



UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

# Des évolutions en projection thermique depuis une vingtaine d'années

16<sup>ème</sup> Journée du réseau plasmas froids du 3 au 6 octobre 2022

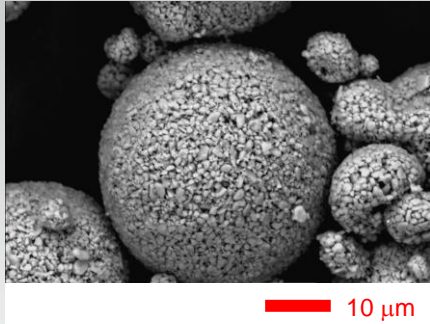
MarieP PLANCHE, Geoffrey DARUT, Hanlin LIAO

# La projection plasma - Généralités

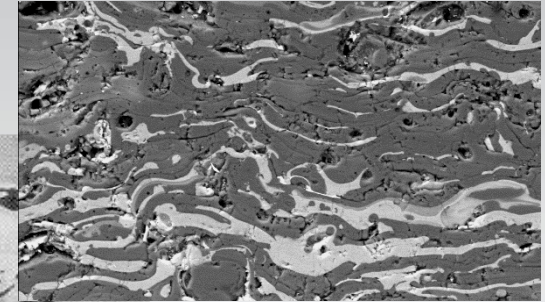
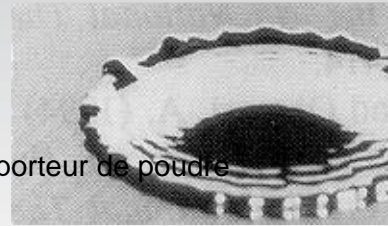
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## ❖ Principe (à partir d'une poudre)

Revêtement



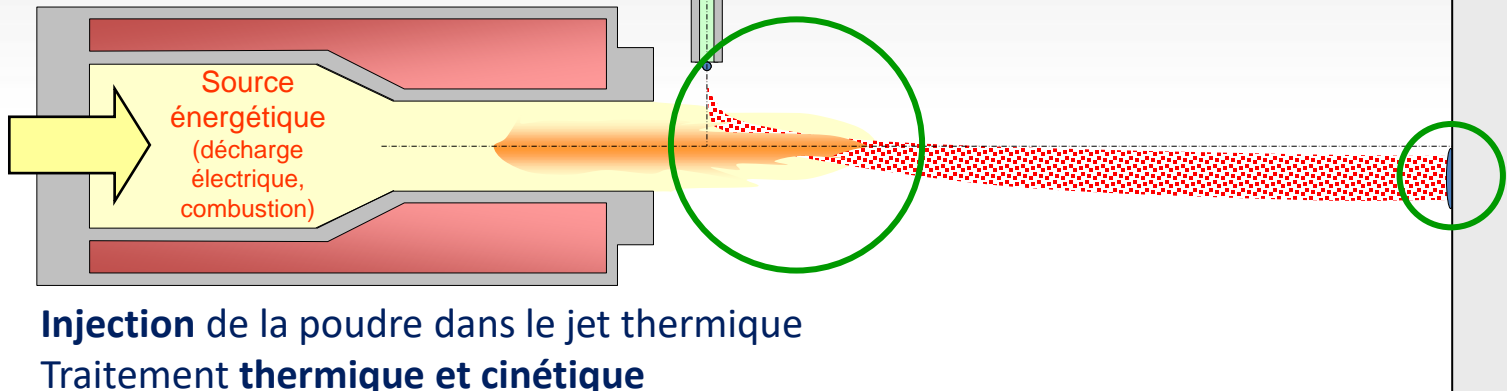
R. Bhola et al., ITSC 1996, 657



Gaz porteur de poudre

Injecteur de poudre

Outils de projection



- **Injection** de la poudre dans le jet thermique
- Traitement **thermique et cinétique**
- **Impact** sur un substrat où elles s'étalent sous forme de lamelles
- L'**empilement** conduit à la formation d'un **dépôt**
- **Différents procédés** existent selon le type de poudres, la thermique, la cinétique ou l'environnement

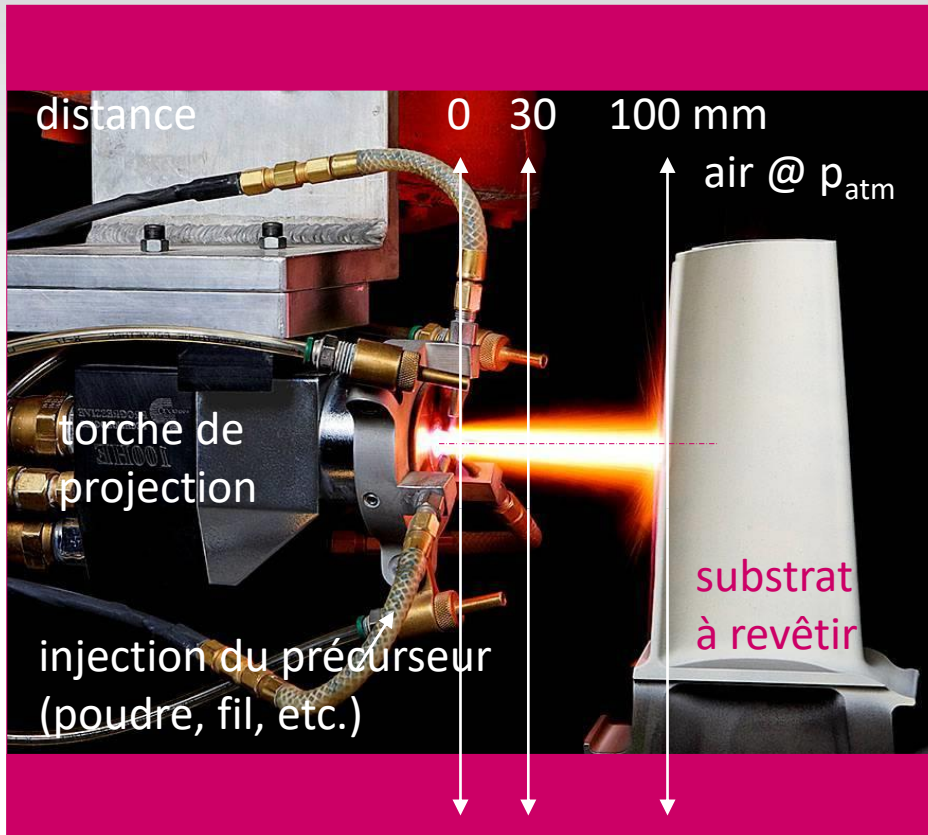
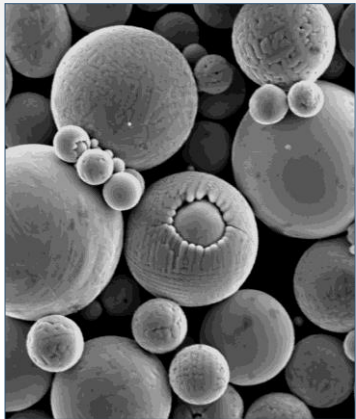
# Principe de la projection thermique - Généralités

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

- durée d'écrasement : 1  $\mu$ s
- durée de solidification : 2 à 5  $\mu$ s ( $\sim 10^6$  K.s<sup>-1</sup>)
- durée avant l'impact d'une particule au même endroit : 1 ms

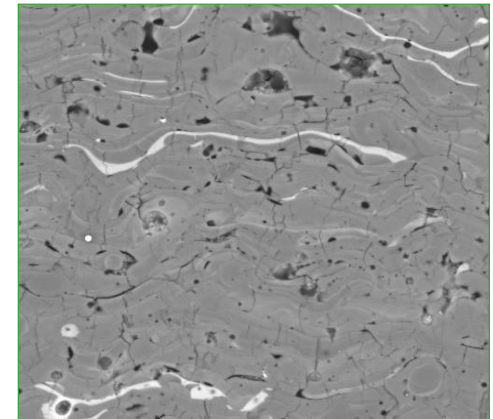
## précurseur micrométrique

- fusion congruente
- $T_{\text{vap.}} = T_{\text{fusion}} + 200$



## dépôt à structure micrométrique

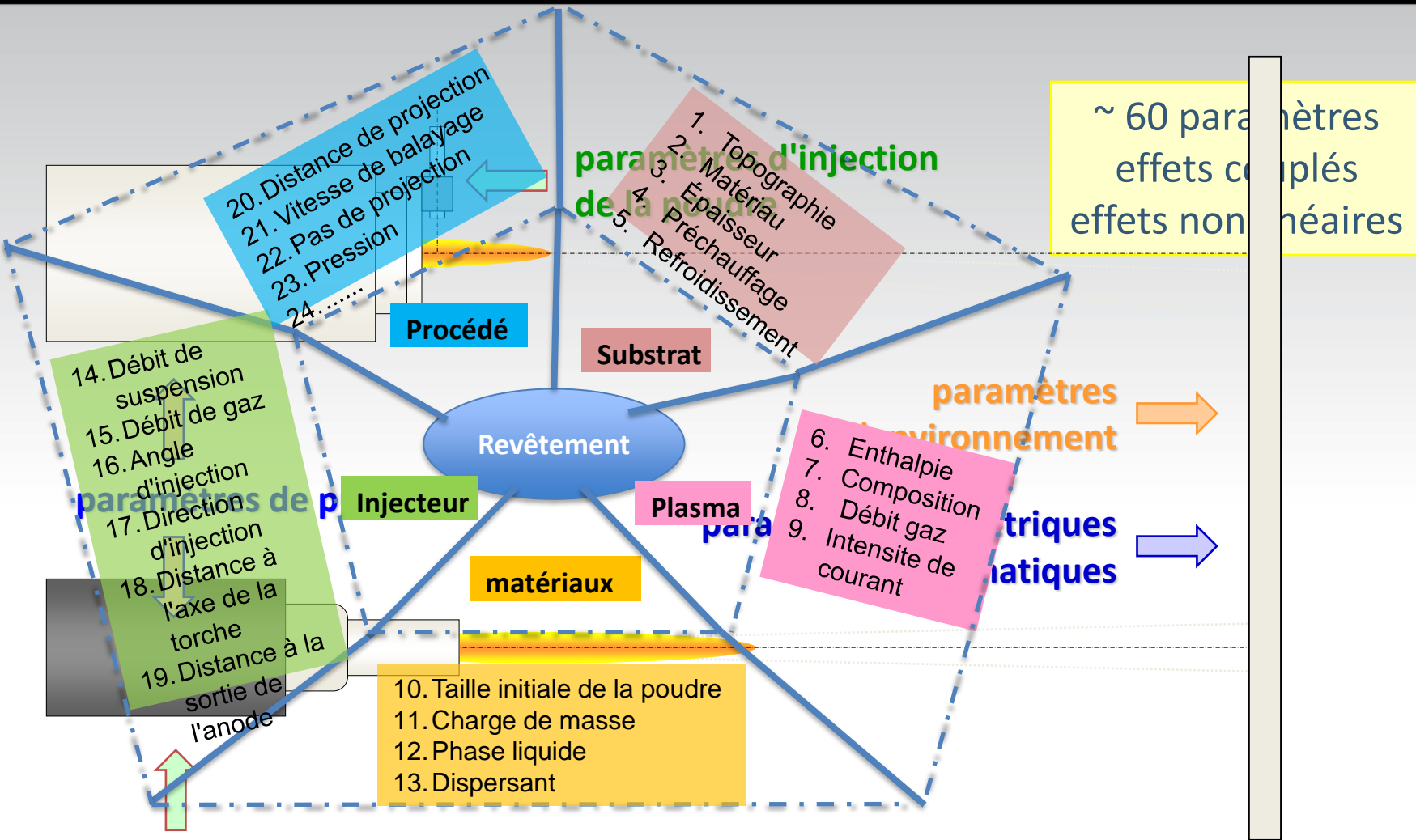
- matrice
- défauts d'empilement (pores / délaminations)
- fissures (relaxation des contraintes)



# Paramètres opératoires ou "piloteables"

## Paramètres qui influencent la microstructure

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



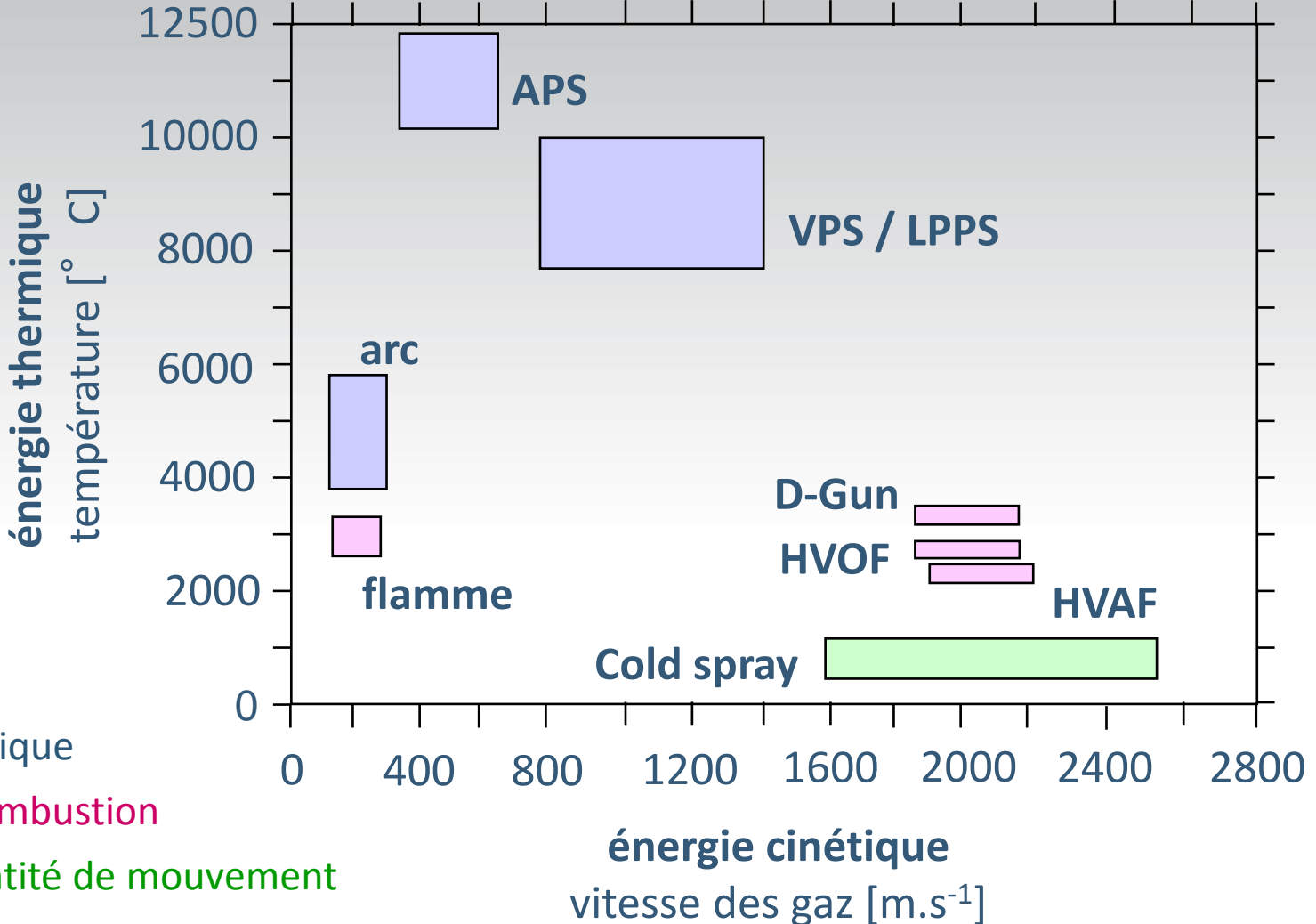
paramètres d'injection de la poudre





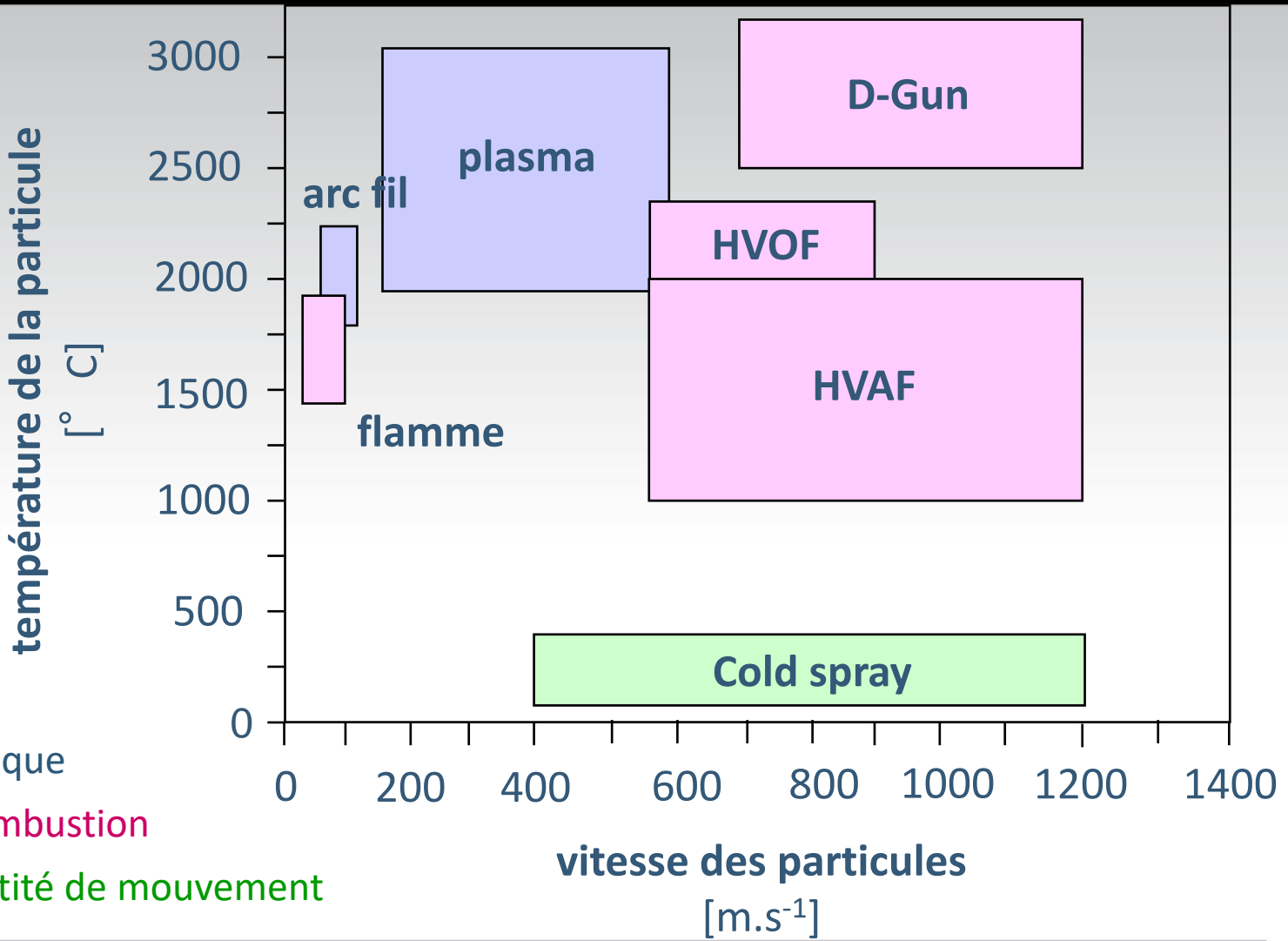
# Caractéristiques des sources

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



# Caractéristiques des procédés

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



- décharge électrique
- enthalpie de combustion
- densité de quantité de mouvement

# (r)évolutions dans le domaine de la projection thermique depuis 1980

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

➤ 1<sup>ère</sup> (r)évolution: fin 1970 (et depuis)

- **systèmes automatisés de projection** avec débitmètres massiques et robots multi-axes

➤ 2<sup>ème</sup> (r)évolution: début 1990 (et depuis)

- systèmes de **diagnostic en ligne**

➤ 3<sup>ème</sup> (r)évolution: milieu 1990 (et depuis)

- **modélisation des procédés**
- modèles CFD transitoires 2D et 3D

➤ 4<sup>ème</sup> (r)évolution: depuis le début 2000 (et depuis)

- amélioration de la performance des dépôts par le développement de **nouveaux procédés**
- procédés **robustes**
- **forte puissance** de torche

# 4<sup>ème</sup> (r)évolution: depuis le début 2000 (et depuis)...

## les recherches développées au laboratoire ICB PMDM

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

- Les améliorations des propriétés des revêtements
  - Projection de Suspension (SPS)- *YSZ*
- La projection de nouveaux matériaux
  - Projection sous très basse pression VLPPS- *TiN*
  - Projection à froid (Cold Spray) - *Mg*
- Les améliorations sur les procédés
  - Le développement autour de l'intelligence artificielle



# Améliorer les propriétés des dépôts en innovant sur les procédés

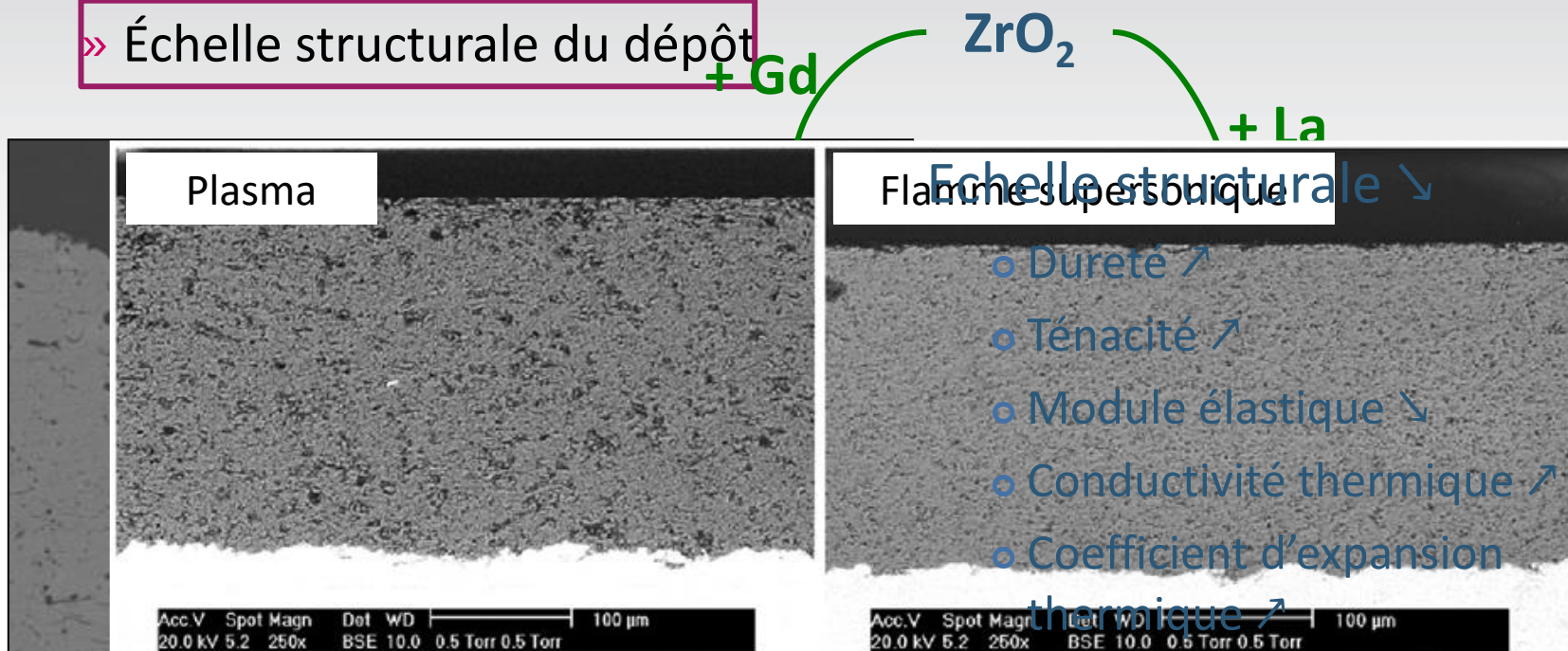
## La projection de suspension (SPS) de YSZ

# Modification des propriétés d'un dépôt projeté thermiquement

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## 3 principaux moyens d'action

- » Composition chimique
- » Procédé de projection
- » Échelle structurale du dépôt



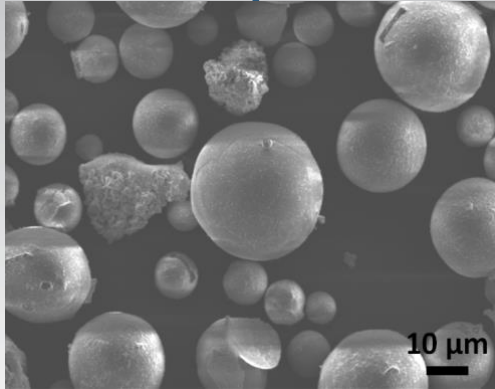
## Revêtements d'alumine

R. Ahmed, N. H. Faisal, A. M. Paradowska, et M. F. Fitzpatrick, « Residual Strain and Fracture Response of  $Al_2O_3$  Coatings Deposited via APS and HVOF Techniques », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 21, n° 1, p. 23-40, janv. 2012.  
R. Valsen, M. O. Jalligot, T. Steinke, D. E. Mack, et D. Stöver, « Overview on advanced thermal barrier coatings », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 205, n° 4, p. 938-942, nov. 2010.  
Gell, *Materials Science and Engineering A204*, 1995, pp 246-251

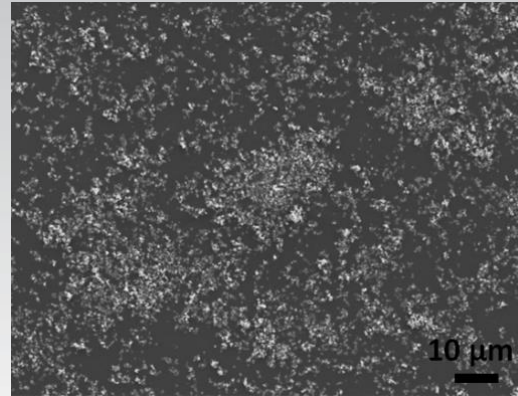
# Une solution réalisable pour augmenter les performances des revêtements

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## Réduire la taille des poudres



YSZ #204F ( Saint-Gobain,  $d_{50} = 25 \mu\text{m}$ )



CY5Z-NA (Saint-Gobain,  $d_{50} = 0,36 \mu\text{m}$ )

$$\frac{d_{25}}{d_{0,36}} = 69$$

$$\frac{S_{25}}{S_{0,36}} = 4823$$

$$\frac{V_{25}}{V_{0,36}} = 334898$$

## Inconvénients

Poudre  
Taille



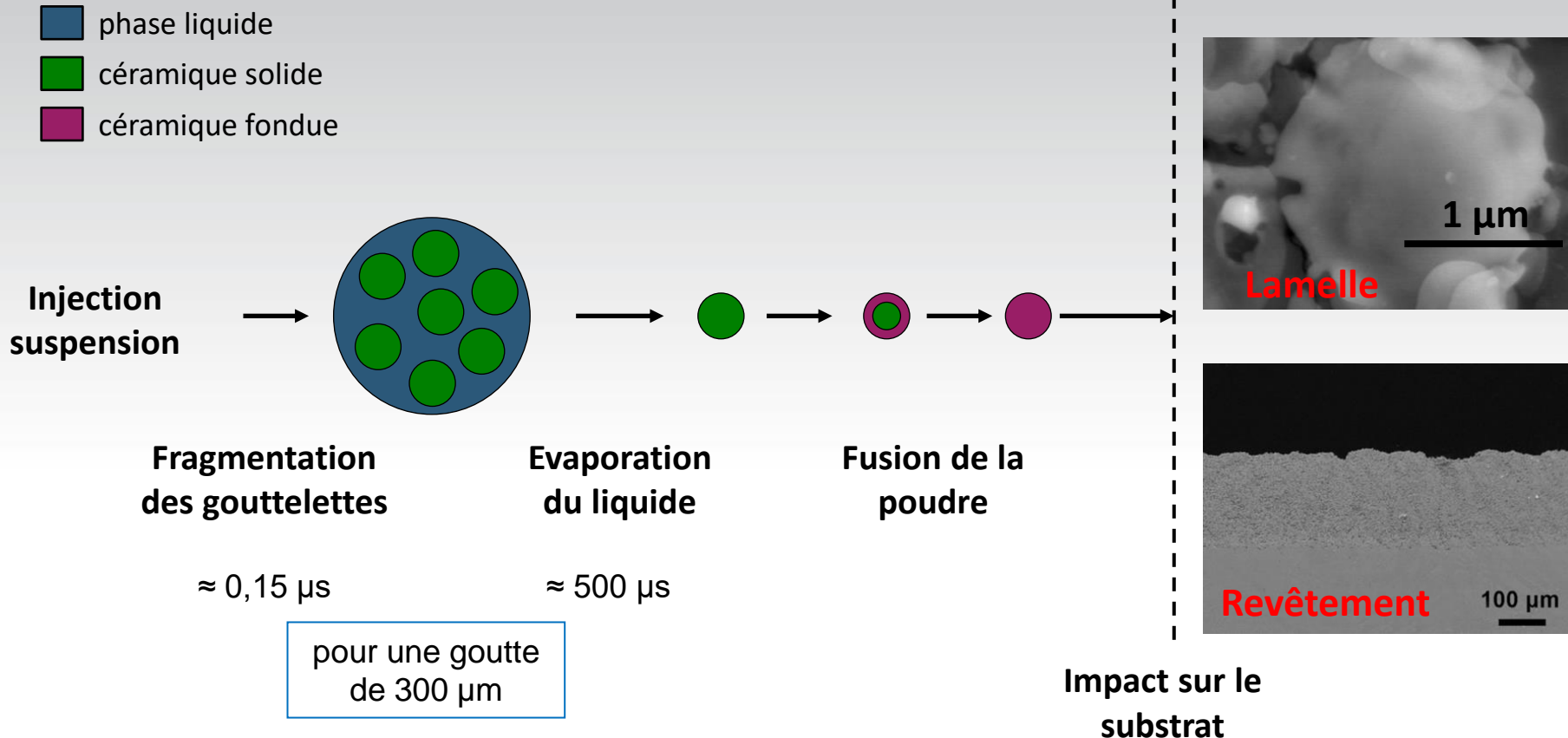
- Agrégation
- Faible fluidité
- Obstruction du tuyau d'injection

**Solution:** remplacer le gaz par un liquide porteur

# Mécanismes physiques en voie liquide

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## Étapes dans le jet thermique



P. Fauchais, R. Etchart-Salas, V. Rat, J. F. Coudert, N. Caron, et K. Wittmann-Ténèze, *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 17, n° 1, p. 31-59, févr. 2008.

J. Fazilleau, C. Delbos, V. Rat, J. F. Coudert, P. Fauchais, et B. Pateyron, *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 26, n° 4, p. 371-391, avr. 2006.

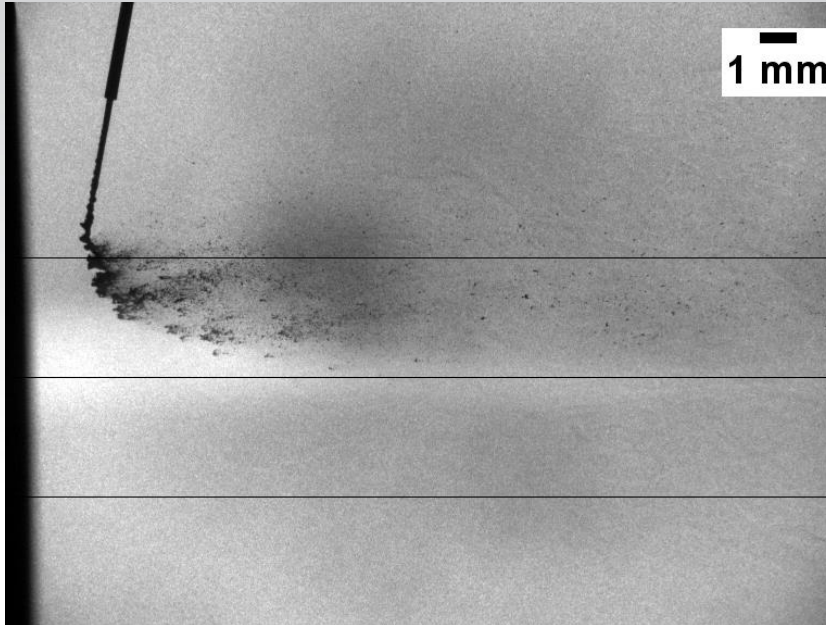
H. Kaßner, R. Vaßen, et D. Stöver, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 202, n° 18, p. 4355-4361, juin 2008.



# Systemes d'injection

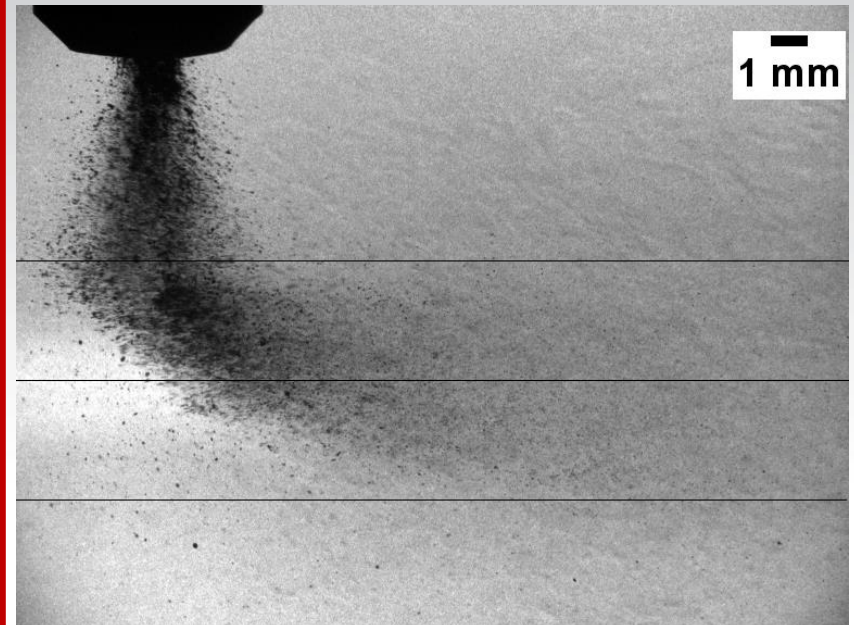
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE Belfort-MONTBÉLIARD

## Injecteur capillaire (jet continu)



- 😊 Simple
- 😊 Injection localisée
  - ☹️ Couplage entre paramètres plasma, débit et vitesse suspension
  - ☹️ Débit de suspension faible

## Atomiseur bi-fluide (nuage de gouttelettes)

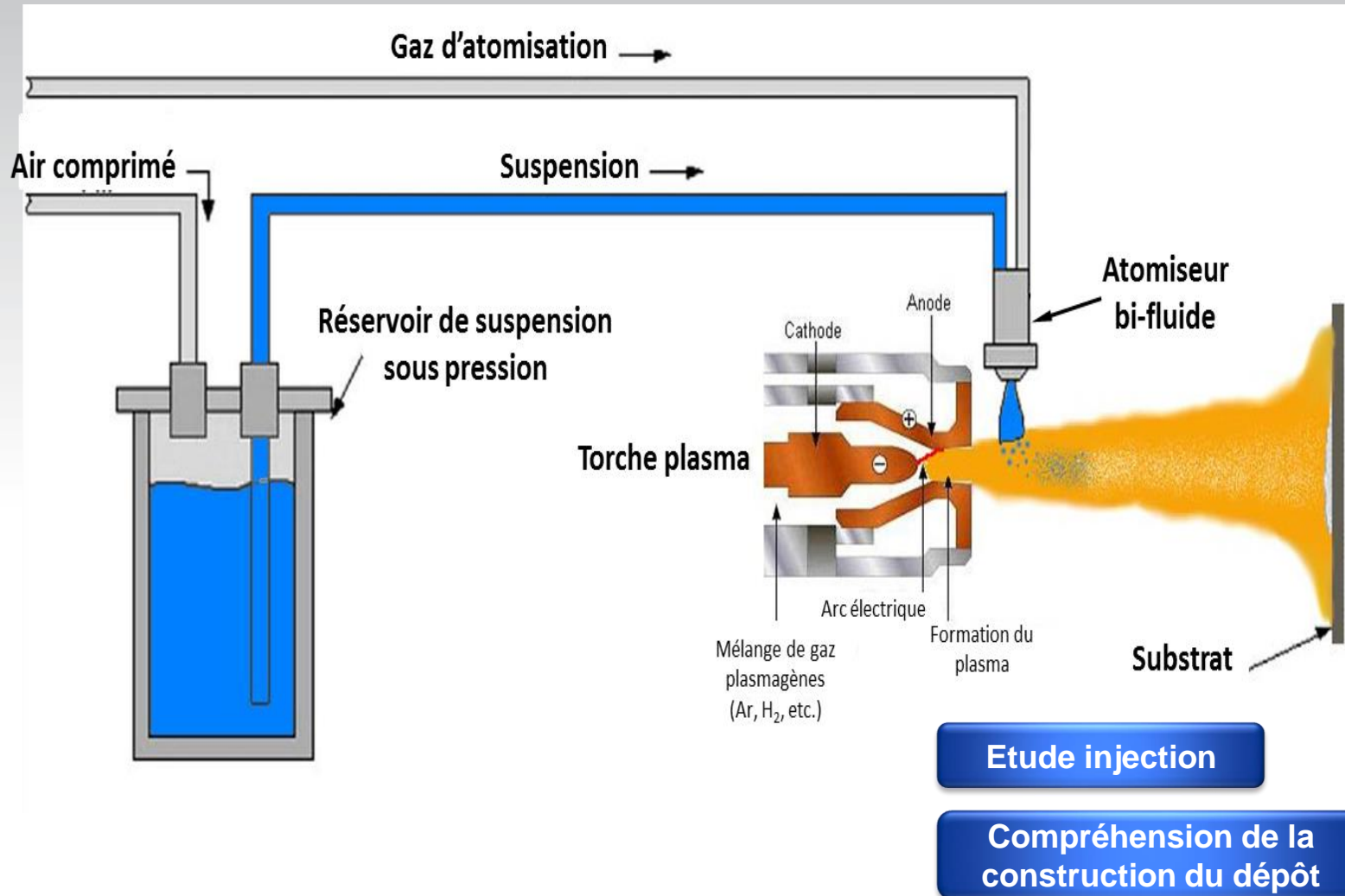


- 😊 Débit de suspension plus élevé (jusqu'à  $\sim x 4$ )
- 😊 Fenêtre opératoire plus large
  - ☹️ Complexe



# Schéma du système SPS que nous avons utilisé

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



# Relation entre paramètres et porosité des revêtements

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

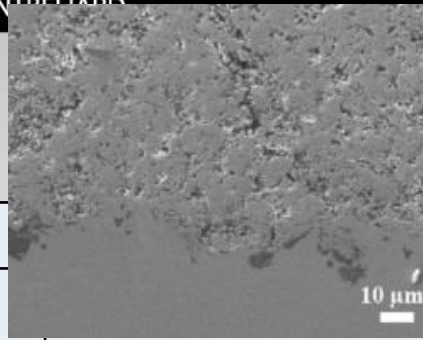
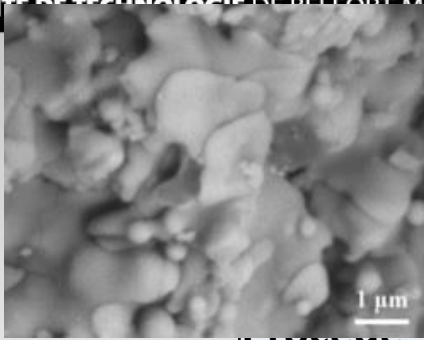
Paramètres fixes du procédé	Valeurs
Plasma	Ar: 50 NL/min H <sub>2</sub> : 10 NL/min Intensité de courant : 600A Puissance: 41 kW

	Paramètres variables	Gamme
Injection suspension	<b>Procédé</b>	
Injecteur		
Vitesse robot	<b>Suspension</b>	
Refroidissement	<b>Substrat</b>	

# Influence de la distance de projection sur la porosité

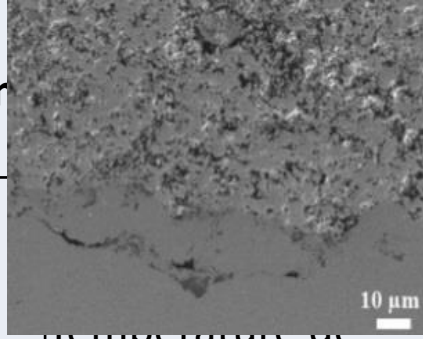
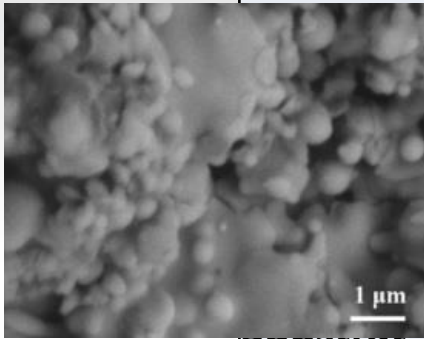
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE Belfort-MONTBÉLIARD

50mm



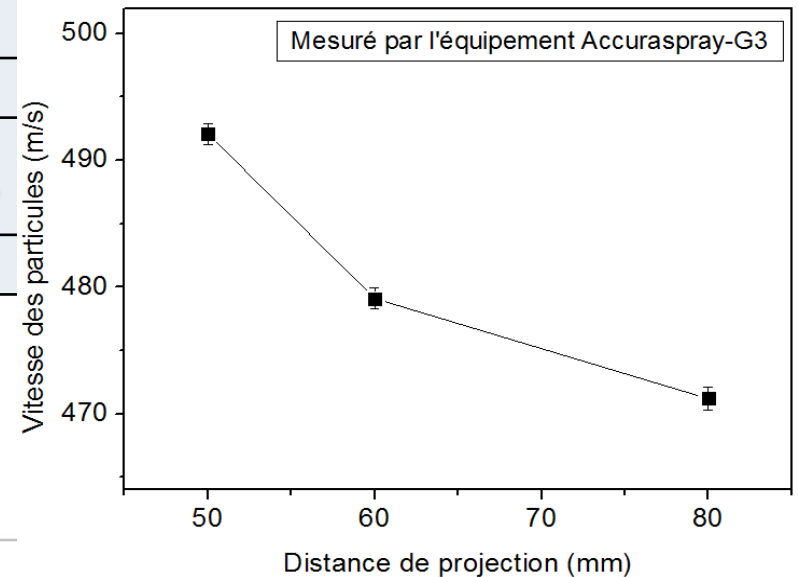
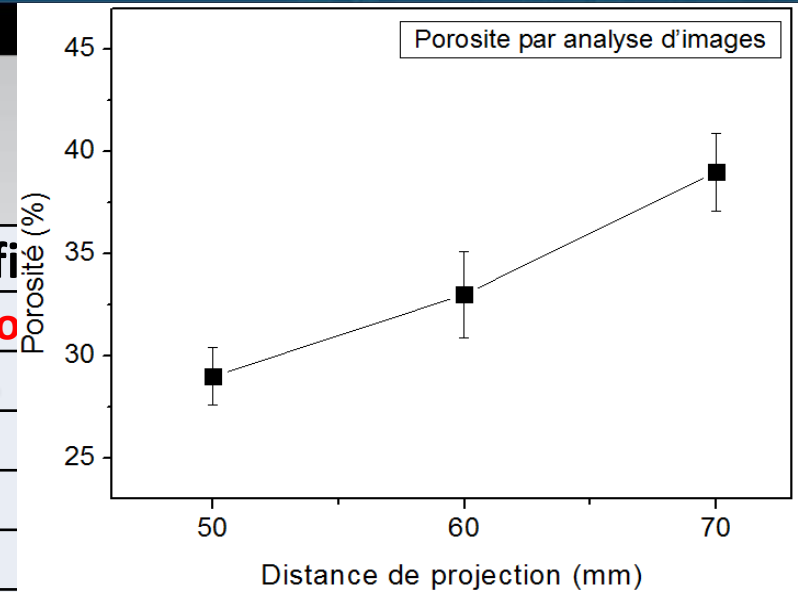
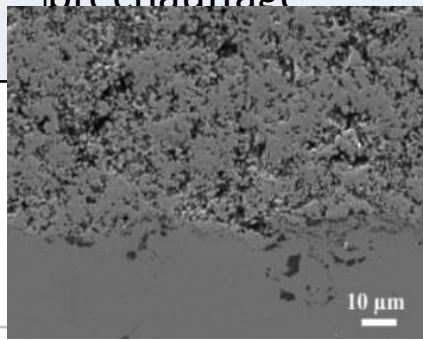
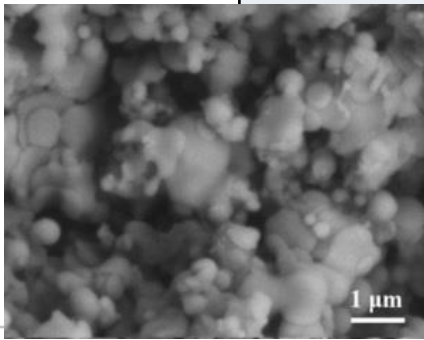
Pas de projection

60mm



température de préchauffage

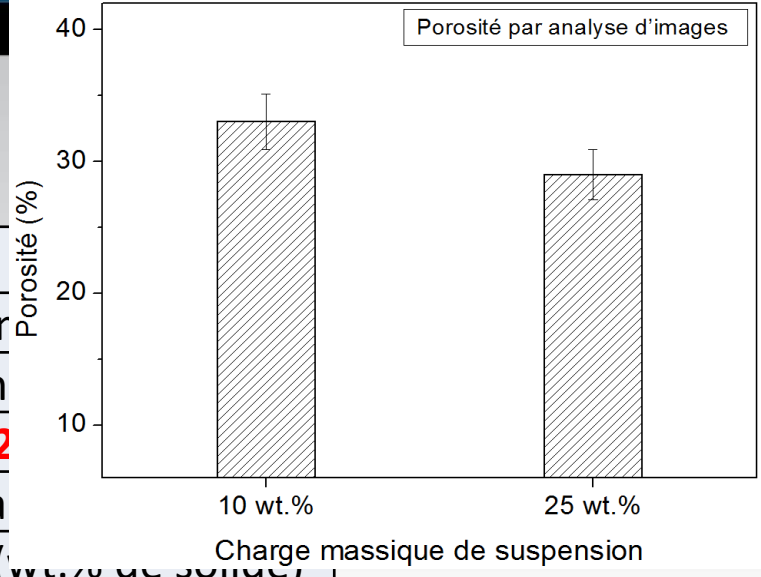
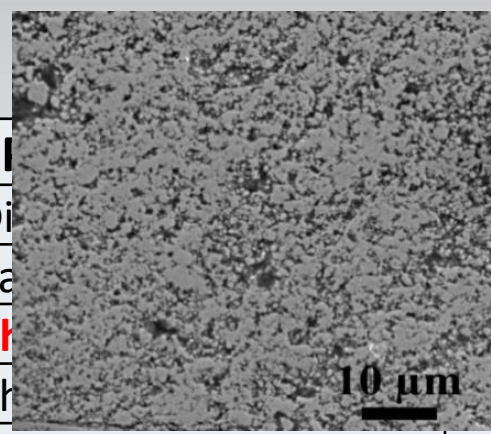
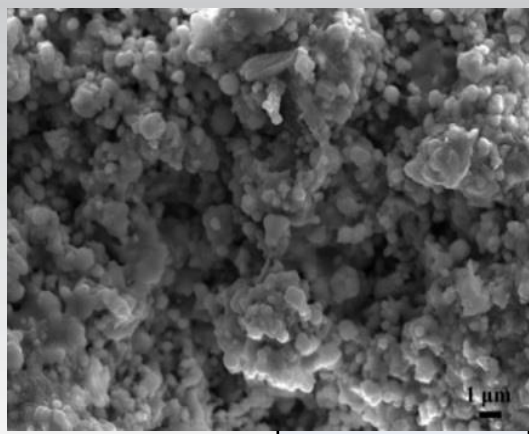
70mm



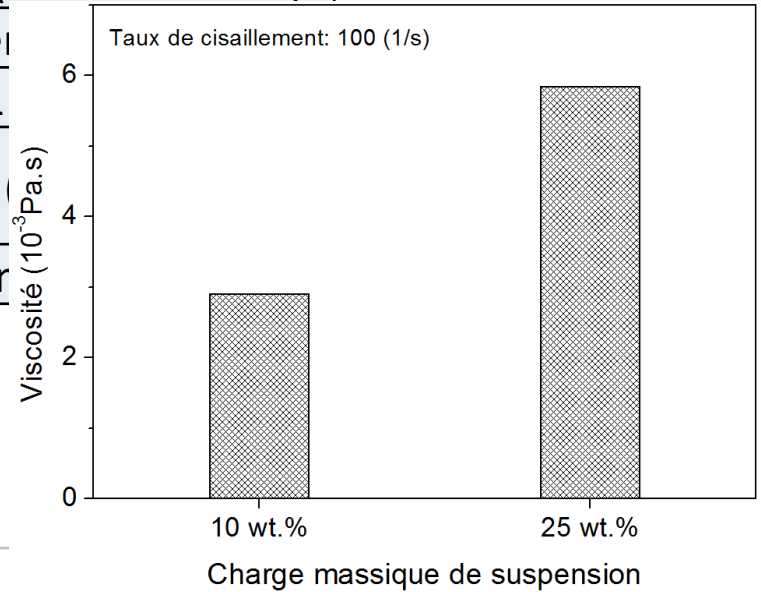
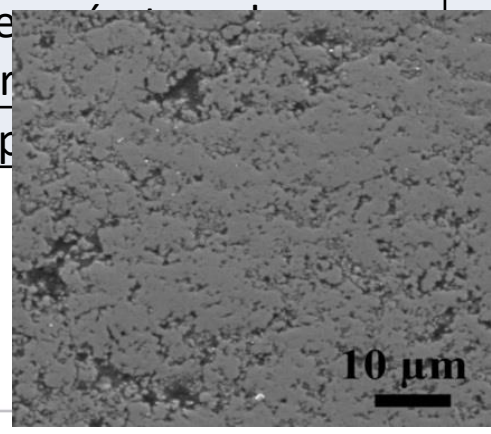
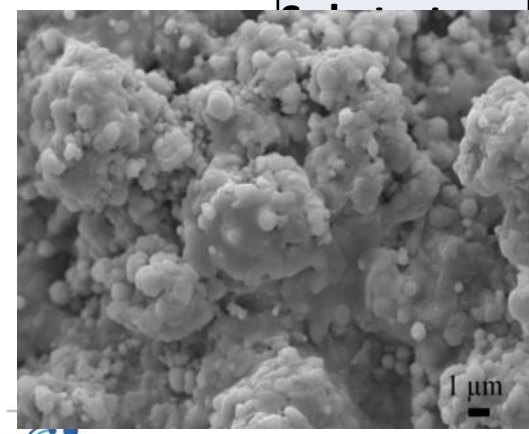
# Influence de la charge massique de la suspension sur la porosité

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

10 wt%



25 wt%



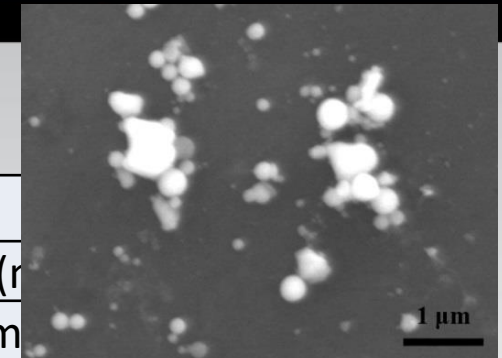
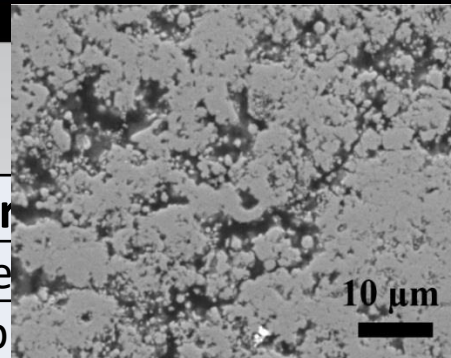
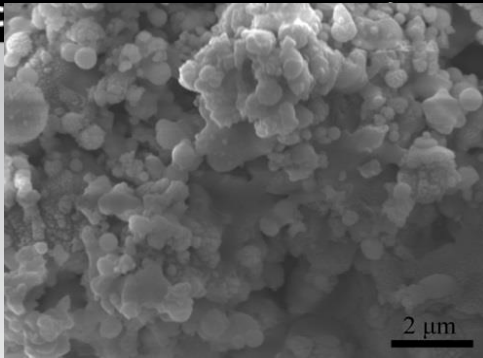
Di	(r
Pa	m
Ch	, 2
Ph	na
Dispersant	2.5 (wt. % de solide)
Matériau	Acier
Rugosité de surface	3.51
Te	0
pr	(r
Ép	



# Influence du matériau substrat sur la porosité

UNIVERSITÉ DE TEC

Aluminium  
(1050)



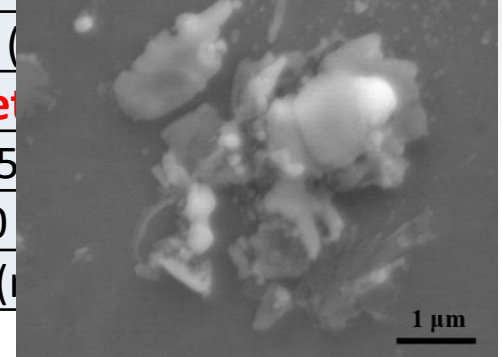
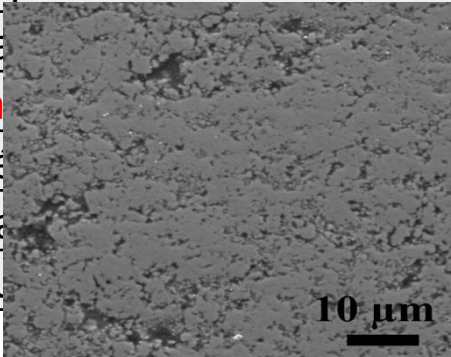
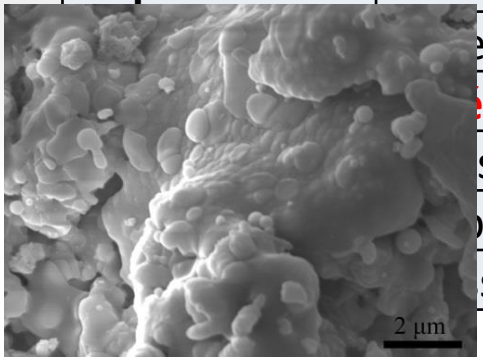
Porosité par analyse d'images :  $30,5 \pm 2,0 \%$

Suspension

Phase liquide

Ethanol

Acier  
(304L)



Porosité par analyse d'images :  $25,9 \pm 1,8 \%$

	Conductivité Thermique ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Capacité thermique spécifique ( $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
Alu (Al1050)	227	897
Acier (304L)	12.1	502



# Conclusion

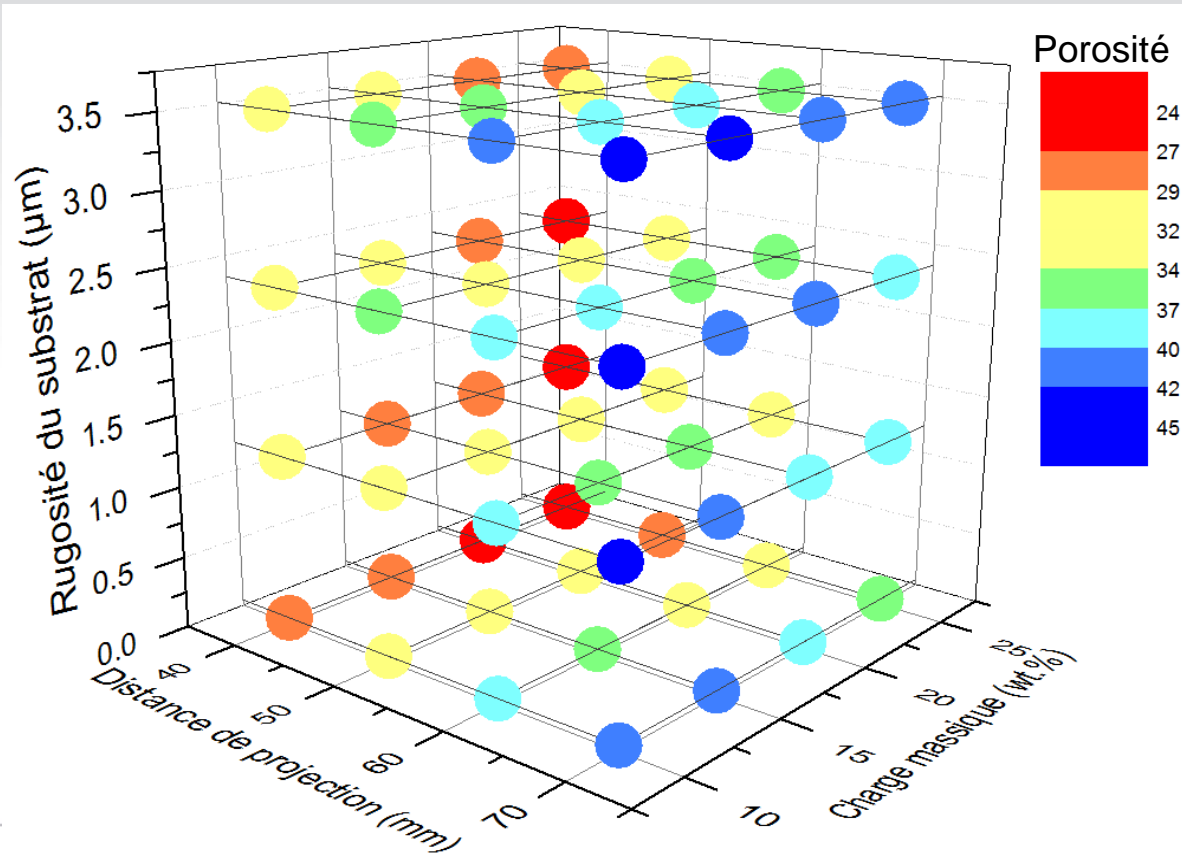
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

	<b>Paramètres variables</b>	<b>Gamme</b>	<b>Porosité (%)</b> (par analyse d'images )
<b>Procédé</b>	Distance de projection	40~70 (mm)	23~40
	Pas de projection	3~12 (mm)	29~34
<b>Suspension</b>	Charge massique	10~25 (wt.%)	29~33
	Phase liquide	Ethanol et eau	29~30
	Dispersant	0 ~2.5 (wt.% de solide)	29~36
<b>Substrat</b>	Matériau	Al et Acier	25~31
	Rugosité de surface	0.04~3.51 ( $\mu\text{m}$ )	23~31
	Température de préchauffage	25~300 ( $^{\circ}\text{C}$ )	23~24
	Épaisseur	5~20 (mm)	25~29

# Conclusion : mise au point d'un modèle prédictif

UN

Puissance du plasma (kW)	Charge massique (wt.%)	Taille de poudre ( $\mu\text{m}$ )	Distance de projection (mm)	Pas de projection (mm)	Rugosité du substrat ( $\mu\text{m}$ )
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
41	10~25	0.36	40~70	6	0,04~3.51



# Innover sur les procédés pour la projection de nouveaux matériaux

## La projection sous très basse pression de nitrures

# Les nitrures, principaux procédés de mise en forme

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



- Stœchiométrie contrôlable
- Dépôts très denses et homogènes

Dépôt Projection thermique



**Matériaux à fusion non congruente impossibles**

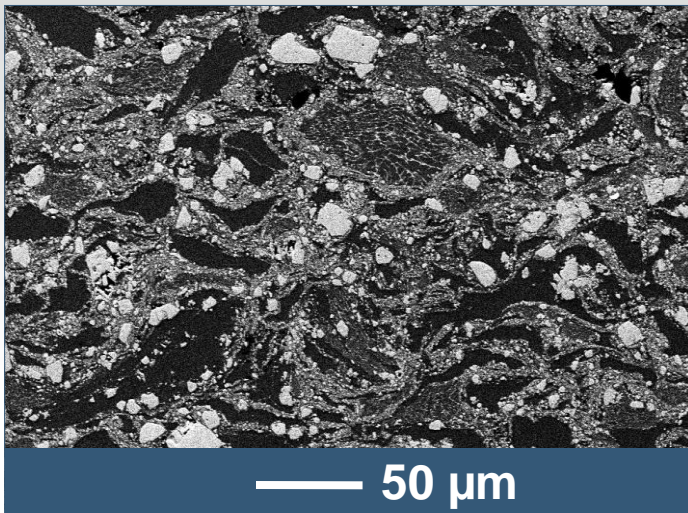
- Rer
- Coi
- dépôts
- Taille des pièces traitées

# Comment élaborer par projection thermique des dépôts renfermant des nitrures ?

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## Sans fusion des nitrures Synthèse *in situ* des nitrures

### Dépôts cermets

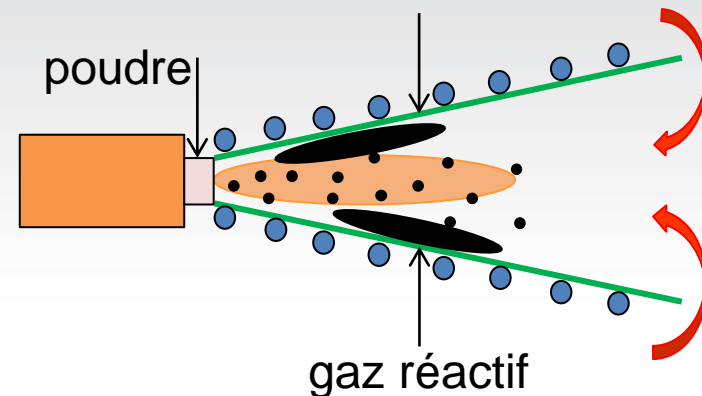


Dépôt Al-TiN



- %N < 100%
- décomposition partielle

### « SHROUD » (« confinement »)



S. Matthews, Shrouded plasma spray of Ni-20Cr coatings utilizing internal shroud film cooling, *Surface and coatings Technology*, Vol. 249, 2014



- liquide/gaz et durée faible
- %N < 100%
- oxydation
- colmatage
- stœchiométrie du dépôt



# La projection plasma sous très basse pression (VLPPS)

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## VAPORISATION

Injection de la poudre



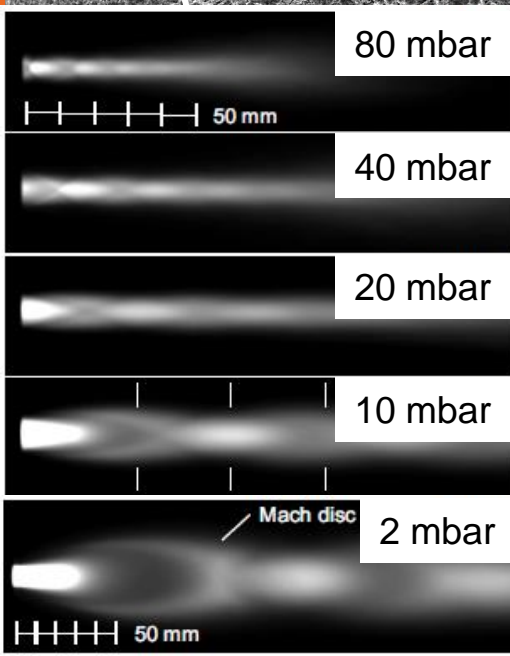
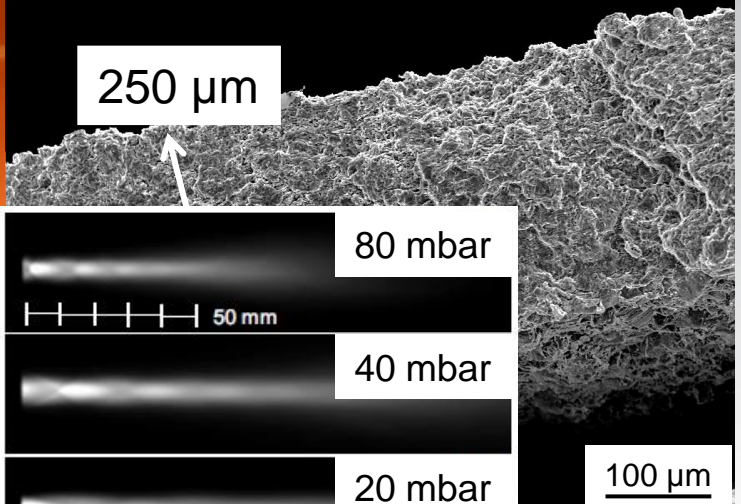
## TRANSPORT DE MATIERE

Vapeurs dans jet de plasma



Expansion du jet de plasma sous très basse pression ( $\approx 150$  Pa)

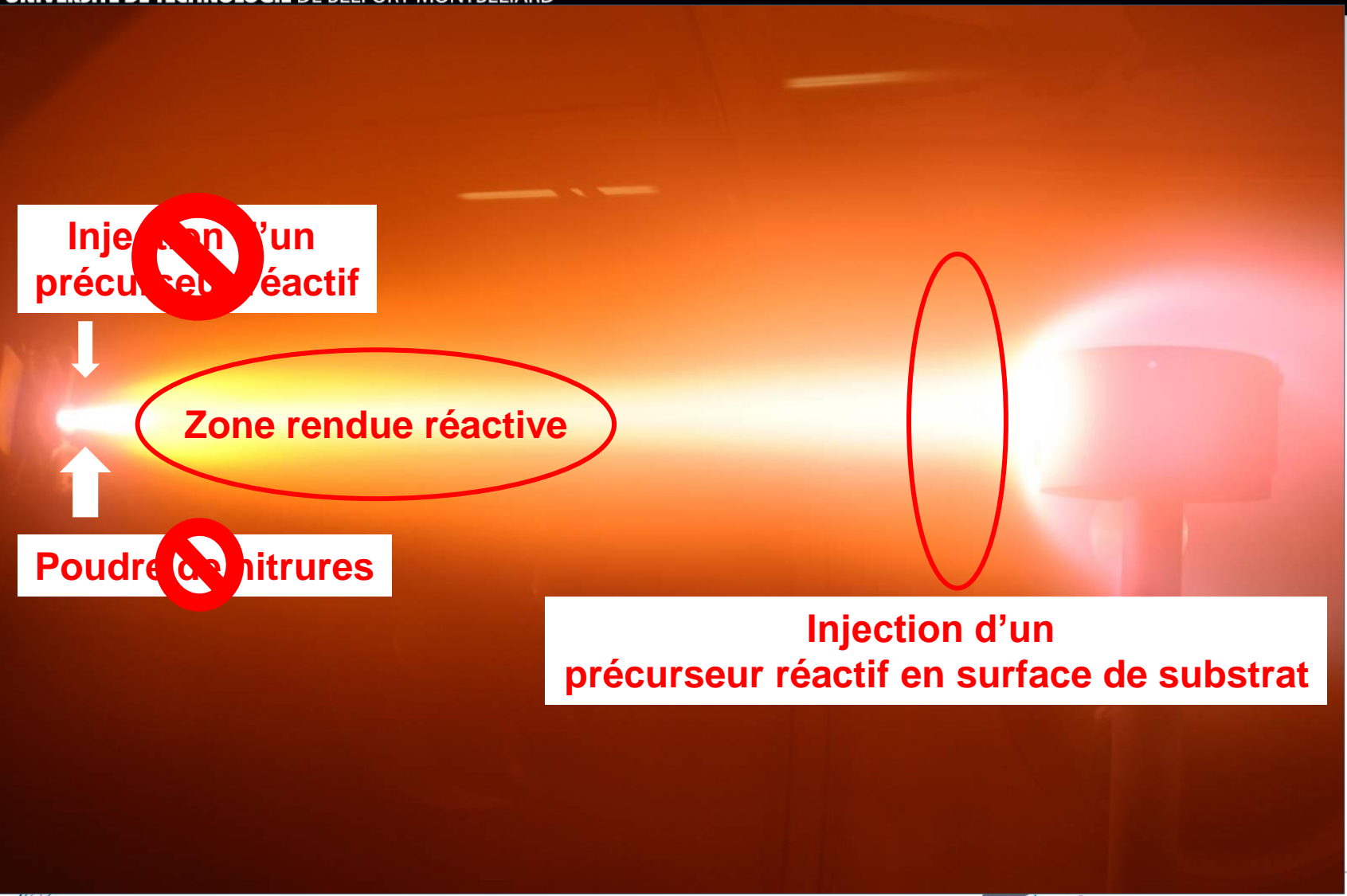
$\sim 1$  m



100 μm

# La projection plasma réactive sous très basse pression (R-VLPPS)

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



~~Injection d'un précurseur réactif~~

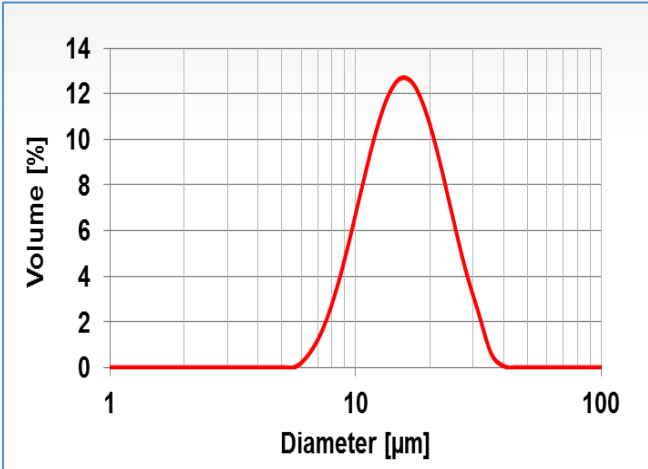
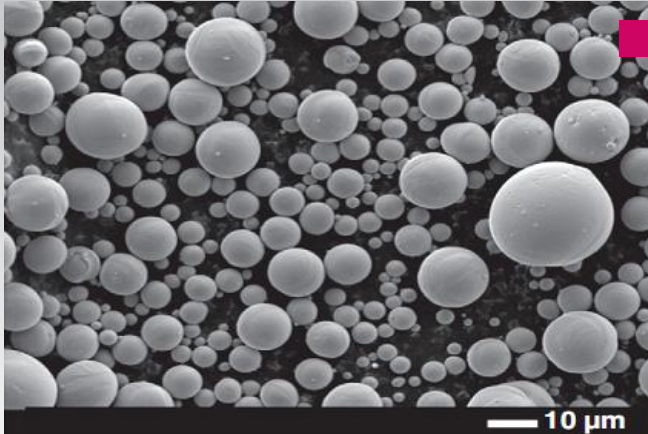
Zone rendue réactive

~~Poudre de nitrides~~

Injection d'un précurseur réactif en surface de substrat

# Paramètres d'expérience

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



diamètre: 0 – 25  $\mu\text{m}$

$d_{50} = 13 \mu\text{m}$

## ■ Poudre Ti ■ Paramètres de projection

Paramètres	Valeur constante
Torche de plasma	F4-VB
Pression d'enceinte (Pa)	150
Intensité du courant (A)	650
Débit de gaz Ar (NL/min)	45
Débit de gaz H <sub>2</sub> (NL/min)	12
Débit de gaz porteur Ar (NL/min)	2,5
Température du substrat (°C)	700-800°C

# Elaboration de couches nitrurées par nitruration en vol

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## Plasma Ar-H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> ( $23 < N_2 < 30 \text{ L.min}^{-1}$ )

Effet de la fraction volumique  
relative de N<sub>2</sub>  
 $75\% < f(N_2) < 81\%$

Agit sur l'enthalpie du  
jet de plasma et sur la  
nitruration en vol

Effet de la température de  
surface du substrat  
( $130^\circ \text{C} < T_{\text{surf}} < 800^\circ \text{C}$ )

Agit sur la mobilité  
des espèces en  
surface de substrat

# Elaboration de couches nitrurées par nitruration en vol

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

Massif	Dureté massif (HVN <sub>25g.f.</sub> )	Dépôt	Dureté moyenne (HVN <sub>25g.f.</sub> )	Ecart-type (HVN <sub>25g.f.</sub> )
TiN	2500	Ti-TiN	1003	312
AlN	1400	Al-AlN	341	164

*moyenne calculée sur 5*

- Dépôts hétérogènes en composition
- Mécanismes de nitruration à renforcer
- **Mise en place d'une injection secondaire d'azote**



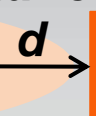
# Mise en place d'une injection secondaire

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

F4-VB

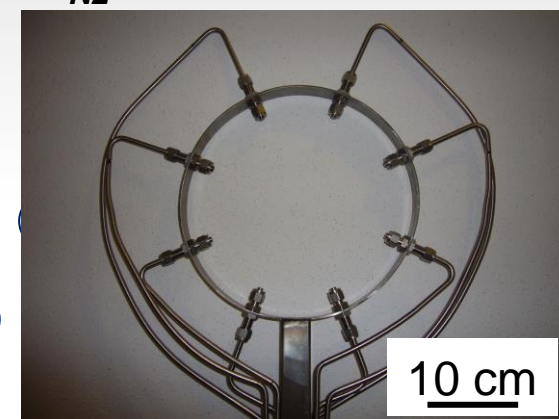
*Plasma Ar-H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>*

*Injection  
secondaire*



*Substrat*

$D_{N_2}$



Effet de la présence  
de l'anneau

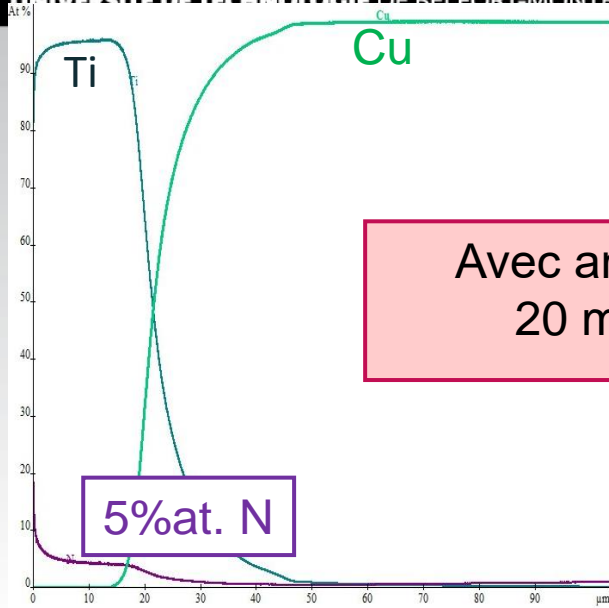
Effet du débit secondaire  
d'azote injecté

Effet de la position  
de l'anneau  
par rapport au substrat

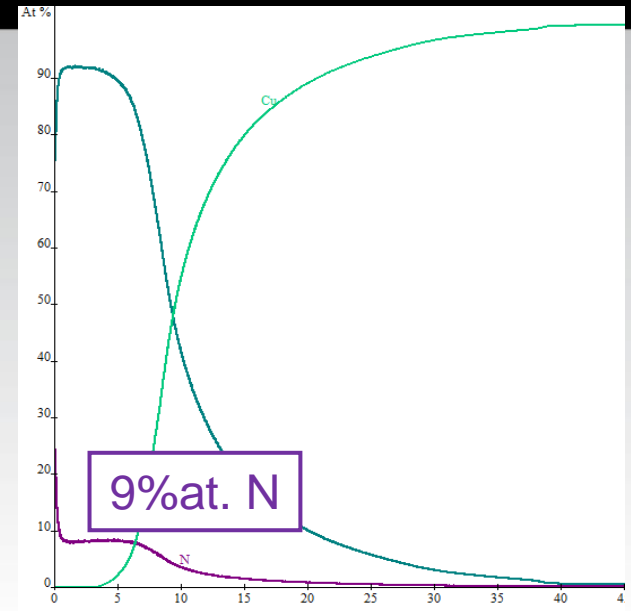
# Cas des dépôts Ti-TiN

## Effet de l'anneau sur la teneur en azote

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTRÉLIARD

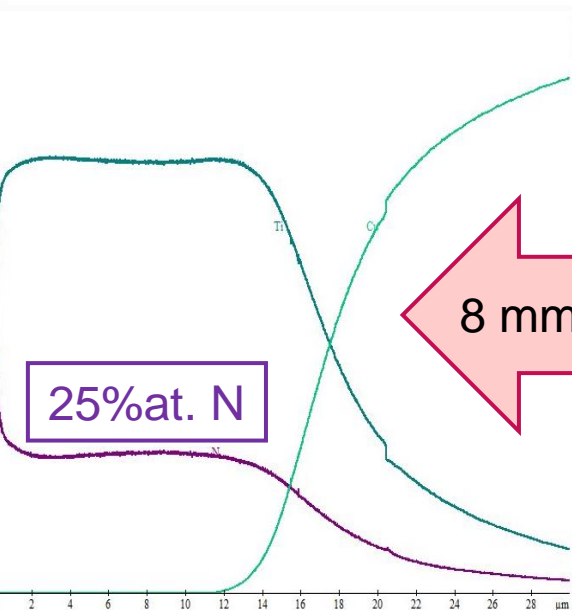


Avec anneau d'injection  
20 mm – 2 L.min<sup>-1</sup>



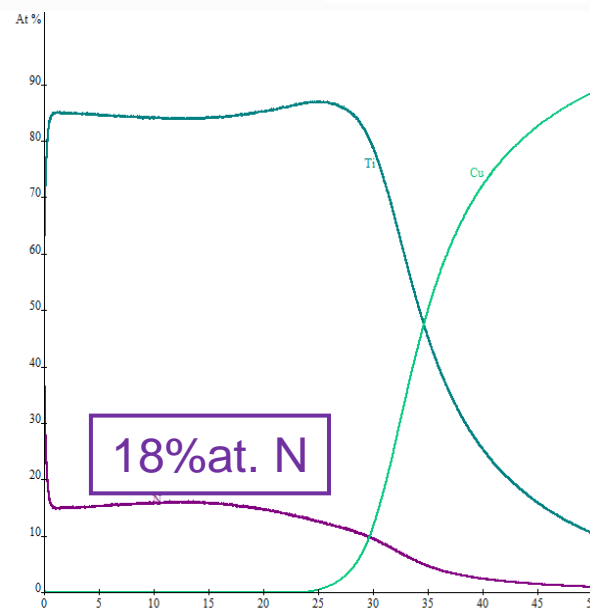
9%at. N

8 mm – 5 L.min<sup>-1</sup>



25%at. N

8 mm – 2 L.min<sup>-1</sup>



18%at. N

# Cas des dépôts Ti-TiN – Effet de l'anneau sur la dureté

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

Massif	Dureté massif (HVN <sub>25g.f.</sub> )	Dépôt	Dureté moyenne (HVN <sub>25g.f.</sub> )	Ecart-type (HVN <sub>25g.f.</sub> )
TiN	2500	Ti-TiN Sans anneau	1003	326
		Ti-TiN Avec anneau	1300	312

- Augmentation de la dureté avec anneau
  - Augmentation du taux de nitrures
- **Teneur en nitrures dans les dépôts < 100%**

# Comment améliorer la nitruration des revêtements?

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTRÉLIARD

## Paramètres expérimentés

### Position des revêtements

### Modes d'injection du gaz réactif

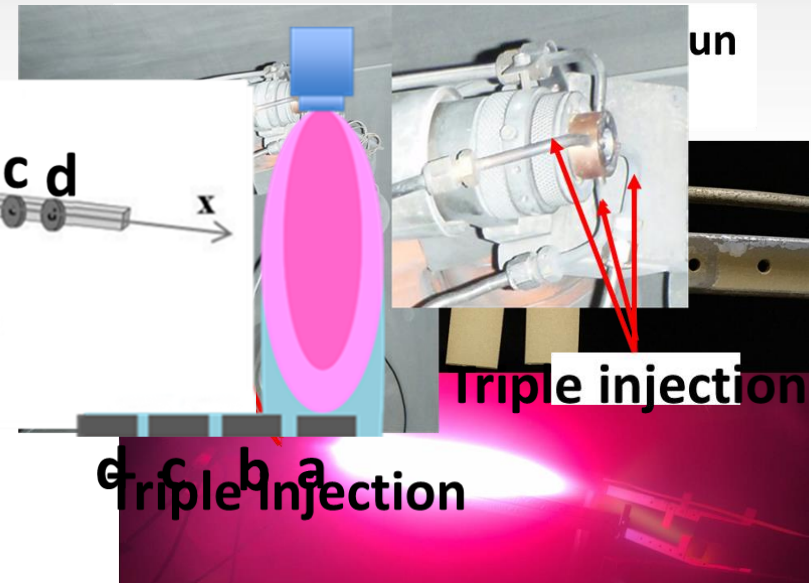
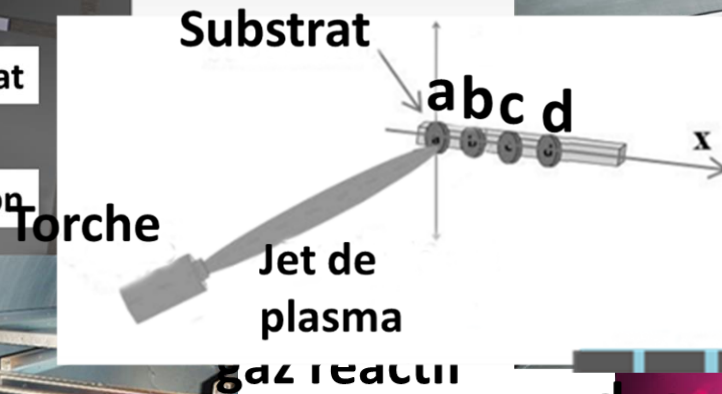
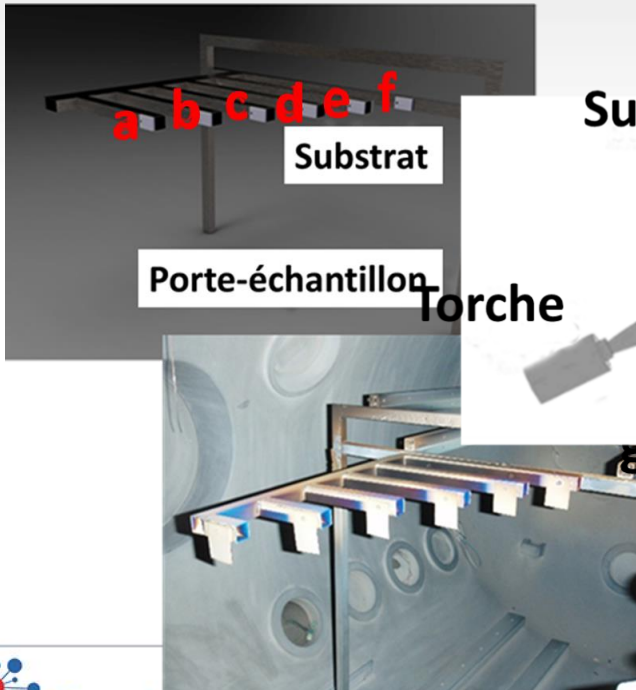
Distance axiale

Distance radiale

Plasma

Torche

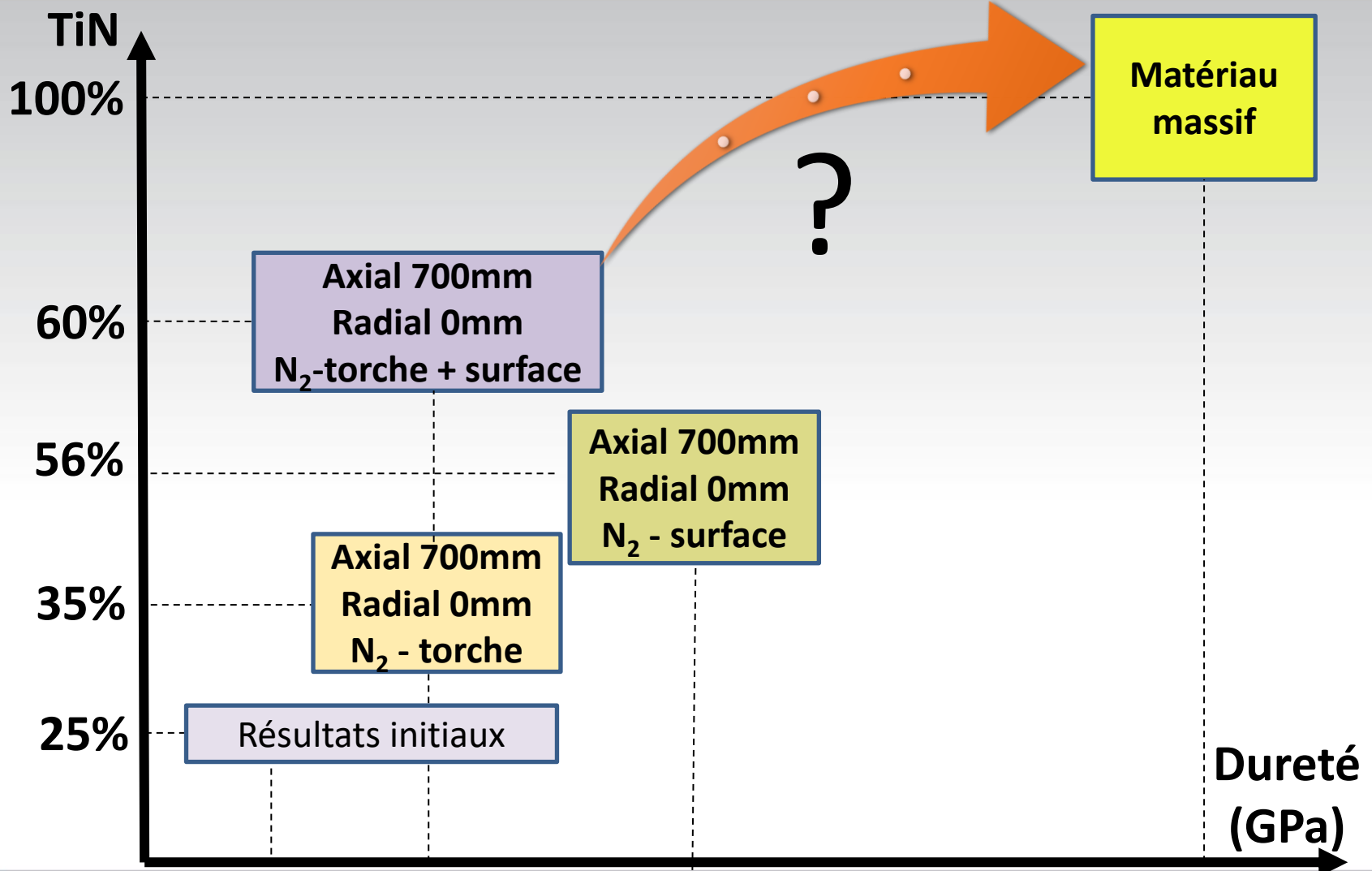
Surface





# Influence du mode d'injection de N<sub>2</sub>

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



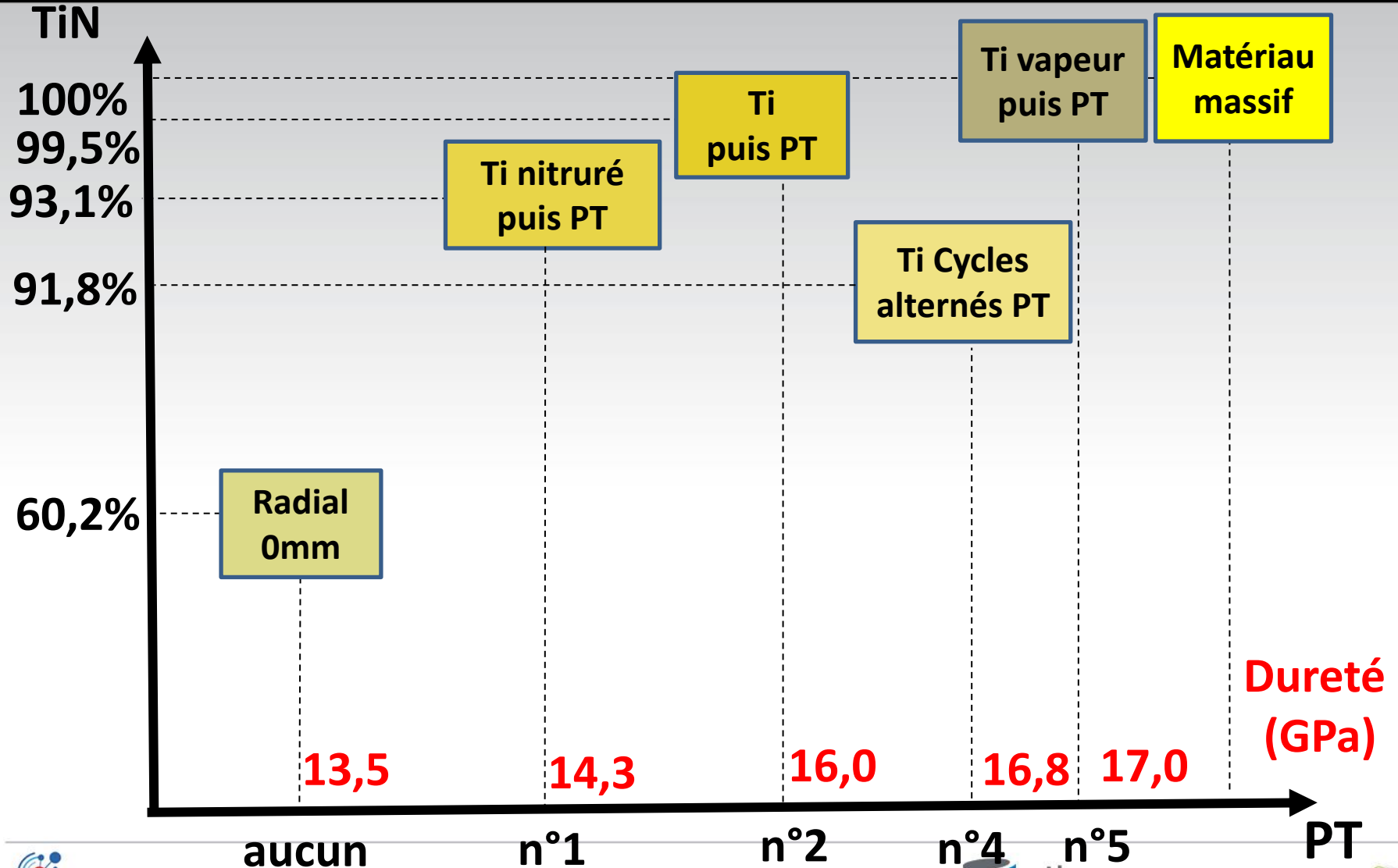
# Post Traitement (PT) de nitruration

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5
Revêtement de base fabriqué	Ti nitruré	Ti	Ti nitruré	Ti	Ti
Gaz réactif N <sub>2</sub> (L.min <sup>-1</sup> )	4				4 + 4
Position d'injection	Torche				Torche + substrat
Distance de projection (mm)	700				
Cinématique de projection	Dépôt <b>suivi</b> du post traitement	<b>Alternance</b> dépôt / post traitement		Dépôt <b>suivi</b> du post traitement	
Cycles de dépôt	400	8*50		400	
Cycles de post traitement	100	8*6		100	

# Influence du Post Traitement (PT) de nitruration

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



# Innover sur les procédés pour la projection de nouveaux matériaux

## La projection à froid (Cold spray) de magnésium



# Introduction à la projection à froid

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

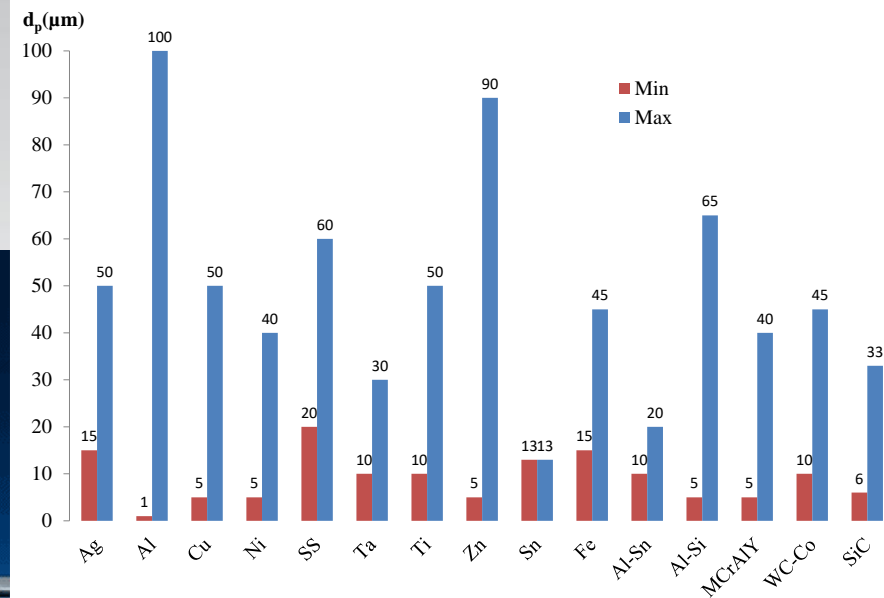


Vitesse élevée

Température faible

Avantages pour le dépôt

- Moins d'oxydation
- Faible porosité
- Epaisseurs importantes
- Rendement élevé .....



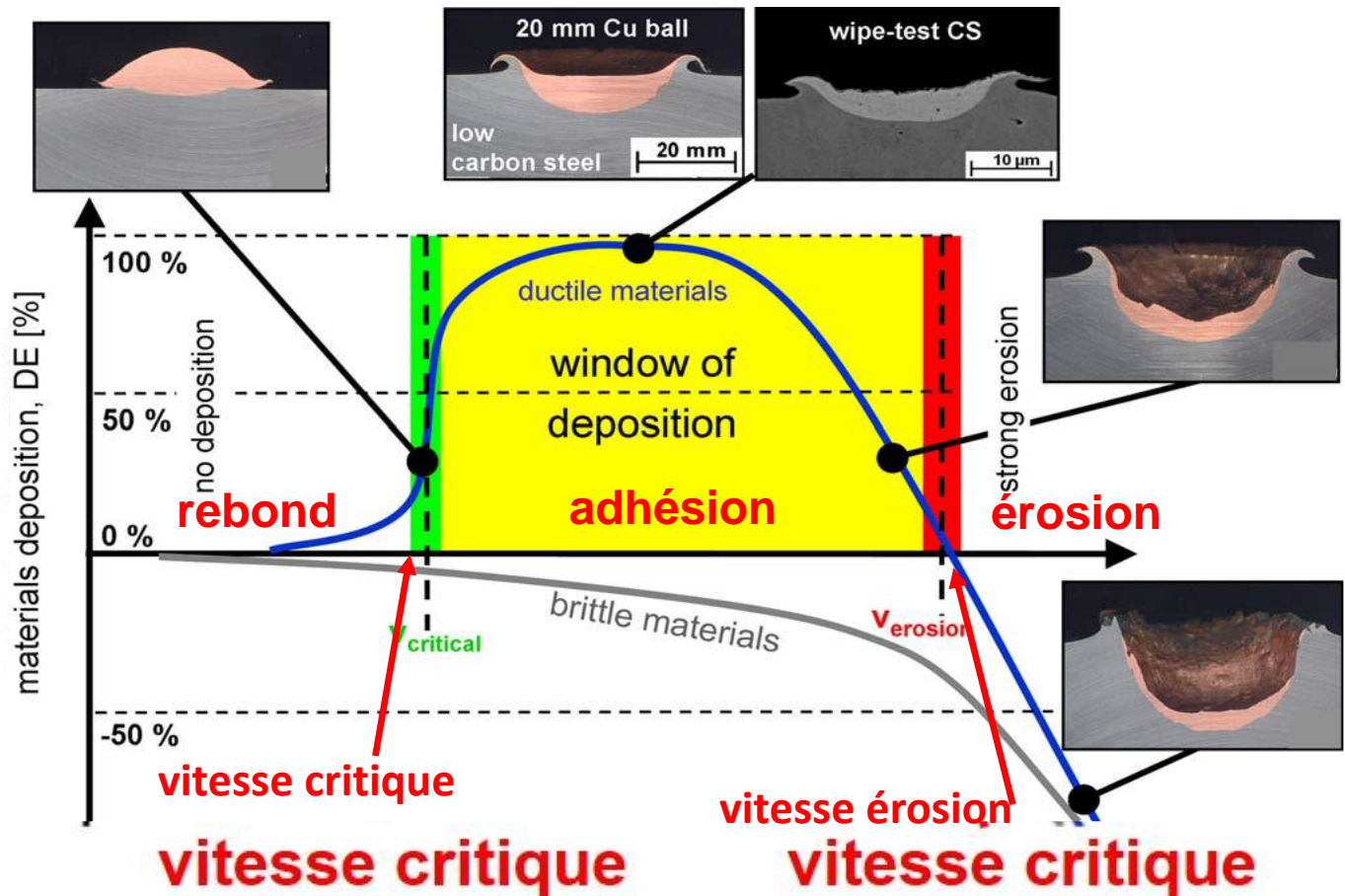
Applications potentielles

- Revêtement protecteur
- Revêtement fonctionnel
- Réparation rapide d'outils
- Fabrication 3D .....

# Critère nécessaire sur la vitesse de projection pour l'obtention d'un revêtement

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## vitesse des particules

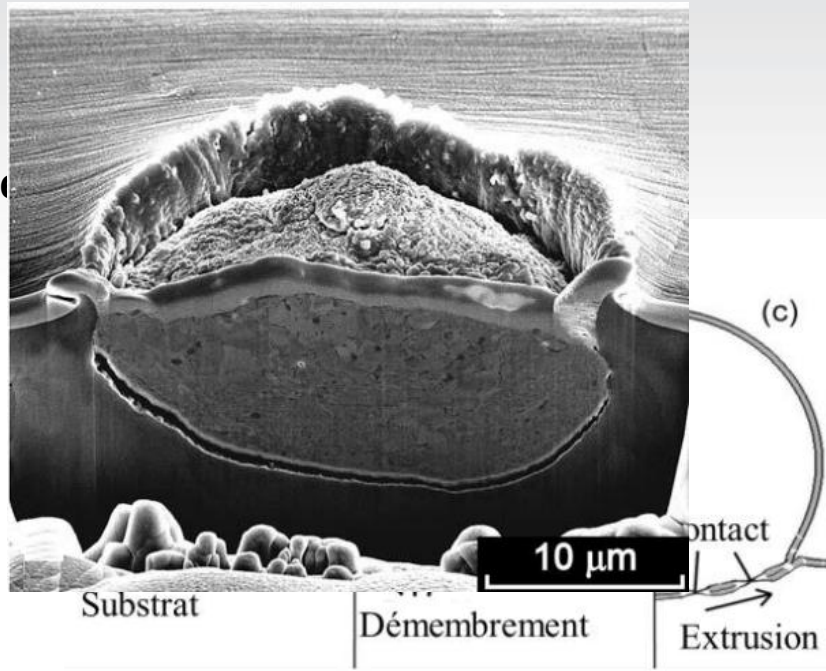


# Mécanismes d'adhérence

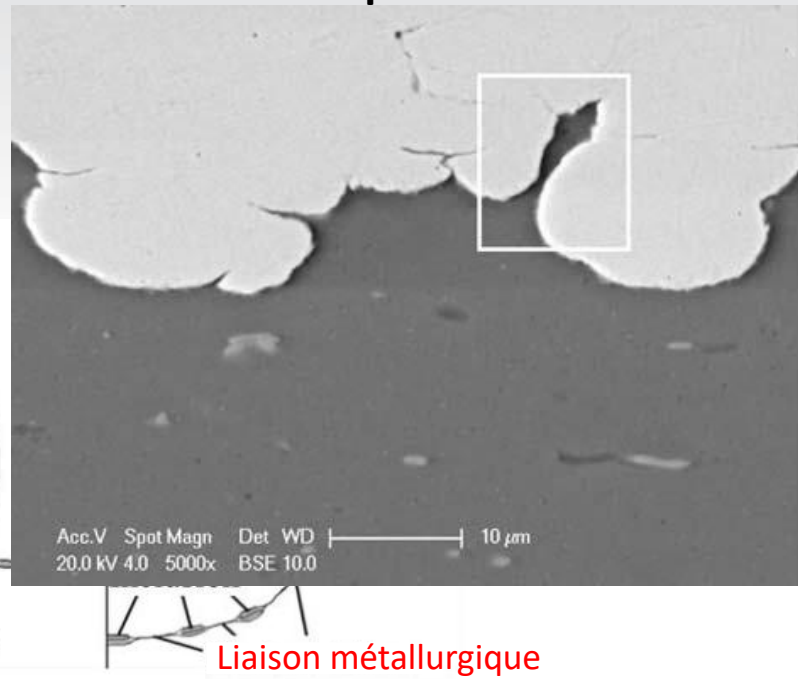
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## Liaison mécanique (Verrouillage mécanique prépondérant)

Particule seule



Dépôt



Liaison mé

Liaison métallurgique

# Projection à froid et Magnésium

## Contexte d'étude

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

Difficultés liées à l'élaboration des dépôts Mg par projection à froid

- Structure hexagonale déformation???
- Point de fusion faible oxydation???
- Inflammabilité manipulation???

Objectifs : Elaborer par dépôt Mg à faible porosité et à microstructure uniforme

Automobile

### Difficultés liées à l'élaboration des dépôts Mg par projection à froid

➤ Structure hexagonale                      déformation???

➤ Point de fusion faible                      oxydation???

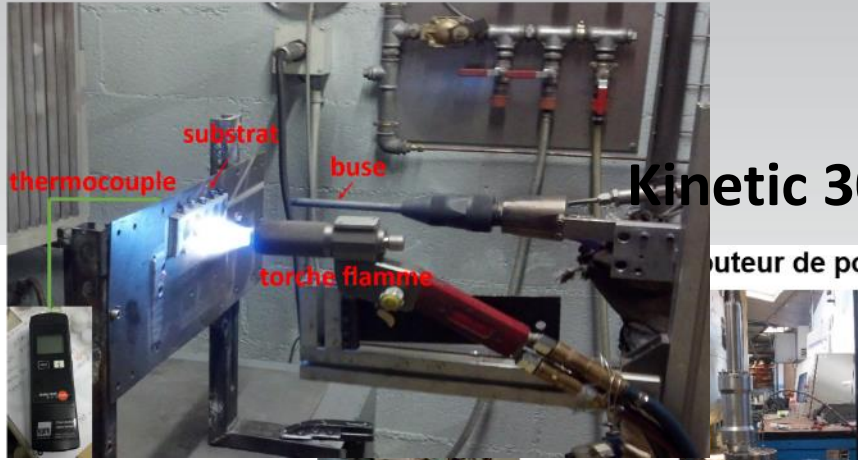
➤ Inflammabilité                      manipulation???

**Objectifs : Elaborer un dépôt Mg à faible porosité et à microstructure uniforme**



# Dispositifs expérimentaux

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



Kinetic 3000

...uteur de pou...



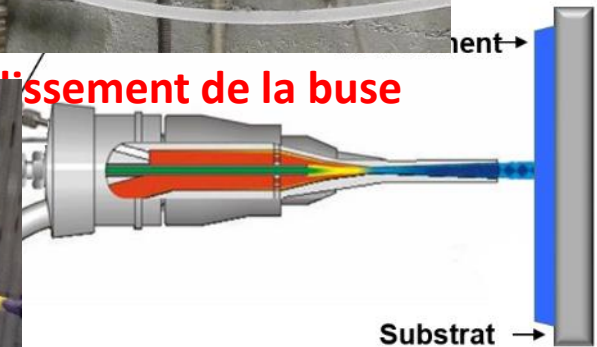
préchauffage du substrat

Armoire de commande



DPV-2000

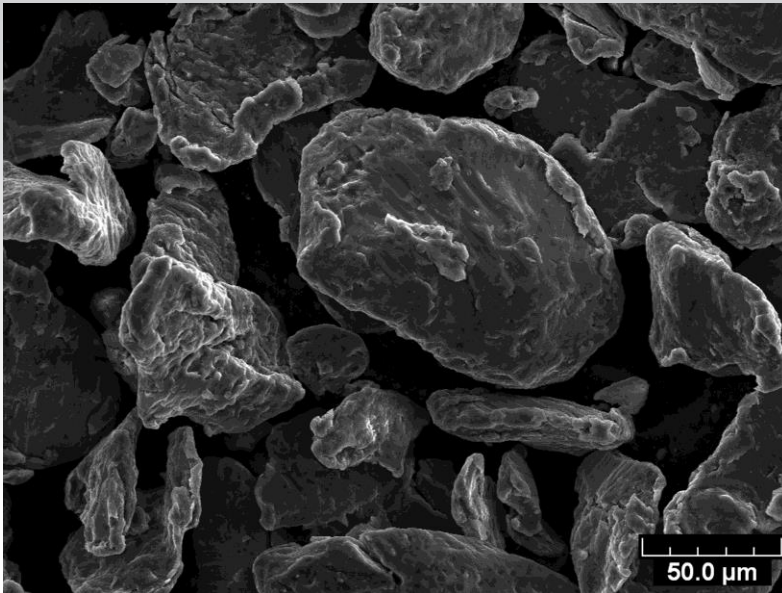
mesure de vitesse des particules



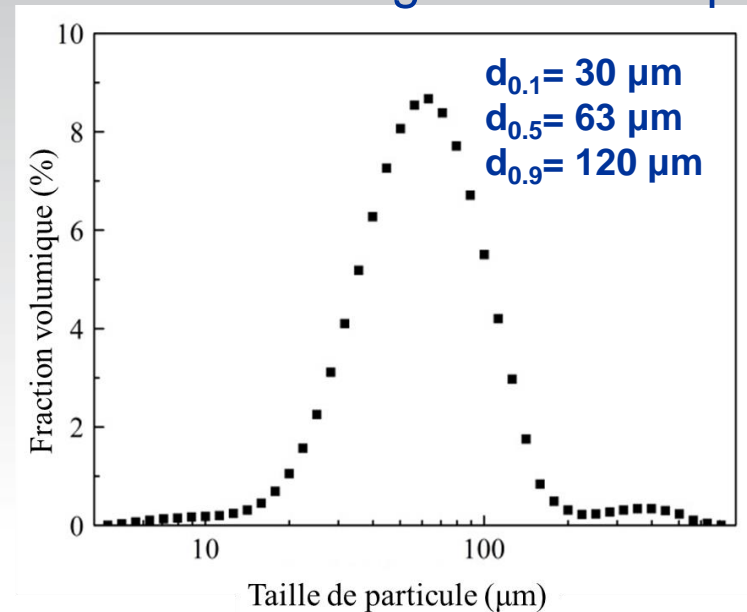
# Elaboration des dépôts Mg

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## ➤ Morphologie : irrégulière



## ➤ Distribution granulométrique

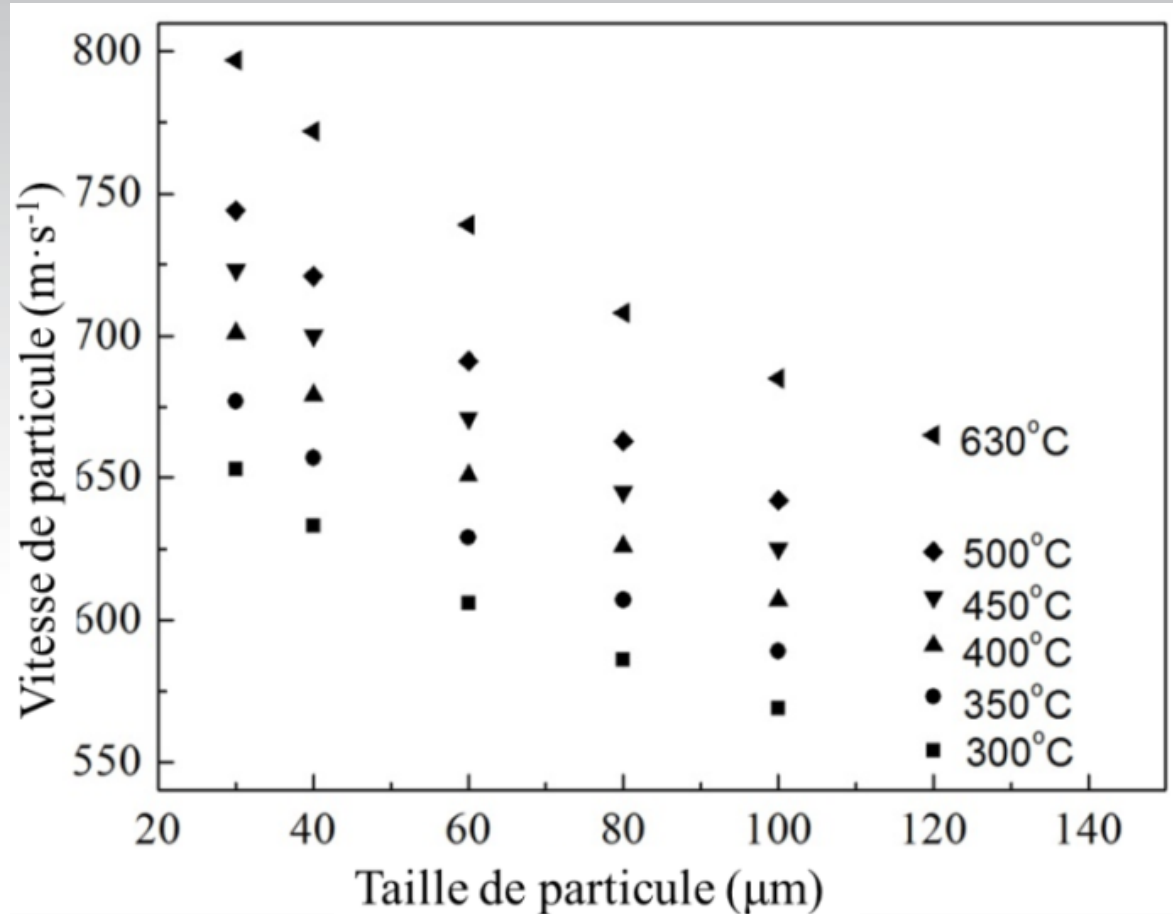


## Paramètres de projection

Buse	Section circulaire
Température du gaz principal air (°C)	300, 350, 400, 450, 450, 500, 630
Pression du gaz (MPa)	2.5
Substrat	Inox (304) et Al

# Estimation de la vitesse critique de particule Mg

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



➤ A 300°C, pas de dépôt;  
 $V_{\text{critique}} > 653 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

➤ A 350°C, dépôt existe;  
 $V_{\text{critique}} < 677 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

➤ Vitesse critique comprise entre 653 et 677 m·s<sup>-1</sup>



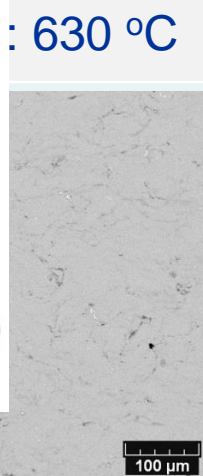
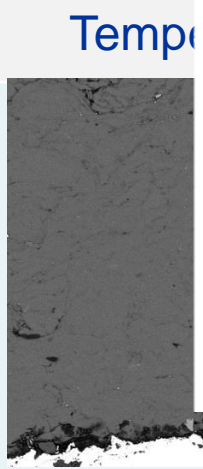
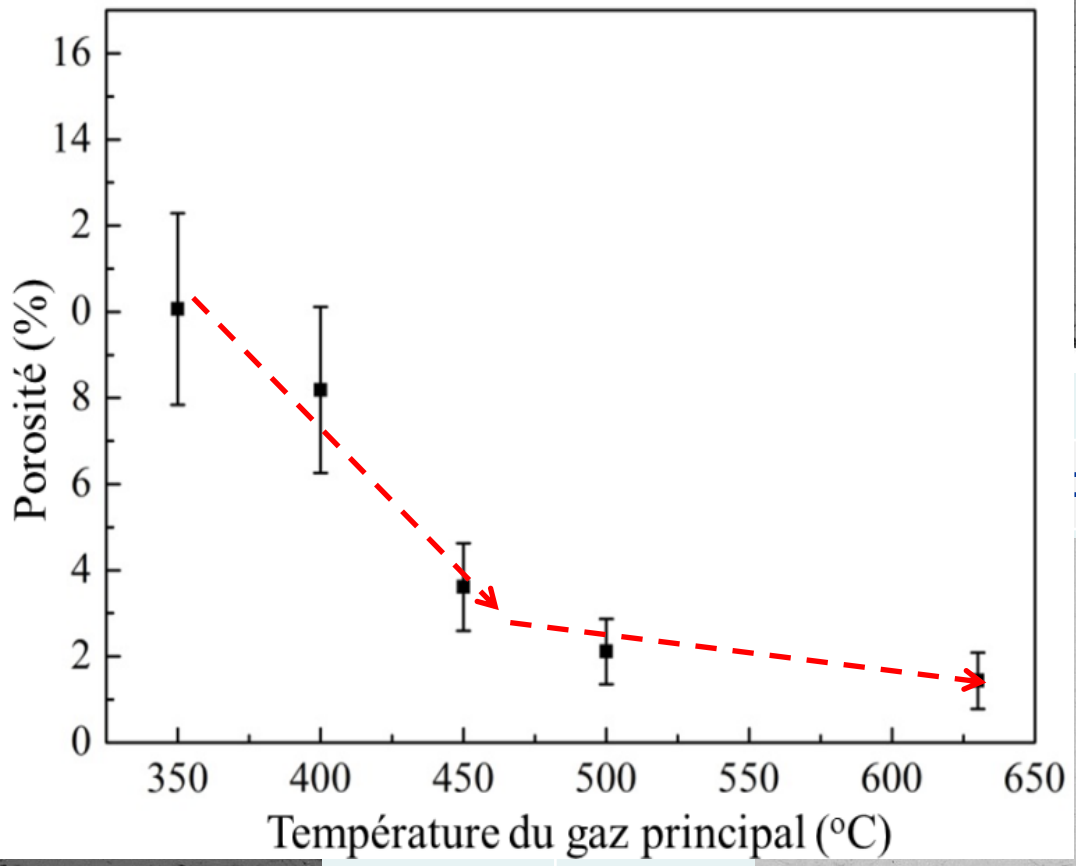
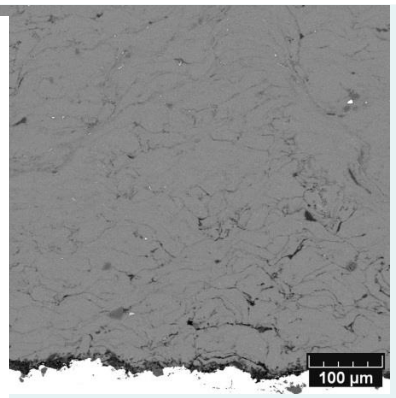
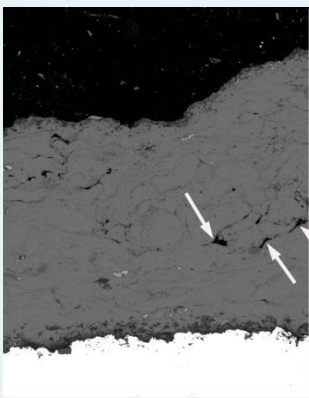
# Effet de la température du gaz sur la microstructure des dépôts

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

Température: 350 °C

Température: 400 °C

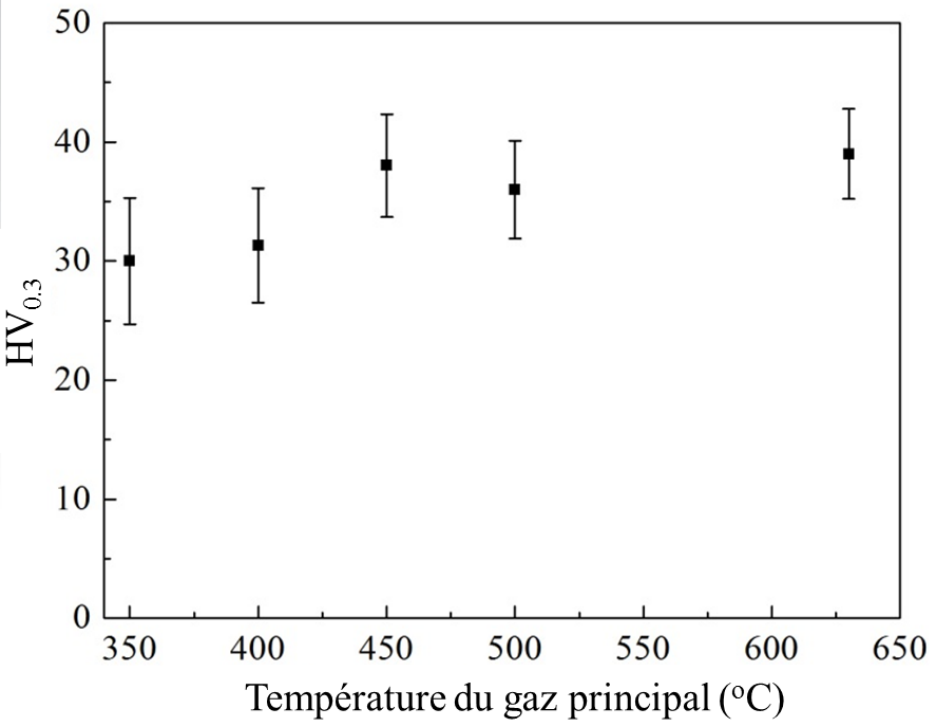
Température: 450 °C



➤ Porosité des dépôts diminue avec la température du gaz  
➤ Degré de déformation des particules augmente avec la température du gaz

# Dureté et adhérence du dépôt Mg

## ➤ Dureté

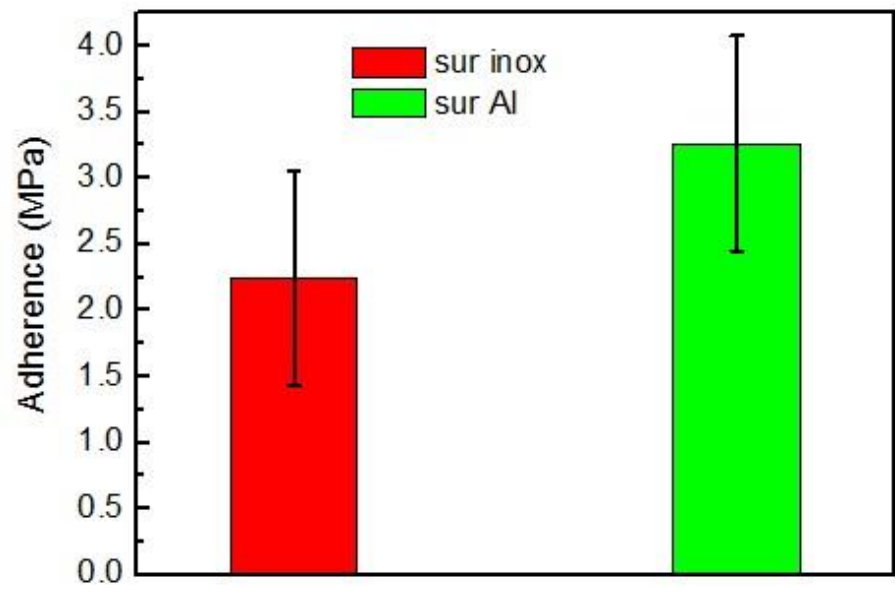


➤ L'évolution de la dureté est en adéquation avec celle de la porosité

➤ L'adhérence du dépôt au substrat dépend de la nature du substrat

Faible

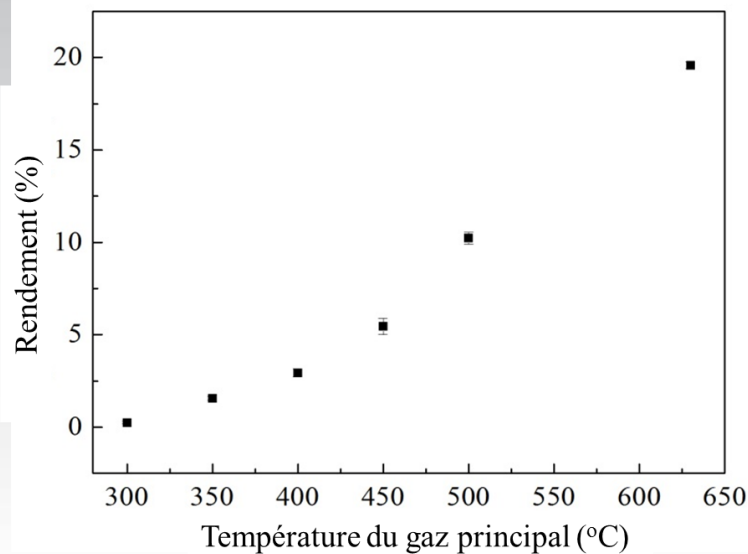
## ➤ Adhérence (500°C, 2.5 MPa)





# Effet de température du gaz sur le rendement de dépôt

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



➤ Rendement augmente avec l'augmentation de la température du gaz

➤ Rendement faible

## Conclusion

Possibilité d'utilisation du procédé projection à froid pour élaborer des dépôts de Mg.

Meilleur résultat sur Alliage de Mg : AZ91D

# Rendre les procédés plus robustes

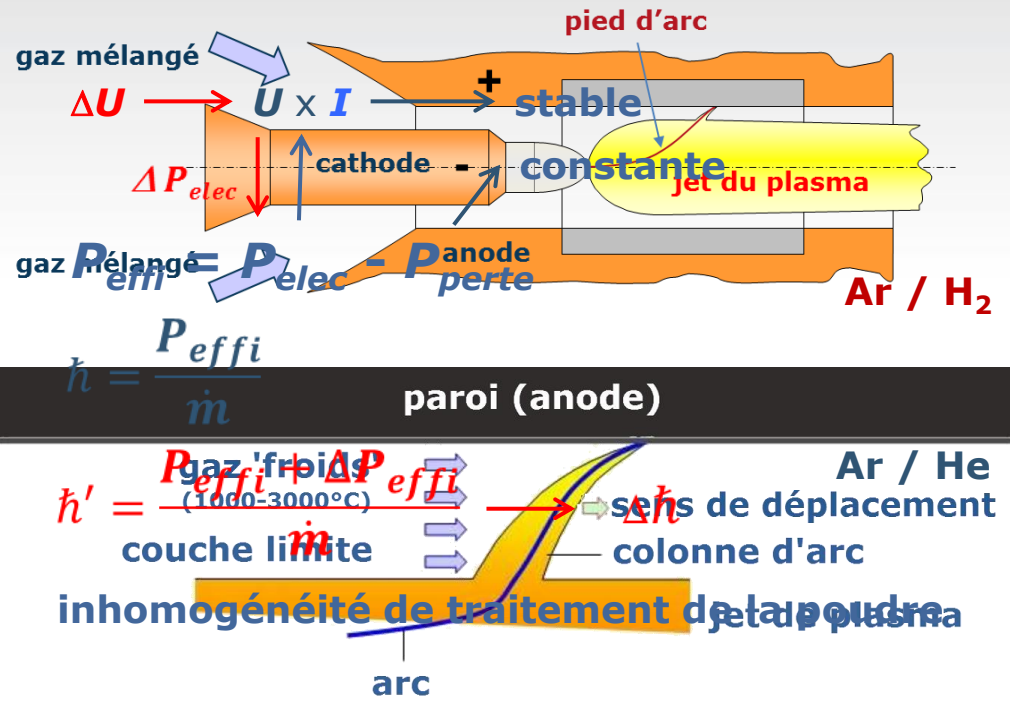
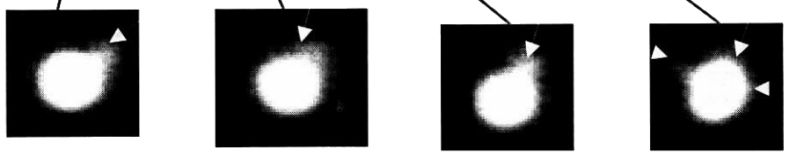
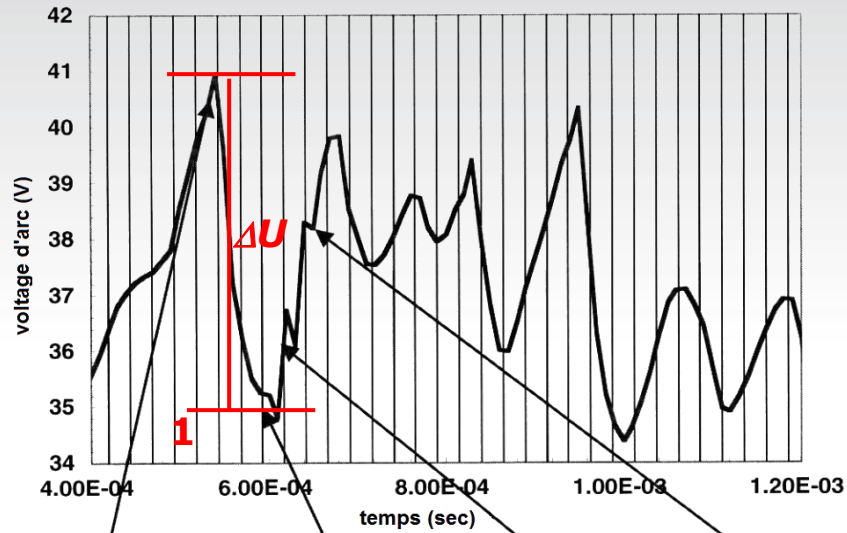
## Le développement de l'intelligence artificielle dans le cadre de la projection thermique

# introduction

fluctuations du pied d'arc

instabilités dans l'alimentation de poudre

érosion des électrodes



1. Z. Duan, J. Heberlein, Arc instabilities in a plasma spray torch, Journal of Thermal Spray Technology, 11(1), p 44 - 51

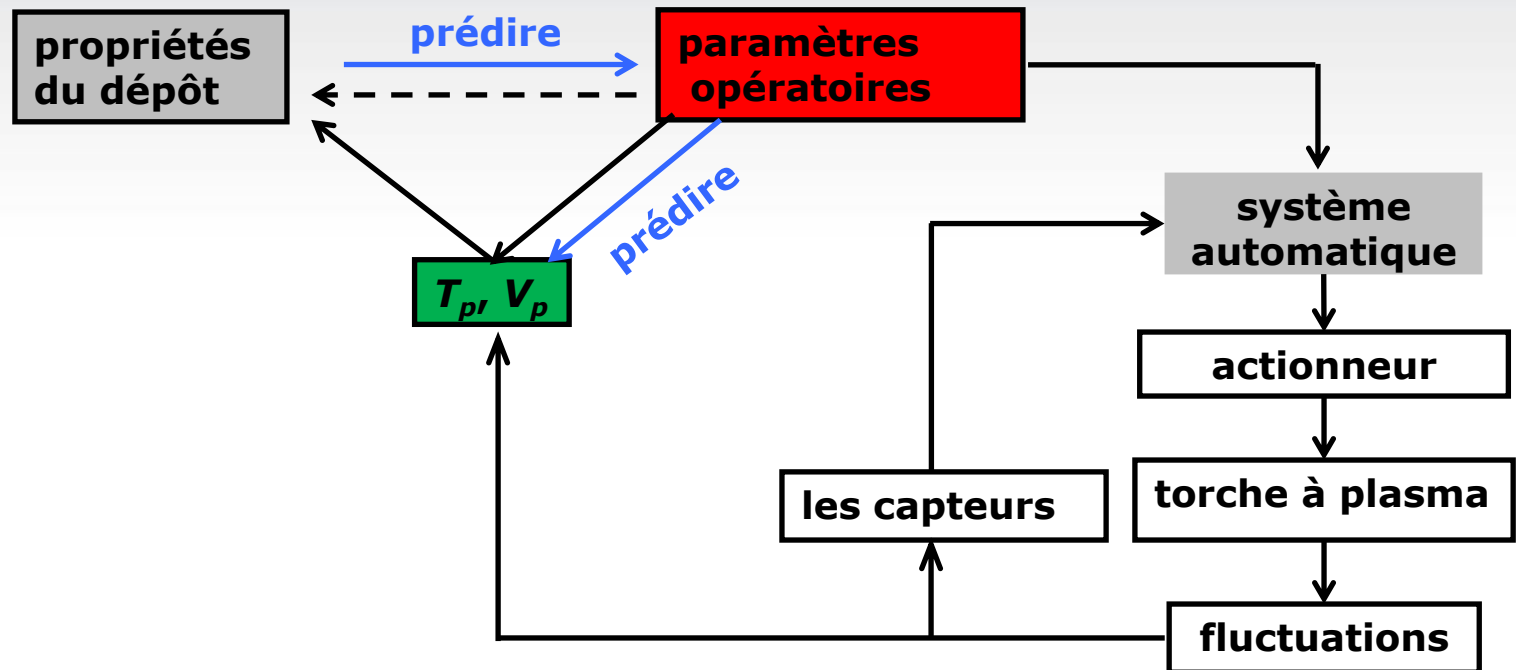
# Réseau de Neurones et Logique floue

Développer un système **automatique** permettant de **stabiliser** le procédé.

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

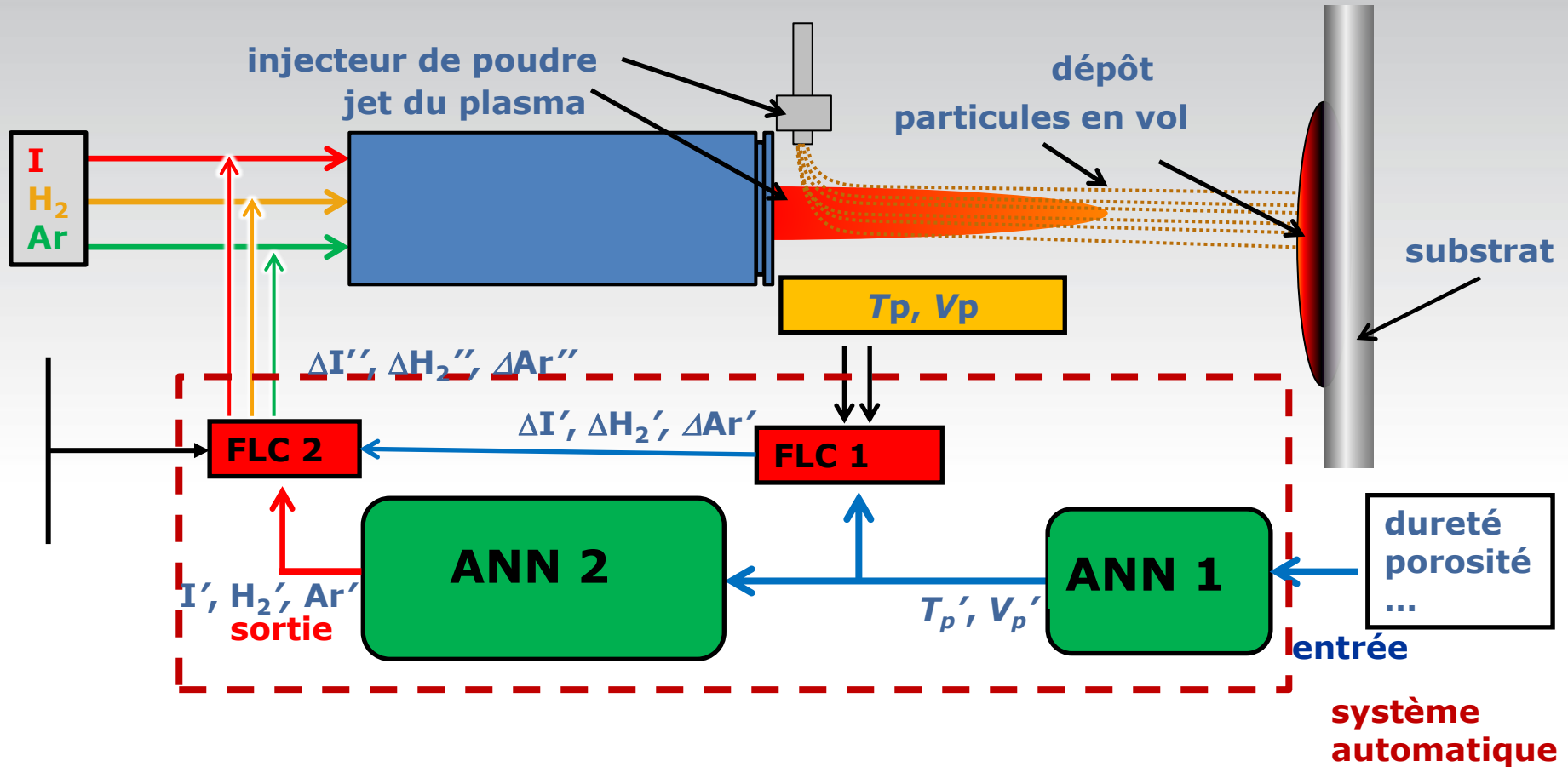
- **automatique:** 1) sans intervention humaine  
2) temps d'action compatible avec la durée de fluctuation

- **stabiliser:** 1) nouvelle conception de torche pour  $\Delta U \rightarrow 0$  *J.F. Coudert (IRCER- Limoges)*  
2) contrôler le procédé via  $T_p, V_p$



# un point de vue pratique

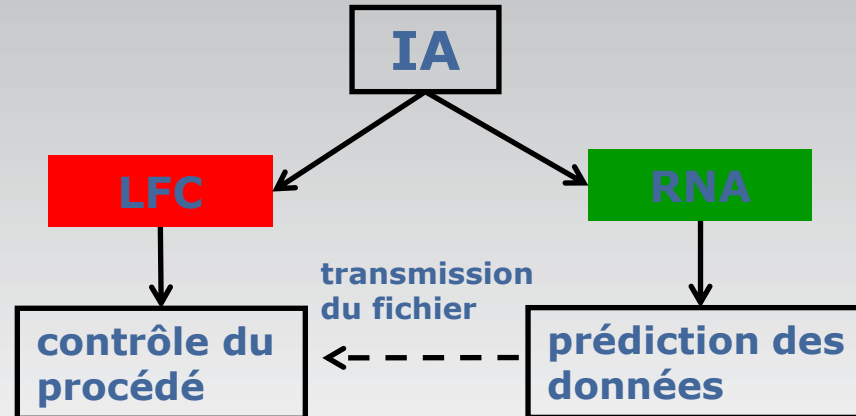
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD





# un point de vue pratique

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



## ➤ paramètres extrinsèques ( $I$ , $H_2$ , $Ar$ )

- $I$                     350~750A
- $H_2$                     0~15 NL/min
- $Ar$                     34~52 NL/min

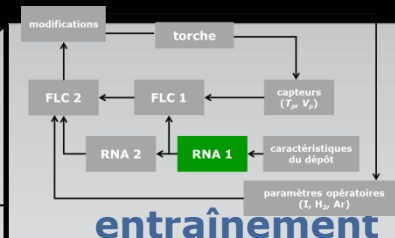
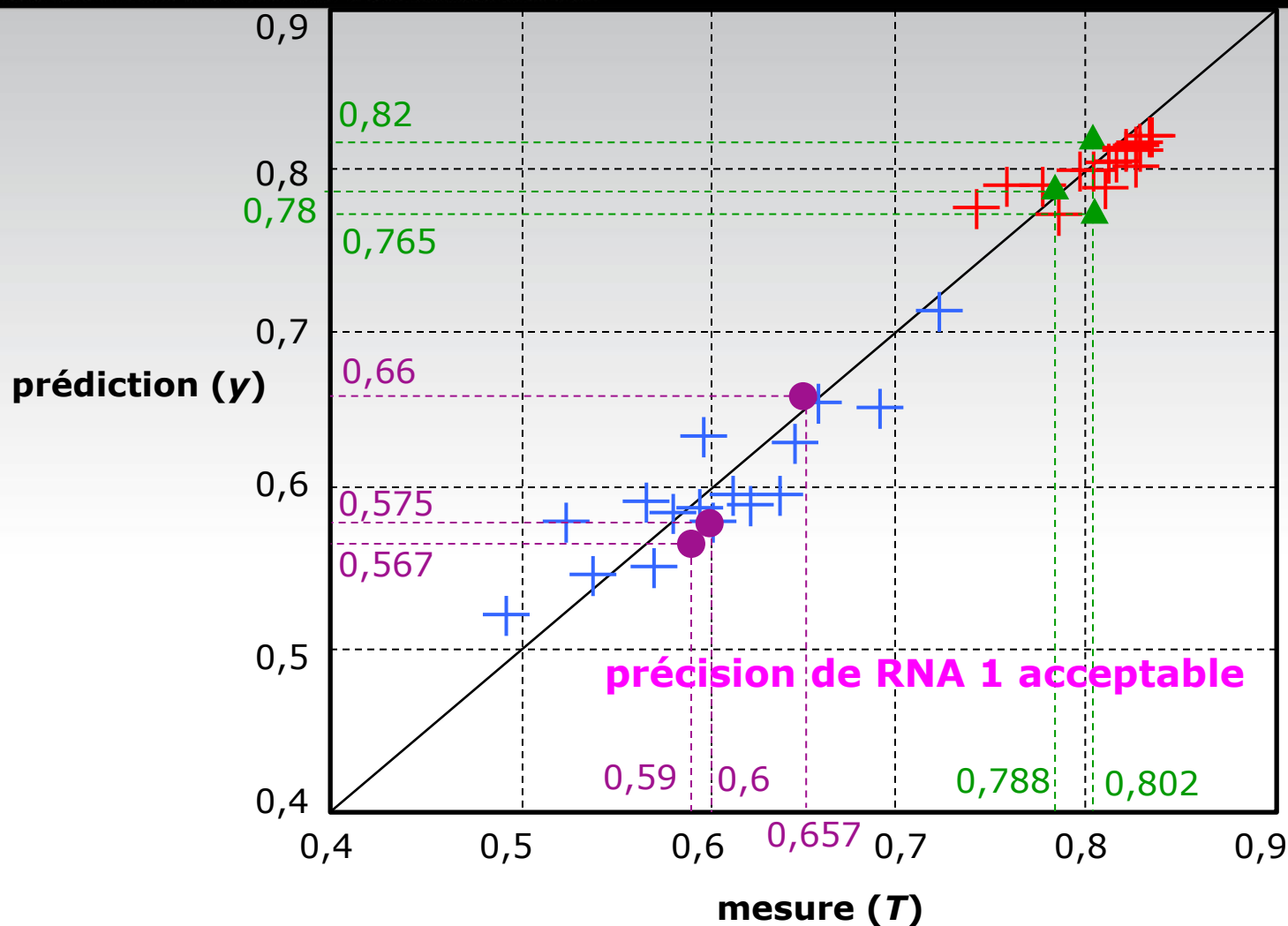
## ➤ paramètres des particules en vol ( $T_p$ , $V_p$ )

- $T_p$                     2000~3000 ° C
- $V_p$                     150~400 m·s<sup>-1</sup>

$Al_2O_3$  – 13wt. %  $TiO_2$

# RNA 1: particule en vol

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



—  $y = T$

+ vitesse

+ température

**validation**

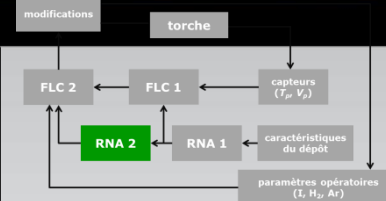
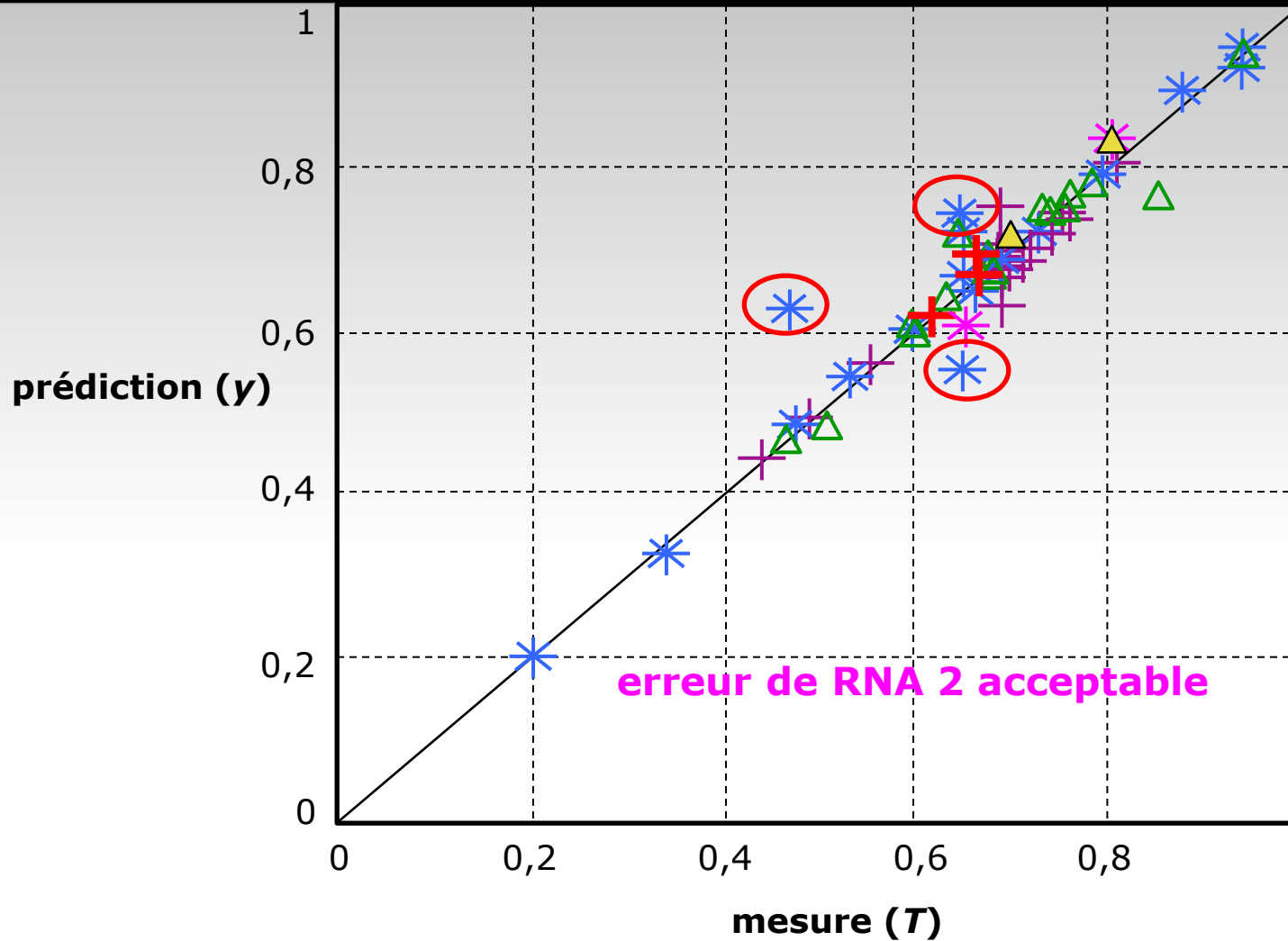
● Vitesse  
3,0%

▲ Température  
2,6%

précision de RNA 1 acceptable

# RNA 2: paramètres opératoires

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



## entraînement

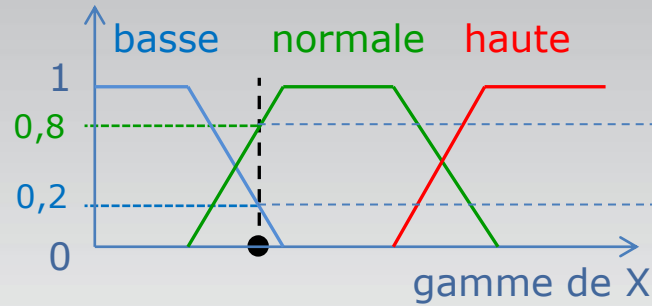
- $y = T$
- + courant
- \* hydrogène
- △ argon

## validation

- + Courant  
1%
- \* Hydrogène  
6%
- △ Argon  
4%

# principe de logique floue

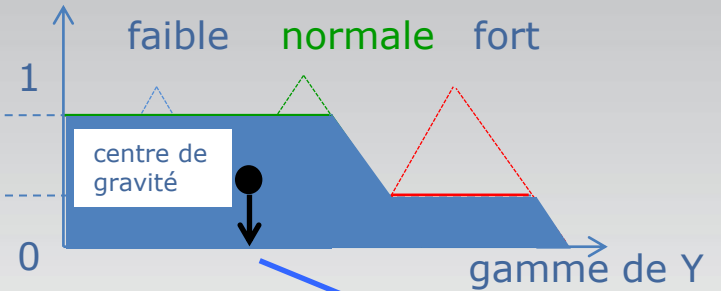
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



X: température ...

Y: courant ...

80% de normale  
20% de basse



80% de normale  
20% de fort

valeur du  
centre de  
gravité

uniformiser  
(0 - 1)

A : basse, haute, normale  
B: fort, faible, normal



ensemble de relations langagières

moteur d'inférence

méthode de défuzzification

ensemble de règles floues

# surface de règles floues

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

entrée

$DT_p : 0,5$

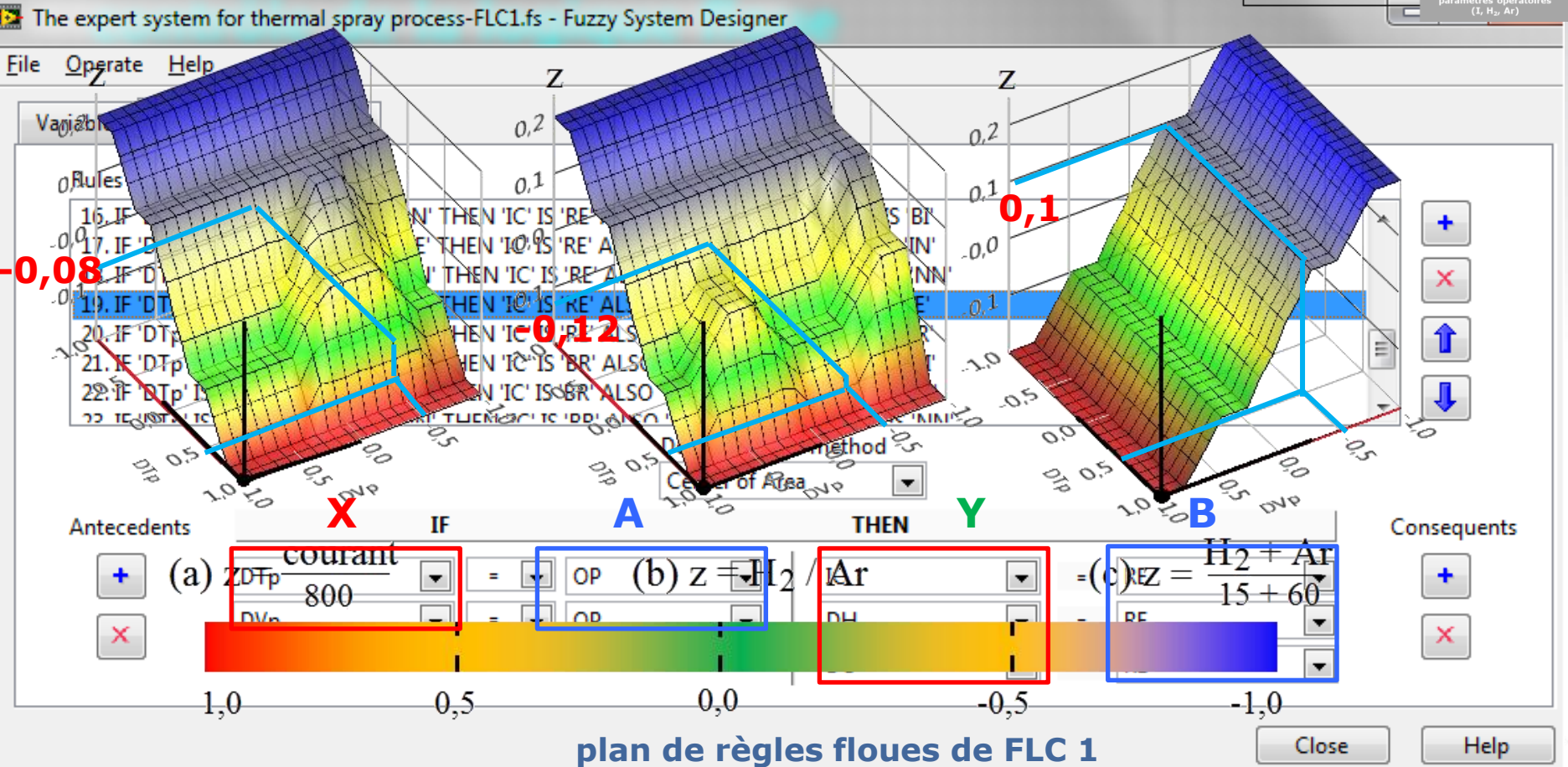
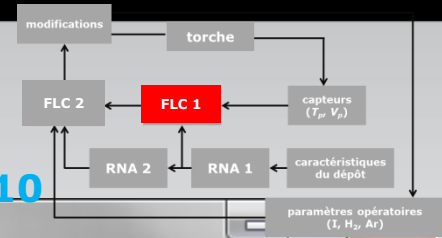
$DV_p :-0,5$

sortie

$I = -0,08$

$H_2 / Ar = -0,12$

$H_2 + Ar = 0,10$

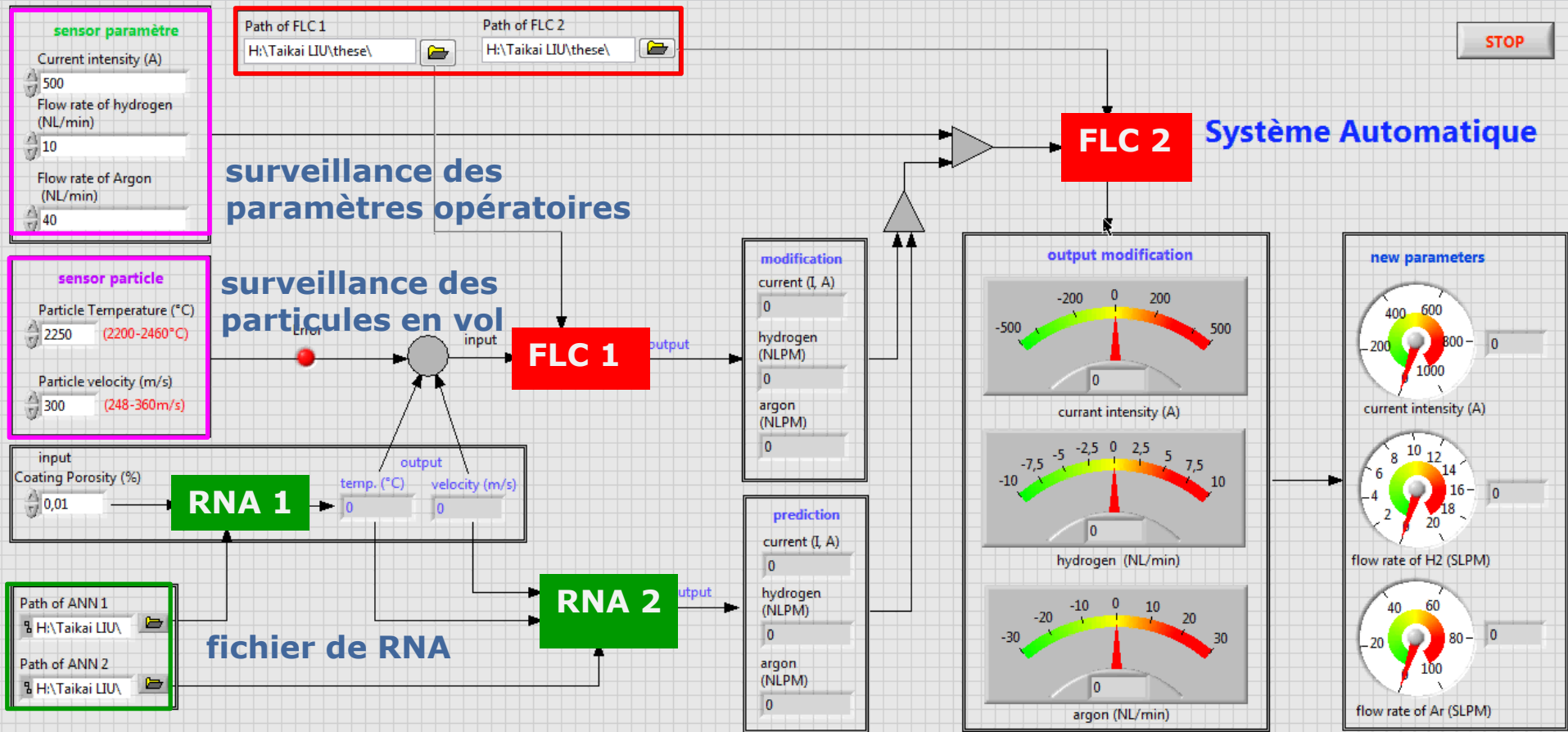




# interface du système automatique

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

## fichier de FLC

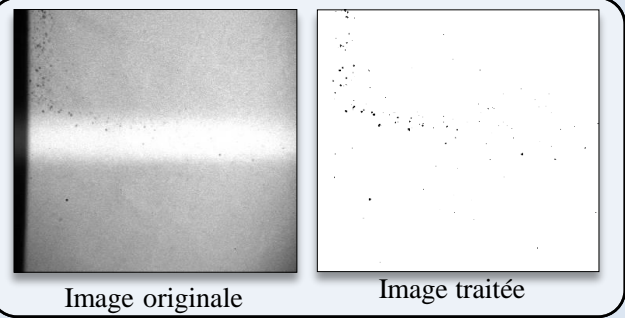


exemple d'interface de système expert sous labview

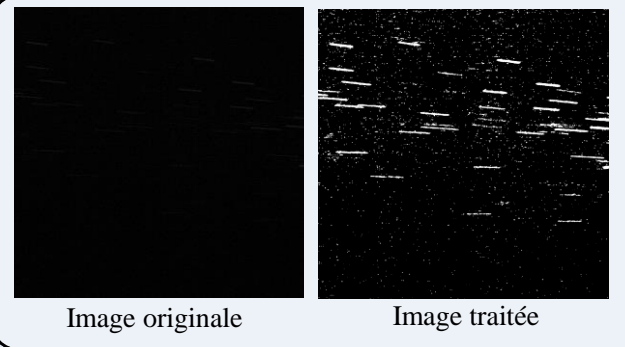
# conclusion

## Application à la projection de plasma

- Observation in situ du flux de particules

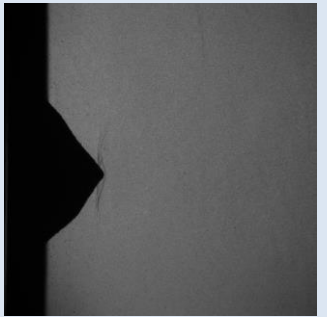


- Calcul de la vitesse des particules en vol

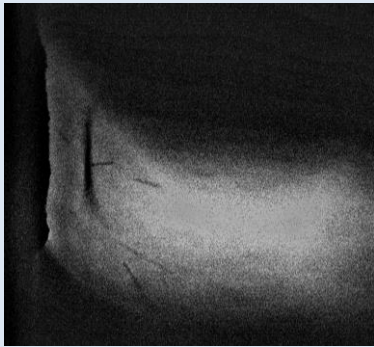


## Application à la projection à froid

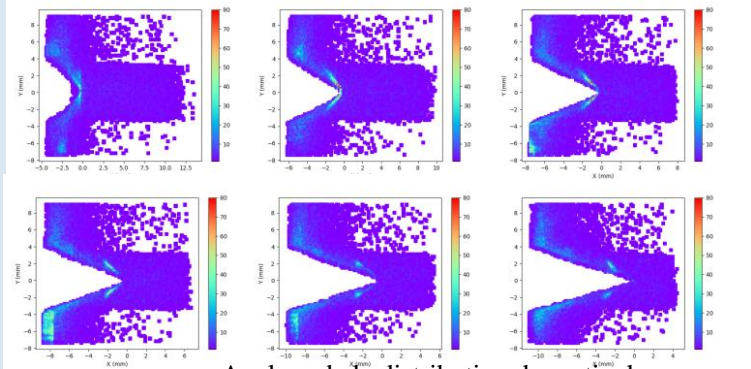
- Observation in-situ de la croissance du revêtement



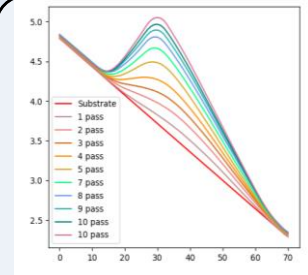
Processus de croissance du revêtement



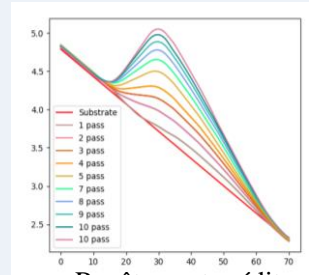
Vitesse particule /Analyse crack



Analyse de la distribution de particules



Revêtement réelle



Revêtement prédite

- Prédiction de la formation du revêtement par IA

# Conclusion

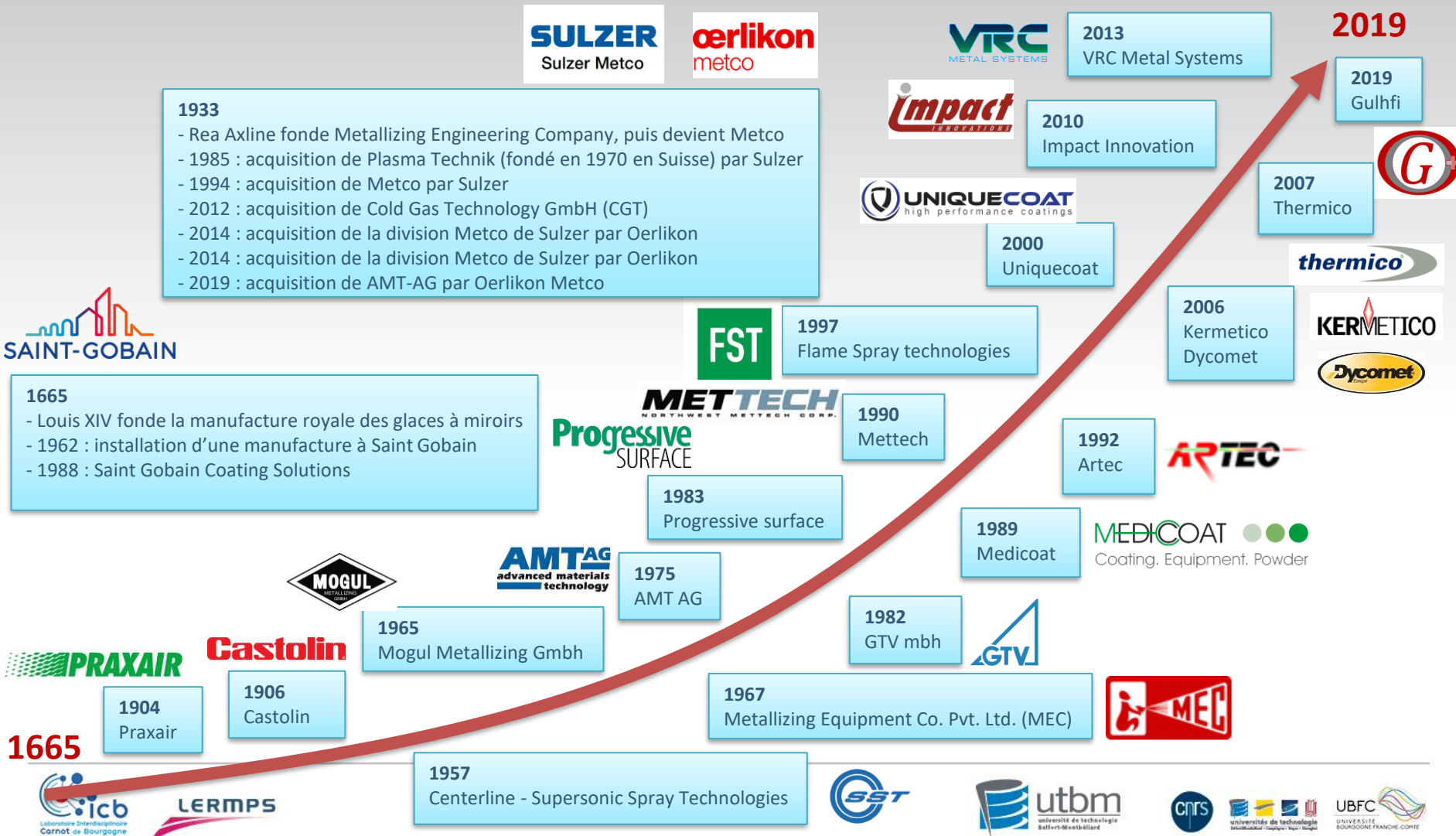
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

- applications industrielles nombreuses et très diversifiées
- association matériau / procédés / traitements de finition
- augmentation de la durée de vie et nouvel outil de conception

**"Le bon matériau au bon endroit"**

# Développeurs en projection thermique

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



# 16<sup>ème</sup> Journée du réseau plasmas froids du 3 au 6 octobre 2022

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD

# Merci