

10^{ème} École Technologique 2025
La mécanique en 203
Réseau Des Mécaniciens

Impact des fluides cryogéniques sur l'usinabilité et l'intégrité des pièces

1er octobre 2025

Guénaël GERMAIN
guenael.germain@ensam.eu

Extrait des travaux de thèse d' Achaf FERSI



Impact des fluides cryogéniques sur l'usinabilité et l'intégrité des pièces

Soutenance de thèse d'Achraf Fersi
13 juin 2025

Jury

Mme. Anna Carla ARAUJO
M. Tarek MABROUKI
M. Pedro ARRAZOLA
M. Vincent WAGNER
M. Guenael GERMAIN
M. Yessine AYED
M. Bruno LAVISSE

Professeure, ICA, INSA Toulouse
Professeur, LMAI, ENIT
Professeur, université de Mondragon
Maître de conférences-HDR, LGP, UTTOP
Professeur, LAMPA, ENSAM Angers
Maître de conférences-HDR, LAMPA, ENSAM Angers
Maître de conférences, LAMPA, ENSAM Angers

Présidente
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

ScCRYO₂

3 Thèses et 1 Post doc

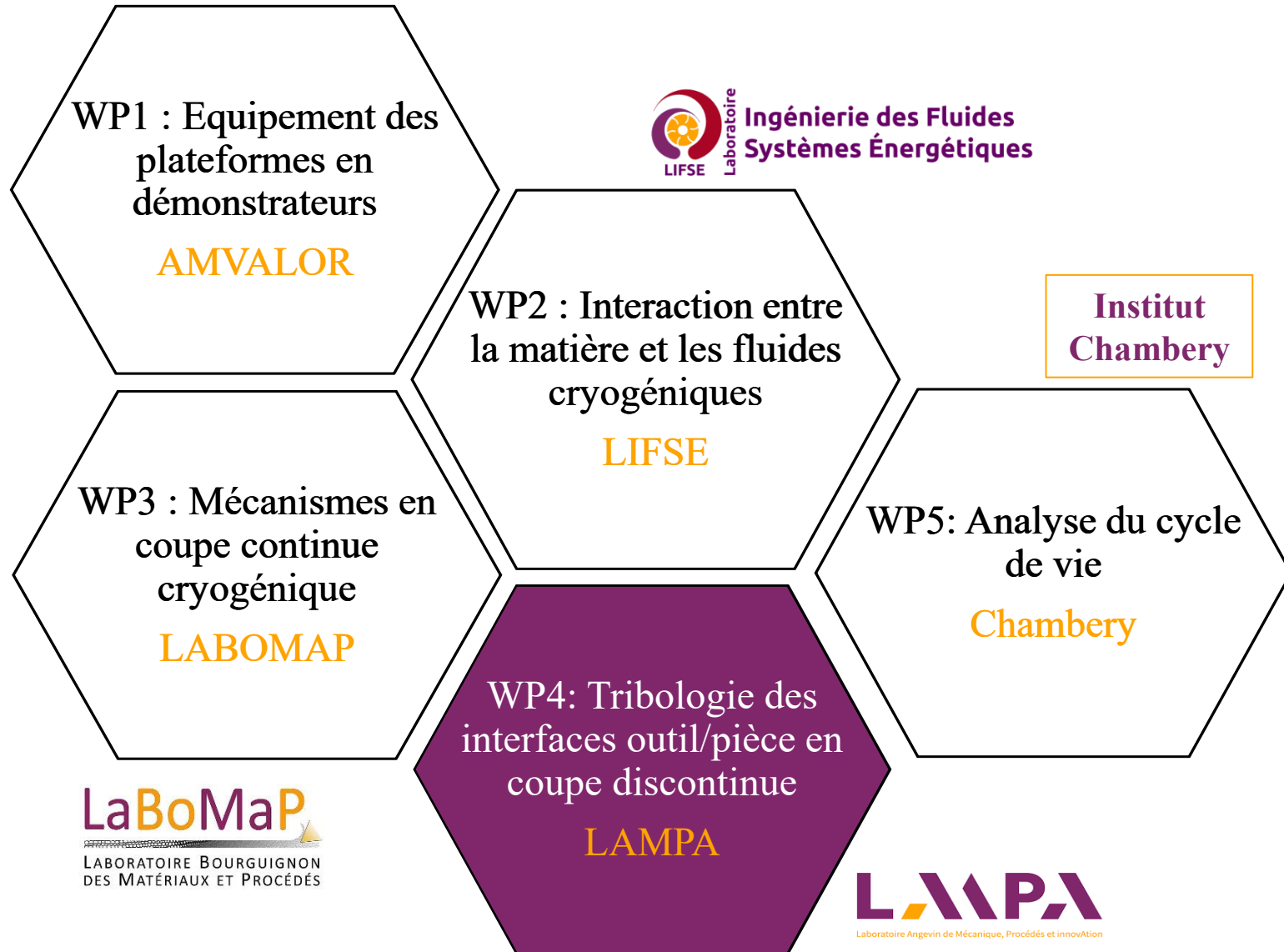
Financeurs :

Institut CARNOT ARTS

CETIM

Région Pays de la Loire

Angers Loire Métropole (aldev)

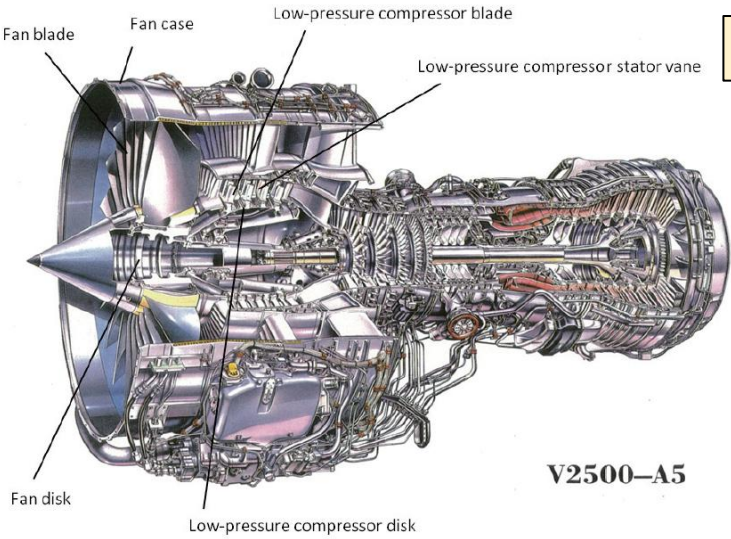
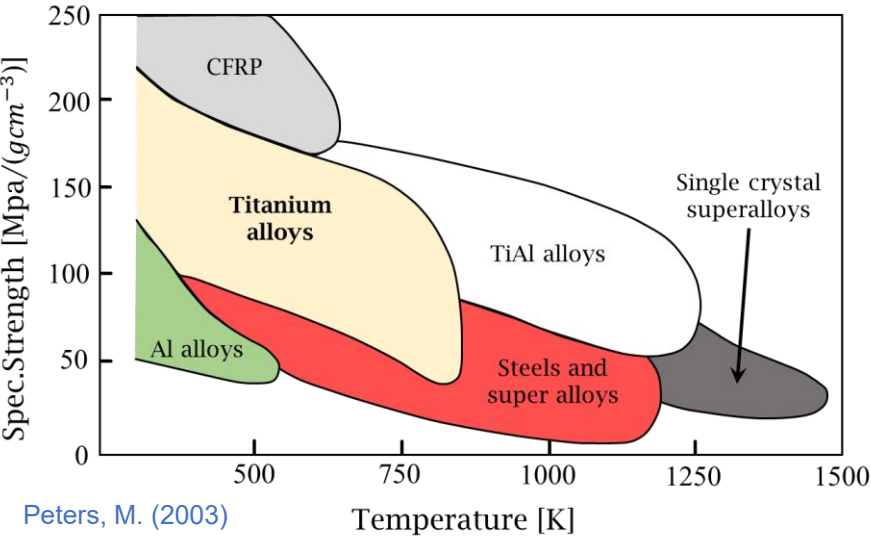


Contexte

Caractéristiques des alliages de titane

- Faible densité
- Biocompatibilité
- Bonne résistance à la corrosion
- Excellentes propriétés mécaniques

Températures élevées
600 °C



Moteur d'avion

Inagaki, I. (2014)

Prothèse de genou artificielle



Prothèse de hanche artificielle



Implants dentaires

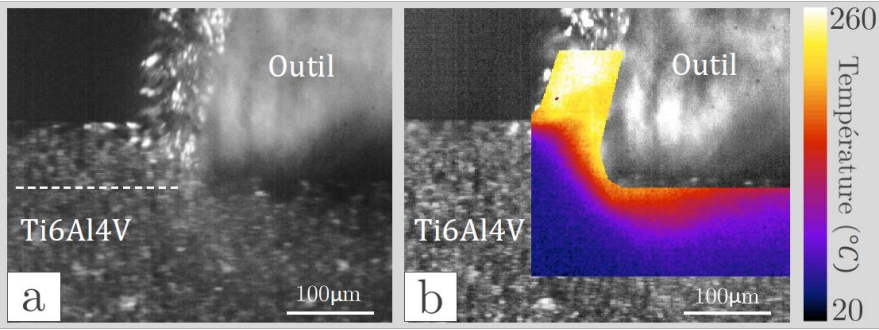
Brunette, D. (2001)

Brunette, D. M., Tengvall, P., Textor, M., & Thomsen, P. (2001). Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications (p. 232). Berlin: Springer.

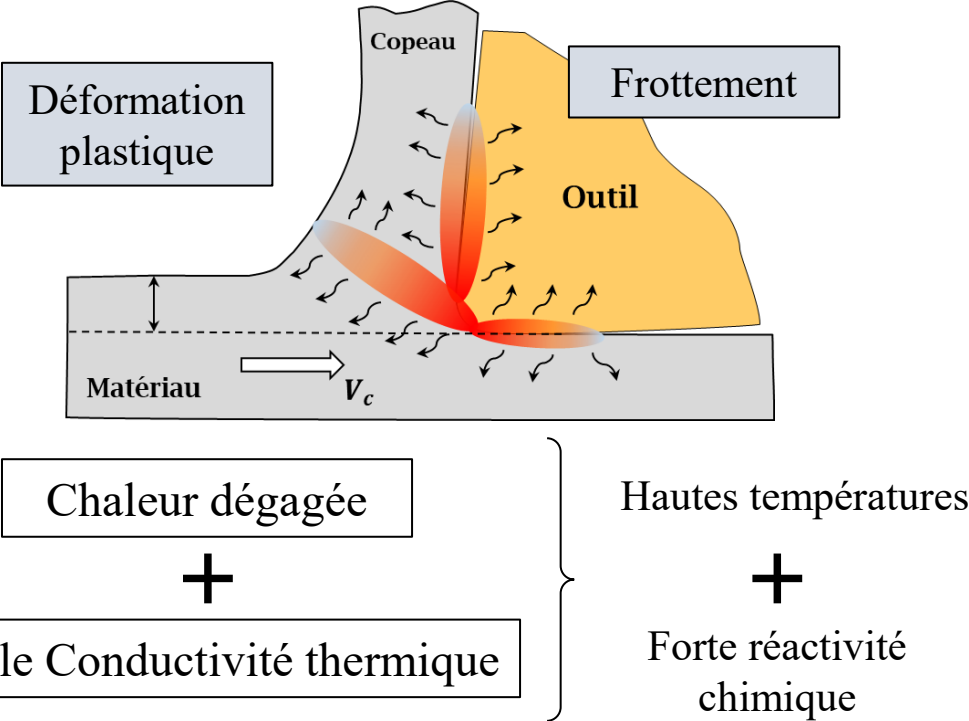
Inagaki, I., Takechi, T., Shirai, Y., & Ariyasu, N. (2014). Application and features of titanium for the aerospace industry. Nippon steel & sumitomo metal technical report, 106(106), 22-27.

Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C. H., & Leyens, C. (2003). Titanium alloys for aerospace applications. Advanced engineering materials, 5(6), 419-427.

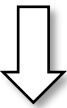
Contexte



Bonnet, C. (2021)

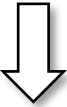


Limiter l'utilisation des fluides de coupe en usinage



Objectifs

- Refroidir efficacement la zone de coupe
- Protéger l'environnement et les opérateurs
- Eviter la pollution de surface des pièces



Chercher des alternatives aux fluides de coupe !

« Usinage cryogénique »

Bonnet, C. (2021). Analyse multi-échelle du chargement thermomécanique induit au cours du perçage du Ti-6Al-4V (Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).
Chaabani, S. (2021). Usinage cryogénique de l'alliage aéronautique: Inconel 718 (Doctoral dissertation, HESAM Université; Université de Mondragó).

Assistance Cryogénique

Principe

Refroidir avec des fluides « cryogéniques »

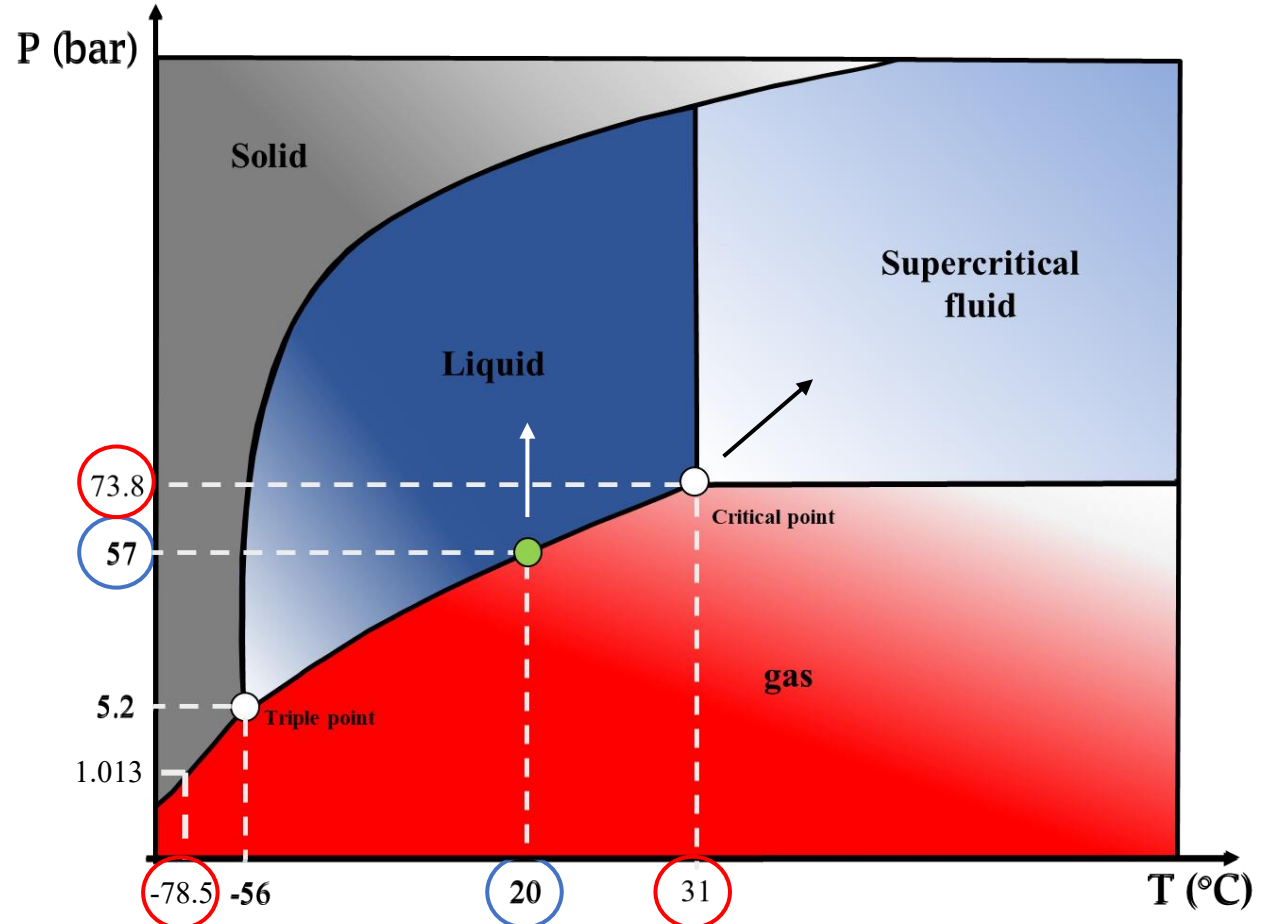
- ✓ L'azote liquide (LN2) **-196°C**
- ✓ Dioxyde de carbone liquide (LCO2)
- ✓ Dioxyde de carbone supercritique (ScCO2)



Fraisage avec LCO2



Fraisage avec ScCO2



A close-up photograph of a white, cylindrical machined part with a small circular feature at the bottom, set against a dark background.

Plan de la présentation

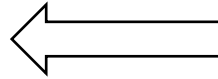
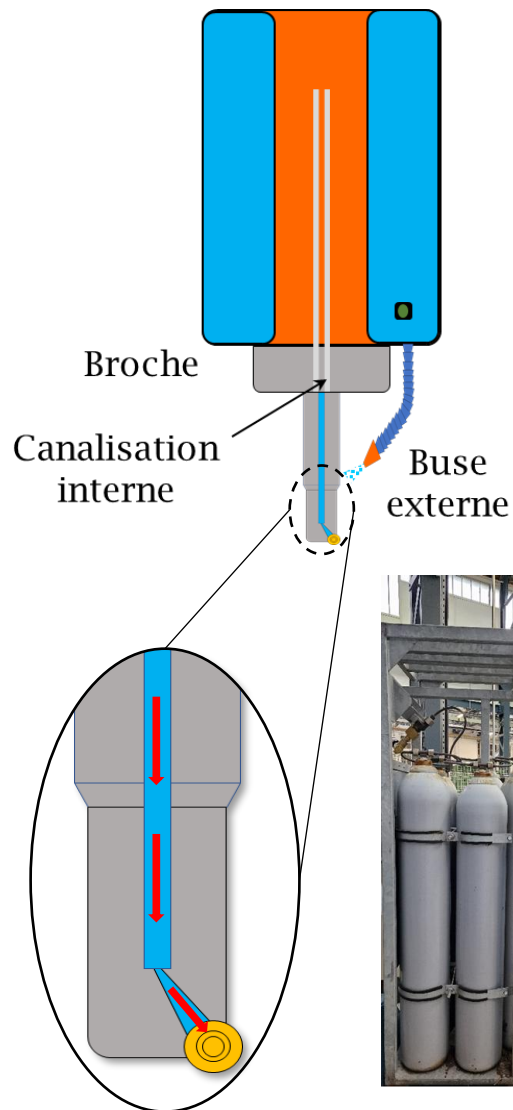
- I. *Effet des modes de refroidissement en fraisage*
- II. *Fraisage cryogénique*
- III. *Étude tribologique*
- IV. *Conclusion et perspective*

Soutenance de thèse | Achraf FERSI | 13 juin 2025

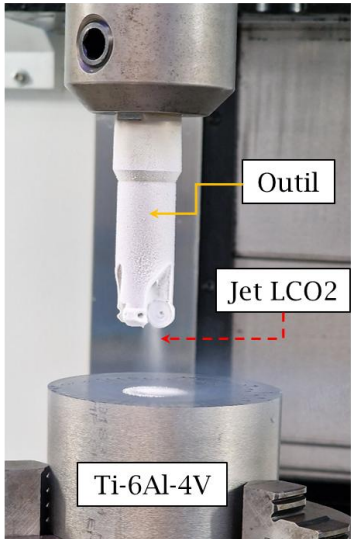
9

Conditions de lubrification

Type d'assistance	Pression (Bar)		Débit	Ø buse (mm)
Sec	-		-	-
Lubrification conventionnelle externe	5		12 L/min	5
Lubrification conventionnelle interne	12		12 L/min	3,8
Haute Pression (HP)	50		20 L/min	
LCO2	60		9,5 Kg/h	1
MQL	Air	2,6	25 ml/h	
	Huile	2,4		
LCO2 + MQL	Air	2,6	25 ml/h	
	Huile	2,4		
	CO2	60	9,5 Kg/h	

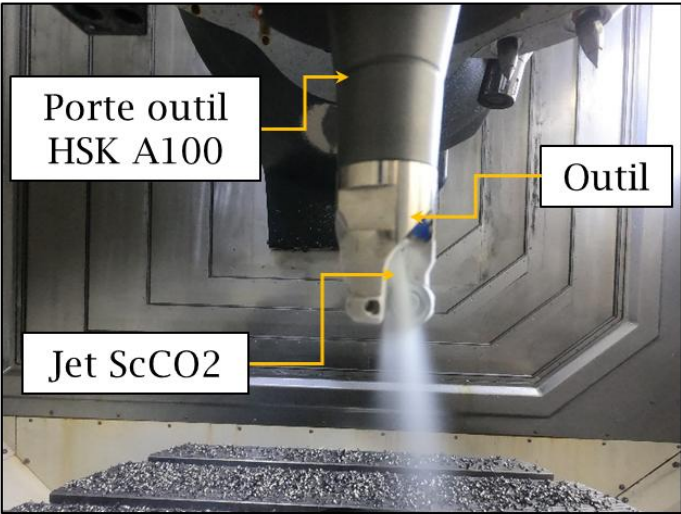
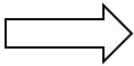
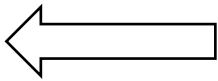
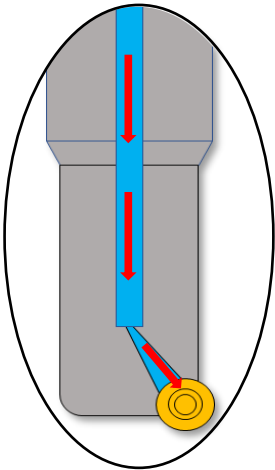


LCO2 / MQL / LCO2 + MQL

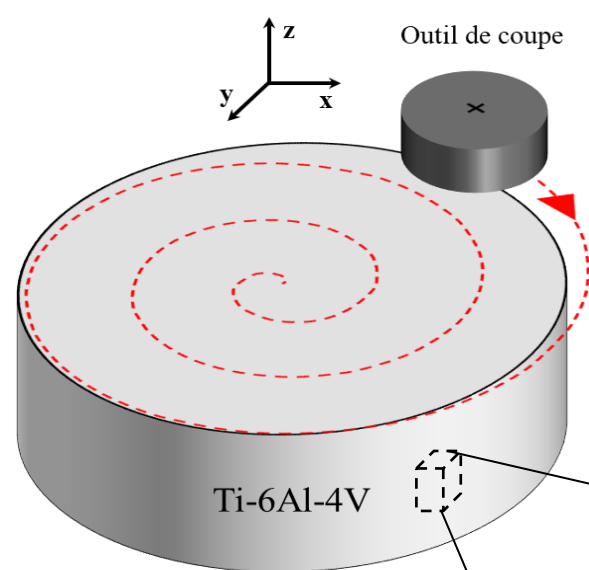


Conditions de lubrification

Type d'assistance	Pression (Bar)		Débit	Ø buse (mm)
Sec	-		-	-
Lubrification conventionnelle externe	5		12 L/min	5
Lubrification conventionnelle interne	12		12 L/min	3,8
Haute Pression (HP)	50		20 L/min	
LCO2	60		9,5 Kg/h	1
MQL	air	2,6	25 ml/h	
	Huile	2,4		
LCO2 + MQL	air	2,6	25 ml/h	
	Huile	2,4		
	CO2	60	9,5 Kg/h	
ScCO2	120		12 kg/h	0,25



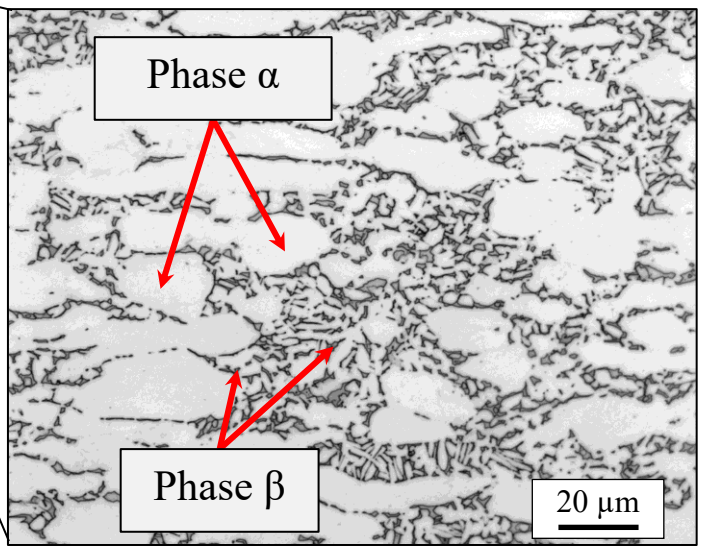
Essai de fraisage



Outil de coupe

Ti-6Al-4V

Usinage en spirale

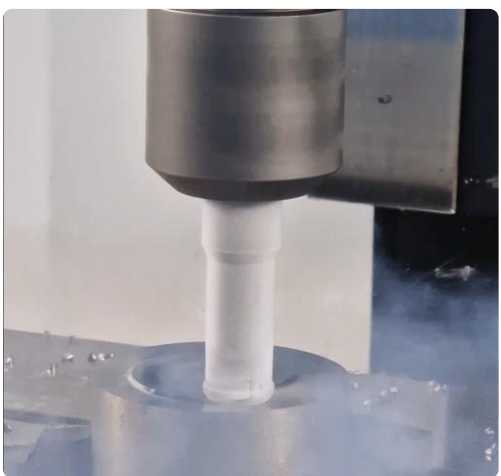


Phase α

Phase β

20 μm

Matériau étudié

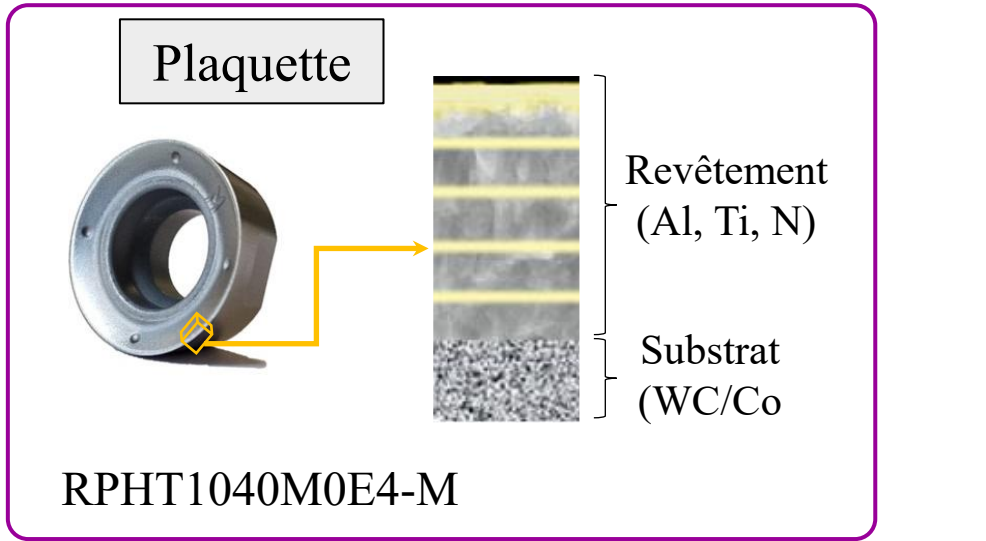




Outil

Sortie du fluide

ARP5PR2503SA25M



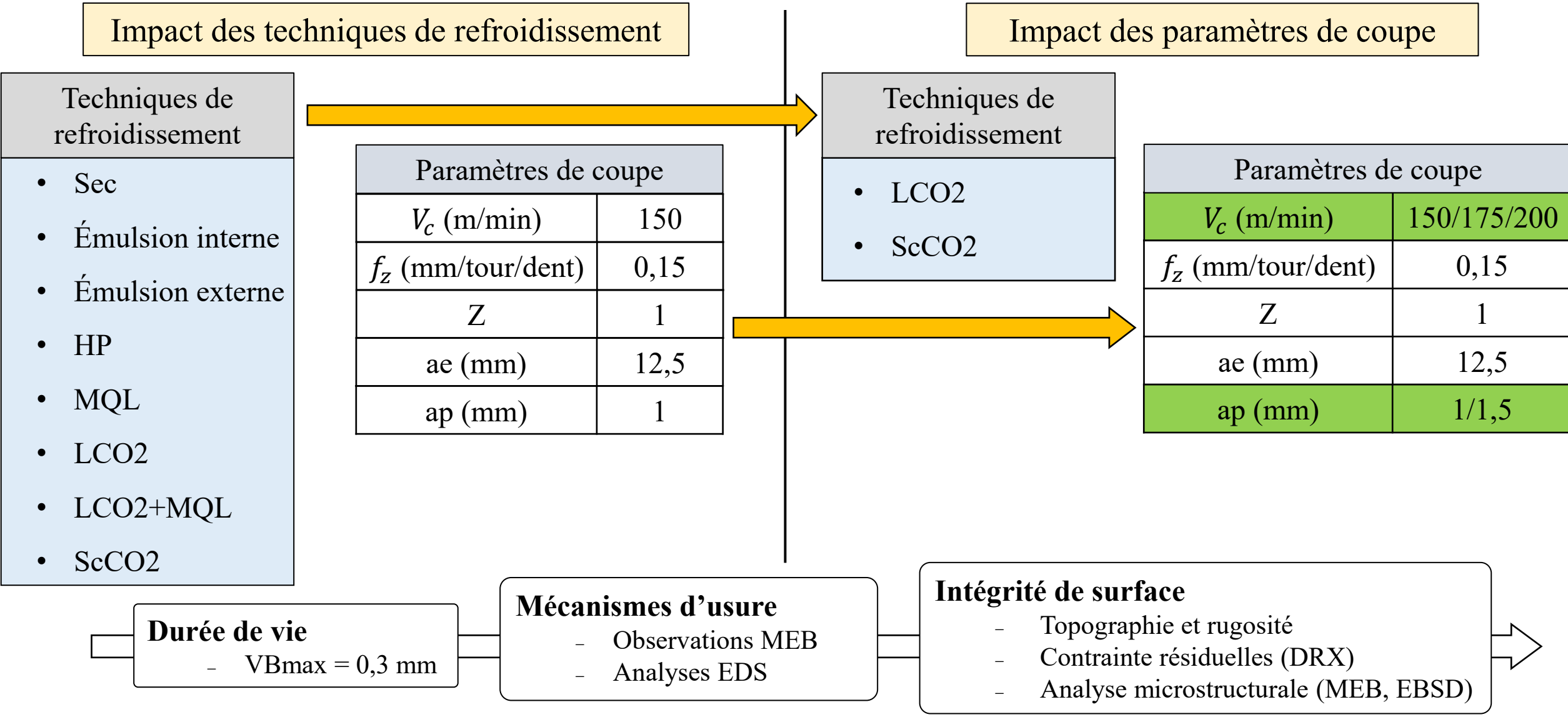
Plaquette

Revêtement (Al, Ti, N)

Substrat (WC/Co)

RPHT1040M0E4-M

Démarche expérimentale



Démarche expérimentale

Impact des techniques de refroidissement

Techniques de refroidissement

- Sec
- Émulsion interne
- Émulsion externe
- HP
- MQL
- LCO2
- LCO2+MQL
- ScCO2

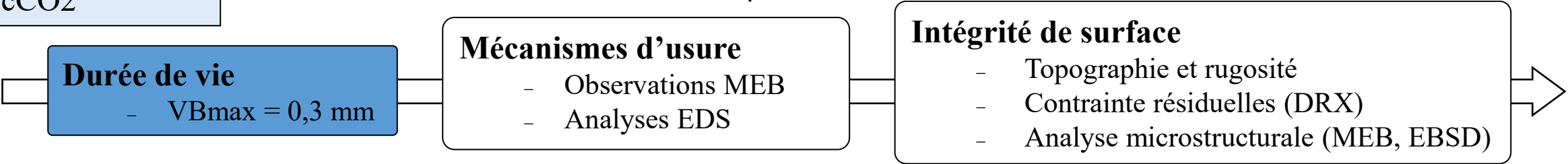
Paramètres de coupe	
V_c (m/min)	150
f_z (mm/tour/dent)	0,15
Z	1
ae (mm)	12,5
ap (mm)	1

Impact des paramètres de coupe

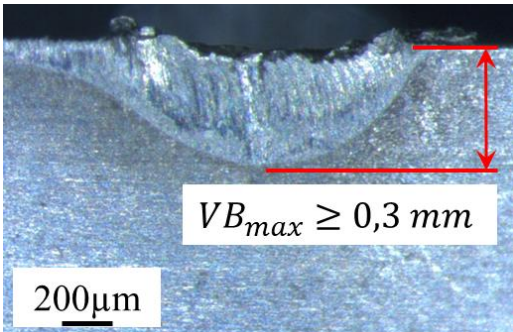
Techniques de refroidissement

- LCO2
- ScCO2

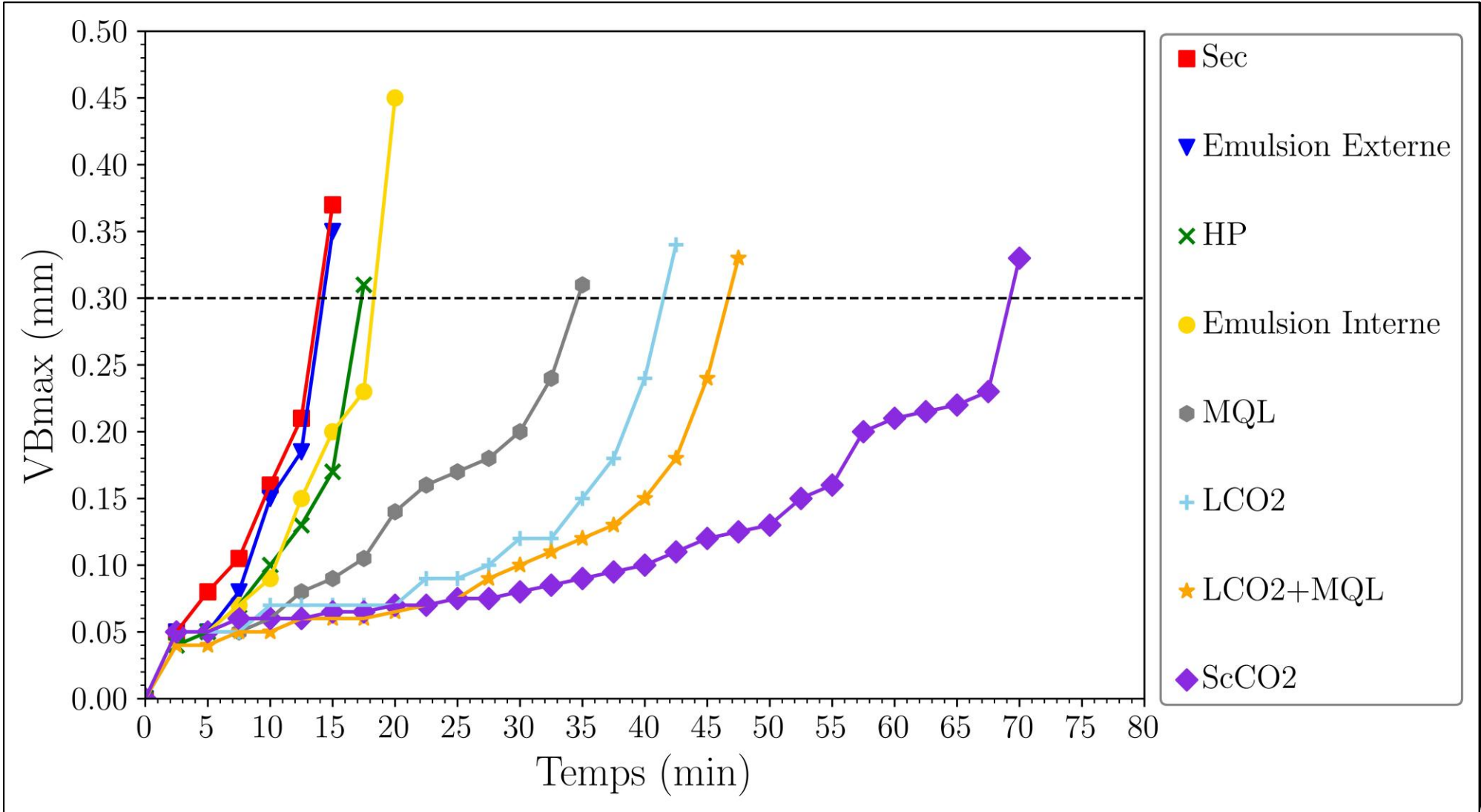
Paramètres de coupe	
V_c (m/min)	150/175/200
f_z (mm/tour/dent)	0,15
Z	1
ae (mm)	12,5
ap (mm)	1/1,5



Durée de vie



Critère de durée de vie



Démarche expérimentale

Impact des techniques de refroidissement

Techniques de refroidissement

- Sec
- Émulsion interne
- Émulsion externe
- HP
- MQL
- LCO2
- LCO2+MQL
- ScCO2

Paramètres de coupe	
V_c (m/min)	150
f_z (mm/tour/dent)	0,15
Z	1
ae (mm)	12,5
ap (mm)	1

Impact des paramètres de coupe

Techniques de refroidissement

- LCO2
- ScCO2

Paramètres de coupe	
V_c (m/min)	150/175/200
f_z (mm/tour/dent)	0,15
Z	1
ae (mm)	12,5
ap (mm)	1/1,5

Durée de vie

- $VB_{max} = 0,3\text{ mm}$

Mécanismes d'usure

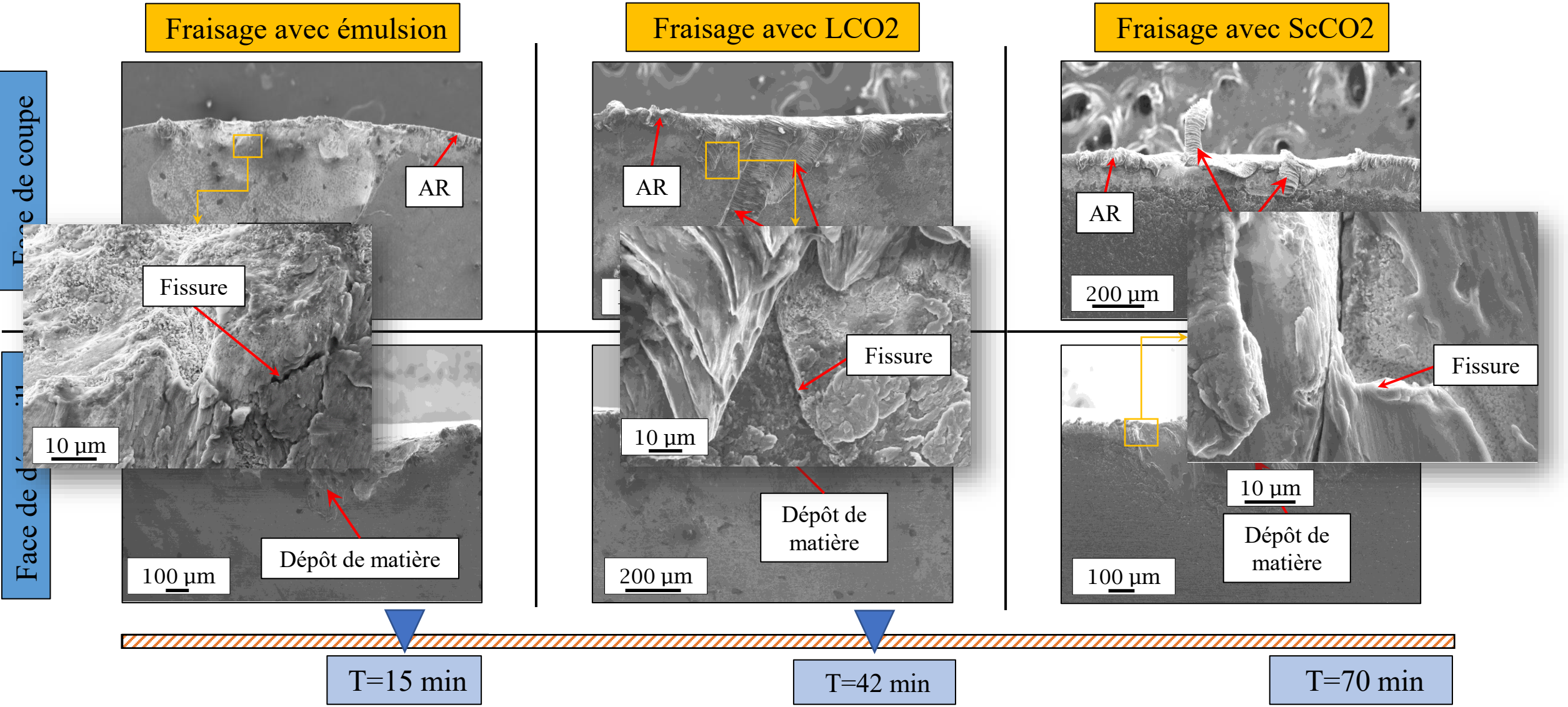
- Observations MEB
- Analyses EDS

Intégrité de surface

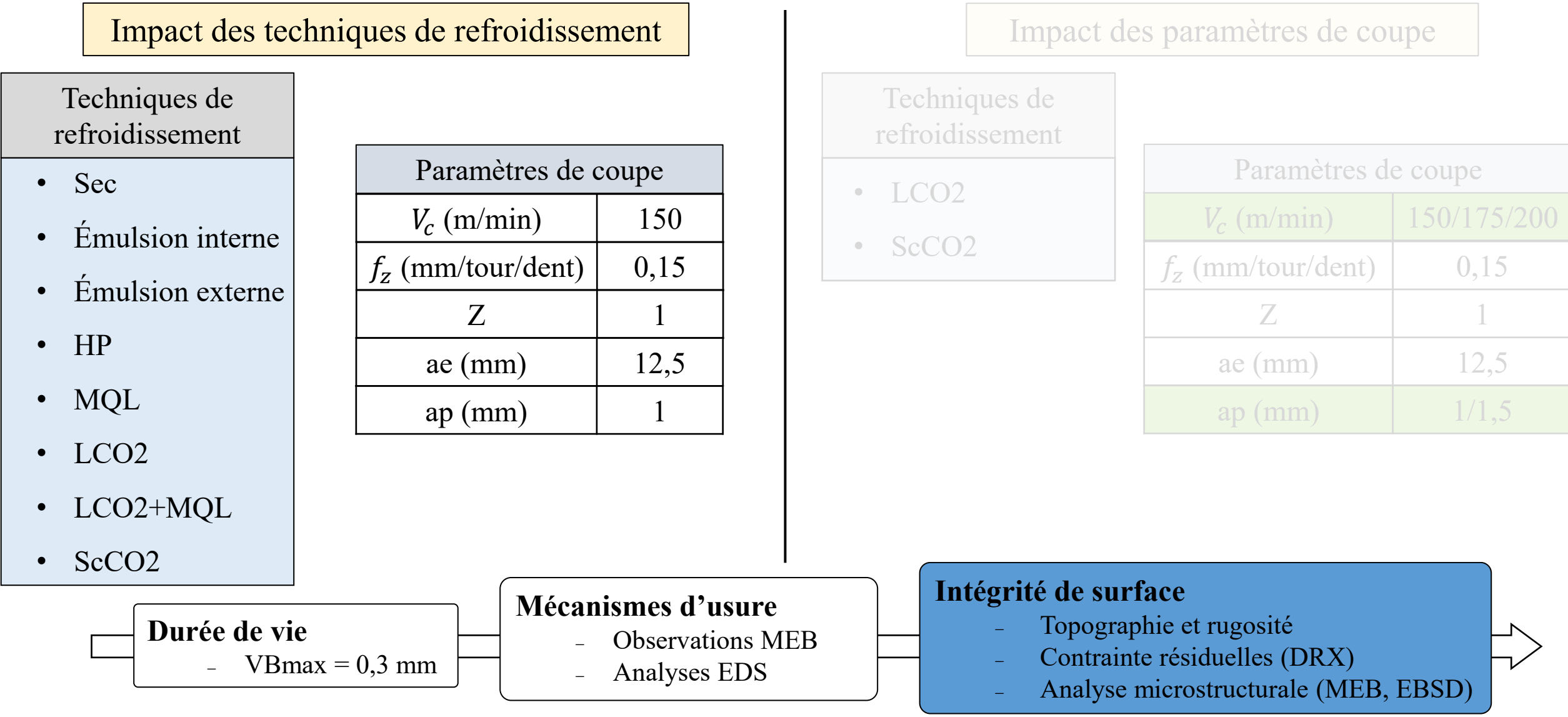
- Topographie et rugosité
- Contrainte résiduelles (DRX)
- Analyse microstructurale (MEB, EBSD)



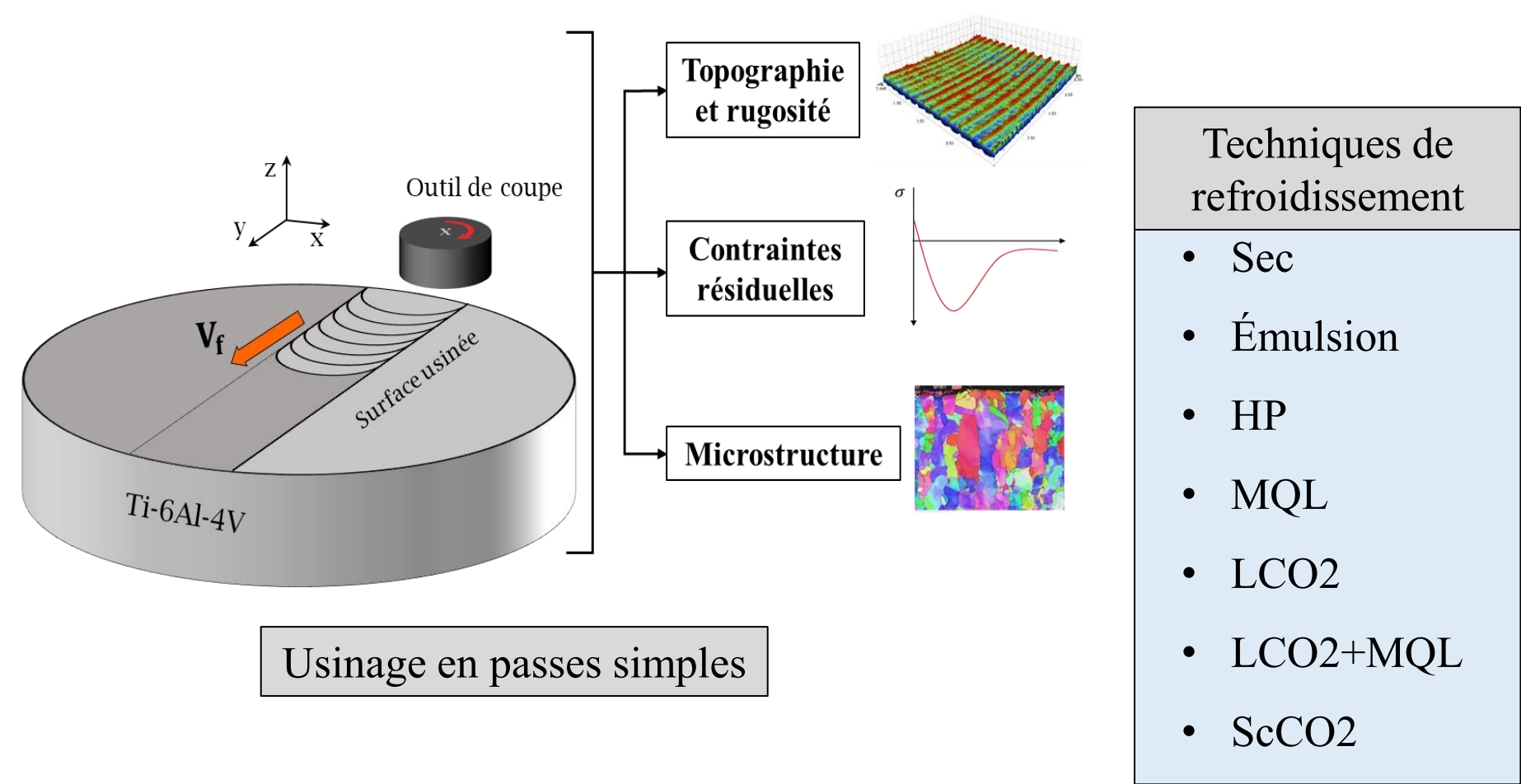
Mécanismes d'usure



Démarche expérimentale



Intégrité de surface



Paramètres de coupe	
V_c (m/min)	150
f_z (mm/tour/dent)	0,15
Z	1
a_e (mm)	12,5
a_p (mm)	1

Synthèse

Point de fonctionnement

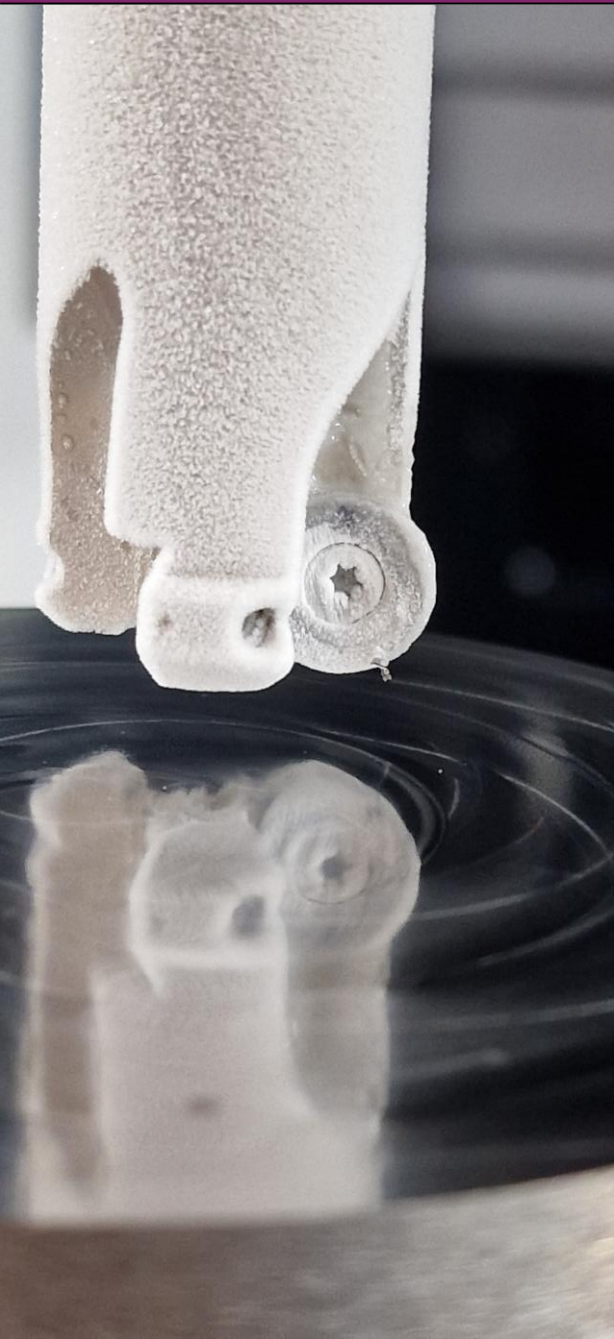
$V_c = 150\text{ m. min}^{-1}$
 $f_z = 0,15\text{ mm/tour/dent}$
 $a_p = 1\text{ mm}$
 $a_e = 12,5\text{ mm}$

	Gain en durée de vie	Mécanismes de dégradation et d'usure			Intégrité de surface	
		Adhésion	Fissure	Écaillage	Ra (µm)	C.R (MPa)
Émulsion	14 min	+++	++	+++	0,39	-250
HP	+21%	+++	++	+++	0,3	-245
MQL	+142%	++	++	+++	0,24	-240
LCO2+MQL	+227%	++	++	+++	0,25	-260
LCO2	+191%	++	++	---	0,25	-255
ScCO2	+385%	++	++	---	0,23	-350

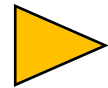
L'assistance cryogénique permet de :

- Prolonger considérablement la durée de vie par rapport à l'émulsion
- Limiter la dégradation de l'outil et l'usure par adhésion et écaillage
- Réduire la rugosité des surfaces usinées de 35 % à 41 % par rapport à l'émulsion

L'utilisation de ScCO2 augmente les contraintes résiduelles en compression de 40%



I. Effet des modes de refroidissement en fraisage

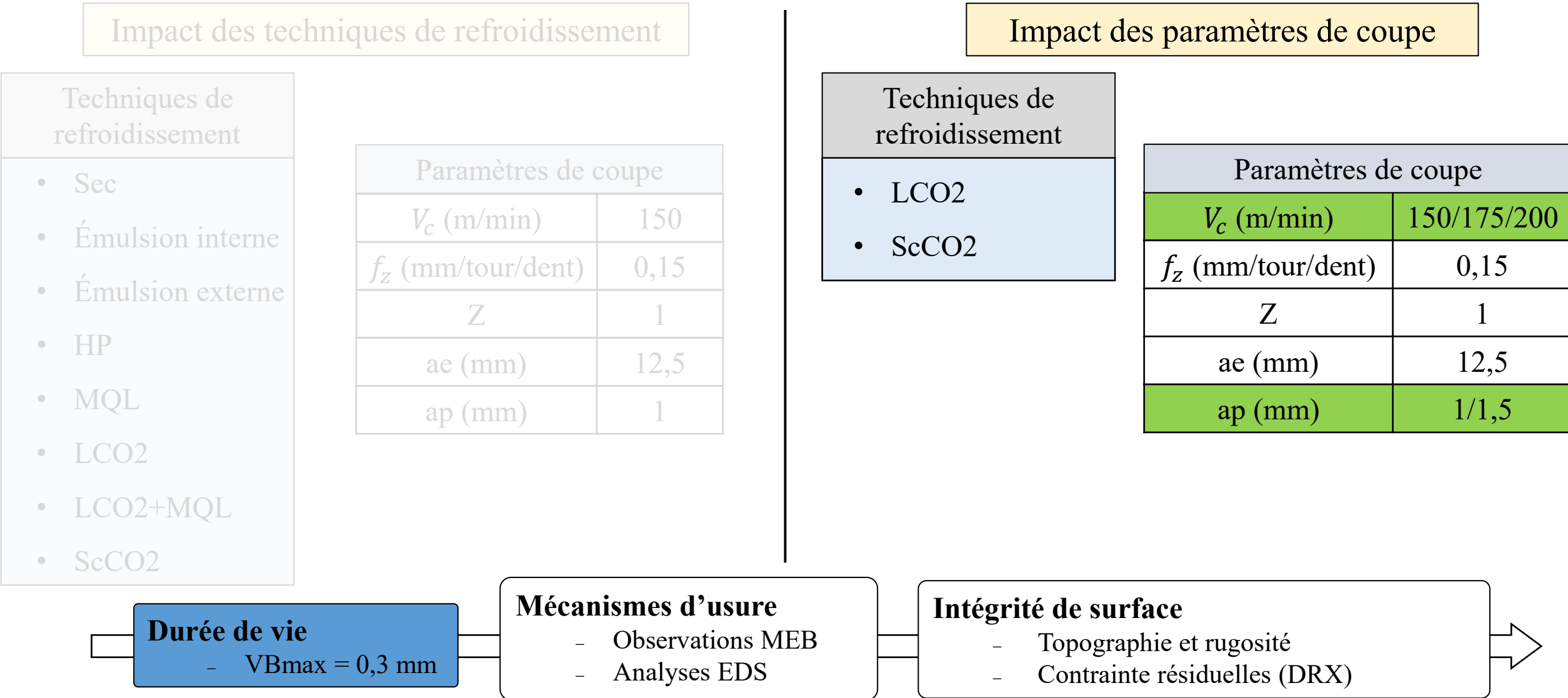


II. Fraisage cryogénique

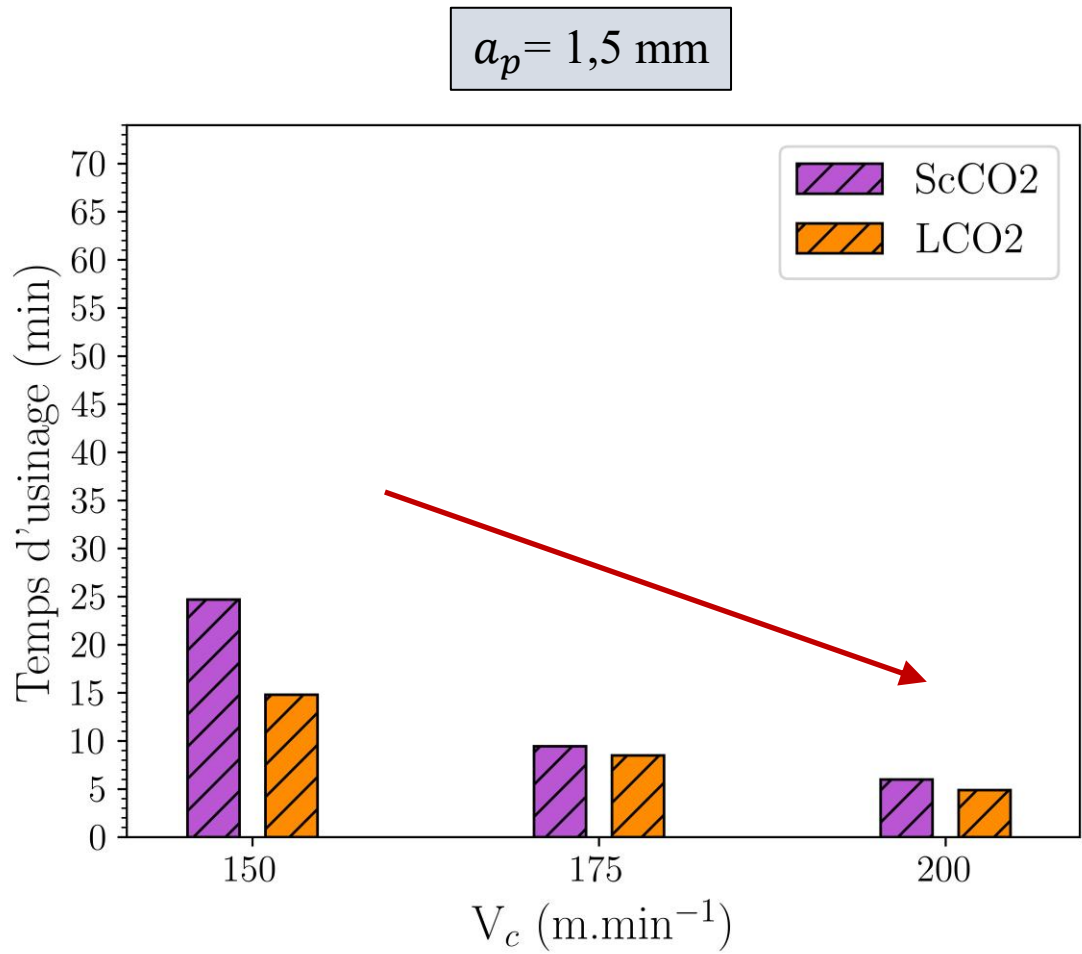
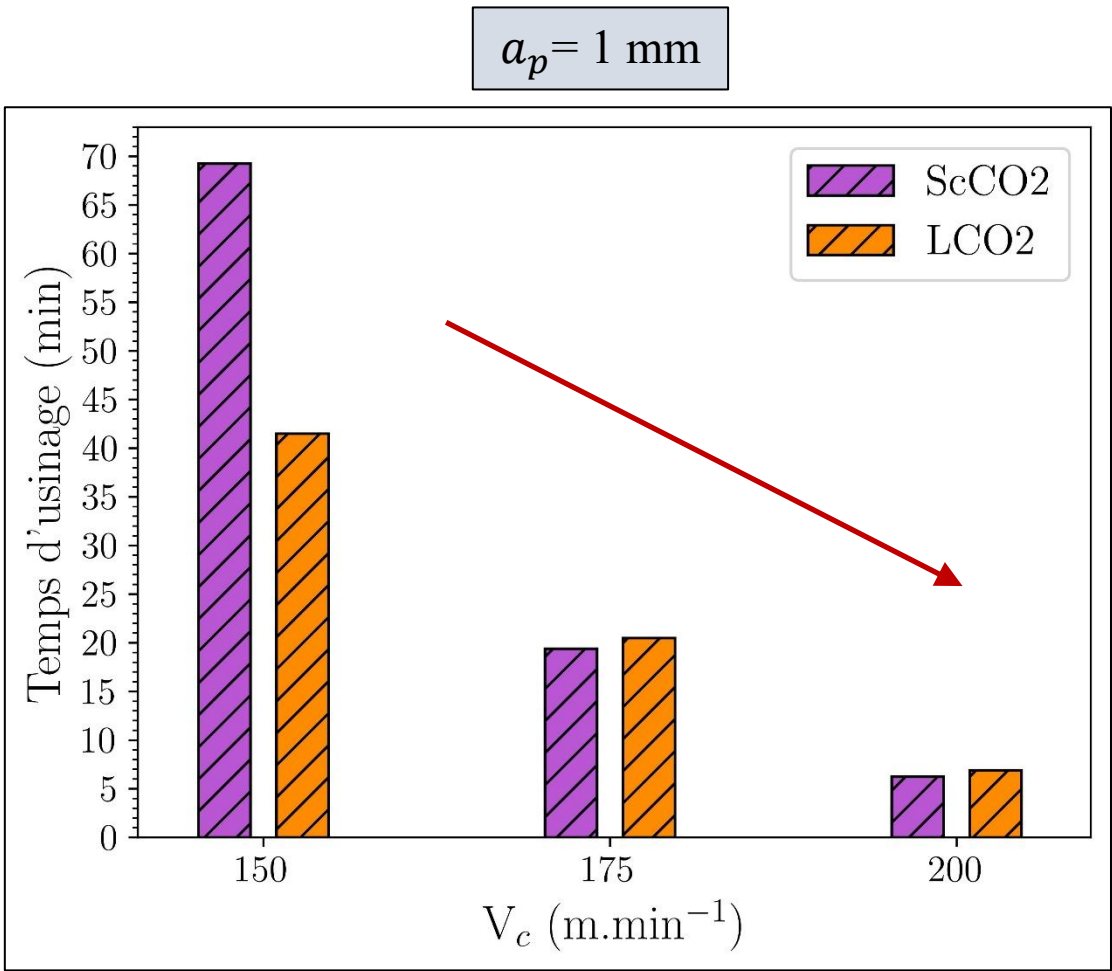
III. Étude tribologique

IV. Conclusion et perspective

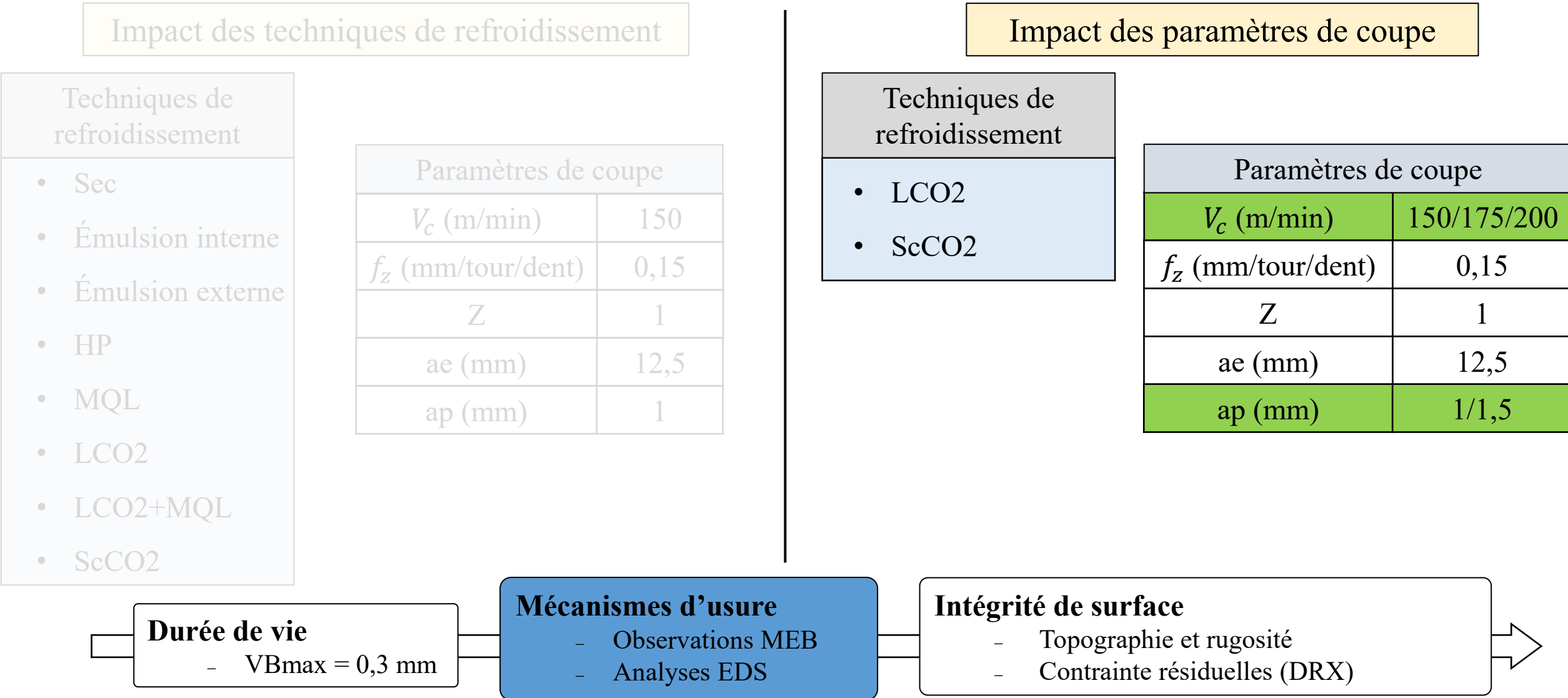
Démarche expérimentale



Durée de vie



Démarche expérimentale



Démarche expérimentale

Impact des techniques de refroidissement

- Techniques de refroidissement
- Sec
 - Émulsion interne
 - Émulsion externe
 - HP
 - MQL
 - LCO2
 - LCO2+MQL
 - ScCO2

Paramètres de coupe	
V_c (m/min)	150
f_z (mm/tour/dent)	0,15
Z	1
ae (mm)	12,5
ap (mm)	1

Impact des paramètres de coupe

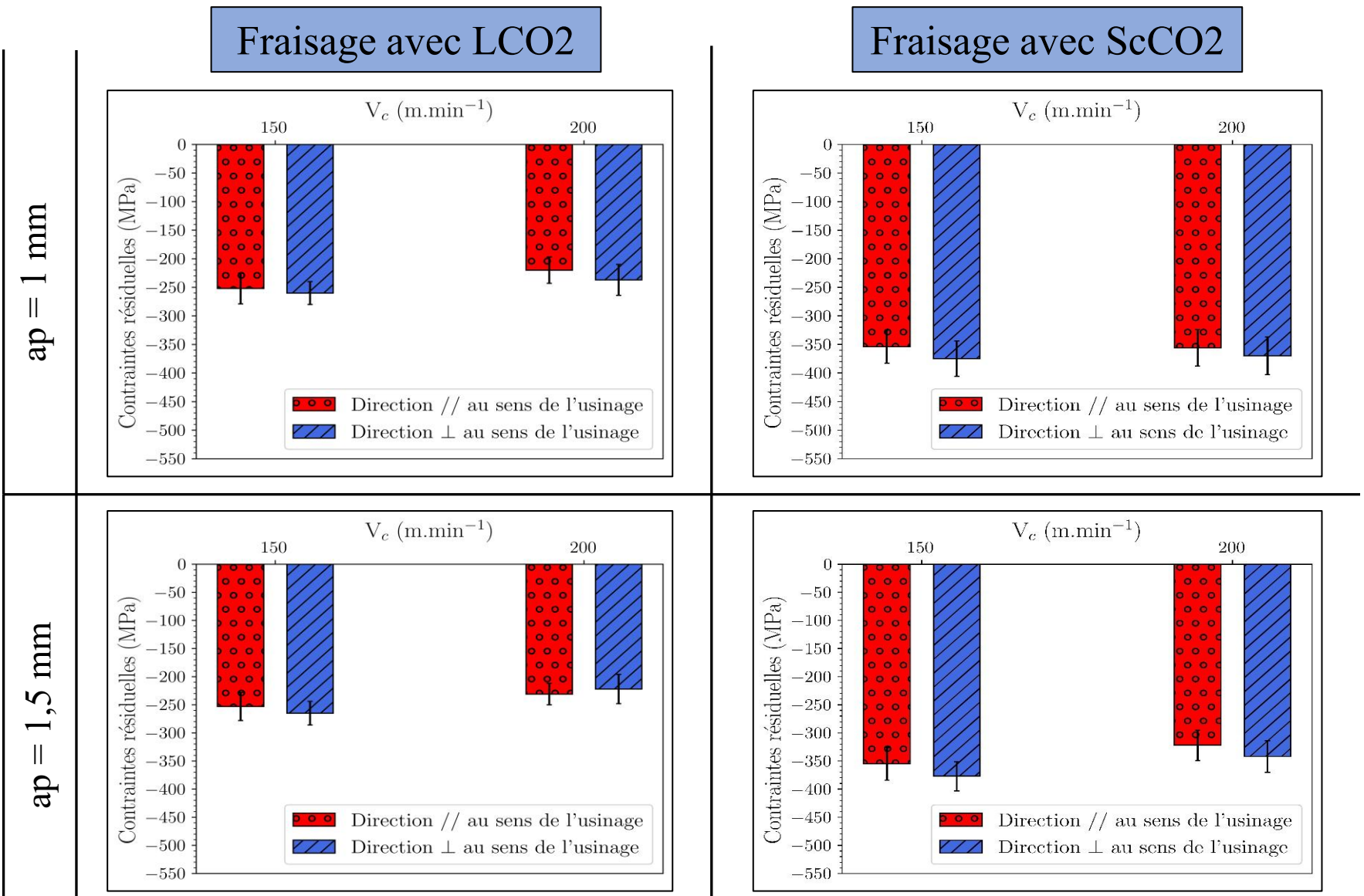
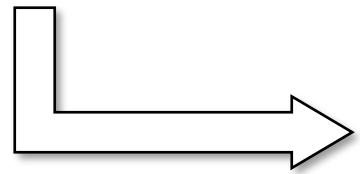
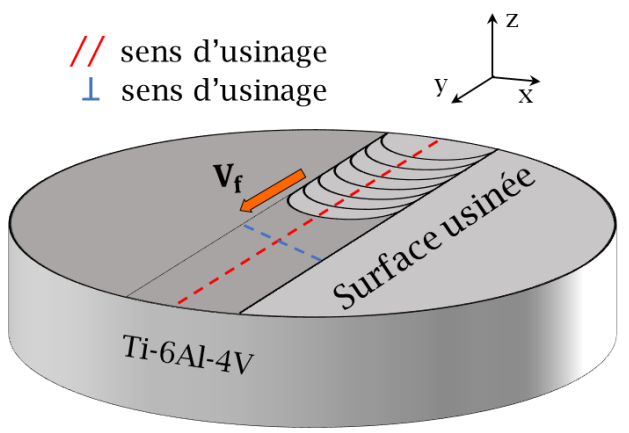
- Techniques de refroidissement
- LCO2
 - ScCO2

Paramètres de coupe	
V_c (m/min)	150/200
f_z (mm/tour/dent)	0,15
Z	1
ae (mm)	12,5
ap (mm)	1/1,5



Intégrité de surface

Contraintes résiduelles



Synthèse

Type d'assistance	Pression (Bar)		Débit	Ø buse (mm)
Sec	-		-	-
Lubrification conventionnelle externe	5		12 L/min	5
Lubrification conventionnelle interne	12		12 L/min	3,8
Haute Pression (HP)	50		20 L/min	
LCO2	60		9,5 Kg/h	1
MQL	air	2,6	25 ml/h	
	Huile	2,4		
LCO2 + MQL	air	2,6	25 ml/h	
	Huile	2,4		
	CO2	60	9,5 Kg/h	
ScCO2	120		12 kg/h	0,25

- Le **ScCO2 est plus efficace** que le LCO2 lors de fraisage à une vitesse de 150 m. min⁻¹
- La **qualité des surfaces n'est pas influencée** par la nature de fluide cryogénique.
- Le fraisage avec **ScCO2 génère des contraintes résiduelles plus importantes** que celles obtenus en cas de fraisage avec LCO2.
- Pour une durée de vie fixé à 14 minutes, **l'assistance cryogénique avec LCO2 / ScCO2 permet d'augmenter la productivité de 20 %** par rapport à l'émulsion.