



Projet de recherche Mitacs Globalink
Pour l'obtention du
Diplôme National d'Ingénieur en Génie Mécanique

**Application d'aide au choix des paramètres
d'impression 3D appliquée à l'acier 316L**

Présenté par:

Oussema BOUGUERRA

Encadré par :

Mr Nouredine BARKA (UQAR)

Mme Salma SLAMA (ENIT)

Mme Asma BELHAJ (ENIT)

Réalisé à:

UQAR

Université du Québec
à Rimouski

Mitacs
Globalink

Année Universitaire : 2021/2022

Plan:

1. Cadre du projet et problématique

2. Le procédé SLM

3. Etude expérimentale

4. Etude numérique

5. Application d'aide au choix

6. Conclusion et perspectives

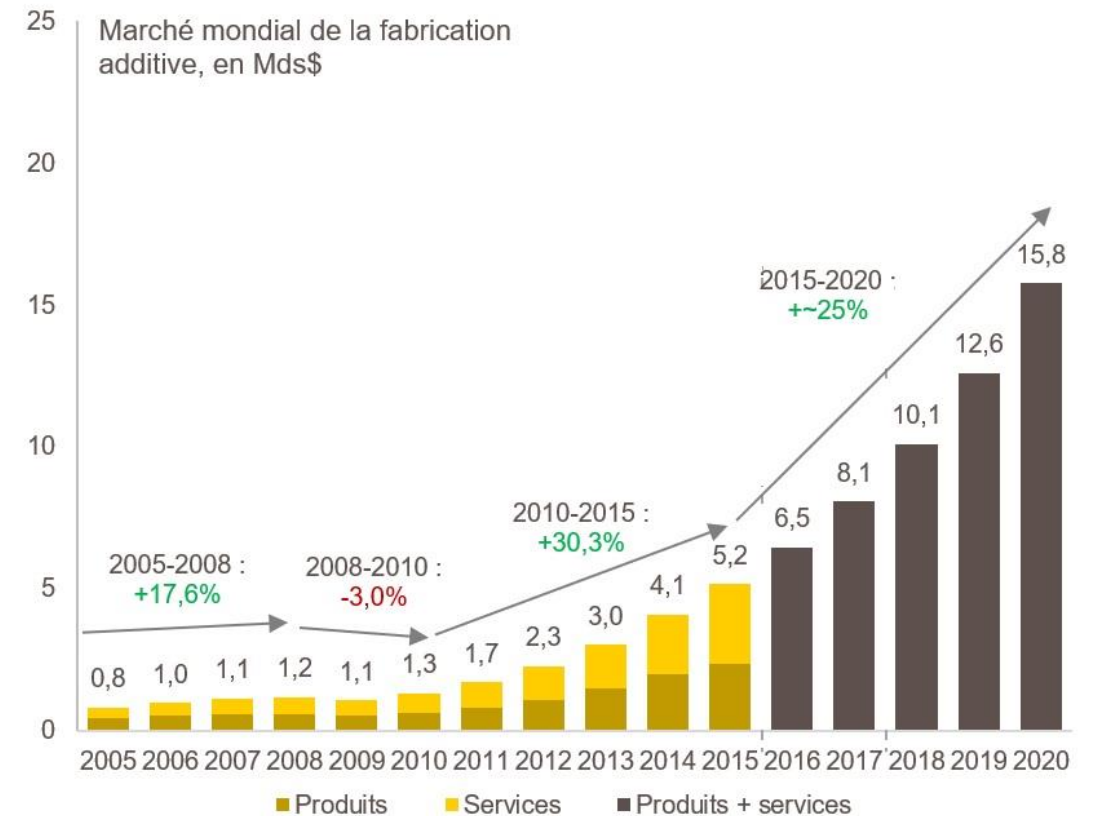
La fabrication additive

Définition

Ajout de matière couche par couche à partir d'un fichier CAO.

Avantages

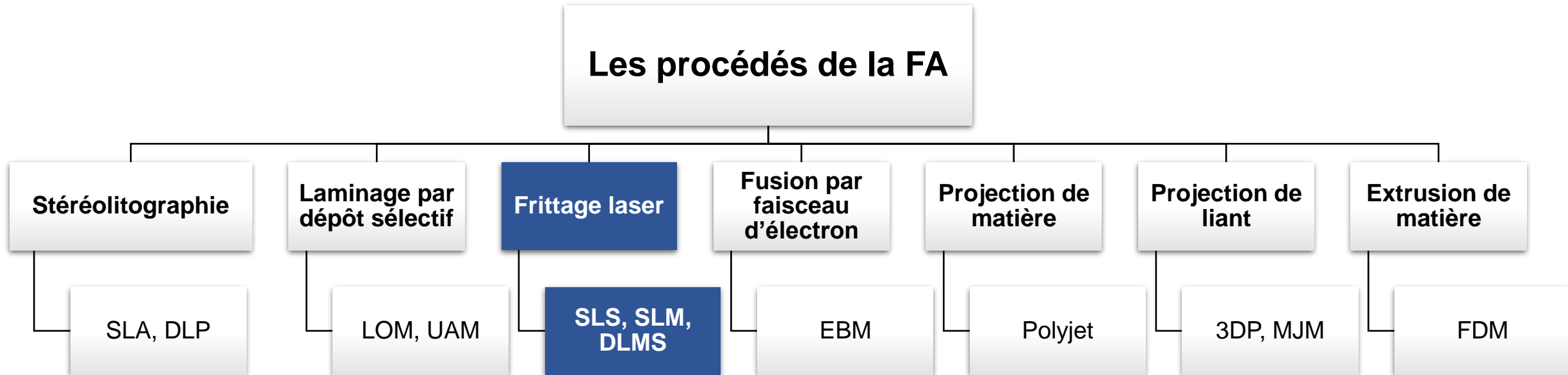
- Géométries complexes
- Flexibilité et rapidité de mise en place
- La variété des matériaux utilisées pour différentes applications (prototypage, outillage, production)



La fabrication additive

Classification des procédés de FA

Norme **ISO 17296-2:2015** → 7 grandes familles de procédés de fabrication additive.



Problématique

- **Le choix des paramètres d'impression SLM appliquée à l'acier 316L**
- **Absence de norme relative au SLM**
- **Manque de données sur le choix des paramètres**

Objectifs

- **Etude paramétrique expérimentale**
- **Développement d'un outil numérique d'aide au choix des paramètres d'impression**

Plan:

1. Cadre du projet et problématique

2. Le procédé SLM

3. Etude expérimentale

4. Etude numérique

5. Application d'aide au choix

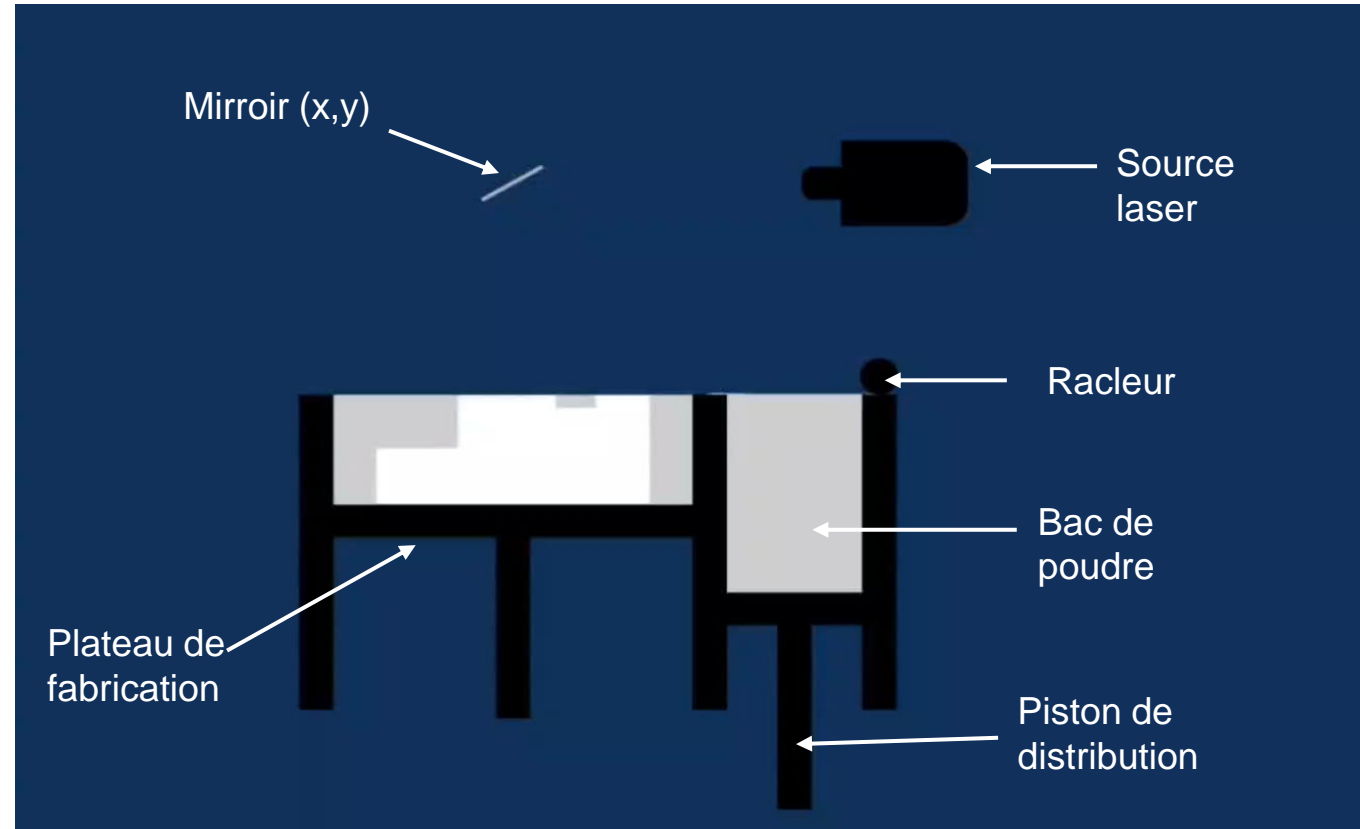
6. Conclusion et perspectives

Principe

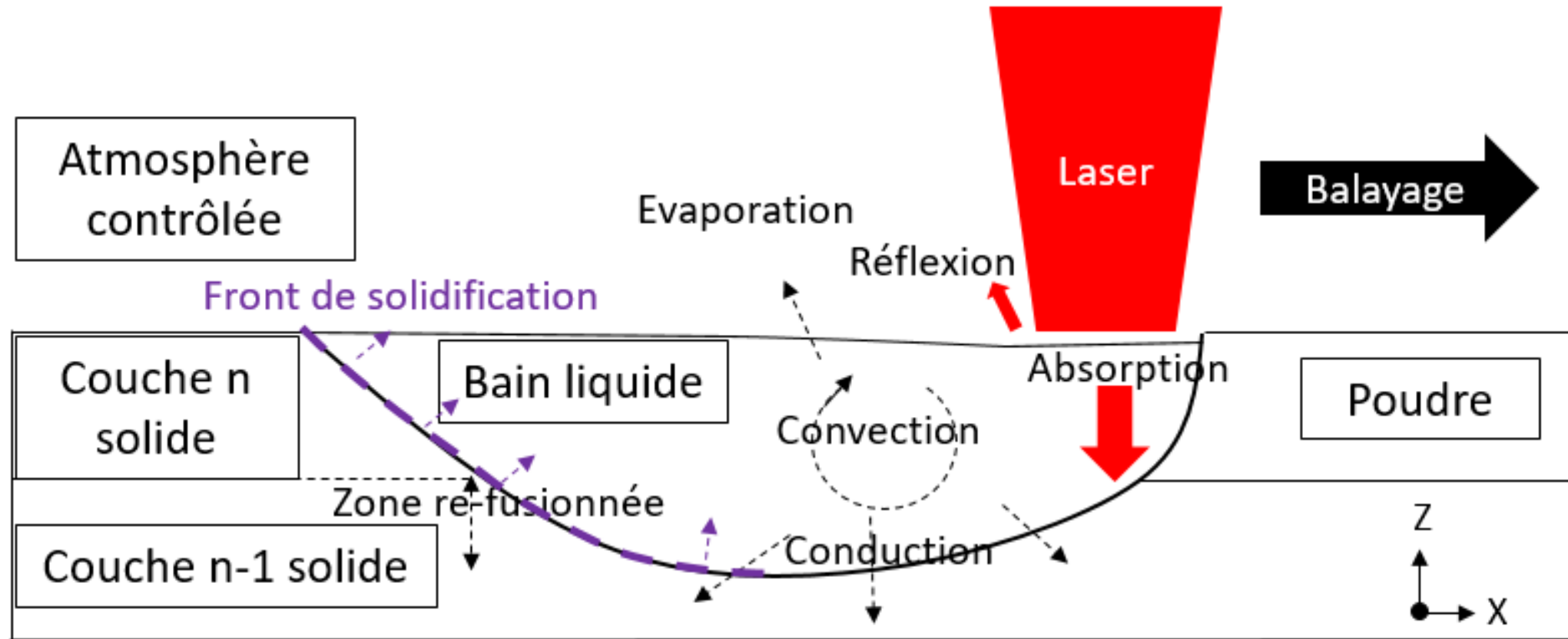
Etape 1: Dépôt d'une couche de poudre

Etape 2: Fusion de cette couche

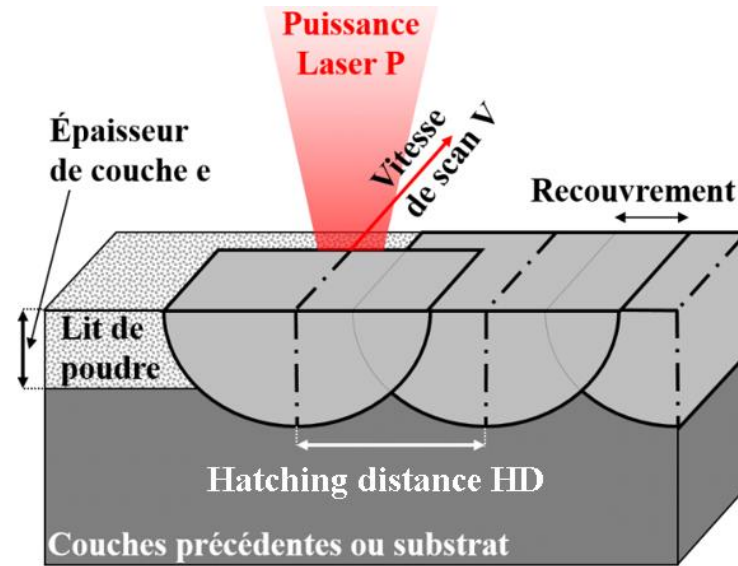
Etape 3: Descente du plateau de fabrication
et montée du piston de distribution.



Phénomènes mis en jeu



Paramètres



Matière première

- Composition chimique
- Morphologie
- Granulométrie
- Coulabilité
- Densité

Procédé SLM

- Laser :
 - Puissance laser
 - Vitesse de balayage
 - Diamètre du faisceau
- Stratégies de balayage
- Epaisseur du lit de poudre
- Hatching Distance : distance entre deux traits laser successifs

Environnement

- Préchauffage du support
- Positionnement de la pièce sur le support
- Teneur en oxygène dans la chambre de construction

Plan:

1. Cadre du projet et problématique

2. Le procédé SLM

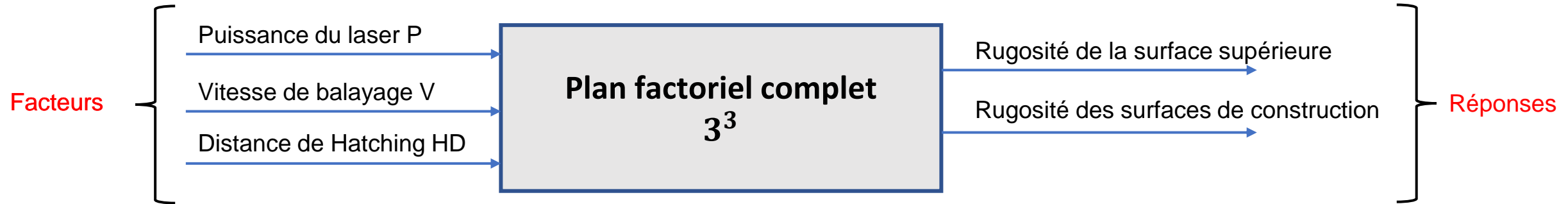
3. Etude expérimentale

4. Etude numérique

5. Application d'aide au choix

6. Conclusion et perspectives

Plan d'expériences



Niveaux des facteurs sélectionnés

Facteur	Niveaux		
Puissance P(W)	100	200	300
Vitesse (mm/s)	500	1000	1500
Distance de hatching (µm)	100	150	200

➔ On a 27 combinaisons de paramètres à étudier

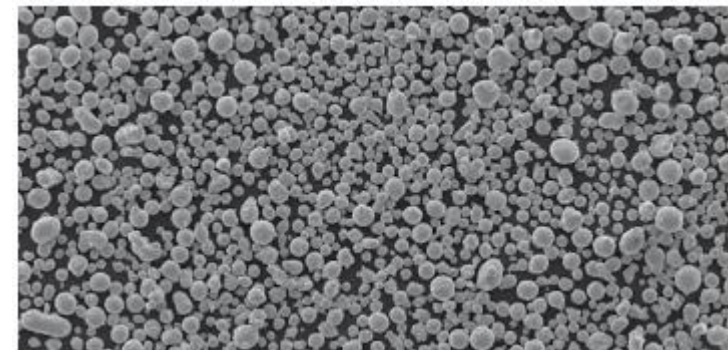
Impression des pièces

Imprimante 3D utilisée



Modèle	EOS M 290
Volume de construction	250mm*250mm*325 mm
Puissance laser maximale P	400 W
Vitesse maximale de balayage V	7000 mm/s
Epaisseur des couches	20 μm

Matériau utilisé: Poudre d'acier 316L

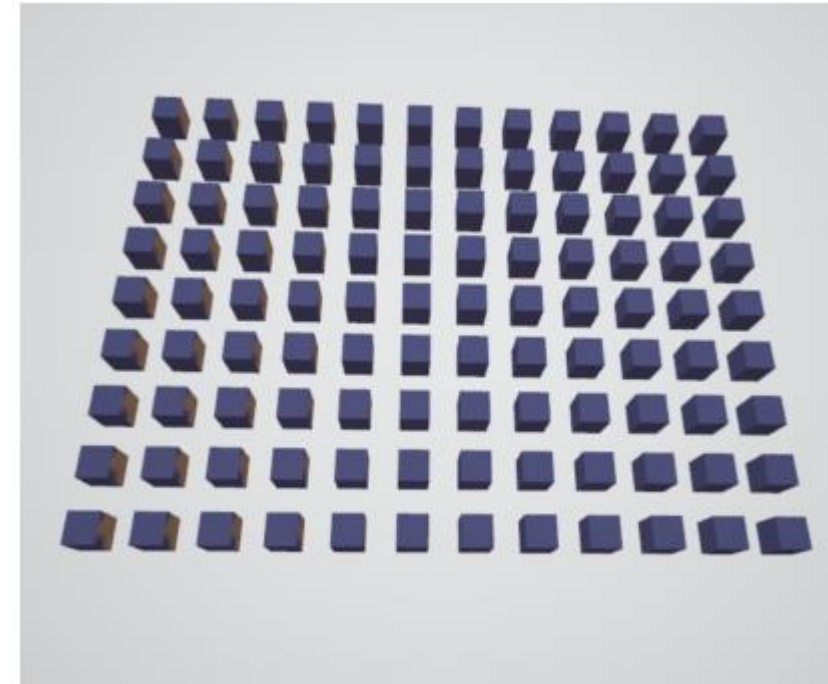
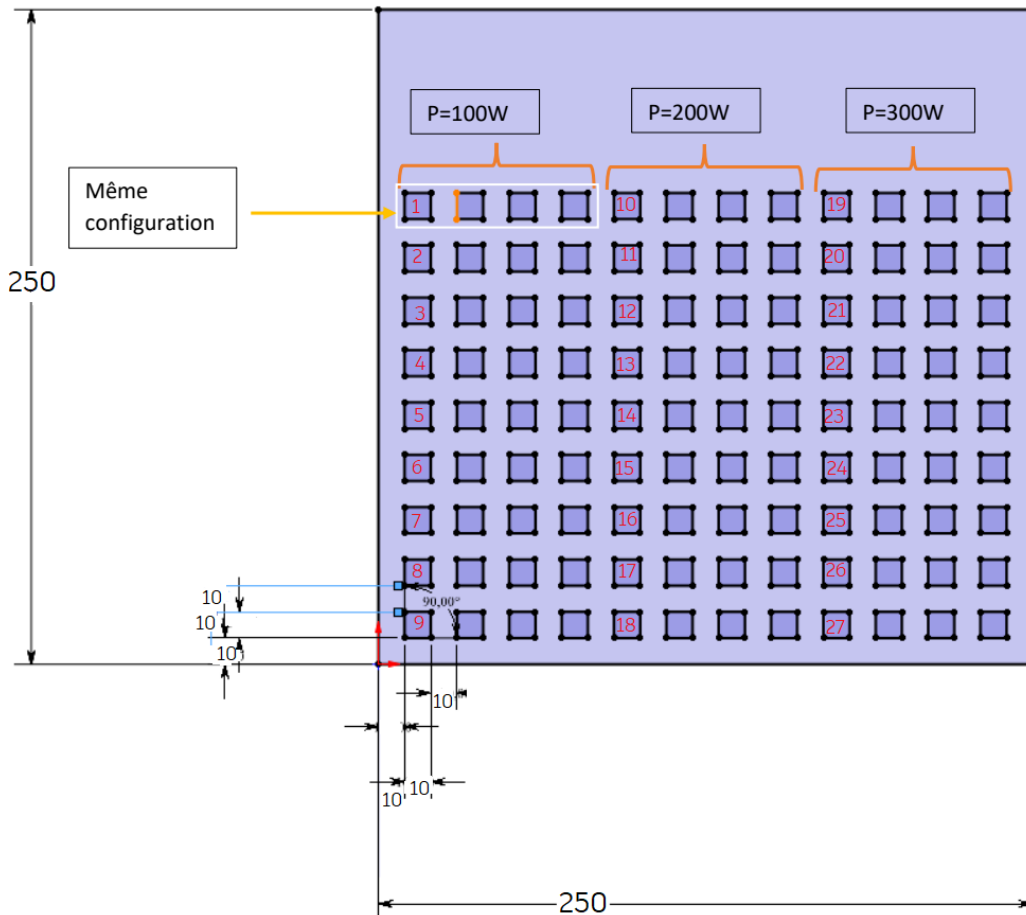


Impression des pièces

Disposition des pièces sur le plateau de construction

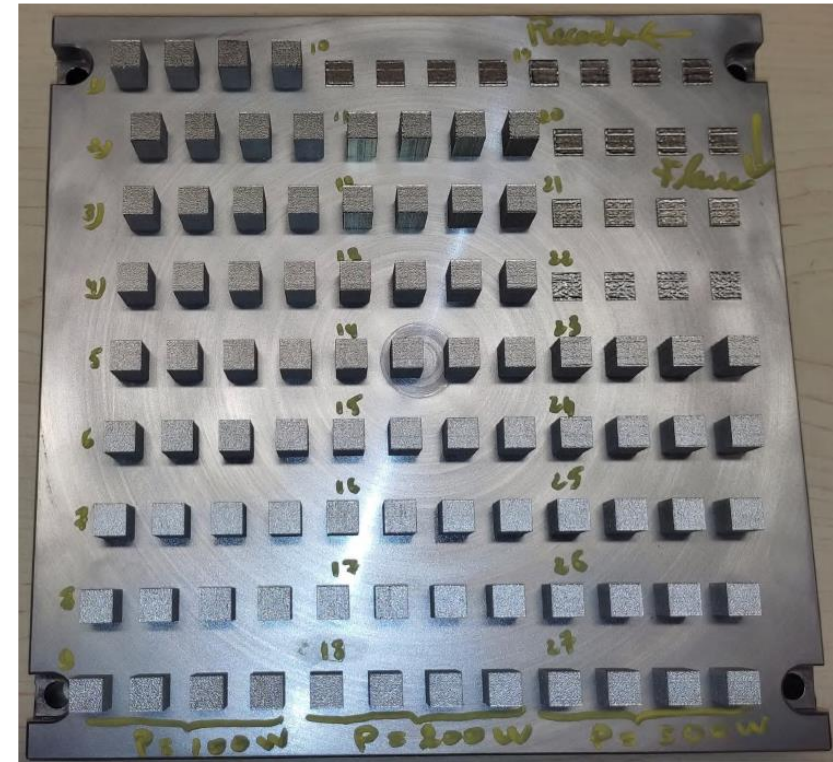
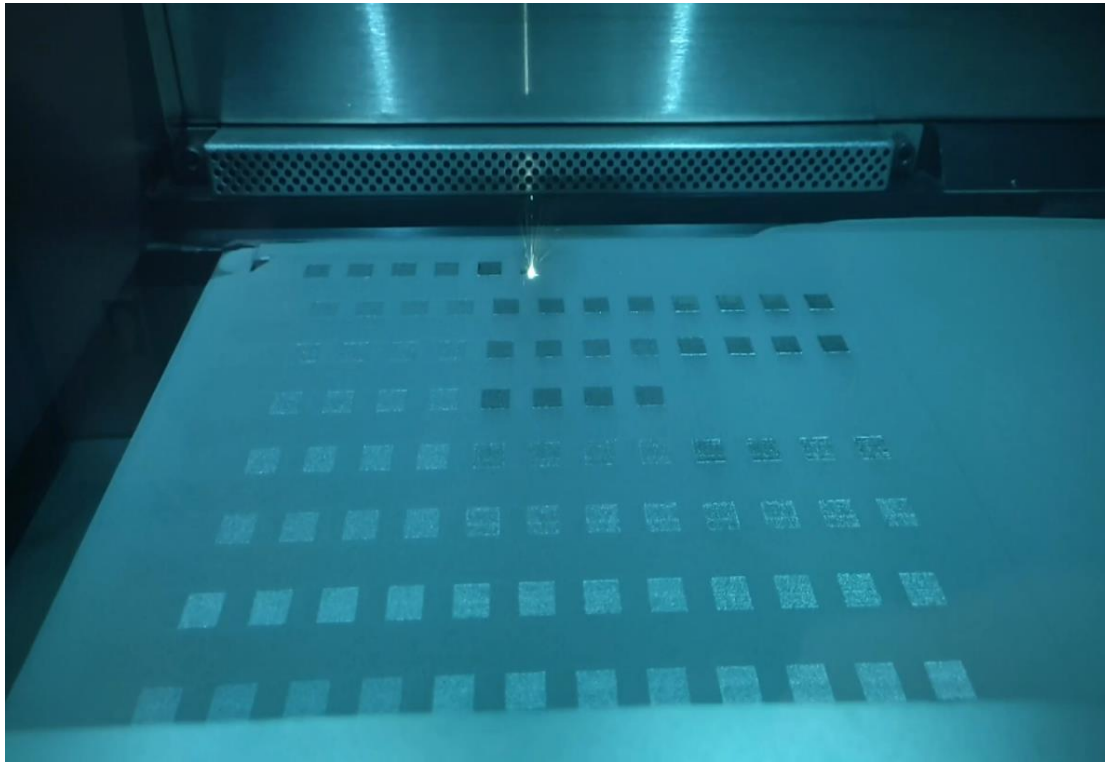
Fichier CAO

Fichier STL



Impression des pièces

Fabrication des pièces



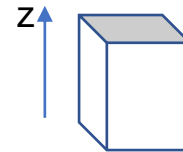
➔ 25 heures d'impression, **88 éprouvettes**

Impression des pièces

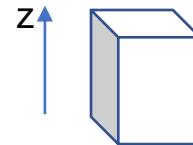
Découpage des pièces



Surfaces supérieures

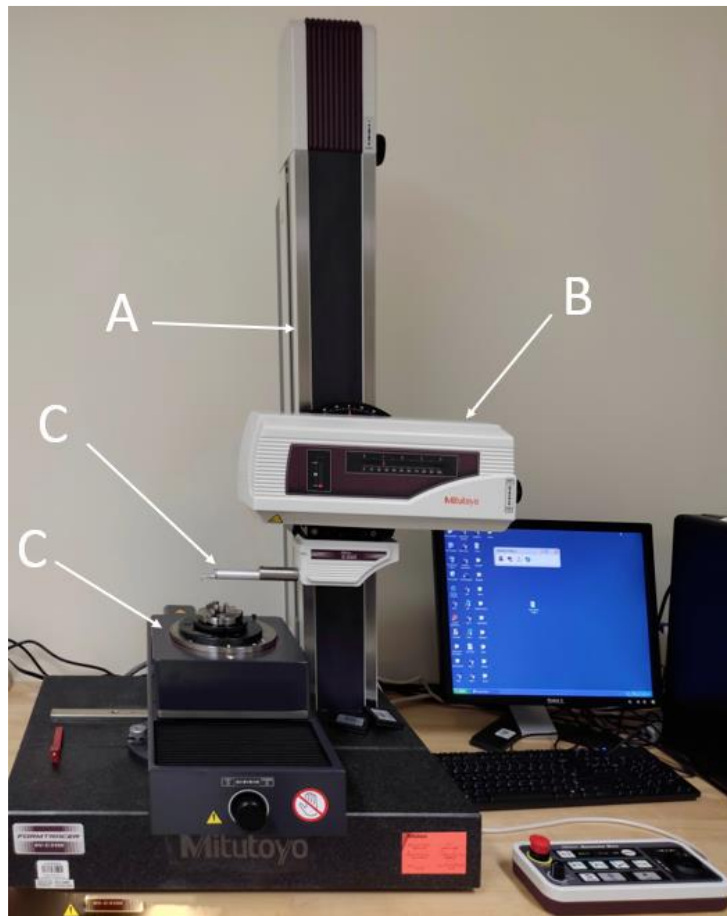


Surfaces de construction



Mesures de rugosité

Rugosimètre utilisé



Résultats

Config	$Ra_{sup}(\mu m)$			Ra_{sup}	Ecart	$Ra_{const}(\mu m)$			Ra_{const}	Ecart
	1	2	3	moyenne		1	2	3	moyenne	
1	8,19	10,85	8,63	9,22	1,43	11,54	11,23	12,60	11,79	0,72
2	8,37	7,19	8,72	8,09	0,80	10,00	11,56	11,06	10,87	0,80
3	9,70	9,57	8,80	9,35	0,48	10,00	9,60	9,56	9,72	0,24
4	6,89	8,42	8,80	8,04	1,01	10,30	10,90	10,56	10,59	0,30
5	7,93	6,71	6,88	7,17	0,66	10,06	10,38	10,58	10,34	0,27
6	9,22	9,04	9,37	9,21	0,17	10,04	9,03	9,45	9,51	0,51
7	8,36	8,31	7,89	8,19	0,26	11,81	11,85	11,68	11,78	0,09
8	8,71	12,07	11,97	10,92	1,91	11,95	10,62	10,48	11,01	0,81
9	12,74	9,68	13,60	12,01	2,06	12,39	11,06	13,06	12,17	1,02
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	10,60	10,24	11,65	10,83	0,73	13,86	15,70	13,31	14,29	1,25
12	8,12	9,16	8,75	8,68	0,52	11,52	11,16	11,75	11,47	0,30
13	8,90	9,40	7,32	8,54	1,09	13,29	13,93	12,54	13,25	0,69
14	10,01	8,82	9,87	9,57	0,65	13,10	13,84	12,90	13,28	0,49
15	12,25	11,32	10,17	11,25	1,04	13,91	14,15	13,23	13,76	0,48
16	10,00	9,78	10,12	9,97	0,17	12,25	12,34	12,21	12,27	0,07
17	8,40	7,94	8,49	8,28	0,29	12,36	10,86	12,91	12,05	1,06
18	9,23	10,60	9,60	9,81	0,71	10,84	13,15	13,50	12,50	1,45
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	12,69	13,82	13,24	13,25	0,56	13,81	12,99	14,51	13,77	0,76
24	12,48	14,97	14,18	13,88	1,27	14,18	13,36	14,33	13,96	0,52
25	14,96	11,81	13,96	13,58	1,61	13,50	13,45	13,96	13,64	0,28
26	11,21	8,62	10,95	10,26	1,42	9,71	11,74	13,45	11,63	1,87
27	10,66	10,90	10,46	10,68	0,22	13,76	16,32	15,76	15,28	1,35

Exploitation des résultats

Densité d'énergie volumique

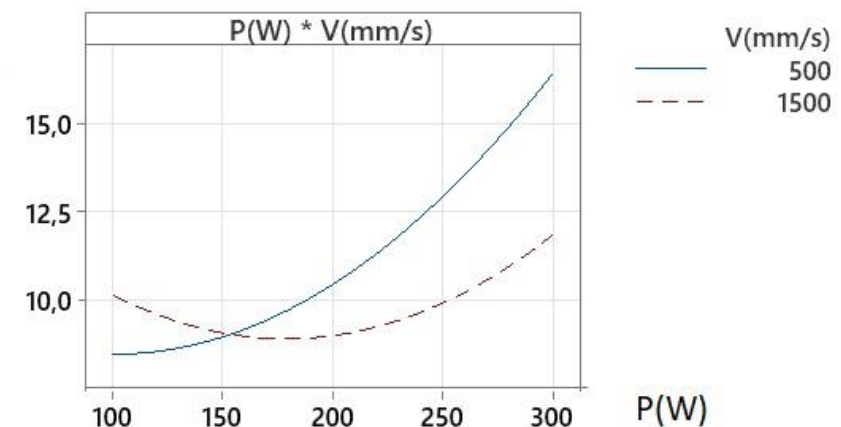
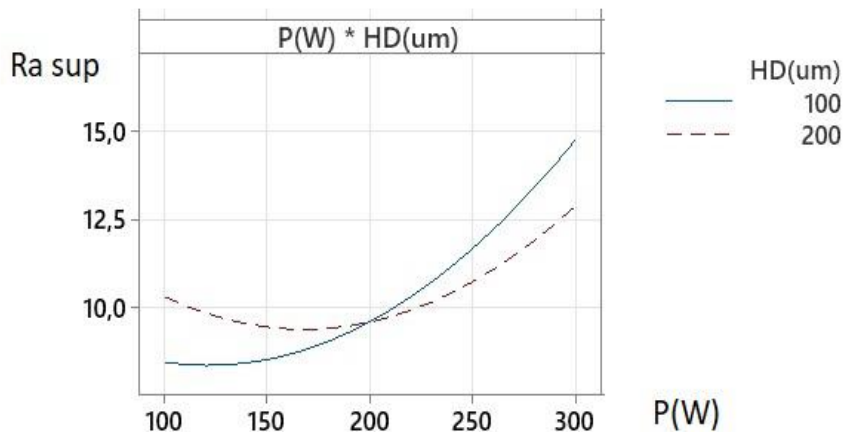
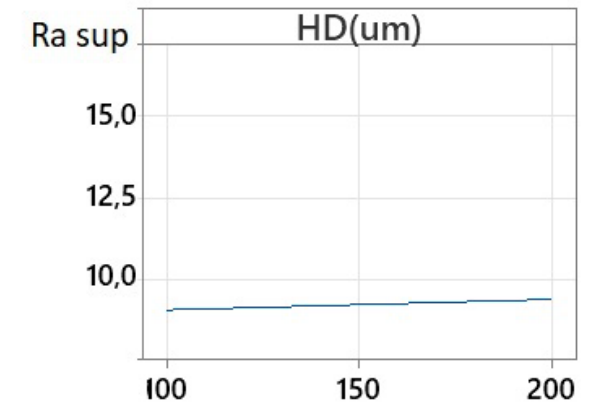
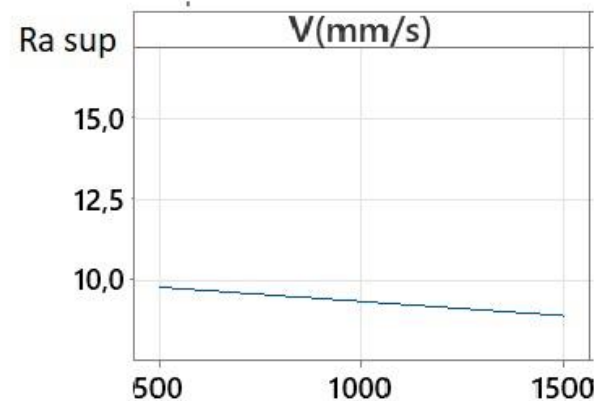
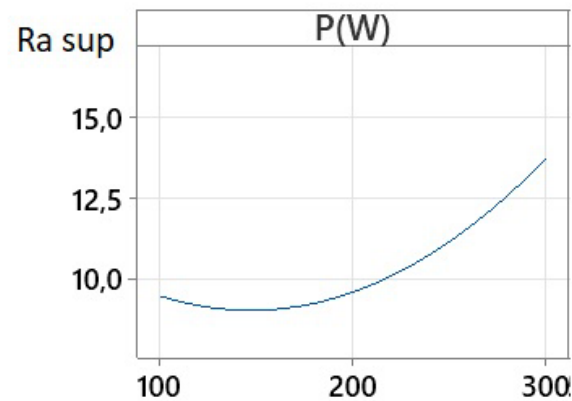
$$E_v = \frac{P}{e \cdot V \cdot HD}$$

Config	P(W)	V(mm/s)	HD(um)	E_v	Ra_{sup}	Ra_{const}
1	100	500	100	100,00	9,22	11,79
2	100	500	150	66,67	8,09	10,87
3	100	500	200	50,00	9,35	9,72
4	100	1000	100	50,00	8,04	10,59
5	100	1000	150	33,33	7,17	10,34
6	100	1000	200	25,00	9,21	9,51
7	100	1500	100	33,33	8,19	11,78
8	100	1500	150	22,22	10,92	11,01
9	100	1500	200	16,67	12,01	12,17
10	200	500	100	200,00	-	-
11	200	500	150	133,33	10,83	14,29
12	200	500	200	100,00	8,68	11,47
13	200	1000	100	100,00	8,54	13,25
14	200	1000	150	66,67	9,57	13,28
15	200	1000	200	50,00	11,25	13,76
16	200	1500	100	66,67	9,97	12,27
17	200	1500	150	44,44	8,28	12,05
18	200	1500	200	33,33	9,81	12,50
19	300	500	100	300,00	-	-
20	300	500	150	200,00	-	-
21	300	500	200	150,00	-	-
22	300	1000	100	150,00	-	-
23	300	1000	150	100,00	13,25	13,77
24	300	1000	200	75,00	13,88	13,96
25	300	1500	100	100,00	13,58	13,64
26	300	1500	150	66,67	10,26	11,63
27	300	1500	200	50,00	10,68	15,28

Exploitation des résultats

Pour la surface supérieure

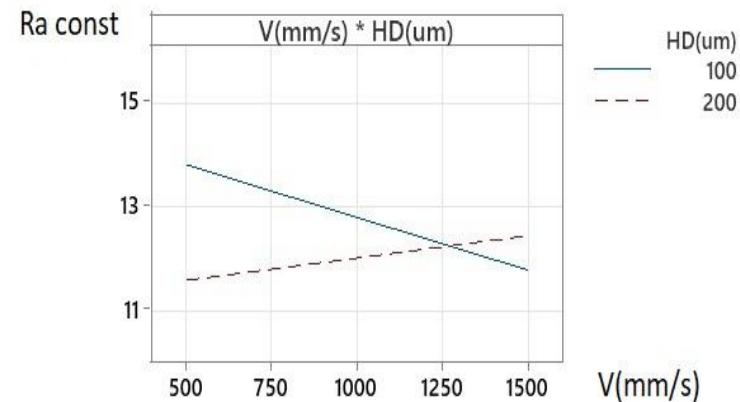
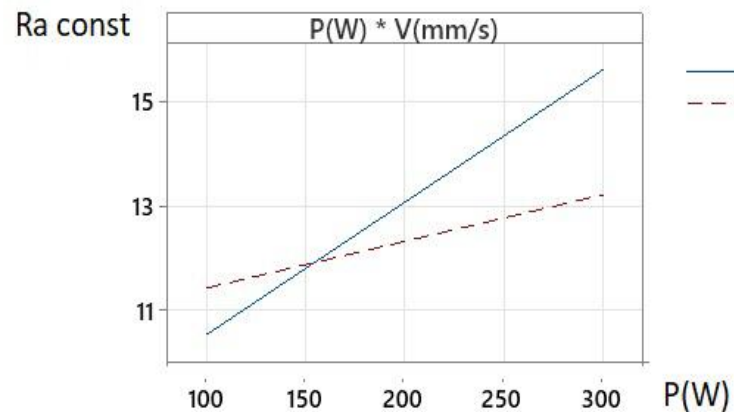
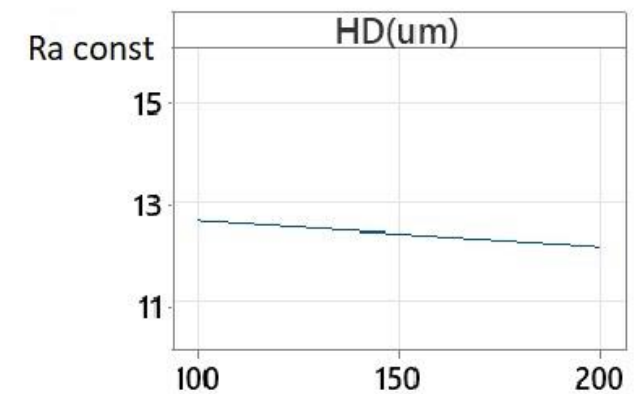
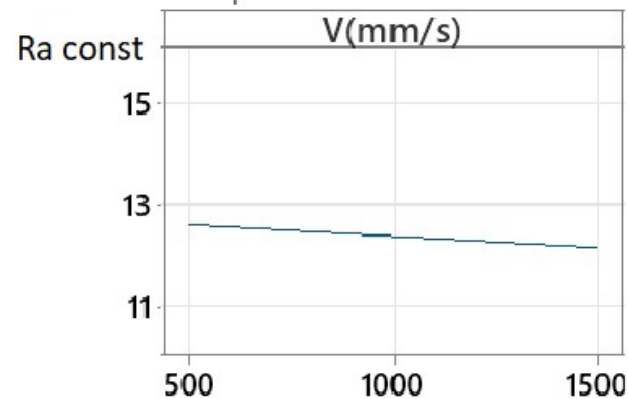
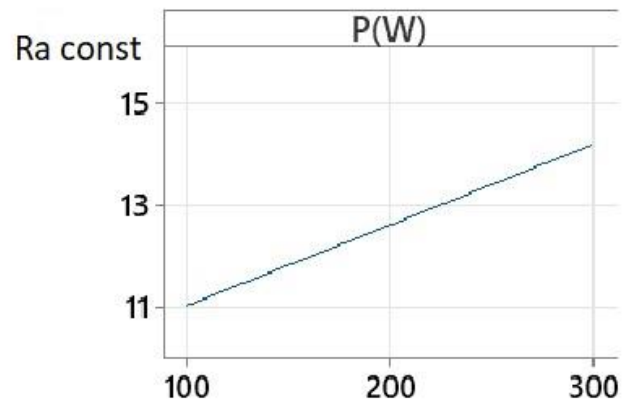
$$Ra_{sup} = 2.36 - 0.0041P + 0.00479V + 0.0370HD + 0.0002P^2 + 0.000031P*V - 0.000186P*HD$$



Exploitation des résultats

Pour les surfaces de construction

$$Ra_{const} = 12.36 + 0.03359P - 0.0019V - 0.0365HD - 0.000016P*V + 0.000029V*HD$$



Plan:

1. Cadre du projet et problématique

2. Le procédé SLM

3. Etude expérimentale

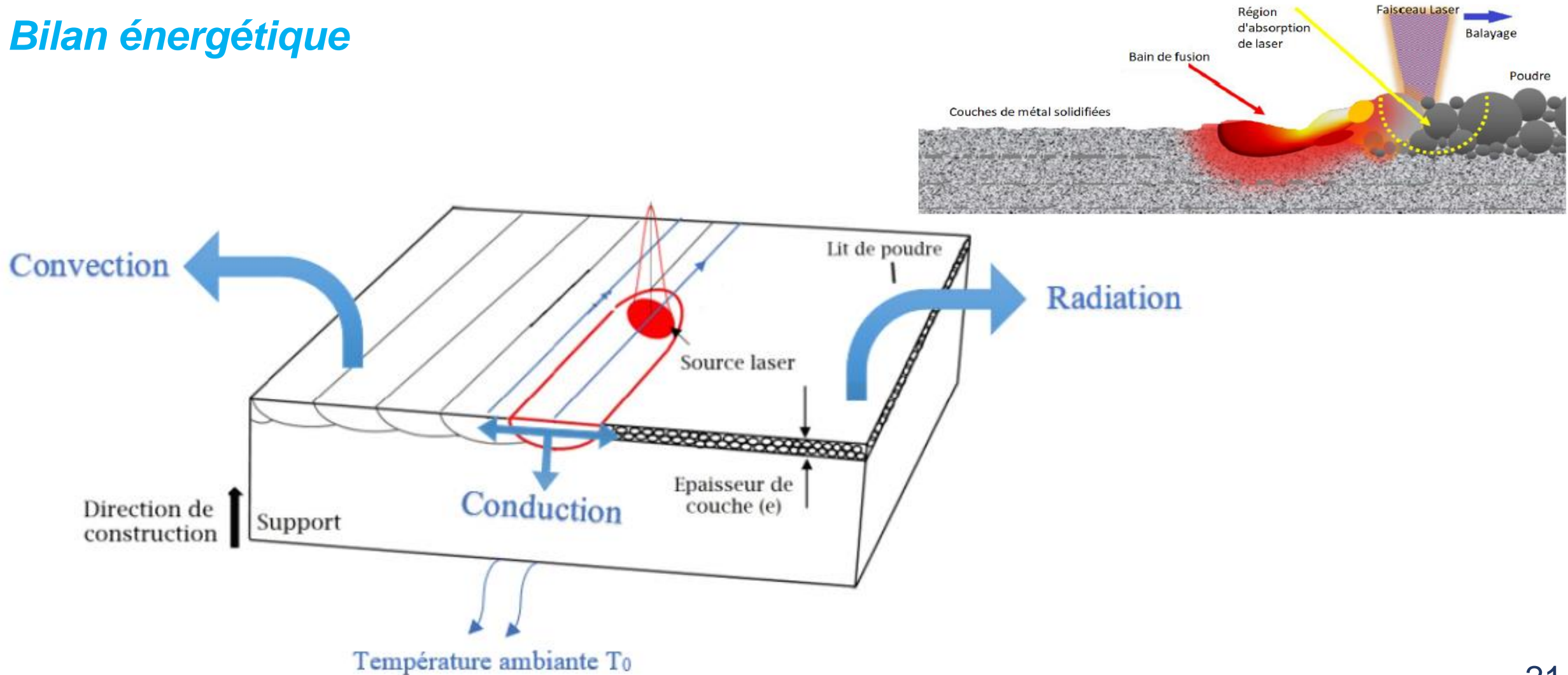
4. Etude numérique

5. Application d'aide au choix

6. Conclusion et perspectives

Modélisation du comportement thermique

Bilan énergétique



Modélisation du comportement thermique

Mise en équation

Résolution de l'équation de la chaleur en régime transitoire non linéaire :

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k(T)\nabla T) = Q$$

Condition aux limites de convection: $q_{conv} = h(T_0 - T)$

Condition aux limites de rayonnement: $q_{ray} = \varepsilon\sigma(T_0^4 - T^4)$

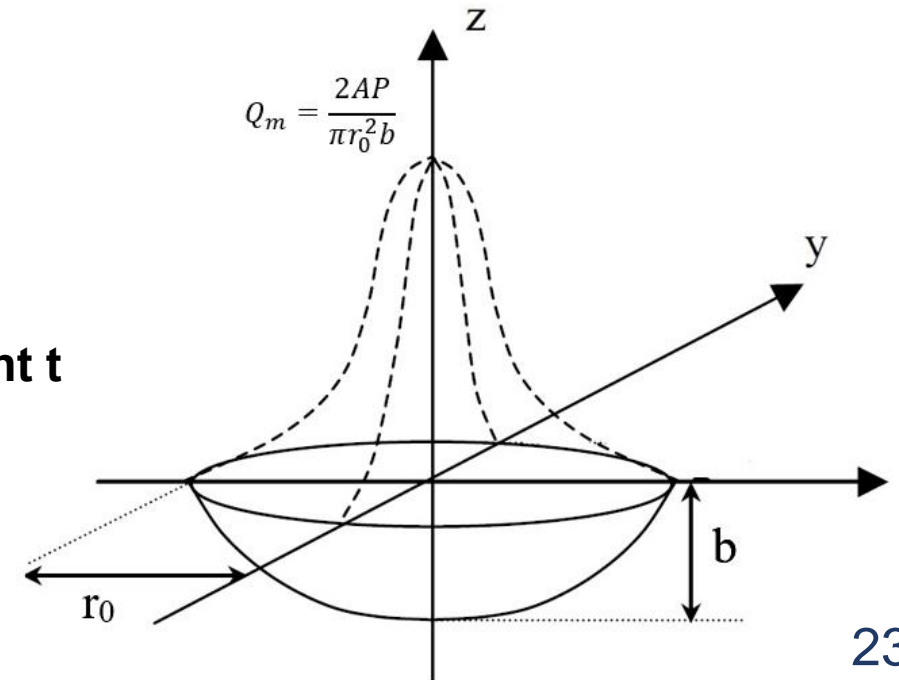
Condition initiale : $T(x, y, z, t)_{t=0} = T_0$

Modélisation du comportement thermique

Source de chaleur

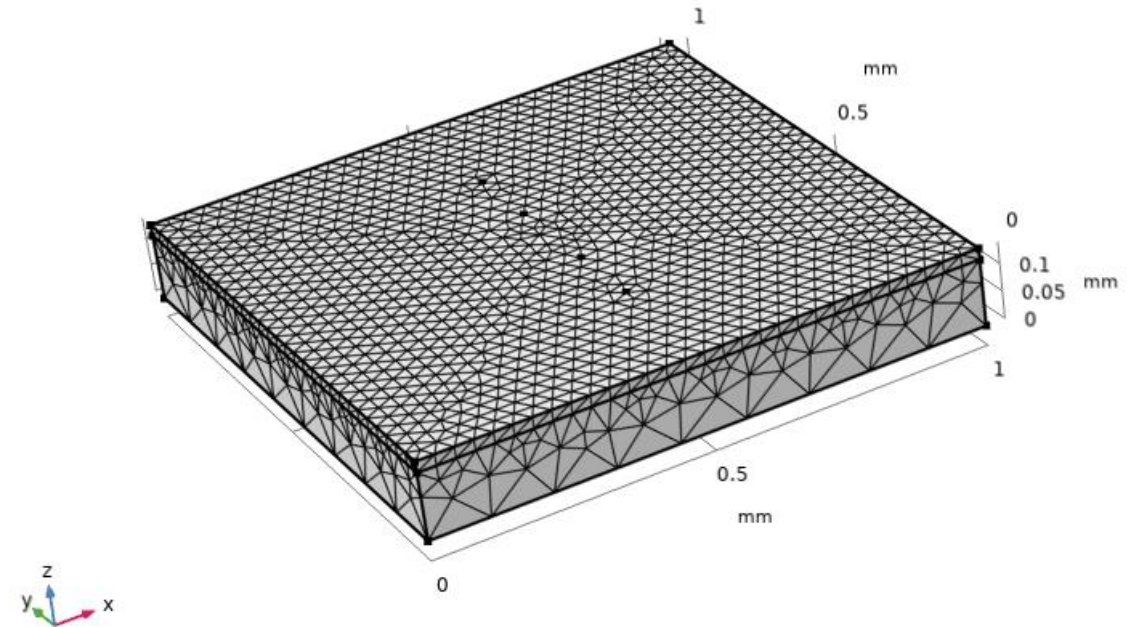
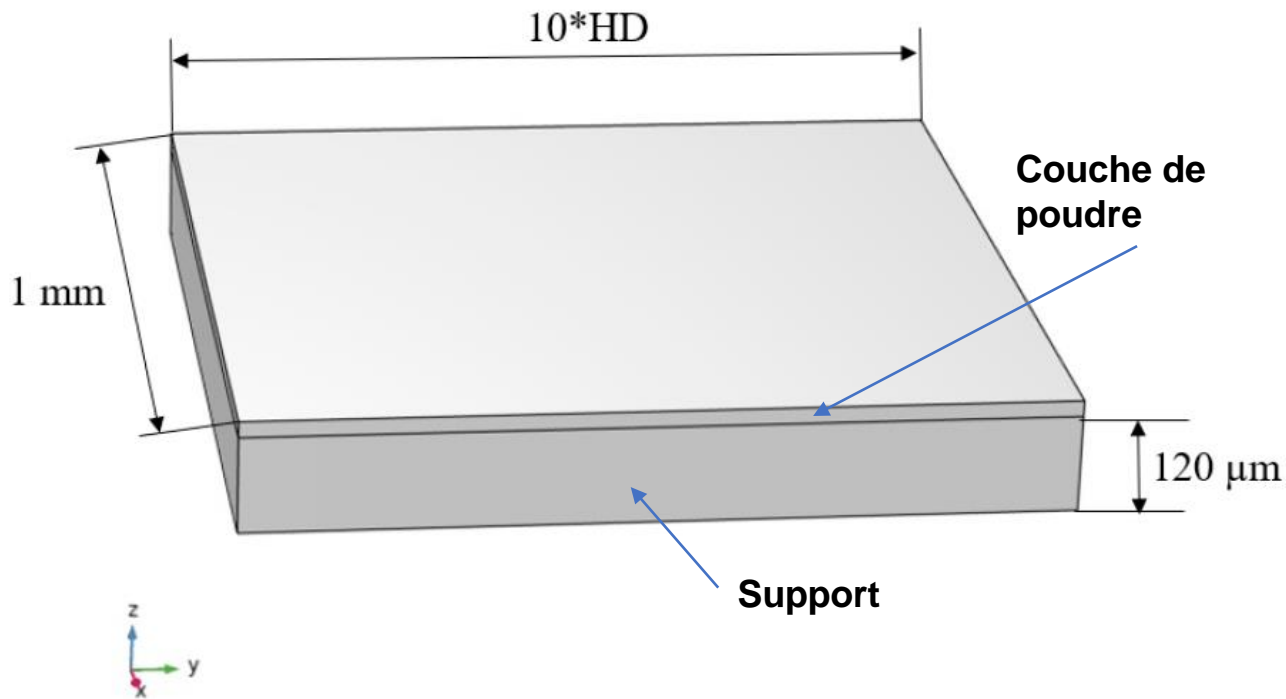
$$Q_{Laser} = \frac{2AP}{\pi r_0^2 b} \exp\left(\frac{-2((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)}{r_0^2}\right) \exp\left(\frac{z - z_0}{b}\right)$$

avec: **A**: Absorptivité de la surface
P(W): La puissance du laser
 r_0 (μm): Le rayon du faisceau laser
 b (μm): La pénétration dans le lit de poudre
 (x_0, y_0, z_0) : Coordonnées de la source laser à l'instant t



Simulation du comportement thermique

Géométrie et maillage



HD=100 μm et épaisseur de la poudre = 20 μm

15496 éléments et 3410 noeuds HD=100.

Simulation du comportement thermique

Paramètres

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$h = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$\varepsilon = 0.35$$

$$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2\text{K}^4$$

T (°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J.K ⁻¹ .g ⁻¹)	k (W/m.K)
25	7950	0.47	13.4
100	7921	0.49	15.5
200	7880	0.52	17.6
300	7833	0.54	19.4
400	7785	0.56	21.8
500	7735	0.57	23.4
600	7681	0.59	24.5
700	7628	0.60	25.1
800	7575	0.63	27.2
900	7520	0.64	27.9
1000	7462	0.66	29.1
1100	7411	0.67	29.3
1200	7361	0.70	30.9
1300	7311	0.71	31.1
1385	7269	0.72	-
1450	6881	0.83	28.5
1500	6842	0.83	29.5
1600	6765	0.83	30.5

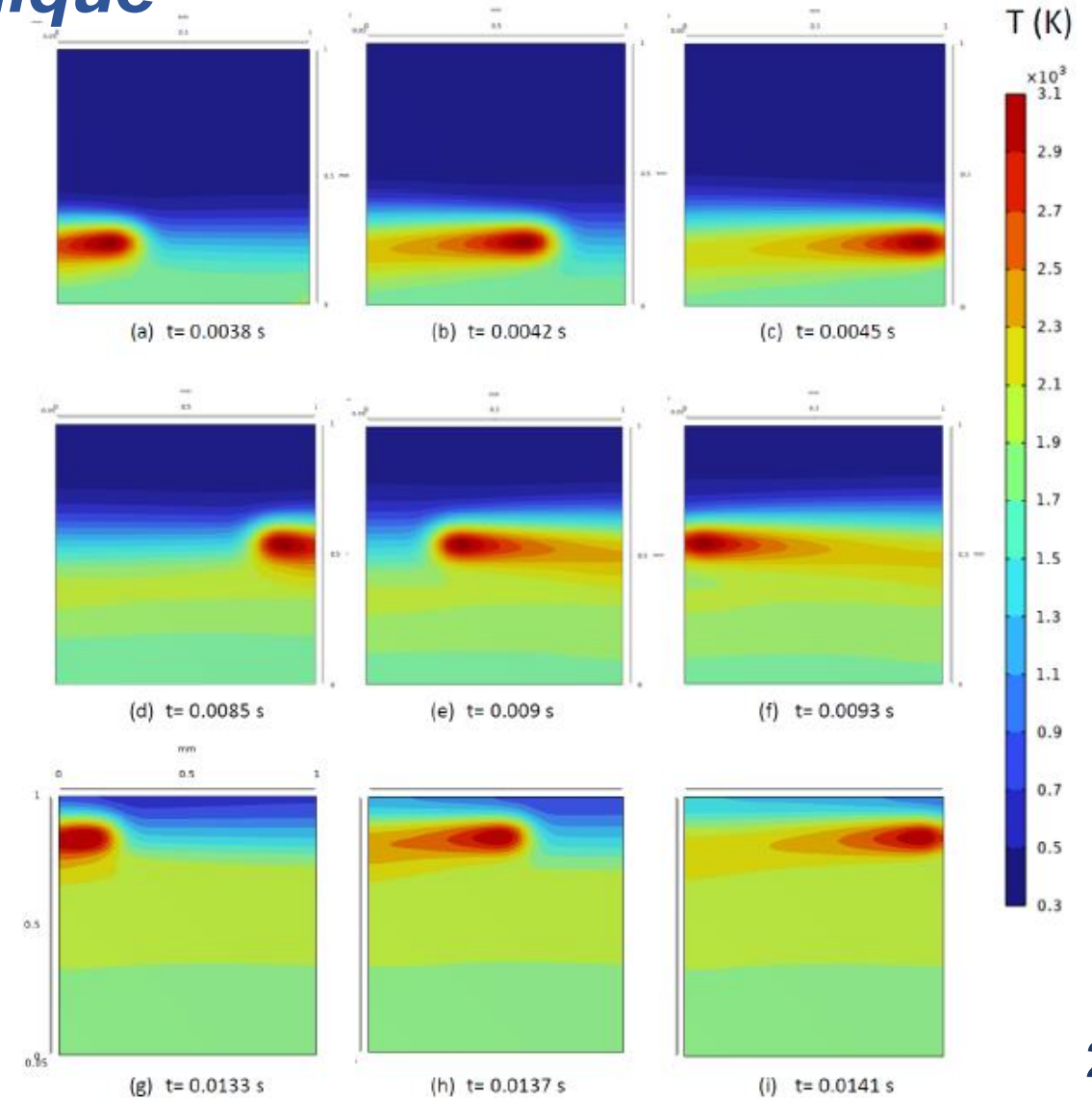
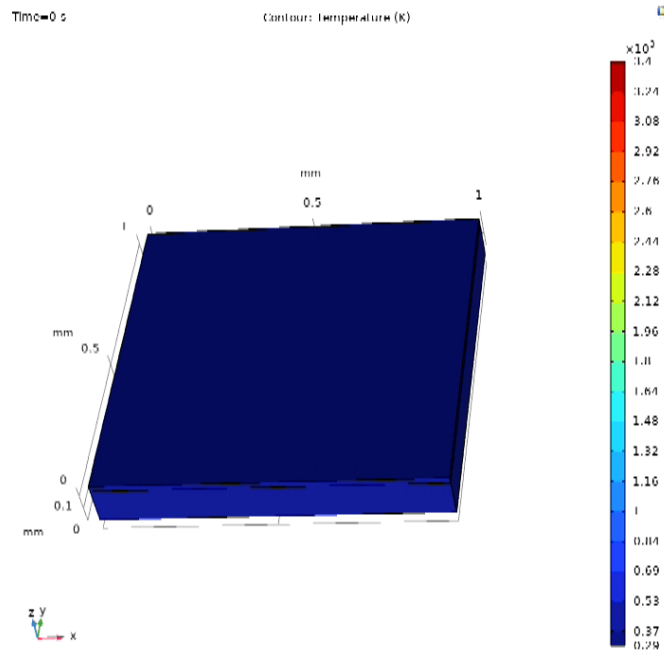
Paramètre	Valeur	Unité
Longueur (L)	10*HD	[mm]
Largeur (W)	1	[mm]
Hauteur (H)	140	[μm]
Puissance laser (P)	200	[W]
Vitesse de balayage (V)	1000	[mm/s]
Distance de hatching (HD)	100	[μm]
Rayon du faisceau laser (r)	100	[μm]
Epaisseur de couche (e)	20	[μm]
Température de fusion de l'acier 316L (Tf)	1650	[K]
Température d'évaporation de l'acier 316L (Tev)	3086	[K]
Absorptivité de la poudre 316l	0,68	1
Point de référence dans la direction x (x0)	-2*r	[μm]
Point de référence dans la direction y (y0)	0,5*HD	[μm]
Penetration du faisceau dans la poudre (b)	60	[μm]

Simulation du comportement thermique

Résultats de simulation: isothermes

$P = 200 \text{ W}$ - $V = 1000 \text{ mm/s}$ - $HD=100\mu\text{m}$

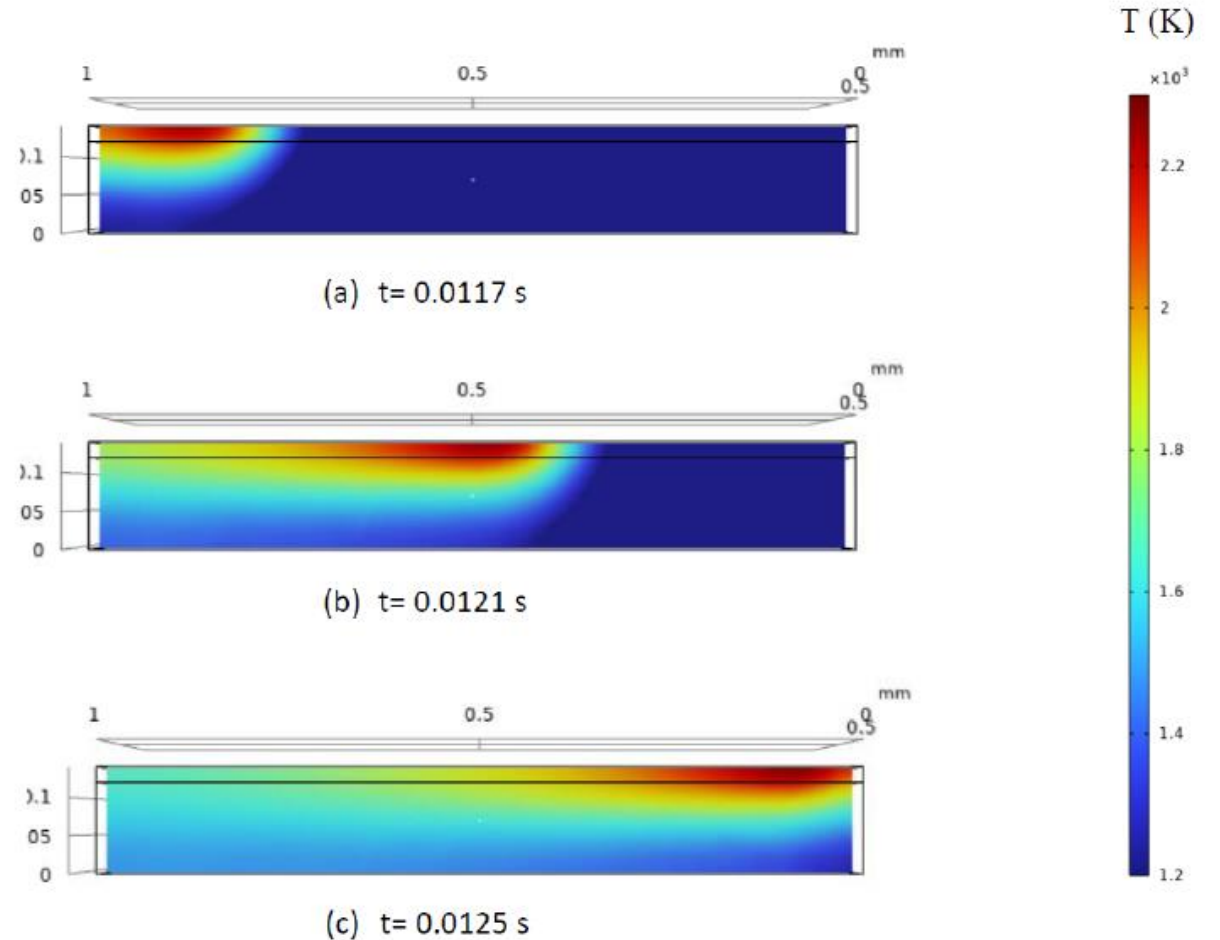
$T_f = 1650 \text{ K} < T_{\text{simulée zone fondue}} < T_{ev} = 3086 \text{ K}$



Simulation du comportement thermique

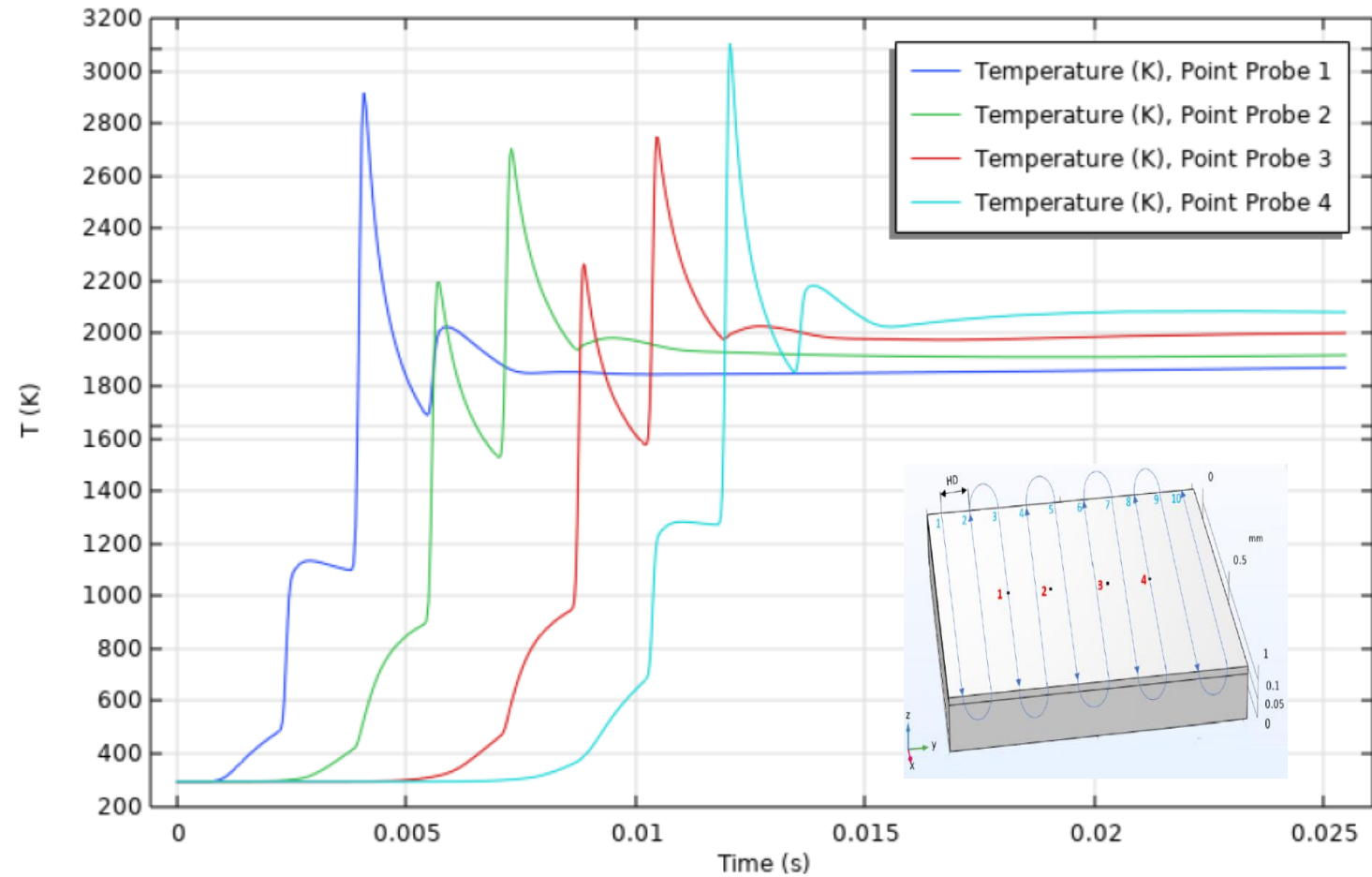
Résultats de simulation: isothermes

Profondeur du bain de fusion = $60 \mu\text{m}$



Simulation du comportement thermique

Résultats de simulation :
évolution de la température en fonction du temps



Plan:

1. Cadre du projet et problématique

2. Le procédé SLM

3. Etude expérimentale

4. Etude numérique

5. Application d'aide au choix

6. Conclusion et perspectives

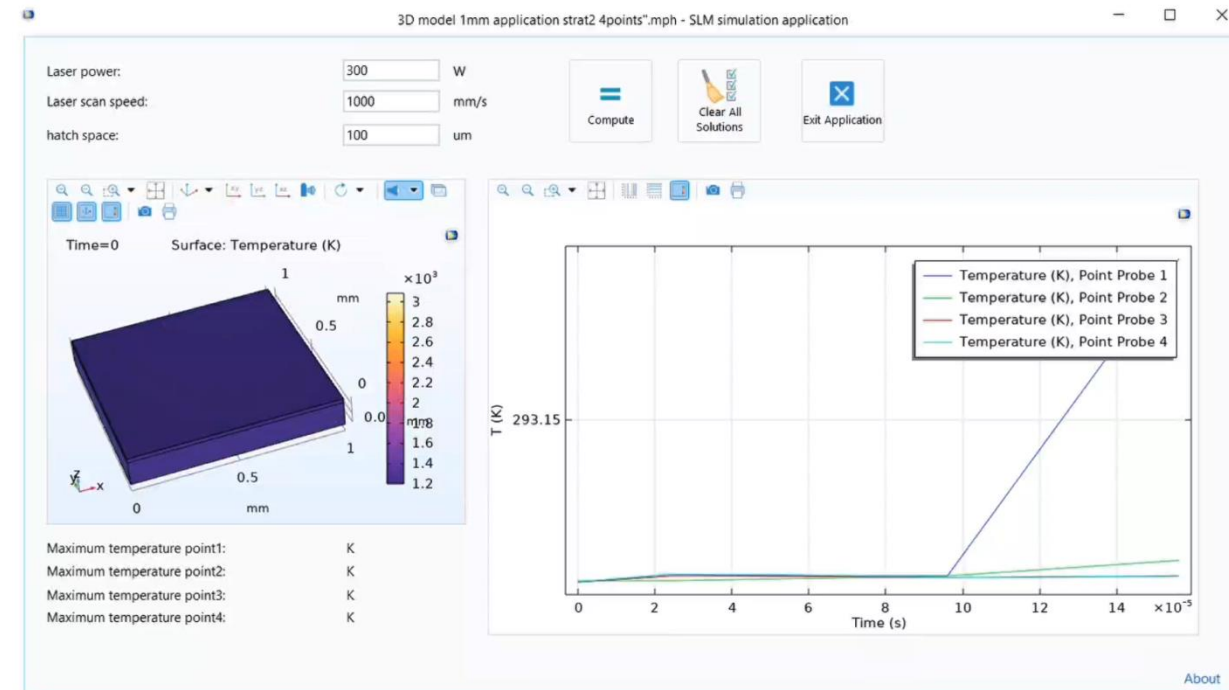
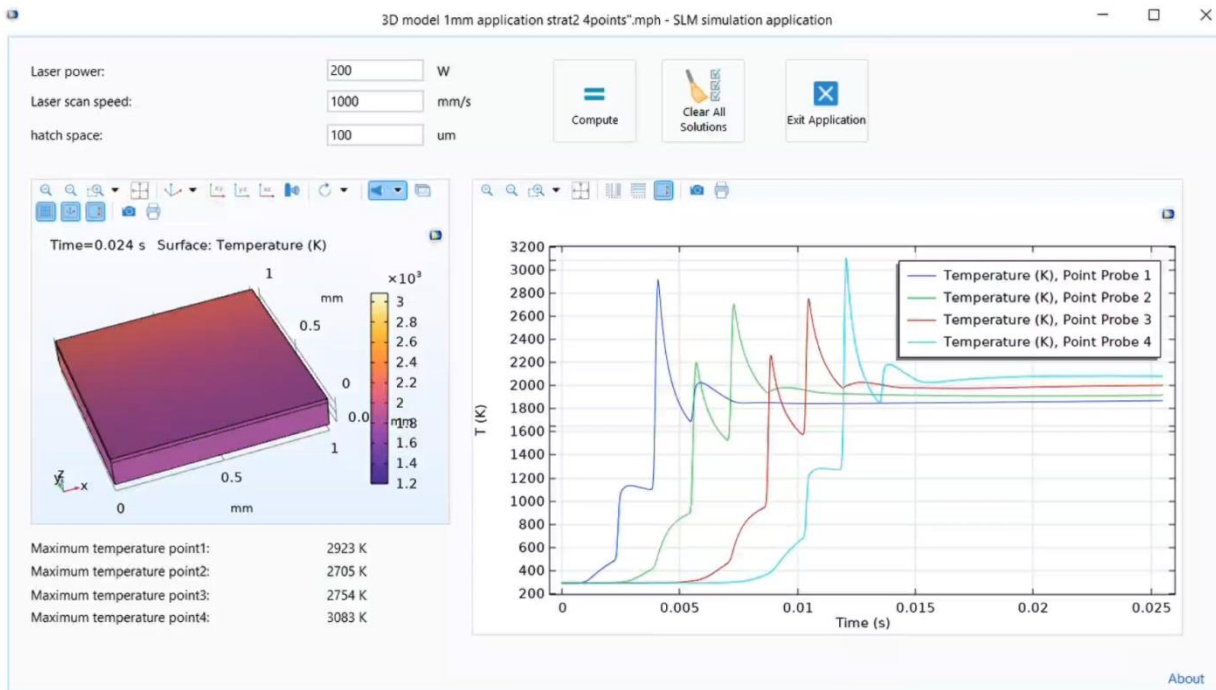
Application d'aide au choix

Interface utilisateur



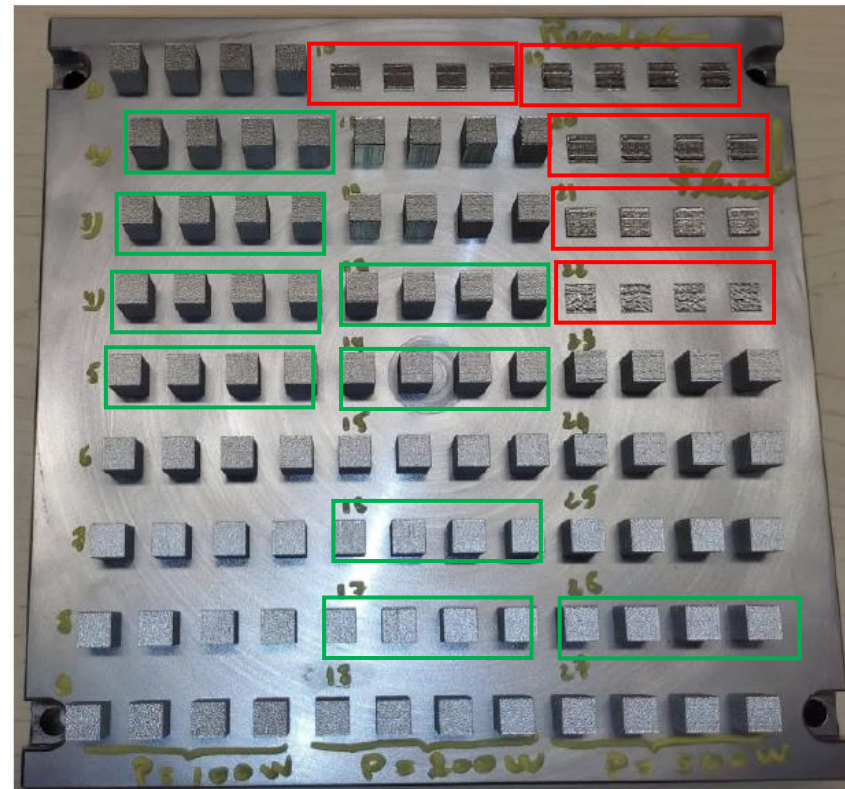
Paramètres recommandés

Paramètres rejetés



Application d'aide au choix

Config	Tmax 1	Tmax 2	Tmax 3	Tmax 4	Bon choix	Interprétation
1	3159	2390	2485	3228	Non	Évaporation sur les lignes
2	2469	1907	1937	2540	Oui	Fusion complète
3	2329	1663	1670	2353	Oui	Fusion complète
4	1919	1773	1809	1978	Oui	Fusion complète
5	1879	1680	1722	1896	Oui	Fusion complète
6	1566	925	926	1565	Non	Fusion incomplète
7	1411	1312	1321	1477	Non	Fusion incomplète
8	1312	977	967	1323	Non	Fusion incomplète
9	1251	727,8	725,4	1247	Non	Fusion incomplète
10	4644	4313	4474	5122	Non	Évaporation sur et entre les lignes
11	4255	3127	3169	4363	Non	Évaporation sur et entre les lignes
12	3995	2316	2323	4044	Non	Évaporation sur les ligne et fusion entre les lignes
13	2923	2705	2754	3084	Oui	Fusion complete
14	2710	1976	1969	2737	Oui	Fusion complete
15	2549	1440	1442	2601	Non	Fusion sur les ligne et manque de fusion entre les lignes
16	2279	2115	2108	2325	Oui	Fusion complète
17	2104	1669	1684	2141	Oui	Fusion complète
18	2012	1106	1107	2023	Non	Fusion incomplète entre les lignes
19	6527	6071	6267	7192	Non	Évaporation sur et entre les lignes
20	6025	4345	4411	6200	Non	Évaporation sur et entre les lignes
21	5650	3110	3122	5677	Non	Évaporation sur et entre les lignes
22	4041	3713	3801	4288	Non	Évaporation sur et entre les lignes
23	3730	2577	2591	3734	Non	Fusion entre les ligne avec une légère évaporation sur les lignes
24	3515	1889	1889	3553	Non	Évaporation sur les ligne et une fusion entre les lignes
25	3128	2783	2834	3163	Non	Bonne fusion entre les lignes et une évaporation sur les lignes
26	2865	2010	1997	2856	Oui	Fusion complète
27	2680	1435	1435	2660	Non	Fusion sur les lignes mais manque de fusion entre les lignes



Combinaisons de paramètres (P,V,HD) rejetées

Combinaisons de paramètres (P,V,HD) recommandées

Application d'aide au choix

Config	P(W)	V(mm/s)	HD(um)	Bon choix	Ra sup	Ra const
1	100	500	100	Non	9,22	11,79
2	100	500	150	Oui	8,09	10,87
3	100	500	200	Oui	9,35	9,72
4	100	1000	100	Oui	8,04	10,59
5	100	1000	150	Oui	7,17	10,34
6	100	1000	200	Non	9,21	9,51
7	100	1500	100	Non	8,19	11,78
8	100	1500	150	Non	10,92	11,01
9	100	1500	200	Non	12,01	12,17
10	200	500	100	Non		
11	200	500	150	Non	10,83	14,29
12	200	500	200	Non	8,68	11,47
13	200	1000	100	Oui	8,54	13,25
14	200	1000	150	Oui	9,57	13,28
15	200	1000	200	Non	11,25	13,76
16	200	1500	100	Oui	9,97	12,27
17	200	1500	150	Oui	8,28	12,05
18	200	1500	200	Non	9,81	12,50
19	300	500	100	Non		
20	300	500	150	Non		
21	300	500	200	Non		
22	300	1000	100	Non		
23	300	1000	150	Non	13,25	13,77
24	300	1000	200	Non	13,88	13,96
25	300	1500	100	Non	13,58	13,64
26	300	1500	150	Oui	10,26	11,63
27	300	1500	200	Non	10,68	15,28



Pour chaque puissance :
Combinaisons de Paramètres (P,V,HD) recommandées



Bonne rugosité sur la surface supérieure et les surfaces de construction

Plan:

1. Cadre du projet et problématique

2. Le procédé SLM

3. Etude expérimentale

4. Etude numérique

5. Application d'aide au choix

6. Conclusion et perspectives

Conclusion

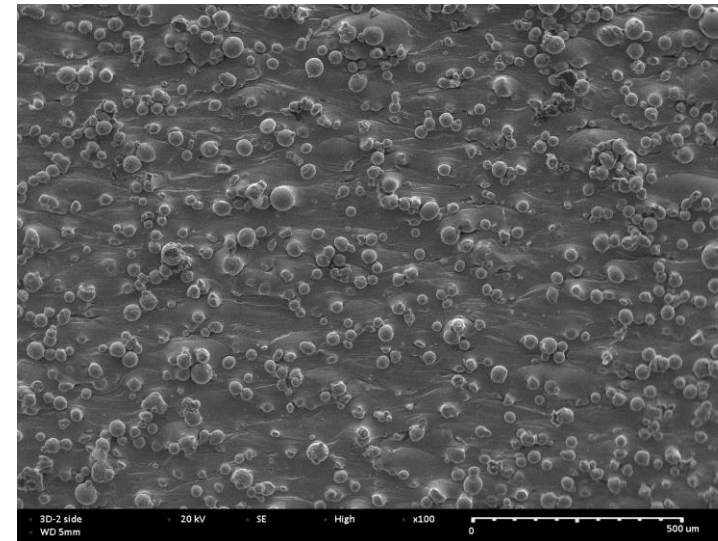
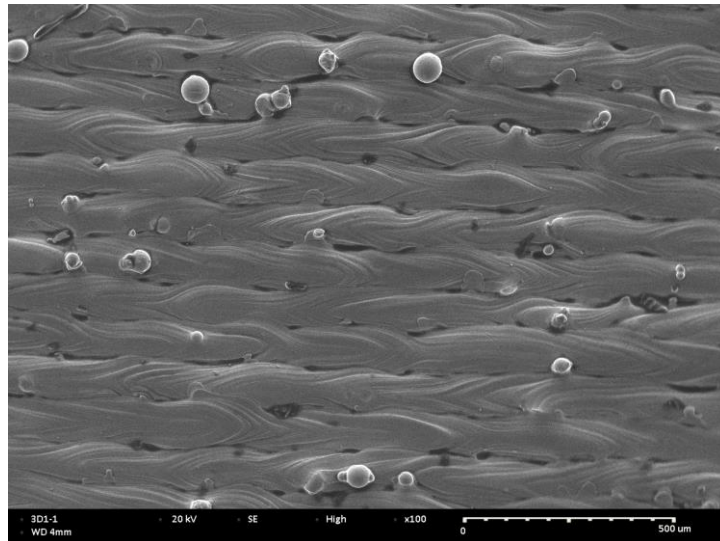
- Etude expérimentale du procédé SLM
 - Plan d'expériences
 - Impression des échantillons
 - Etude de l'influence des principaux paramètres sur l'état des surfaces

- Etude numérique du procédé SLM
 - Modélisation du comportement thermique
 - Simulation numérique de la distribution spatio-temporelle de la température

- Développement d'une application d'aide au choix des paramètres pour la fabrication additive du 316L par le procédé SLM

Perspectives

- Réaliser d'autres essais de caractérisation en vue de valider le modèle proposé
- Etendre cette étude pour d'autres types de matériaux



Merci pour votre attention