

Réparation d'Aubage en Superalliage base Ni par LMD

Développement de technologies de rechargement par projection laser
pour la réparation de composants de turbines aéronautiques de
nouvelles générations

04 Mars 2016

Romain **ALLUSSE** +33 (0)1 60 76 30 14 romain.allusse@mines-paristech.fr

Tuteur industriel

Hervé **MOLET** +33 (0)5 49 20 25 85 herve.molet@sncma.fr
Mathilde **OLIVIER** +33 (0)5 49 20 23 47 mathilde.olivier@sncma.fr

Tuteur de stage

Christophe **COLIN** +33 (0)1 60 76 30 18 christophe.colin@mines-paristech.fr
Thibaut **GELPI** +33 (0)1 60 76 30 28 thibaut.gelpi@mines-paristech.fr
thibaut.gelpi@sncma.fr

PLAN DE LA PRESENTATION

1. CONTEXTE INDUSTRIEL

1. Turboréacteur
2. Besoin de réparation
3. Objectifs

2. MATERIAU

1. AM1
2. Solidification dirigée

3. PROCEDE

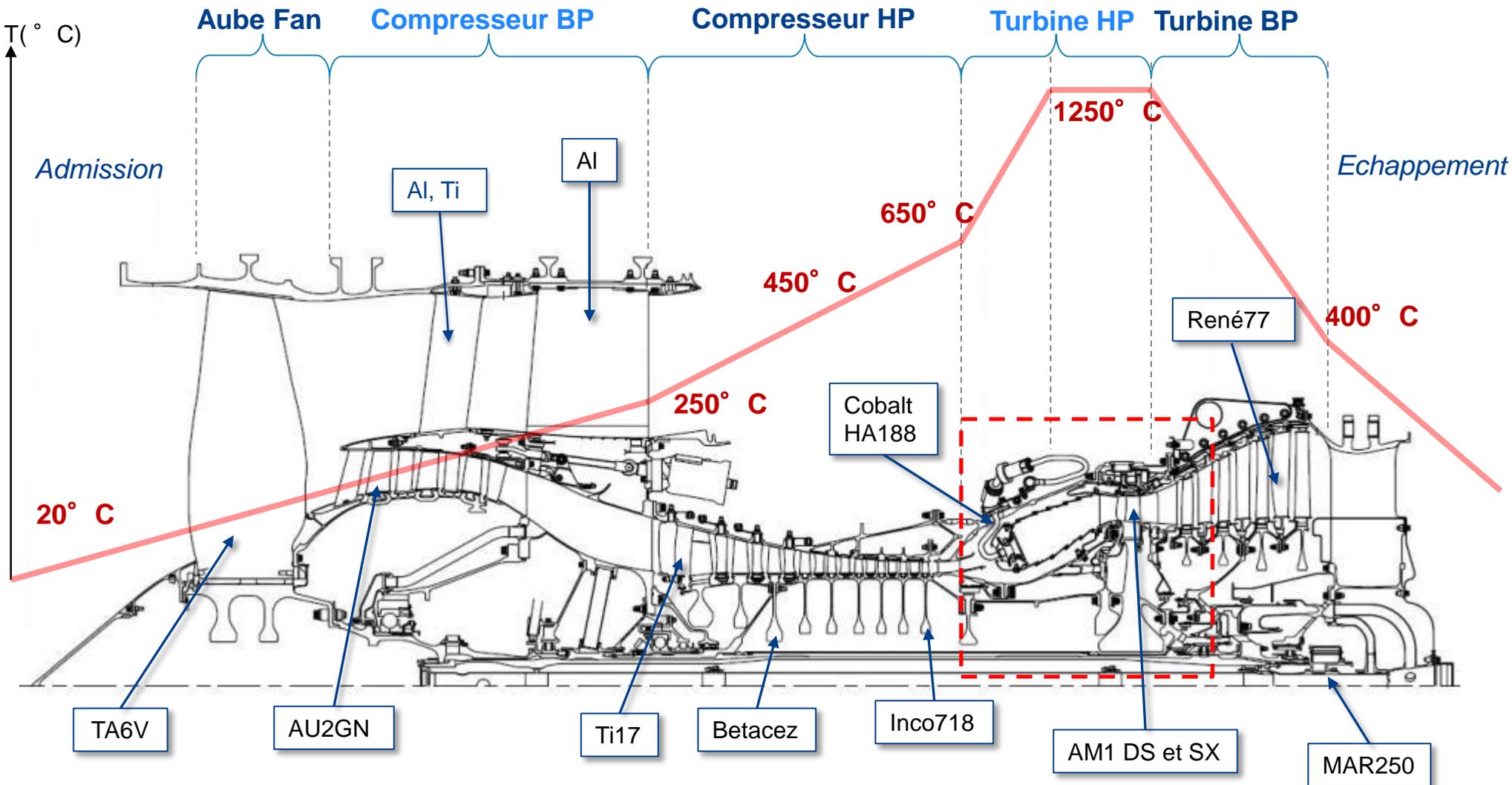
1. Présentation du procédé *Laser Metal Deposition*
2. Influence des paramètres procédés – microstructure

4. PRE-ETUDE

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

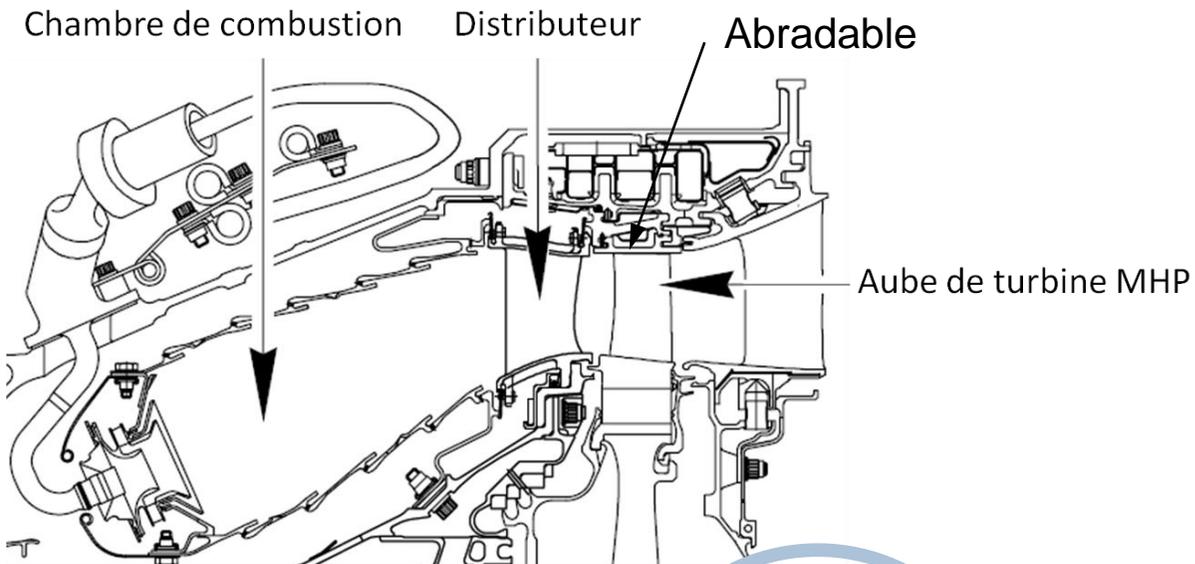
1. CONTEXTE INDUSTRIEL

Turboréacteur

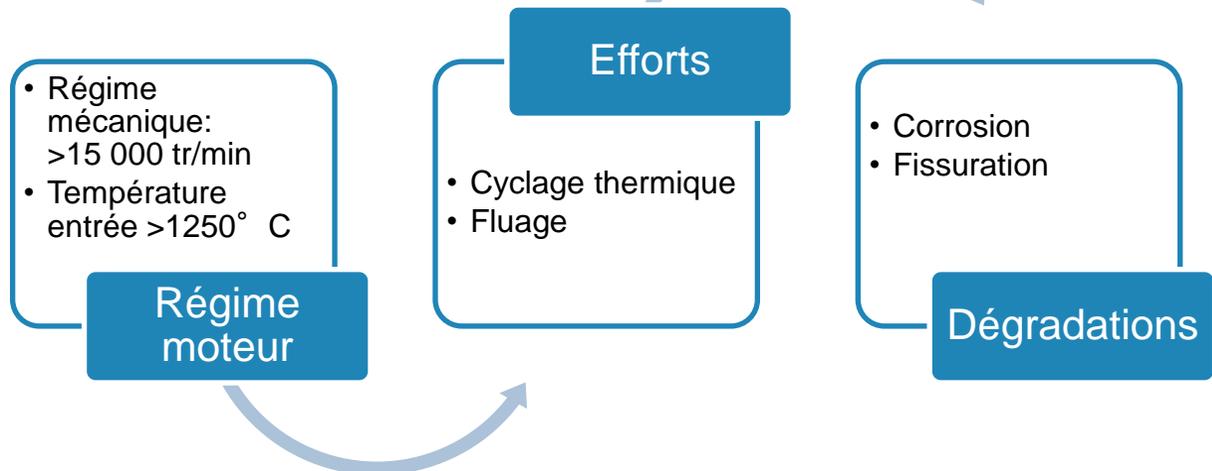


1. CONTEXTE INDUSTRIEL

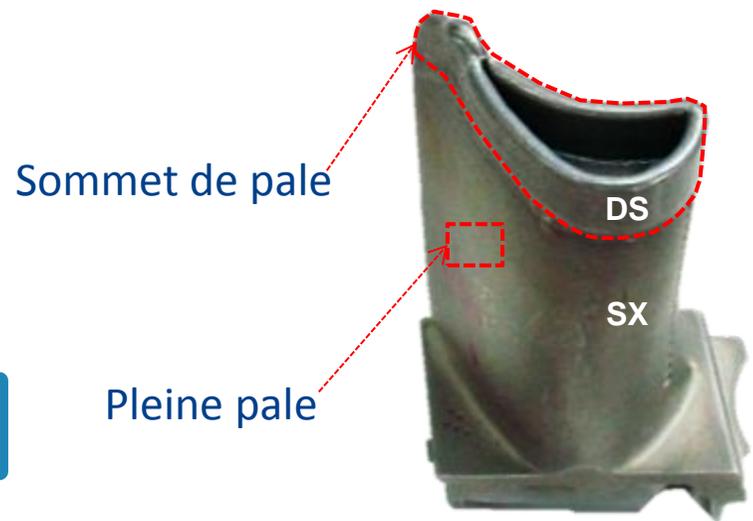
Besoin de réparation



- Usure en sommet de pale
- Jeu avec l'abradable
- Perte de poussée



Mobile HP
AM1 monocristallin



→ Expliciter les relations entre paramètres procédés et qualité métallurgique du rechargement AM1

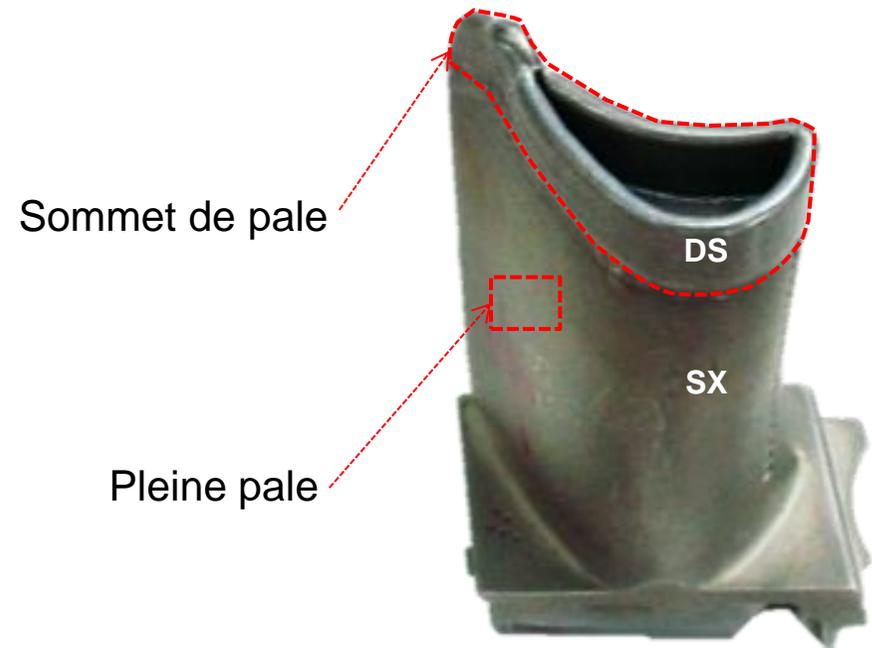
Applications :

- Rechargement orienté du sommet de pale

Objectifs:

- Piloter la géométrie du rechargement
- Piloter la microstructure
 - Conditions de croissance orientée
 - Optimisation par traitements thermiques
- Définir la stratégie de construction
 - Optimisation sur une trajectoire type
 - Influence des accidents de géométrie sur l'orientation cristalline

Mobile HP
AM1 monocristallin

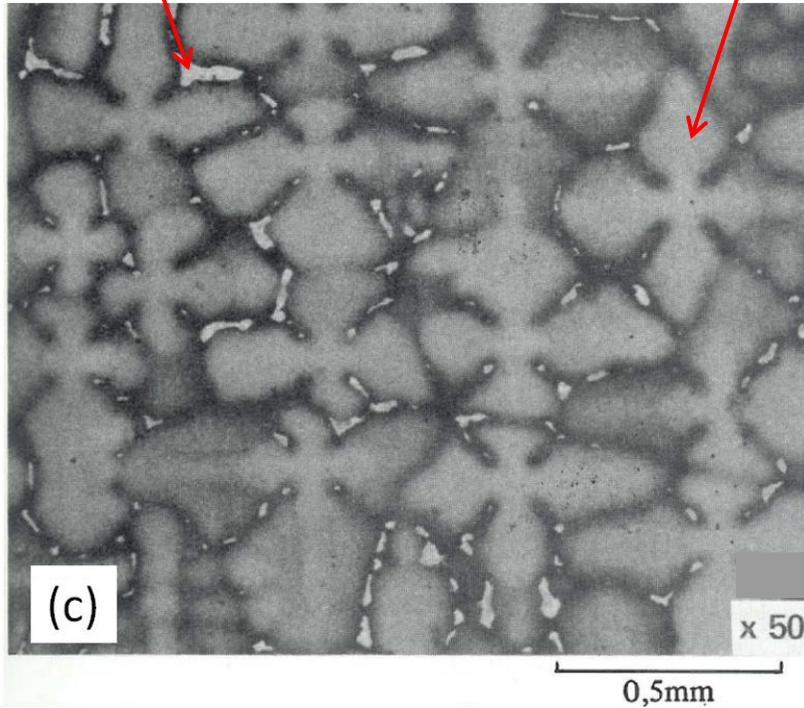


→ Microstructure

Liquide inter-dendritique

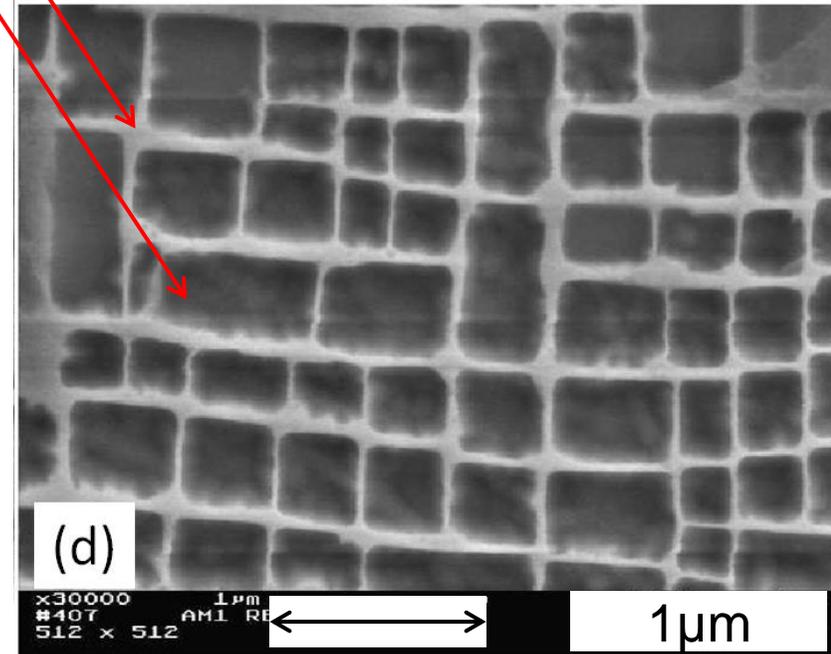
Dendrite

Brute de coulée



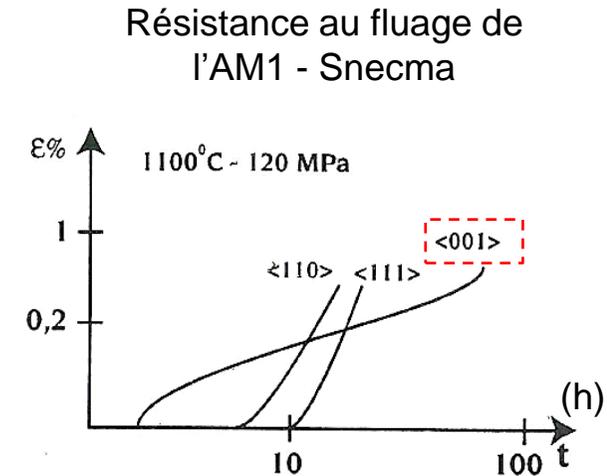
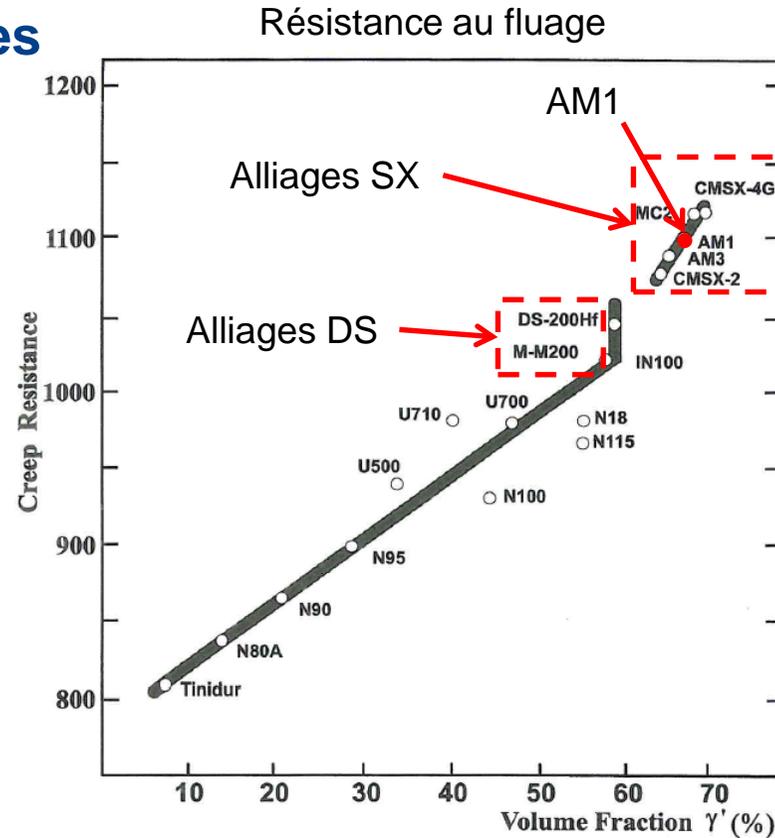
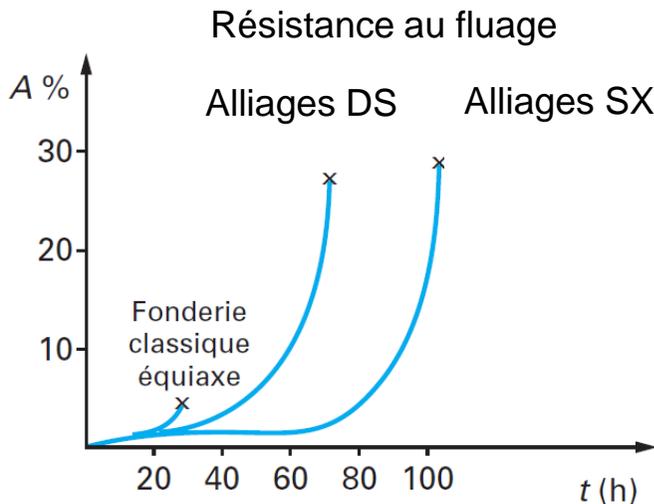
γ' γ

Traité thermiquement



Homogénéisation: 1300°C - 3h + Revenu: 1100°C - 5h + Revenu: 870°C - 16h)

→ Propriétés mécaniques



Fonderie de précision à modèle perdu - Application aux super-alliages JC.DORIATH S PRIGNET 2007 (TI)



The microstructure of superalloys - M DURAND CHARRE 1997

→ Morphologies de solidification

Gradient thermique $G = \frac{dT}{dx}$

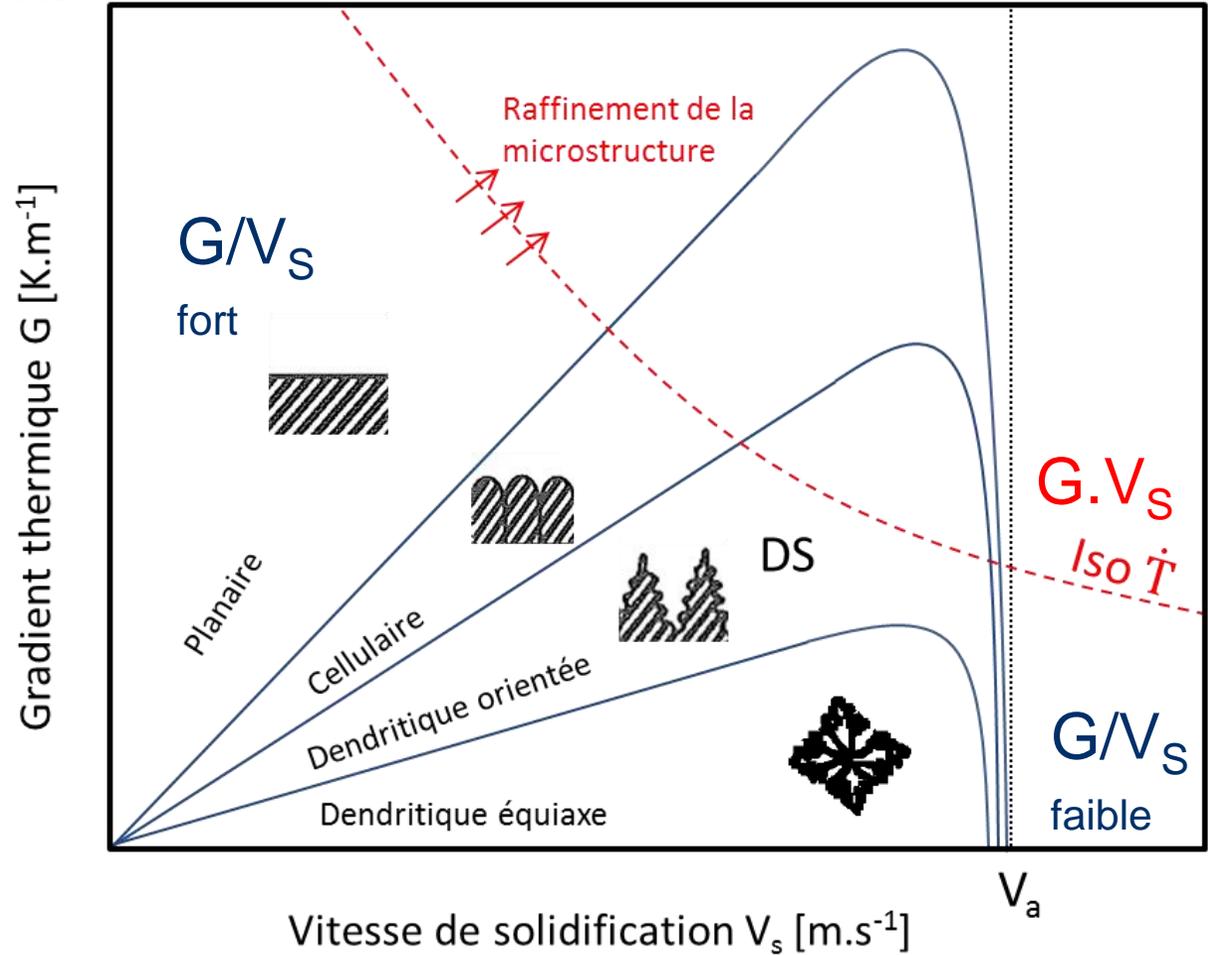
Vitesse de solidification $V_s = \frac{dx}{dt}$

Vitesse de refroidissement $\dot{T} = \frac{dT}{dt}$

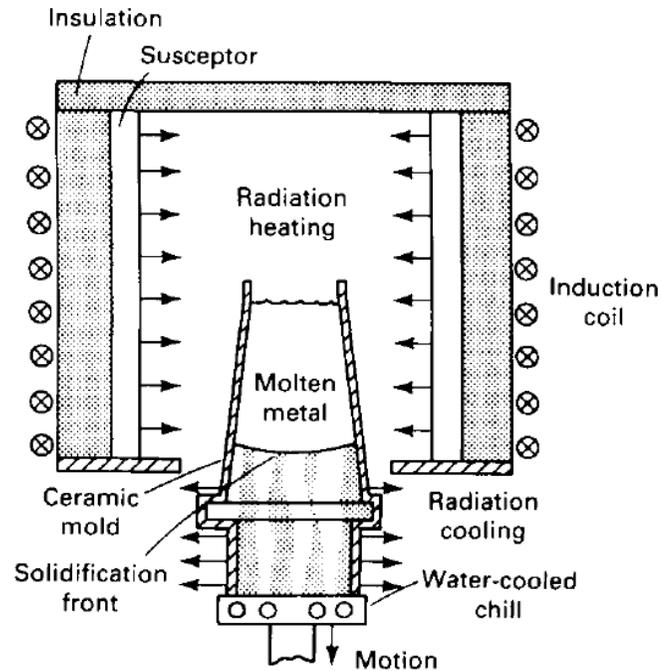
$G \cdot V_s = \dot{T}$

$G/V_s \rightarrow$ type de solidification

$G \cdot V_s \rightarrow$ taille de la microstructure

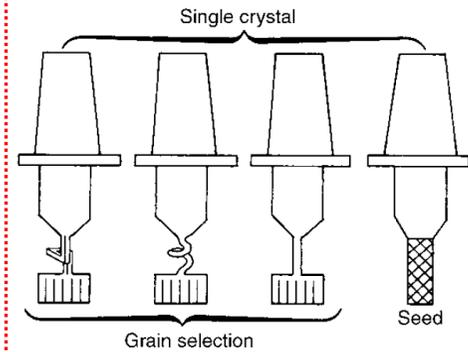
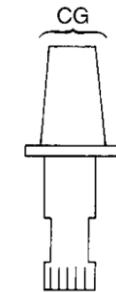
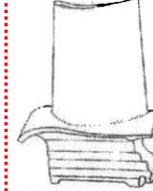
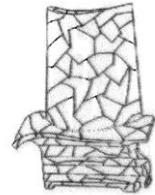


→ Solidification dendritique



$$G = 1000 - 6000 \text{ K/m}$$

$$V_S = 5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$



Superalloys a technical guide DONACHIE 2002

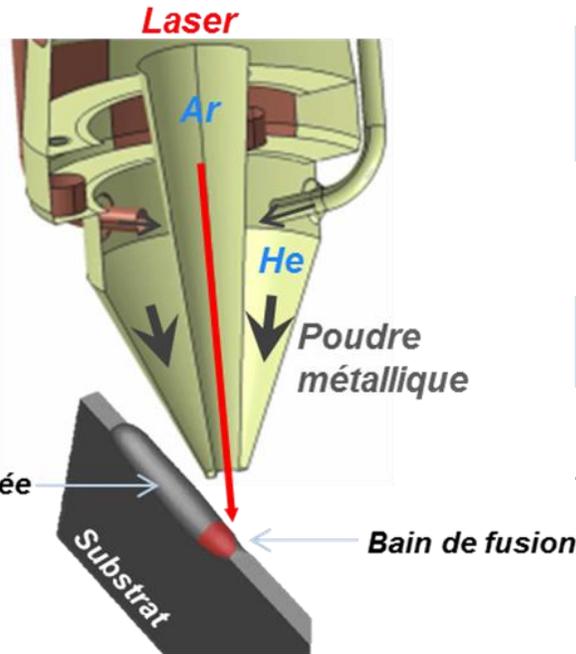
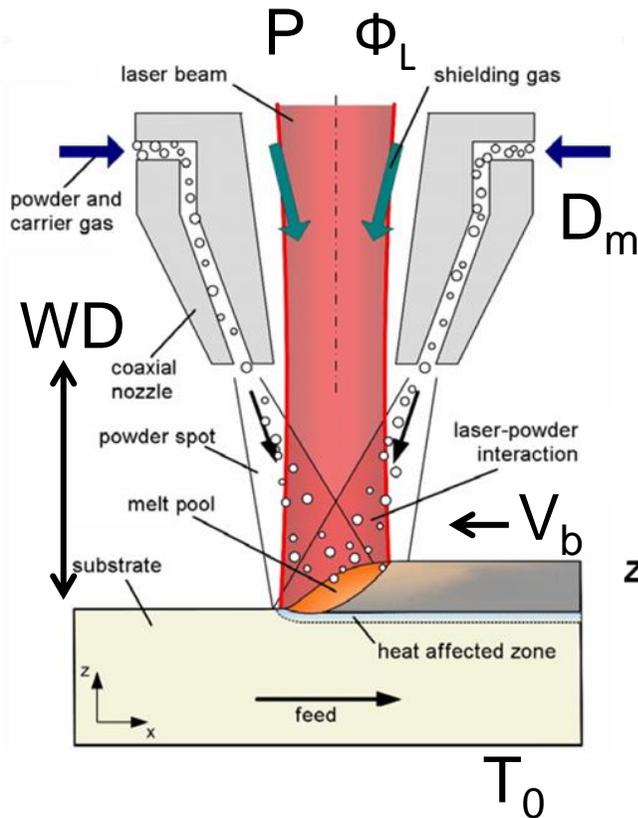


The microstructure of superalloys - M DURAND CHARRE 1997

3. PROCÉDE

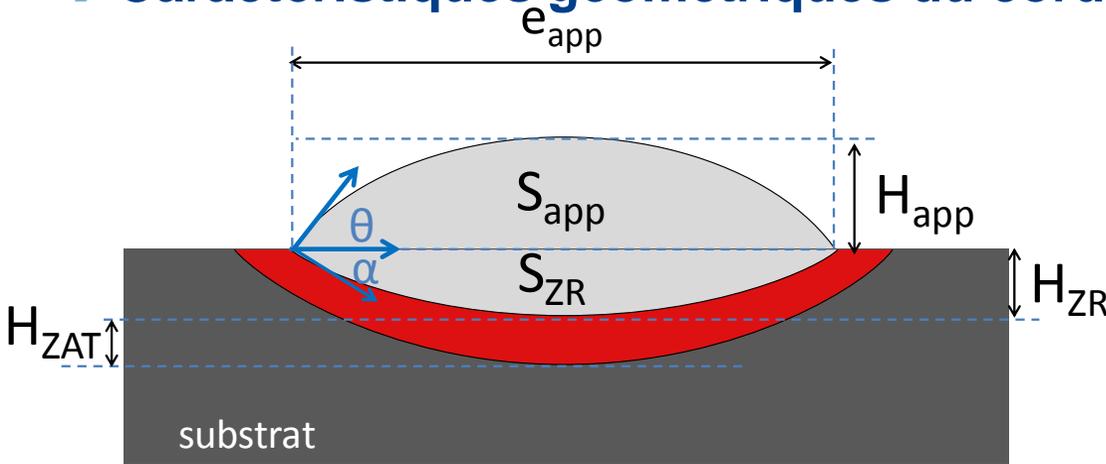
Présentation du Procédé Laser Metal Deposition

→ Paramètres du procédé



Paramètres	Ordres de grandeur
Puissance du laser (P)	100 – 5000W
Vitesse de déplacement de la buse (V_b)	50 – 3000mm/min
Débit massique de poudre projetée (D_m)	0.2 – 20g/min
Diamètre du faisceau laser (Φ_L = D_b):	0.5 – 2mm
Distance de travail (WD):	3-10mm
Température du substrat (T₀)	200-1000° C

→ Caractéristiques géométriques du cordon de rechargement



$$r_{e-cordon} = \frac{H_{app}}{e_{app}}$$

$$r_{e-bain} = \frac{H_{app} + H_{ZR}}{e_{app}}$$

$$Dil_h = \frac{H_{ZR}}{H_{app} + H_{ZR}}$$

α

Stabilité du cordon
 Forme du front de solidification
 Reprise d'orientation

Caractéristiques géométriques

e_{app} : épaisseur apparente du cordon

H_{app} : hauteur apparente du cordon

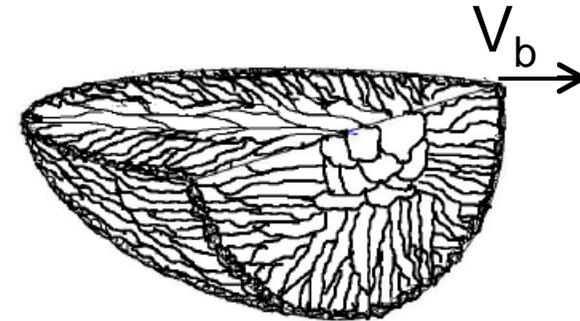
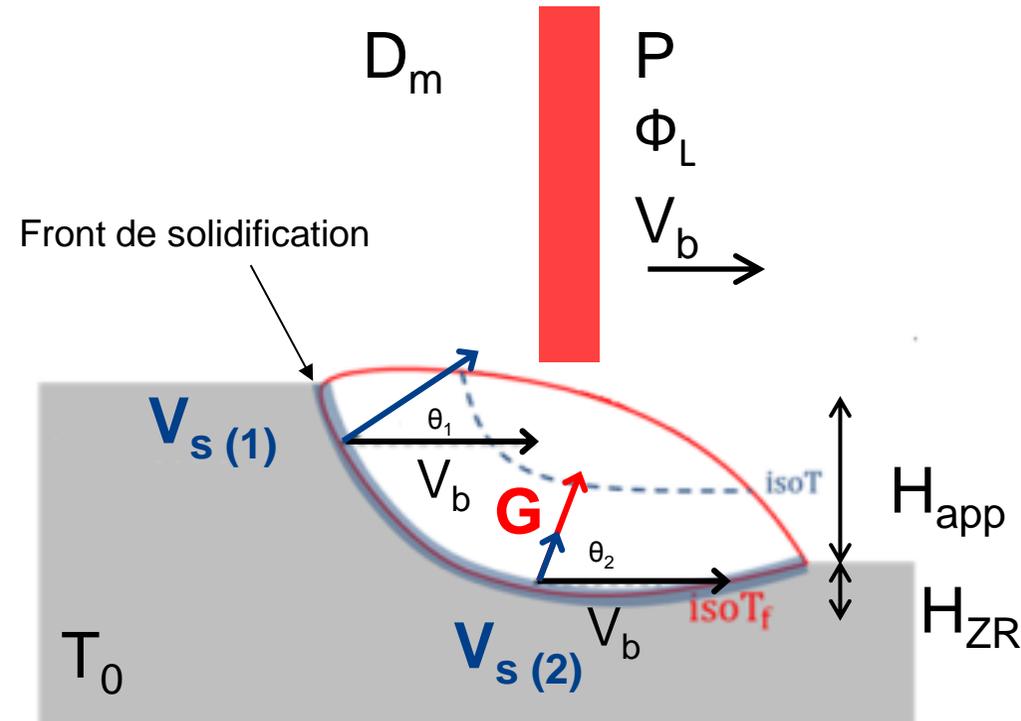
H_{ZR} : hauteur de la zone refondue

H_{ZAT} : hauteur de la zone affectée thermiquement

θ : angle entre la surface du substrat et la tangente au cordon

α : angle entre la surface du substrat et la tangente à la zone refondue

→ Caractéristiques géométriques du cordon de rechargement



Croissance des dendrites perpendiculairement aux courbes isothermes

V_s vitesse de solidification

$$V_s = V_b \cos\theta$$

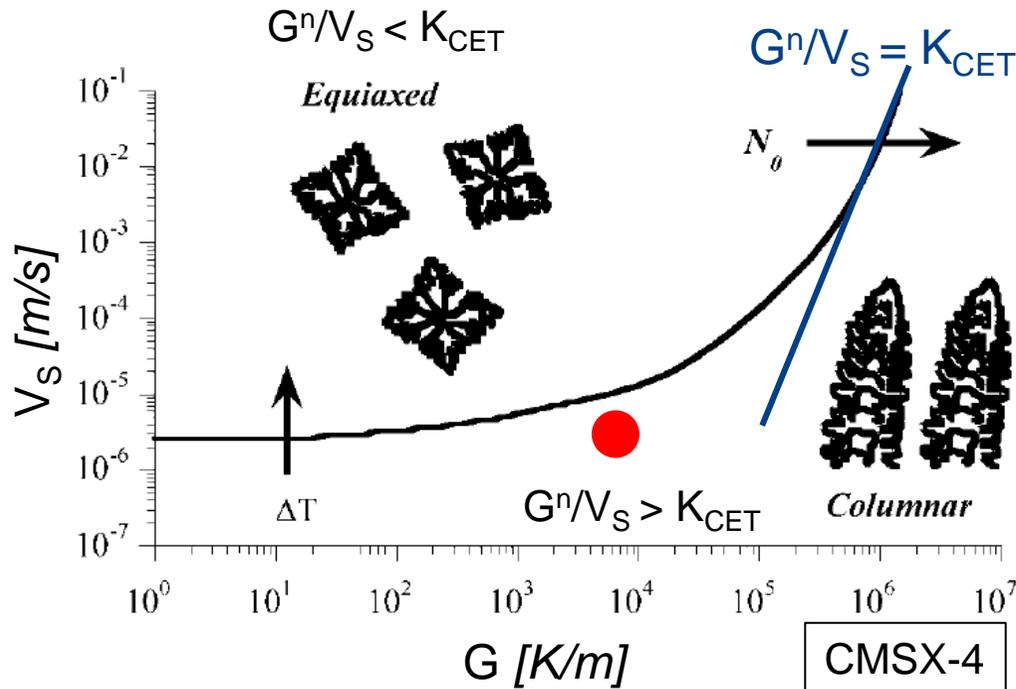
- Gradient et Vitesse : grandeurs vectorielles
- Solidification pilotée par le gradient et la vitesse de solidification locale
- Mesure du gradient impossible sur l'ensemble de l'isotherme de fusion

3. PROCEDE

Influence des paramètres procédés – microstructure

→ Refusion

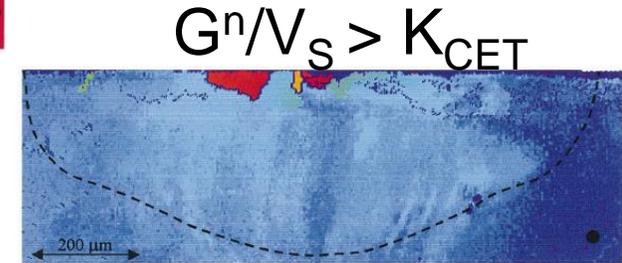
Columnar to Equiaxed Transition



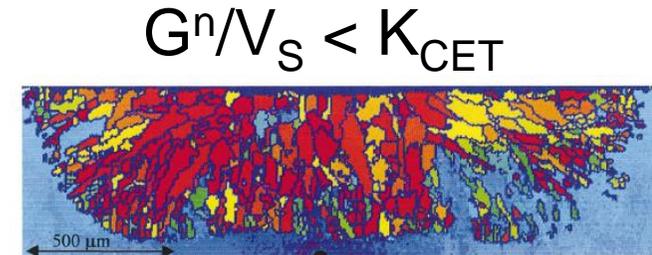
● ≈ Solidification dirigée en coulée



Epitaxiale
colonnaire



Equiaxe



$$\frac{G^n}{V_S} > K_{CET} = a \left\{ \sqrt[3]{\frac{-4\pi N_0}{3\ln(1 - \Phi_C)} \frac{1}{n + 1}} \right\}^n$$

N_0 densité initiale de germes

Φ_C fraction surfacique de grains équiaxes



Single-crystal laser deposition of superalloys: processing–microstructure maps GÄUMANN - KURZ et al 2001

3. PROCEDE

Influence des paramètres procédés – microstructure

→ Refusion

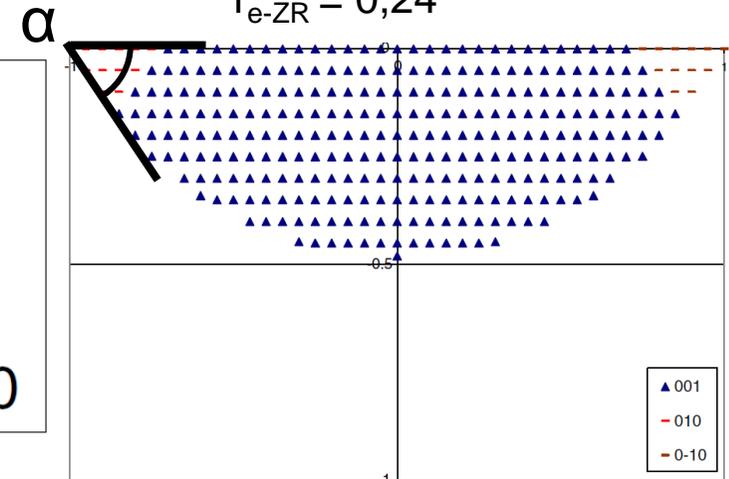
$\alpha = 90^\circ$
 $r_{e-ZR} = 0,5$

Liu & Dupont 2004

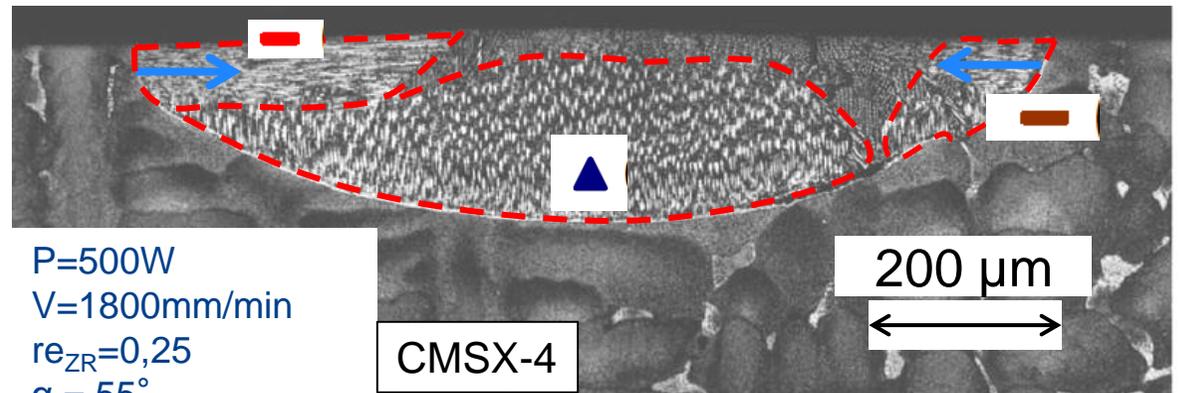
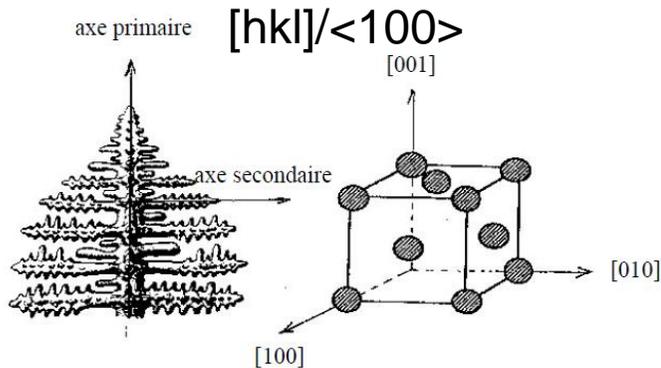
$$r_{e-ZR} = \frac{H_{ZR}}{e_{app}}$$

- 001
- 100
- 010
- 0-10

$\alpha = 55^\circ$
 $r_{e-ZR} = 0,24$



dendrite/substrat



P=500W
V=1800mm/min
 $r_{e-ZR} = 0,25$
 $\alpha = 55^\circ$

CMSX-4

200 μ m

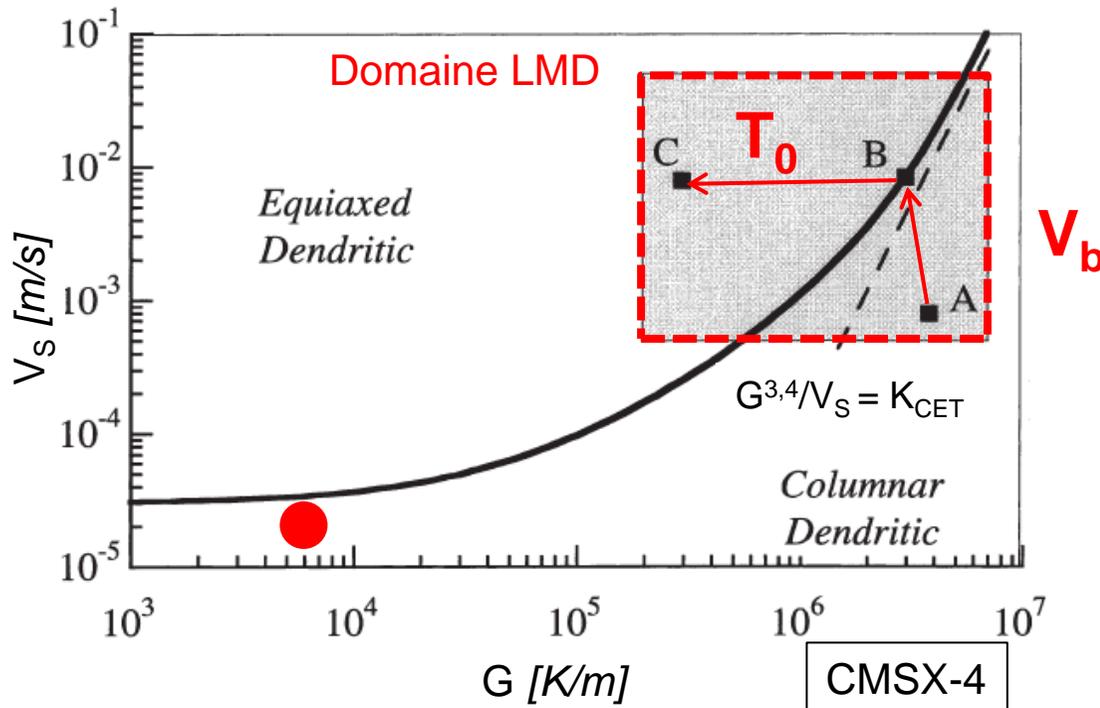
Rappaz 1989 + Liu & Qi 2005

3. PROCEDE

Influence des paramètres procédés – microstructure

→ Refusion

Echantillon	T ₀ (°C)	V _b (mm/s)	P(W)	Φ (%)
A	20	1	340	5
B	20	10	820	9
C	1000	10	820	80



● ≈ Solidification dirigée en coulée

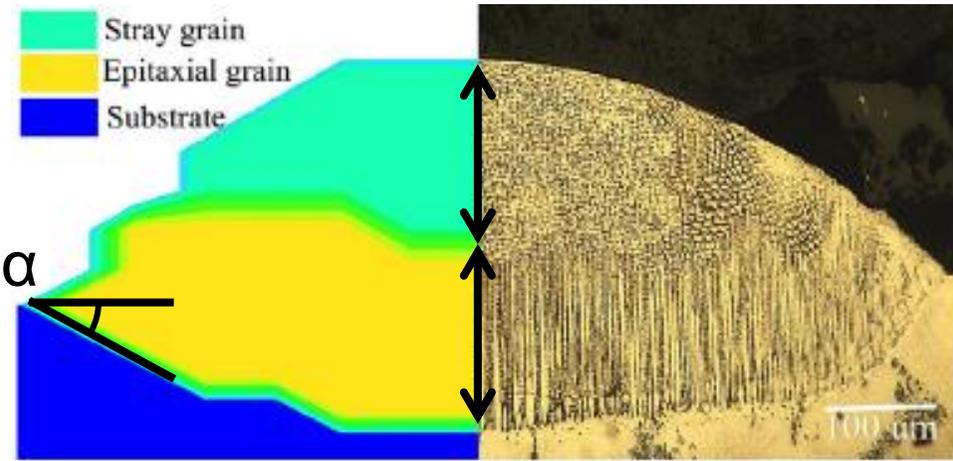


Solidification Microstructure-Processing Maps : Theory and Application – KURZ 2001

3. PROCEDE

Influence des paramètres procédés – microstructure

→ Rechargement 1D



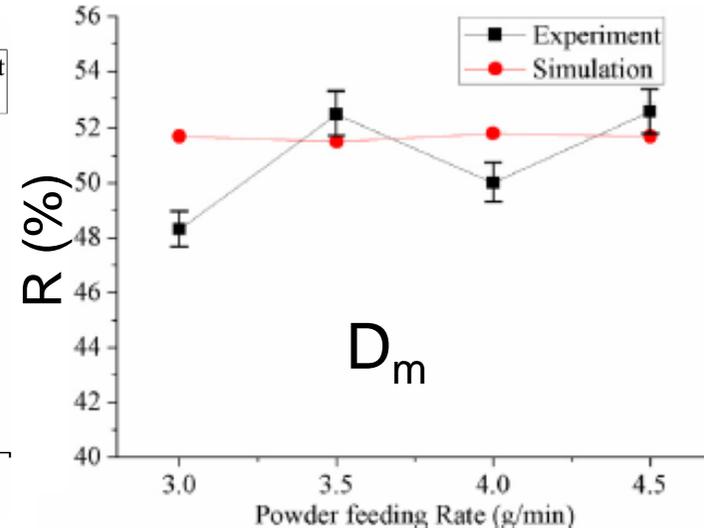
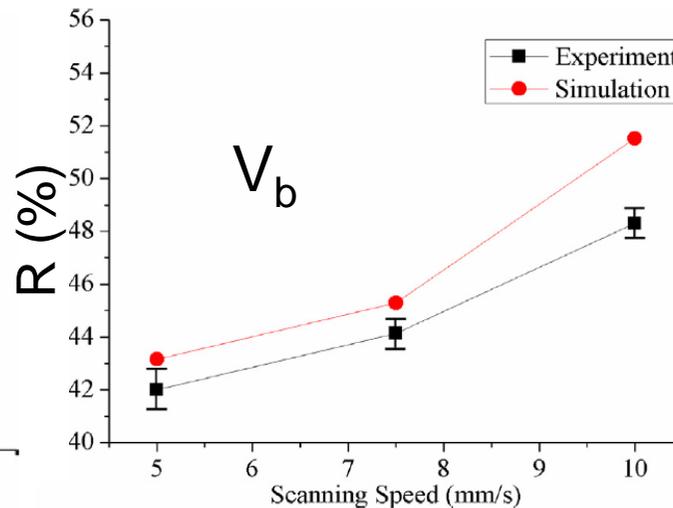
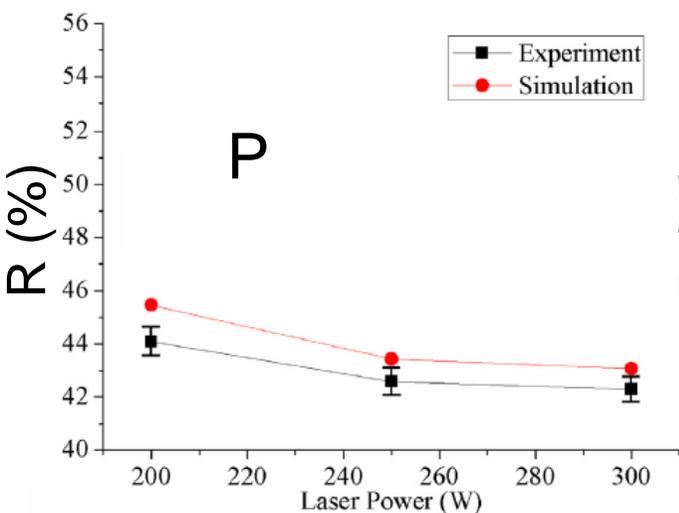
Modeling of crystal orientations in laser powder deposition of single crystal material QI - 2012

Effects of processing parameters on crystal growth [...] LIU - 2015

$H_{equiaxe}$

$H_{epitaxiale}$

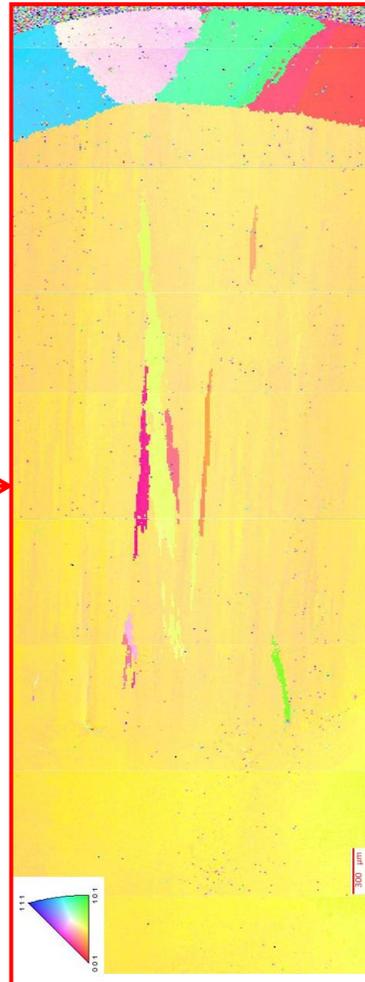
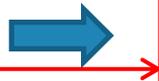
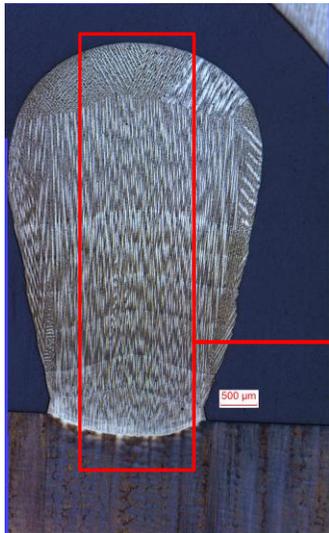
$$R = \frac{H_{colonnaire}}{H_{colonnaire} + H_{equiaxe}}$$



3. PROCEDE

Influence des paramètres procédés – microstructure

→ Rechargement 2D



$$H_{Z\text{Refondue}} > H_{Z\text{Equiaxe}}$$

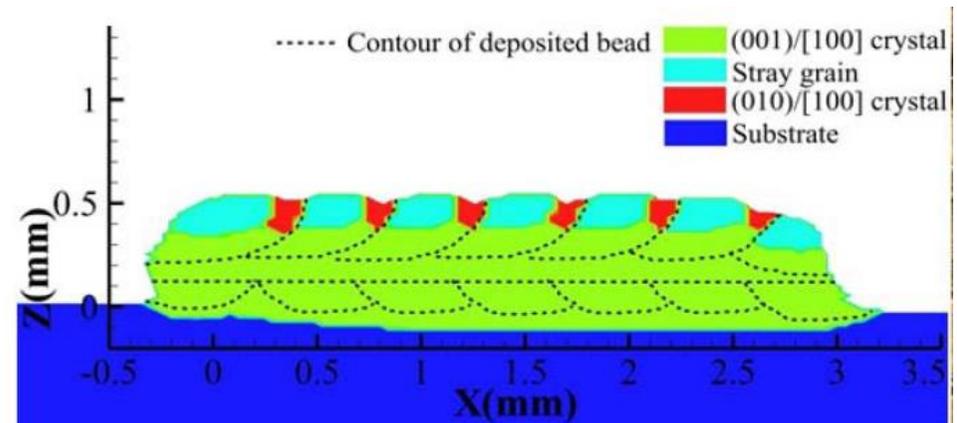
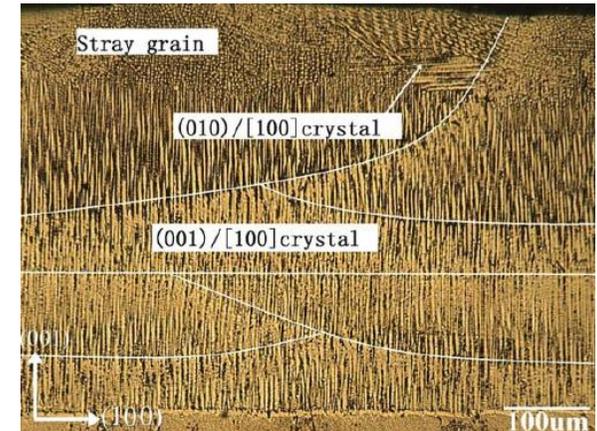
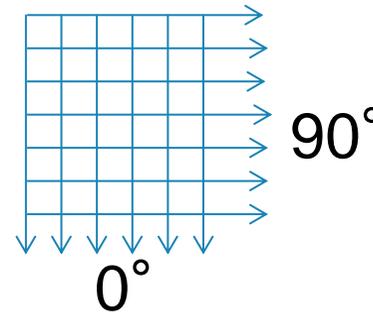
Maximiser

$$Dil_{ZC} = \frac{H_{ZC}}{H_{total}}$$

 Snecoma Châtellerault

Rechargement 3D

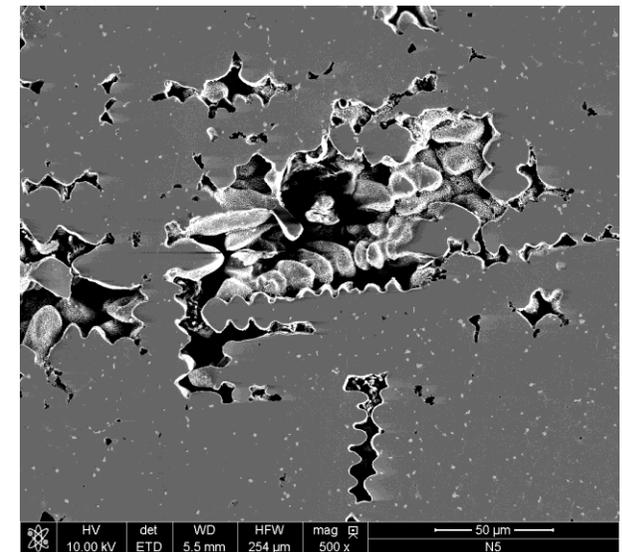
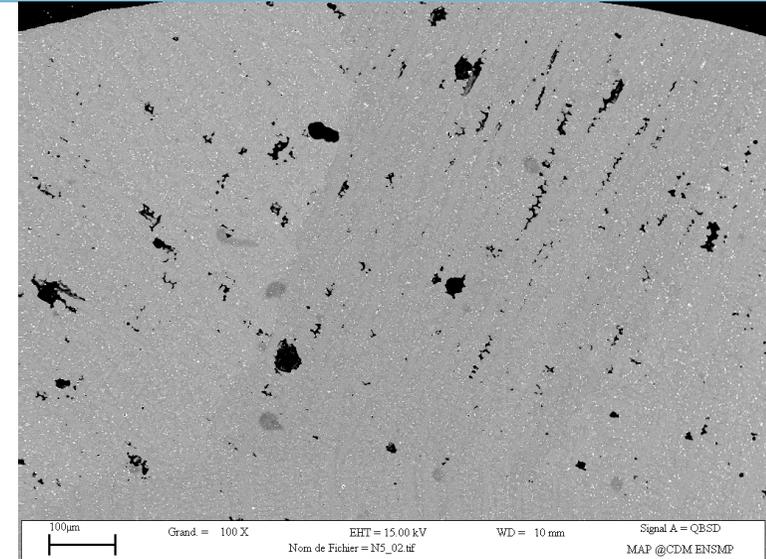
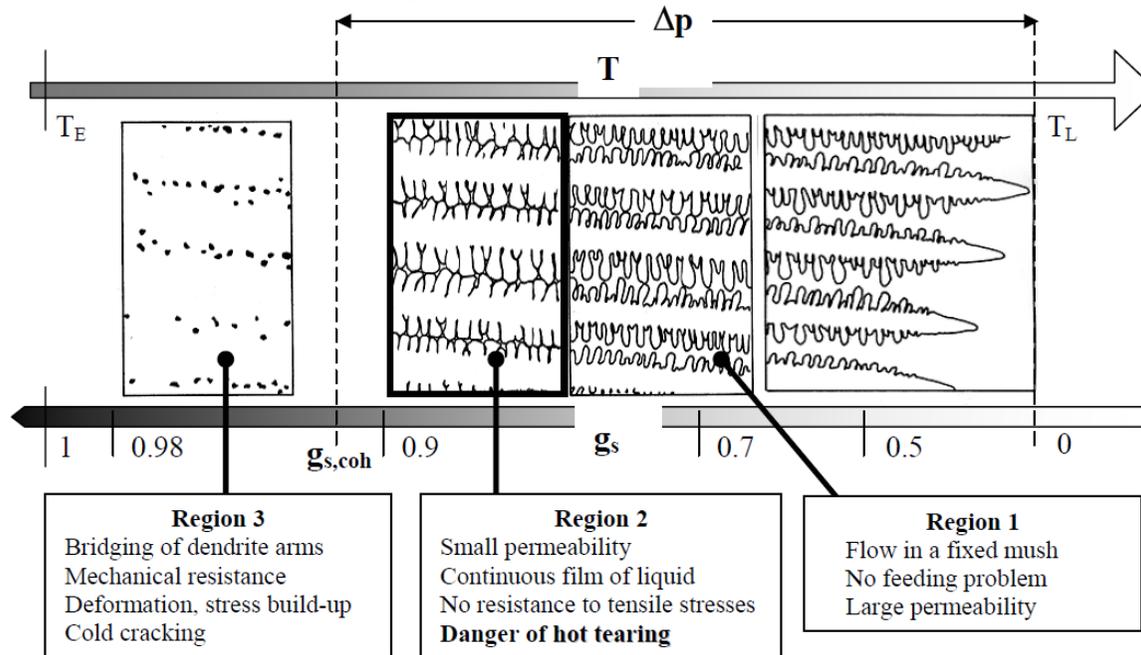
Influence de la stratégie de balayage



3. PROCEDE

Influence des paramètres procédés – microstructure

→ Fissuration à chaud



How does coalescence of dendrite arms or grains influence hot tearing ? RAPPAZ - 2004

Critères de fissuration à chaud:

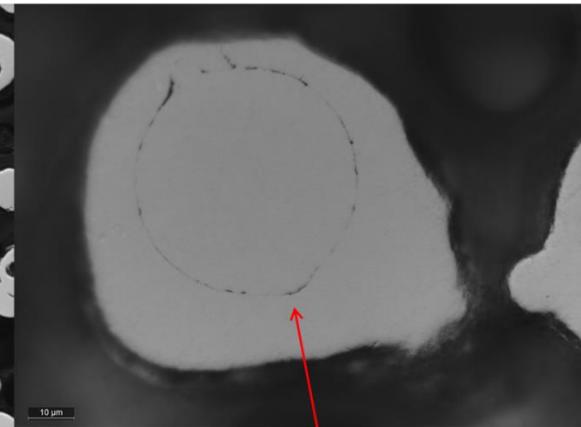
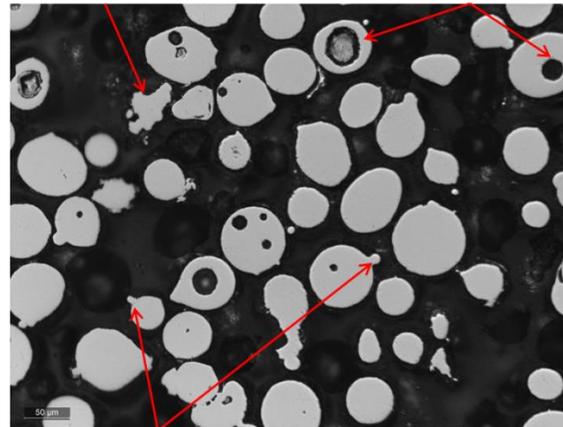
- en composition chimique
- phénoménologique
- thermodynamique

→ Analyses poudre

- Granulométrie
- Morphologie
- Chimique
- Thermique
- Aptitude à l'écoulement
- Densité
- Dureté

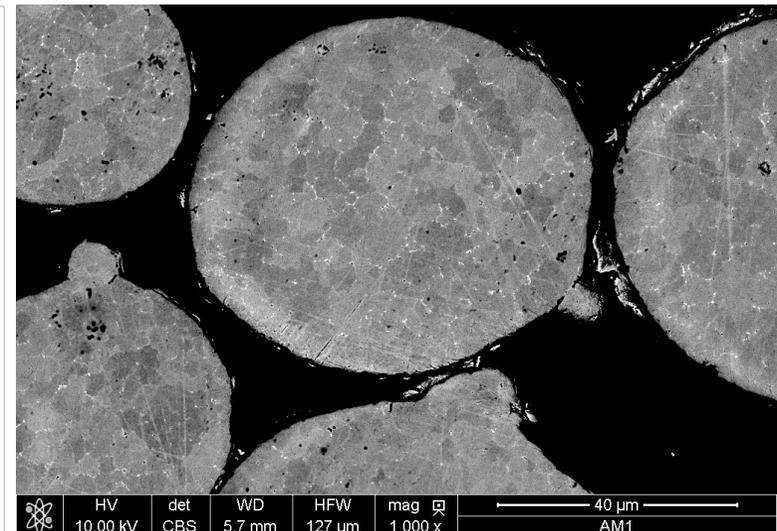
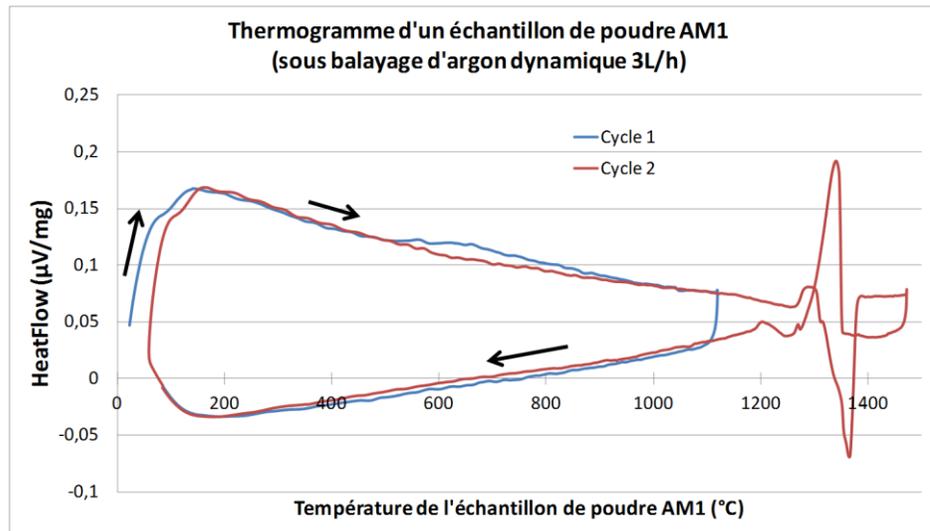
Agglomérat

Inclusions



Particules satellites

Double-peau



→ Objectif:

- Expliciter les relations entre paramètres procédés et qualité métallurgique du rechargement AM1

→ Problématiques techniques:

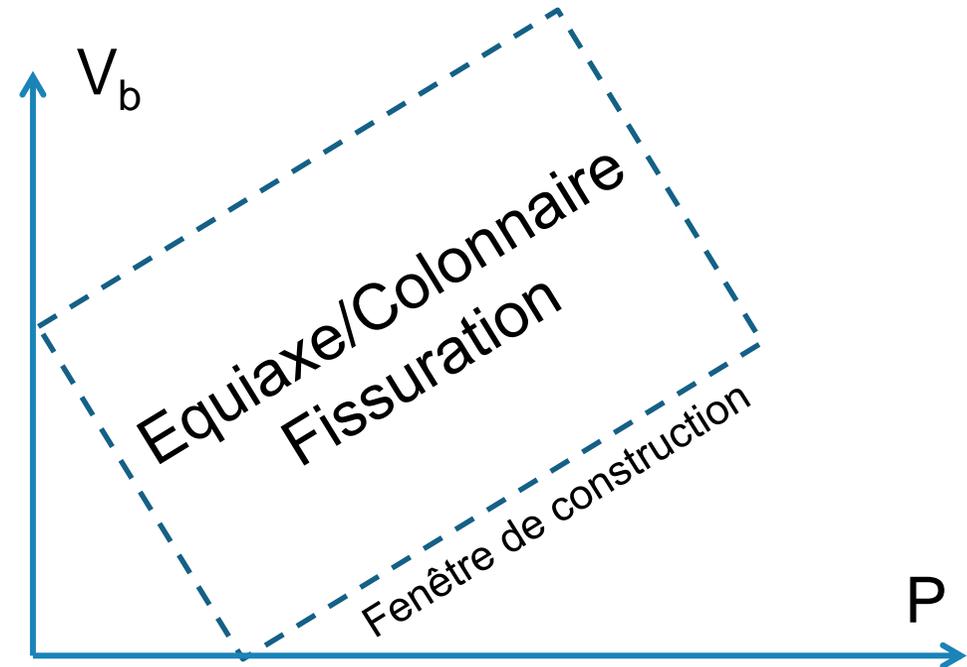
- Transition CET
- Fissuration à chaud

→ Pré-étude:

- Analyse de la poudre d'AM1

→ Etude:

- Refusion
- Rechargement 1D
- Rechargement 2D
- Rechargement éprouvette représentative



→ Fenêtre paramétrique décrivant le rechargement d'AM1 par LMD avec une microstructure colonnaire épitaxiale sans fissure et sans porosité

Merci de votre attention