JDD CETIM 2023

Caractérisation accélérée de la fatigue à très grand nombre de cycles de pièces de fabrication additive par essais d'autoéchauffement et par machine de fatigue ultrasonique

Grégoire Brot, le 17/01/23

Sommaire

1. Contexte et objectifs
2. Obtention et caractérisation des nuances
3. Essais de fatigue ultrasonique
4. Essais d’autoéchauffement
5. Conclusions et suite

Contexte

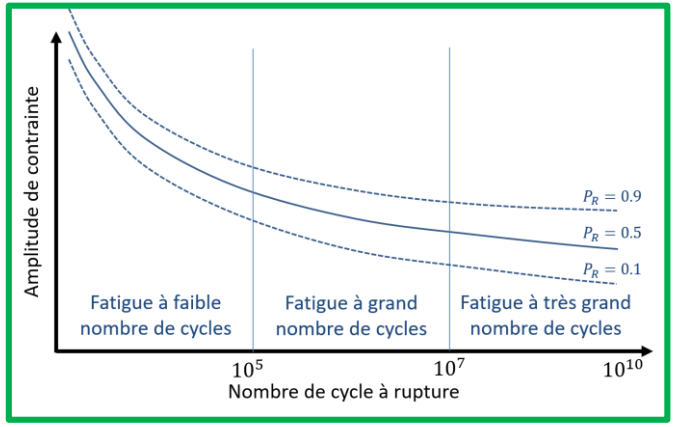
Encadrement :

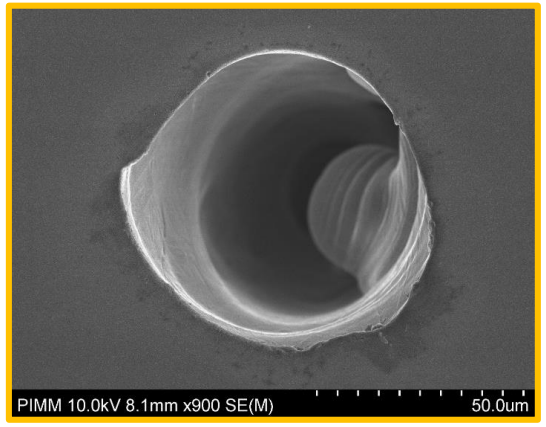
- V. Favier (PIMM)
- I. Koutiri (PIMM)
- V. Bonnand (ONERA)

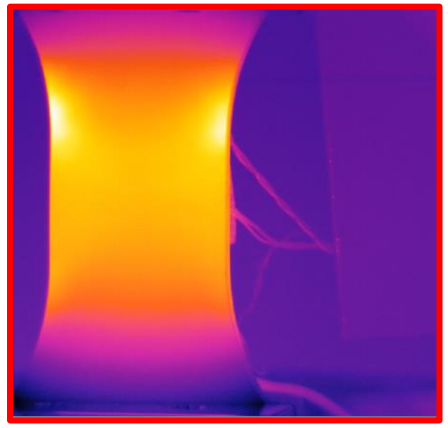
Financement : CETIM et ONERA par leur contribution à AFH

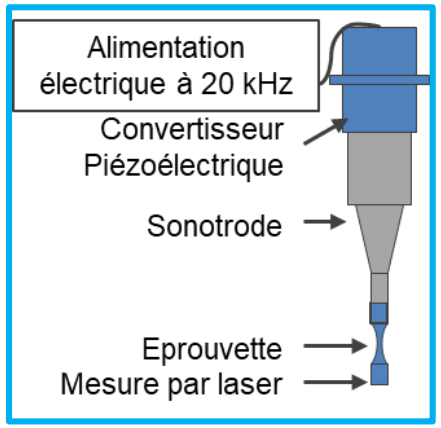
Sujet et notions clefs :

Caractérisation accélérée de la fatigue à très grand nombre de cycles de pièces de fabrication additive par essai d'autoéchauffement et par machine de fatigue ultrasonique

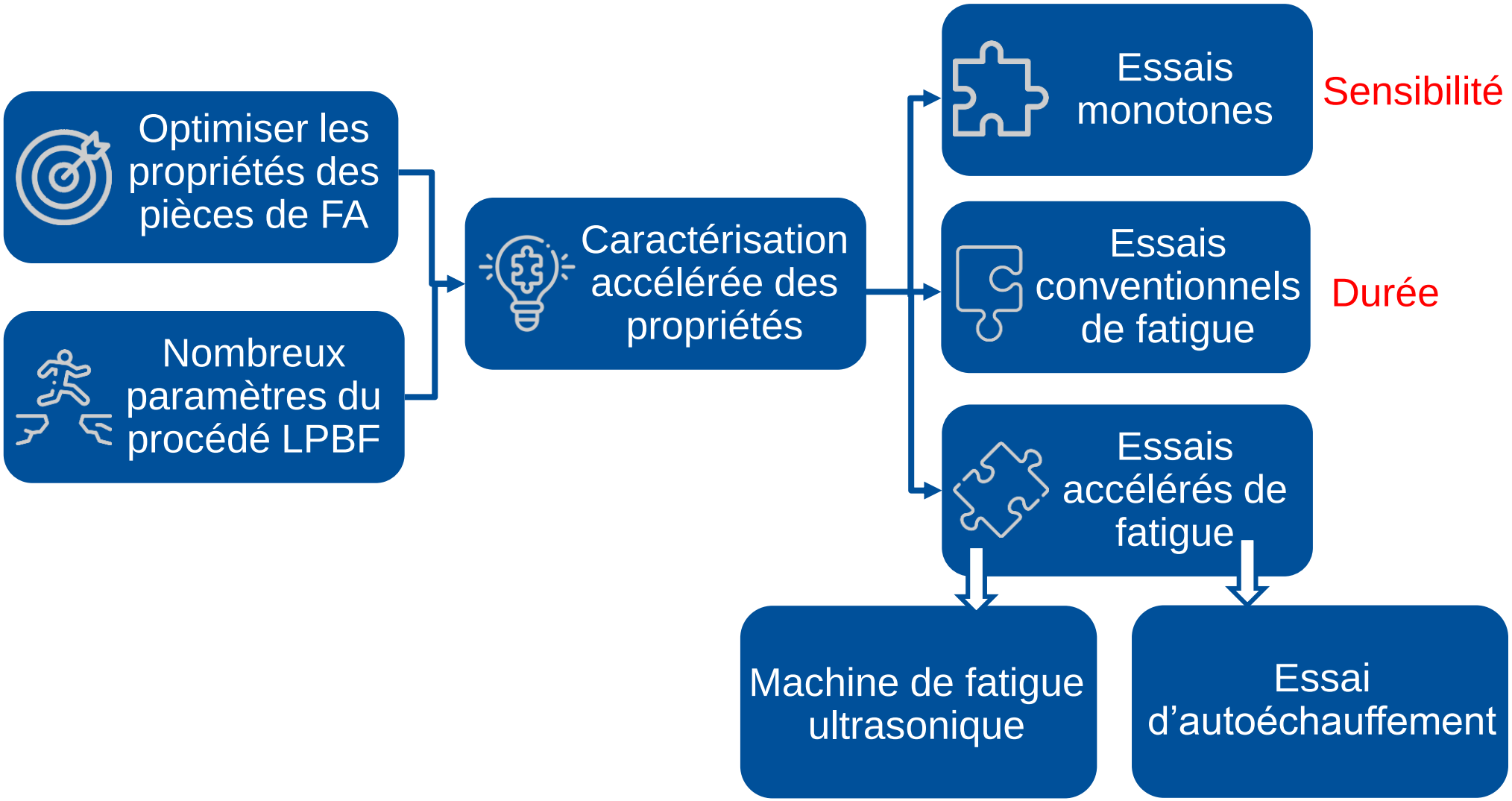






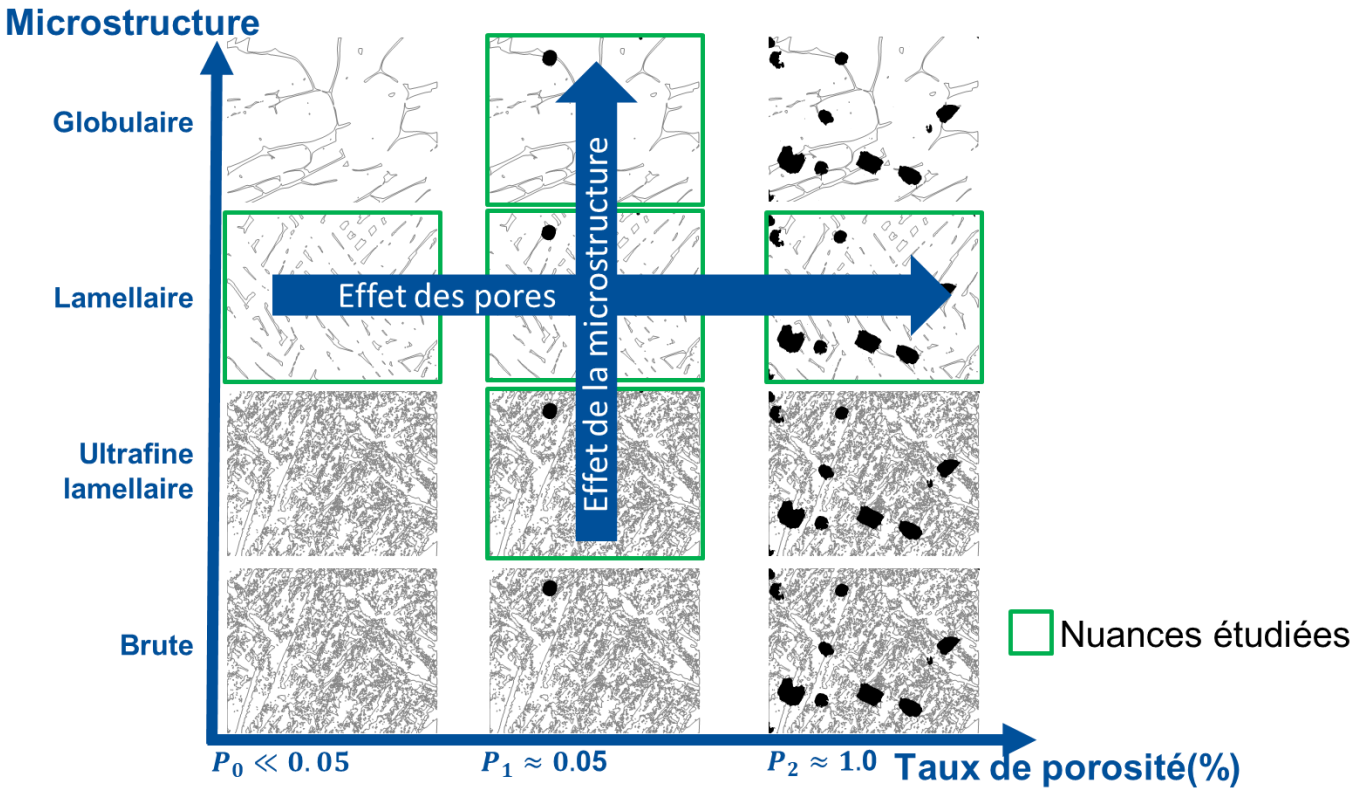


Contexte


Optimiser les propriétés des pièces de FA
Nombreux paramètres du procédé LPBF
Caractérisation accélérée des propriétés
Essais monotones
Sensibilité
Essais conventionnels de fatigue
Durée
Essais accélérés de fatigue
Machine de fatigue ultrasonique
Essai d'autoéchauffement

Objectifs

- Comparer ces deux méthodes d'essais accélérés de fatigue entre elles et avec des essais conventionnels
- Analyser l'effet de la porosité et de la microstructure sur la résistance en fatigue à très grand nombre de cycles du TA6V par LPBF



➢ Essais de fatigue ultrasonique et d'autoéchauffement sur 5 nuances du TA6V par LPBF

Sommaire

1. Contexte et objectifs

2. **Obtention et caractérisation des nuances**

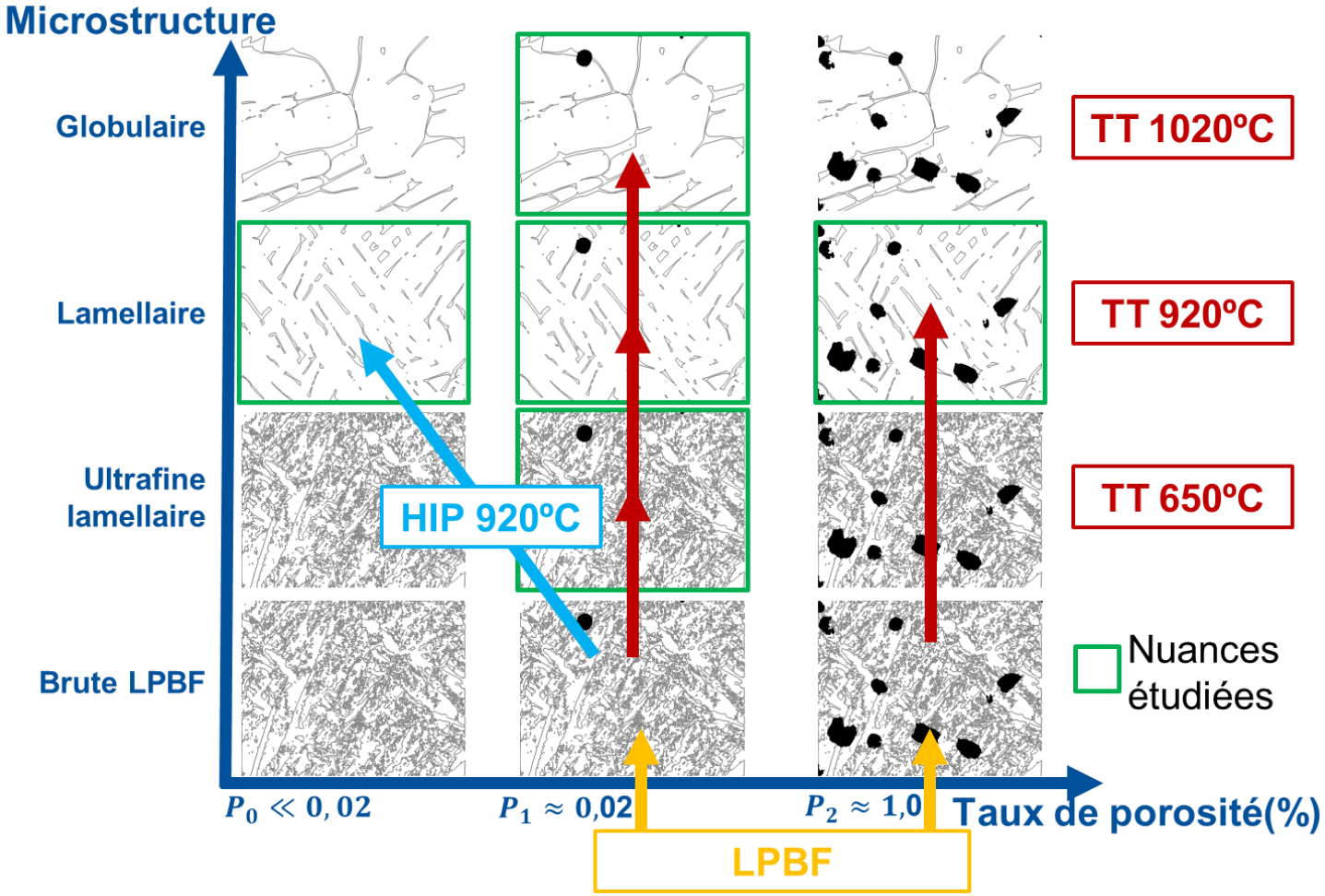
3. Essais de fatigue ultrasonique

4. Essais d’autoéchauffement

5. Conclusions et suite

Obtention et caractérisation des nuances

Stratégie d'obtention des différentes nuances du TA6V par LPBF



Obtention et caractérisation des nuances : porosité

1. Choix des paramètres de fabrication à l'aide de mesures de porosité par coupe micrographique

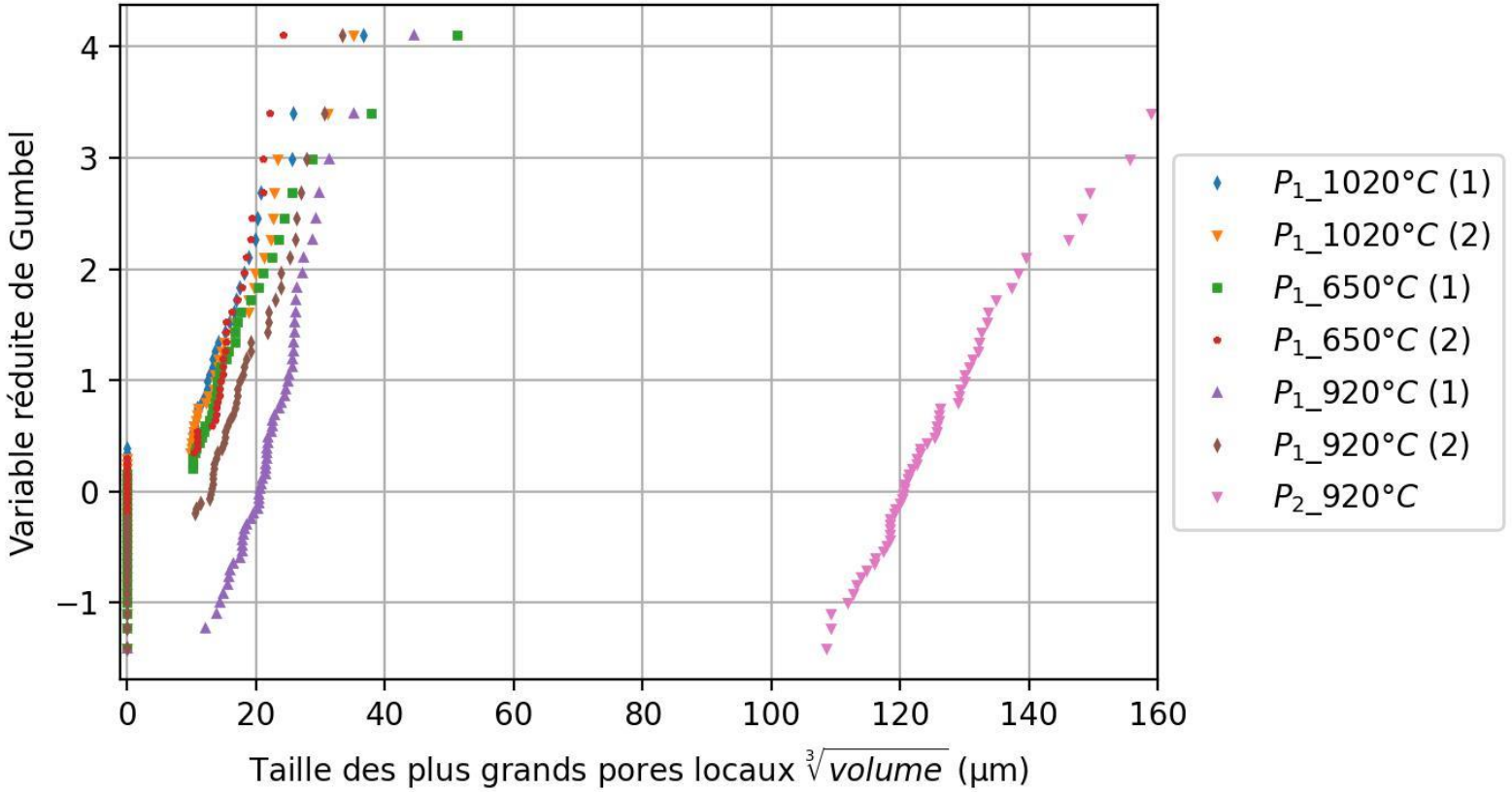
2. Analyse de la porosité par **microtomographie X** sur 9 éprouvettes traitées :
   - Taille de voxel 4*4*4 μm^3, pores de plus de 10 µm considérés
   - Aucun pore détecté sur la nuances $\boldsymbol{P_0}$ (HIP 2h, 920ºC, 2000 bar)
   - Taux de porosité : $\boldsymbol{P_1 \approx 0,001}$ %, $\boldsymbol{P_2 \approx 1,0}$ %

Nuance	P_0_920°C	P_1_1020°C	P_1_650°C	P_1_920°C	P_2_920°C
Taux de porosité (ppm)	< 1	2 ± 0.2	3 ± 0.1	11 ± 0.4	10713 ± 20
Taille maximale de pore (µm)	< 10	36	51	44	260
Densité de pore >10 µm (mm^{-1})	0.0	0.7	0.6	2.2	117.3
Taux de porosité (ppm)	< 1	2 ± 0.1	2 ± 0.1	3 ± 0.2	
Taille maximale de pore (µm)	< 10	35	24	33	
Densité de pore >10 µm (mm^{-1})	0.0	0.4	0.7	0.6	

Obtention et caractérisation des nuances : porosité

Distribution de la taille des plus grands pores de différents sous-volumes tomographiés :

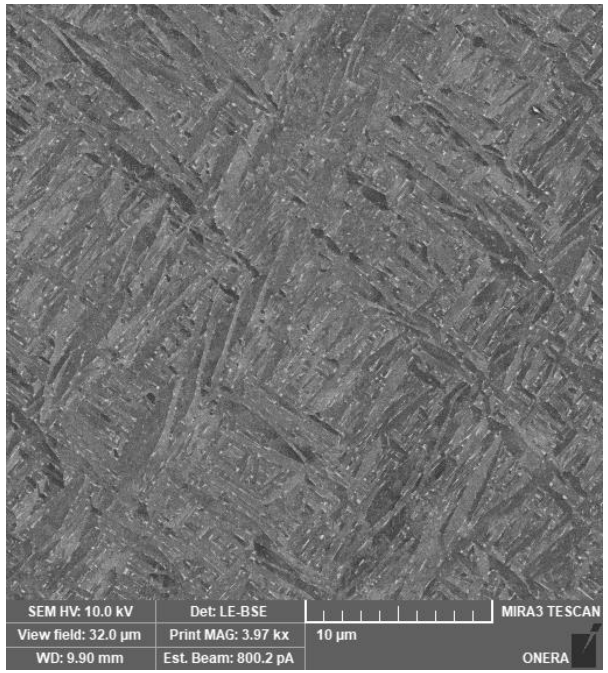
- Distribution bien distincte entre les deux niveaux de porosité, reproductible pour P1
- Distribution représentable par une loi de Gumbel (statistique des extrêmes)



Obtention et caractérisation des nuances : microstructure

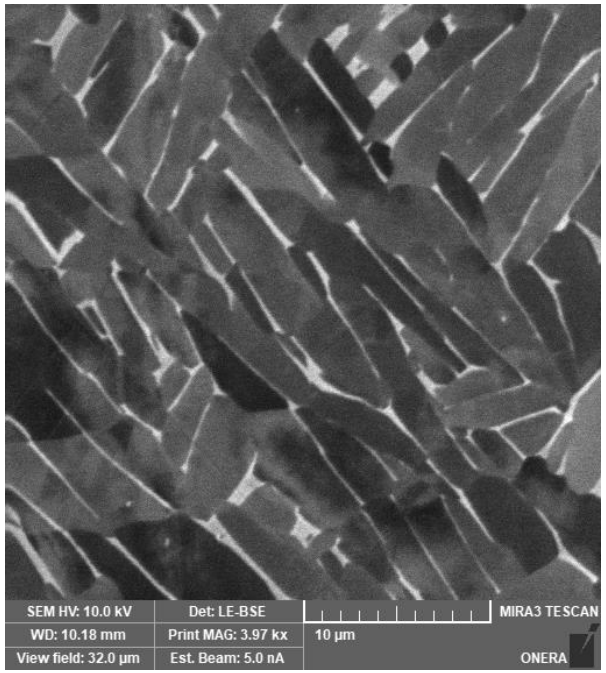
Microscopie BSE, même échelle

3h, 650ºC, r. à l'air

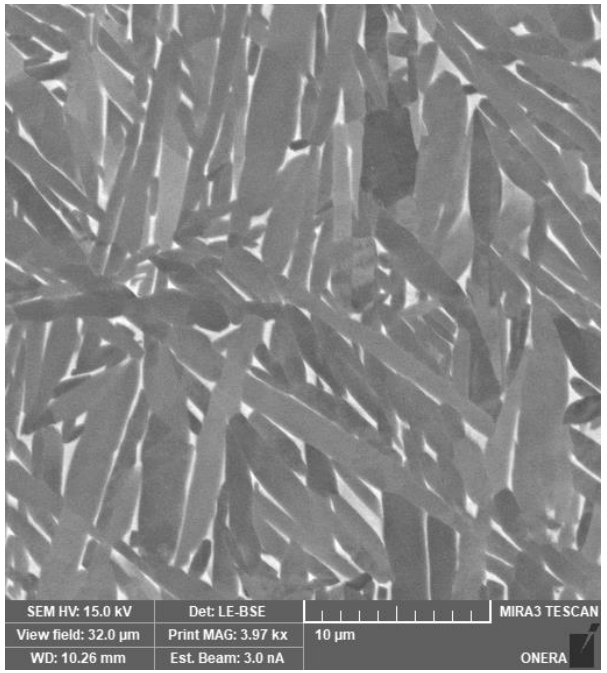


Grain : lamelle α/α' de 0,4 µm de large

2h à 920ºC r. four

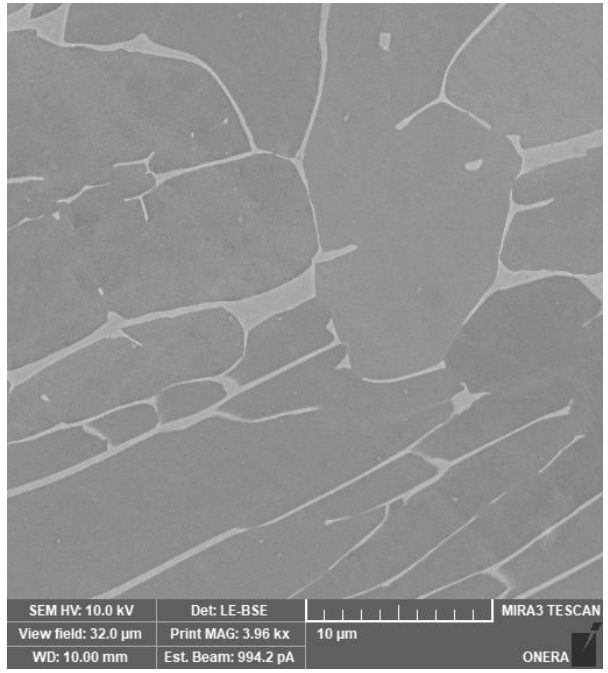


HIP 2h à 920ºC



Grain : lamelle α de 1,6 µm de large

2h, 1020ºC, r. four



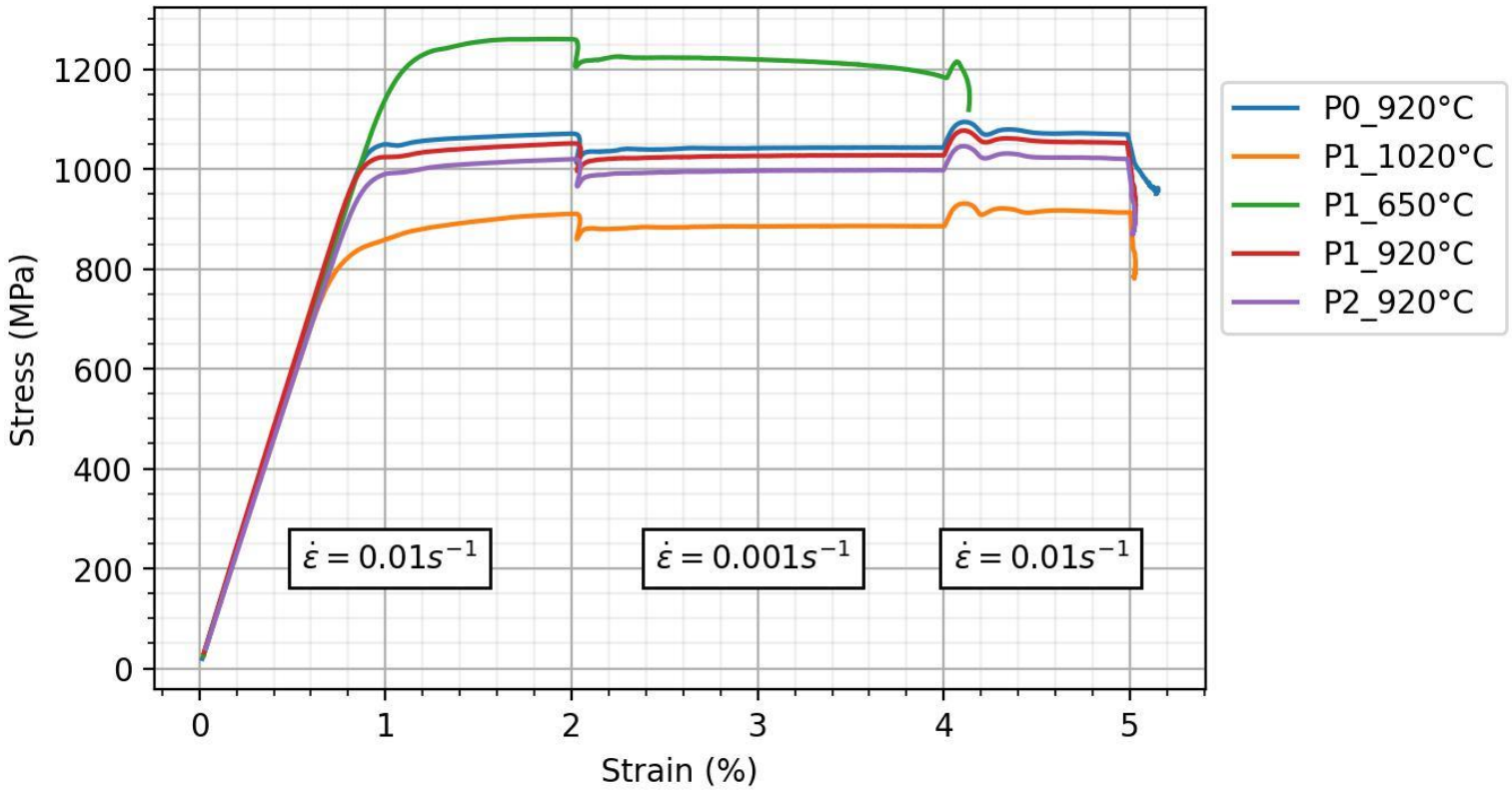
Grain : colonie lamellaire α + β de 200 µm

Obtention et caractérisation des nuances : essais de traction

Essais de traction à deux vitesses de déformation + relaxation de 5 min :

- Fort effet de la microstructure
- Effet visible mais plus faible de la porosité
- Sensibilité à la vitesse de déformation indépendante de la nuance et relativement faible :
  $\sigma = \sigma_0 \dot{\varepsilon}^m, avec\ m \approx 0{,}021$

Nuance	Re0,2% (MPa)
P0_920ºC	1047
P1_1020ºC	850
P1_650ºC	1235
P1_920ºC	1024
P2_920ºC	992



Sommaire

1. Contexte et objectifs

2. Obtention et caractérisation des nuances

3. **Essais de fatigue ultrasonique**

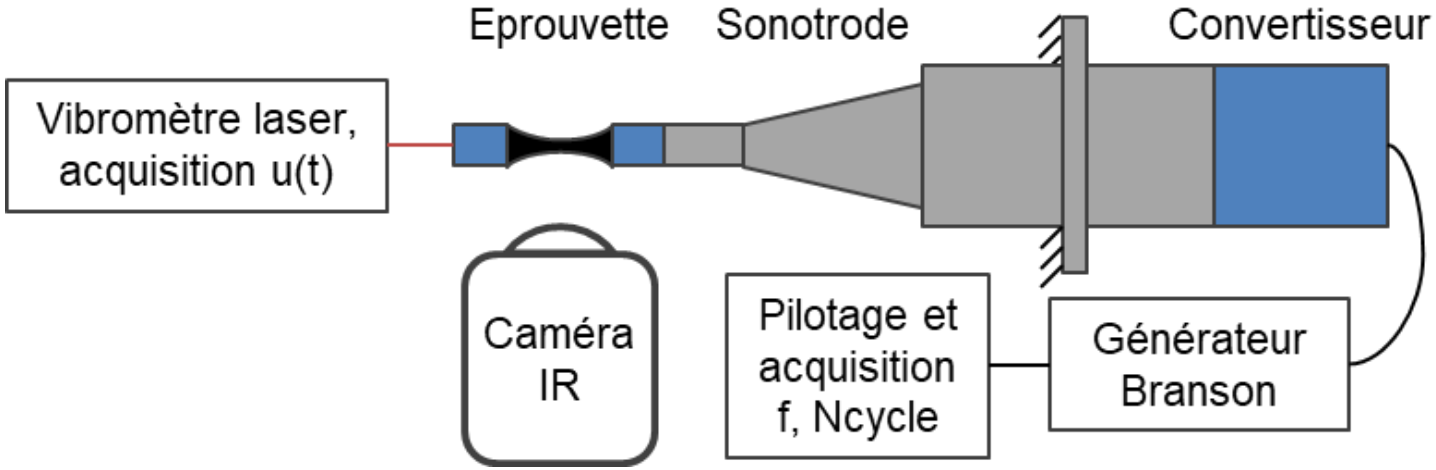
4. Essais d’autoéchauffement

5. Conclusions et suite

Matériaux et méthode : essais de fatigue ultrasonique

Spécificités de l'essai :

- Essai piloté en déplacement : déplacement sinusoïdal à 20 kHz imposé en bout d'éprouvette
- Hypothèse d'élasticité linéaire à l'échelle macroscopique pour imposer la contrainte voulue
- $R = -1$
- Fort échauffement → refroidissement à air comprimé, $\Delta T < 30°C$
- Dispositif :

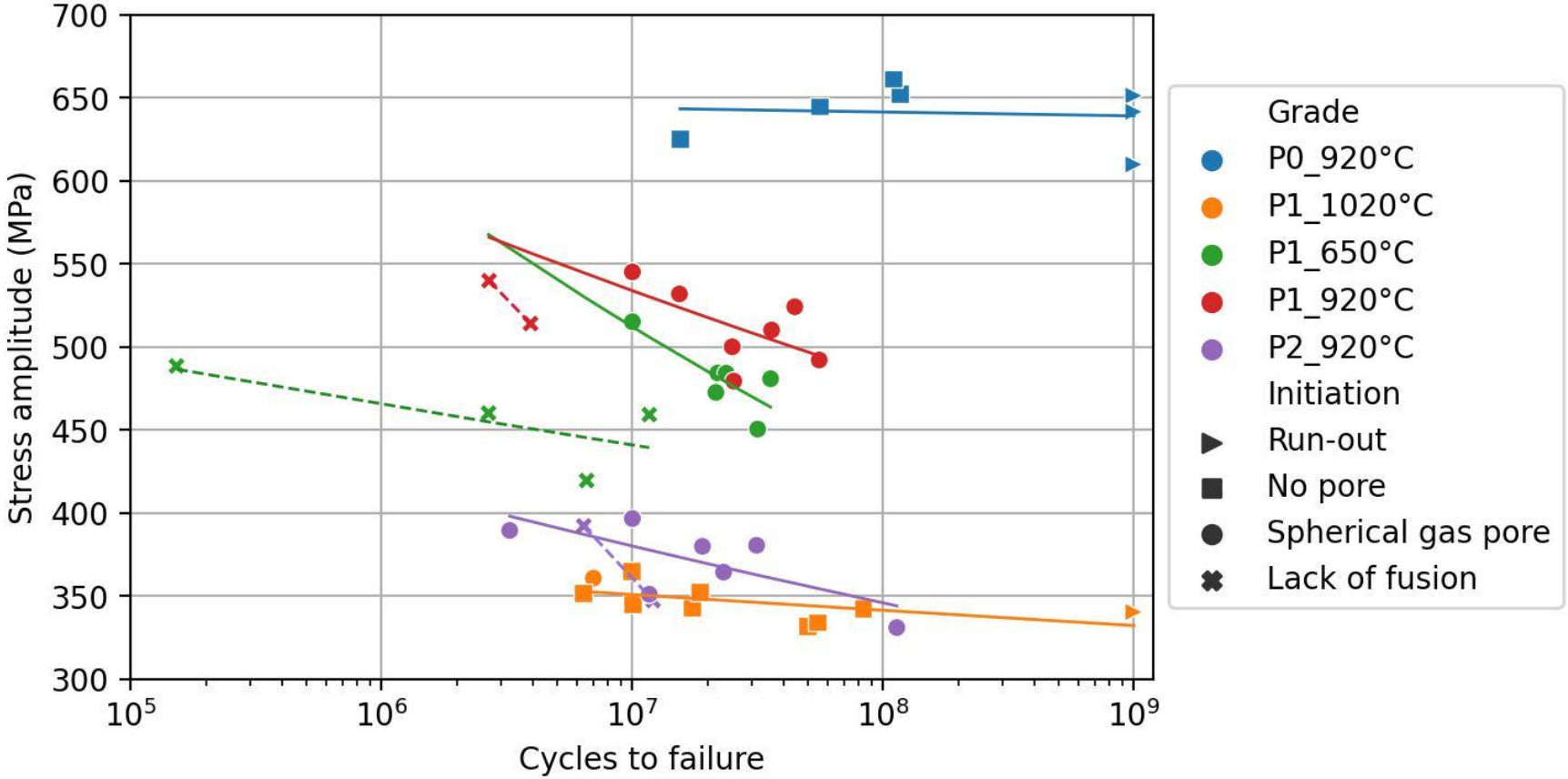


Méthode :

- Courbe SN en visant des durées de vie proche de 10^7-10^8 cycles
- Essai arrêté si non rompu à 10^9 cycles
- 47 éprouvettes testées

Résultats : courbes de Wöhler

- Résistance en fatigue bien différente selon le niveau de porosité ou le traitement
- Grande dispersion, en particulier pour les nuances P1-650ºC et P1-920ºC
- Dispersion liée aux différents types d'amorçage : courbes SN bimodales



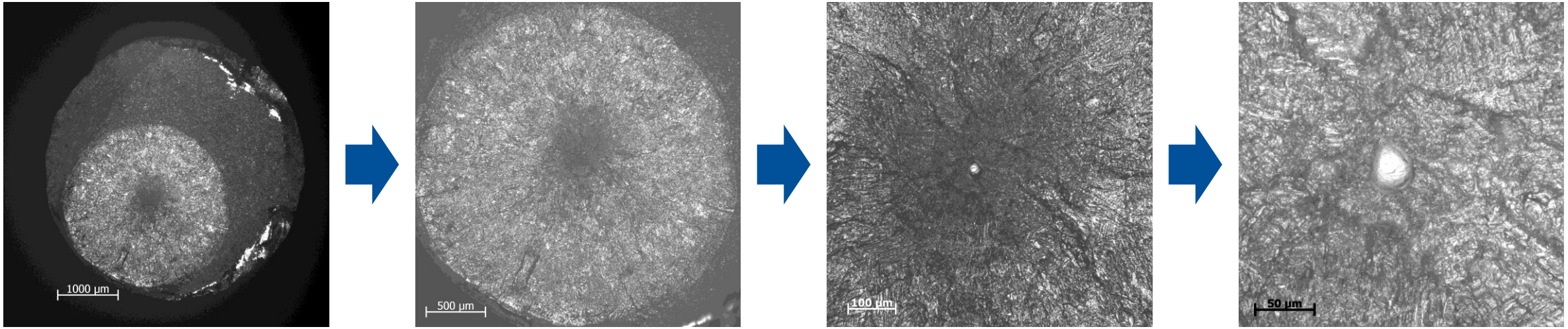
Résultats : fractographie

Trois types d'amorçage observés :

- **Sans pore**
- Sur un pore de type **manque de fusion** ($\sqrt{Area}$ de 76 à 600 µm)
- Sur un pore de type **bulle de gaz** ($\sqrt{Area}$ de 12 à 156 µm)

➢ La plupart des amorçages sont **internes** (38, 7 en sub-surface, 2 en surface)

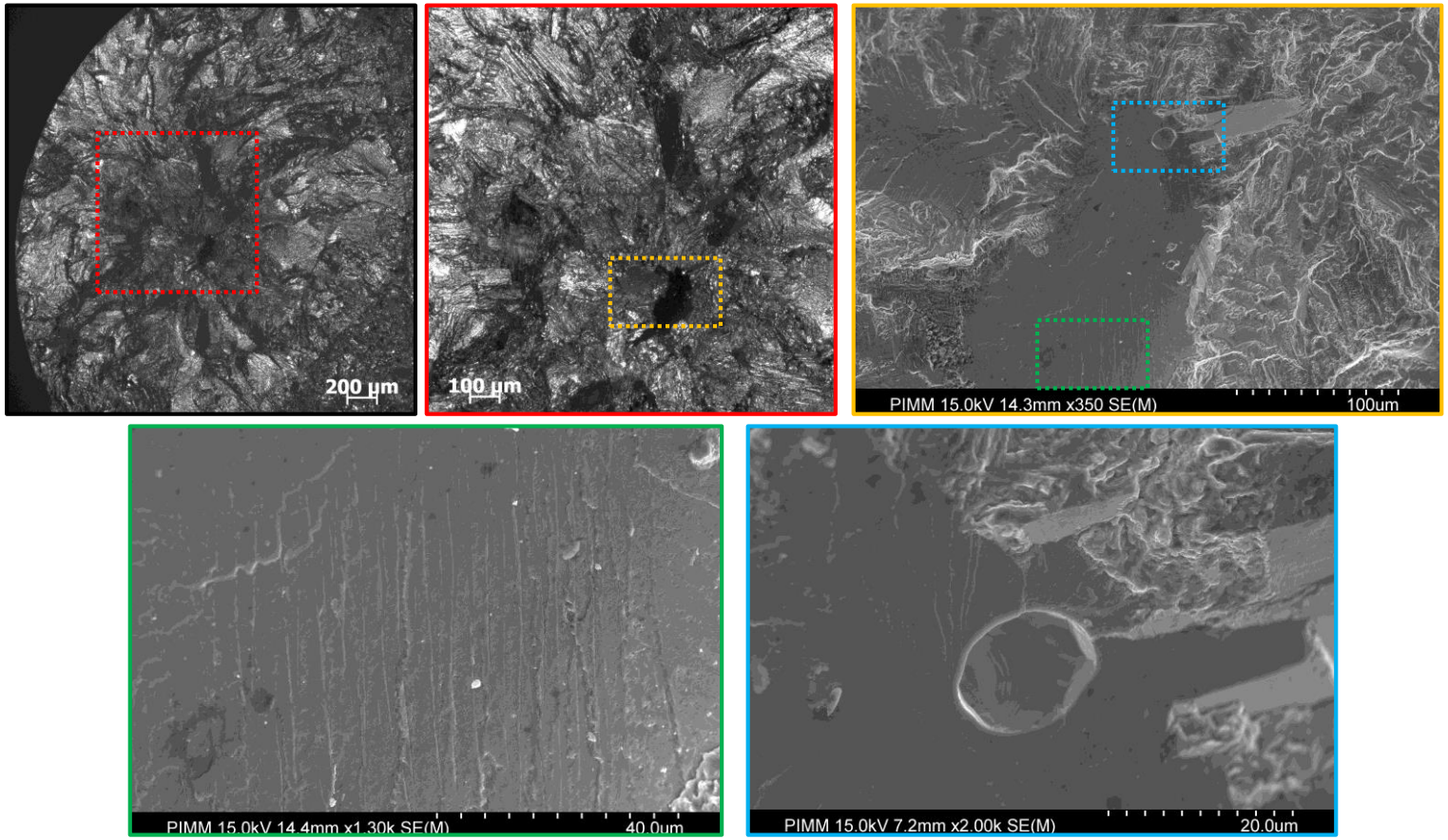
Exemple de faciès d'éprouvettes P1-920ºC : Amorçage interne sur bulle de gaz ($N_f = 3{,}6\,.10^7\ cycles$)



Résultats : fractographie

Faciès de rupture d'éprouvette **P1_1020ºC** :

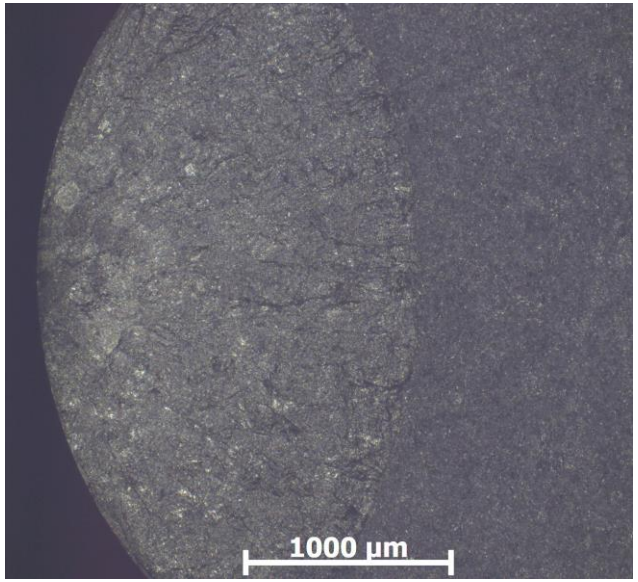
- Facettes visibles sur tous les faciès, pore de 12 µm visible sur un seul faciès

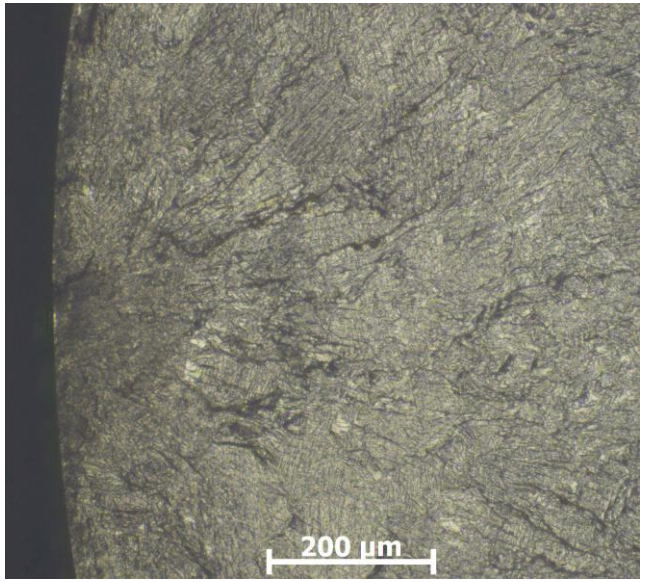


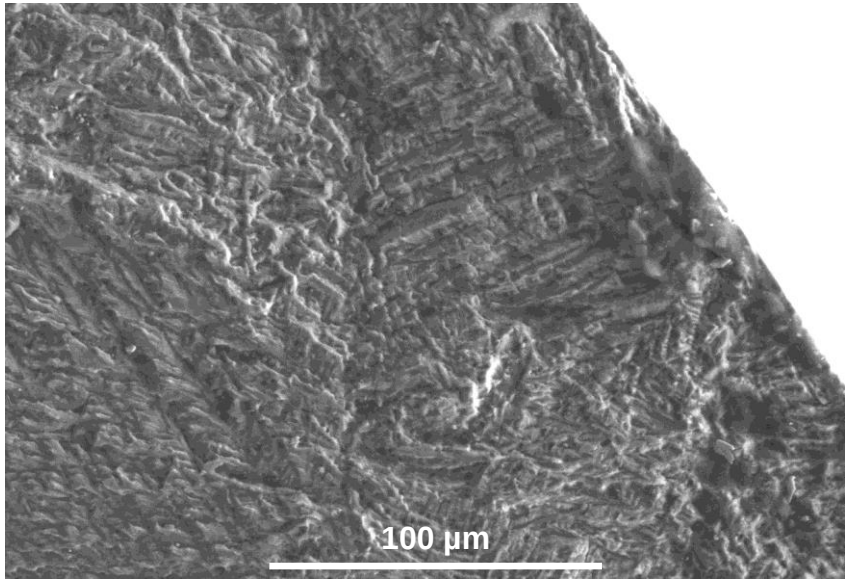
Résultats : fractographie

Exemple de faciès de rupture d'éprouvette **P0_920ºC (HIP)** :

- Amorçage en surface sans pore visible ($N_f = 8{,}8\,.10^7\ cycles$)





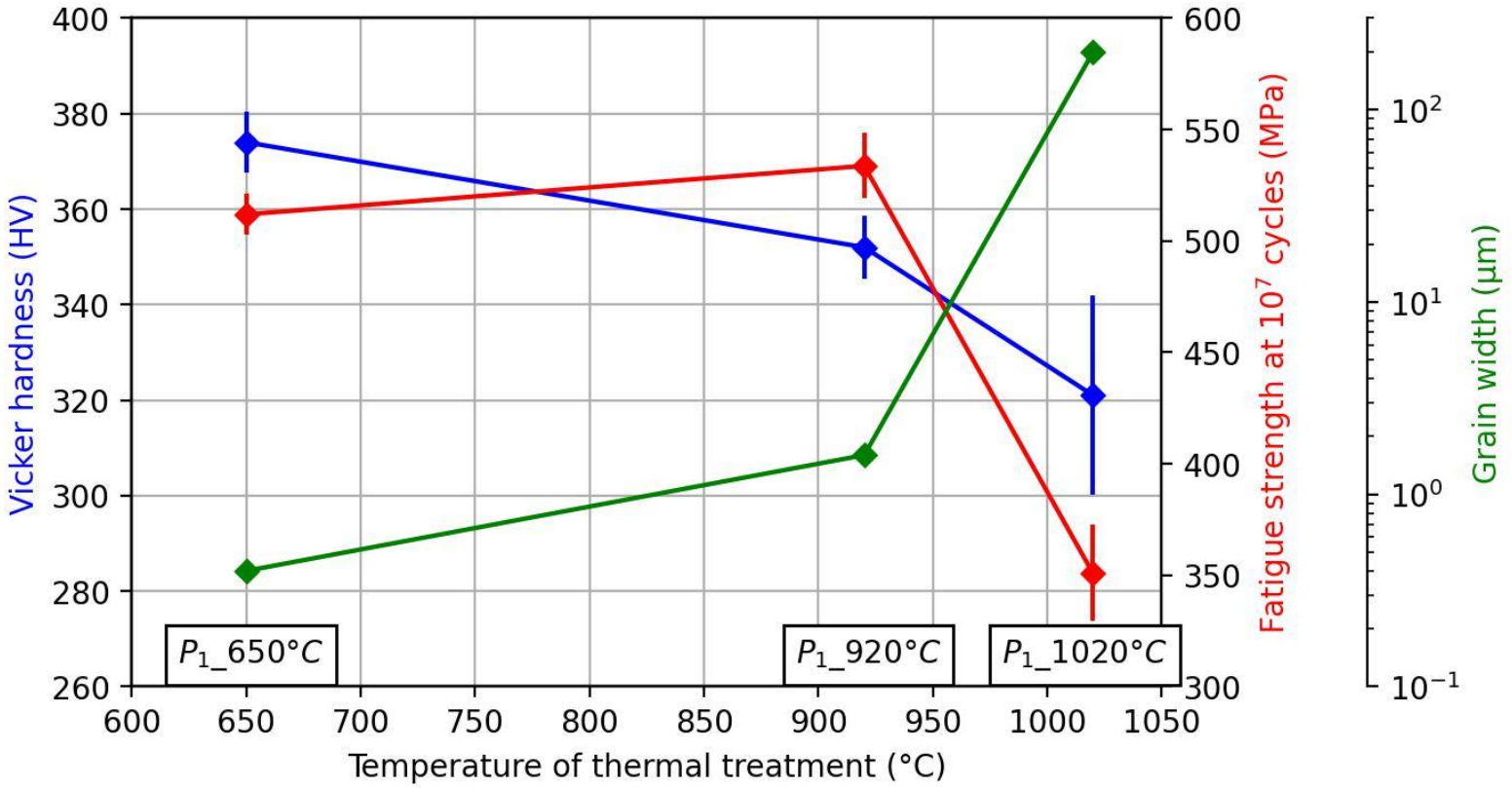


➢ **Pour tous les essais de cette étude, amorçage sur microstructure lorsque la taille de grain est plus grande que celles des pores**

Discussion : effet de la microstructure

Résultats des nuances de même porosité : P1_650ºC, P1_920ºC, P1_1020ºC

- Variation de la limite de fatigue non monotone avec la dureté ou $R_{e0,2\%}$
- Existence d'une température de post-traitement optimale proche de 920ºC



Sommaire

1. Contexte et objectifs

2. Obtention et caractérisation des nuances

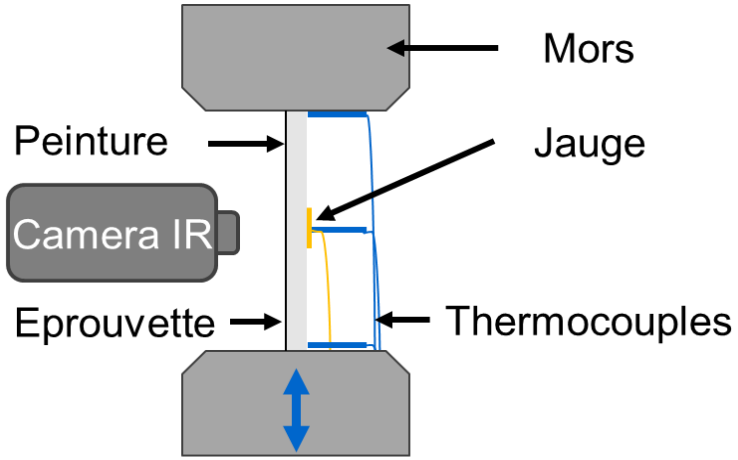
3. Essais de fatigue ultrasonique

4. **Essais d’autoéchauffement**

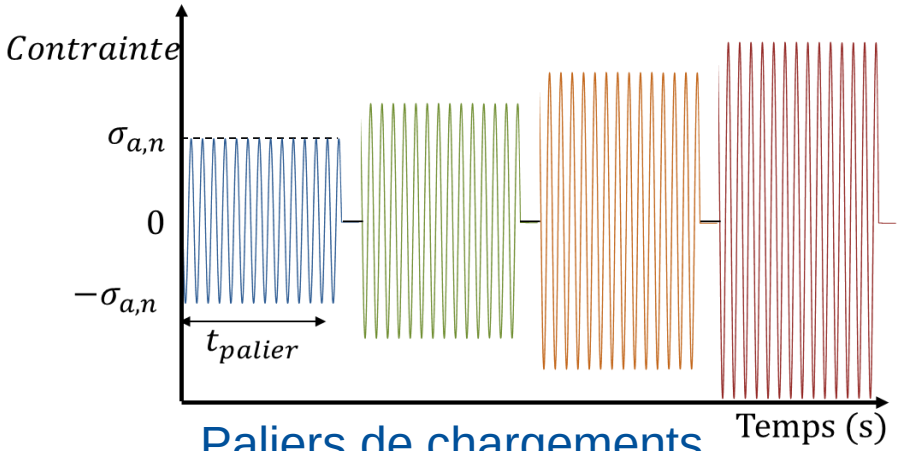
5. Conclusions et suite

Essais d'autoéchauffement

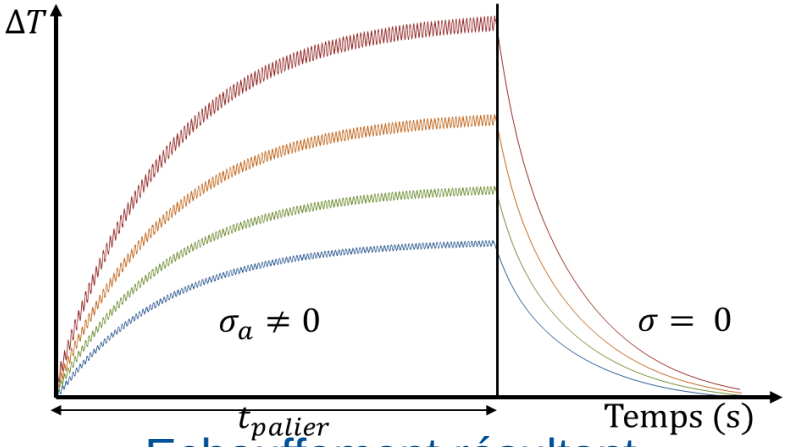
Principe des essais d'autoéchauffement



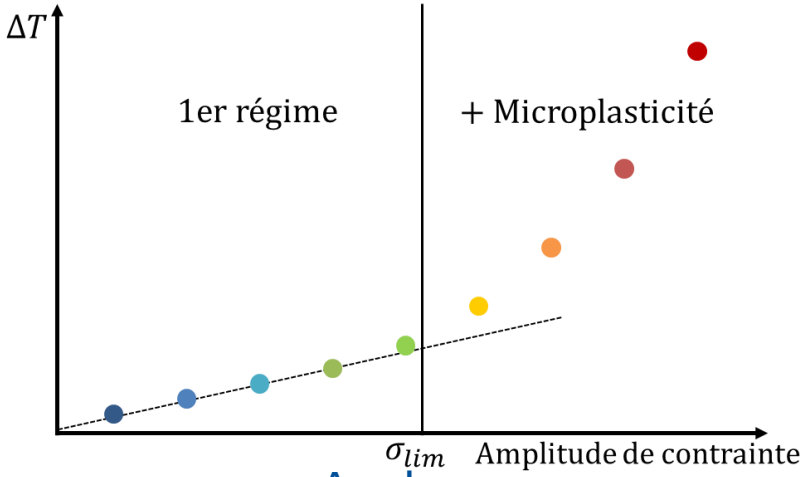
Dispositif



Paliers de chargements



Echauffement résultant

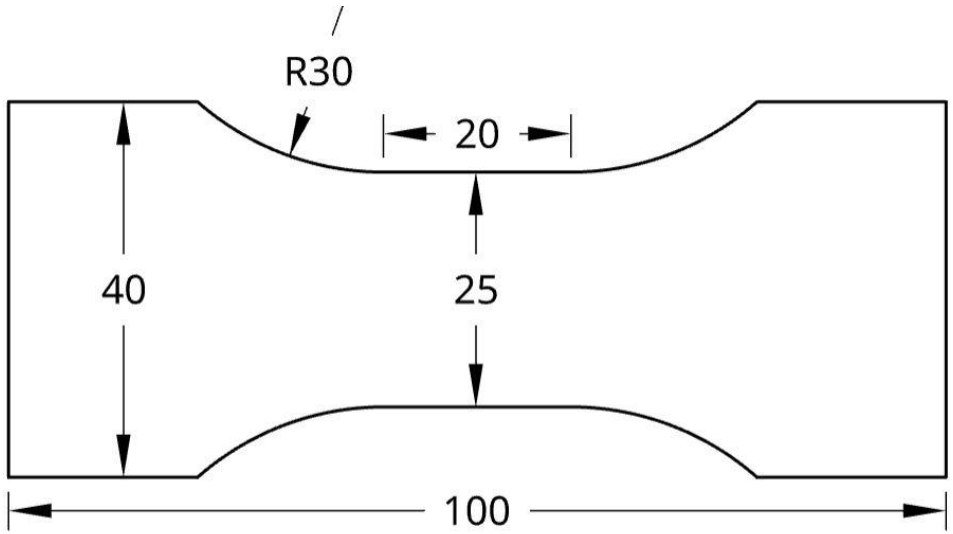


Analyse

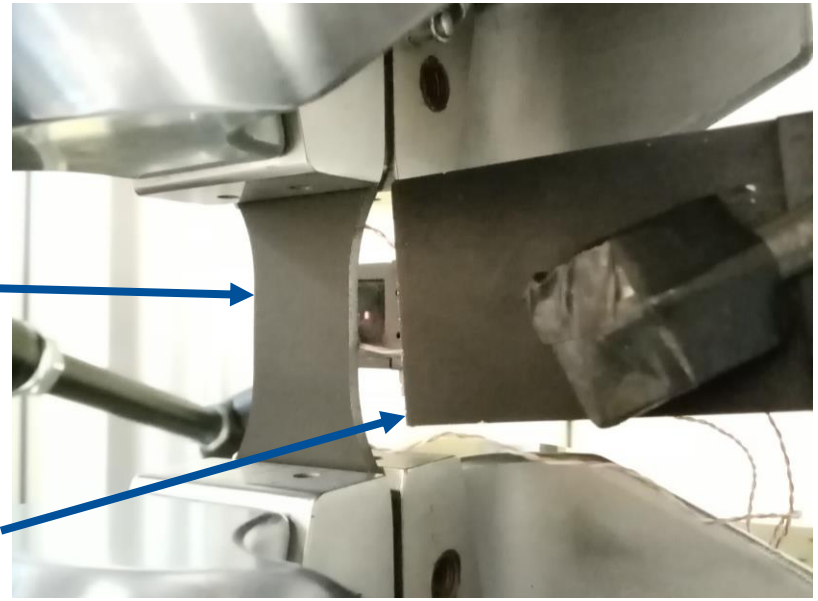
Essais d'autoéchauffement

Méthode utilisée ici :

- Paliers de chargement de **50 cycles** pilotés en force, $\boldsymbol{f_{load} = 4,87\mathrm{Hz}}$, Rapport de charge $\boldsymbol{R = -1}$
- Mesure thermique par caméra infrarouge synchrone, $f_{IR} = 99\ \mathrm{Hz}$
- Analyse thermique 0D, démodulation du signal de température moyenne dans la zone de jauge
  - **Amplitudes des harmoniques $\boldsymbol{A_{1f}}$, $\boldsymbol{A_{2f}}$ et vitesse d'échauffement $\boldsymbol{V_{echauff}}$**, pas de température stabilisée



Géométrie des éprouvettes testées



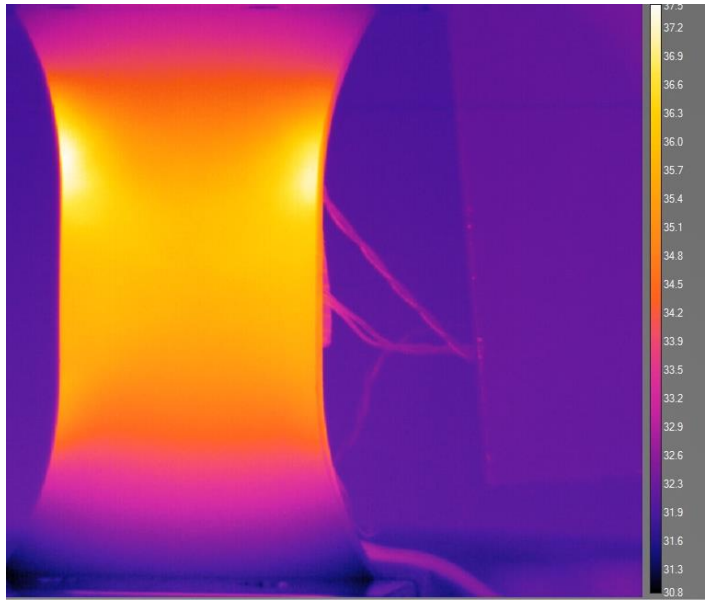
Eprouvette face coté caméra IR

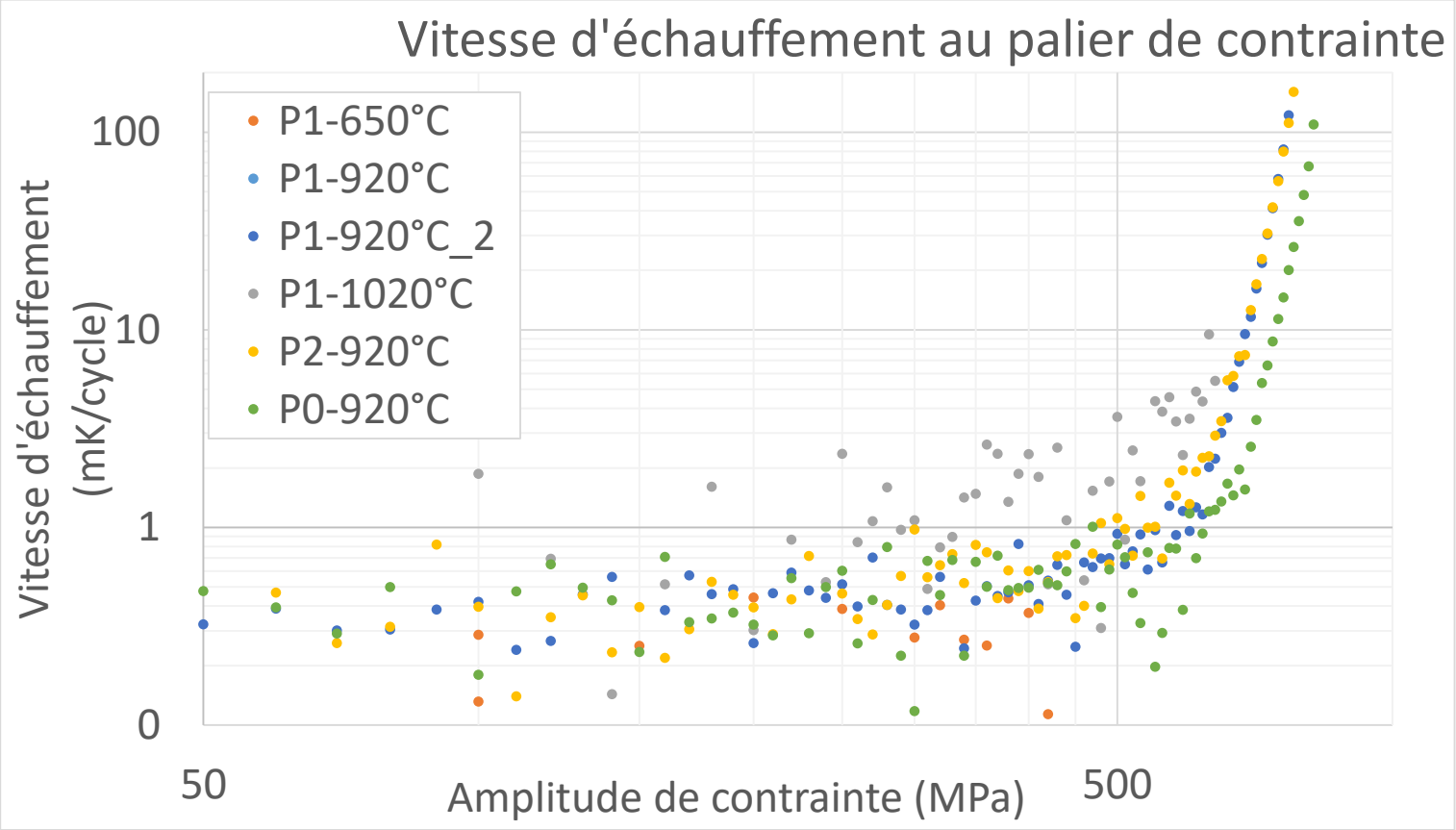
Plaque à température ambiante dans le champs de la caméra

Essais d'autoéchauffement

Analyse de la vitesse d'échauffement :

- Existence d'un deuxième régime d'AE $V_{echauff} \propto \sigma^{m+2}$
- Mais changement de régime bien après la limite de fatigue et lié à de la plasticité macroscopique





Essais d’autoéchauffement

Nouveaux essais d’autoéchauffement avec des changements de méthode :

- **6000 cycles par palier, $\mathbf{f_{load} = 15,67Hz}$**
  - Variation de température et vitesse d’échauffement non bruitées dès les premiers paliers
  - Estimation de limite possible (225 MPa) mais essais de faisabilité réalisés sur des éprouvettes de traction déformée à 5 %
  - Prochains essais avec cette méthode

Sommaire

1. Contexte et objectifs

2. Obtention et caractérisation des nuances

3. Essais de fatigue ultrasonique

4. Essais d’autoéchauffement

5. Conclusions et suite

Conclusion

Résultats :

- Sensibilité de la fatigue ultrasonique à la microstructure et aux défauts internes
- Fort effet de la taille de microstructure et la taille des porosité sur la résistance en fatigue à très grand nombre de cycle

Futures travaux :

- Comparaison avec des essais conventionnels de fatigue (f ≈ 25 Hz) en cours de réalisation au CETIM
- Essais d'autoéchauffement complémentaires avec nouvelle méthodologie
- Modélisation des essais d'autoéchauffement

Merci pour votre attention

Contact :

Grégoire Brot

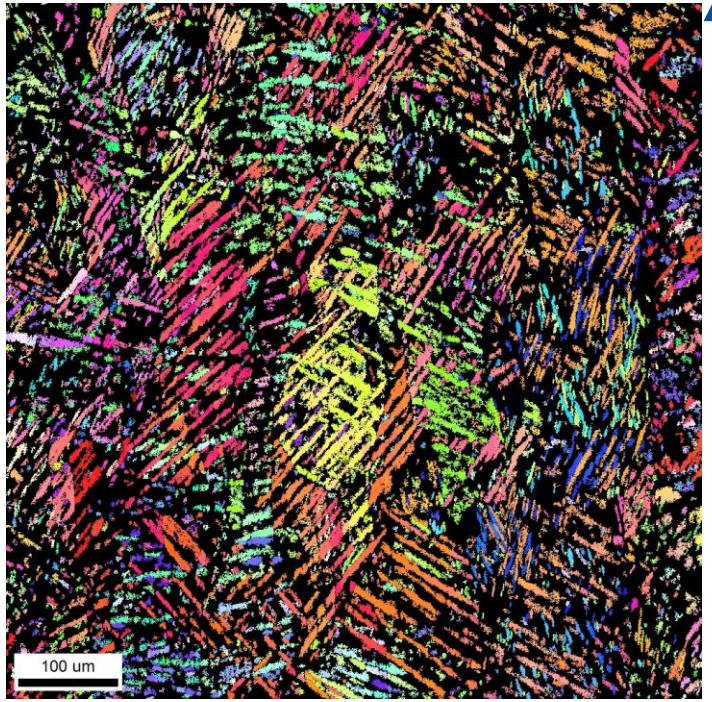
gregoire.brot@onera.fr

gregoire.brot@ensam.eu

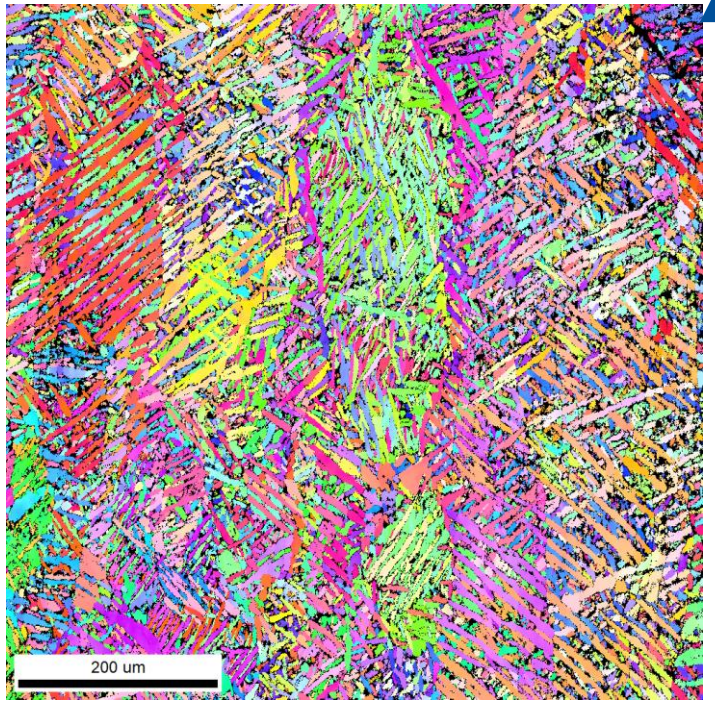
Obtention et caractérisation des nuances

IPF EBSD même échelle

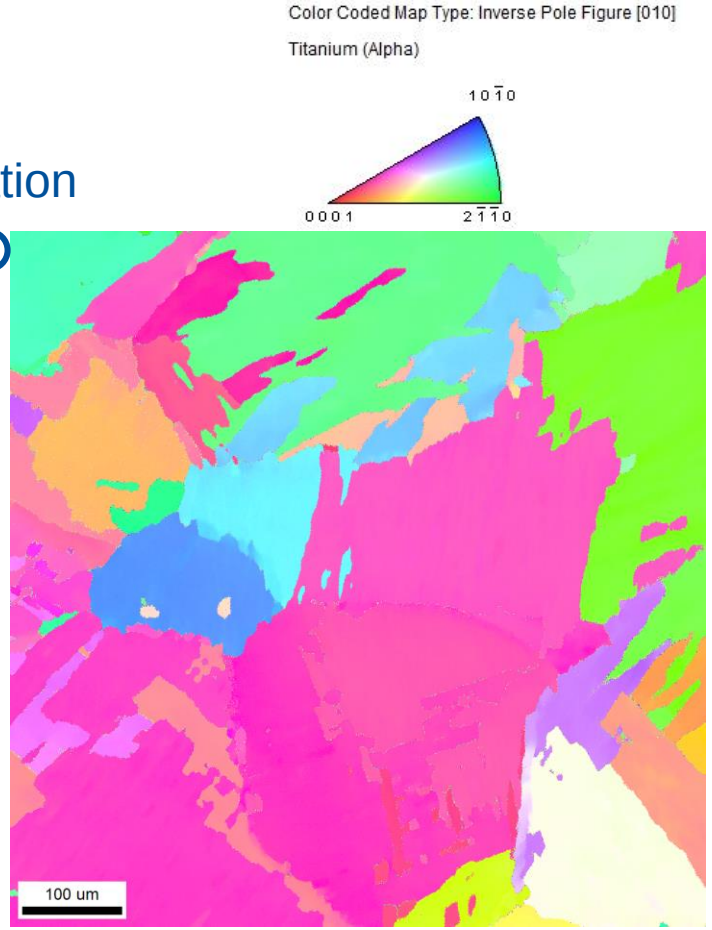
Direction de fabrication



3h, 650ºC, refroidis à l'air



2h à 920ºC
Refroidis au four

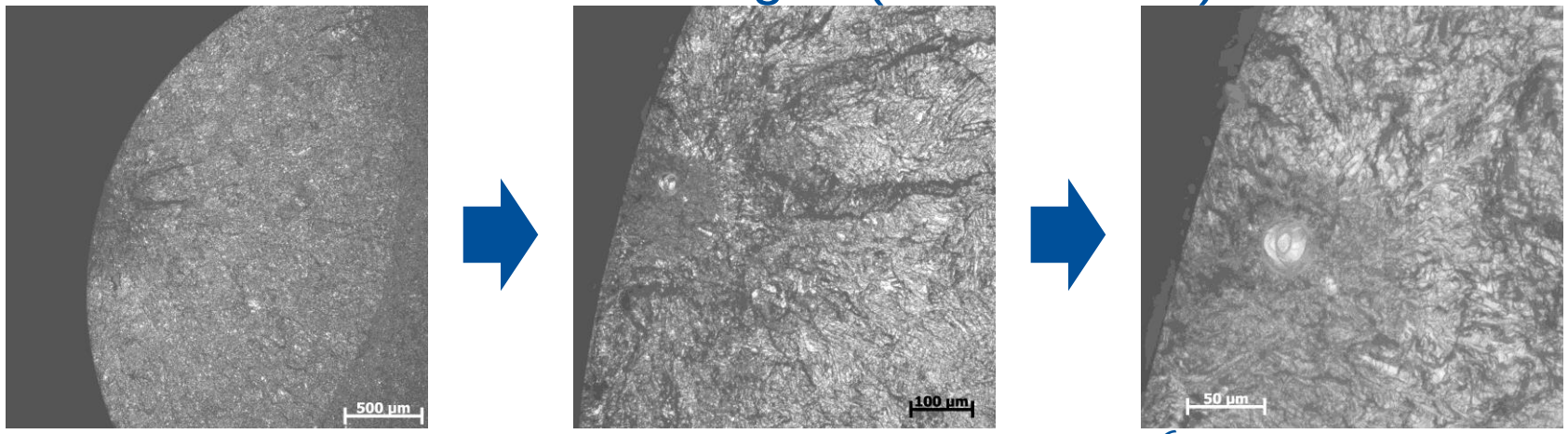


2h, 1020ºC,
refroidis au four

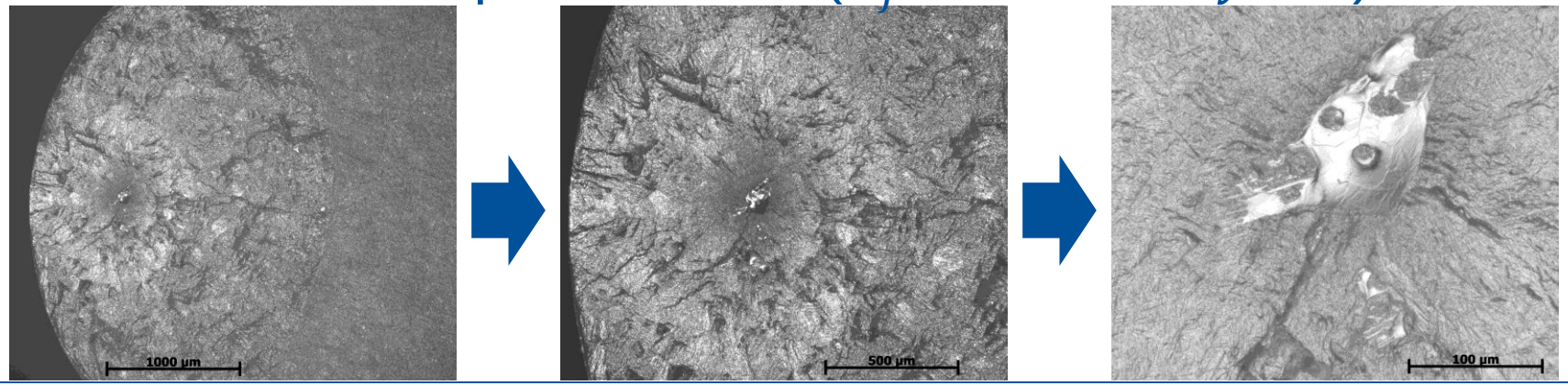
Résultats : fractographie

Exemples de faciès de rupture d'éprouvettes **P1-920ºC ou P1-650ºC**.

- Amorçage en subsurface sur bulle de gaz (essai Locati) :



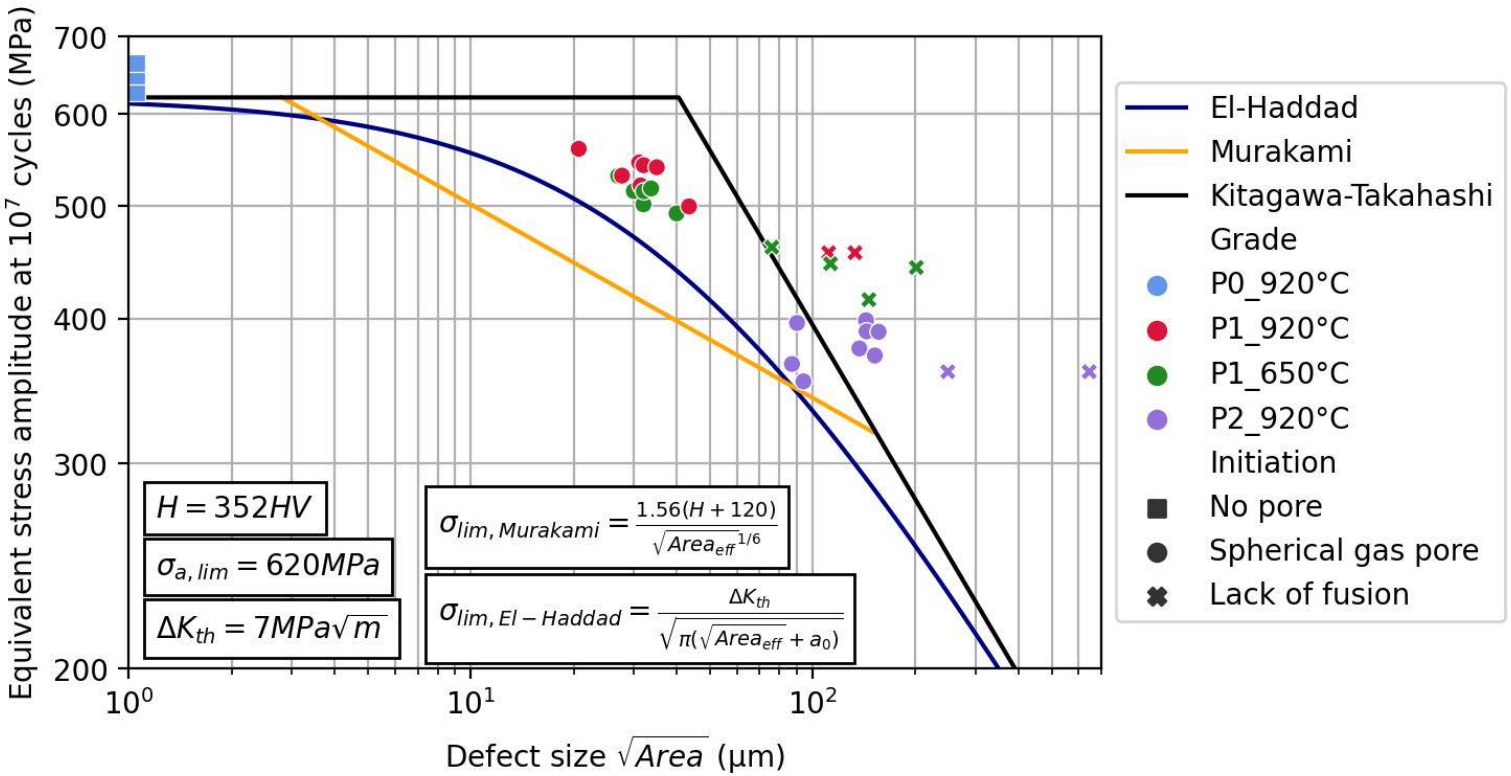
- Amorçage interne sur manque de fusion ($N_f = 2{,}7\ .10^6\ cycles$) :



Discussion : effet des pores

Diagramme de Kitagawa-Takahashi :

- Amplitude de contrainte équivalente à 10^7 cycles selon la taille de défaut $\sqrt{Area}$
- Limite de fatigue la nuance P0_920ºC prise pour $\Delta\sigma_{lim} = 620\ MPa$
- Modèles de El-Haddad et de Murakami avec coefficients pour amorçages internes

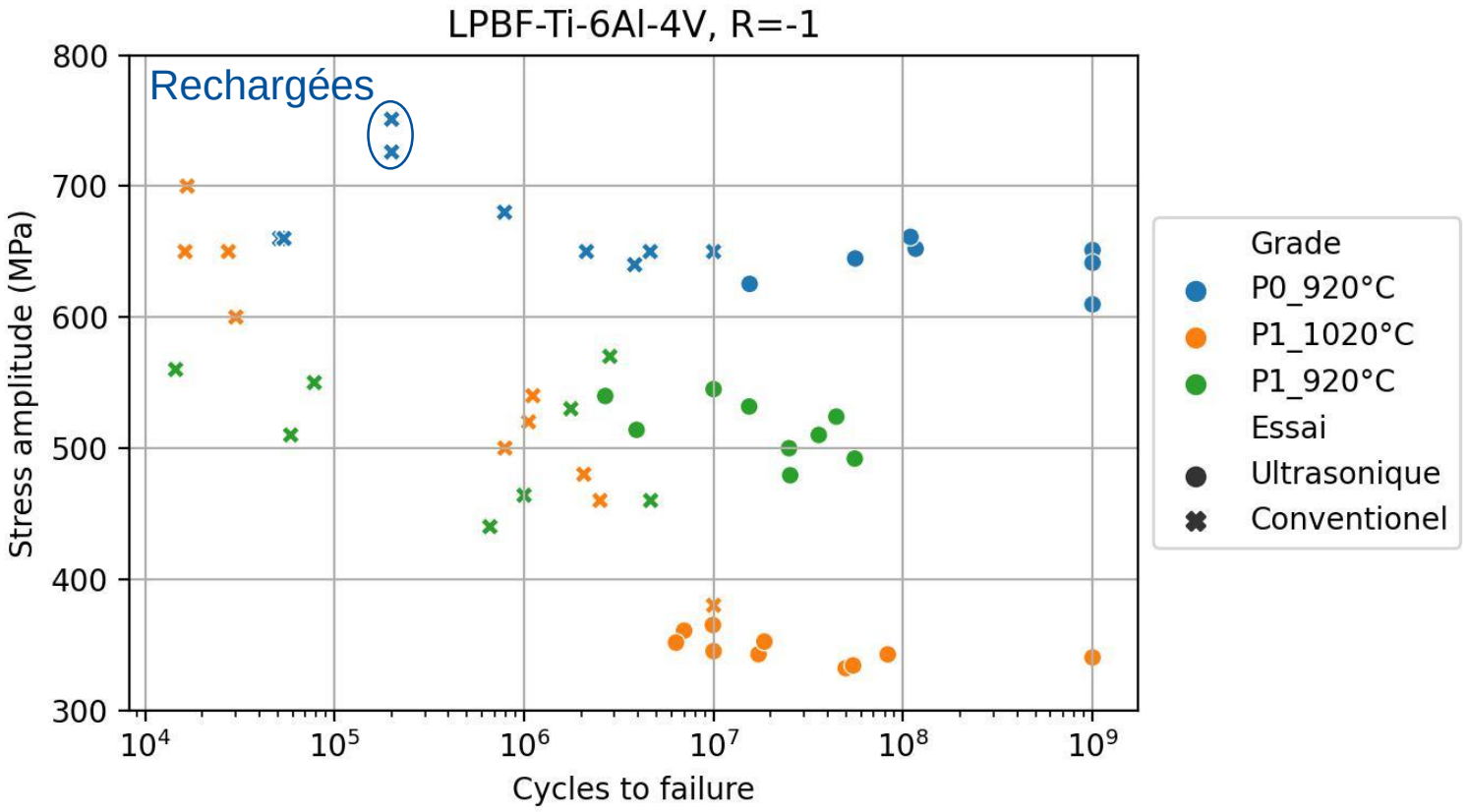


Résultats de l'obtention et la caractérisation des nuances, des essais de traction et des essais de fatigue ultrasonique présentés dans un article soumis début décembre

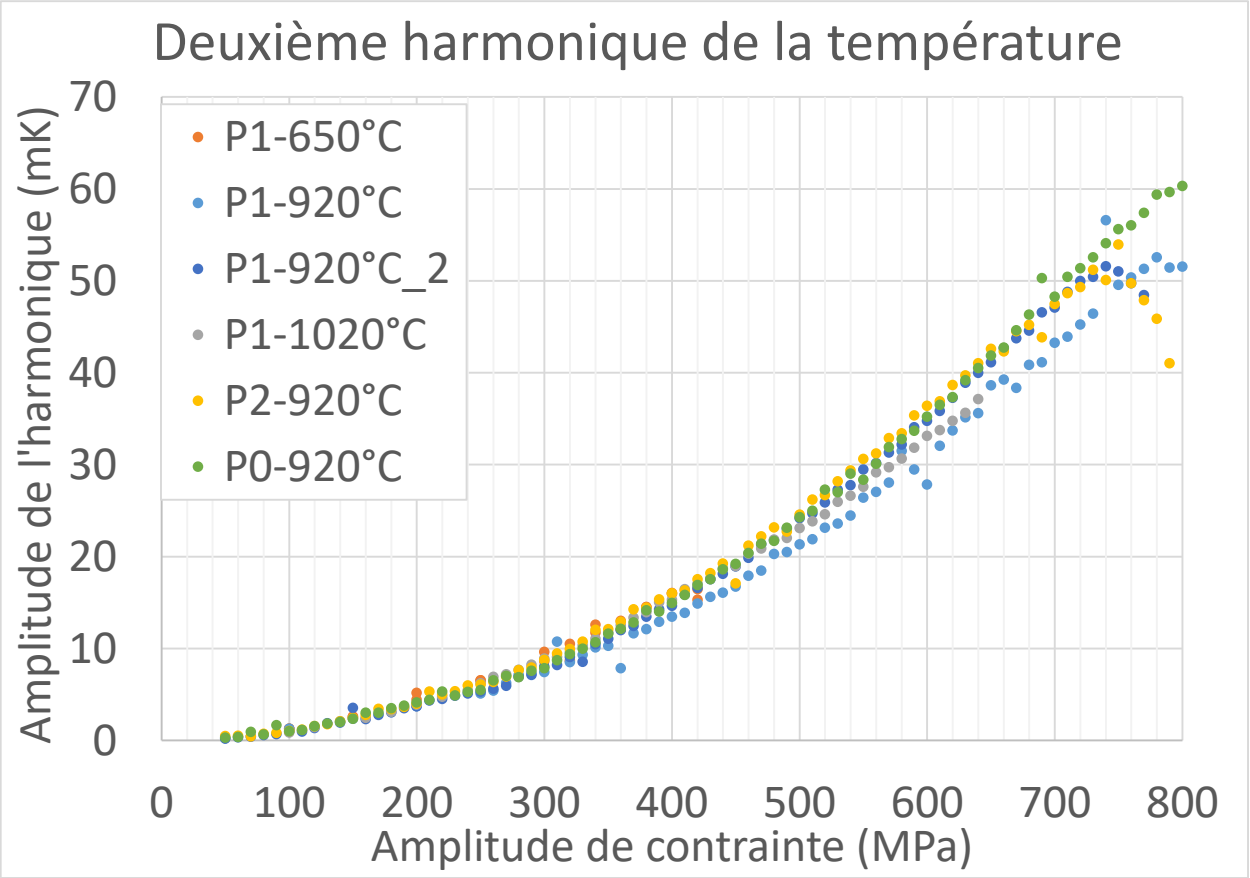
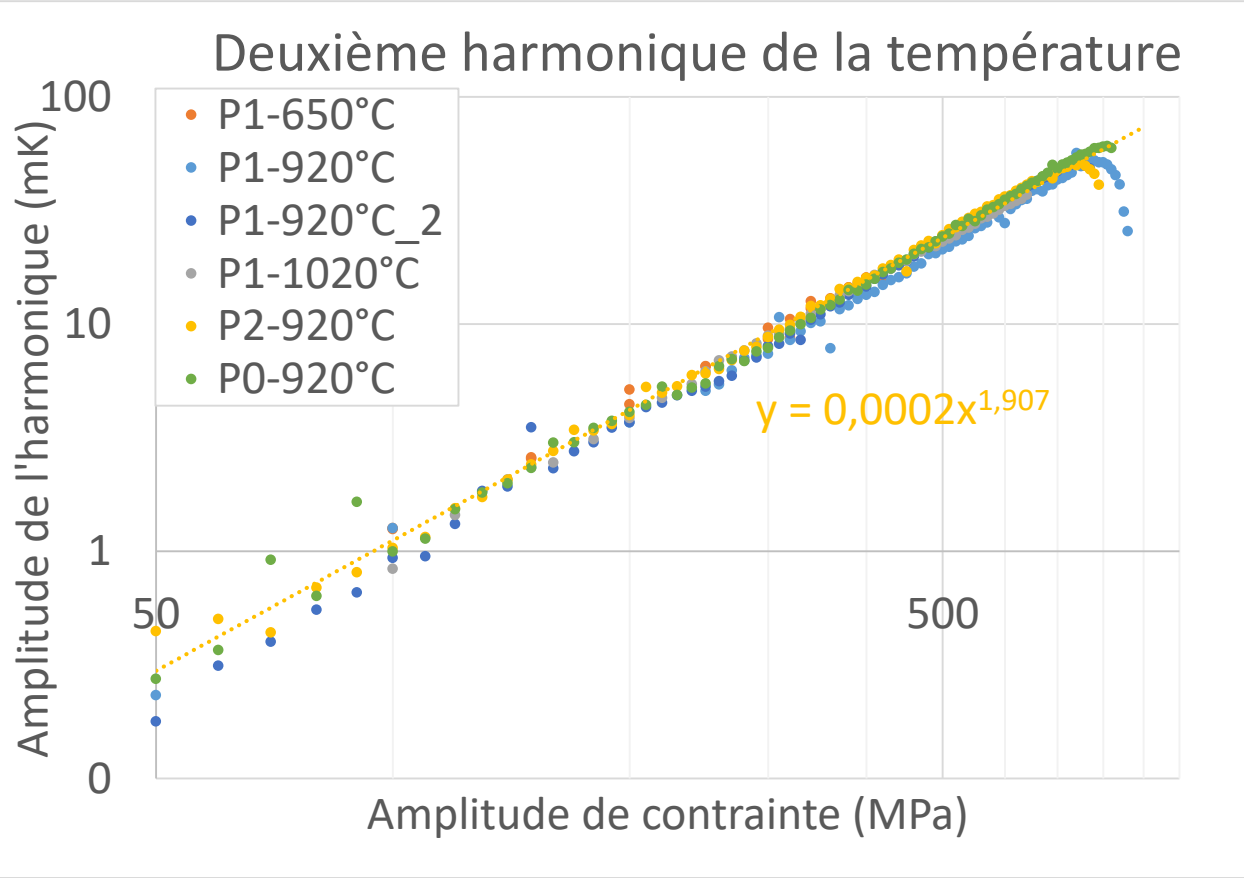
Discussion : effet des pores

Comparaison avec des essais conventionnels de fatigue (en cours) :

- Accord pour les nuances P0_920ºC et P1_1020ºC
- Pour la nuance P1_920ºC accord ou non selon l'étude fractographique à venir



Essais d'autoéchauffement

Analyse de la deuxième harmonique de température :

- Un seul régime d'autoéchauffement avec $A_{2f} \propto \sigma^2$, pas de changement de régime
- Pas de différence significative entre les différentes nuances