LaM CU3E
Laboratoire de mécanique, multiphysique, multiéchelle

CRITT MATÉRIAUX INNOVATION

Mise au point et développement d'un procédé de Fabrication Additive Métallique accessible au plus grand nombre

Sophie Badin, Jean-François Witz, Vincent Magnier, Delphine Auzene, Denis Najjar

GDR Concord, UTT, 9 0ctobre 2025

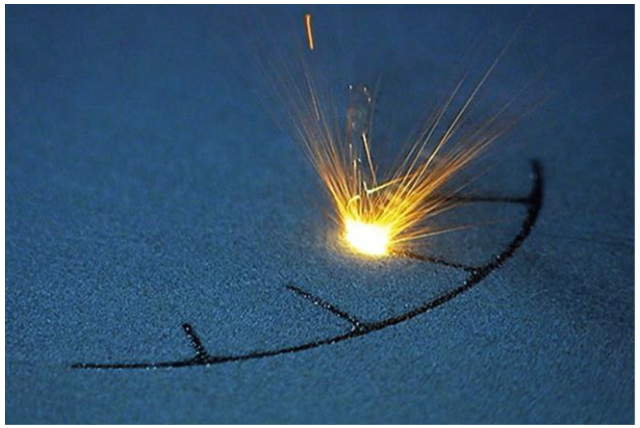
Université de Lille

cnrs

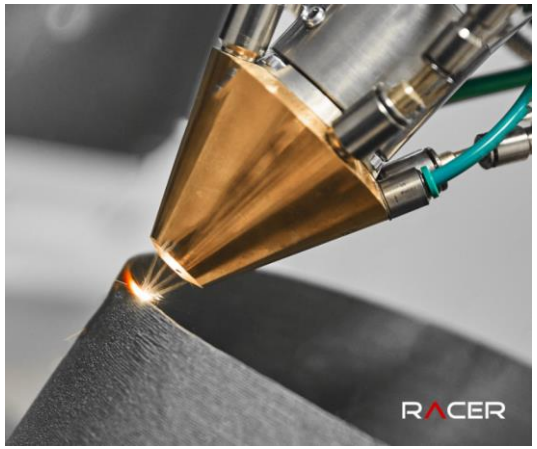
centralelille

État de l'art de la fabrication additive métallique (FAM)

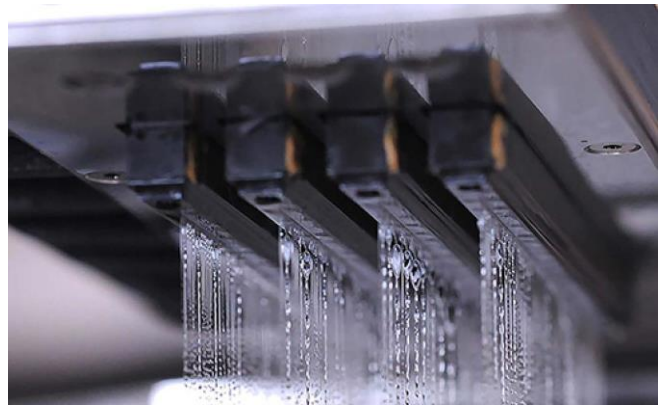
Powder Bed Fusion (PBF)

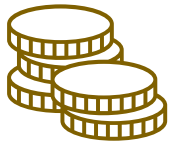


Direct Energy Deposition (DED)



Binder Jetting (BJ)





[200k€ - 1000k€]

Poudres libres



\+

pollution

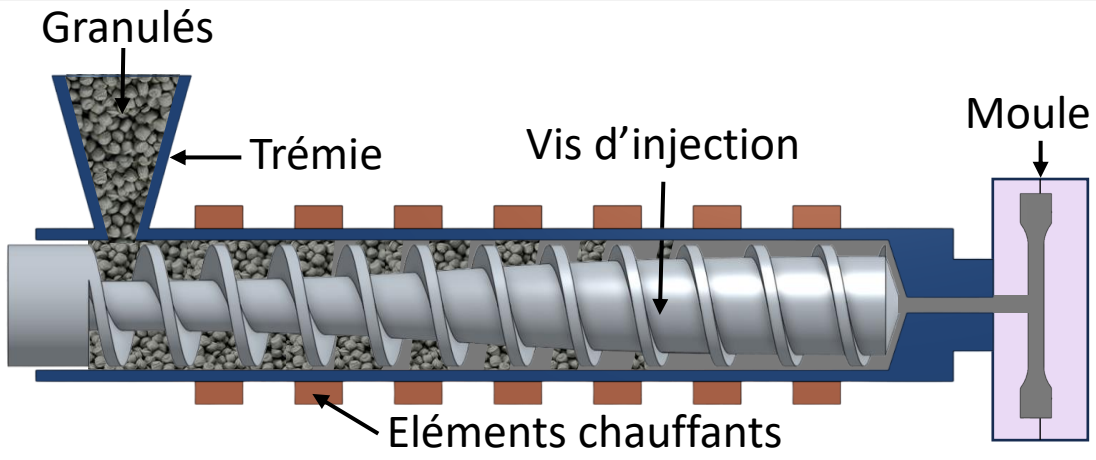
machine

Émergence nouvelles technologies inspirées du **Metal Injection Molding** (MIM)

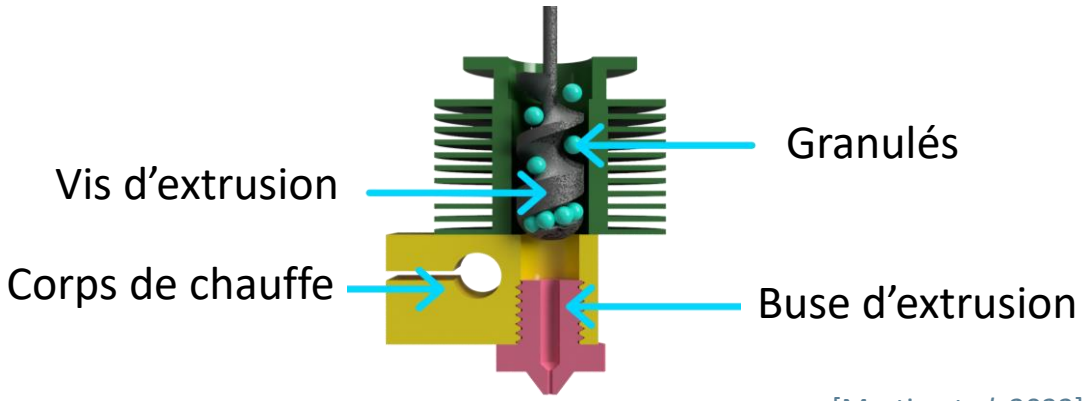
Images : Irepa Laser, Racer Machinery International, ExOne

Présentation des procédés MIM et MIM-like

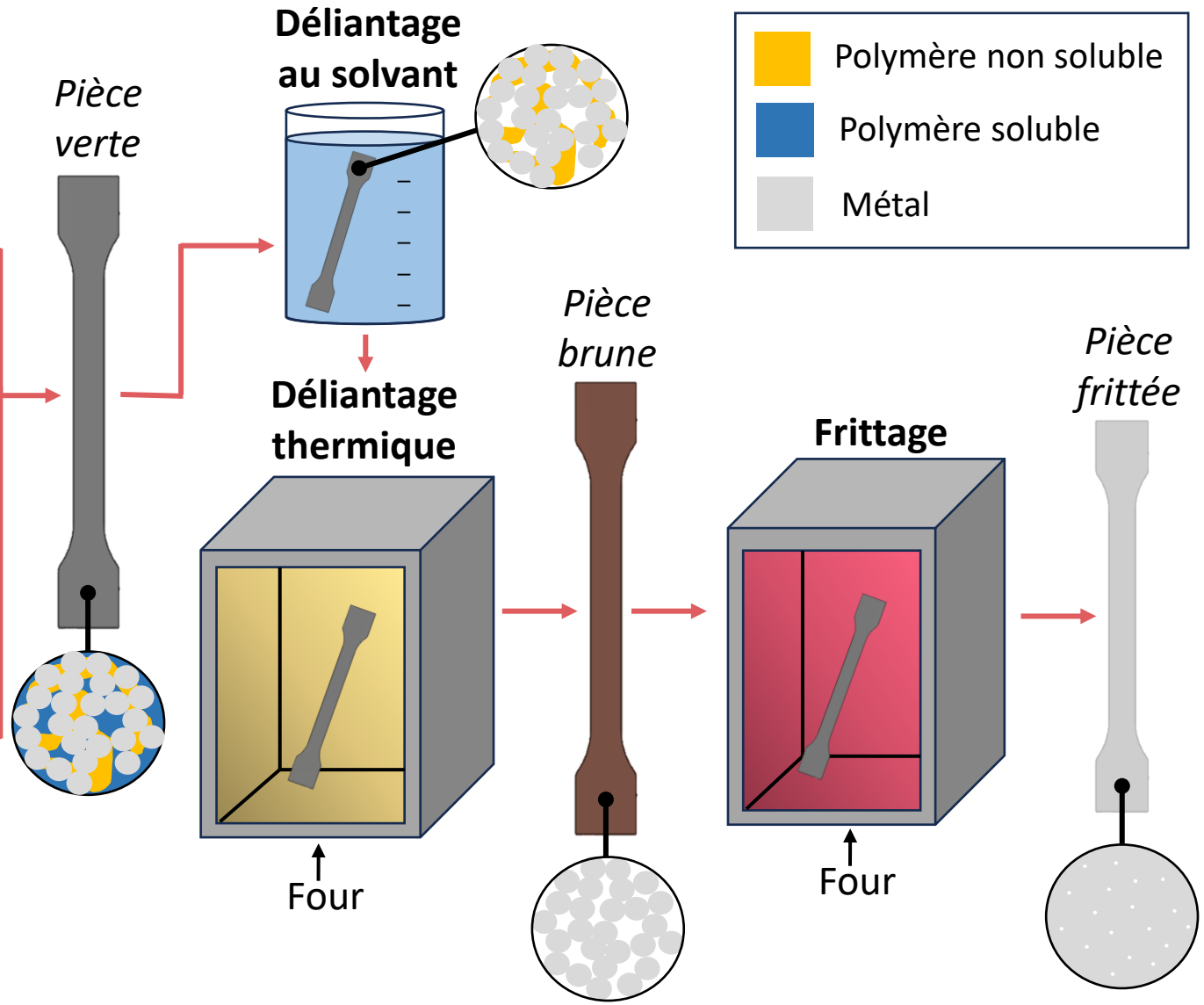
Metal Injection Molding (MIM) - Injection



Impression 3D MIM-like - Extrusion



[Martin *et al.* 2022]



Plus values du procédé MIM-like

Économies sur machine
+
suppression moules

	Powder Bed Fusion (PBF)	Direct Energy Deposition (DED)	Binder Jetting (BJ)	MIM	MIM - like
Investissements initiaux	€€€€	€€€€	€€€	€€€	€
Coût des matériaux et de fonctionnement	€€€€	€€€	€€€€	€	€
Diversité des matériaux	++	++	++	+++	+++

Économies sur machine et matériaux

MIM-like → Imprimantes de « bureau »

✓ Sécurité : Poudres enrobées

Sources : All3DP, A3DM Magazine, Primante 3D (Pollen)

État du marché du procédé MIM-like

MarkForged
~ 200 k€



Desktop Metal
~ 200 k€

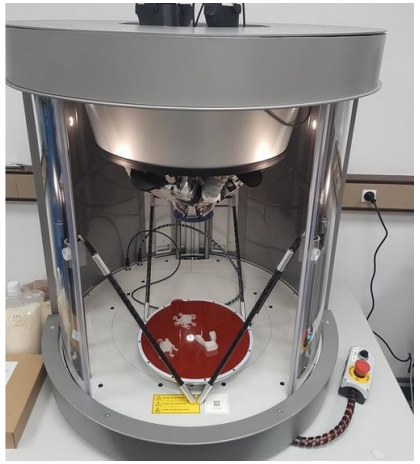


Ensemble imprimante + solution déliantage/frittage

✓ Utilisation simple ✓

✗ Coûts élevés
Paramètres non accessibles
(imprimante et four) ✗

Pollen
~ 80 k€



Imprimante vendue seule

✓ Paramètres accessibles ✓

✗ Utilisation laborieuse
Nécessite sous-traitance pour le frittage ✗

Four industriel ~ 400 k€



Contexte

Projet Interreg **FabricAr3v** (2019 – 2022) :

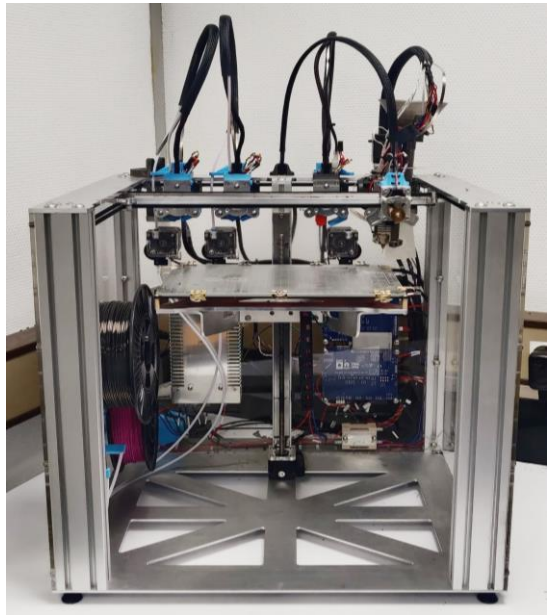
→ Projet OpenSource visant à créer des moyens de FAM à **moins de 30 k€**, se basant sur le principe d'extrusion.

→ Maîtriser toute la chaîne.

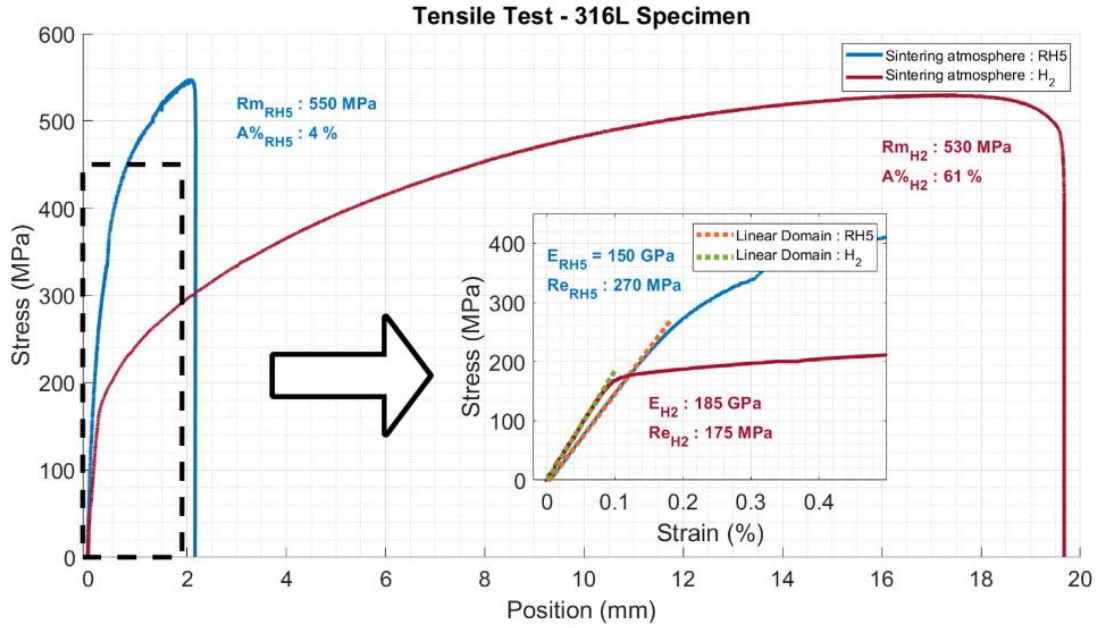
⇨ Rendre FAM accessible à tous : PME, FabLab, particuliers ...

Thèse V. Martin (2019 - 2023)

Mise en place imprimante :

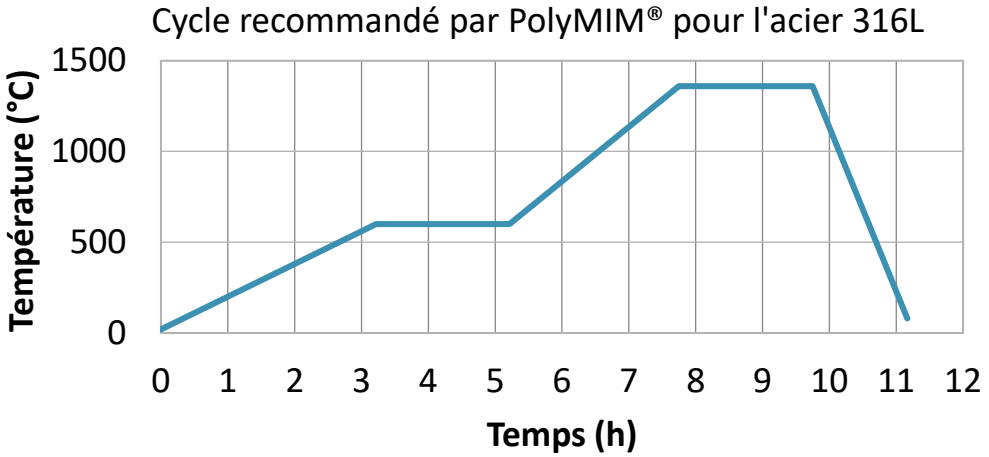


Premiers essais mécaniques (preuve de concept) :



Problématique de la thèse CIFRE de S. Badin (soutenue le 02/12/2024)

FAM accessible à tous : Solution économique pour le déliantage thermique et frittage ?



Le cycle thermique dédié au MIM pour l'acier inoxydable 316L reste-t-il adapté au MIM-like et à l'utilisation de fours économiques ?



En industrie, frittage sous hydrogène (H_2)
→ Nécessite infrastructures de protection (€€)

Est-il possible de substituer l'hydrogène par un autre gaz plus simple d'emploi ?

Matériau et Procédé

Choix de l'acier inoxydable austénitique 316L

- De nombreuses applications industrielles : Aéronautique, architecture, médical, ferroviaire, etc.
- Feedstock disponible pour le procédé MIM
- Rapport performance/prix avantageux
- Excellentes propriétés mécaniques et résistance à la corrosion
- État de l'art bien documenté en FAM et en procédés conventionnels
- Expertise LaMcube sur le comportement mécanique et la résistance à la corrosion de l'acier 316L élaboré par procédé conventionnel de mise en forme par déformation plastique (laminage) et par enlèvement de matière (usinage) après fonderie

Stratégie d'impression et conditions de déliantage chimique

Feedstock → Impression → Déliantage chimique → Déliantage thermique → Frittage

[Thèse V. Martin 2023]

Granulés
=
Liant soluble dans l'eau
+ liants non solubles
+ poudre 316L



Acier inoxydable 316L
(PolyMIM®)

Concentrations massiques selon la norme EN 10088-1

	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	S	P
Min.	-	-	16,0	10,0	2,0	-	-	-	-
Max.	Reste	0,03	18,5	14,0	3,0	2,0	1,0	0,03	0,045

Acier austénitique
8 g/cm^3

Stratégie d'impression et conditions de déliantage chimique

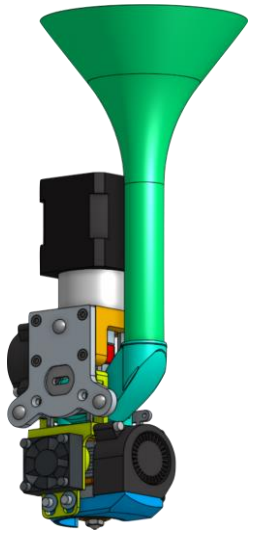
Feedstock → **Impression** → Déliantage chimique → Déliantage thermique → Frittage

[Thèse V. Martin 2023]

Granulés
=
Liant soluble dans l'eau
+ liants non solubles
+ poudre 316L



Acier inoxydable 316L
(PolyMIM®)



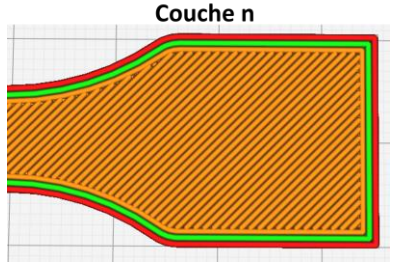
Tête d'impression 3D pour granulés (Mahor XYZ, modifiée)

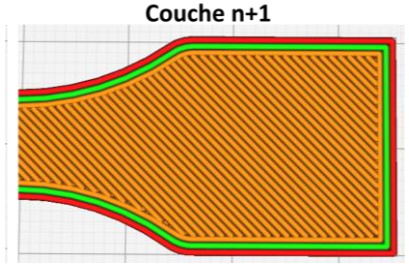
	TPU	316L
Température d'impression (°C)	205	195
Température du plateau (°C)	60	
Vitesse d'impression (mm/s)	30	20
Hauteur des couches (mm)	0.2	0.2
Largeur des cordons (mm)	0.6	0.6
Débit (%)	100	100
Chevauchement de remplissage (%)	10	50



Pièce verte imprimée

Stratégie impression :
+/- 45° avec 2 parois
100% remplissage





Stratégie d'impression et conditions de déliantage chimique

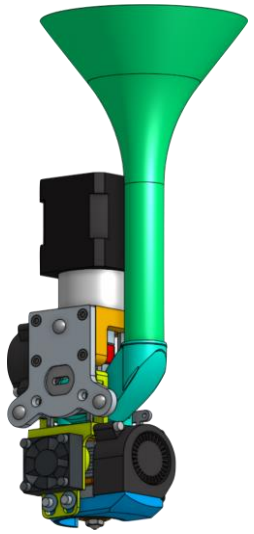
Feedstock → Impression → **Déliantage chimique** → Déliantage thermique → Frittage

[Thèse V. Martin 2023]

Granulés
=
Liant soluble dans l'eau
+ liants non solubles
+ poudre 316L



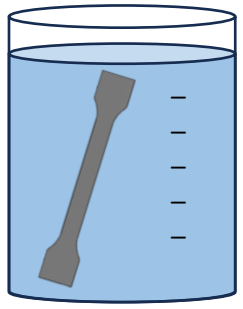
Acier inoxydable 316L
(PolyMIM®)



Tête d'impression 3D pour granulés (Mahor XYZ, modifiée)

	TPU	316L
Température d'impression (°C)	205	195
Température du plateau (°C)	60	
Vitesse d'impression (mm/s)	30	20
Hauteur des couches (mm)	0.2	0.2
Largeur des cordons (mm)	0.6	0.6
Débit (%)	100	100
Chevauchement de remplissage (%)	10	50

Déliantage à l'eau



60°C pendant 48h

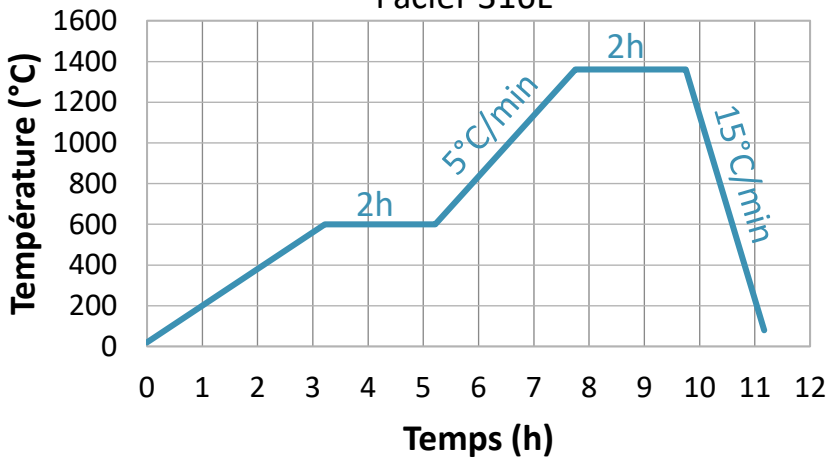


Pièce verte imprimée

Conditions de déliantage thermique et de frittage

Feedstock → Impression → Déliantage chimique → **Déliantage thermique** → **Frittage**

Cycle recommandé par PolyMIM® pour l'acier 316L



- Déliantage 600°C
- Frittage 1360°C

~ 400 k€



Four batch
(Elnik)

Hydrogène (H_2)

Four industriel (CRITT)

~ 40 k€



Four tubulaire
(Pyrox)

Argon (Ar)
Azote (N_2)
RH5 (10% H_2 + 90% N_2)

~ 5 k€



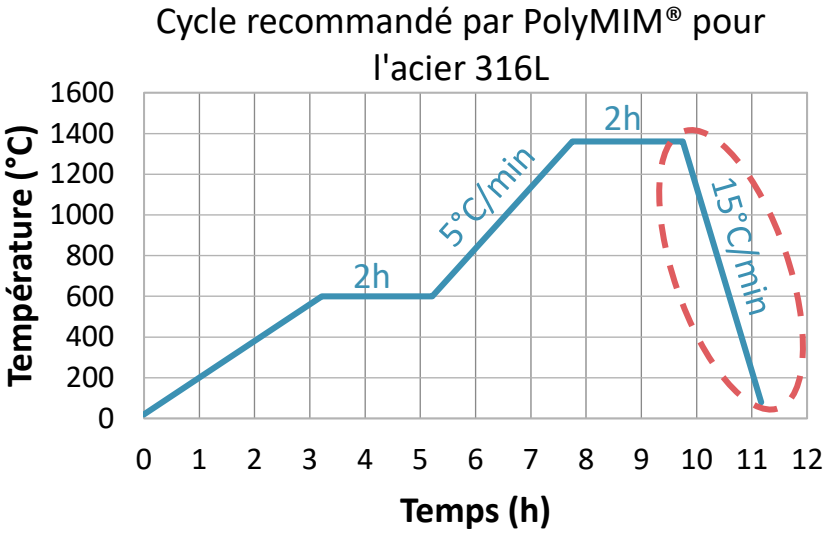
Four tubulaire
(Sager)

Déliantage N_2
+
Frittage
Vide primaire

Fours de laboratoire (LaMcube)

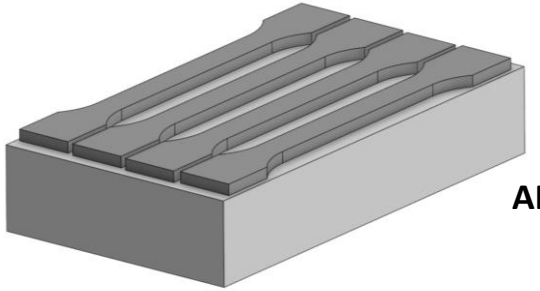
Conditions de déliantage thermique et de frittage

Feedstock → Impression → Déliantage chimique → **Déliantage thermique** → **Frittage**



Contrainte fours laboratoires : **5°C/min max**

Disposition :

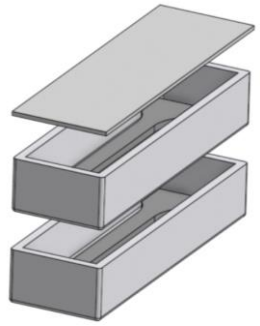


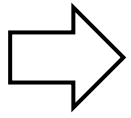


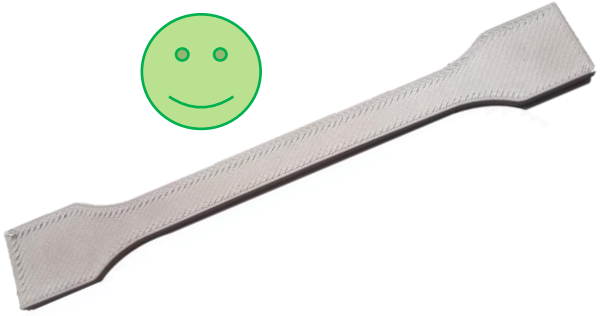
ARGON ou AZOTE



Condition C - 1

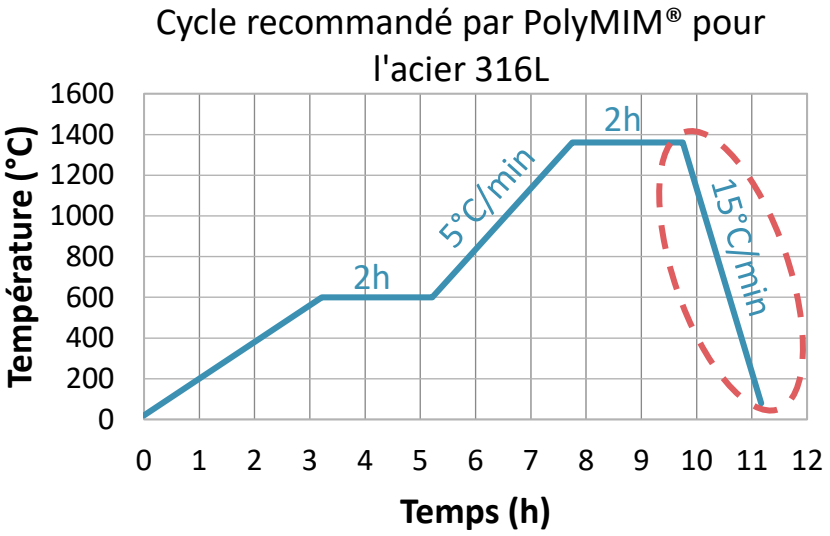






Conditions de déliantage thermique et de frittage

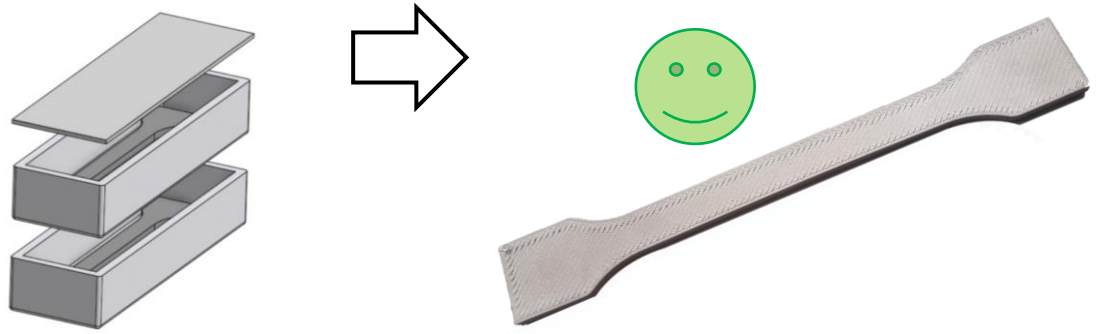
Feedstock → Impression → Déliantage chimique → **Déliantage thermique** → **Frittage**



Contrainte fours laboratoires : **5°C/min max**

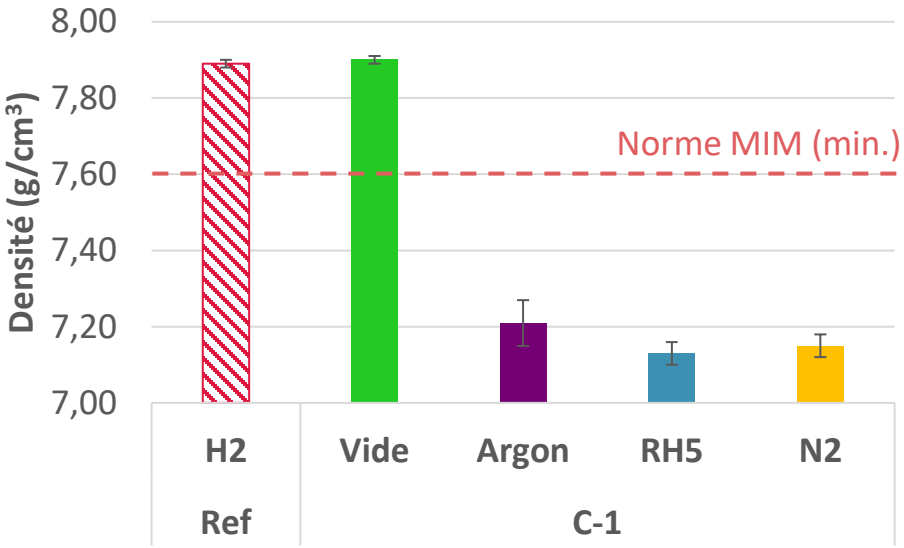
	Four(s)	Confinement	Environnements étudiés	Refroidissement
Référence	Industriel	Non	H_2	15°C/min - Contrôlé
Condition C - 1	Laboratoire, tubulaires	Oui	RH5, Azote, Ar (four Pyrox) ; Vide (four Sager)	5°C/min - Contrôlé jusqu'à 740°C

Condition C - 1



Influence des conditions de frittage

Densité



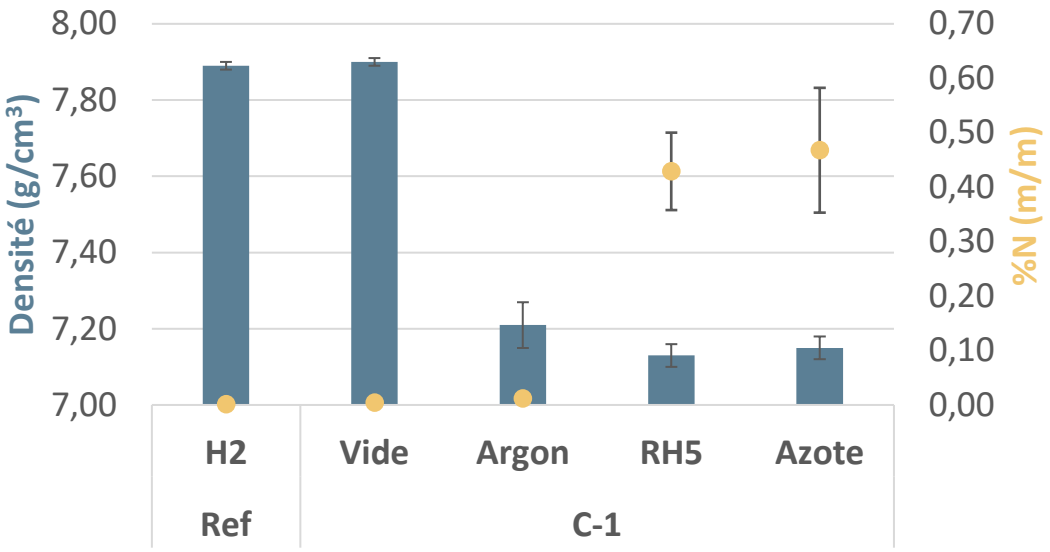
H_2 = vide >> Ar > RH5 = N_2

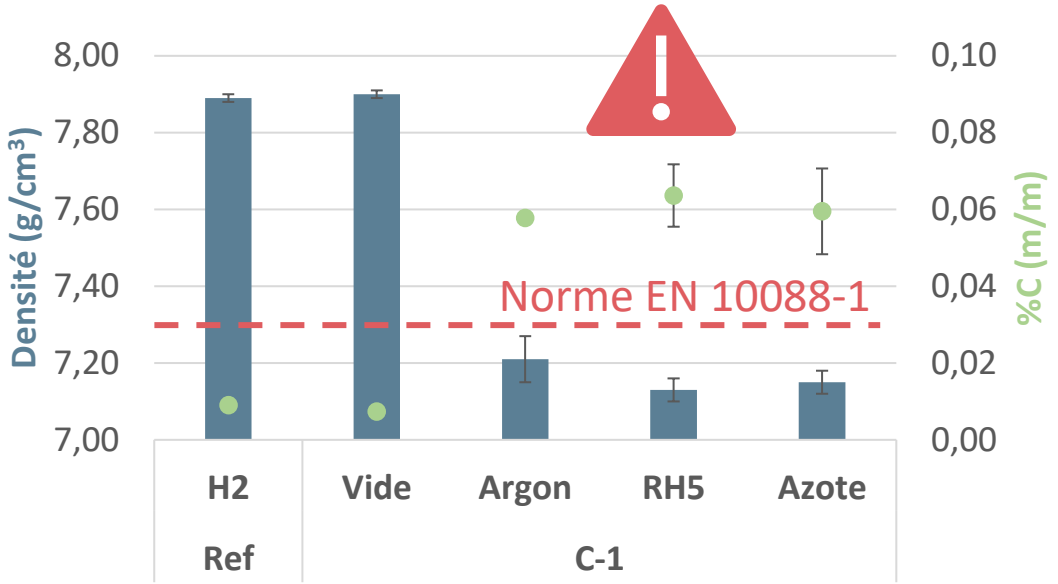
H_2 et vide > norme MIM min.

Comment expliquer la différence de densité ?

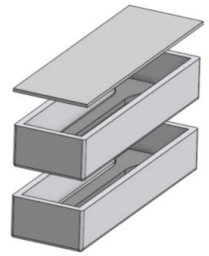
[Norme ASTM B883-10]

Densité





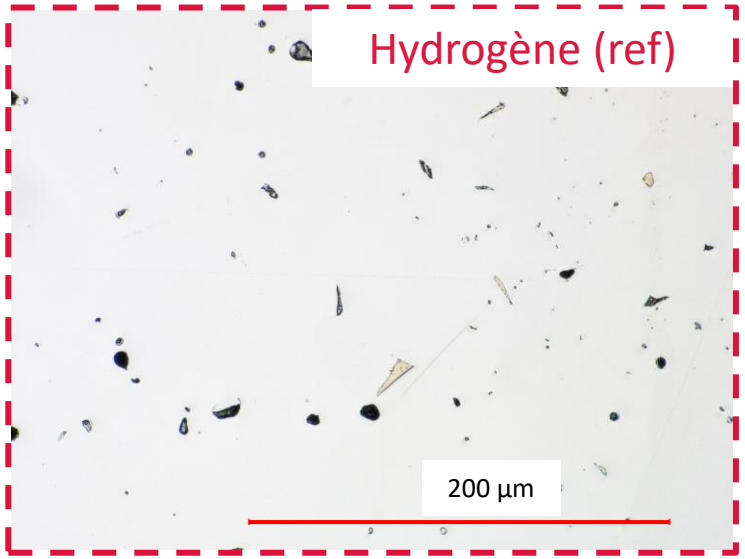
- RH5, N2 : Dissociation du diazote en azote monoatomique
- RH5, N2, Ar : Carbone issu de la dégradation des polymères piégés dans les creusets

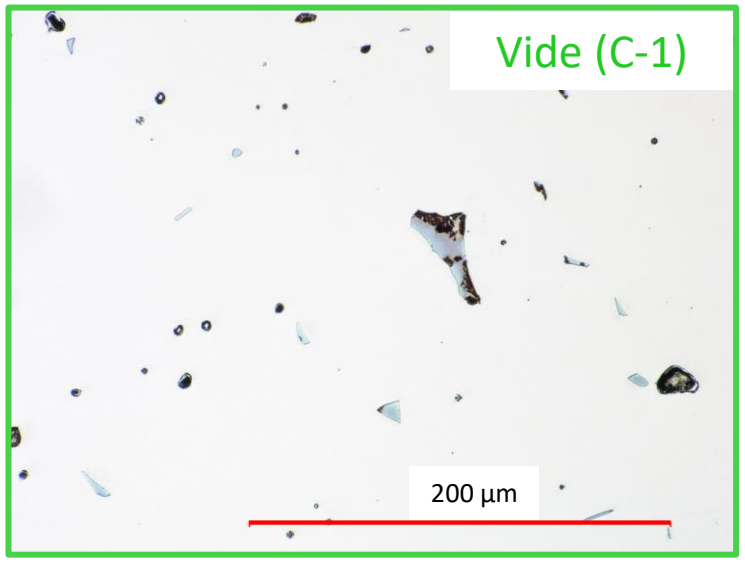


- Diffusion pendant le frittage d'azote monoatomique et/ou de carbone en insertion dans l'acier inoxydable 316L
- Présence N et/ou C en insertion limite la diffusion pendant le frittage des autres éléments chimiques en substitution (Cr, Ni, Mo…) dans la matrice Fe et, en conséquence, la bonne densification

[Shen *et al.* 2023], [Narayan *et al. 2010*]

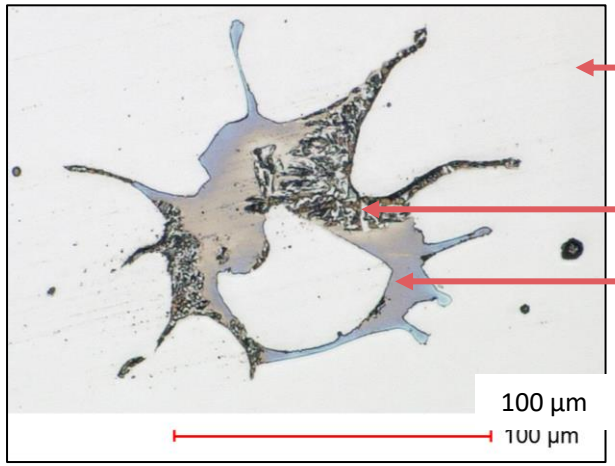
Microstructure







Matrice austénitique avec porosités et traces de ferrite δ



Austénite

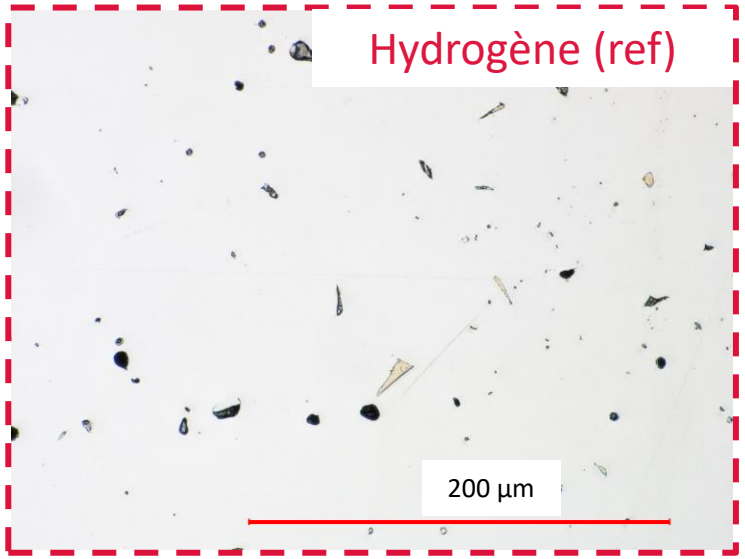
Phase σ

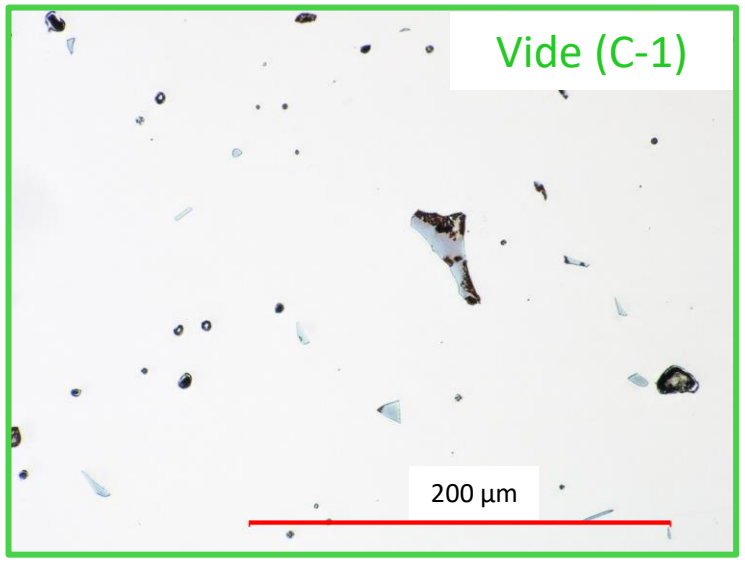
Ferrite δ

- Quelques hétérogénéités
- Présence de phase σ dans les grains de ferrite δ

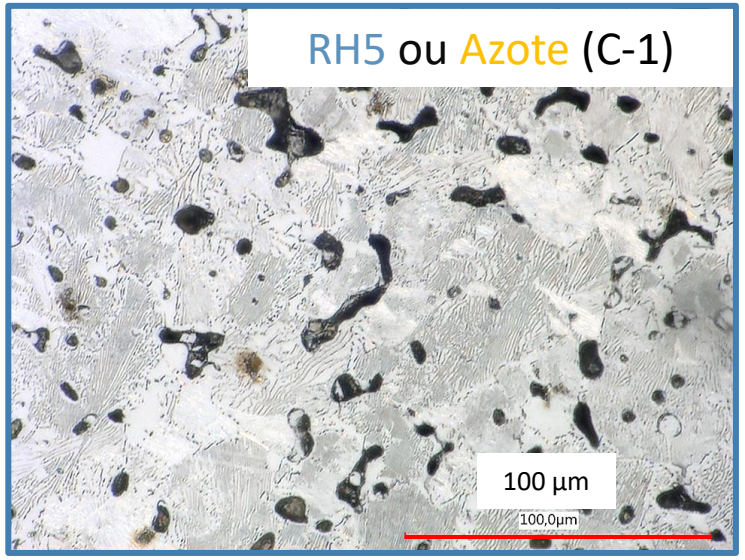
→ Refroidissement lent

Microstructure







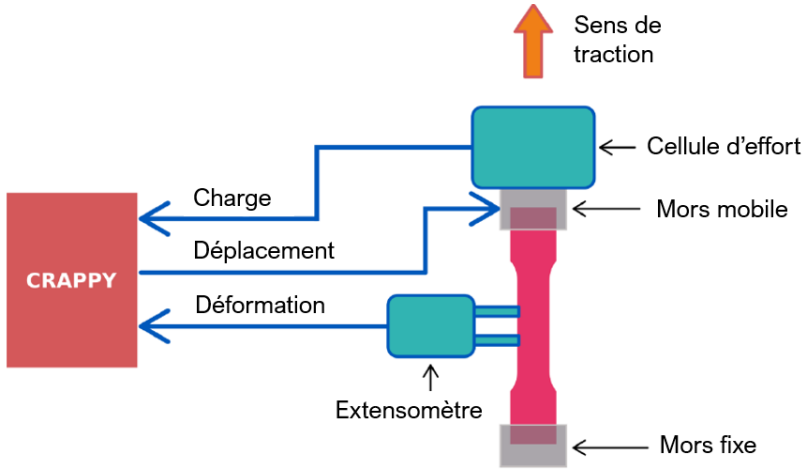


Micro-DRX → Lamelles ferrite α + lamelles de nitrures de chrome

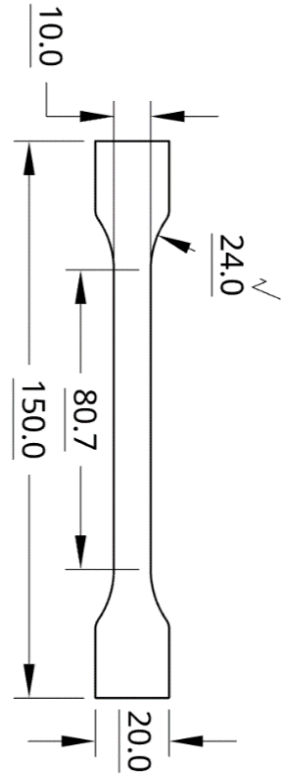
Cr_2N = **PERLITE AZOTÉE**

[Park *et al.* 2012]

Propriétés mécaniques de traction





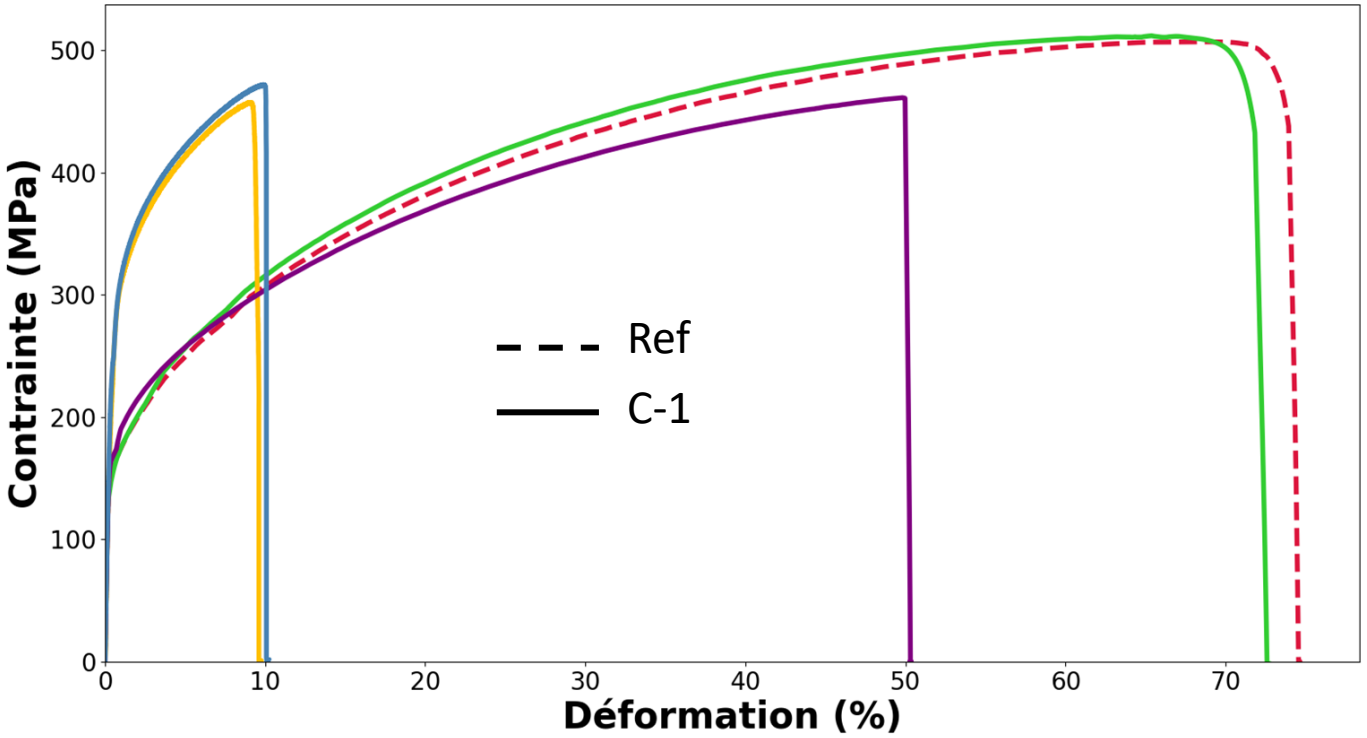


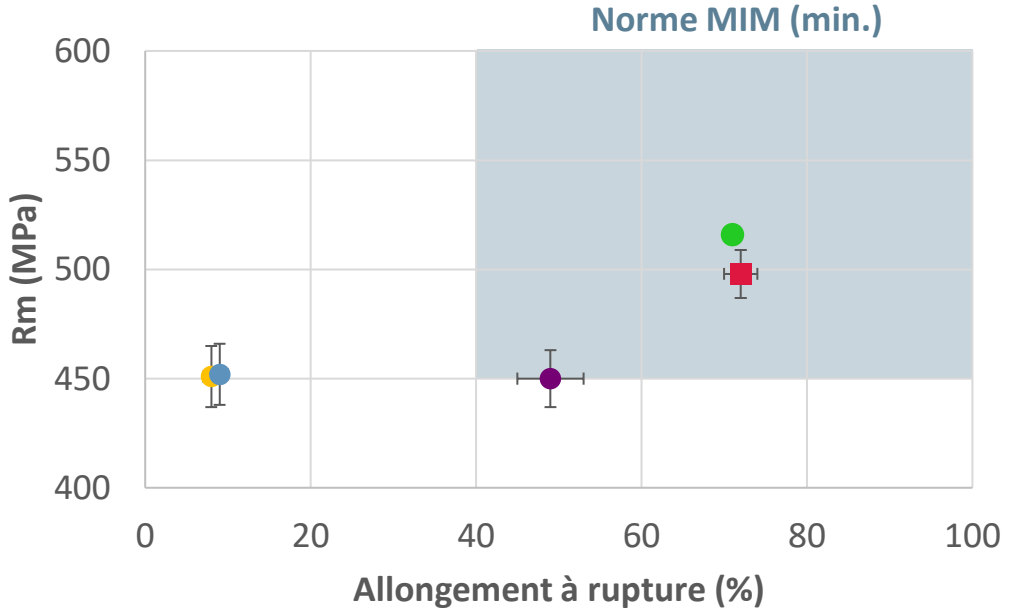
- Essai caractérisation matériau
- Norme MIM disponible : **Standard Specification for Metal Injection Molding (MIM) Ferrous Materials - ASTM B883-10**

Positionner MIM-like (impression) par rapport au MIM (injection)

Propriétés mécaniques de traction

			Rm (MPa)	A (%)
■	Ref	Hydrogène	498 ± 11	72 ± 2
●	C-1	Vide	516 ± 3	71 ± 1
		Argon	450 ± 13	49 ± 4
		Azote	451 ± 14	8 ± 1
		RH5	452 ± 14	9 ± 1





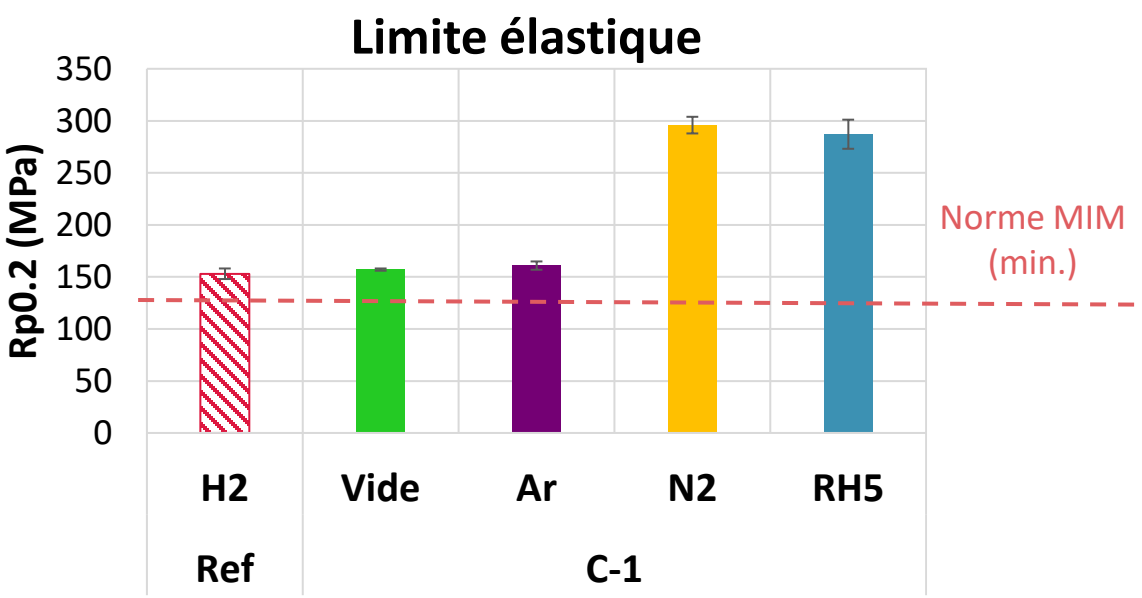
- Vide ≈ H_2 ; respectent norme MIM
- Argon ↘ A% et Rm ; A% dans la norme et Rm limite
- Azote = RH5 : ↘ Rm et ↘↘ A% ; A% hors norme et Rm limite

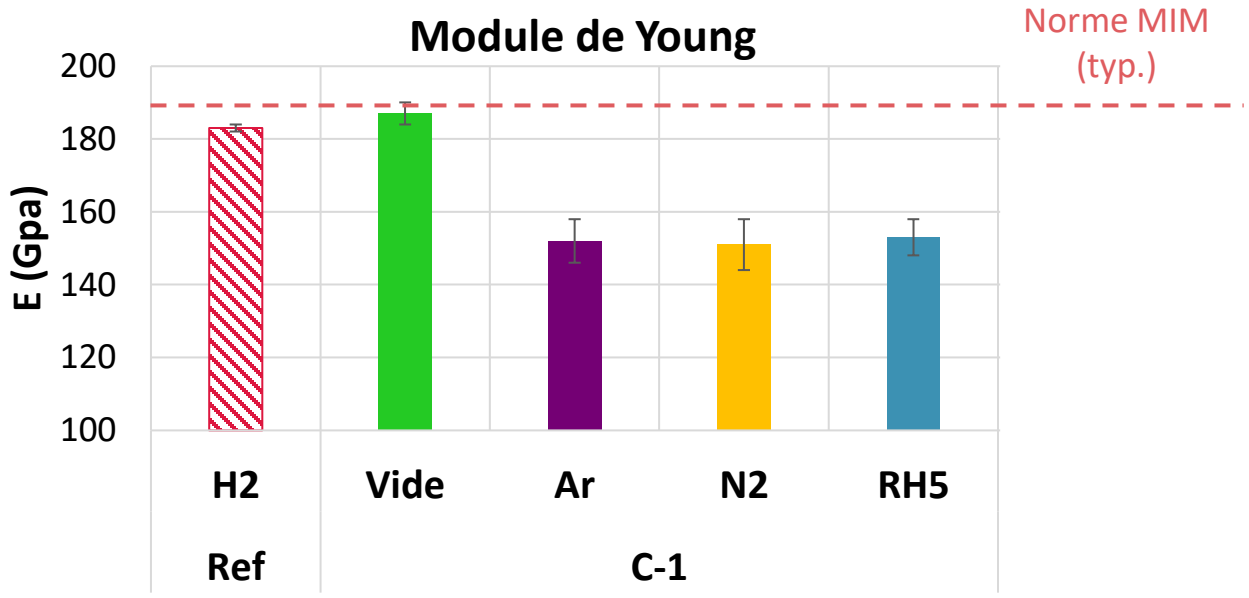
[Norme ASTM B883-10]

Propriétés mécaniques de traction

		Rm (MPa)	A (%)	Rp0.2 (MPa)	E (GPa)
Ref	Hydrogène	498 ± 11	72 ± 2	153 ± 5	183 ± 1
C-1	Vide	516 ± 3	71 ± 1	157 ± 1	187 ± 3
	Argon	450 ± 13	49 ± 4	161 ± 4	152 ± 6
	Azote	451 ± 14	8 ± 1	296 ± 8	151 ± 7
	RH5	452 ± 14	9 ± 1	287 ± 14	153 ± 5

- Rp0.2 en accord avec la norme MIM
- Rp0.2 presque x2 pour atmosphère contenant de l'azote
- Seuls les frittages sous H_2 et sous vide donnent E proches des valeurs attendues de la norme MIM

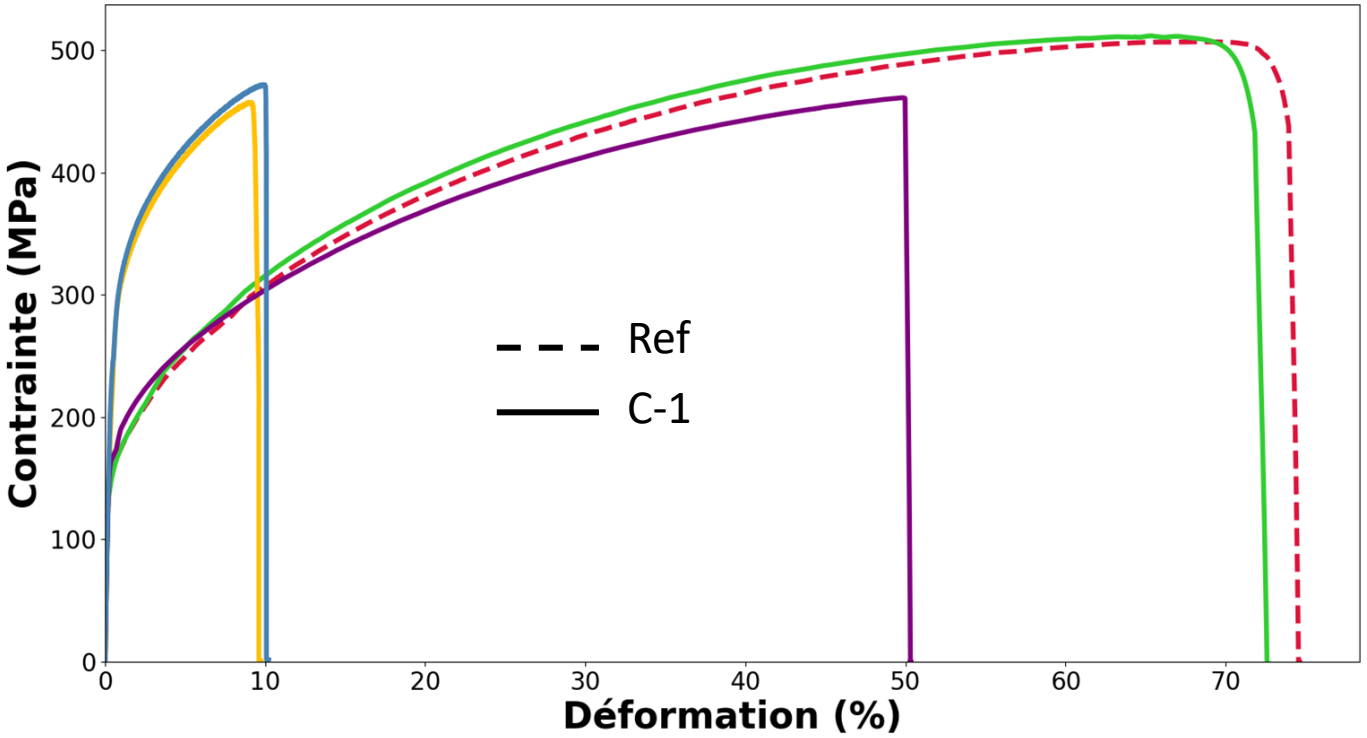




[Norme ASTM B883-10]

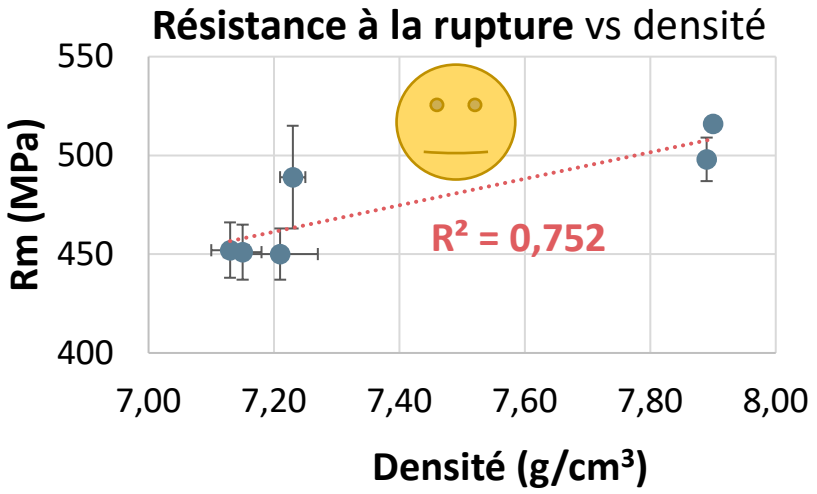
Propriétés mécaniques de traction

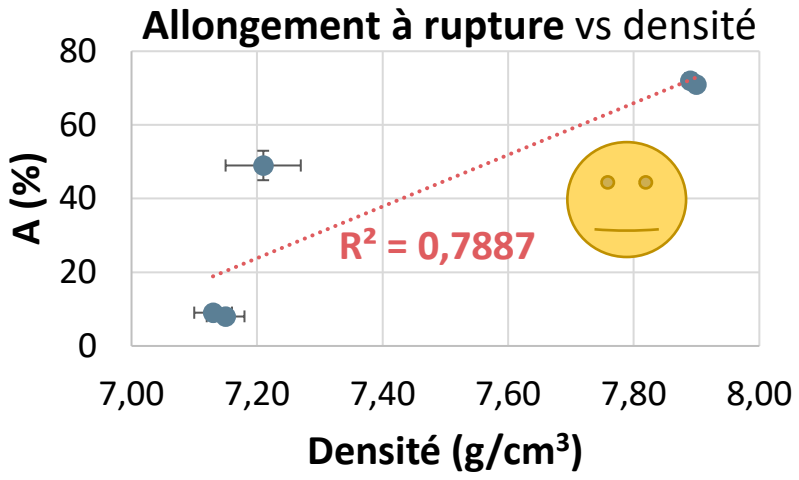
		Rm (MPa)	A (%)	Rp0.2 (MPa)	E (GPa)
Ref	Hydrogène	498 ± 11	72 ± 2	153 ± 5	183 ± 1
C-1	Vide	516 ± 3	71 ± 1	157 ± 1	187 ± 3
	Argon	450 ± 13	49 ± 4	161 ± 4	152 ± 6
	Azote	451 ± 14	8 ± 1	296 ± 8	151 ± 7
	RH5	452 ± 14	9 ± 1	287 ± 14	153 ± 5



Comment expliquer la différence de propriétés mécaniques ?

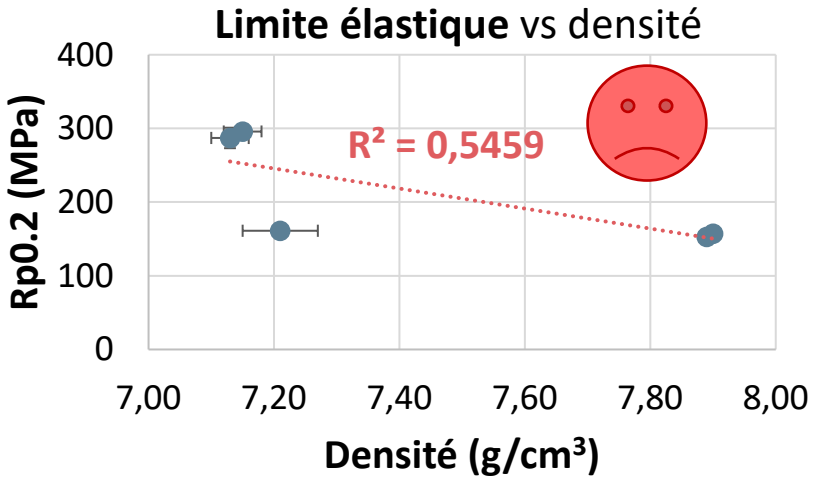
Relations entre propriétés mécaniques de traction et densité

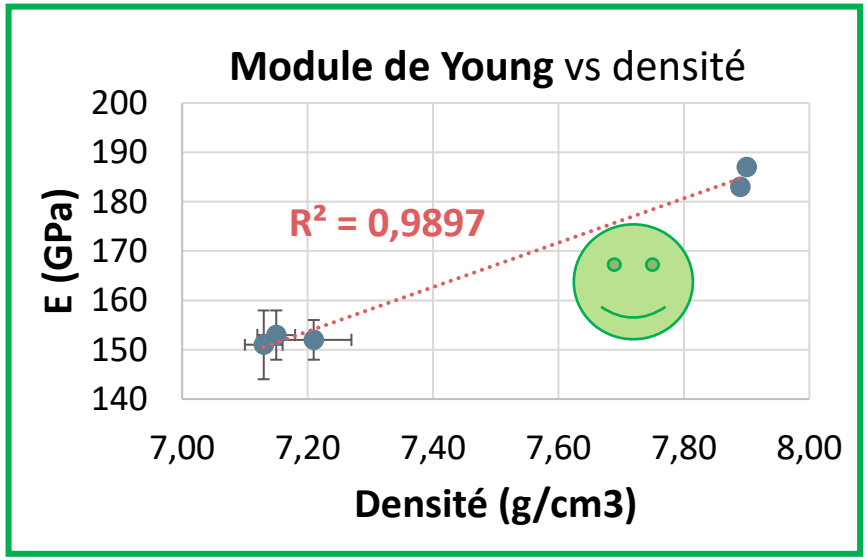




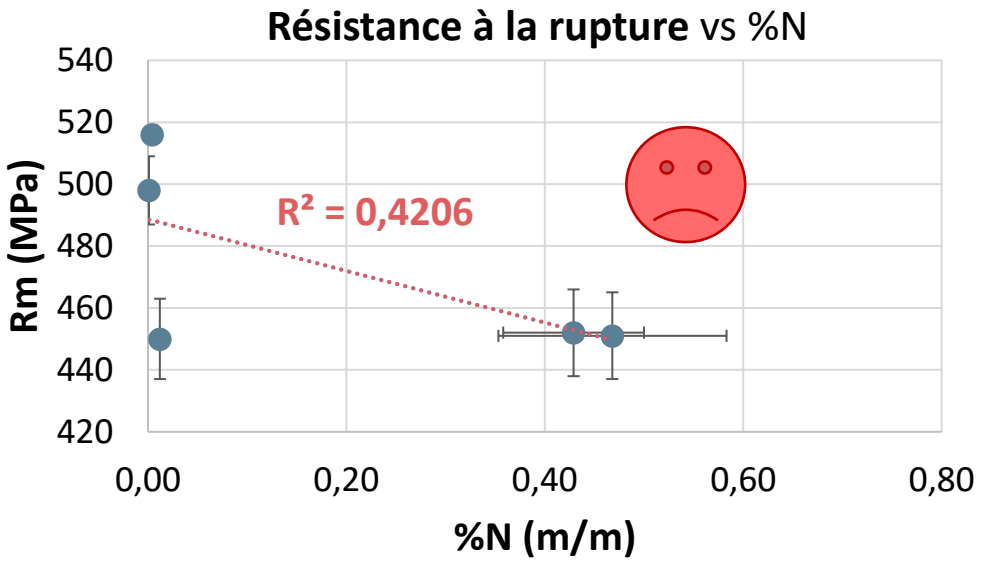
Effet du taux de porosité prépondérant sur la rigidité

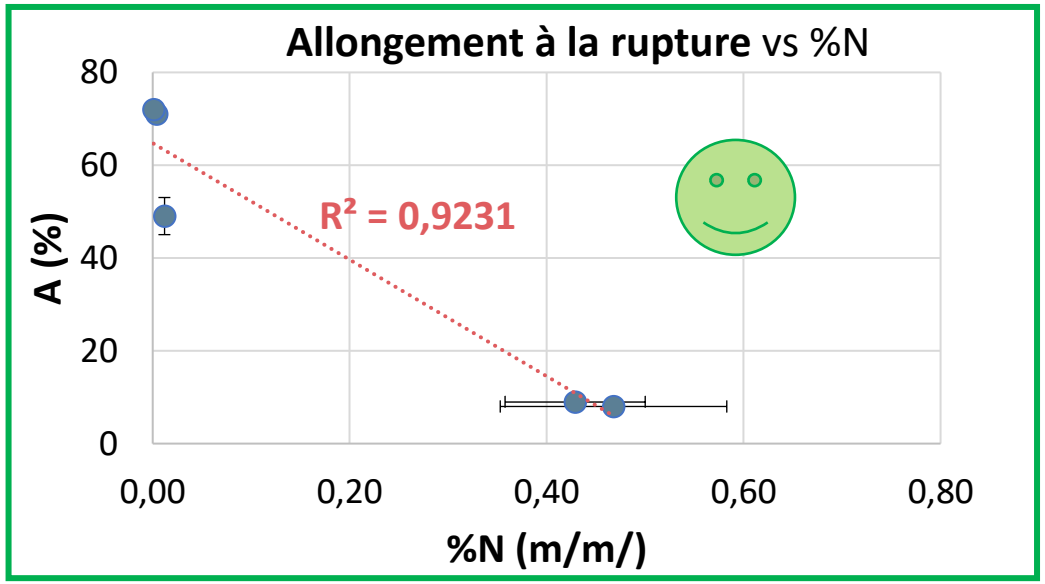
Réduction de la section = Déformation plus importante sous une contrainte donnée

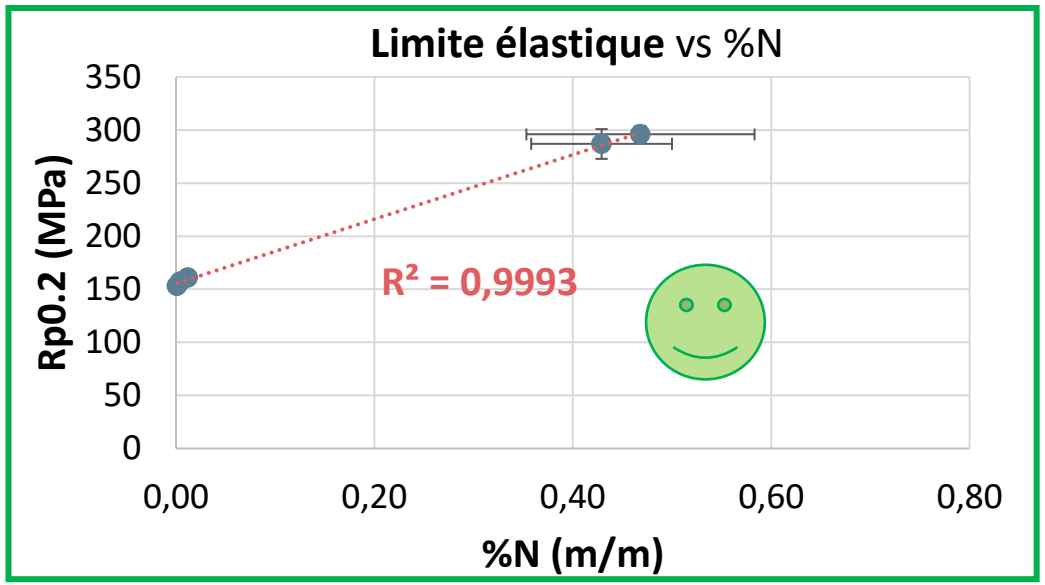




Relations entre propriétés mécaniques de traction et teneur en azote





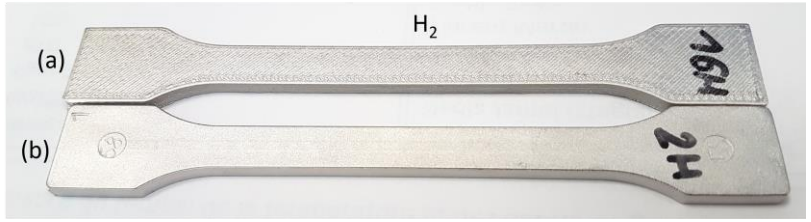


La limite élastique et l'allongement à rupture sont fortement influencés par la teneur en azote

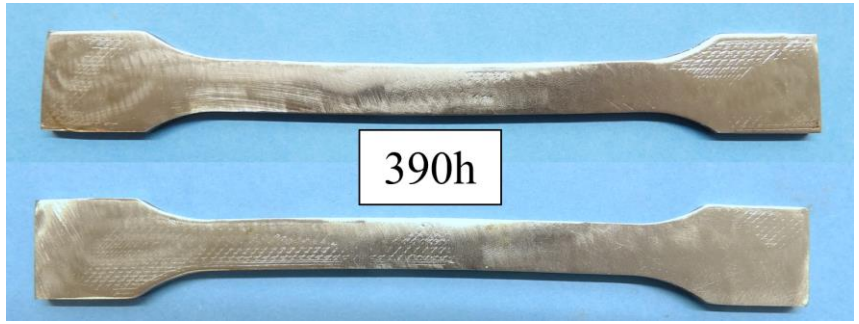
Azote en SS + formation de nitrures (DRX) durcissent l'acier mais le fragilise

Résistance à la corrosion généralisée

Brouillard salin NaCl 5%, 35°C (norme ISO 9227) polissage grade 600 avec analyses visuelles allant de 1h à 390h

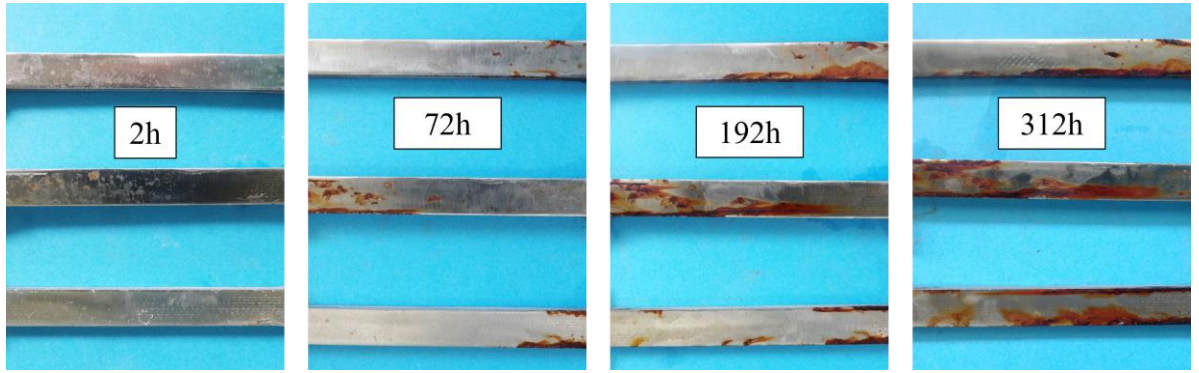


HYDROGÈNE (Ref) Pas de traces de rouille

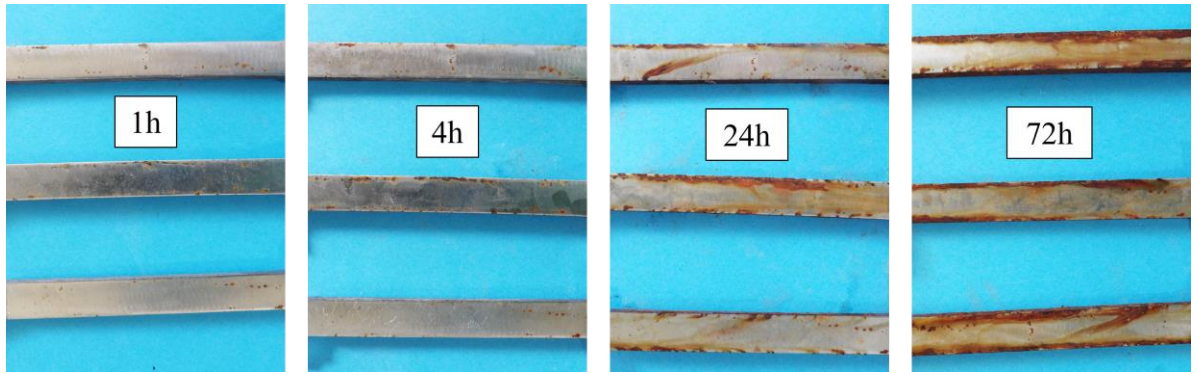


VIDE 1ère trace de rouille après 72h sur échantillon mais aucune évolution supplémentaire

ARGON (C-1)



RH5 et AZOTE (C-1)

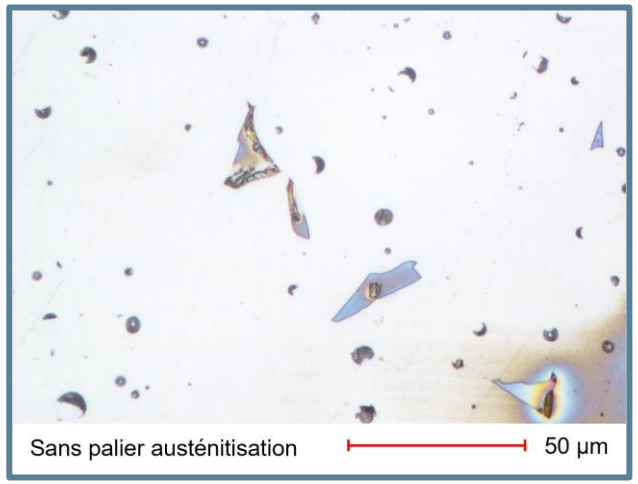


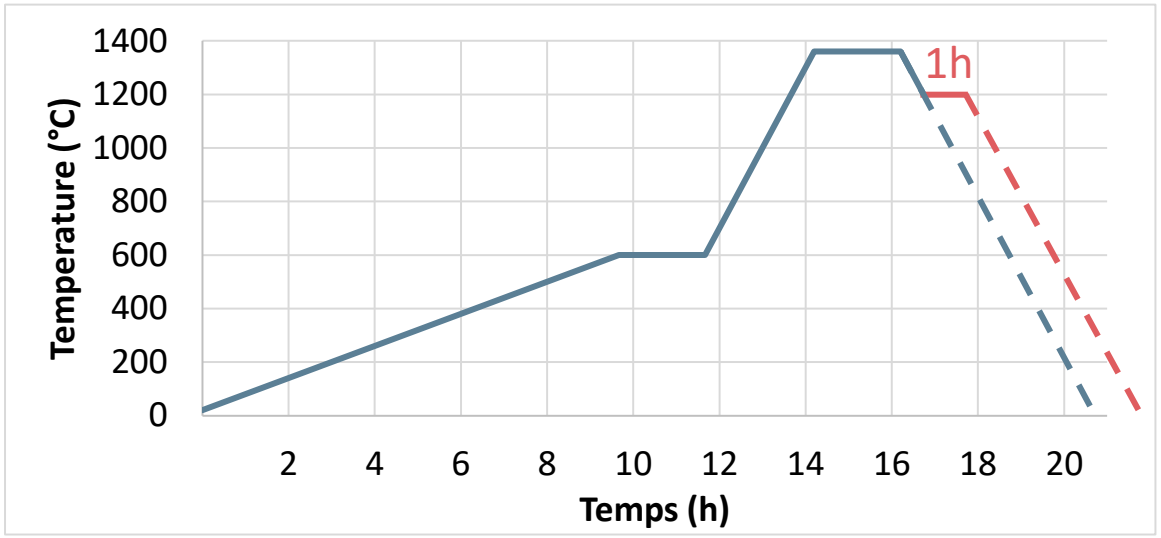
Forte dégradation de la résistance à la corrosion généralisée excepté sous vide

Optimisation des conditions de frittage

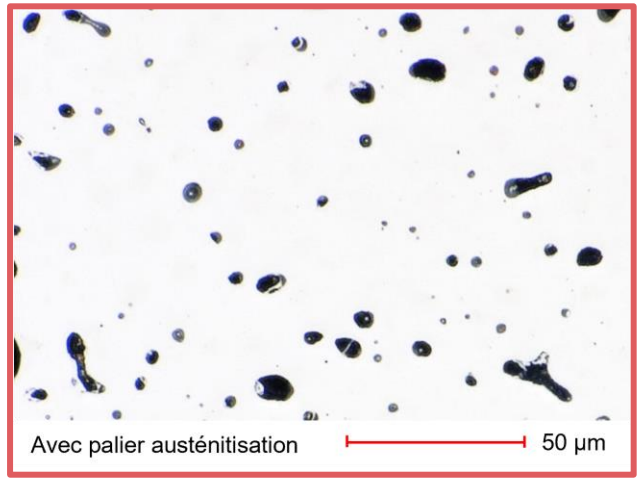
Elimination de la ferrite δ

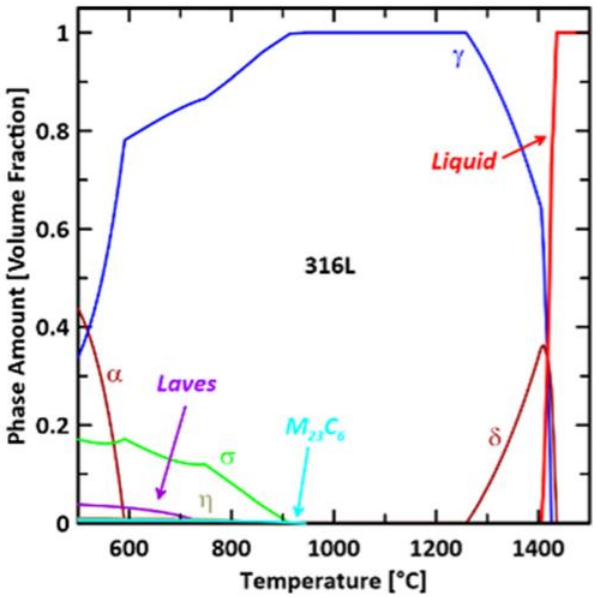
SANS palier





AVEC Palier





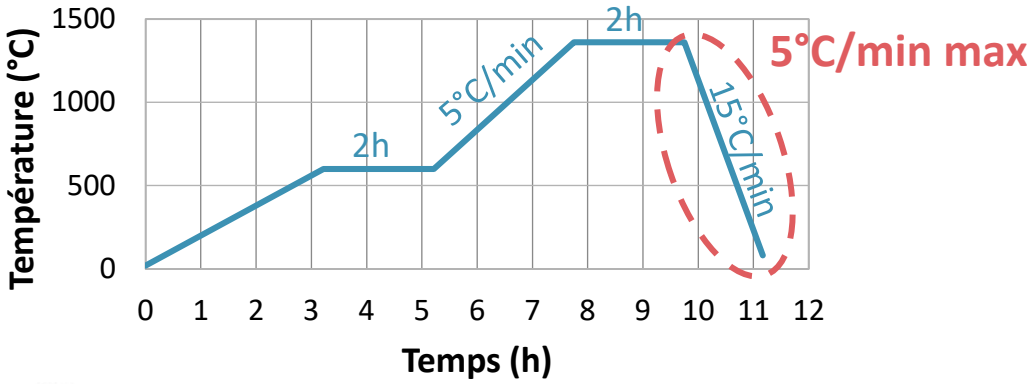
- Austénite γ et ferrite δ thermodynamiquement stables pendant le frittage à 1360°C pendant 2h

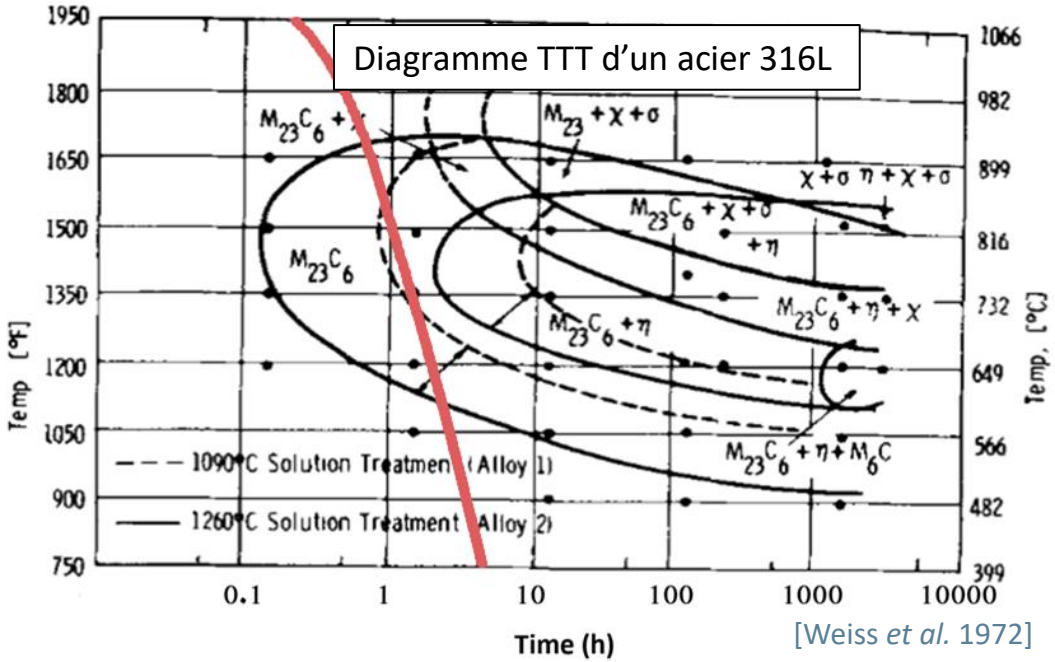
Peut-on éliminer la ferrite δ indésirable en ajoutant un palier post-frittage dans le domaine ou seule l'austénite γ est thermodynamiquement stable ?

Palier post-frittage d'austénitisation à 1200°C pendant 1h permet d'éliminer la ferrite

[Gonzalez *et al.* 2023]

Elimination des phases fragiles (sigma, carbures et nitrures)

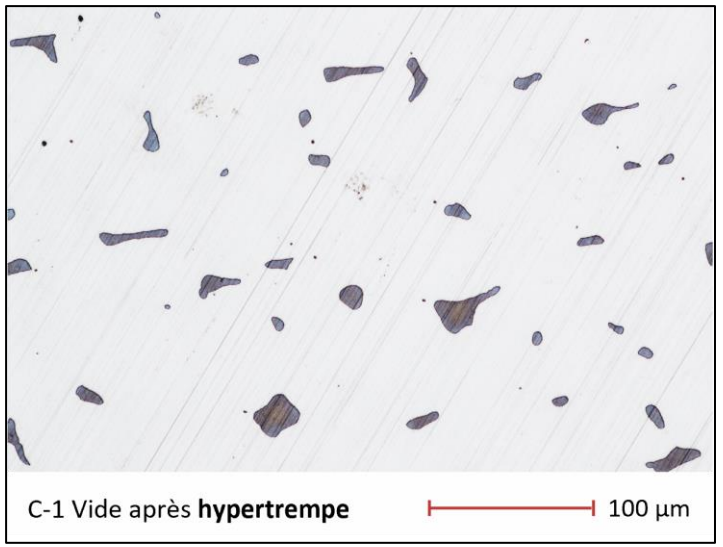




[Weiss *et al.* 1972]

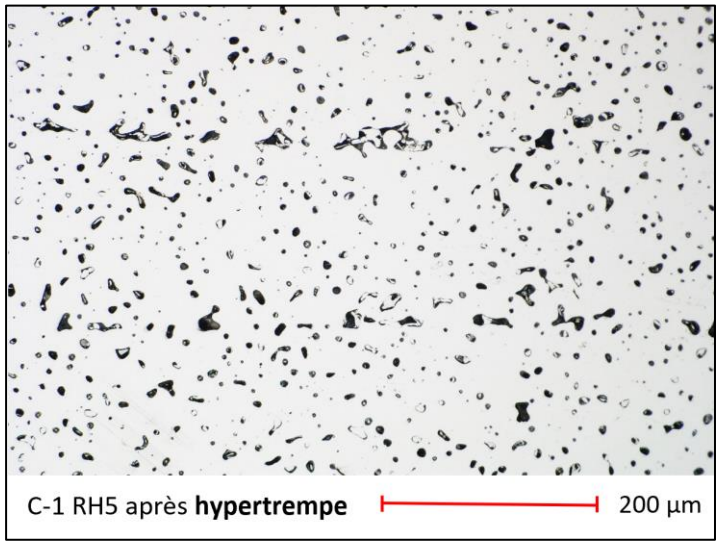
Refroidissement lent = Risque formation carbures, nitrures, phase σ, etc.

Traitement d'hypertrempe : 2h à 1050°C sous Argon puis trempe à l'eau



Sur échantillon contenant ferrite δ + phase σ :

→ Élimination phase σ



Sur échantillon contenant perlite azotée :

→ Élimination perlite azotée à cœur

Conclusions

&

Perspectives



Conclusion

		Particularité du gaz	Microstructure	Résistance à la corrosion	Comparaison avec la norme MIM				
					Densité	Limite élastique	Résistance à la rupture	Allong. à la rupture	Module de Young
Four industriel	**Hydrogène**	€€€ Infrastructures sécurité	Austénite (+ traces ferrite)	++	+++	+	++	+++	++
Four de lab. + pièces confinées	**Vide**	€	Austénite (+ traces ferrite)	+	+++	+	++	+++	++
	Argon	€€	Austénite (+ traces ferrite)	-	-	++	-	++	-
	Azote ou RH5	€ ou €€	Austénite + perlite azotée	- -	--	+++	-	- - -	-



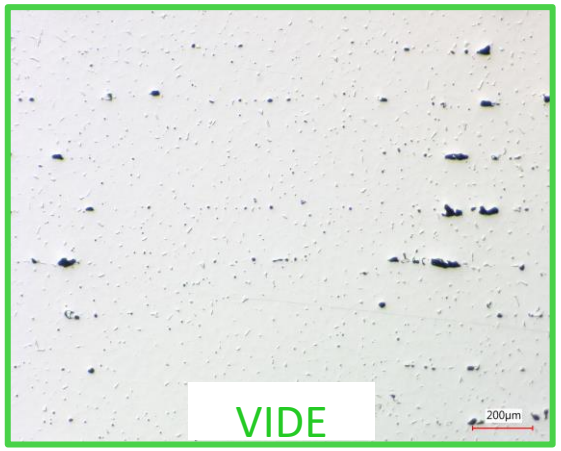


- Une nouvelle génération de FAM qui peut allier performance mécanique, coût réduit et durabilité

- Frittage sous vide = performances mécaniques des pièces imprimées en MIM-like conformes aux normes applicables aux pièces injectées par MIM
  - → Valide la stratégie développée dans le cadre du projet FabricAr3v
  - → Démontre la possibilité d'utiliser des équipements plus économiques

Perspectives (1/2)

Amélioration de la résistance à la corrosion = enjeu crucial pour le 316L



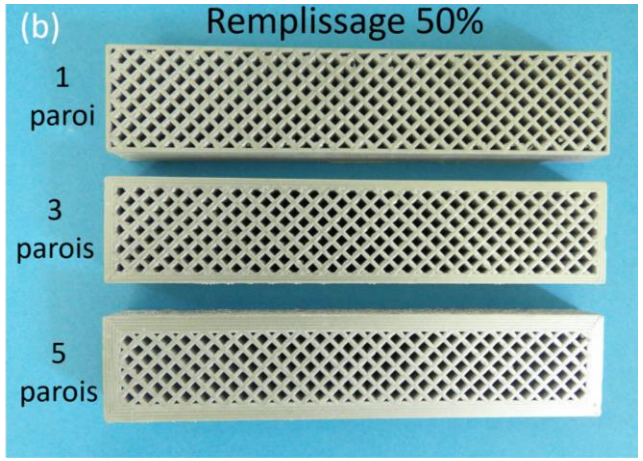
Élimination des porosités
- Hybridation (impression + usinage) → Sur-extrusion → Diminution des porosités
- Augmentation temps/température frittage

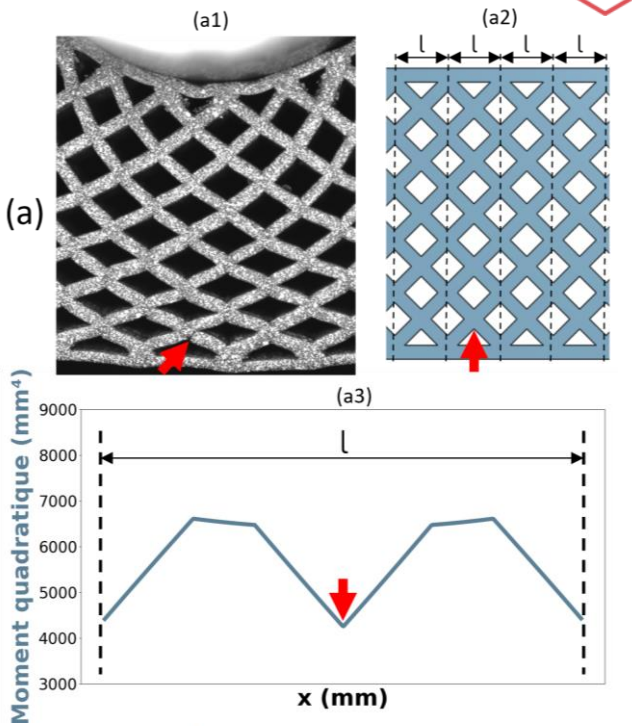
Optimisation temps/T° palier austénitisation
- Elimination de la ferrite et des phases fragiles
- Adaptation des paramètres à la dimension des pièces

Optimisation et validation hypertrempe
- Brouillard salin après hypertrempe
- Tests corrosion approfondis
- Hypertrempe sur pièces complexes

Perspectives (2/2)







- Étudier d'autres paramètres structuraux
- Développer des nouveaux modèles pour la simulation numérique des structures en treillis
- Multiplier les caractérisations et la nature des essais mécaniques
- Imprimer des pièces complexes
- Maîtriser les tolérances dimensionnelles : retrait, déformations, rugosité
- Appliquer la démarche sur d'autres matériaux



Interreg
Cofinancé par l'Union Européenne
Medegefinancierd door de Europese Unie
France - Wallonie - Vlaanderen
Inside 3D

Interreg
Cofinancé par l'Union Européenne
Medegefinancierd door de Europese Unie
France - Wallonie - Vlaanderen
CrossS3
TECH4FAB-Cross S3

LaM CUBE
Laboratoire de mécanique, multiphysique, multiéchelle

CRITT
MATÉRIAUX INNOVATION

Merci pour votre attention !

Université de Lille

cnrs

centralelille