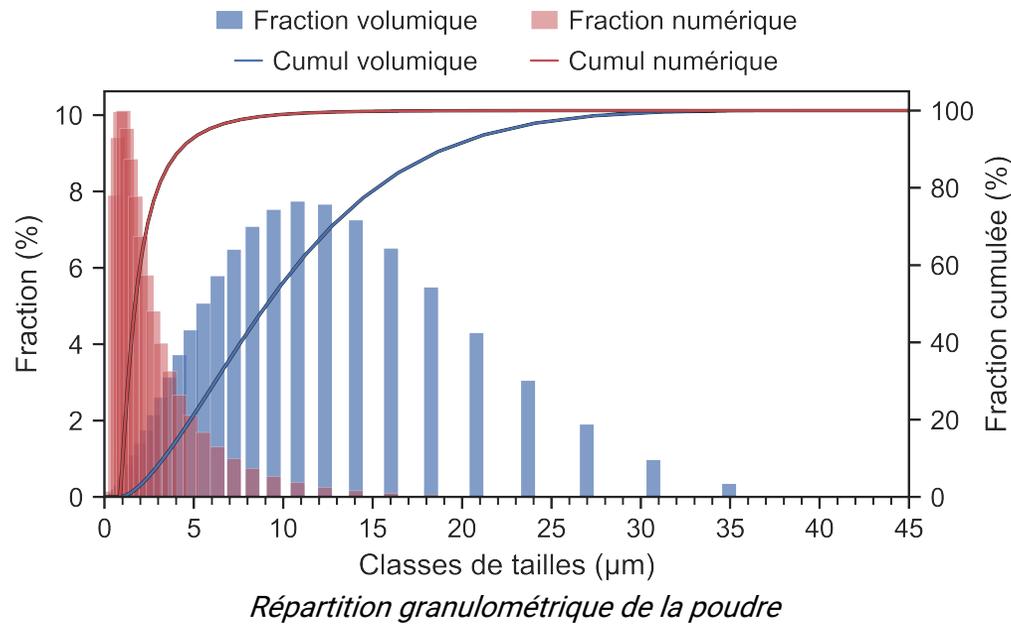


CARACTÉRISTIQUES DE LA POUDRE UTILISÉE

Composition chimique poudre 316L (données Sandvik Osprey)

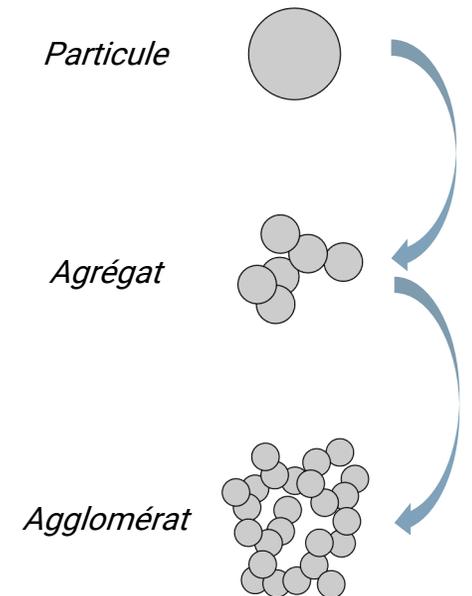
Élément	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S	Fe
wt%	17,0	12,0	2,5	1,24	0,63	0,02	0,015	0,004	Bal.

Matériau	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	$d_{99,99}$ (μm)	Span	ρ_{vraie} (g/cm^3)	$\rho_{versée}^{relative}$ (%)	$\rho_{tassée}^{relative}$ (%)	Rapport d'Hausner	Indice de Carr (%)
SS 316L	3,74	10,33	21,59	40,1	1,73	7,9	43	56	1,32	32



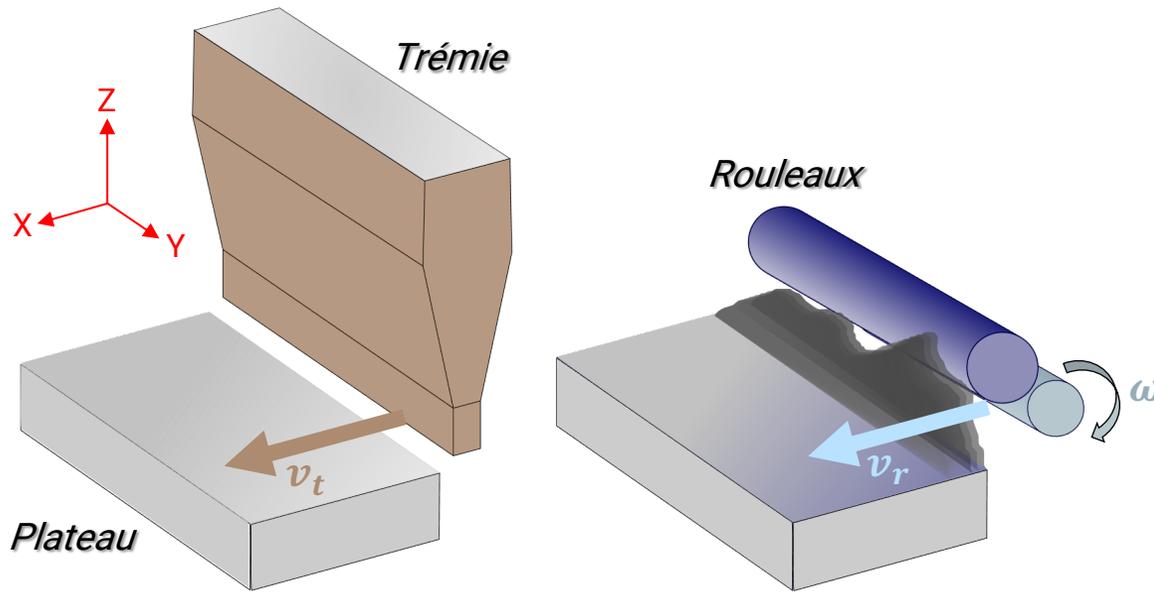
Imagerie MEB de la poudre
Sphéricité : $0,74 \pm 0,17$

- Poudre compressible et cohésive
- Coulabilité médiocre



MISE EN COUCHE - EXONE

« Triple ACT » (Advanced Compaction Technology) - ExOne



Paramètres clés

- Nombre de rouleaux
- Vitesse d'avance du/des rouleaux v_r
- Vitesse de rotation du rouleau de compaction ω
- Ecart entre rouleaux Δh_r
- Epaisseur de couche dZ
- Vitesse de la trémie v_t
- Température de la couche de poudre $T_{séchage}$

- **Roughing roller** au design moleté : augmenter la friction avec la surface de la poudre. Aide à répartir la poudre de manière répétée sur une hauteur contrôlée.
- **Smoothing roller** : compacter la poudre de manière contrôlée.

Épaisseur de poudre déposée initialement sur le plateau

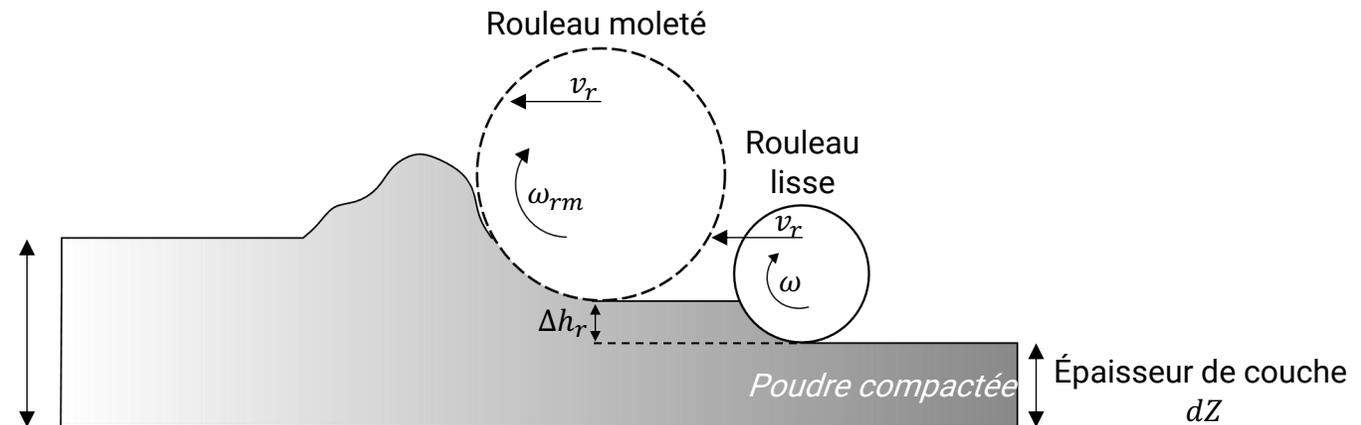
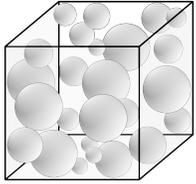
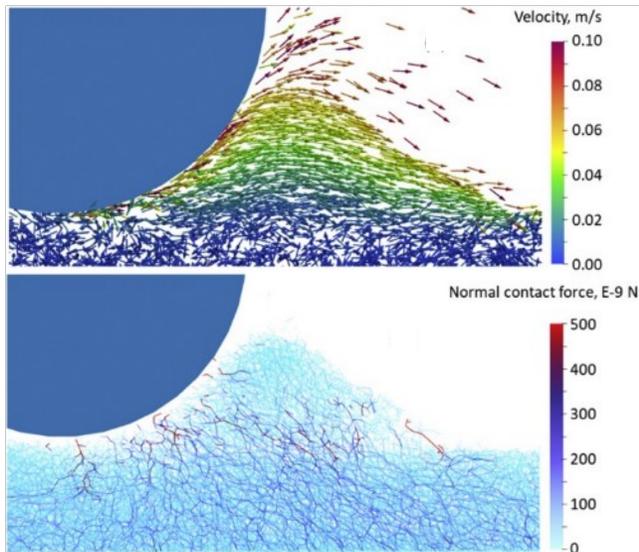
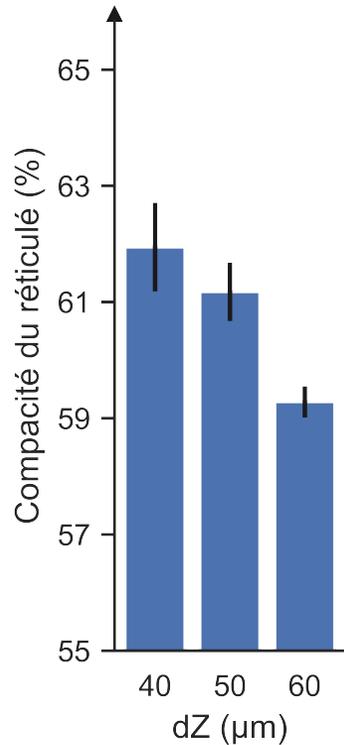


Schéma du système ACT (Advanced Compaction Technology) de la machine ExOne

IMPACT DES PARAMÈTRES SUR LA COMPACITÉ DU RÉTICULÉ



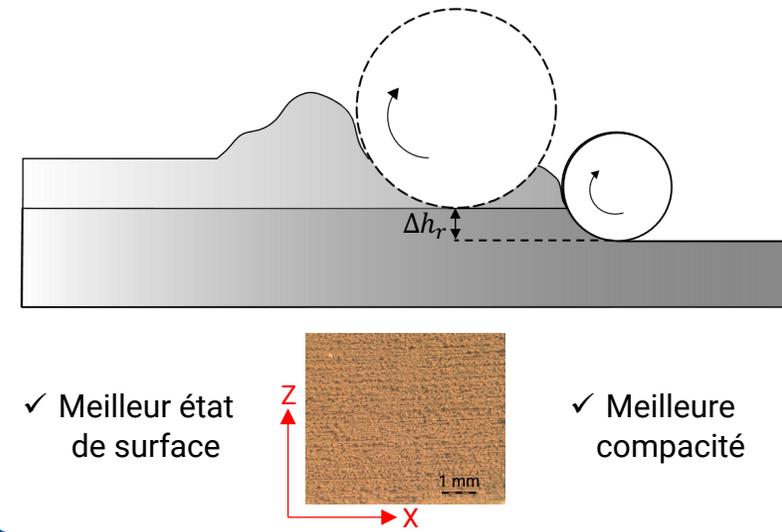
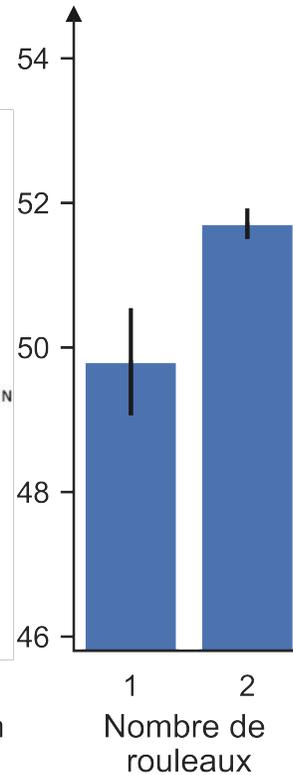
Compacité = Densité relative = $\frac{\rho_{app}}{\rho_{th}} = 1 - P_t$



Wang et al. 2020

Vitesse d'avance des rouleaux (mm/s)

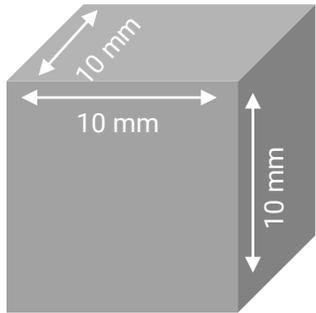
Vitesse de rotation (rpm)



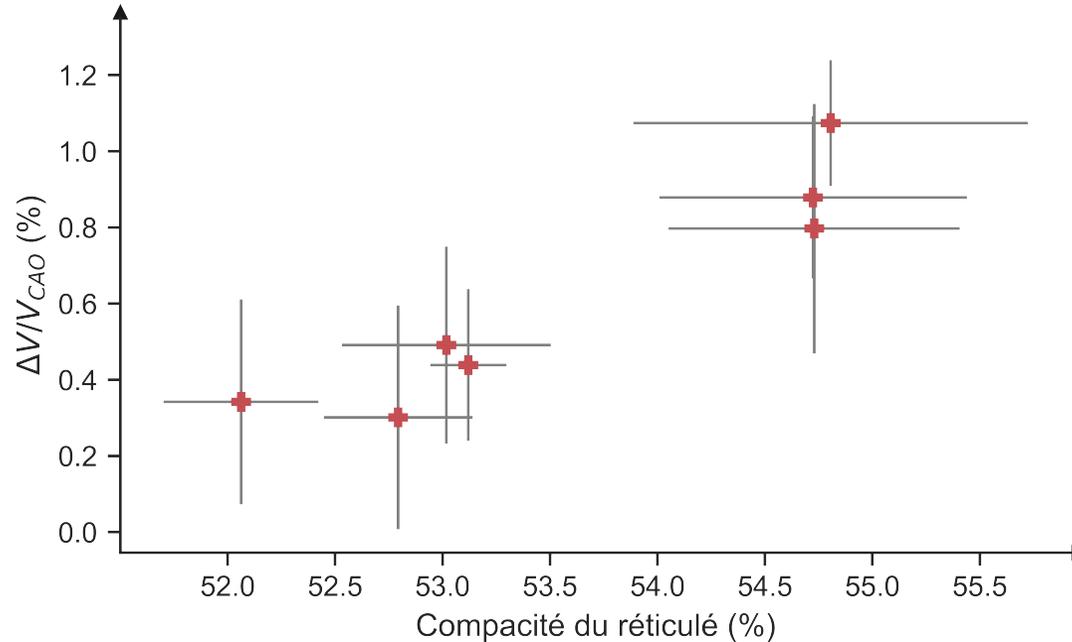
- Diminution de la compacité avec l'augmentation de dZ (dans la gamme $4*d_{50} - 6*d_{50}$) ;
- Limiter la vitesse d'avance des rouleaux ;
- Pas de consensus sur la vitesse de rotation dans la littérature ;
- Deux rouleaux pour une meilleure compacité ;
- L'écartement Δh_r entre rouleaux influence l'homogénéité des propriétés des pièces réticulées dans la largeur du plateau.

LIEN ENTRE COMPACITÉ ET ÉCARTS AUX COTES

$$\text{Ecart volumique (\%)} : \frac{V_{app} - V_{CAO}}{V_{CAO}} \text{ avec } V_{app} = X * Y * Z \text{ et } V_{CAO} = X_{CAO} * Y_{CAO} * Z_{CAO}$$

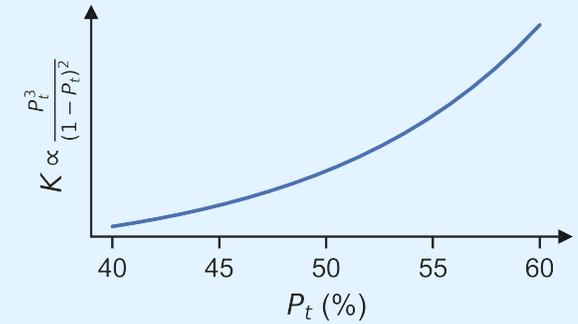
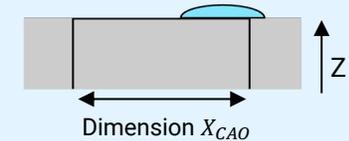


Modèle CAO des pièces étudiées



Écarts volumiques post-réticulation en fonction de la compacité du réticulé (iso-volume de liant)

Hypothèse



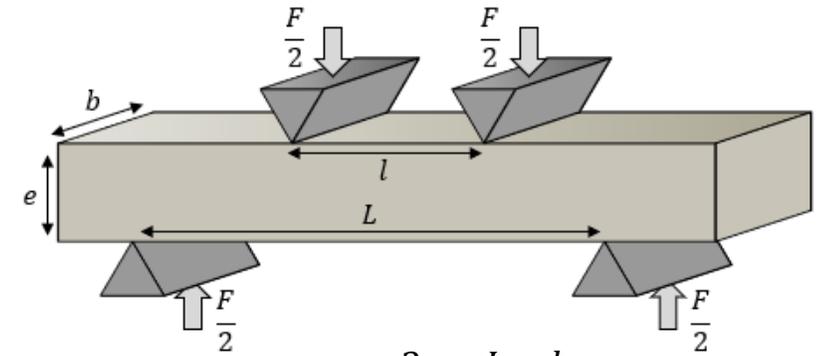
$$\text{Perméabilité } K \propto d_{50}^2 \frac{P_t^3}{(1 - P_t)^2} \text{ (Carman-Kozeny)}$$

→ Étalement favorisé par une perméabilité plus faible (Alleborn & Raszillier, 2004)

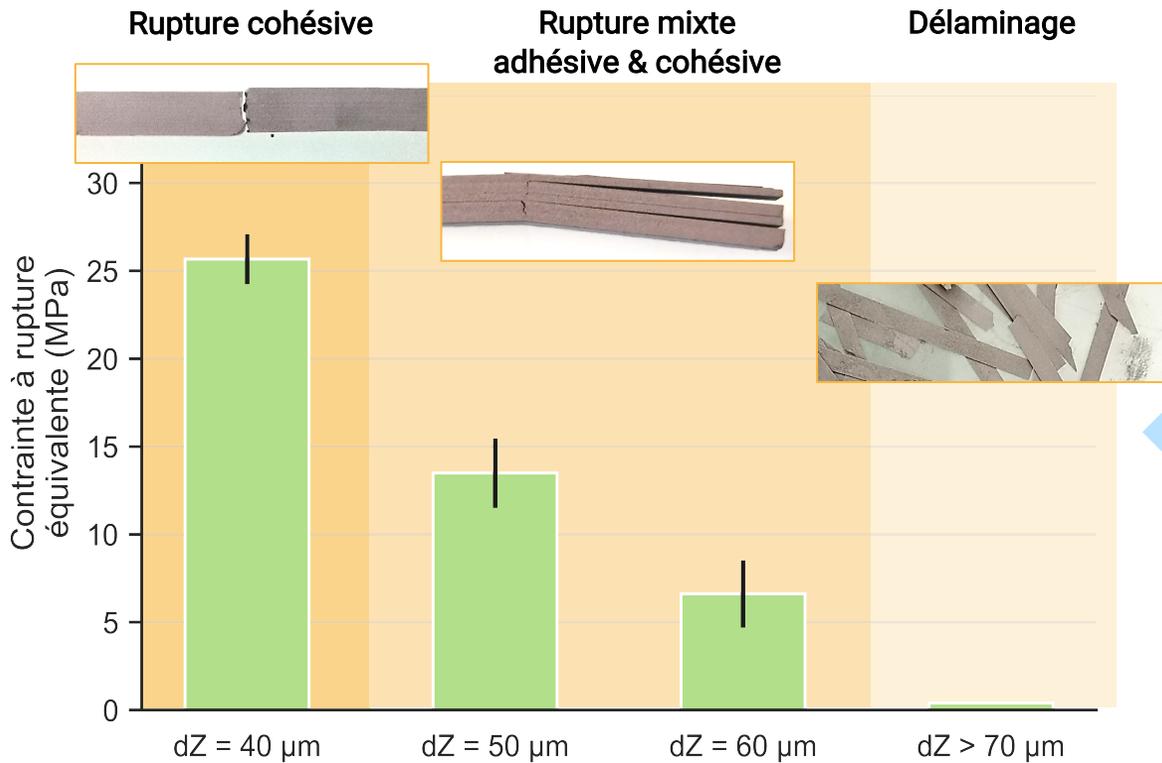
- Une plus grande compacité du lit de poudre (et donc des pièces à vert) favorise les surcotes par rapport à la CAO.
- L'état du réticulé dicte le comportement des pièces au frittage.

INFILTRATION ET TENUE MÉCANIQUE

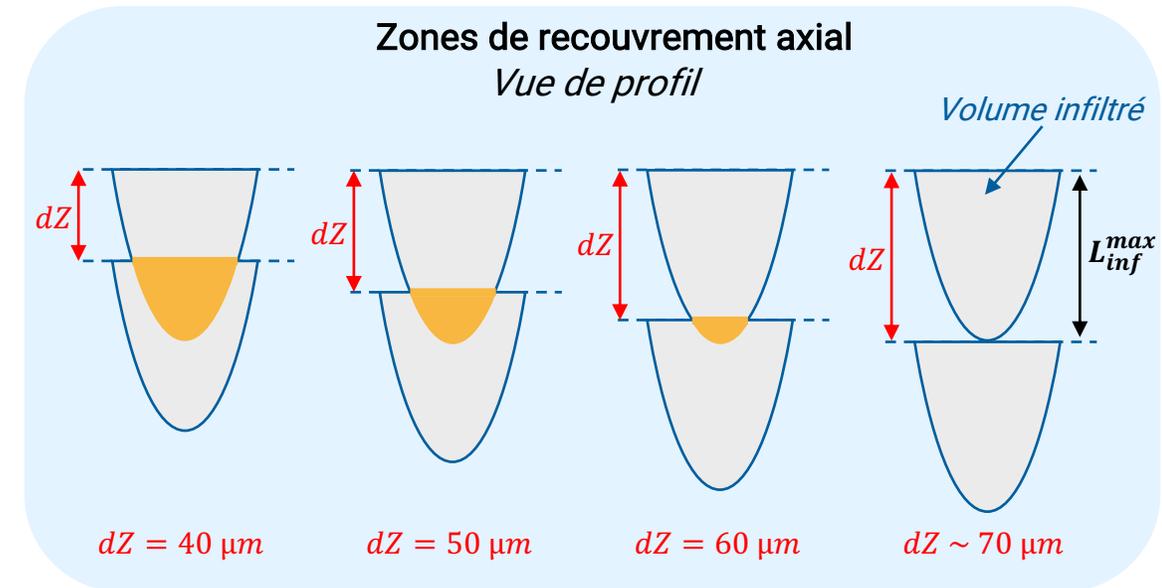
Effets de dZ en flexion 4 points sur éprouvettes réticulées



$$\sigma_{eq}^{max} = \frac{3}{2} F \cdot \left(\frac{L-l}{b \cdot e^2} \right)$$



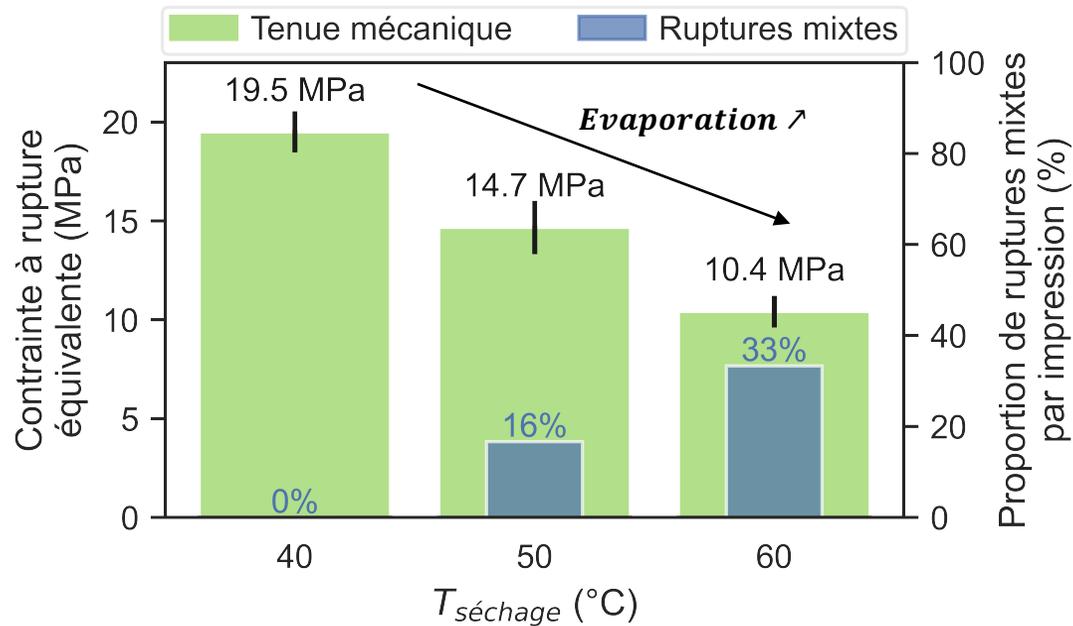
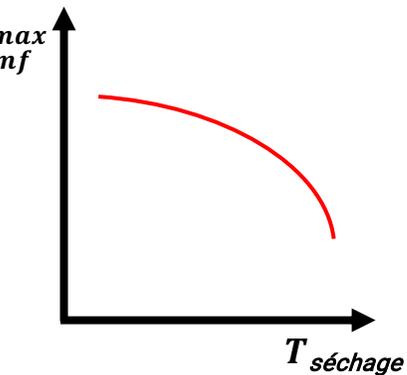
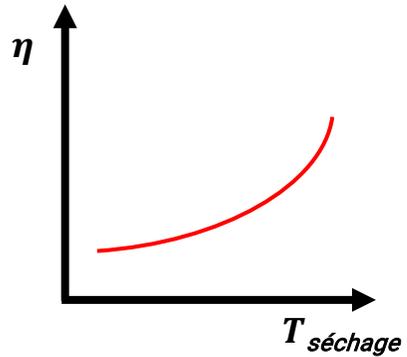
Effet de l'épaisseur de couche sur la tenue mécanique des pièces à vert ($T_{séchage} = 50^\circ\text{C}$)



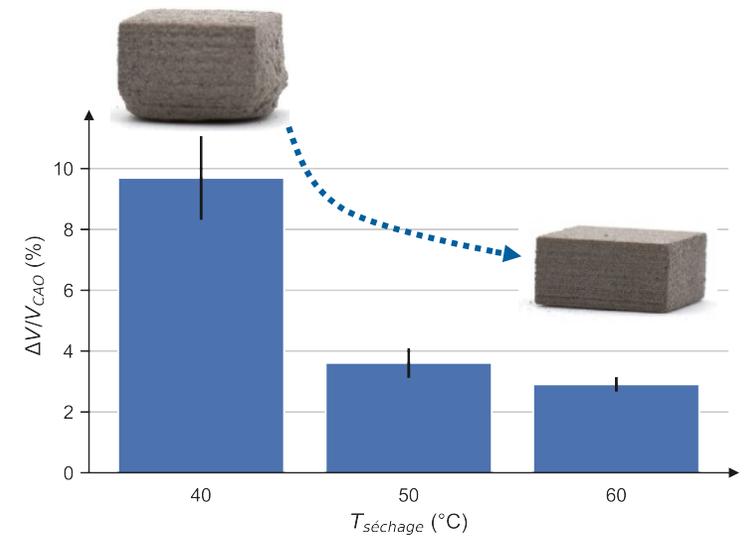
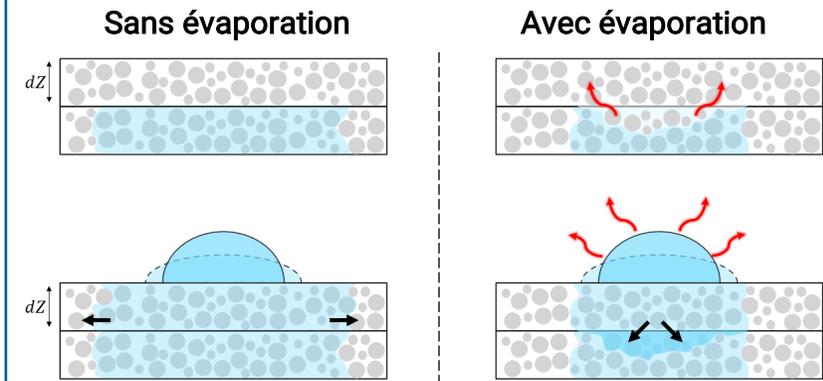
Profondeur max d'infiltration $L_{inf}^{max} \sim 74 \mu\text{m}$ pour ces conditions d'impression.

INFILTRATION ET TENUE MÉCANIQUE

Effets de $T_{\text{séchage}}$ en flexion 4 points sur éprouvettes réticulées



Effet de la température sur les propriétés mécaniques et le mode de rupture



Effet de la température sur la maîtrise des cotes

Chute des propriétés mécaniques avec l'augmentation de la température et fragilisation des zones inter-couches.

➤ Impact majeur de l'évaporation des solvants du liant sur la tenue mécanique...

... mais compromis à trouver avec la maîtrise dimensionnelle des pièces fabriquées.

CONCLUSION

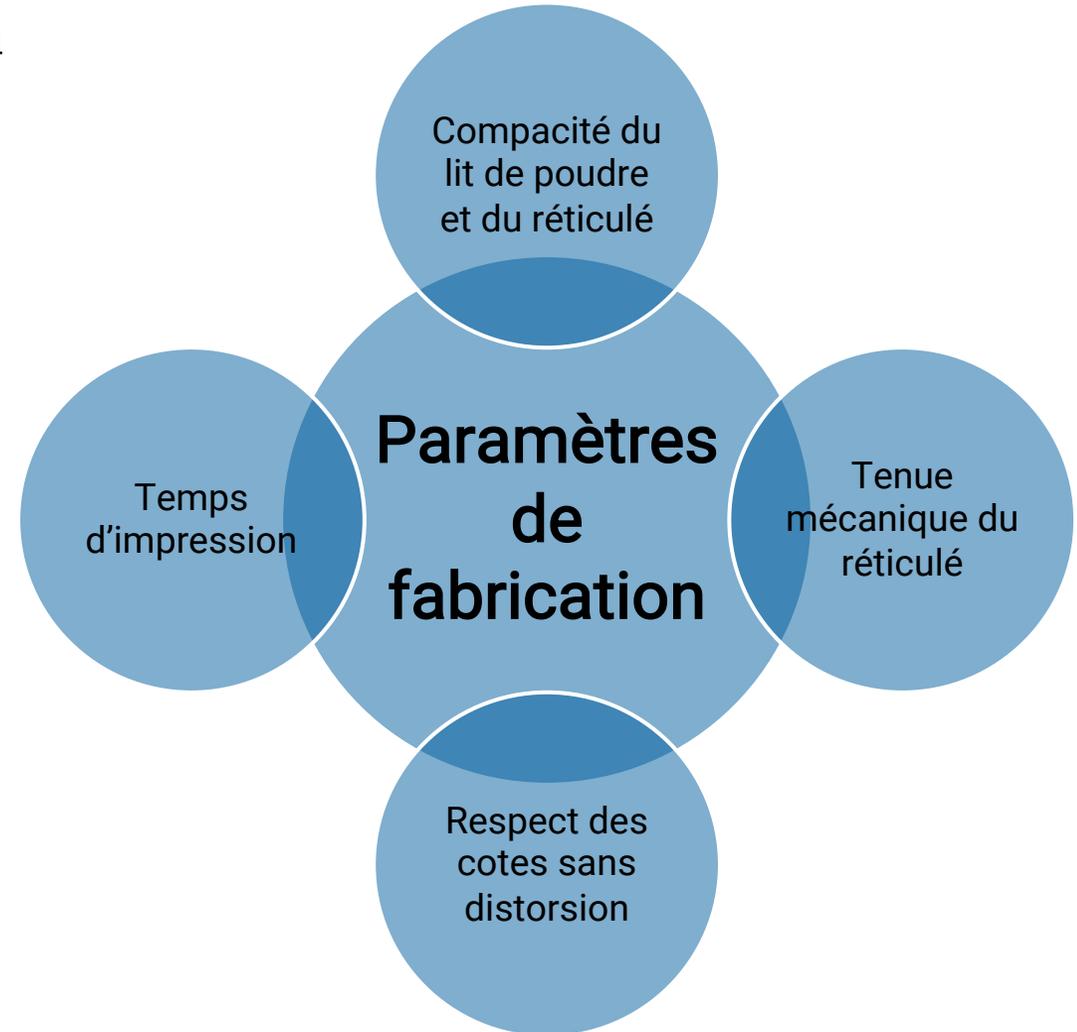
Etude des problématiques de mise en couche et d'impression dans la fabrication de pièces en MBJ :

- Des leviers pour maîtriser les différentes propriétés des pièces aux étapes pré-frittage
- Une affaire de compromis

Finalité :

Aboutir à des pièces de grandes dimensions :

- ✓ Aux cotes
- ✓ Sans distorsion
- ✓ Manipulables à l'état réticulé
- ✓ Temps de production raisonnables
- ✓ Sans dépendance de la position des pièces dans la box



MERCI POUR VOTRE ATTENTION !

