Atelier Plasma thermique
Limoges, 3-5 juin 2009

ITSFC

Le LERMPS-UTBM est membre de l'Institut des Traitements de Surface de Franche-Comté

Interactions plasma/particules
Méthodes de mesure et résultats

LERMPS
Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Site de Sévenans, 90 010 Belfort Cedex, France

www.lermps.com

LERMPS

sommaire

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions

- introduction
- méthodes de contrôle en ligne du procédé de projection
- effets des paramètres opératoires sur les caractéristiques des particules en vol
- conséquences sur les propriétés des dépôts
- conclusions

LERMPS

un procédé spécial

le résultat du procédé ne dépend pas directement mais indirectement des paramètres opératoires

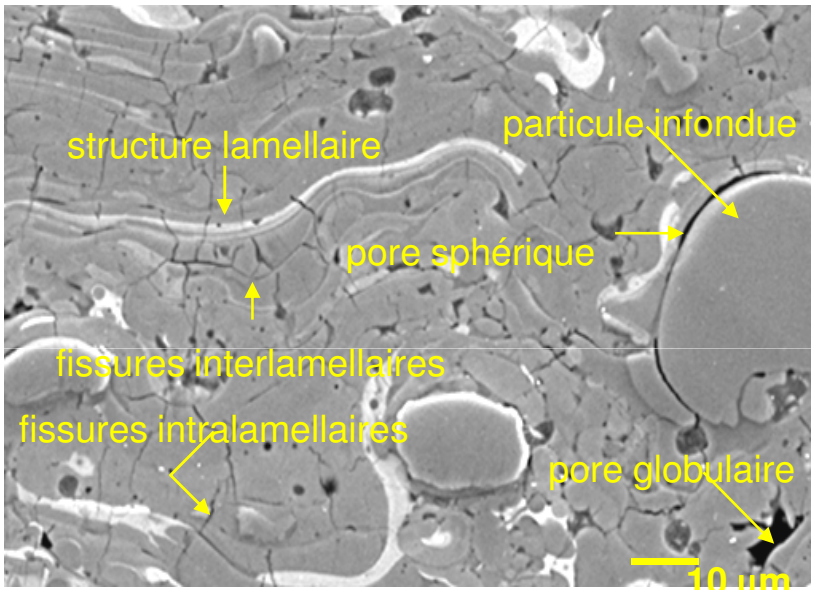
introduction

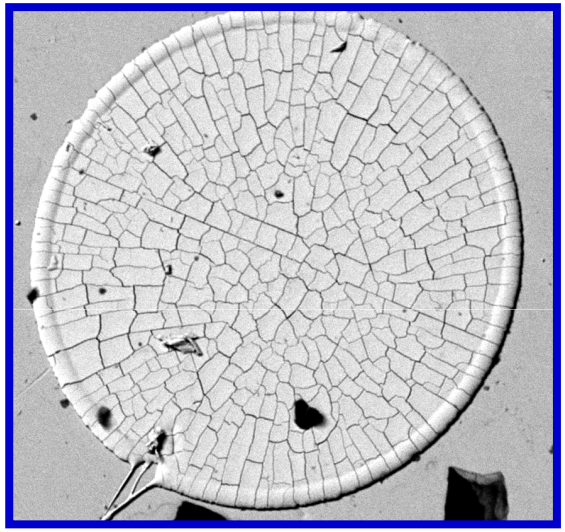
méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions

direction de projection





pilotage

diagnostics

paramètres opératoires

caractéristiques en vol des particules
caractéristiques du substrat

LERMPS

paramètres extrinsèques

paramètres opératoires ou "pilotables"

~ 60 paramètres
effets couplés
effets non linéaires

introduction

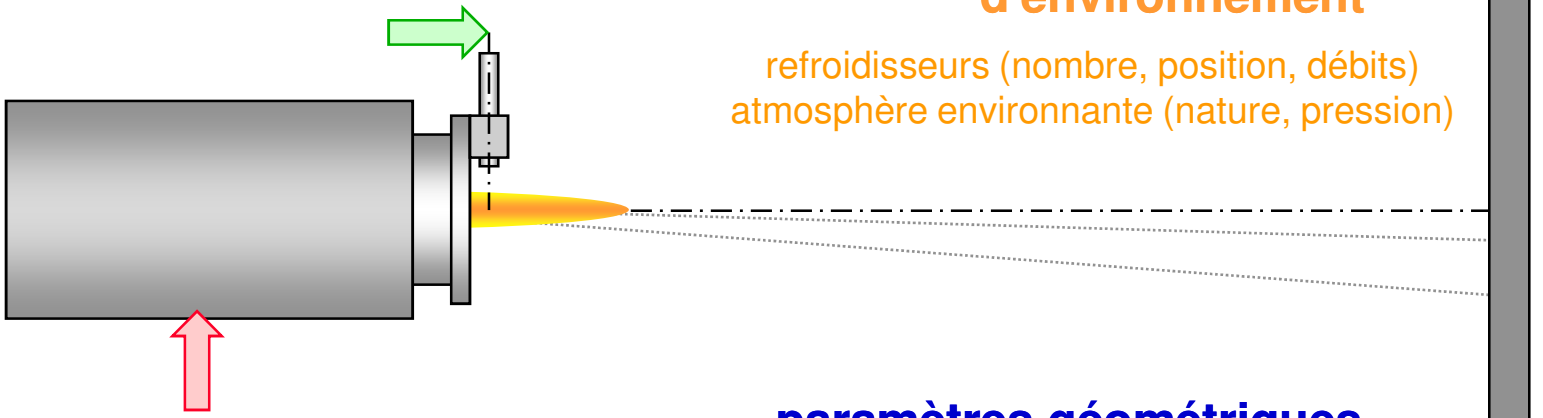
méthodes de contrôle
en ligne du procédé

effets des paramètres
opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions

paramètres d'injection de la poudre

diamètre interne de l'injecteur
débit de gaz porteur
distance d'injection à l'axe géométrique de la torche
angle d'injection
débit de poudre



paramètres d'environnement

refroidisseurs (nombre, position, débits)
atmosphère environnante (nature, pression)

paramètres de puissance

intensité du courant d'arc
débit total de gaz plasmagènes
fraction d'hydrogène
fraction d'hélium

paramètres géométriques et cinématiques

distance de projection
vitesse de projection
pas de balayage

LERMPS

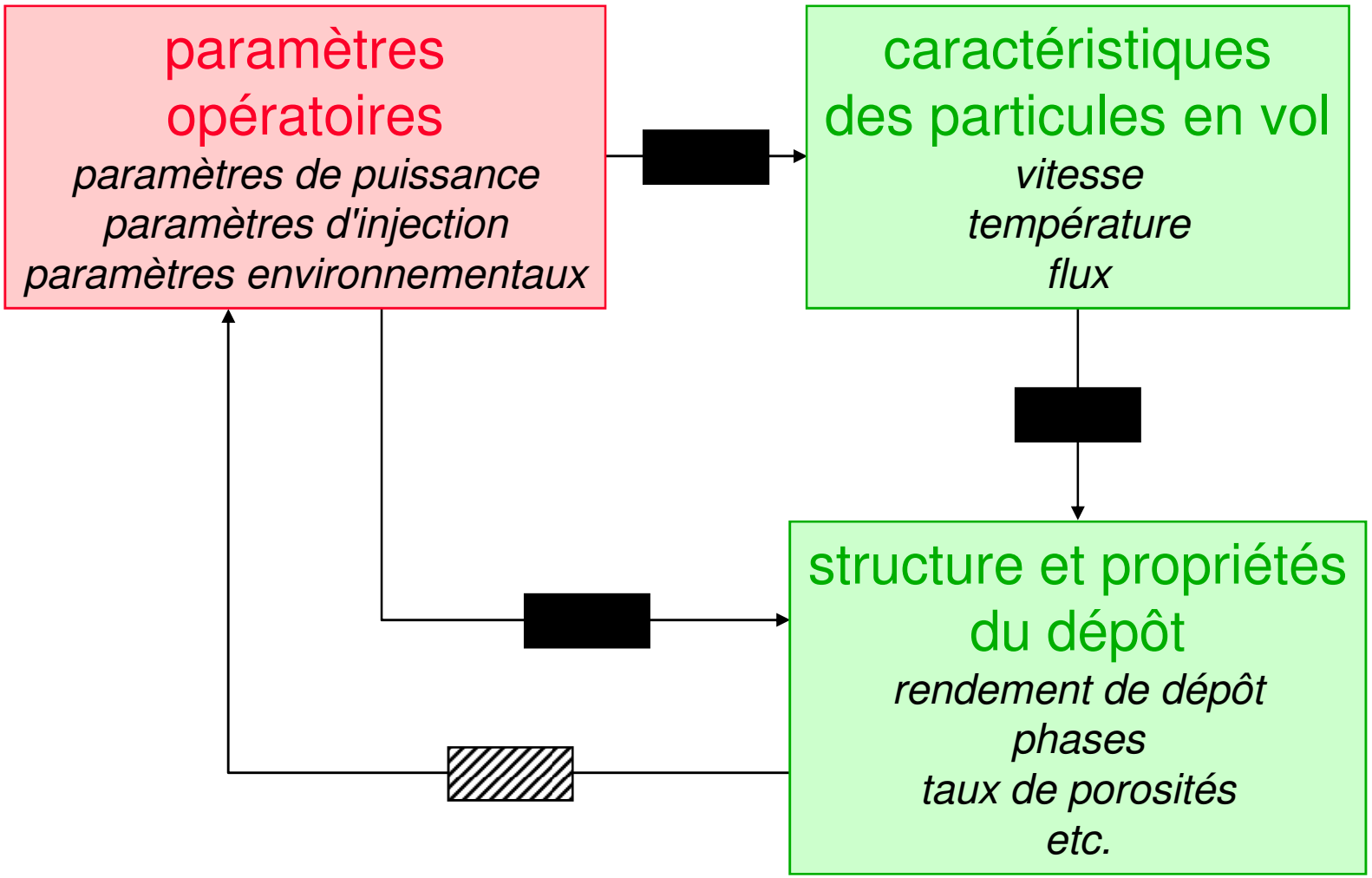
5 stratégies de contrôle

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions



LERMPS

nécessité de définir des critères de contrôle

contrôle des caractéristiques du jet de particules

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions

mise au point des fenêtres opératoires et / ou contrôle du procédé

caractéristiques recherchées
vitesses
températures
diamètres
flux particulaires
géométrie du panache (largeur, déflexion, etc.)

pyrométrie bichromatique
DPV-2000 (Tecnar)
Accuraspray (Tecnar)
Therma Viz (Stratonics)

imagerie / fluxmétrie
Spray Watch (Oseir)
SDC (Snecma)
Plumespector(Tecnar)

mesures des vitesses : ~ 5%
mesures des températures : ~ 10 à 30%
interpolations des diamètres : ~ 10 à 30%

LERMPS

Emission thermique

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions

- Tout corps émet un rayonnement I (loi de Planck) qui dépend de :
  - Surface rayonnante S
  - Emissivité du matériau ε
  - Température T (K)

$$I(\lambda,T) = \varepsilon\ S\ \ fct(T,\lambda)$$

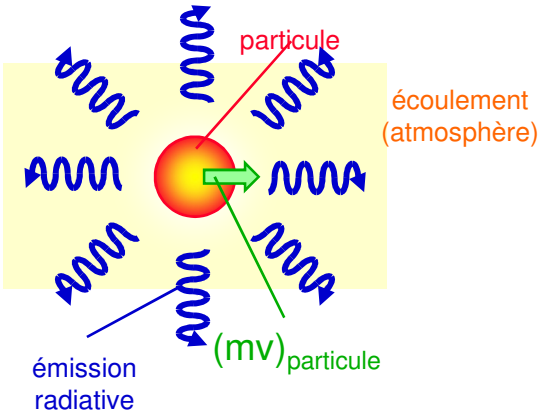
8 rayonnement des corps

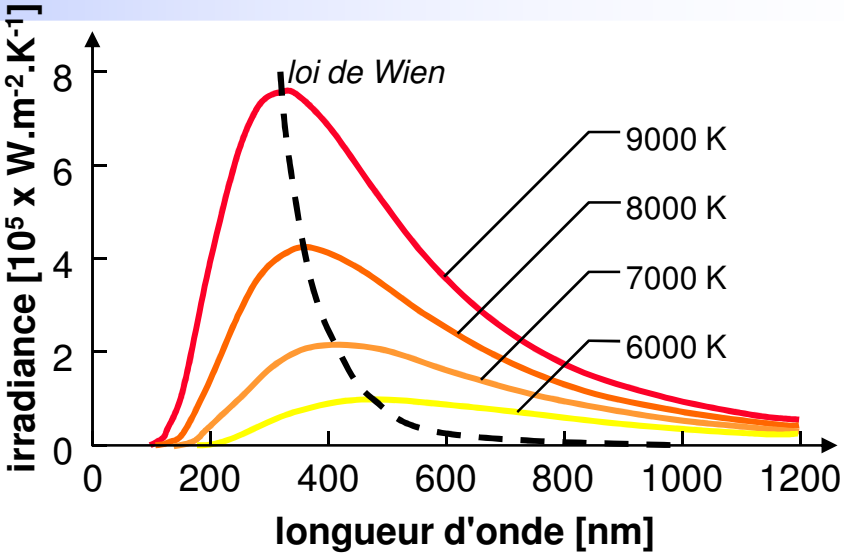
introduction

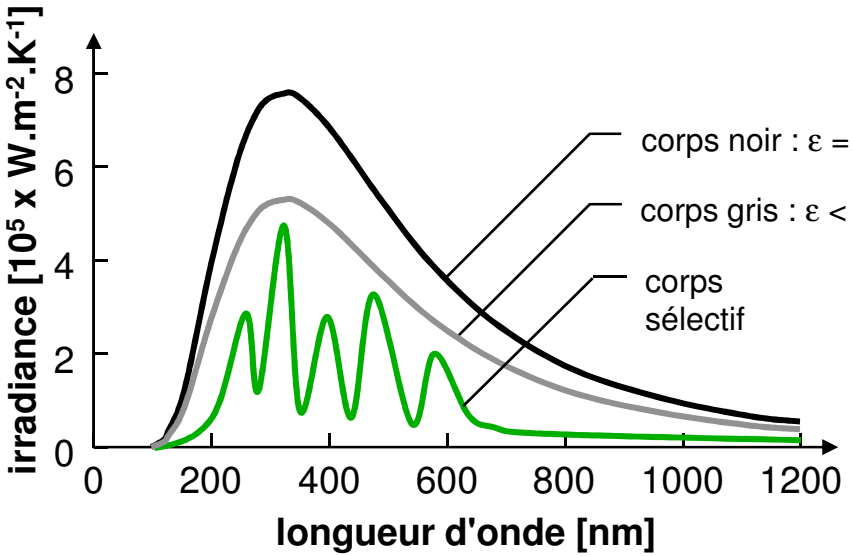
méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions







corps noir

$$I = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$$

corps gris

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda$$

LERMPS

Les mesures

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions

- Mesures sur particules
  - mesures particules individuelles
  - mesures sur jet de particules
- Mesures sur pièces
  - pyrométrie (infrarouge) de surface
  - température avant dépôt (préchauffage)
  - température du dépôt et refroidissement

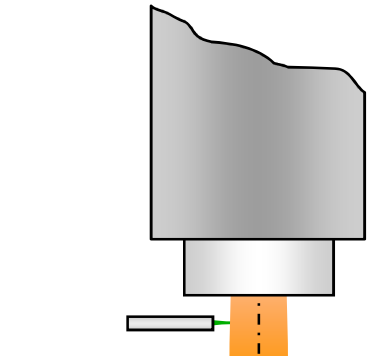
Les mesures sur les particules

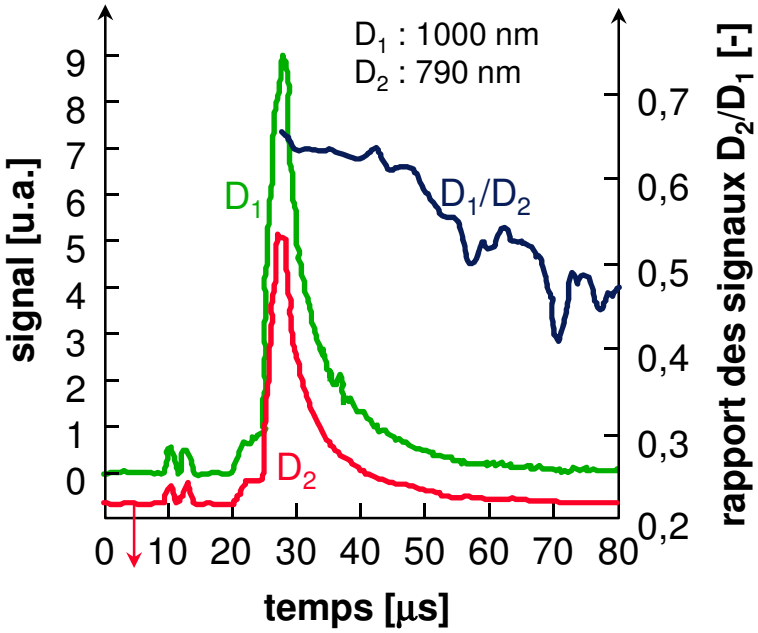
introduction

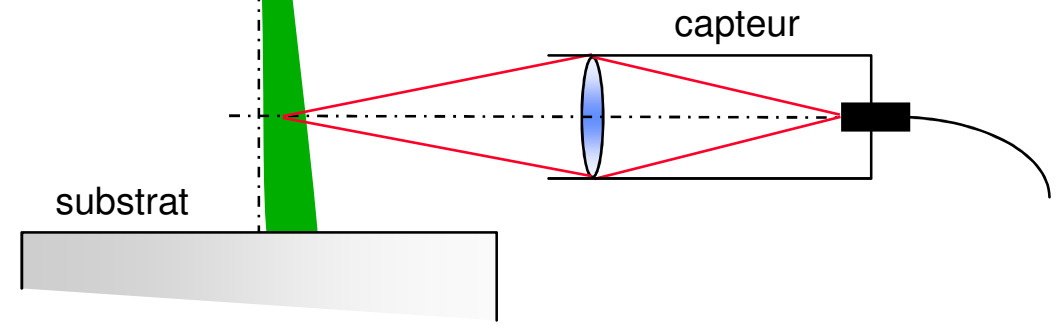
méthodes de contrôle en ligne du procédé

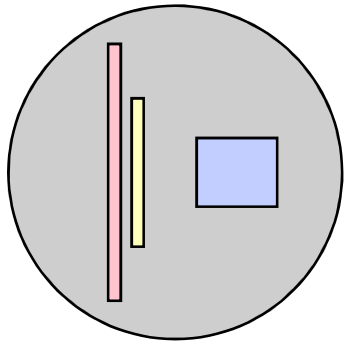
effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions









LERMPS

Difficultés physiques liées aux mesures sur les particules

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions

Problème de détectivité

- particules de petite taille
- limitation = T/diamètre (limite sur signal)
- reconnaissance petits signaux

Problème source très lumineuse

- la source peut éblouir et rendre les particules invisibles
- la radiation source peut être diffusée par les particules

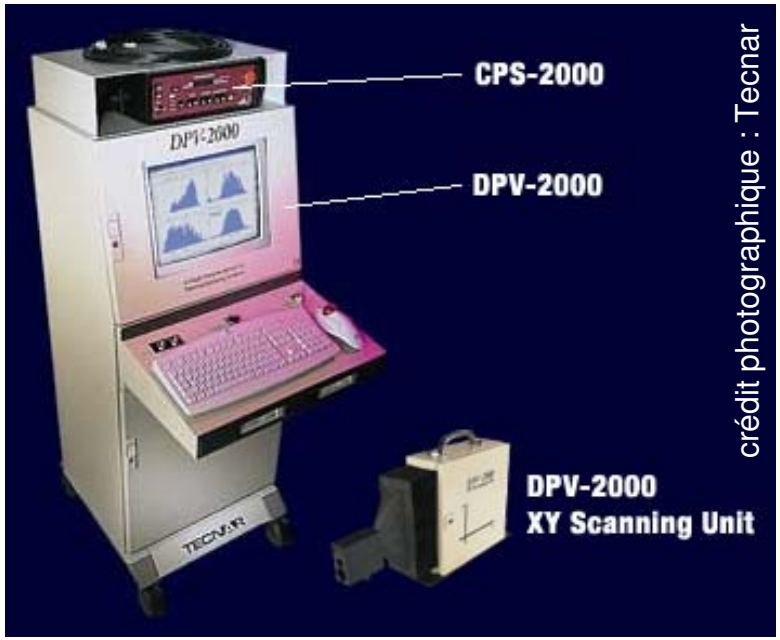
Les dispositifs commerciaux

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions



crédit photographique : Tecnar

crédit photographique : Tecnar

mesure des caractéristiques des particules unitaires : **V** et **T**
interpolation des caractéristiques des particules unitaires : **D**
intégration du flux particulaire : **F**
cartographie implicite du jet par "mapping"

LERMPS

contrôle des caractéristiques du jet de particules

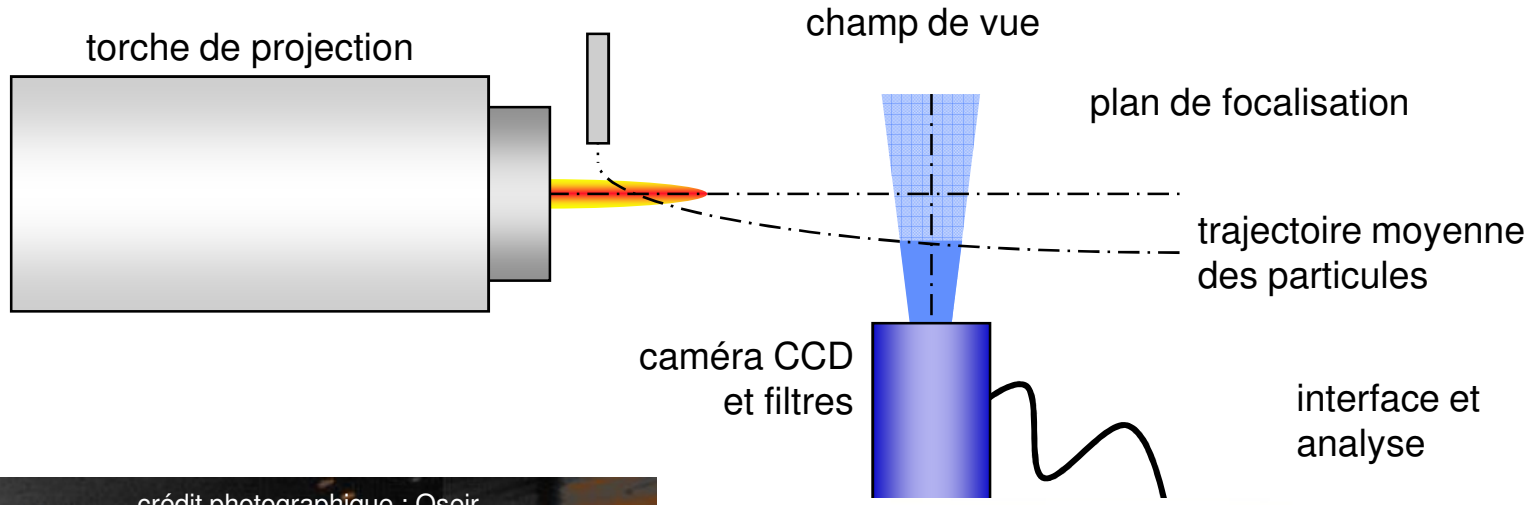
contrôle par imagerie / fluxmétrie

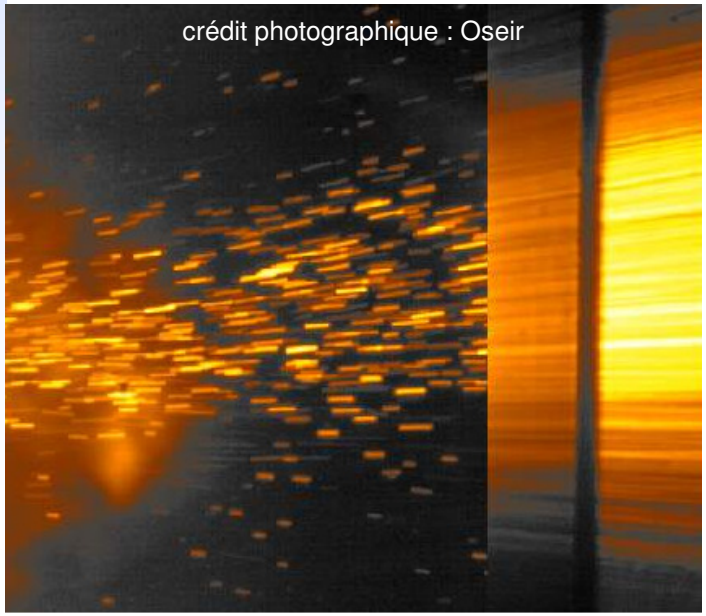
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖**I, Ar, H2**
- ❖**Pression**
- ❖**Taille des particules**
- ❖**Vitesse d'injection**
- ❖**Distance de mesure**

conclusions




crédit photographique : Oseir

LERMPS

contrôle des caractéristiques du jet de particules

contrôle par imagerie / fluxmétrie : dispositifs commerciaux

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions

mesure directe du flux particulaire : **F**
cartographie explicite du jet
mesure des caractéristiques des particules unitaires : **V**
interpolation des caractéristiques des particules unitaires : **T**

LERMPS

contrôle des caractéristiques du jet de particules

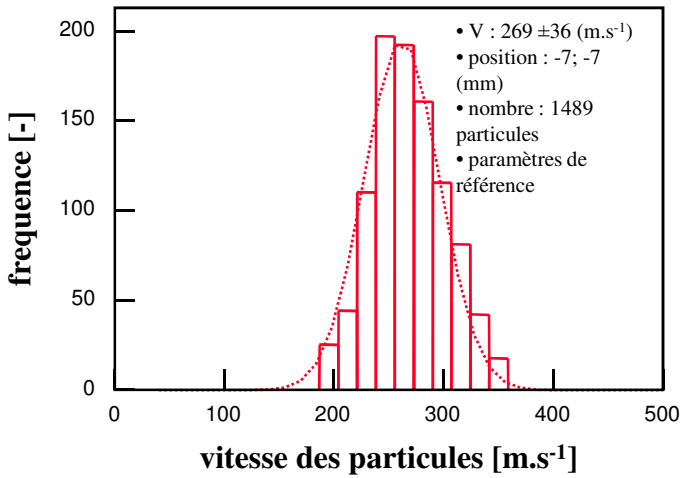
exemple d'informations collectées

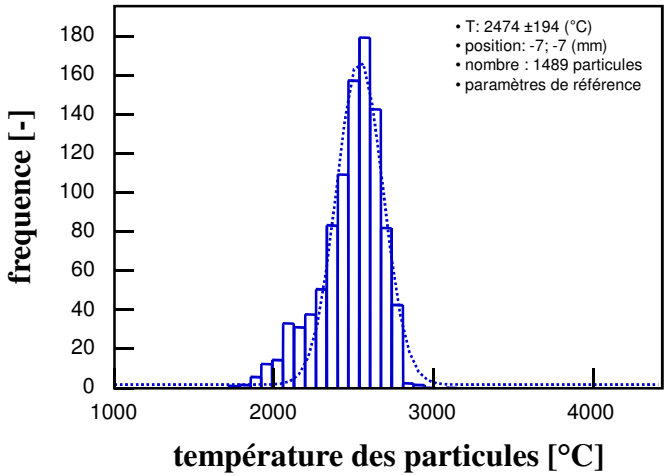
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

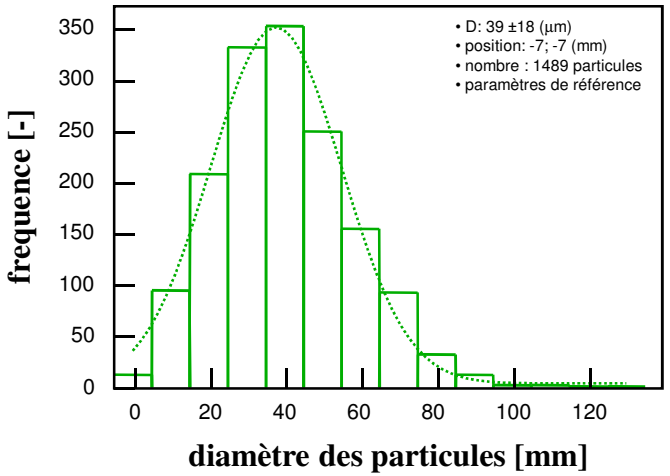
effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions





- Al_2O_3-TiO_2 (Metco 130)
- F4 buse 6 mm
- Ar+H_2 : 54 Nl.min^{-1}
- H_2/Ar : 35 %
- Intensité : 530 A
- Gaz porteur : 3,2 Nl.min^{-1}
- ϕ_{inj} : 1,8 mm
- D_{inj} : 6 mm
- Débit de poudre : 22 g.min^{-1}
- D_{proj} : 125 mm



LERMPS

fenêtre des paramètres pilotables

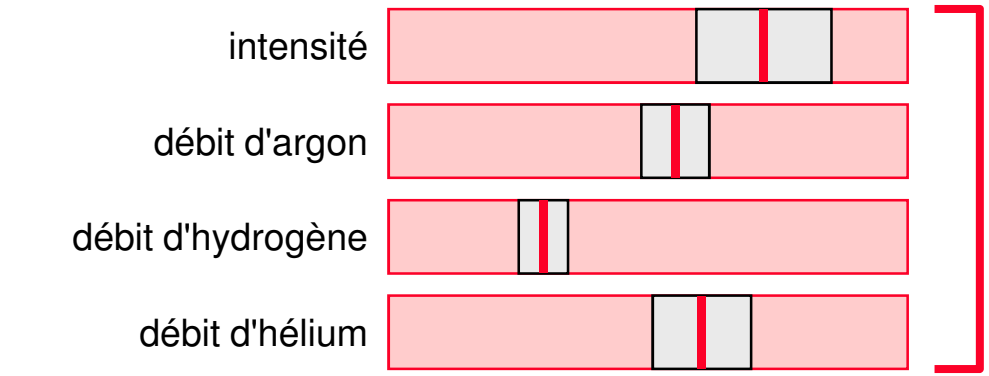
paramètres "cibles" + plage admise de variations
exemple : procédé "plasma"

introduction

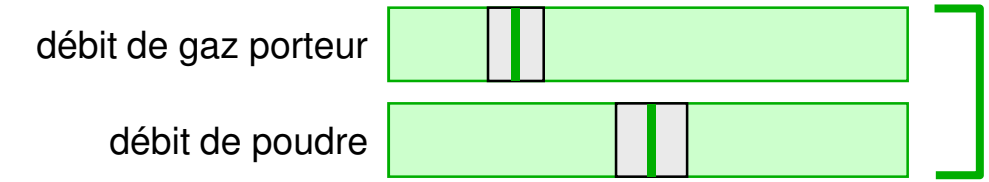
méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

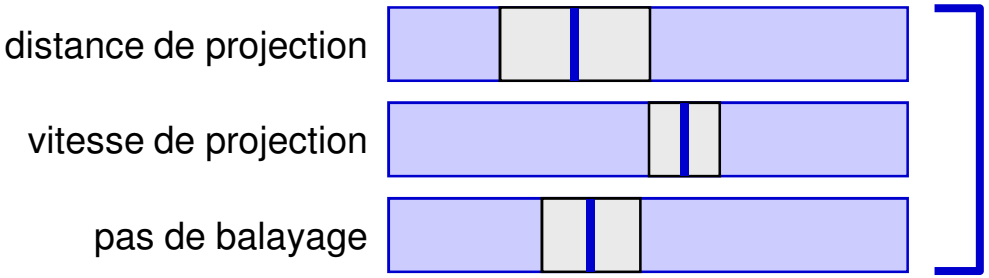
conclusions



- puissance électrique
- puissance effective
- enthalpie
- conductivité thermique
- viscosité



- quantité de mouvement des particules
- trajectoire des particules
- divergence et déviation du jet



- trajectoire des particules
- divergence et déviation du jet
- charge thermique sur la pièce

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

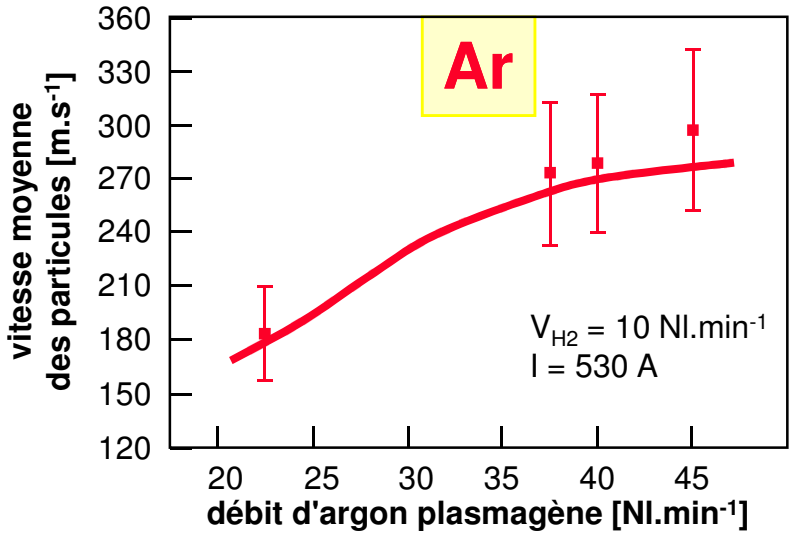
effets des paramètres de puissance / plasma

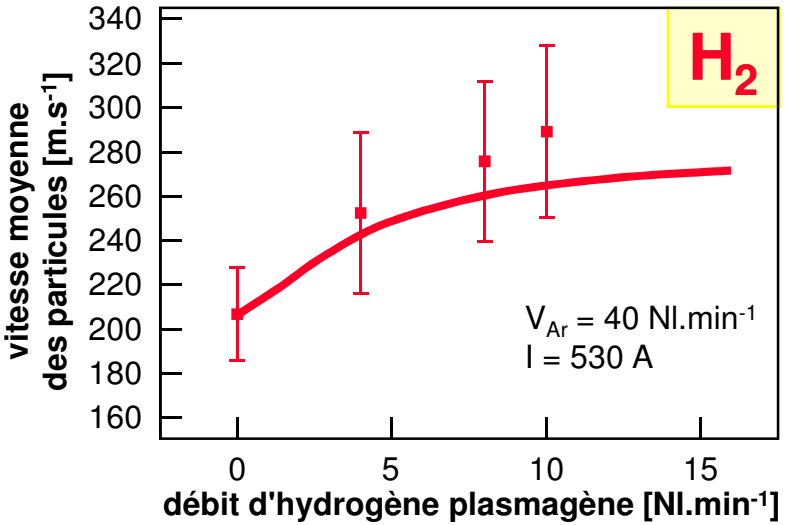
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

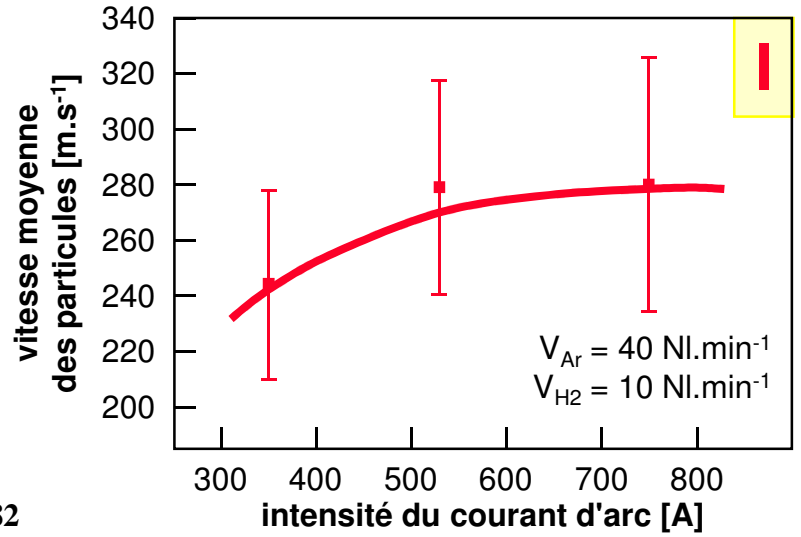
effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions





- Al_2O_3-TiO_2 (13% en masse)
- +15 -53 µm
- Torche F4 (6 mm de diamètre d'anode)
- à la distance de projection : 125 mm
- diamètre d'injecteur : 1,8 mm
- débit de gaz porteur : 3,2 Nl.min^{-1}
- distance d'injection : 8 mm



J. of Surface Coatings Technology, 202, 2008, p. 4479-4482

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

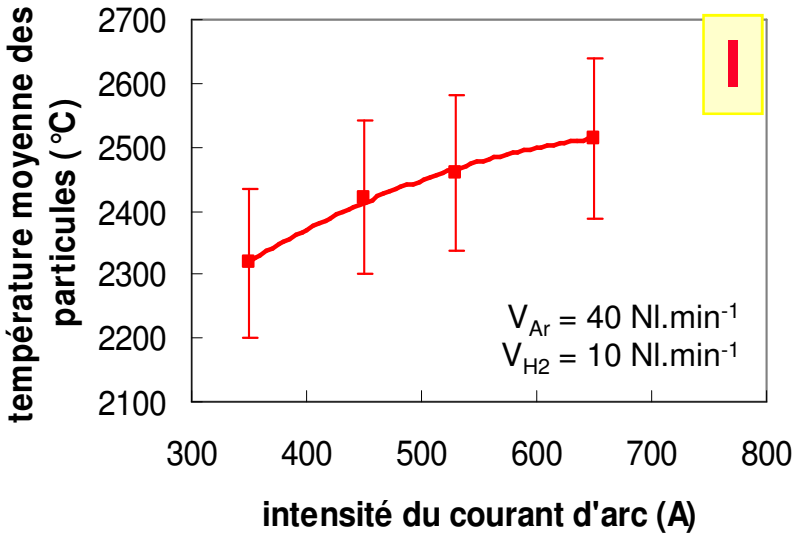
effets des paramètres de puissance / plasma

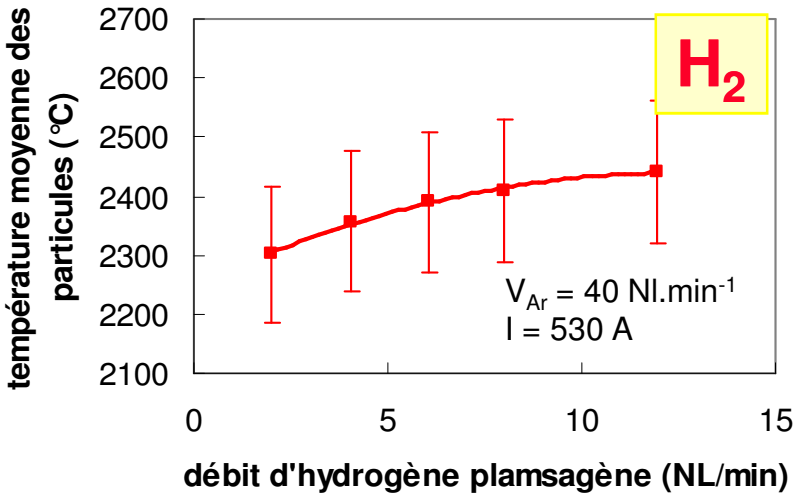
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions





- Al_2O_3-TiO_2 (13% en masse)
- +15 -53 µm
- Torche F4 (6 mm de diamètre d'anode)
- à la distance de projection : 125 mm
- diamètre d'injecteur : 1,8 mm
- débit de gaz porteur : 3,2 Nl.min^{-1}
- distance d'injection : 8 mm

J. of Surface Coatings Technology, 202, 2008, p. 4479-4482

LERMPS

caractéristiques des dépôts

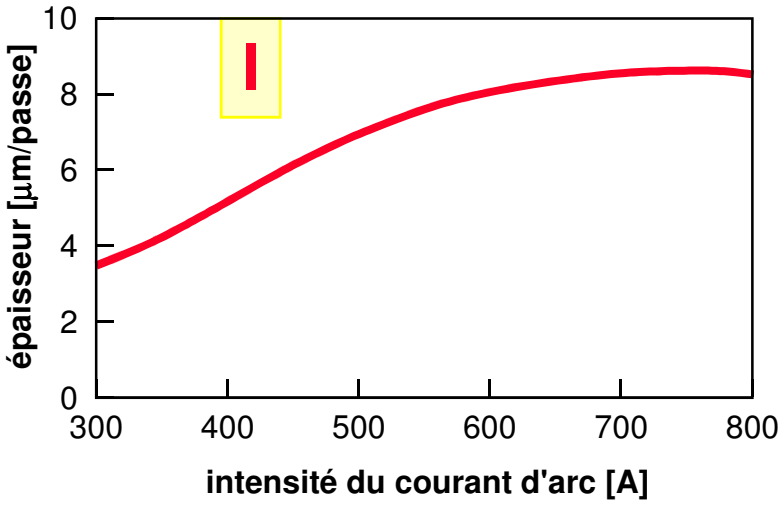
effets des paramètres de puissance / plasma

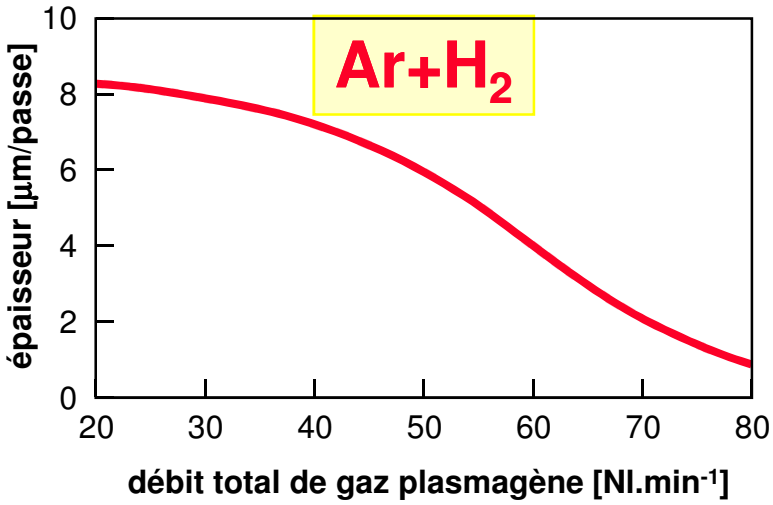
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

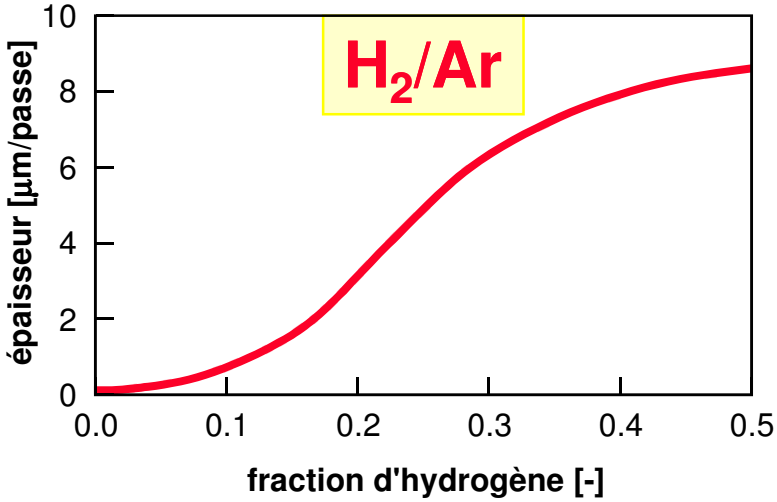
effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions





- Al_2O_3-TiO_2 (13% en masse)
- +15 -53 µm
- Torche F4 (6 mm de diamètre d'anode)
- à la distance de projection : 125 mm
- diamètre d'injecteur : 1,8 mm
- débit de gaz porteur : 3,2 Nl.min^{-1}
- distance d'injection : 8 mm



J. of Surface Coatings Technology, 202, 2008, p. 4479-4482

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

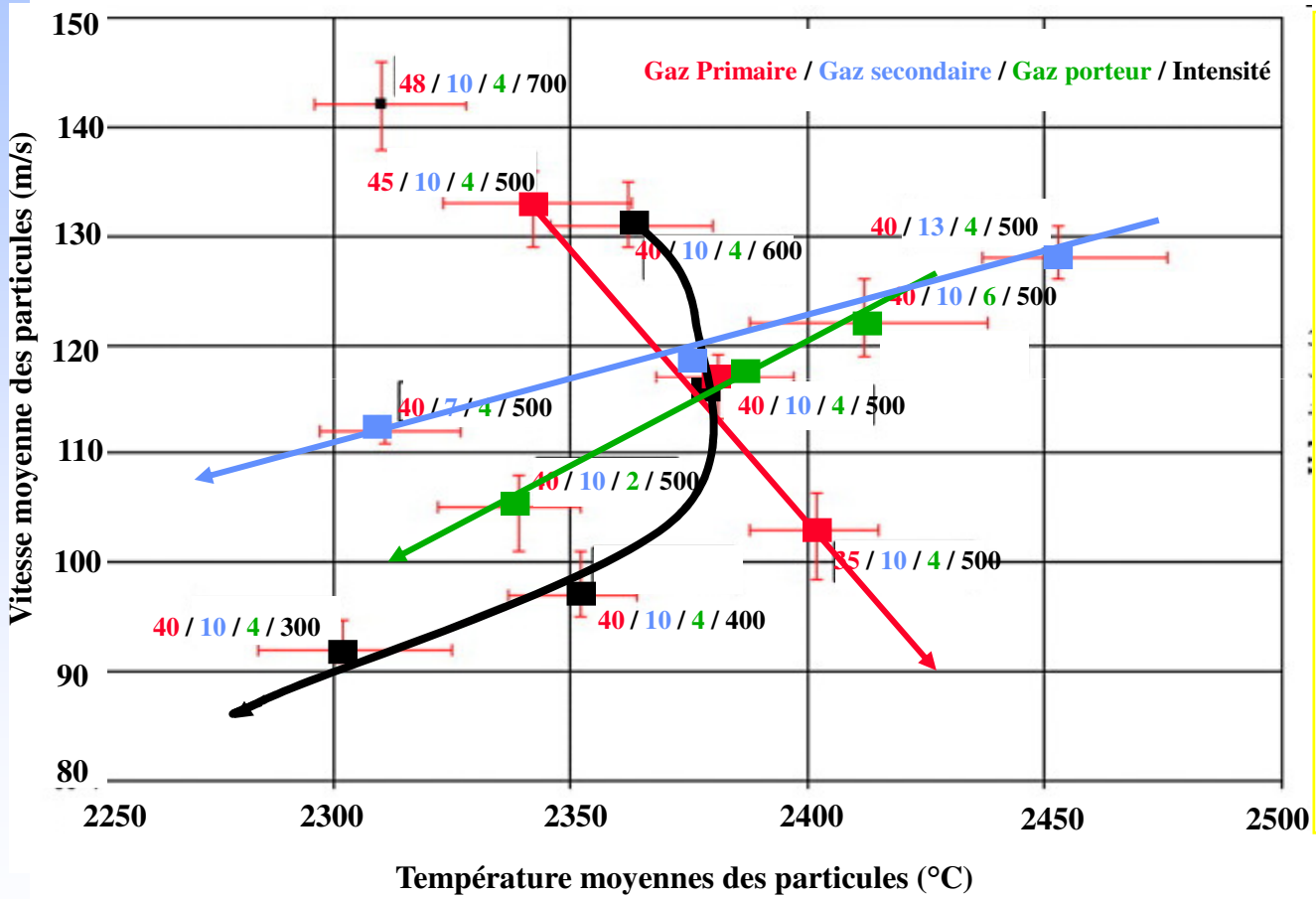
effets des paramètres de puissance / plasma

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions



- TiB_2 - Al_2O_3 composite
- +38 -100 µm
- Torche Metco (7 mm de diamètre d'anode)
- Intensité de courant : 300/400/500/600/700 A
- Débit de gaz Ar : 35/40/45 Nl.min-1
- Débit de gaz H2 : 7/10/13 Nl.min-1
- à la distance de projection : 150 mm
- diamètre d'injecteur : 1,8 mm
- débit de gaz porteur : 2/4/6 $Nl.min^{-1}$
- distance d'injection : 2 mm

J. of Surface Coatings Technology, 203, 12, 2009, p. 1649 - 1655

LERMPS

caractéristiques des dépôts

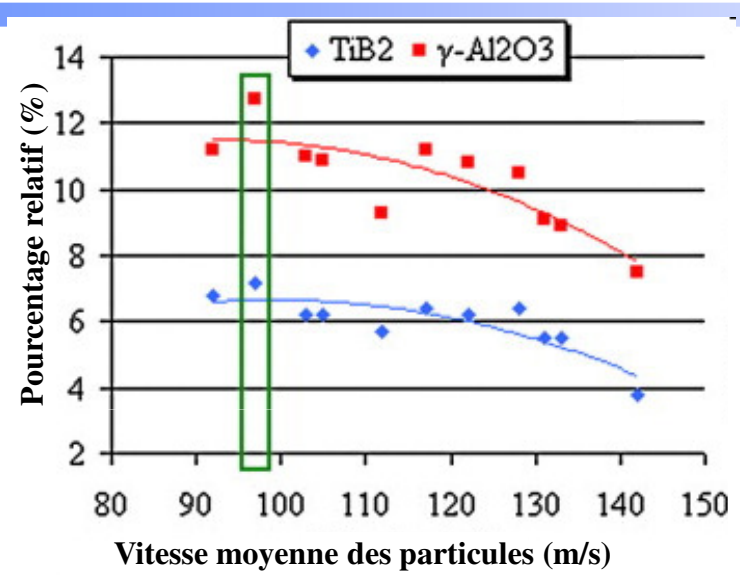
effets des paramètres de puissance / plasma

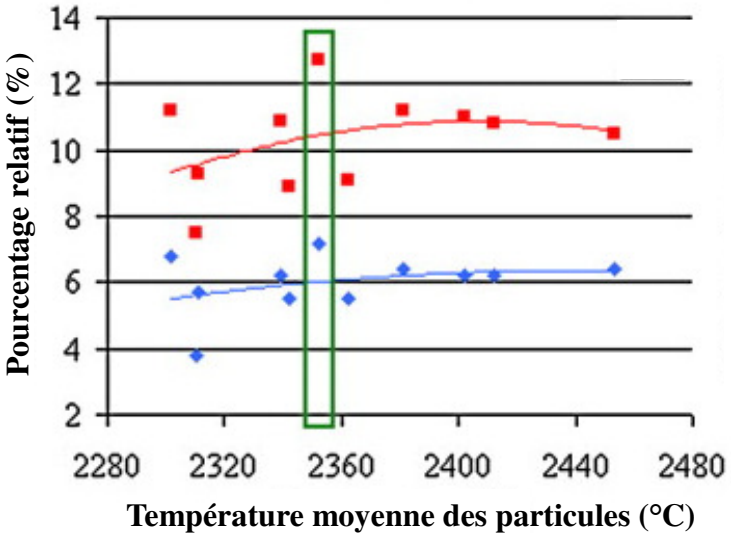
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions





- Paramètre vitesse plus influent que paramètre température
- Conditions opératoires optimum :
- 40 / 10 / 4 / 400
- . Vitesse correspondante : 97 m/s
- Température correspondante : 2352 °C

J. of Surface Coatings Technology, 203, 12, 2009, p. 1649 - 1655

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

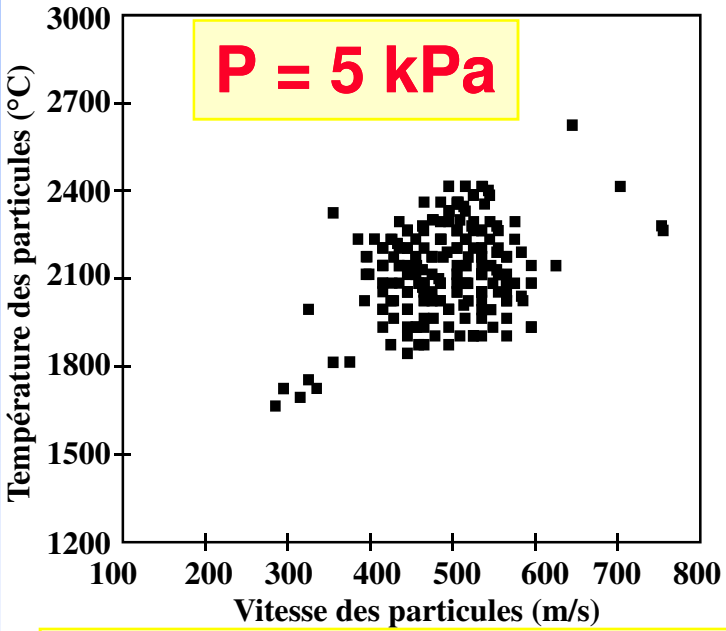
effet de la pression

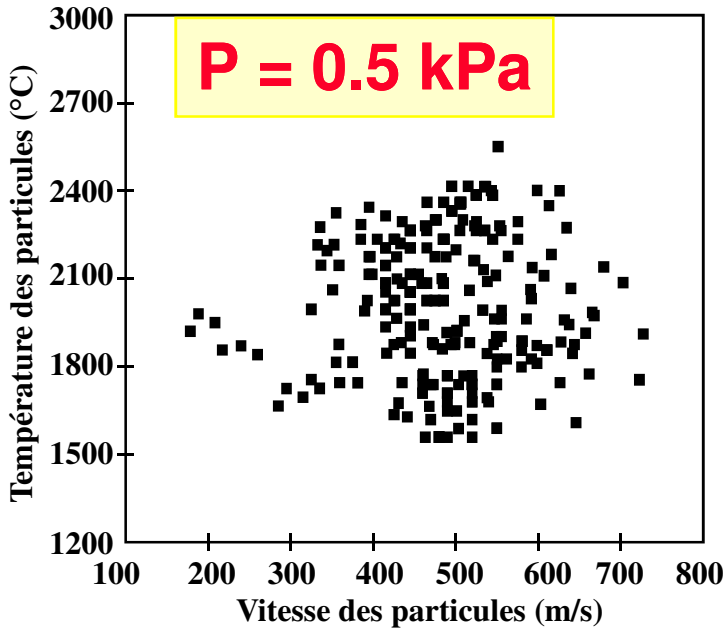
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions





- ZrO_2-Y_2O_3 (8% en masse)
- +45-75 µm
- Torche F4 -VB (6 mm de diamètre d'anode)
- Pression : 0.5 – 15 kPa
- Ar : 40 Nl.min^{-1}
- intensité : 500 A
- à la distance de projection : 150-560 mm
- diamètre d'injecteur : 1,8 mm
- débit de gaz porteur : 3,Nl.min^{-1}
- Débit de poudre : 6 g.min^{-1}

J. of Aerospace Science and Technology, 9, 2005, p. 203-209

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

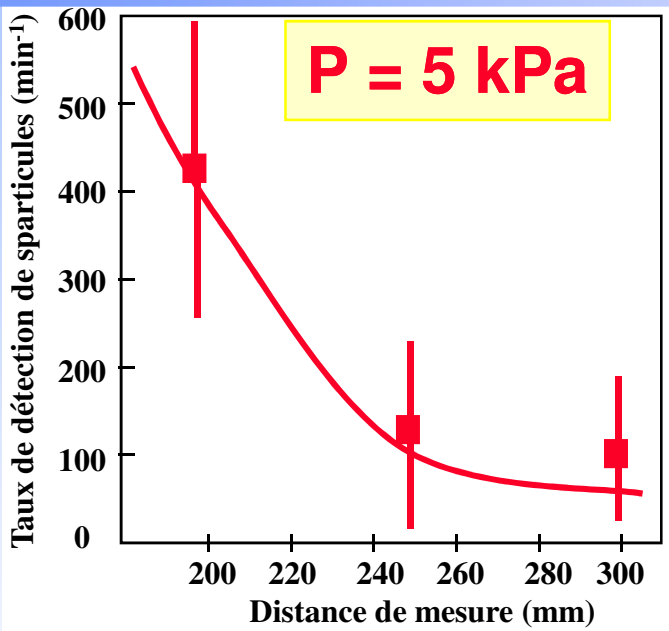
effets de la pression

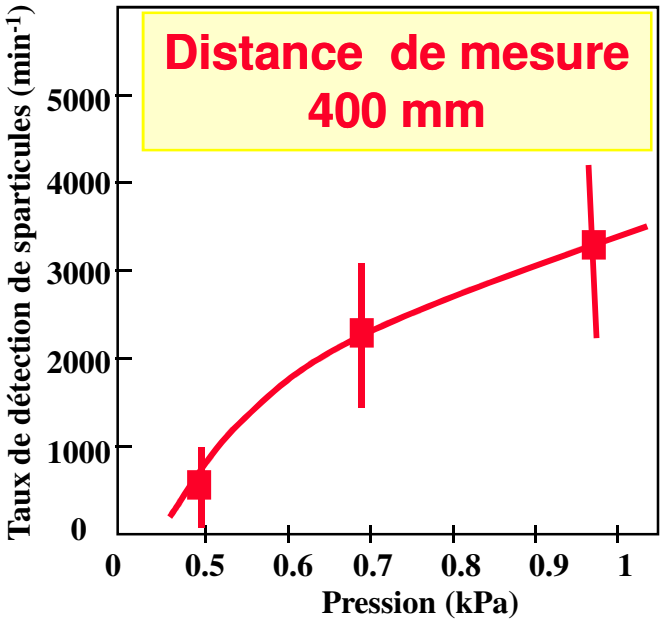
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions





- ZrO_2-Y_2O_3 (8% en masse)
- +45-75 µm
- Torche F4 -VB (6 mm de diamètre d'anode)
- Pression : 0.5 – 15 kPa
- Ar : 40 Nl.min^{-1}
- intensité : 500 A
- à la distance de projection : 150-560 mm
- diamètre d'injecteur : 1,8 mm
- débit de gaz porteur : 3,Nl.min^{-1}
- Débit de poudre : 6 g.min^{-1}

J. of Aerospace Science and Technology, 9, 2005, p. 203-209

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

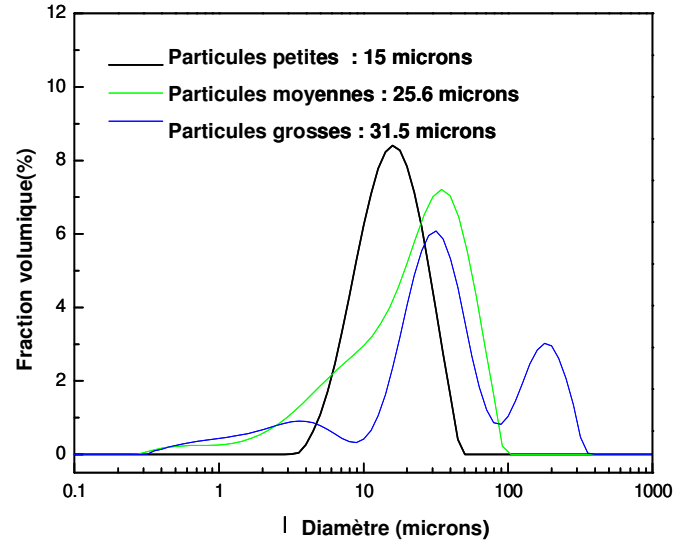
effet de la taille de la poudre

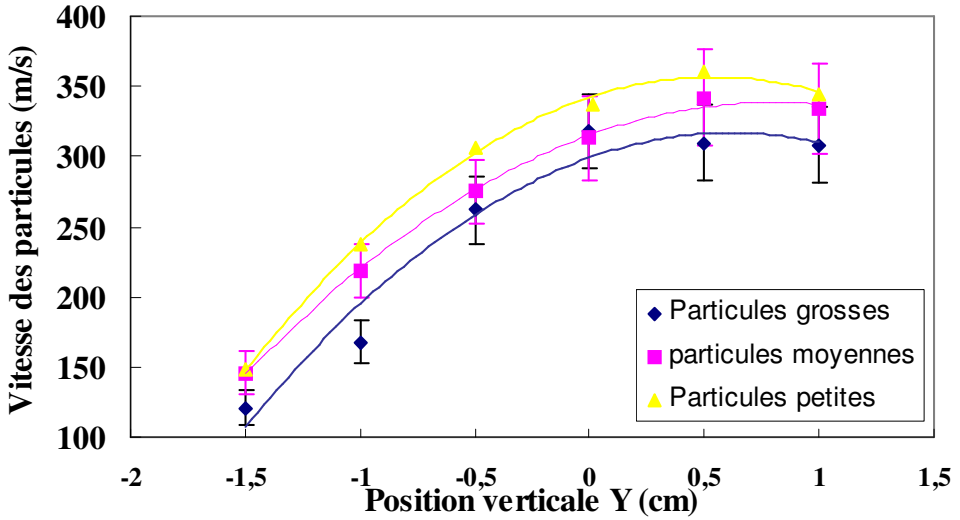
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

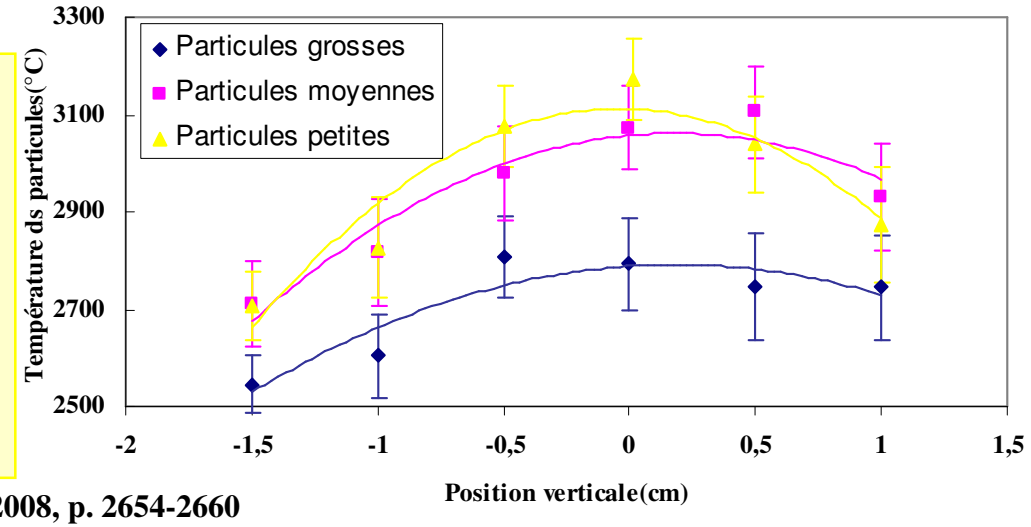
effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions





- ZrO_2- Y_2O_3
- 3 tailles de poudre
- Torche F4 (6 mm de diamètre d'anode)
- Ar /H2 : 35 / 12 Nl.min-1
- intensité : 600 A
- à la distance de projection : 100 mm
- diamètre d'injecteur : 1,8 mm
- débit de gaz porteur : 3,2 Nl.min^{-1}



J. of Surface Coatings Technology, 202, 12, 2008, p. 2654-2660

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

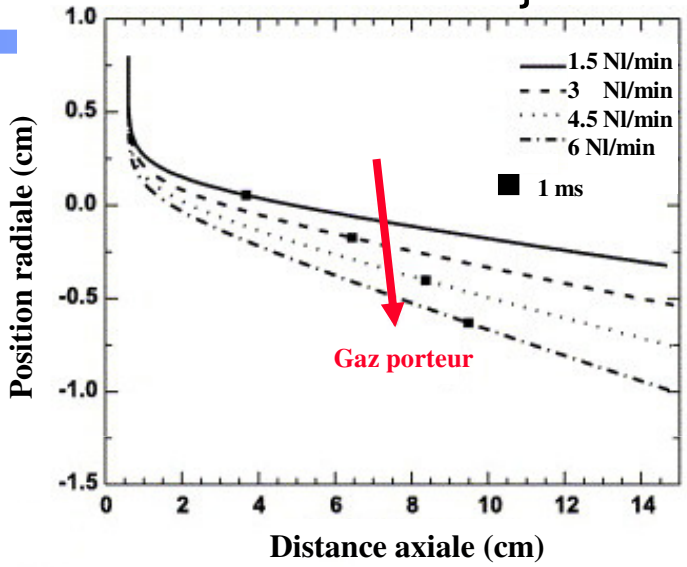
effet de la vitesse d'injection

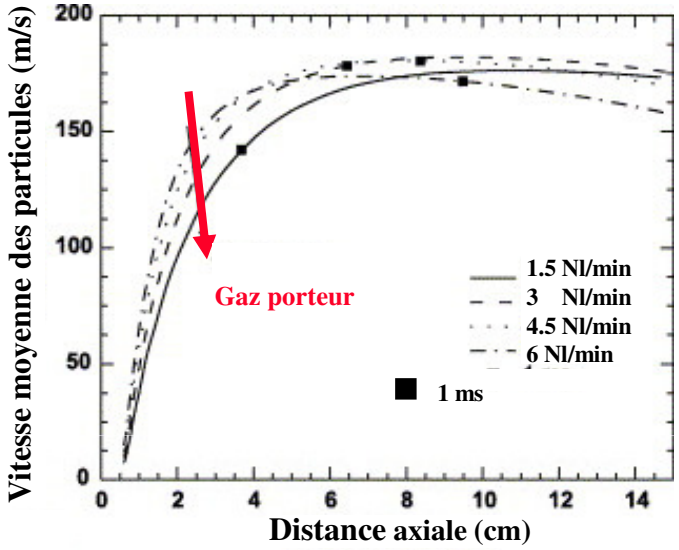
introduction

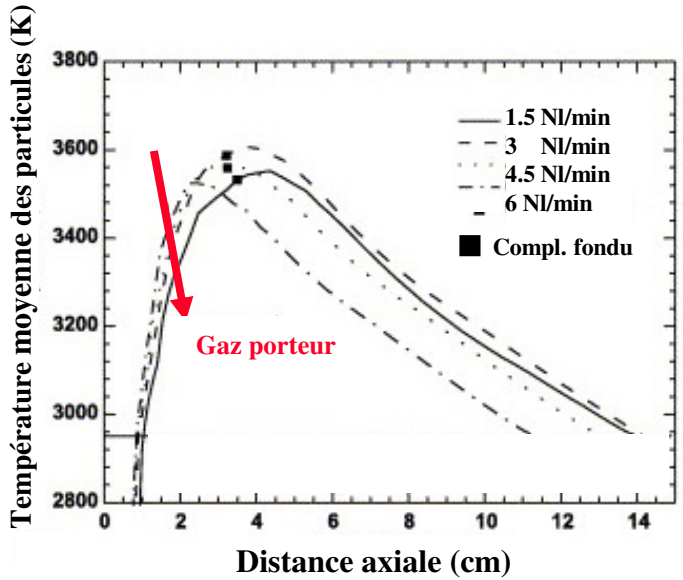
méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions







- ZrO2 de diamètre 30 µm
- Torche Metco 9MB(6 mm de diamètre d'anode)
- Ar /H2 : 40 / 7 Nl.min-1
- intensité : 500 A
- diamètre d'injecteur : 1,8 mm
- débit de gaz porteur : 1.5 à 6 Nl.min^{-1}
- distance d'injection : 8 mm

J. of Heat and Mass Transfer, 47, 24, 2004, p.5189-5200

LERMPS

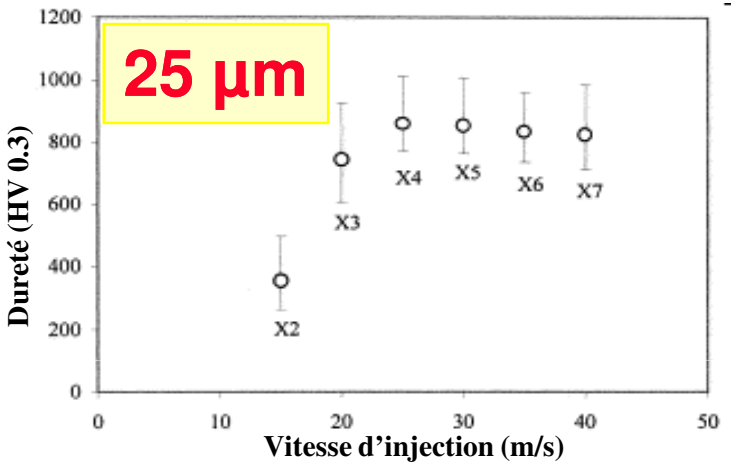
Caractéristiques des dépôts
effet de la vitesse d'injection

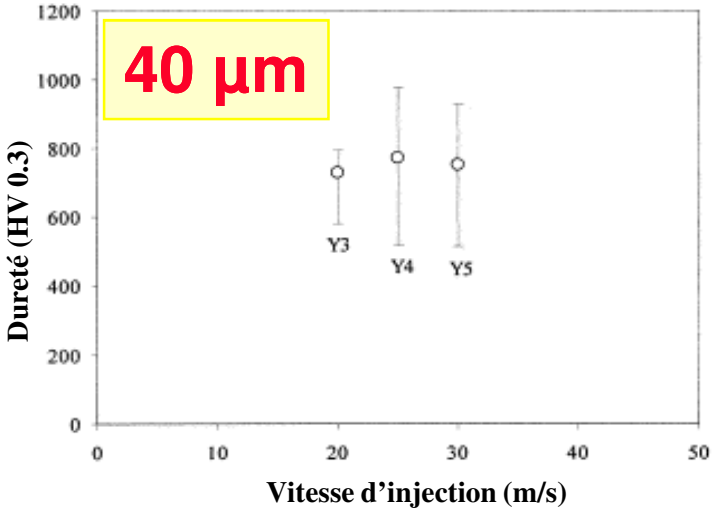
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions





- Poudre Al_2O_3
- 3 tailles différentes

(+ 10-40µm) (25-65 µm)
25 µm 40 µm

Torche SG 100, diamètre d'anode : 8 mm
- Plasma Ar : 78 NL.min^{-1}
- Intensité : 900 A
- Débit de gaz porteur Ar : 2-16 NL.min^{-1}
- Distance de mesure : 100 mm

J. of Surface and Coatings Technology, 139, 1, 2001, p. 44-54

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

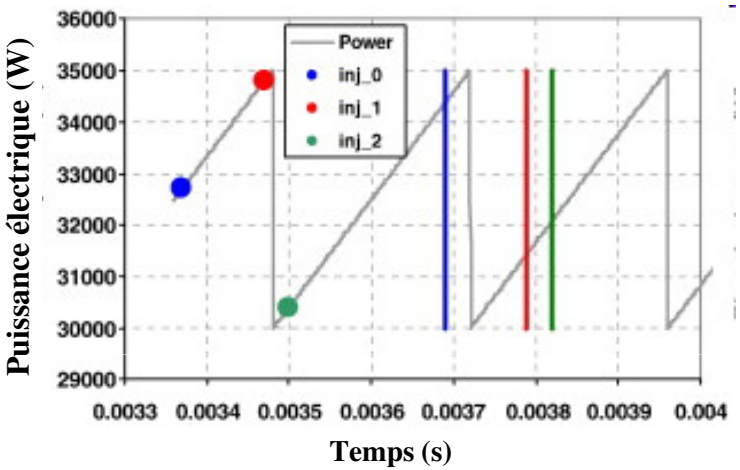
effets de la vitesse d'injection

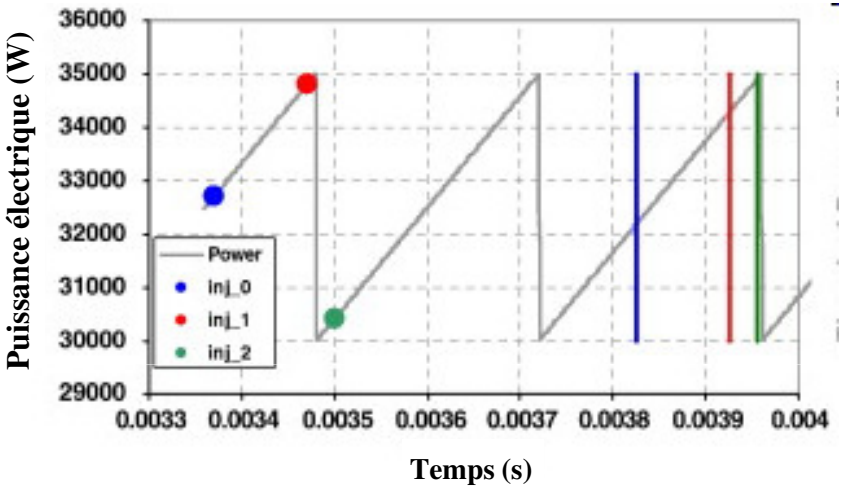
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions





- ZrO2 de diamètre moyen 30 µm - 60 µm
- Distance de mesure 120 mm
- Ar /H2 : 45 / 15 Nl.min-1
- intensité : 500 A
- diamètre d'injecteur : 1,6 mm
- débit de gaz porteur : 5 Nl.min^{-1}
- distance d'injection : 9 mm

J. of Surface and Coatings Technology, 202, 18, 2008, p. 4465-4469

LERMPS

caractéristiques en vol des particules

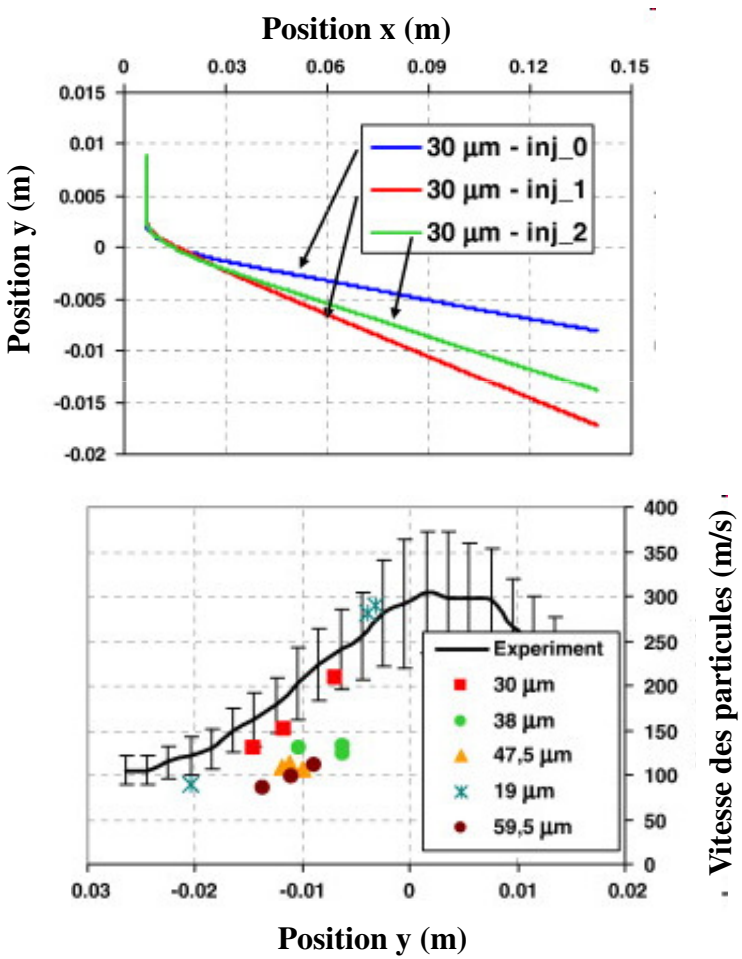
Effet de la vitesse d'injection sur la trajectoire des particules

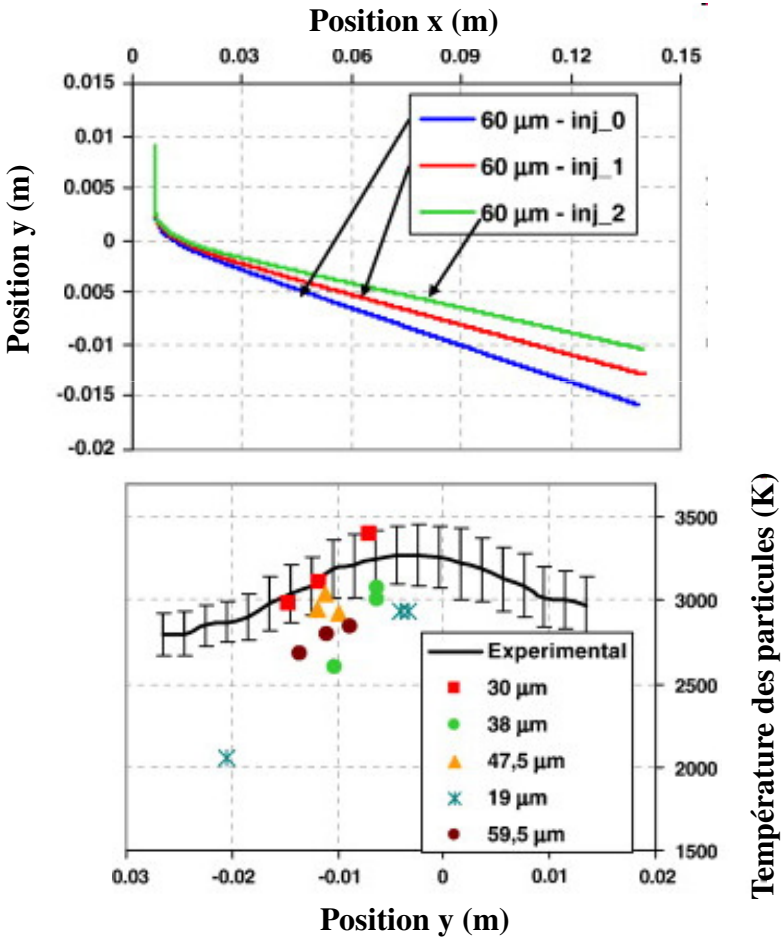
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions





J. of Surface and Coatings Technology, 202, 18, 2008, p. 4465-4469

caractéristiques en vol des particules

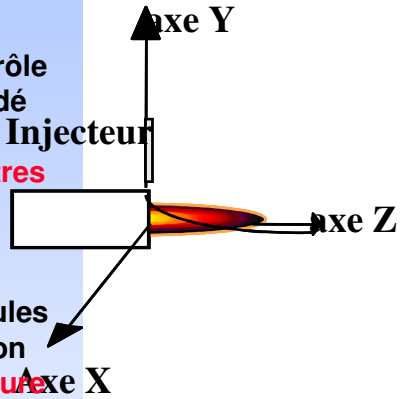
effets de la distance axiale du point de mesure

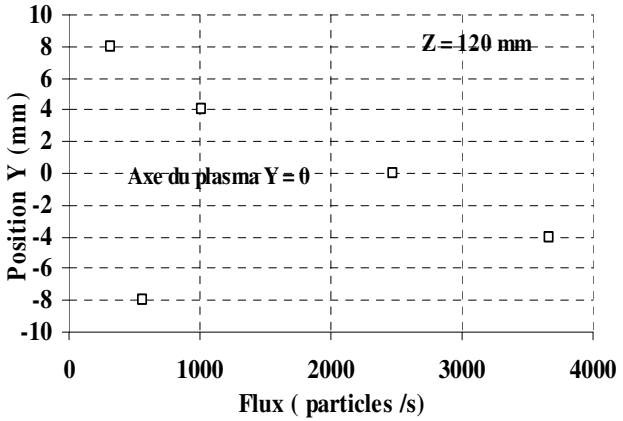
introduction

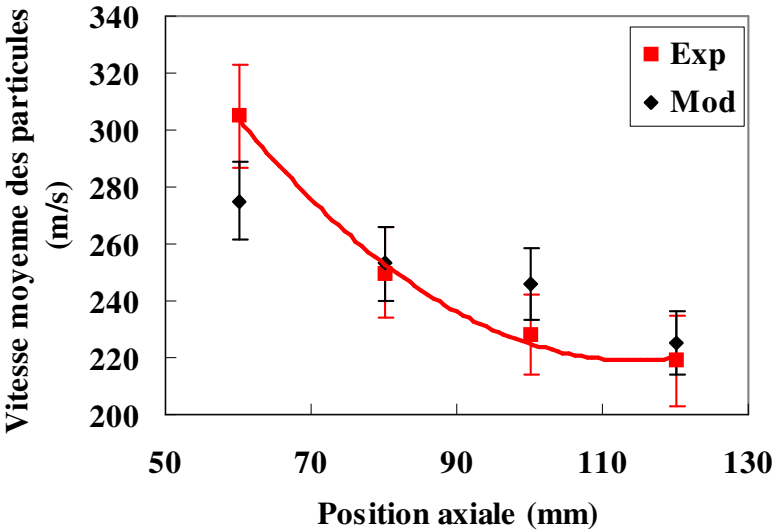
méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

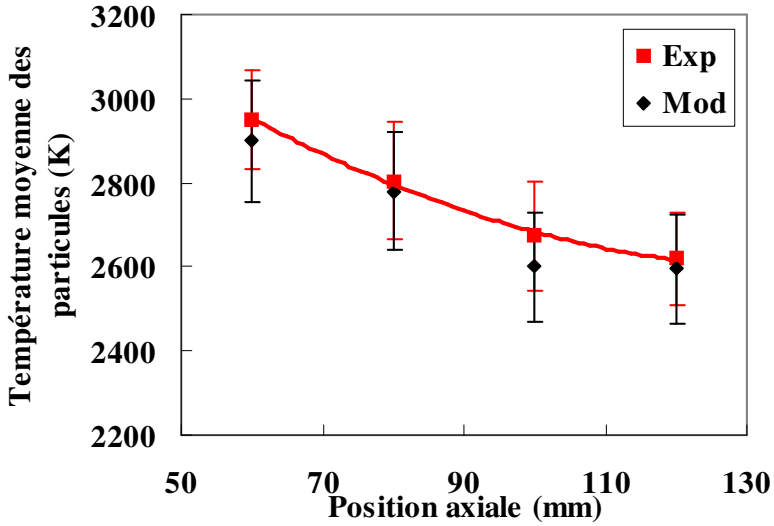
conclusions







- Al_2O_3
- +45 -90µm
- Torche F4 (6 mm de diamètre anode)
- Ar/H2 : 40/14 Nl.min^{-1}
- Intensité : 575 A
- débit de gaz porteur : 3,2 Nl.min^{-1}

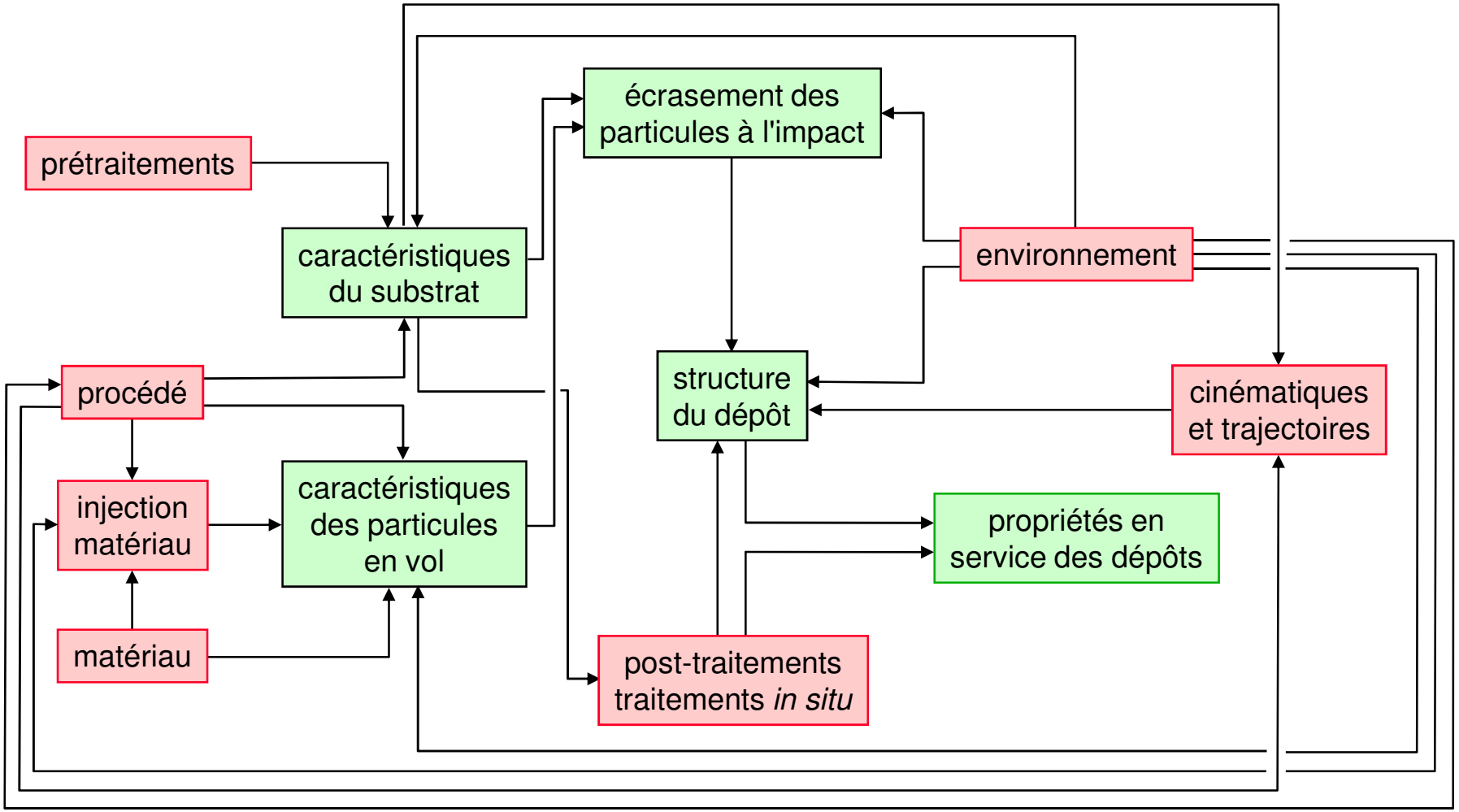


J. of Thermal Spray Technology,
12, 1, 2003, p.101-111

LERMPS

Conclusion

paramètres et interactions



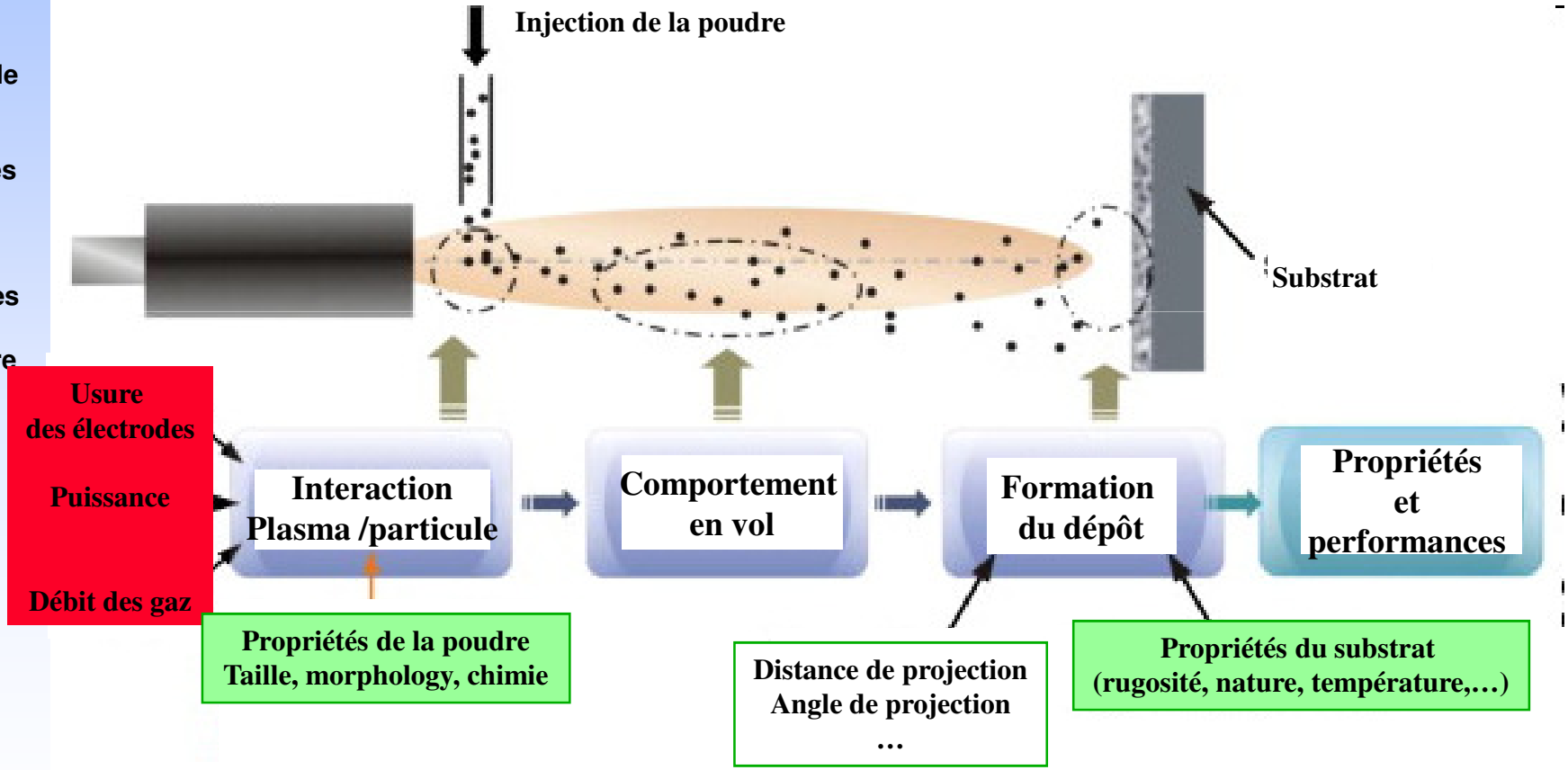
Conclusion

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖I, Ar, H2
- ❖Pression
- ❖Taille des particules
- ❖Vitesse d'injection
- ❖Distance de mesure

conclusions



LERMPS

Conclusion

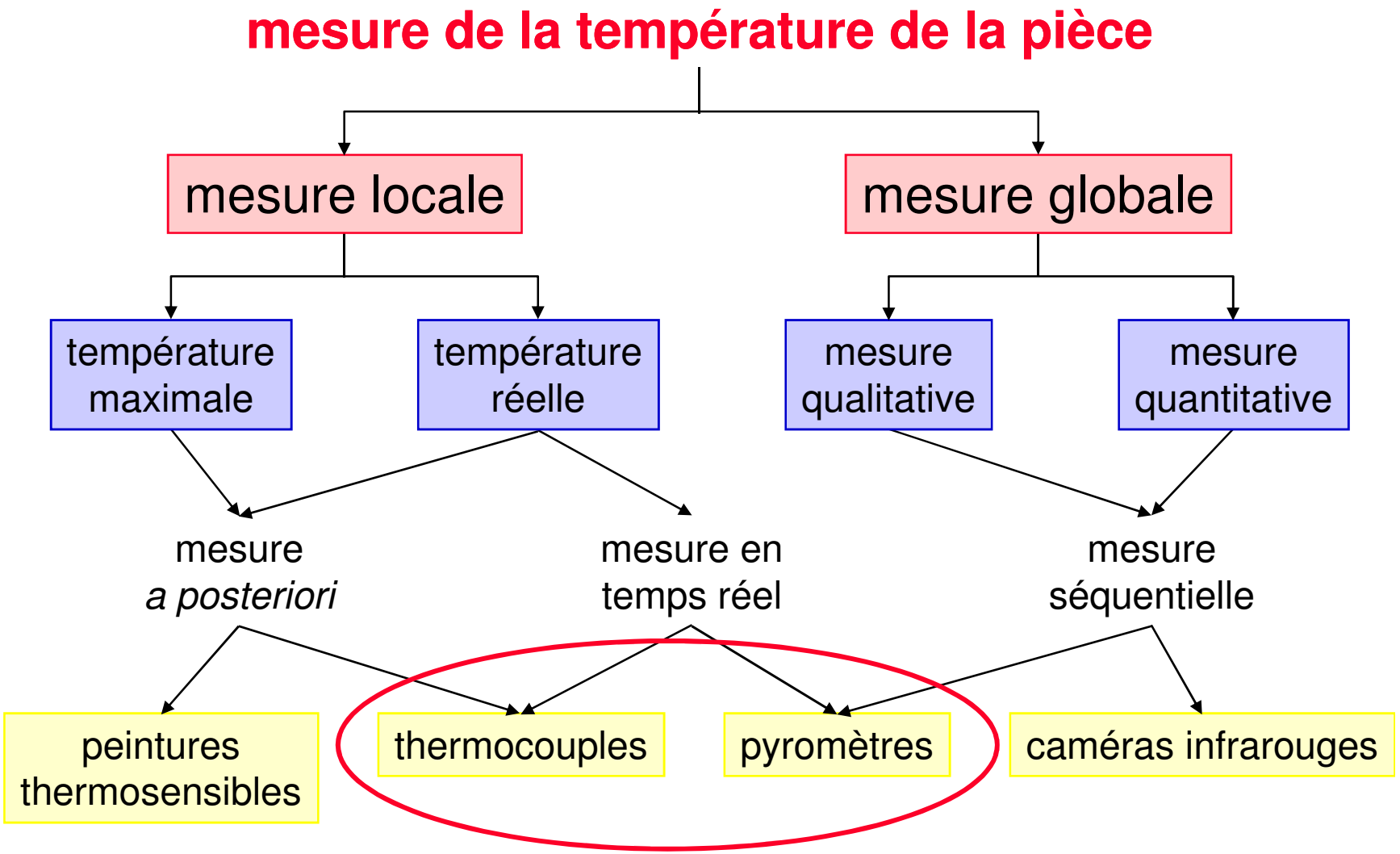
contrôle de la température de la pièce

introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- ❖**I, Ar, H2**
- ❖**Pression**
- ❖**Taille des particules**
- ❖**Vitesse d'injection**
- ❖**Distance de mesure**

conclusions



LERMPS

Conclusion

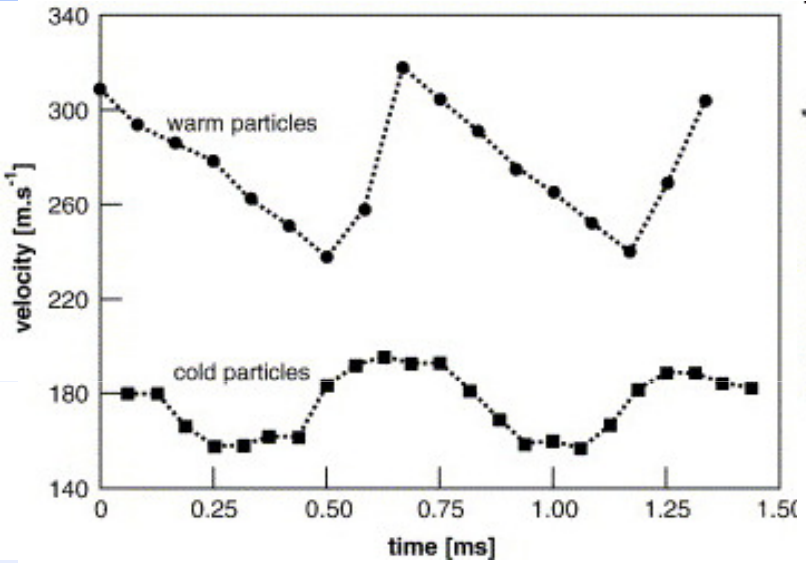
incidence des fluctuations de tension

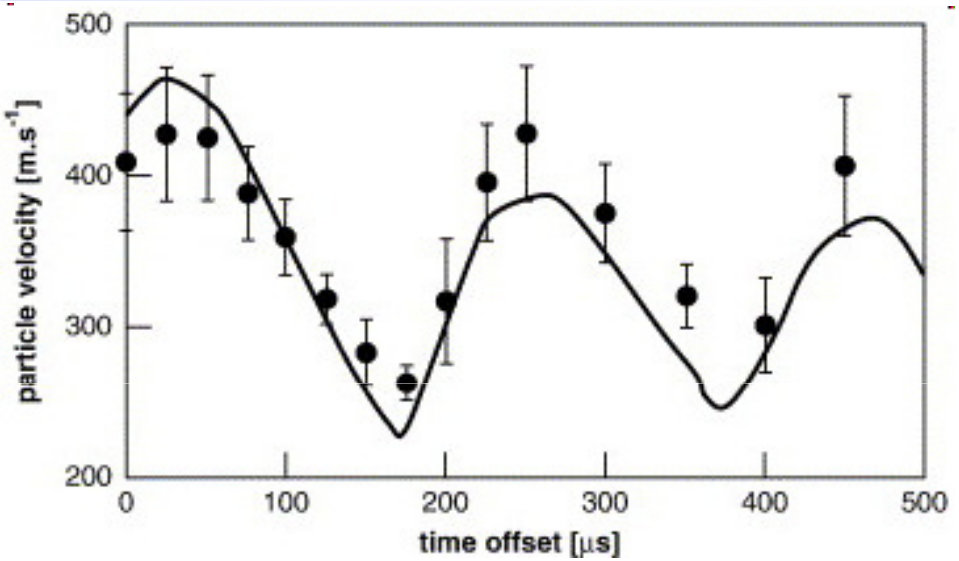
introduction

méthodes de contrôle en ligne du procédé

effets des paramètres opératoires
- I, Ar, H2
- Pression
- Taille des particules
- Vitesse d'injection
- Distance de mesure

conclusions





LERMPS