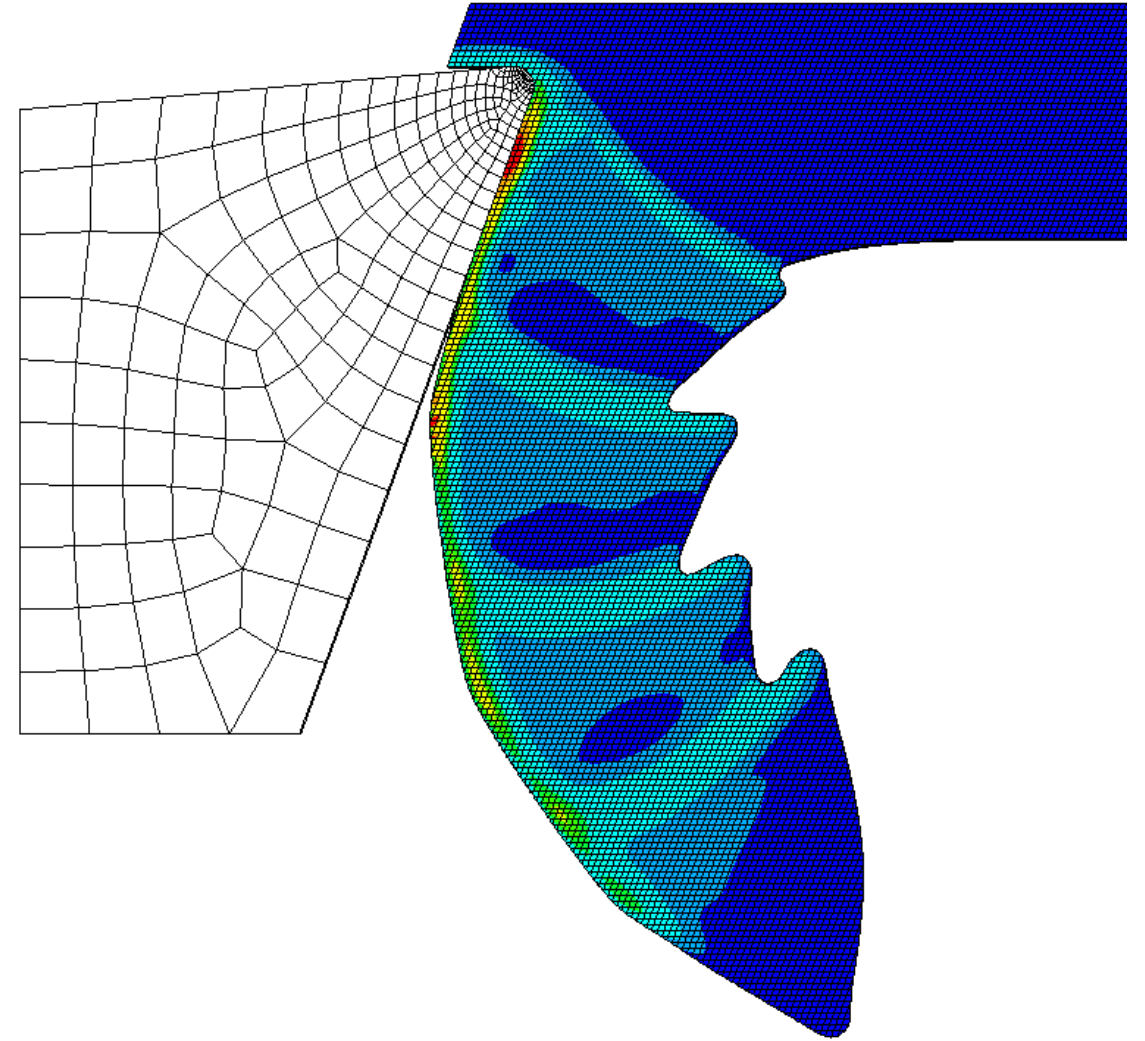
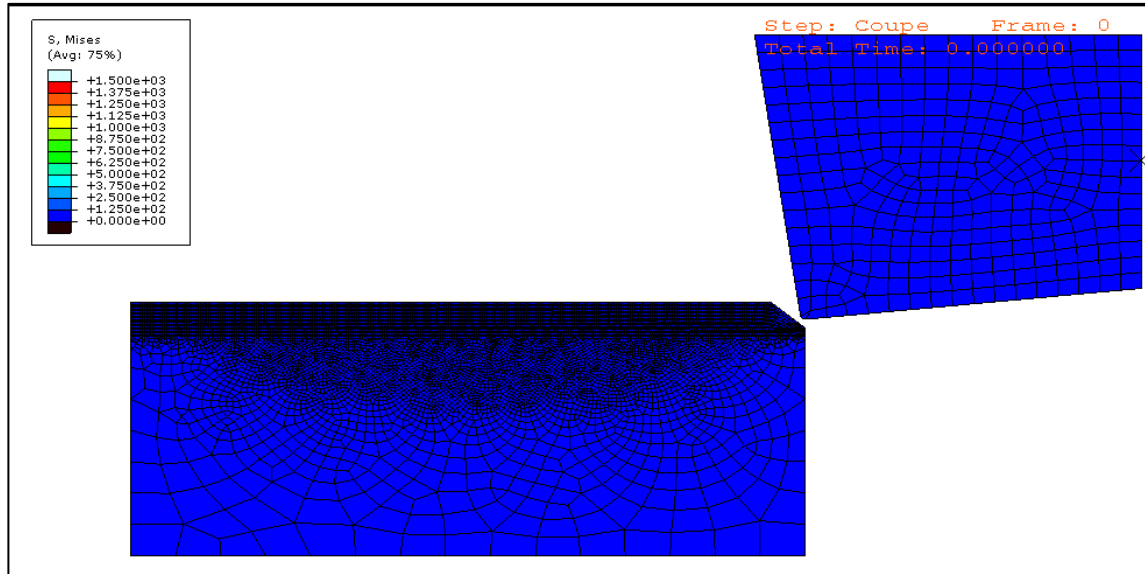


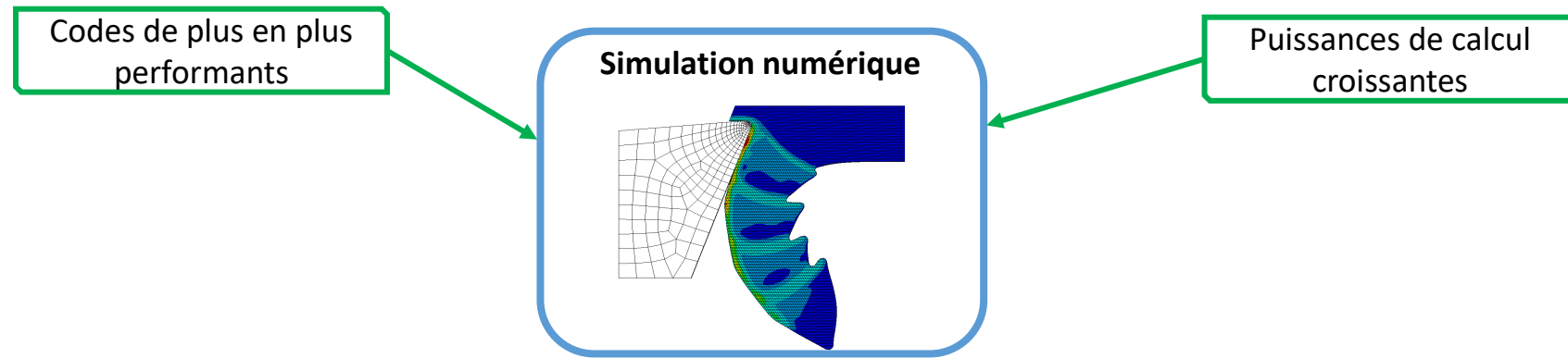
Essais & instrumentation pour la simulation des procédés

François HILD

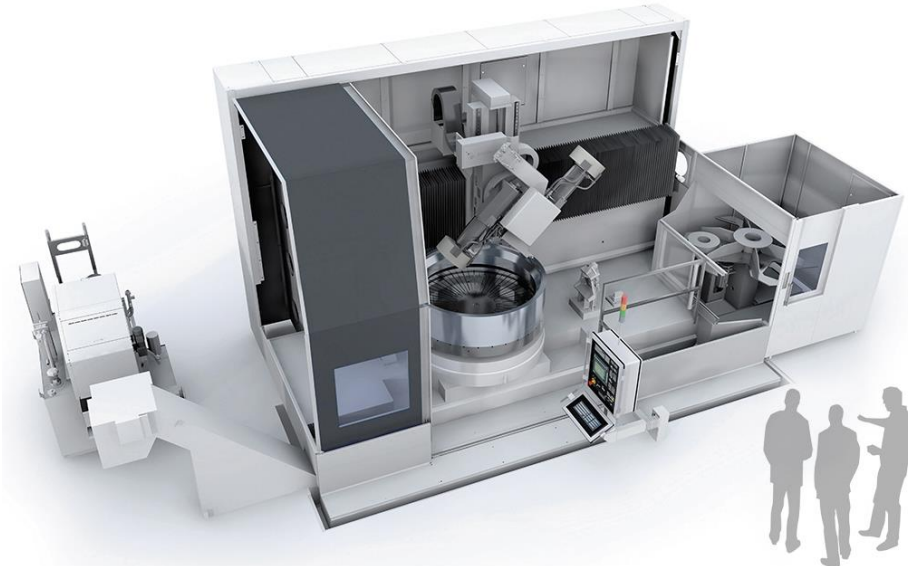
Vous avez dit simulation des procédés ?



Simulation des procédés

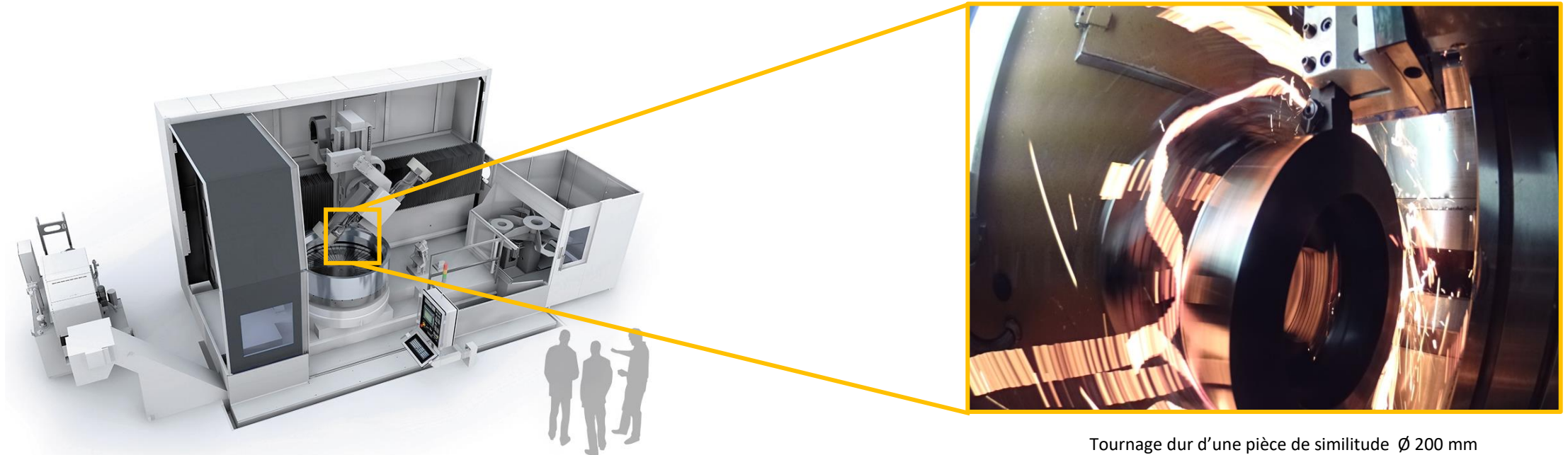


Prévoir l'intégrité de surface



Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]

Prévoir l'intégrité de surface

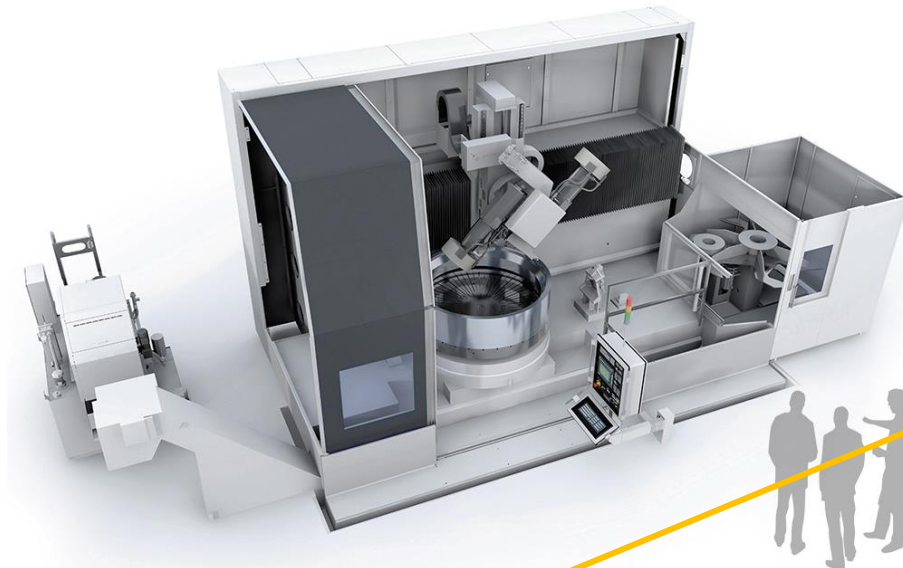


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]

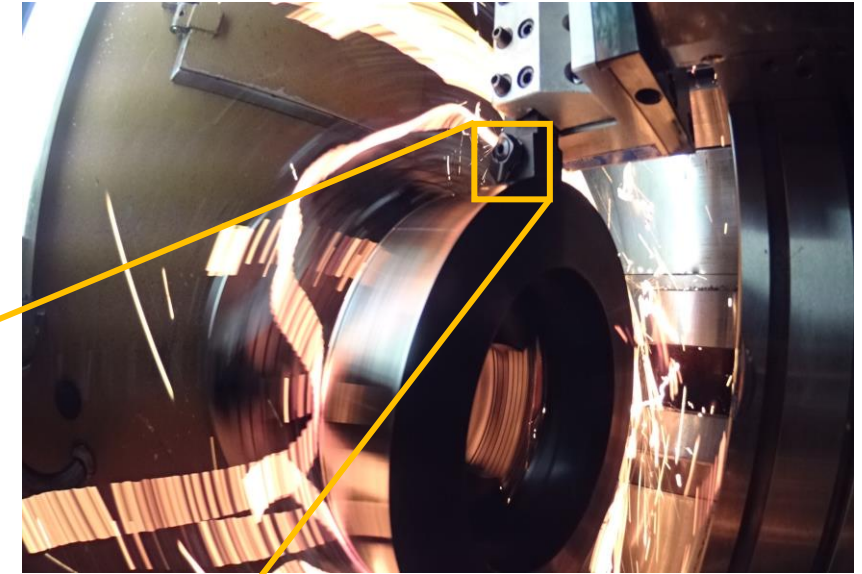
Tournage dur d'une pièce de similitude Ø 200 mm

Paramètres de l'intégrité de surface [Chomienne14]
Schéma du chariotage

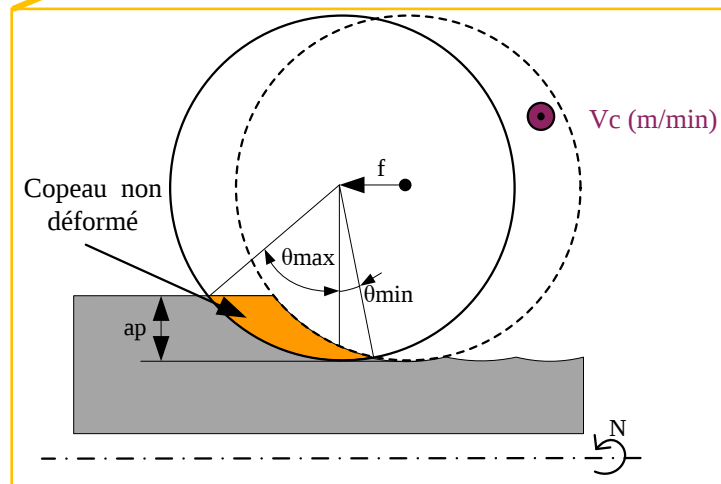
Prévoir l'intégrité de surface



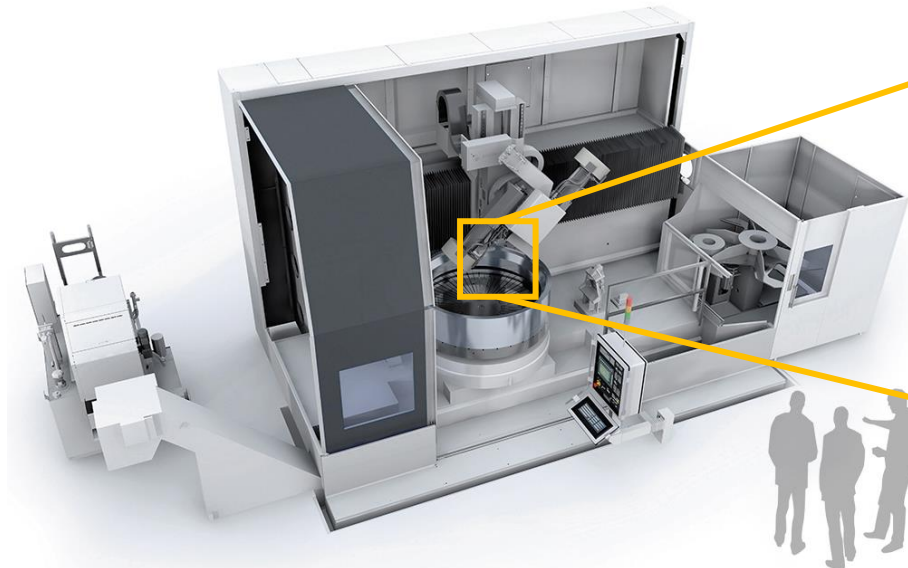
Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]



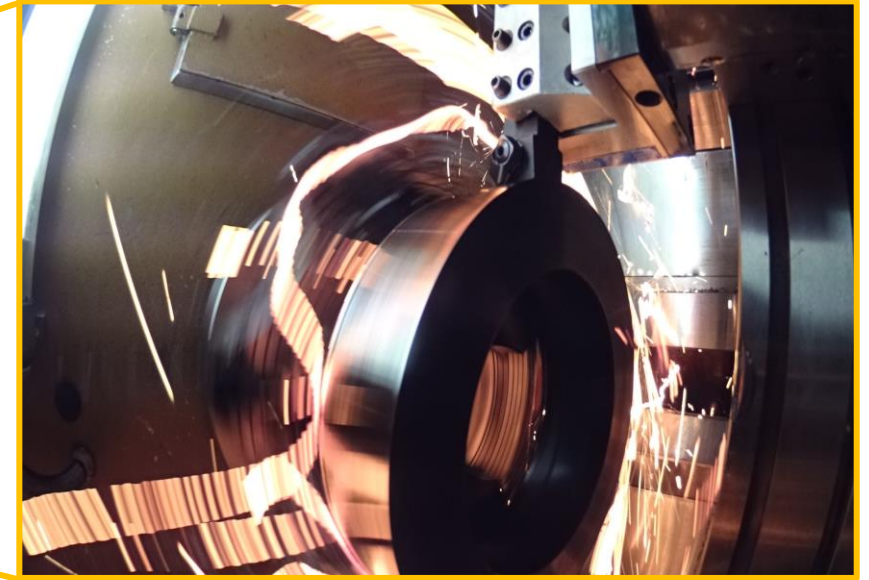
Tournage dur d'une pièce de similitude Ø 200 mm



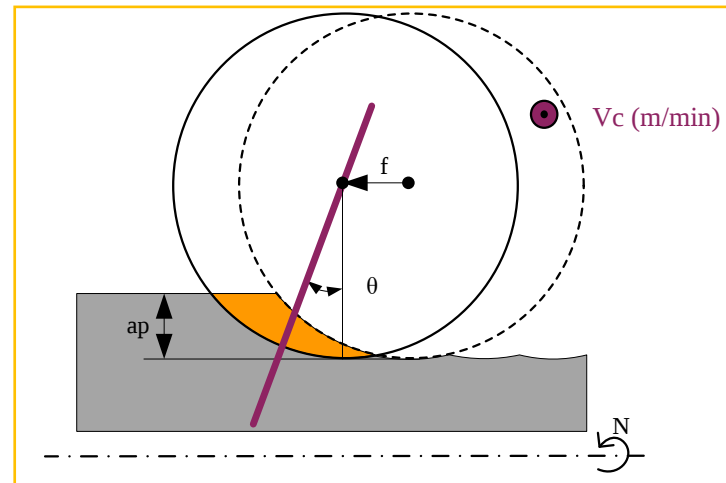
Prévoir l'intégrité de surface



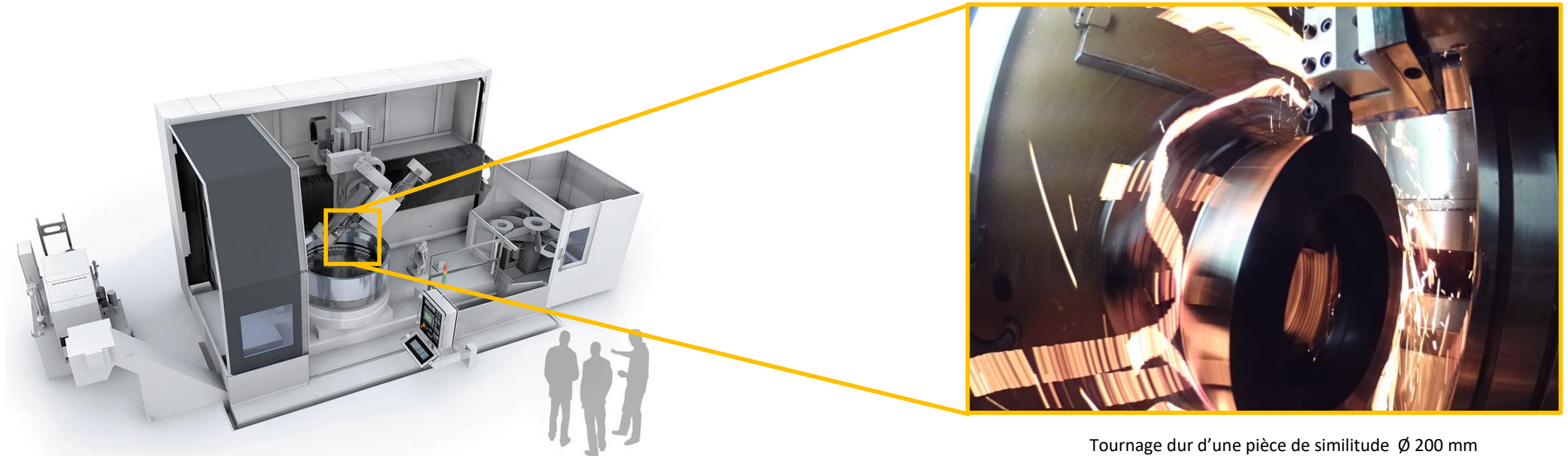
Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 $\varnothing$ 4500 mm [Berthiez 2016]



Tournage dur d'une pièce de similitude $\varnothing$ 200 mm

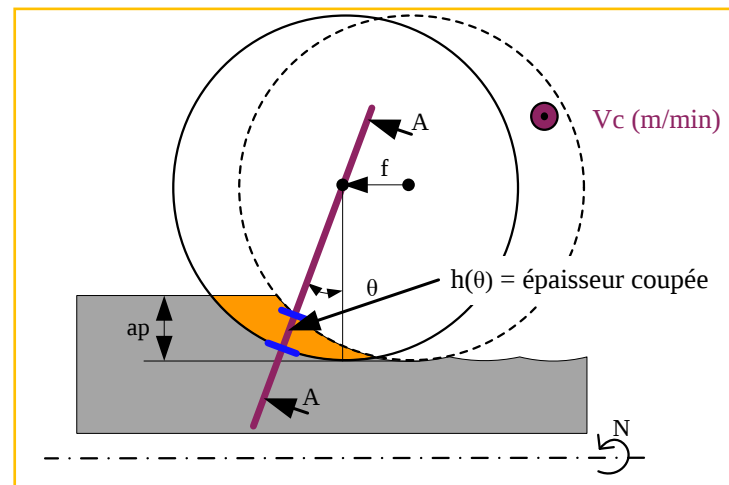


Prévoir l'intégrité de surface

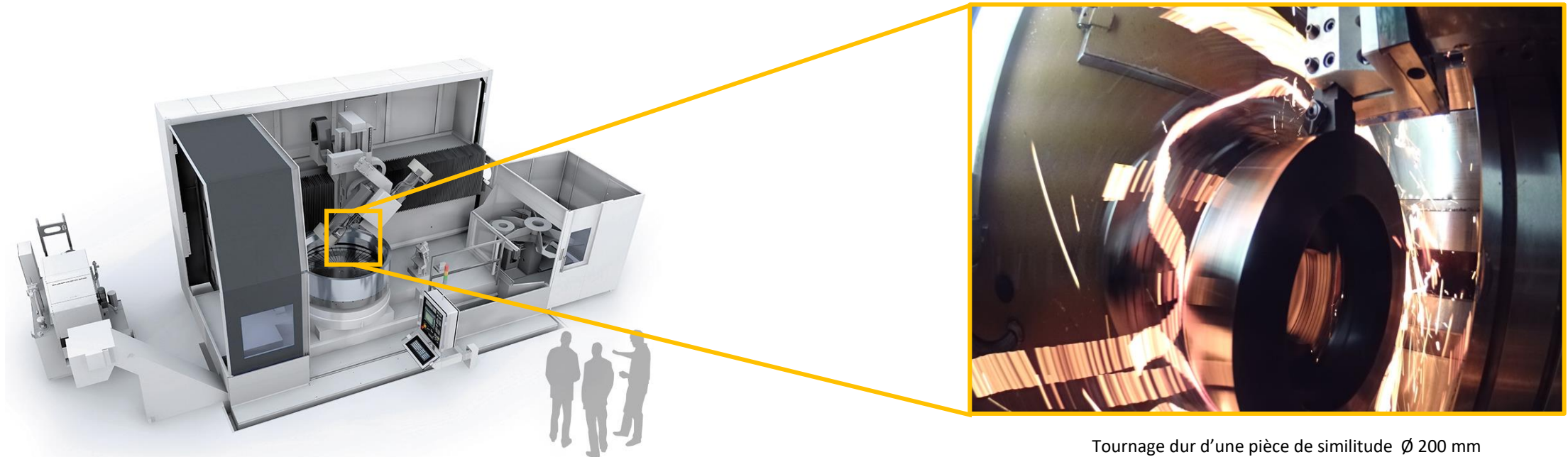


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 $\varnothing$ 4500 mm [Berthiez 2016]

Tournage dur d'une pièce de similitude $\varnothing$ 200 mm

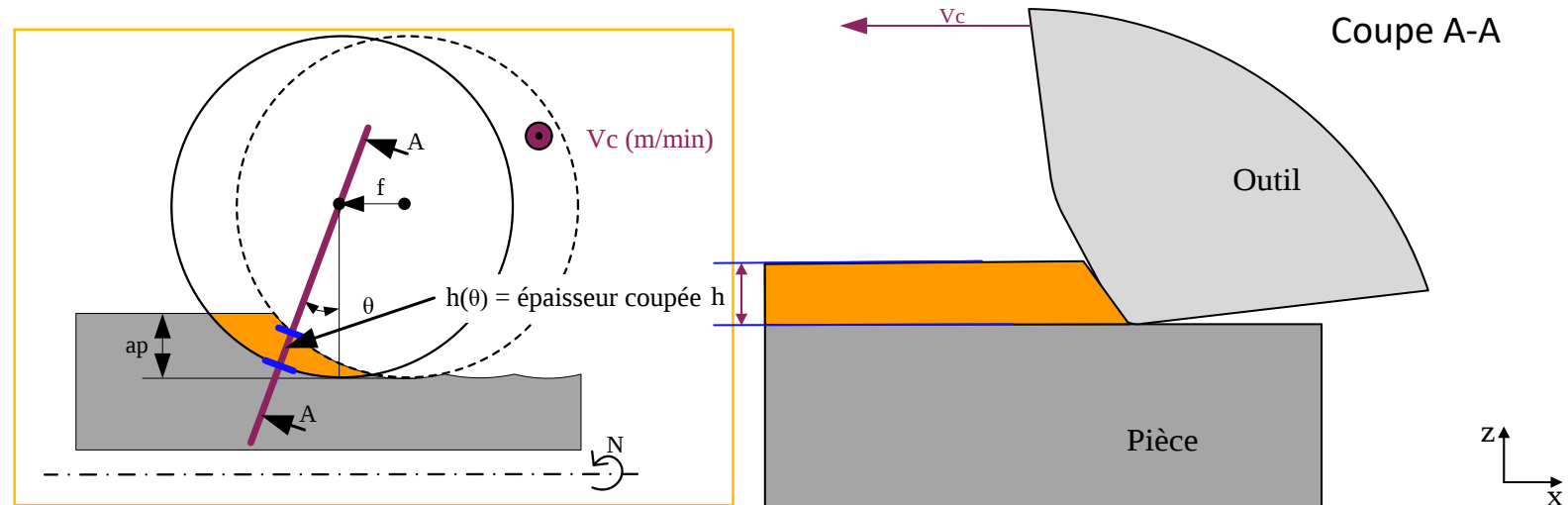


Prévoir l'intégrité de surface

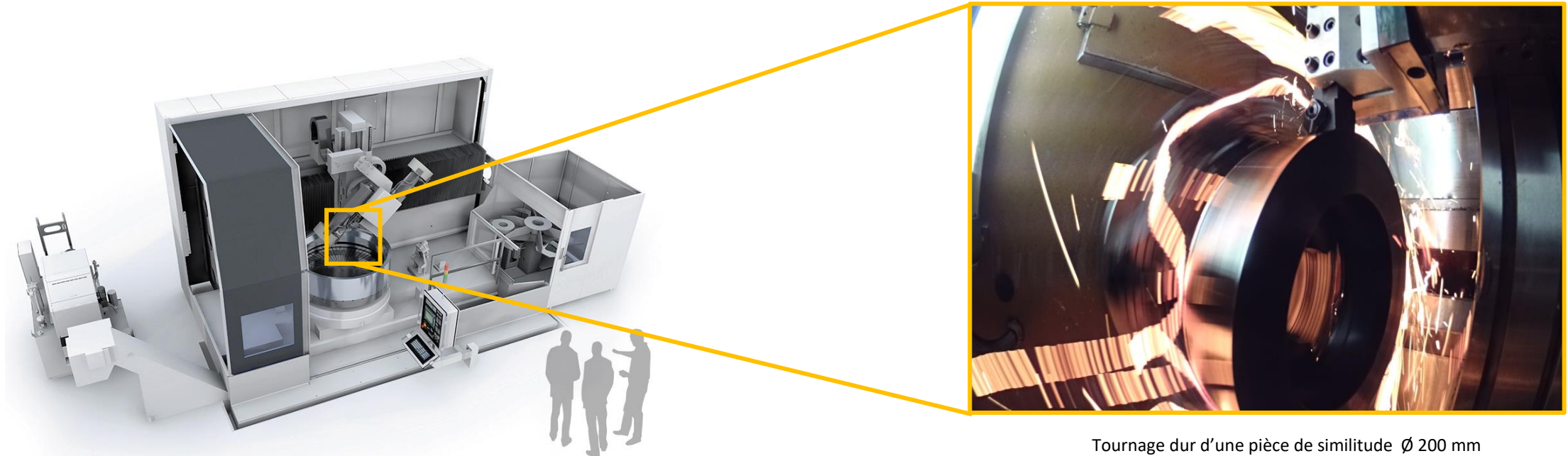


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]

Tournage dur d'une pièce de similitude Ø 200 mm

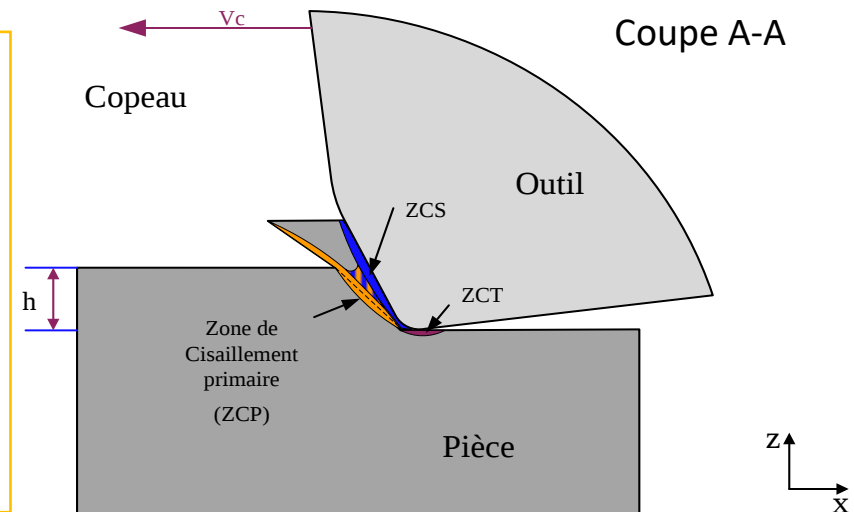
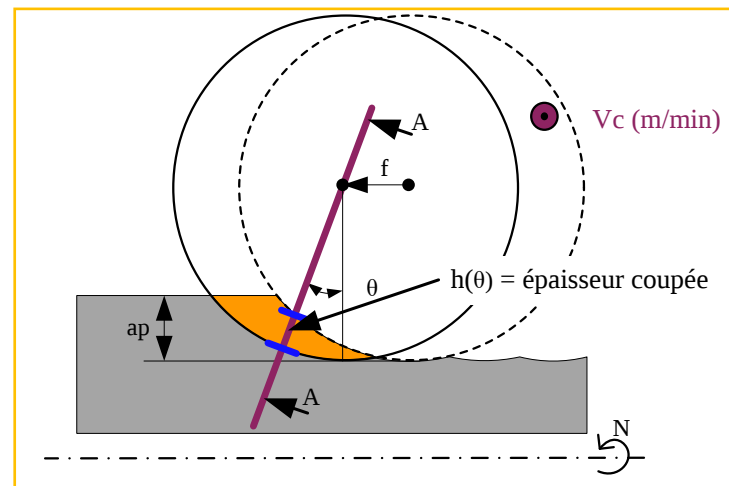


Prévoir l'intégrité de surface

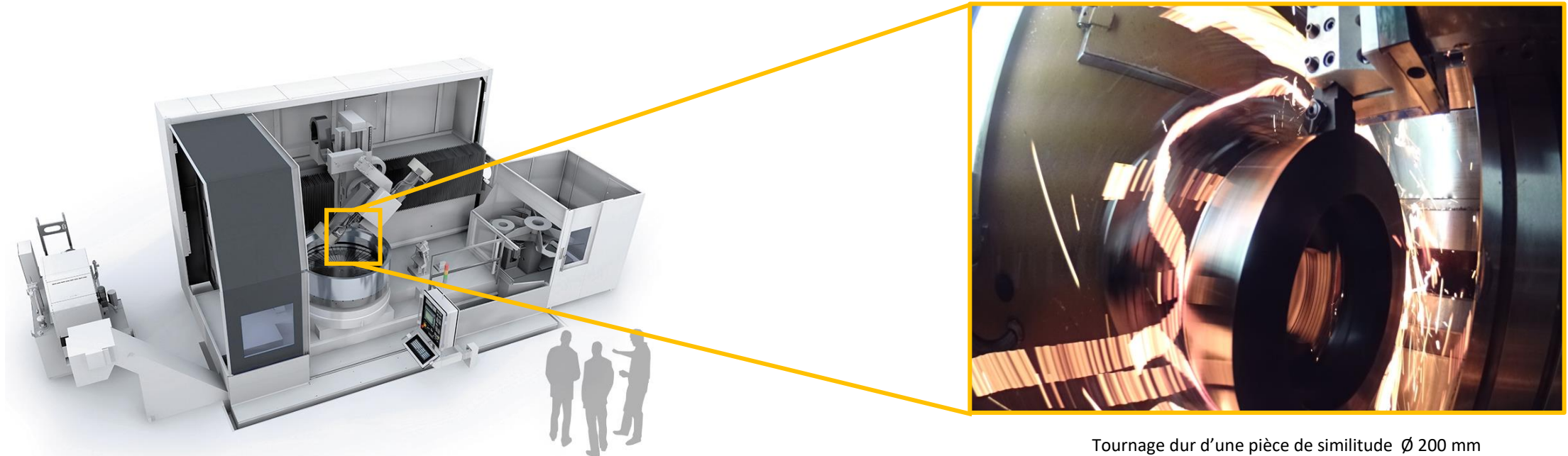


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]

Tournage dur d'une pièce de similitude Ø 200 mm

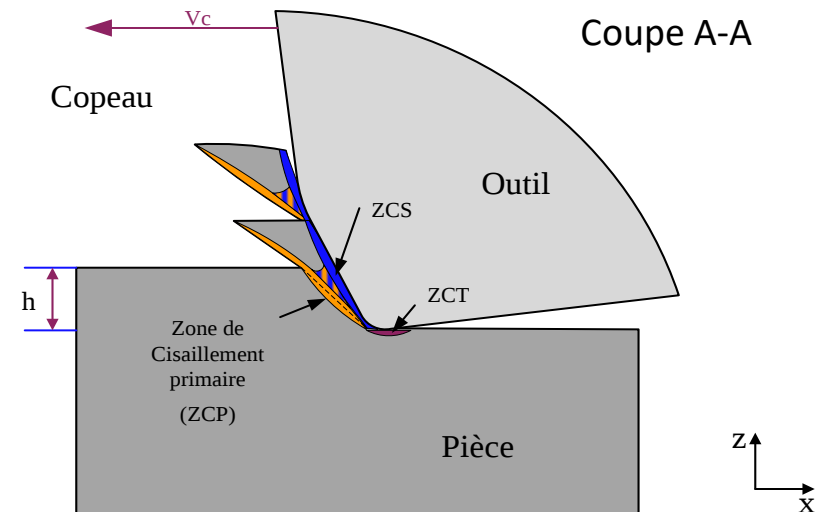
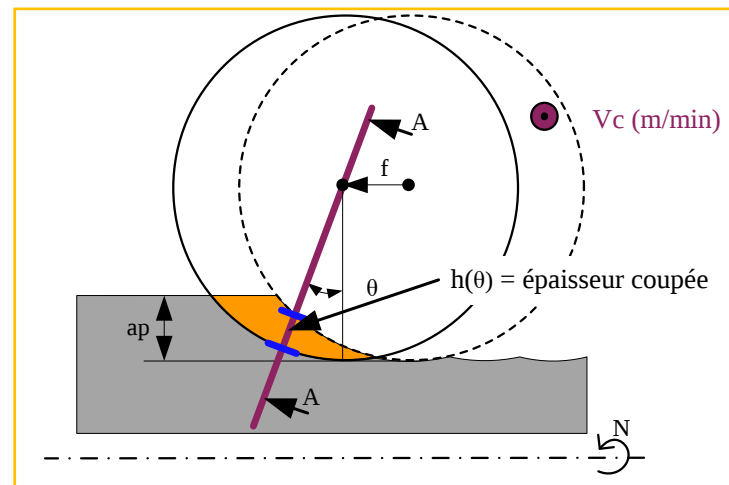


Prévoir l'intégrité de surface

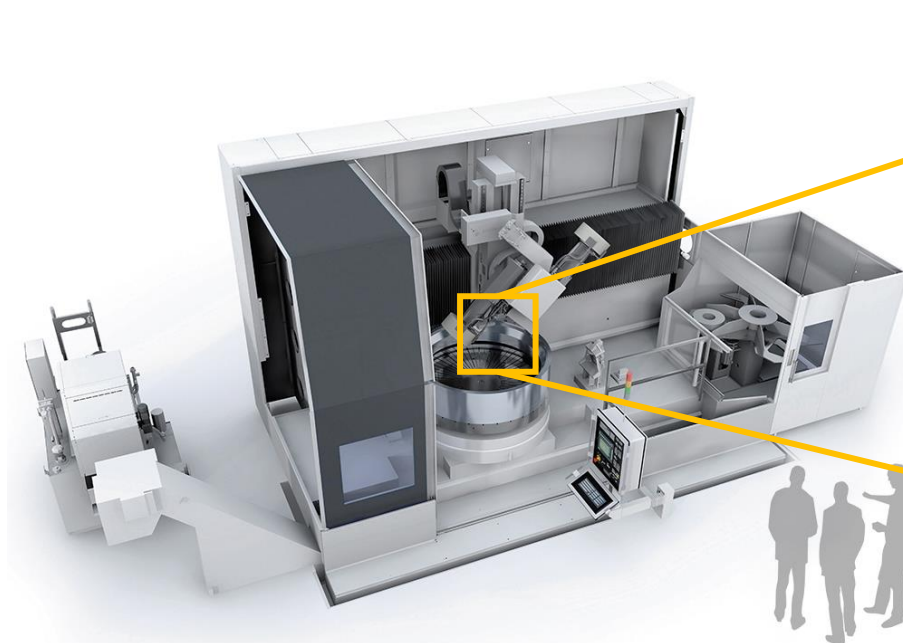


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 $\varnothing$ 4500 mm [Berthiez 2016]

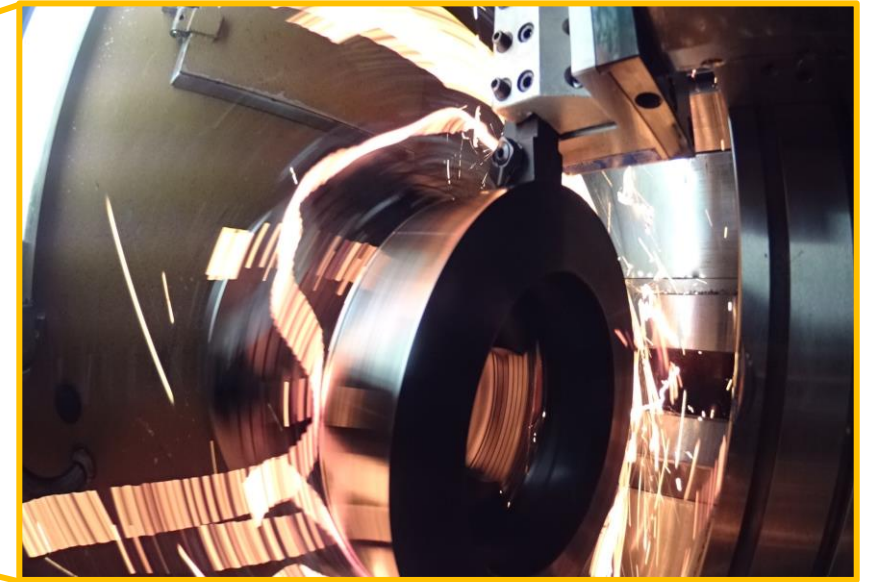
Tournage dur d'une pièce de similitude $\varnothing$ 200 mm



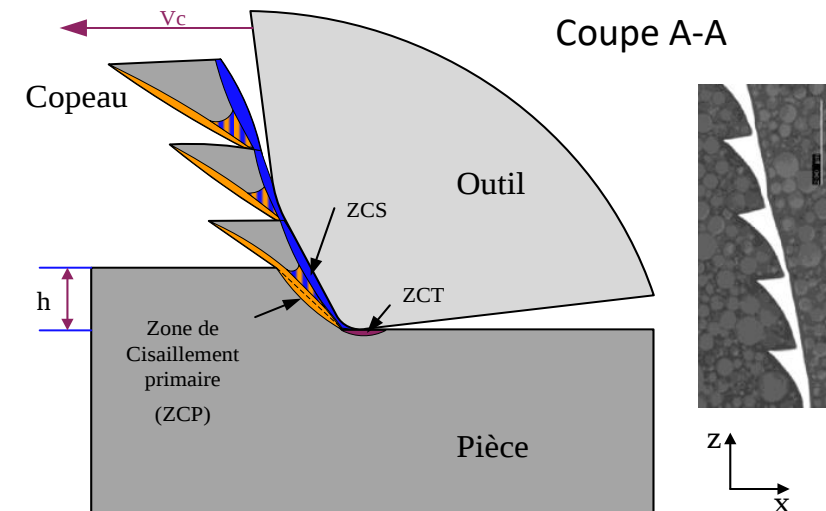
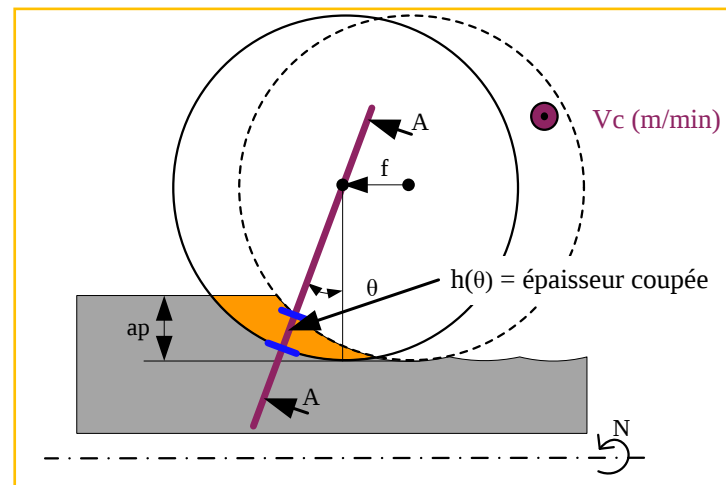
Prévoir l'intégrité de surface



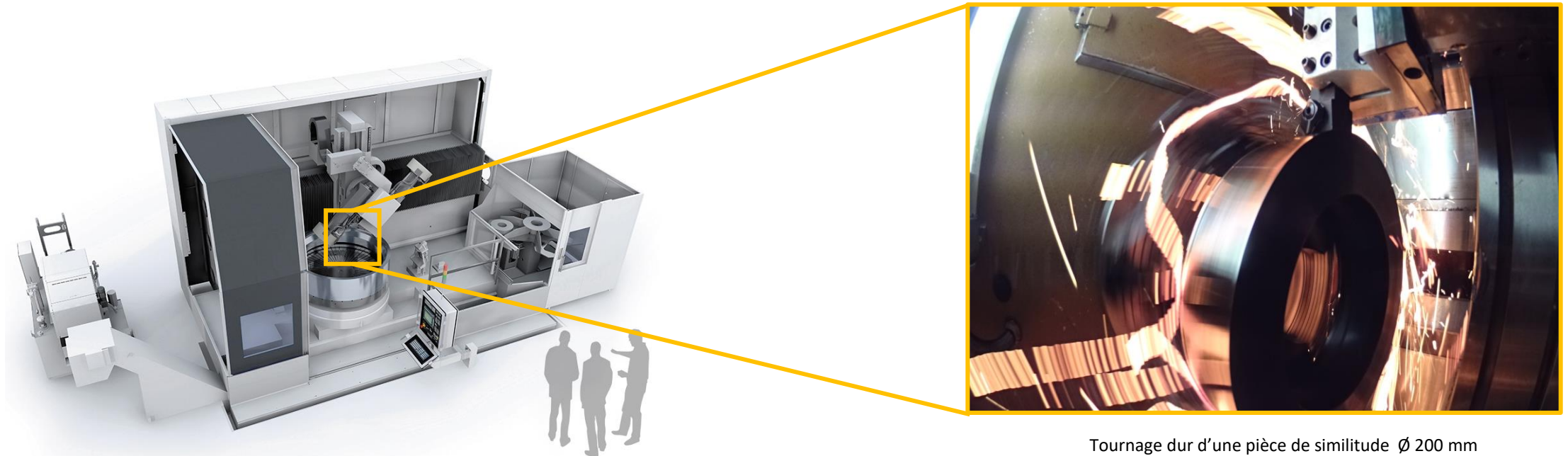
Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 $\varnothing$ 4500 mm [Berthiez 2016]



Tournage dur d'une pièce de similitude $\varnothing$ 200 mm

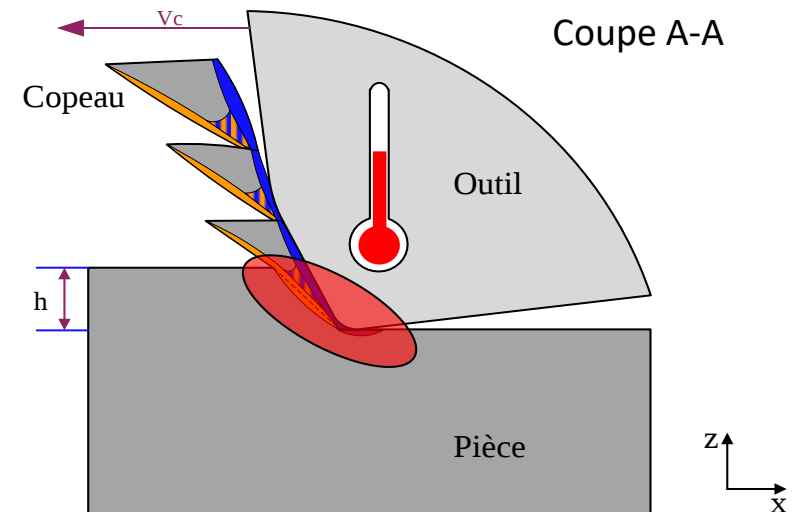
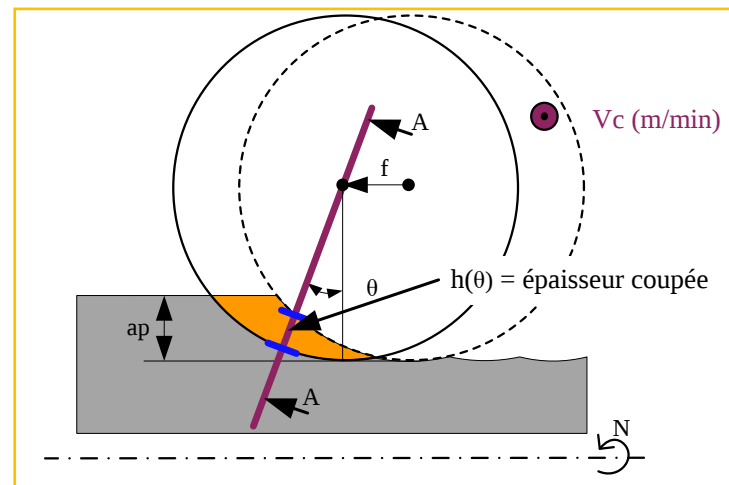


Prévoir l'intégrité de surface

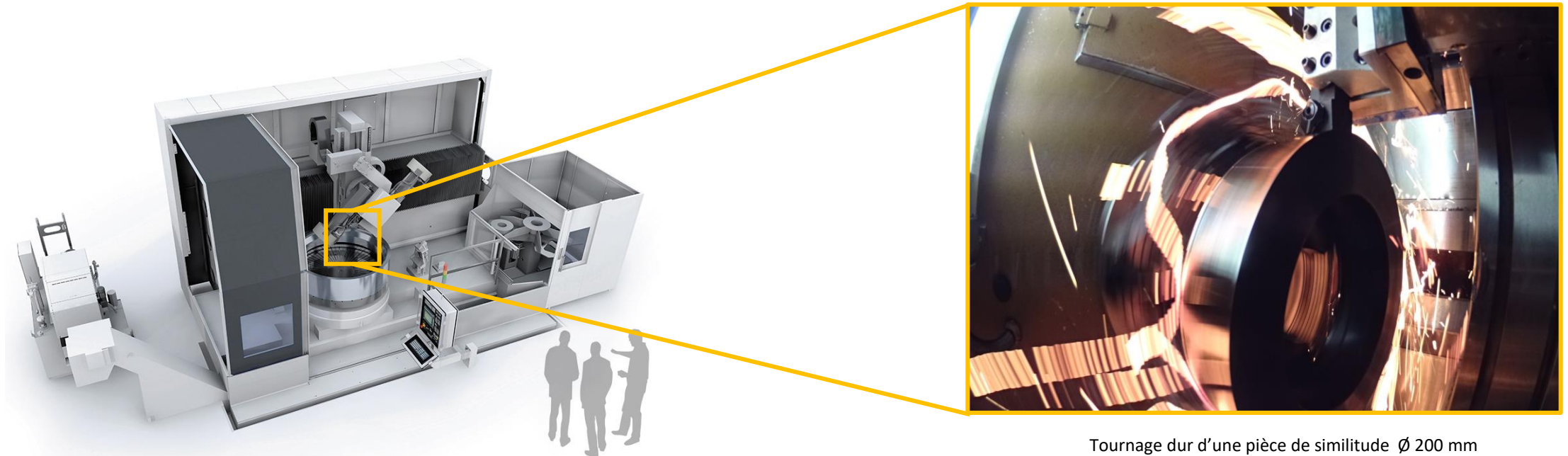


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]

Tournage dur d'une pièce de similitude Ø 200 mm

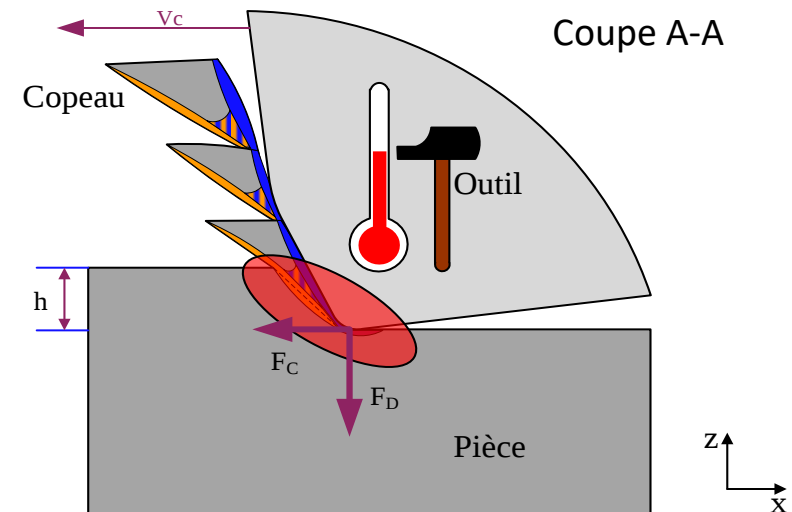
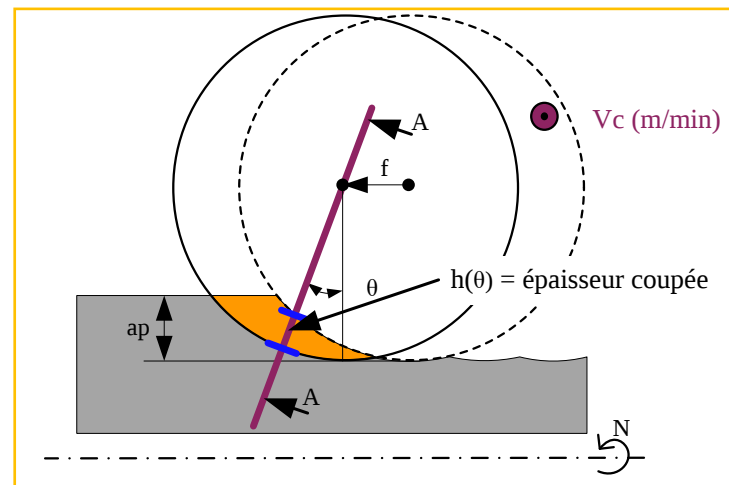


Prévoir l'intégrité de surface

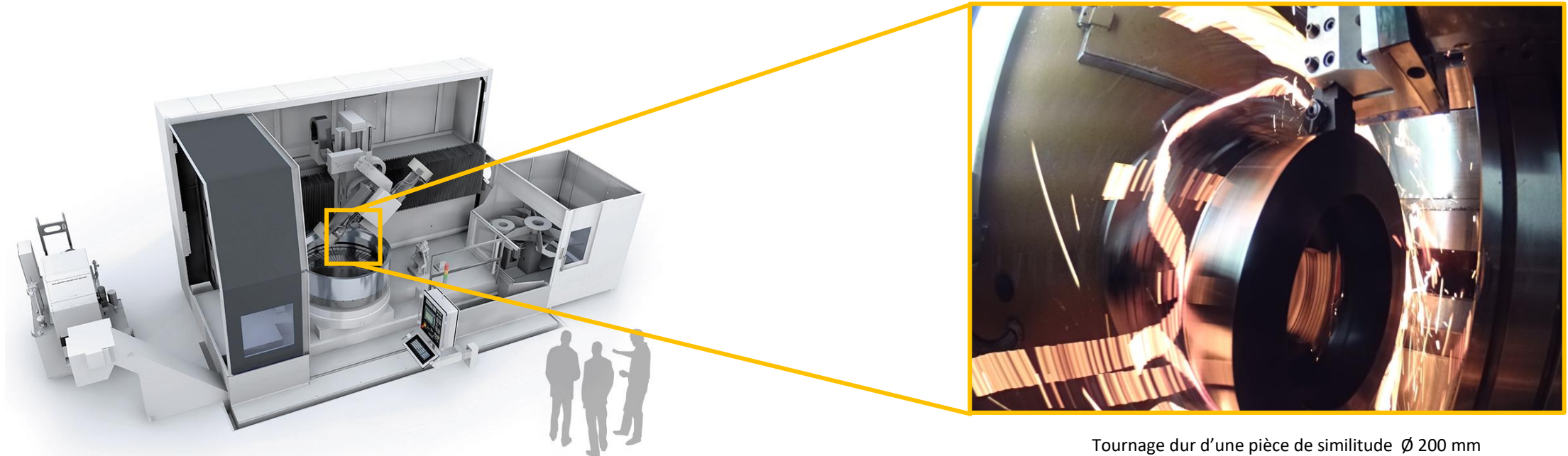


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]

Tournage dur d'une pièce de similitude Ø 200 mm

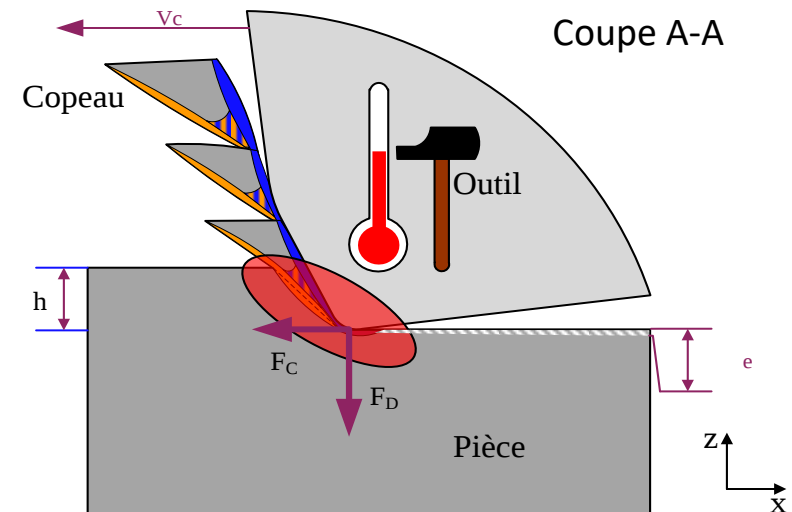
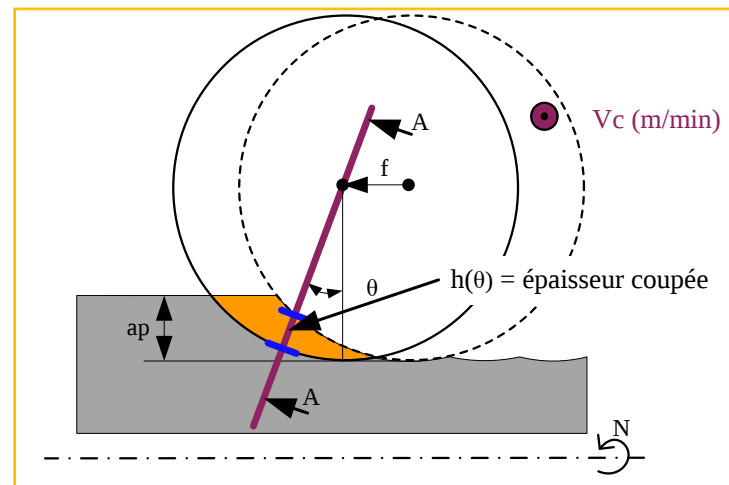


Prévoir l'intégrité de surface

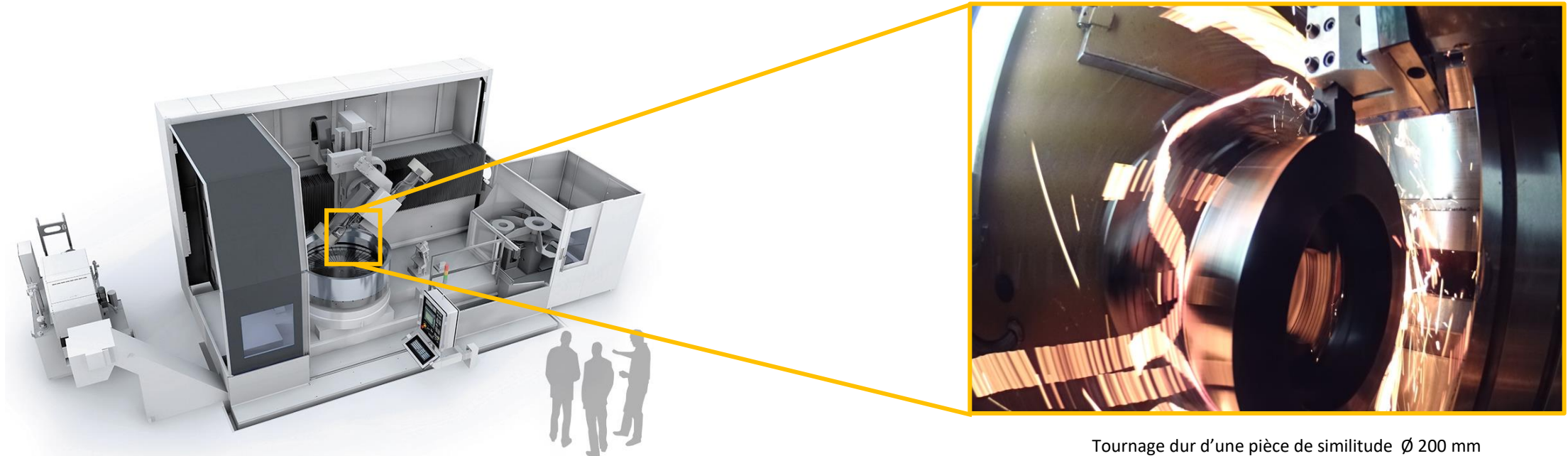


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]

Tournage dur d'une pièce de similitude Ø 200 mm

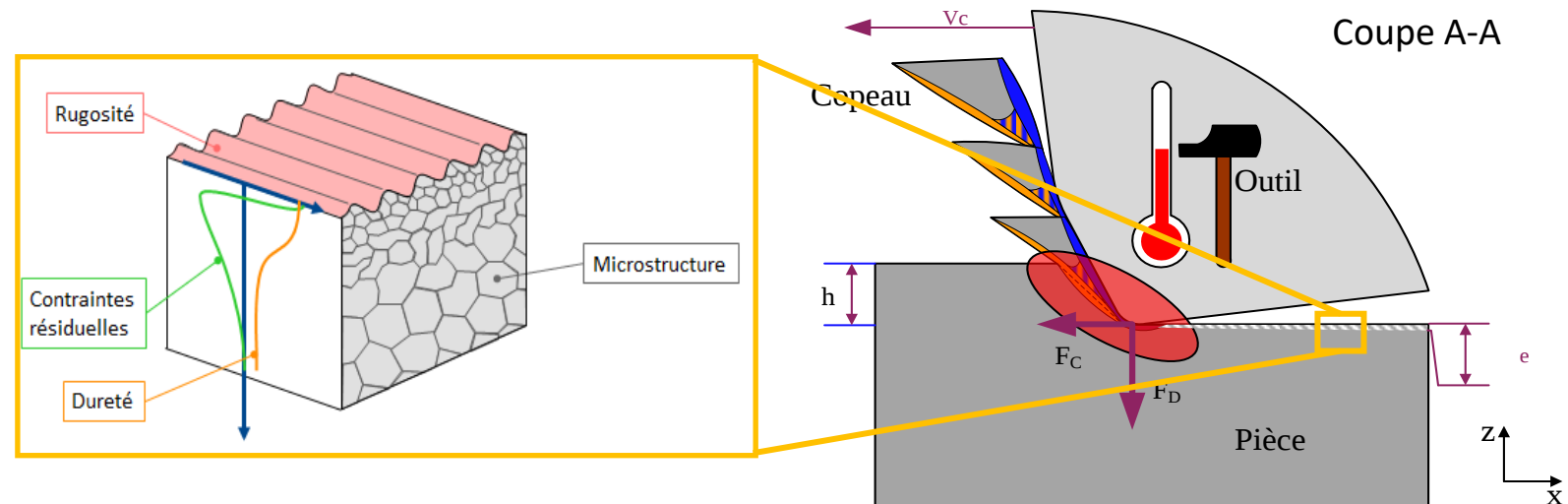


Prévoir l'intégrité de surface

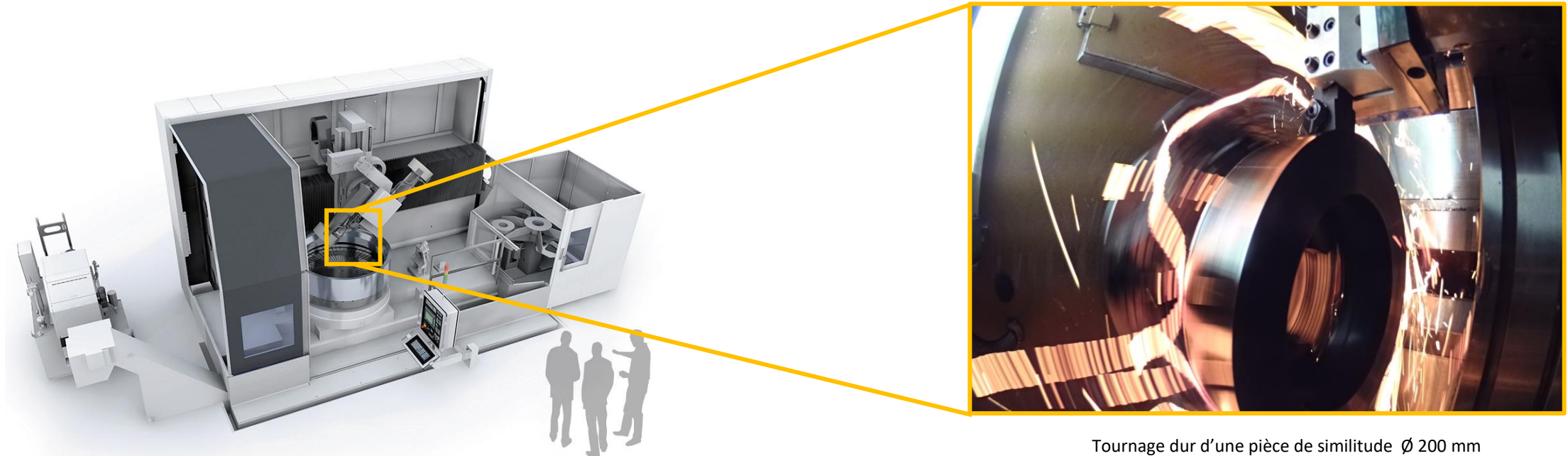


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 $\varnothing$ 4500 mm [Berthiez 2016]

Tournage dur d'une pièce de similitude $\varnothing$ 200 mm

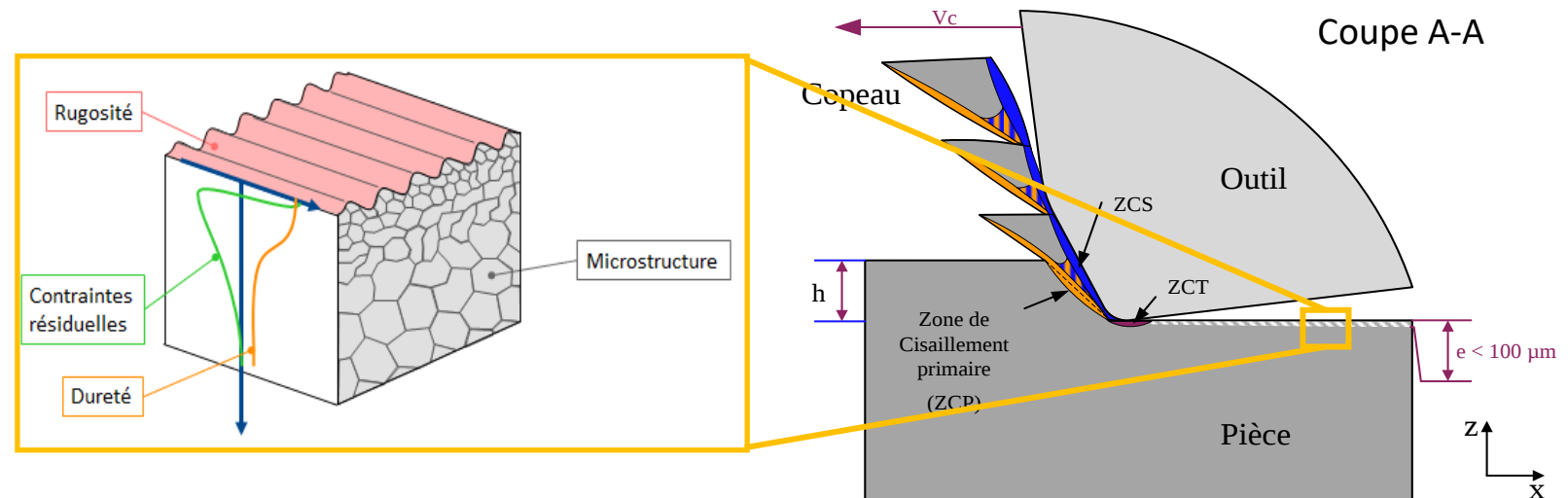


Prévoir l'intégrité de surface

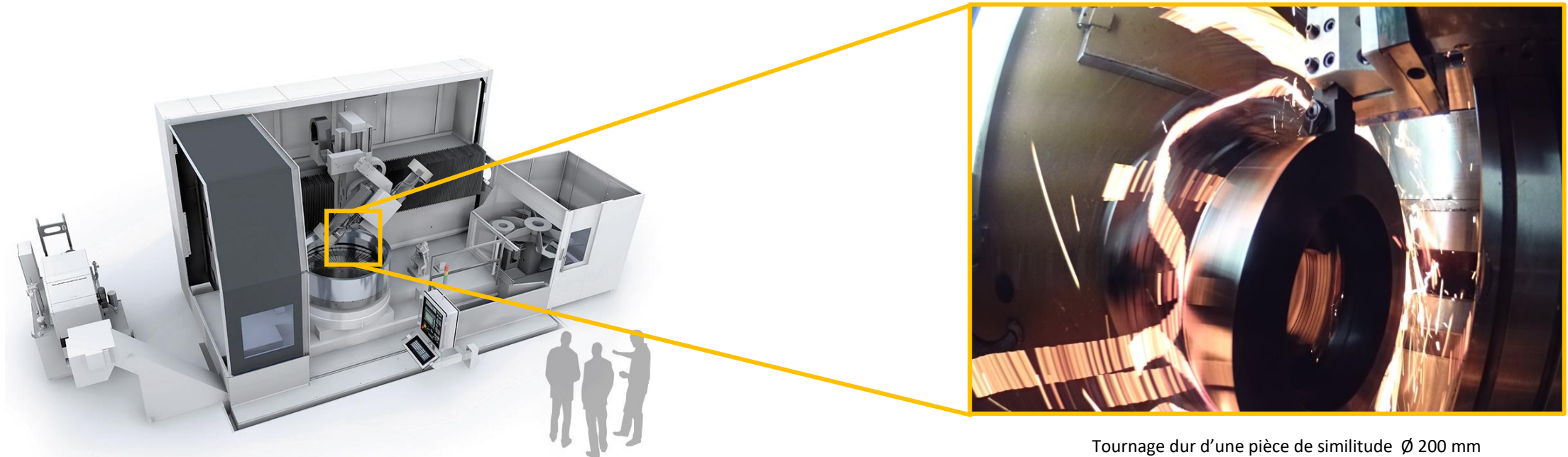


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 $\varnothing$ 4500 mm [Berthiez 2016]

Tournage dur d'une pièce de similitude $\varnothing$ 200 mm

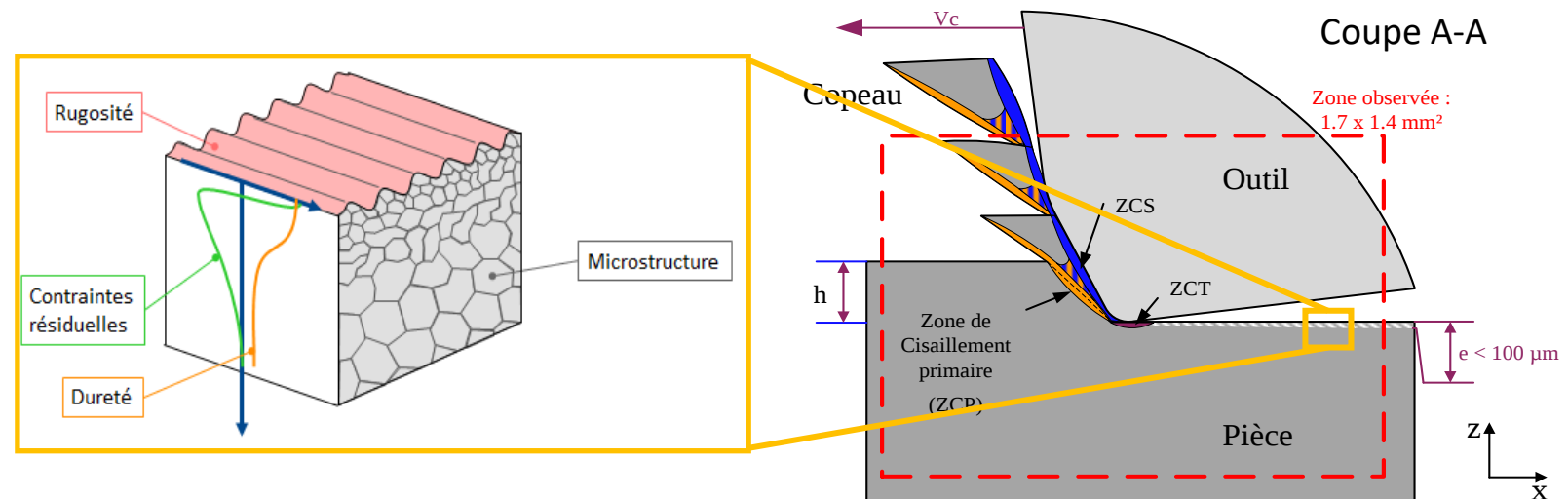


Prévoir l'intégrité de surface

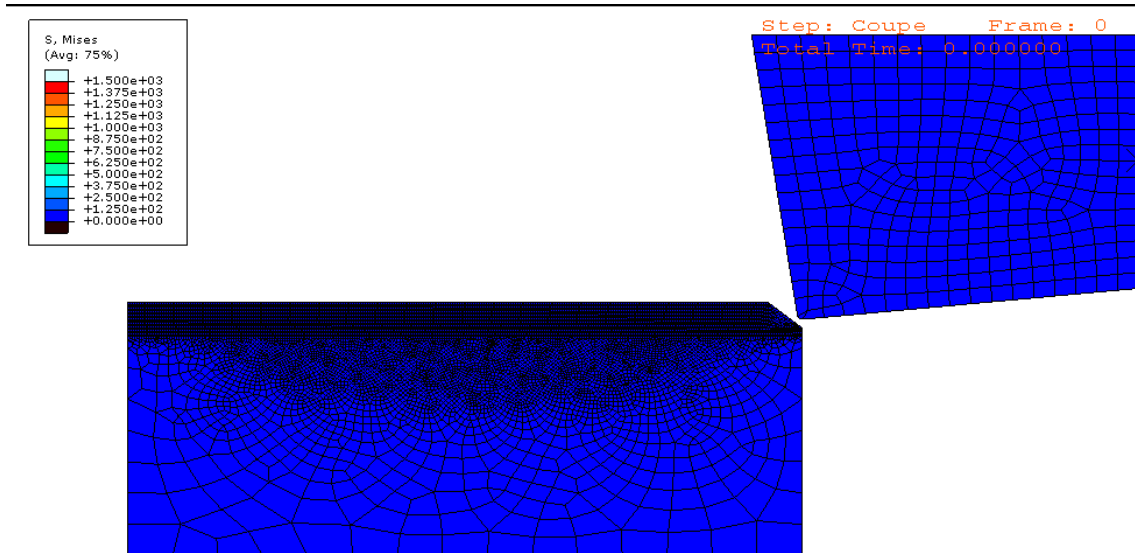


Centre de tournage/rectification RVU 4700/450 Ø 4500 mm [Berthiez 2016]

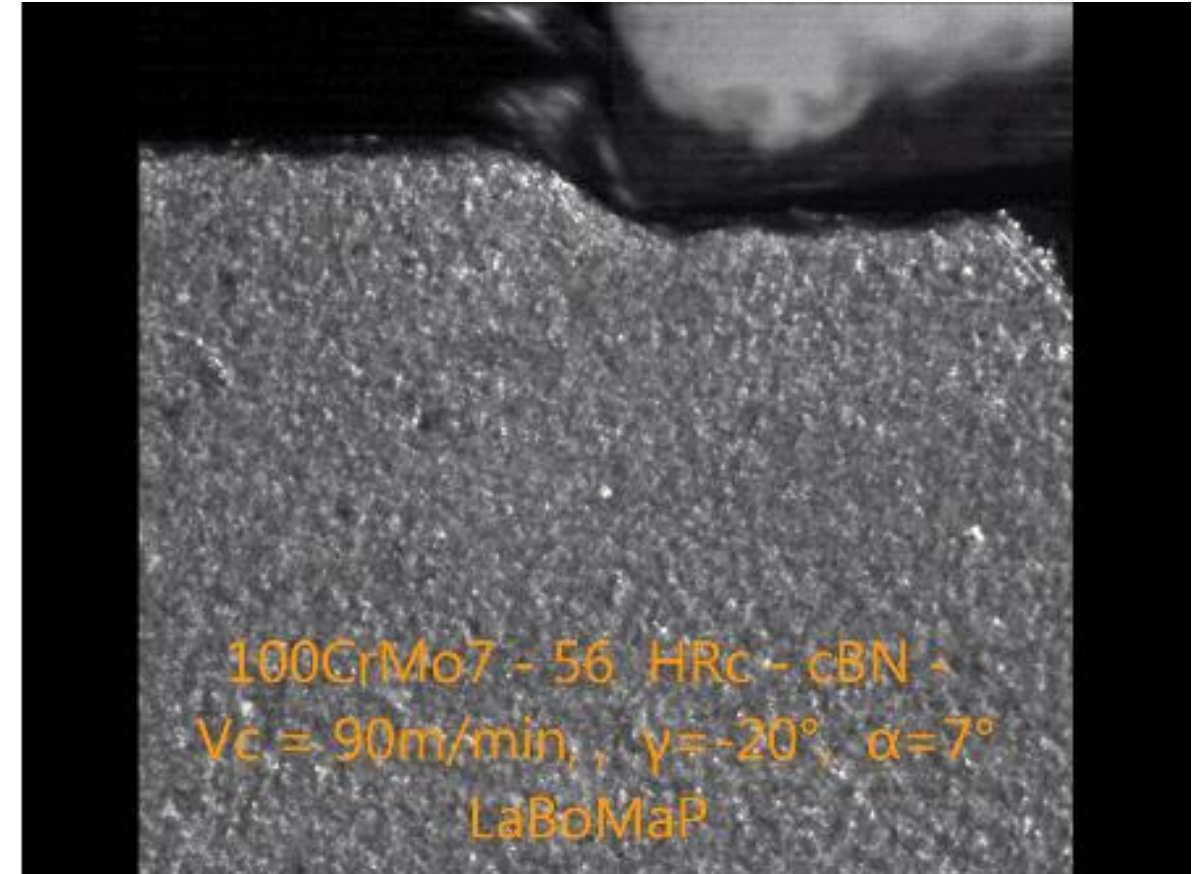
Tournage dur d'une pièce de similitude $\varnothing$ 200 mm



Simulation crédible ?

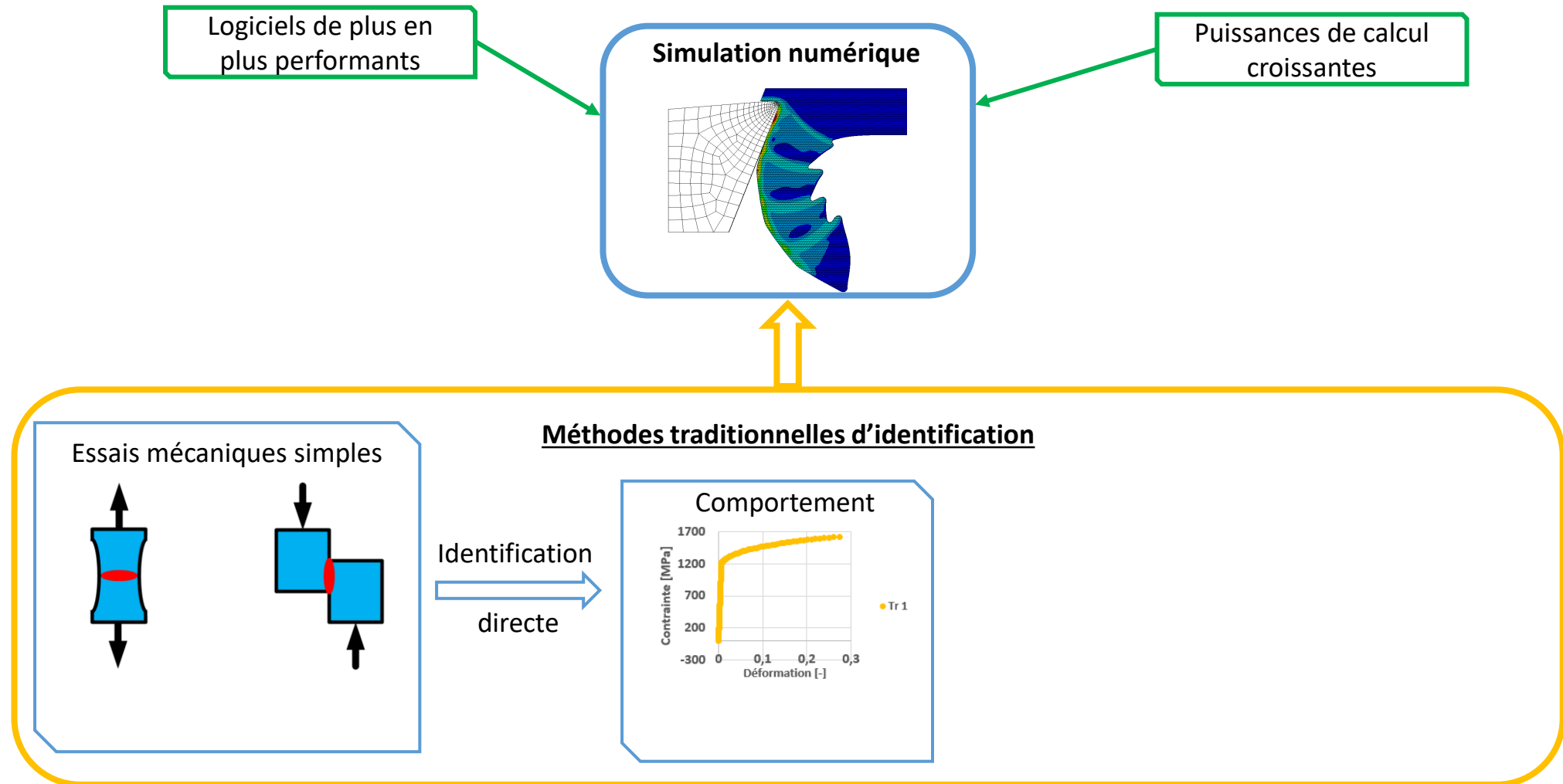


Rabotage 100CrMo7, $V_c = 60$ m/min, $\gamma_n = -20^\circ$, $\alpha_n = 7^\circ$
(contrainte équivalente Von Mises)

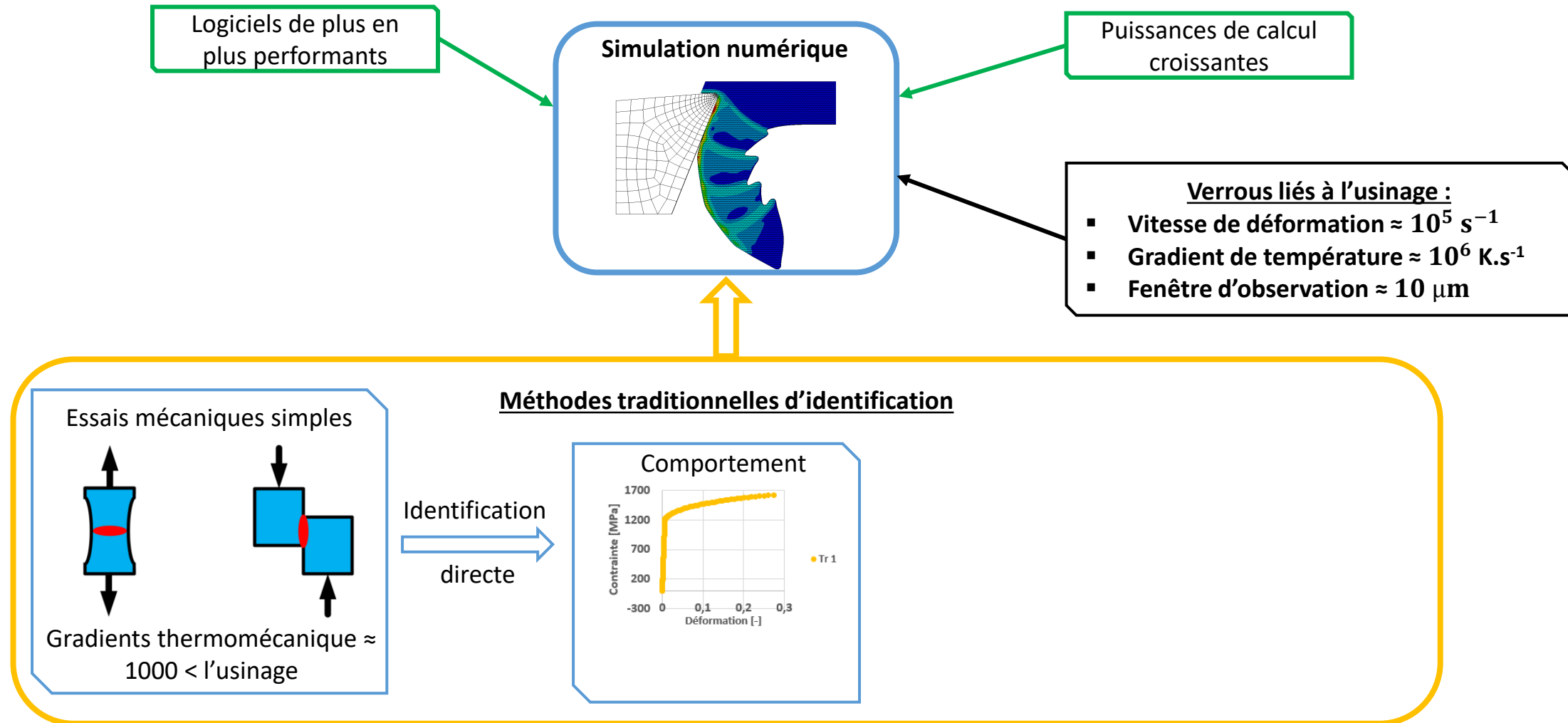


Rabotage du 100CrMo7, $V_c = 90$ m/min, $\gamma_n = -20^\circ$, $\alpha_n = 7^\circ$

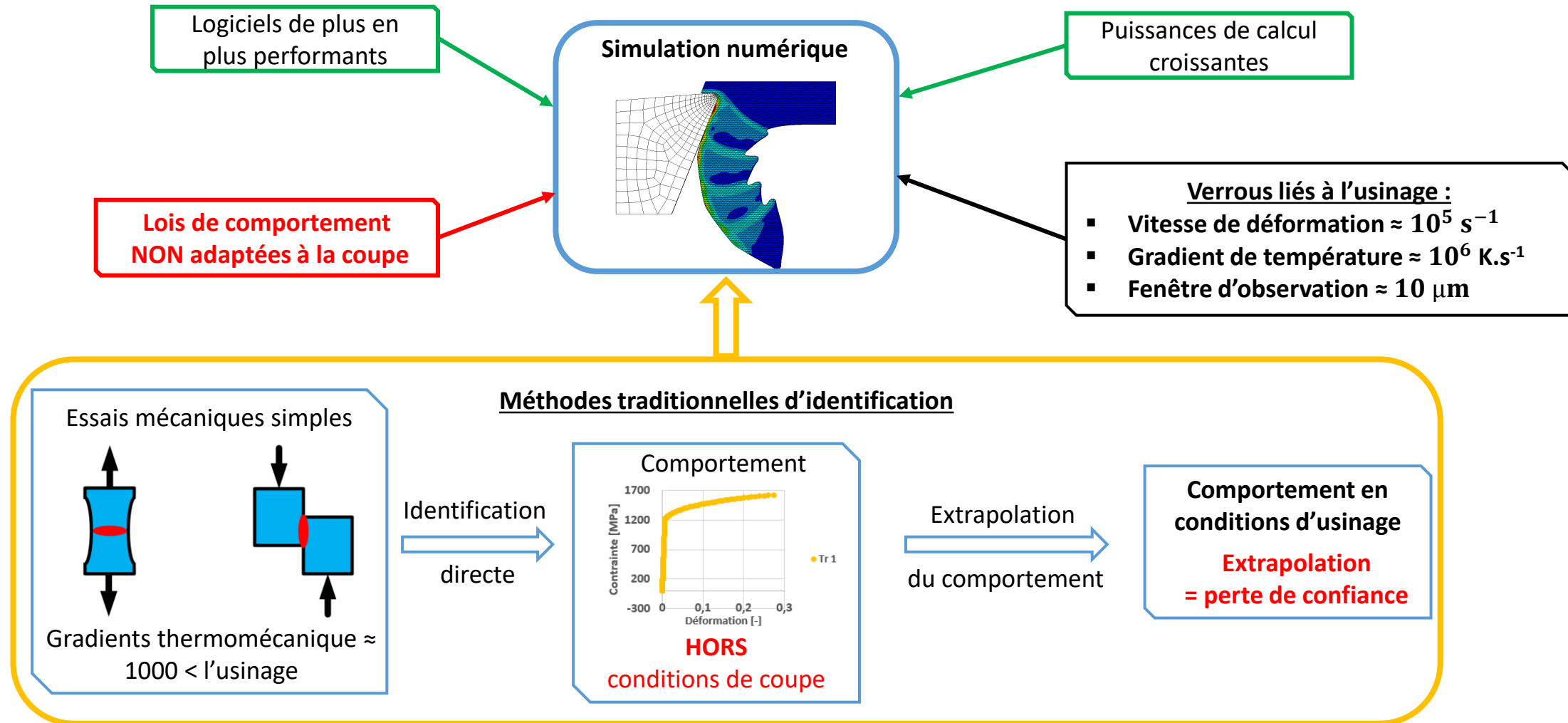
Simulation des procédés



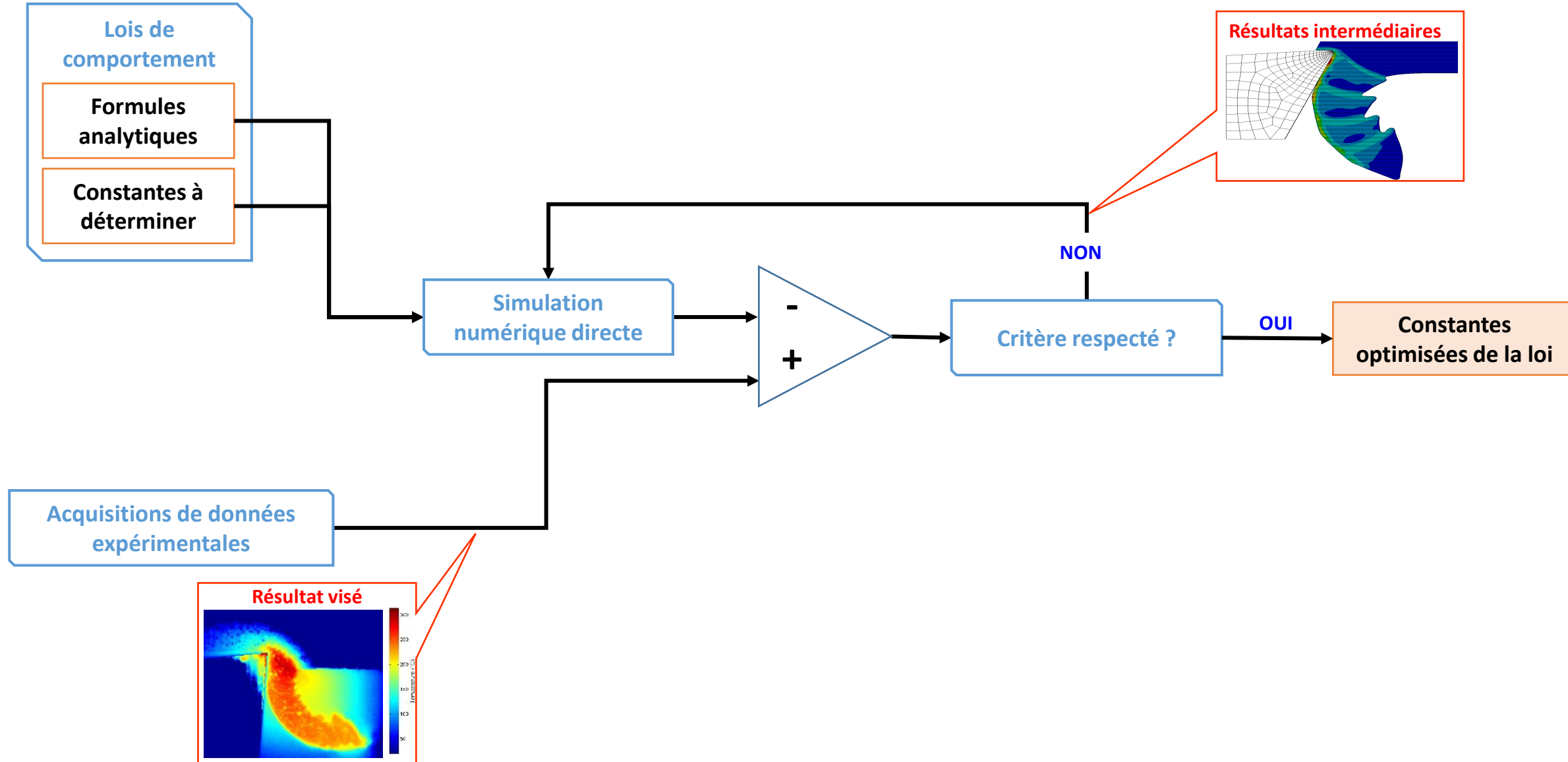
Simulation des procédés



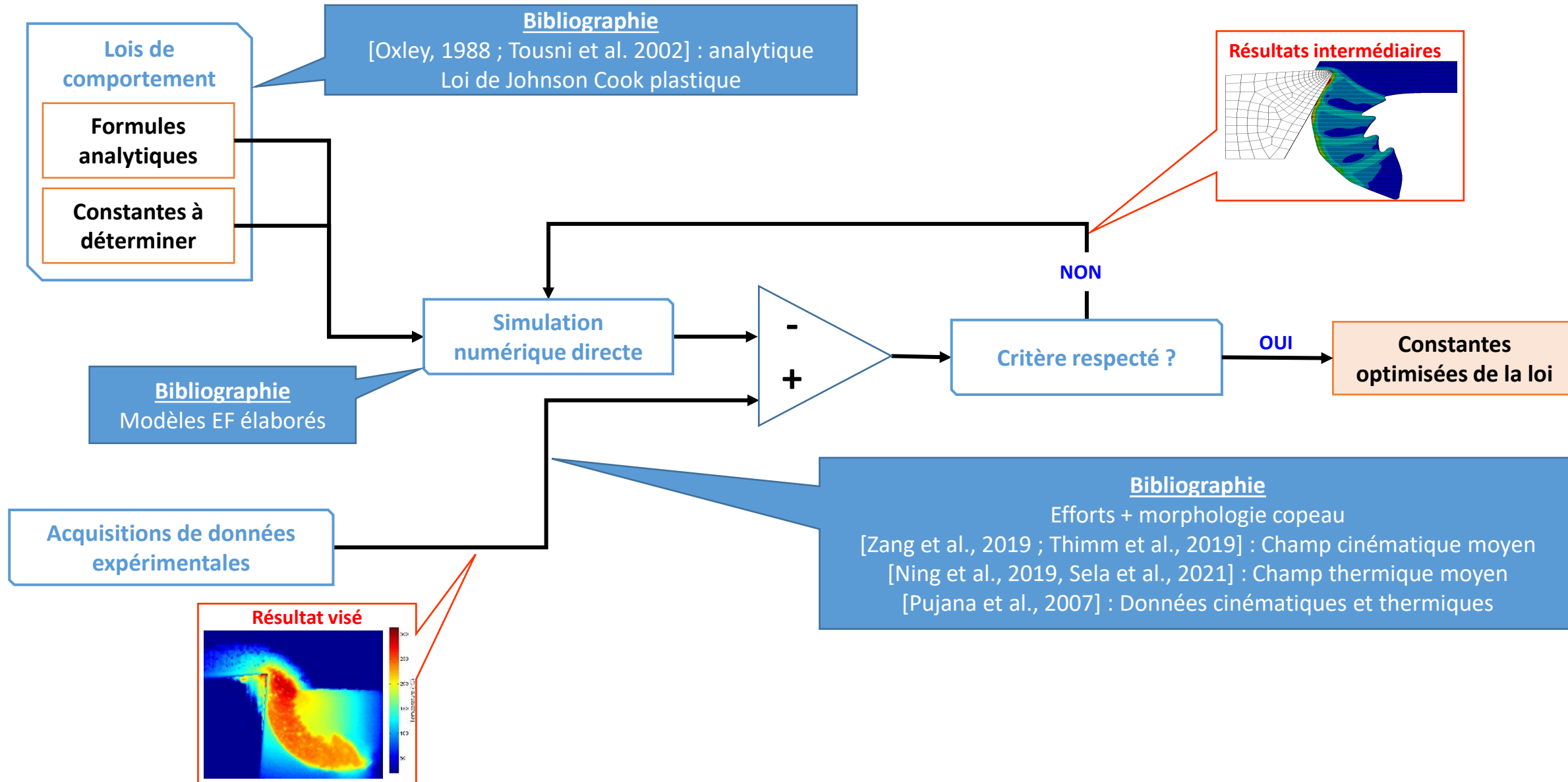
Simulation des procédés



Identification avec données in situ



Identification avec données in situ



Plan de l'exposé

- **Simulation des procédés**
- Essais in situ et instrumentation
- Mesure des efforts de coupe par corrélation d'images
- Mesures thermomécaniques in situ
- Imagerie RX et procédés
- Conclusion et perspectives

Plan de l'exposé

- Simulation des procédés
- **Essais in situ et instrumentation**
- Mesure des efforts de coupe par corrélation d'images
- Mesures thermomécaniques in situ
- Imagerie RX et procédés
- Conclusion et perspectives

Instrumentation

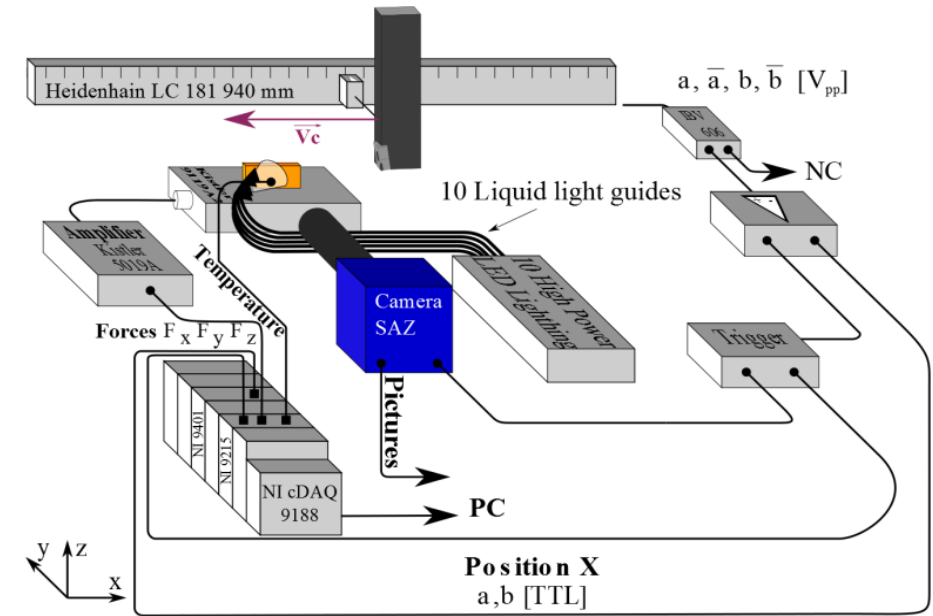
- **Caractéristiques :**

- Fraiseuse à moteur linéaire : $V_{Cmax} = 120 \text{ m/min}$
- Temps de passage de l'outil : $< 1 \text{ ms}$

- **Enregistrements :**

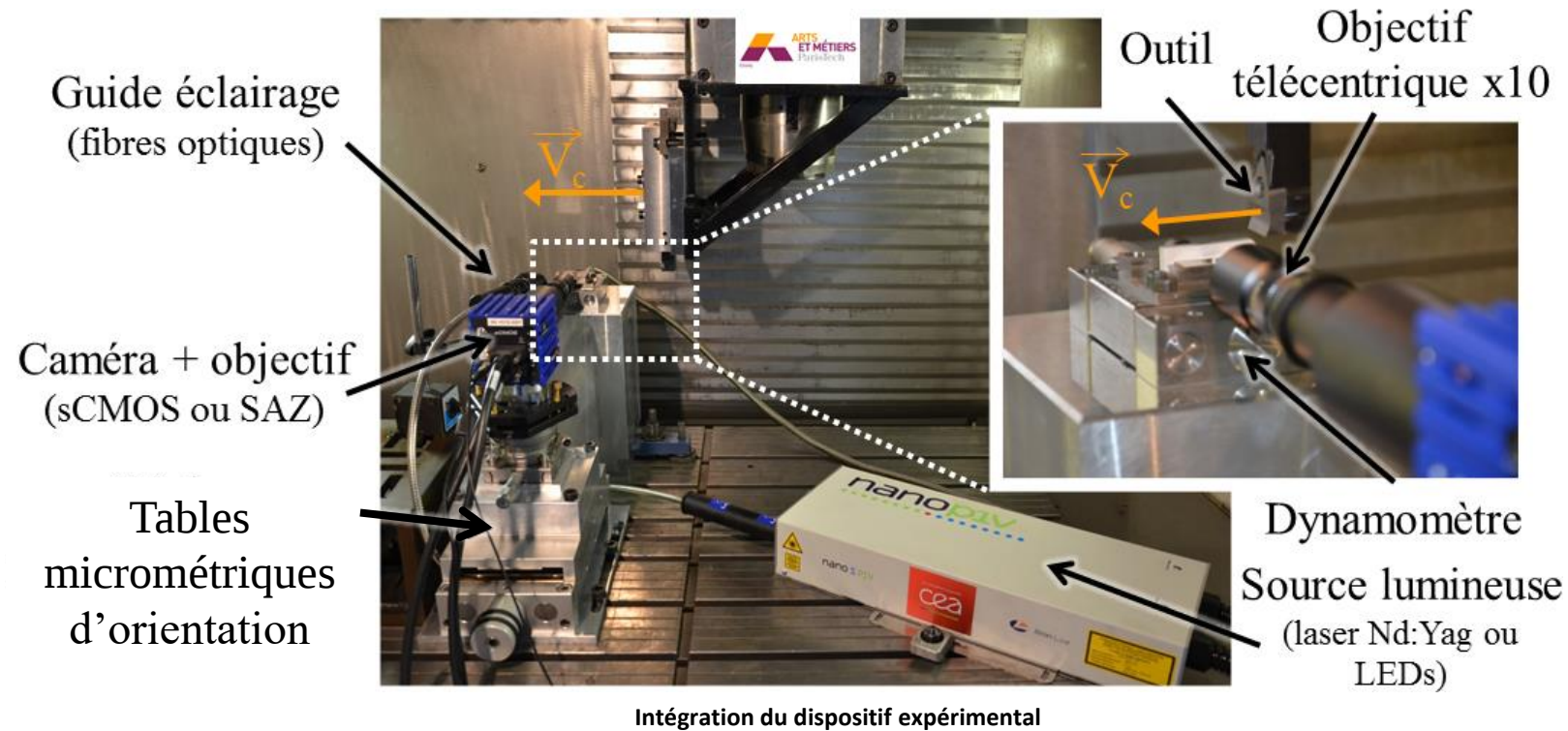
- Efforts de coupe : platine dynamométrique
- Codeur d'axe X : comptage
- Images : caméras
- Signaux de synchronisation : tensions

- **Caméras :**

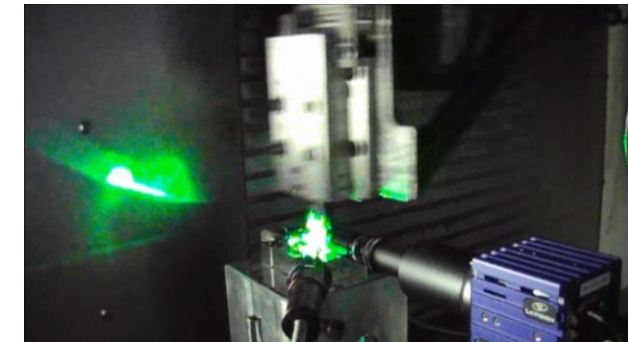


	sCMOS		SAZ	
Zone observée / définition	1.7 x 1.4 mm (2560 x 2160 px)		1.14 x 1.06 mm ² (640 x 600 px)	
Grandissement	0.66 μm / px		1.8 μm / px	
Prise d'images	Paire		Continue	
Inter image	120 ns		20 μs (50 000 fps)	
Éclairage	Flash (Laser)		Continu (LEDs)	
Temps d'exposition	5 ns	cea	10 μs	LaBoMaP LABORATOIRE BOURGUIGNON DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS

Expérimentation in situ



Implantation de la caméra SAZ



Prise d'images avec la caméra sCMOS

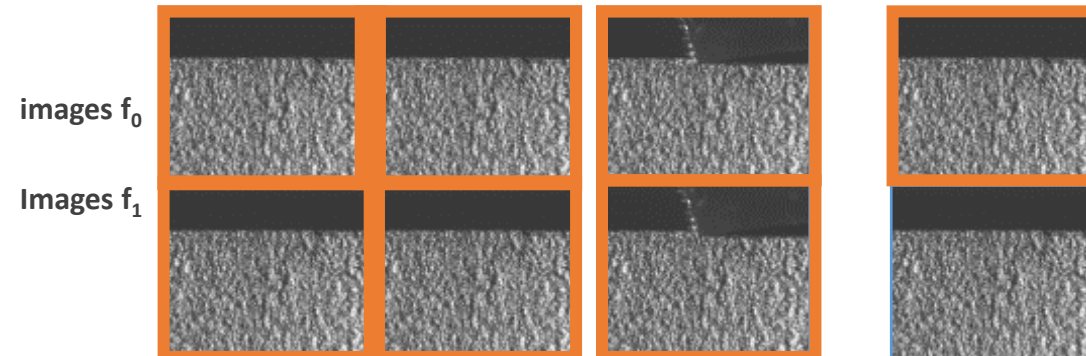
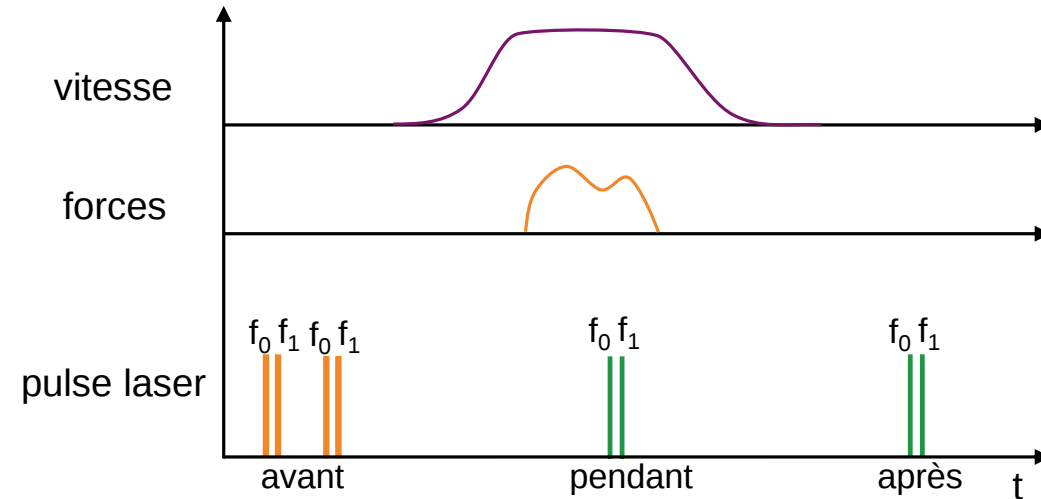
Images et synchronisation

- **pendant/pendant :**
formation du copeau

- **pendant/avant :**
champs de cinématiques
(comparaison avec des simulations)

- **après/avant :**
déformations résiduelles (plastique + élastique)
après la coupe ; profondeur affectée

- **avant/avant :**
estimation de l'incertitude de mesure et
qualification du marquage

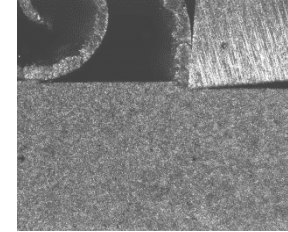
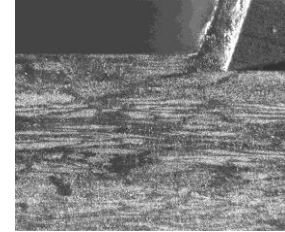


Chronogramme des 4 paires d'images prises pendant chaque test
(caméra sCMOS)

Préparation des surfaces

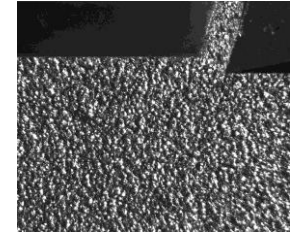
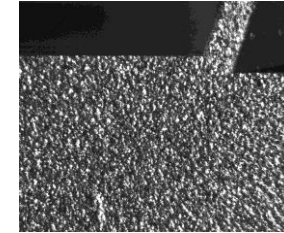
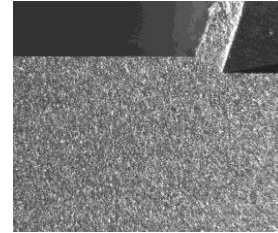
- Poli/attaqué

Polissage miroir jusqu'à $1\text{ }\mu\text{m}$ et attaque selon matériau

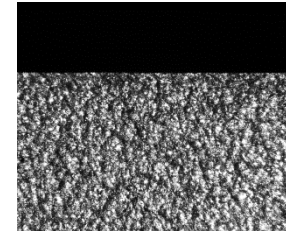
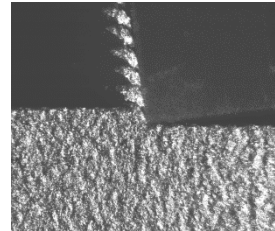


- Poli/microbillé

Polissage miroir jusqu'à $1\text{ }\mu\text{m}$ + microbillage 1 à 6 bar



- Découpe électroérosion fil



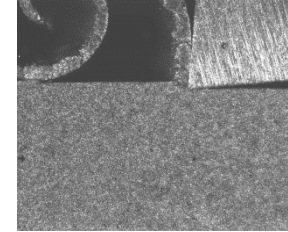
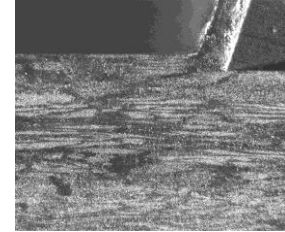
- Peintures fluorescentes pour laser

Qualité d'image inférieure qu'en éclairage direct
→ abandon de la technique

Préparation des surfaces

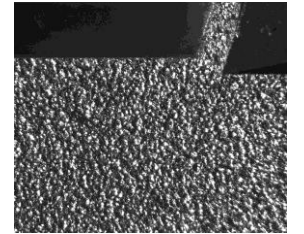
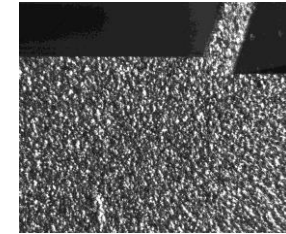
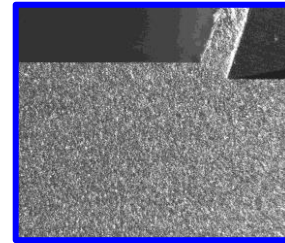
- Poli/attaqué

Polissage miroir jusqu'à $1\text{ }\mu\text{m}$ et attaque selon matériau

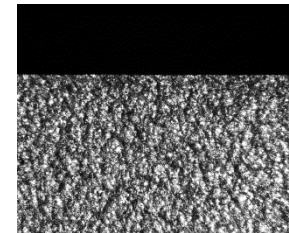
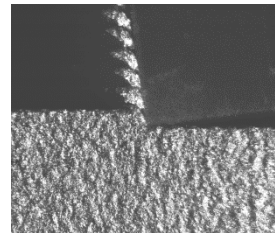


- Poli/microbillé

Polissage miroir jusqu'à $1\text{ }\mu\text{m}$ + microbillage 1 bar



- Découpe électroérosion fil



- Peintures fluorescentes pour laser

Qualité d'image inférieure qu'en éclairage direct
→ abandon de la technique

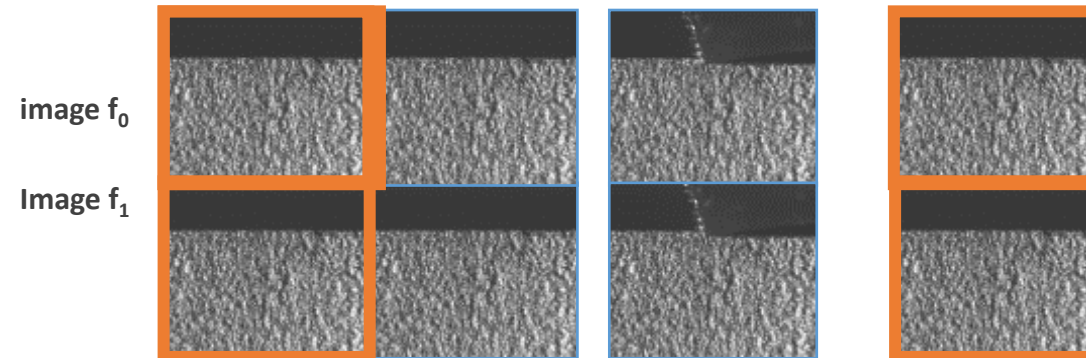
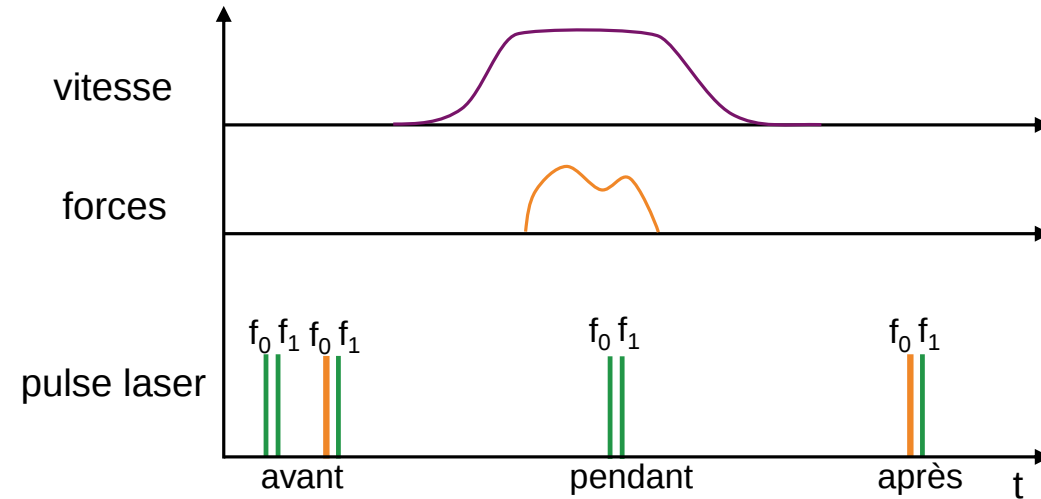
Intégrité de surface

- **pendant/pendant :**
formation du copeau

- **pendant/avant :**
champs de cinématiques
(comparaison avec des simulations)

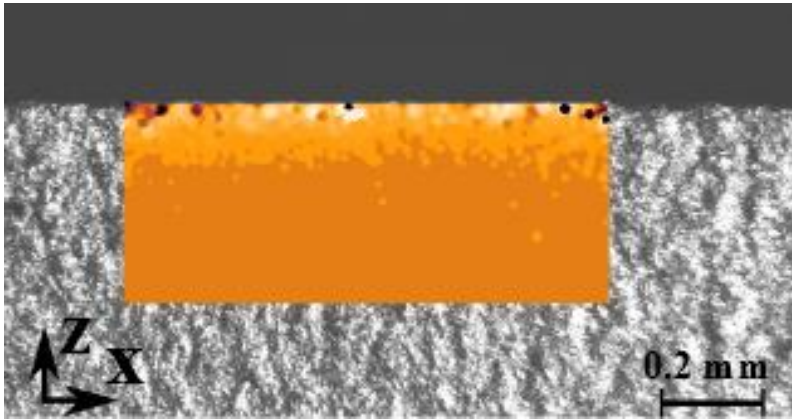
- **après/avant :**
déformations résiduelles (plastique + élastique)
après la coupe; profondeur affectée

- **avant/avant :**
estimation de l'incertitude de mesure et
qualification du marquage

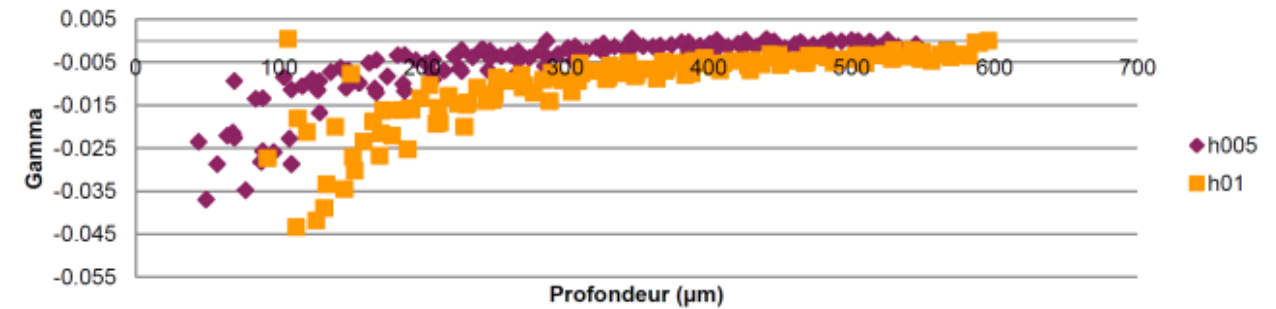
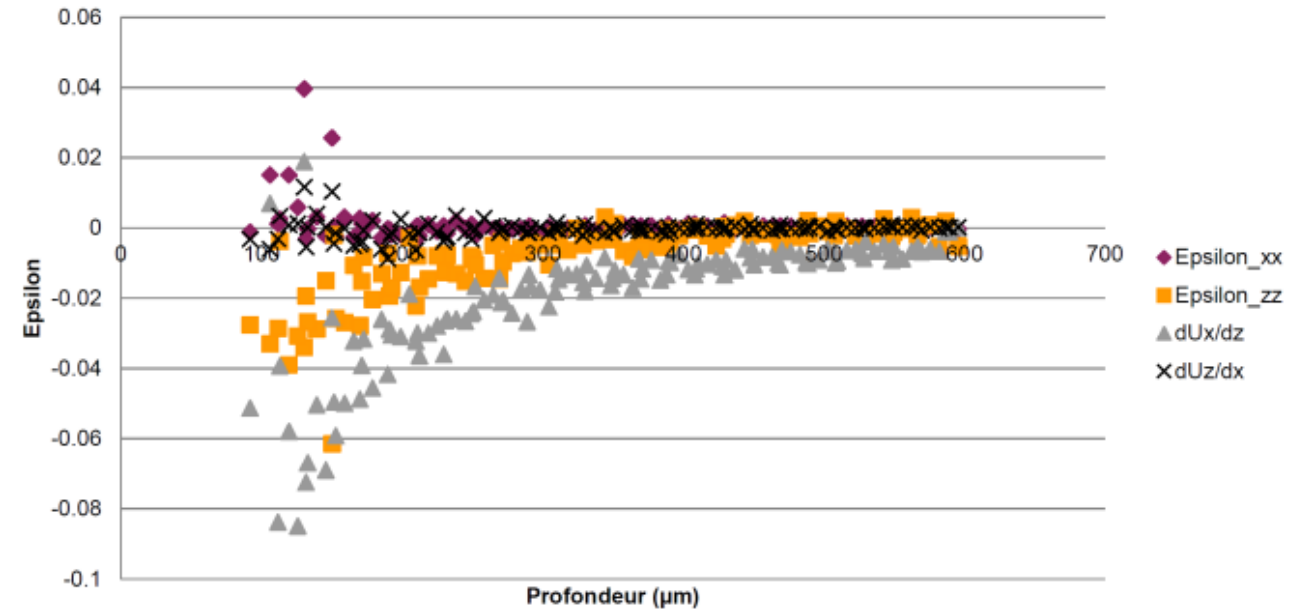
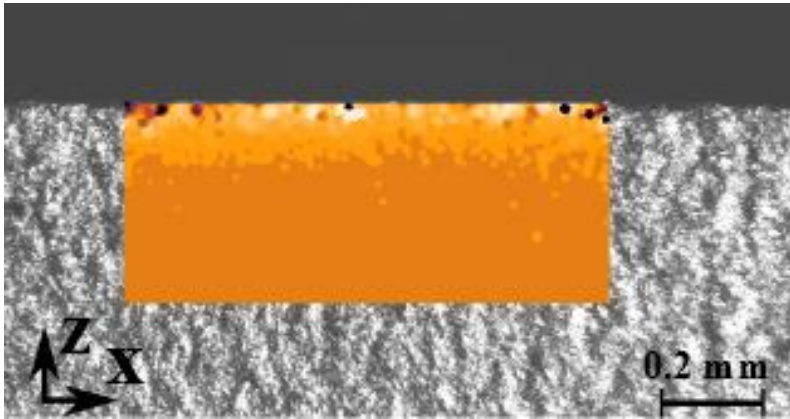


Chronogramme des 4 paires d'images prises pendant chaque test
(caméra sCMOS)

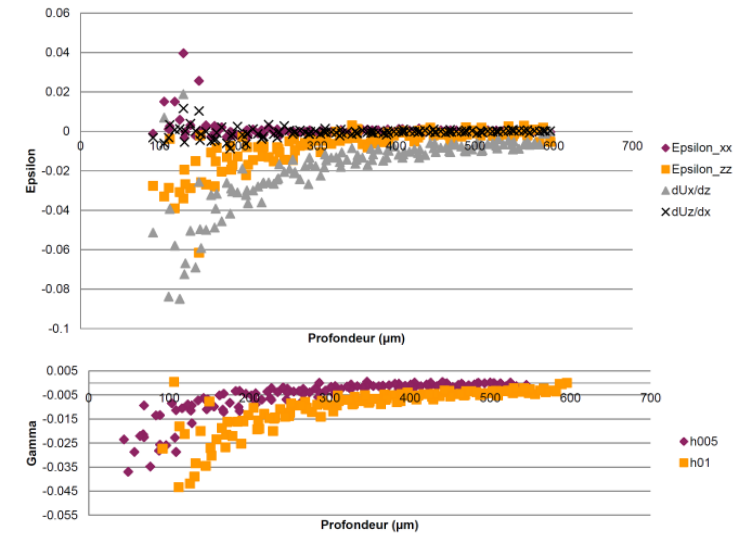
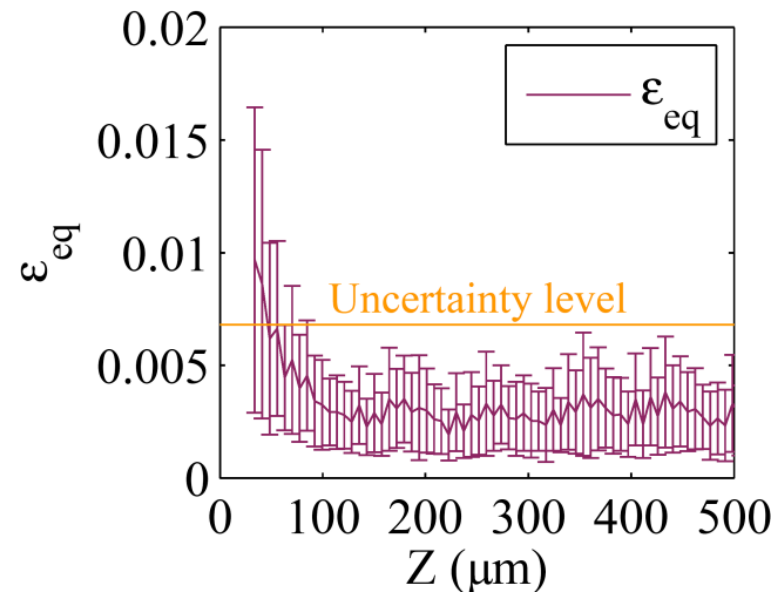
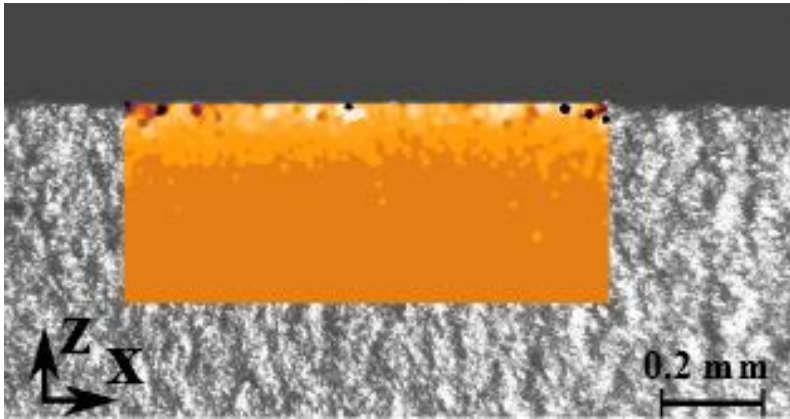
Déformations équivalentes résiduelles



Déformations résiduelles



Déformations résiduelles



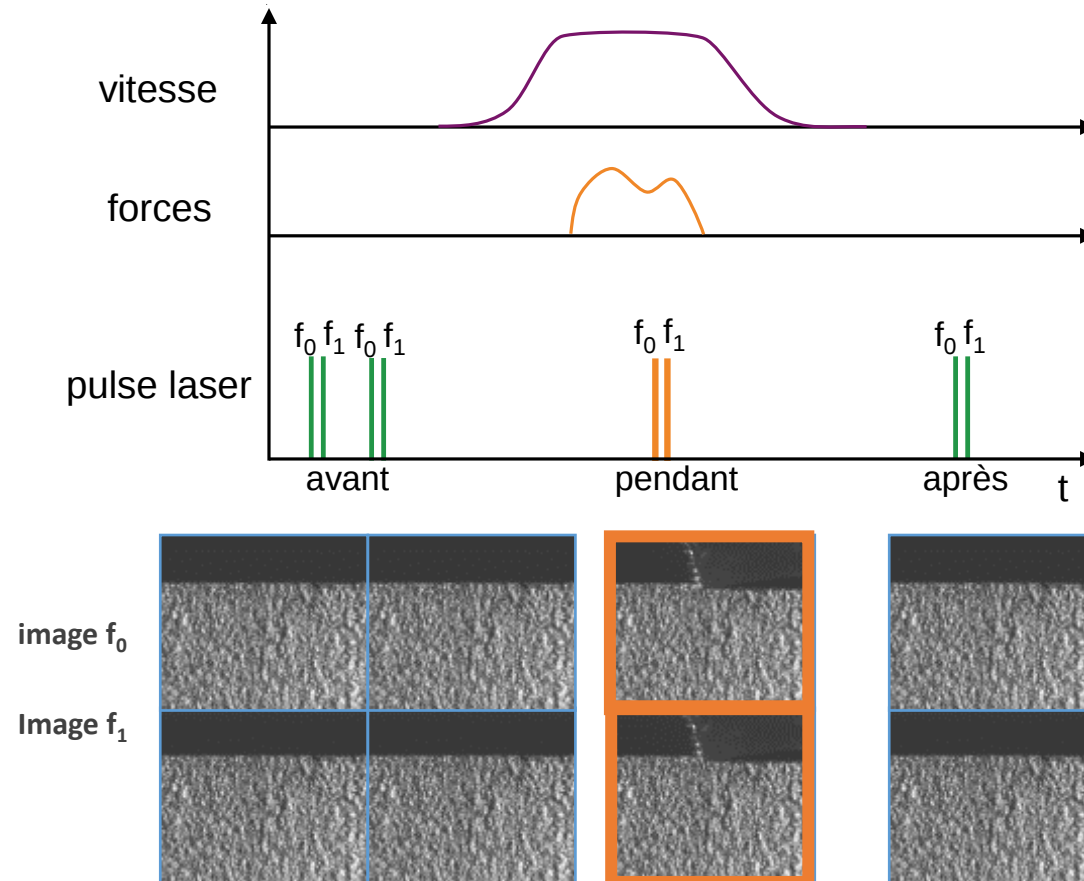
Formation du copeau

- **pendant/pendant :**
formation du copeau

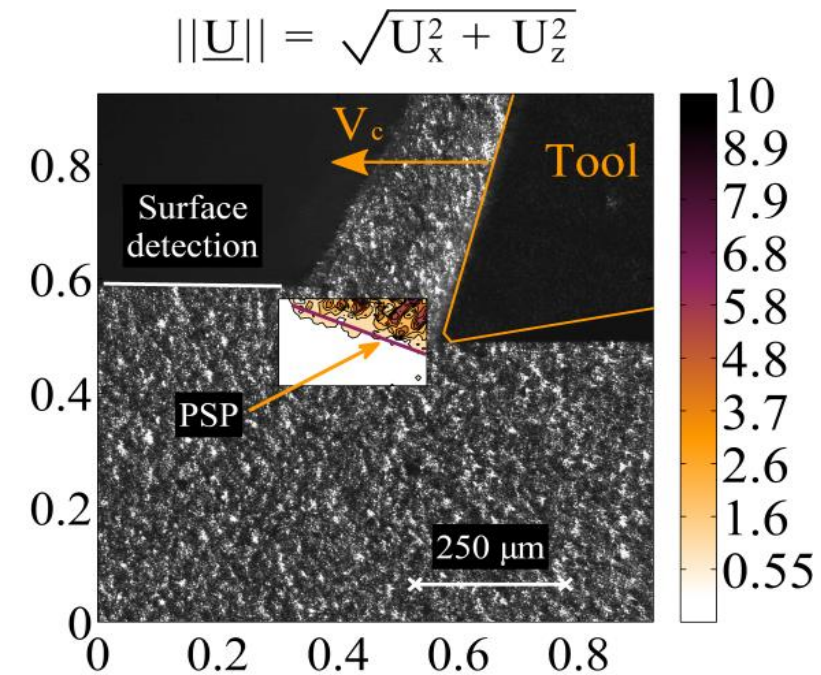
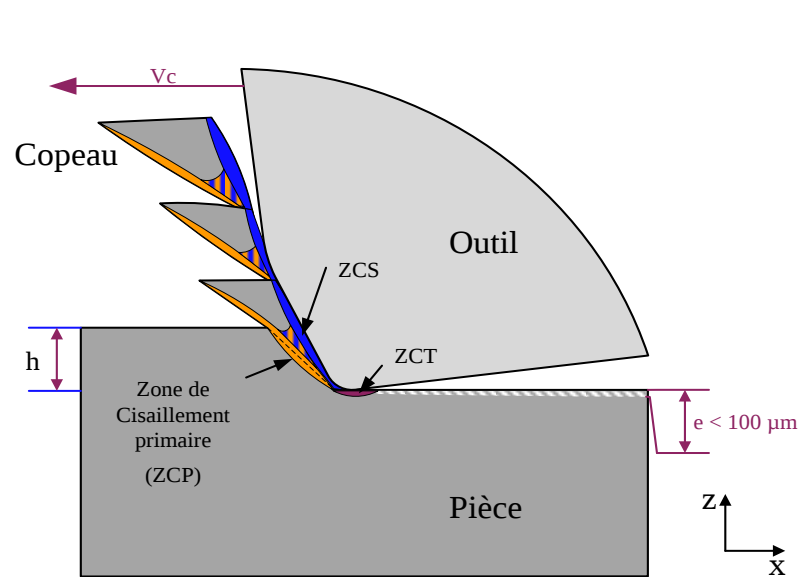
- **pendant/avant :**
champs de cinématiques
(comparaison avec des simulations)

- **après/avant :**
déformations résiduelles (plastique + élastique)
après la coupe; profondeur affectée

- **avant/avant :**
estimation de l'incertitude de mesure et
qualification du marquage



Zone de cisaillement primaire (ZCP)



Confrontation des résultats aux modèles existants

Méthode et modèle	Moyenne (°)	Écart type (°)
Automatique	29.6	6.3
Plan de cisaillement manuel	28.3	3.9
Merchant	38.1	0.3
Lee et Shaffer	31.1	0.8

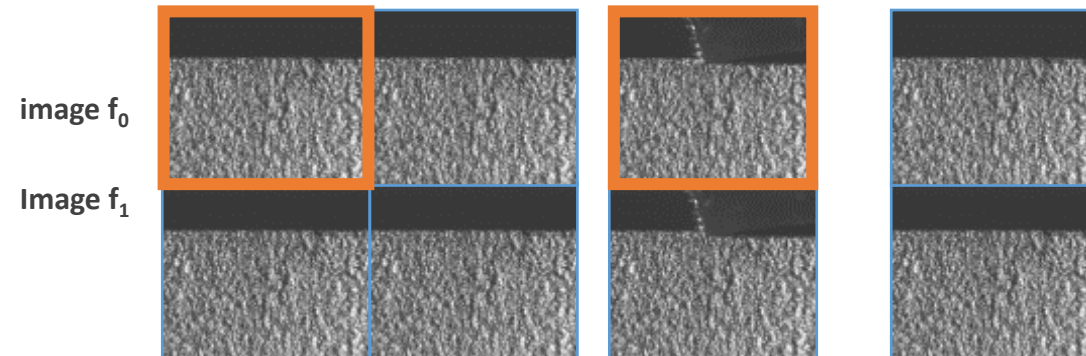
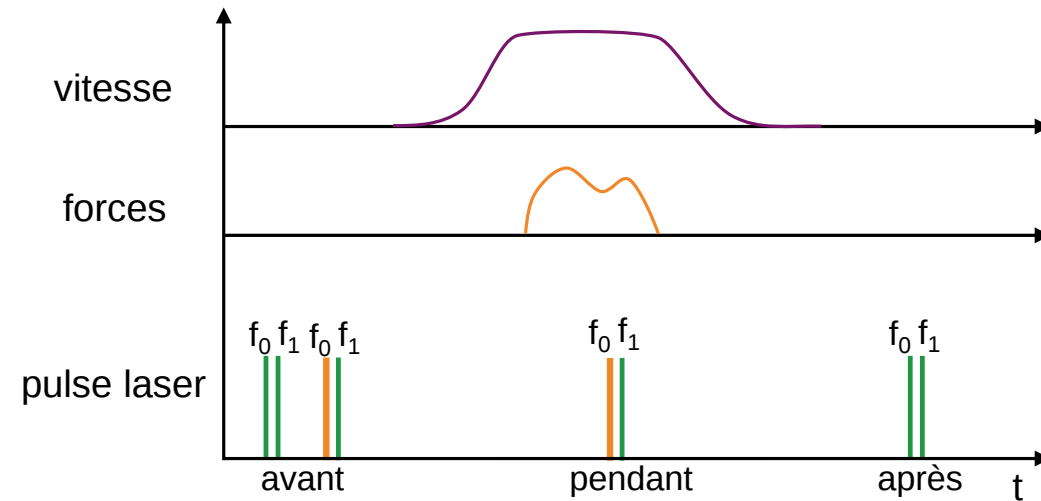
Efforts de coupe ?

- **pendant/pendant :**
formation du copeau

- **pendant/avant :**
champs de cinématiques
(comparaison avec des simulations)

- **après/avant :**
déformations résiduelles (plastique + élastique)
après la coupe; profondeur affectée

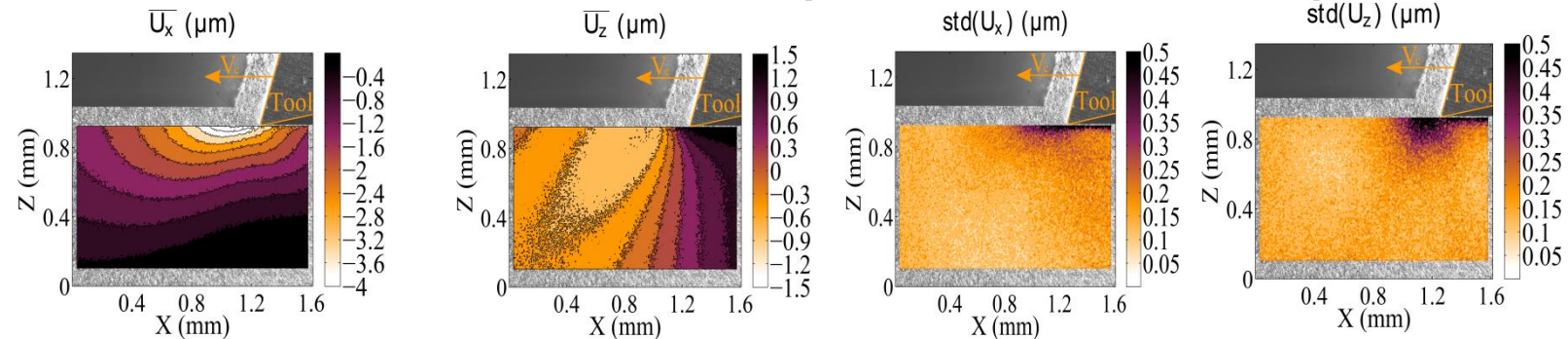
- **avant/avant :**
estimation de l'incertitude de mesure et
qualification du marquage



Chronogramme des 4 paires d'images prises pendant chaque test
(caméra sCMOS)

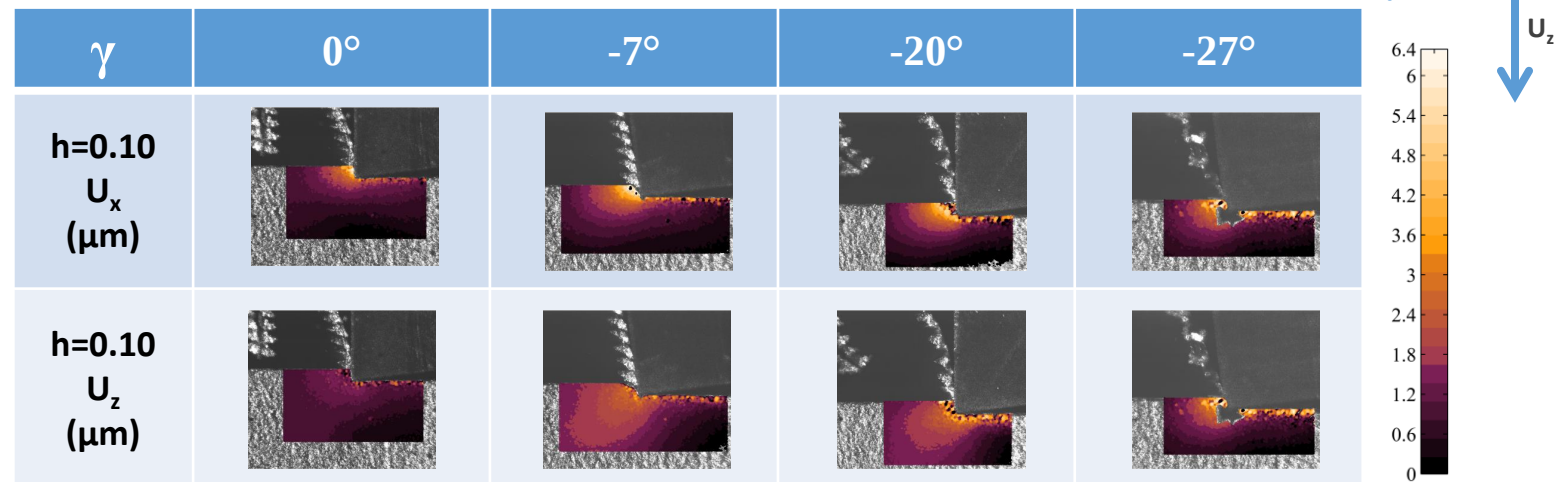
Champs de déplacements mesurés

- Mise au point : traitement de 10 essais (ENAW 7020 T6)



Champs de déplacement : moyenne et écart type suivant les deux directions

- Influence de la géométrie de coupe



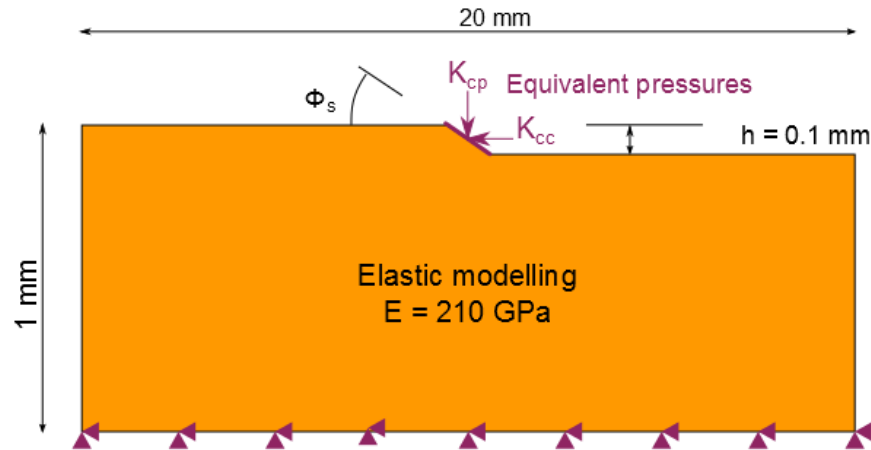
Champs de déplacement dans les directions x et z à $V_c = 90$ m/min 100CrMo7

Plan de l'exposé

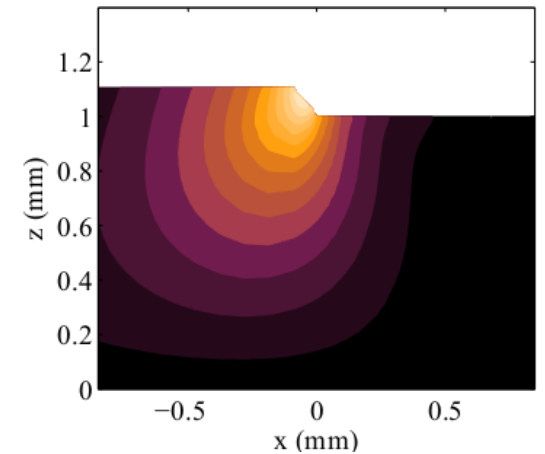
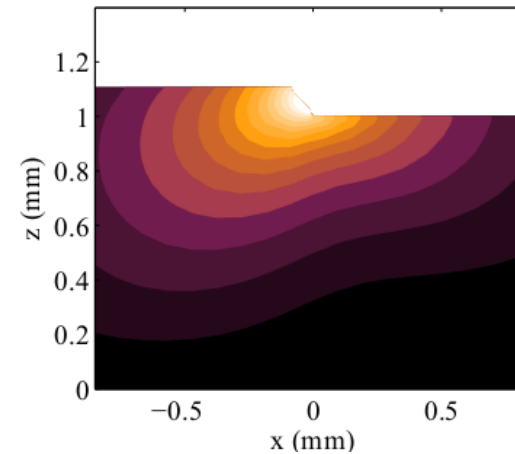
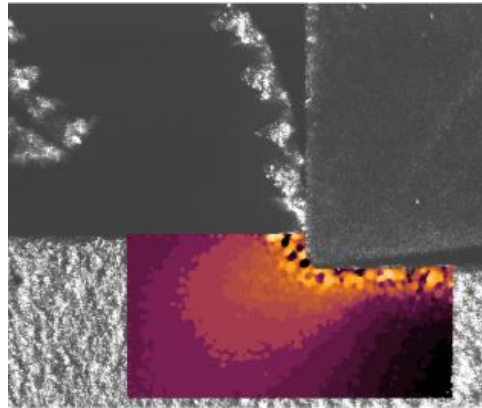
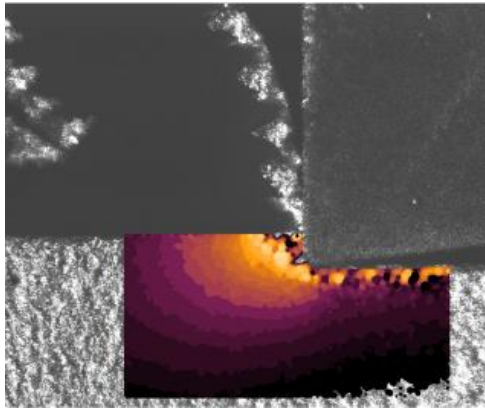
- Simulation des procédés
- Essais in situ et instrumentation
- **Mesure des efforts de coupe par corrélation d'images**
- Mesures thermomécaniques in situ
- Imagerie RX et procédés
- Conclusion et perspectives

Champs de déplacements

Modèle linéaire
d'efforts de coupe [Armarego 1970]



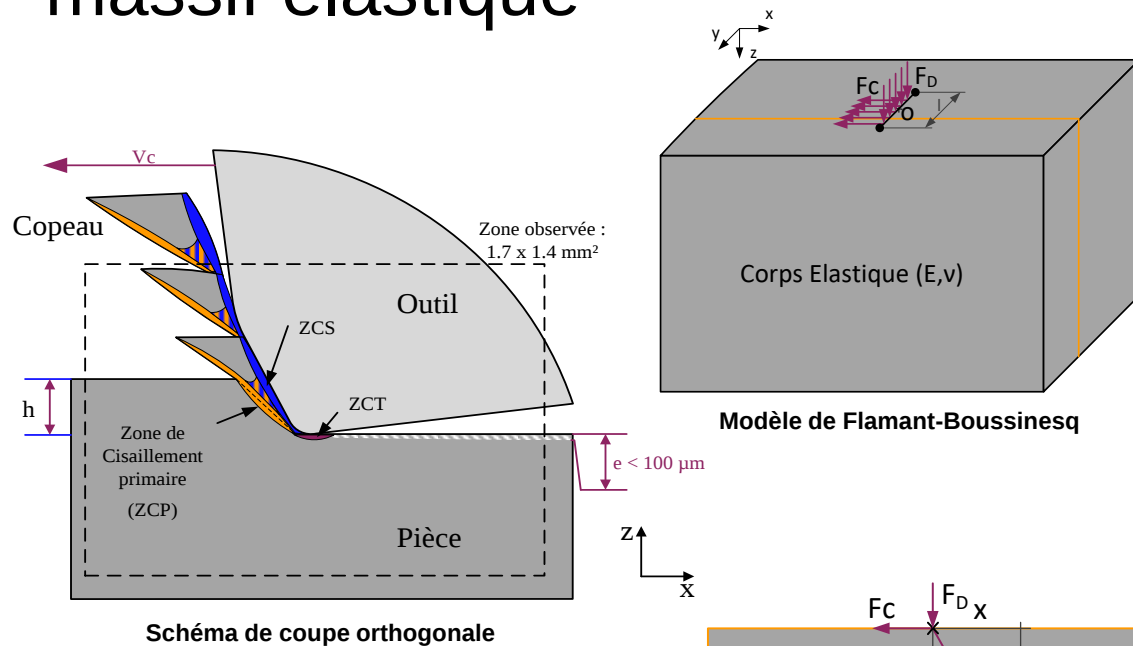
Modélisation élastique du chargement équivalent, $V_c = 90\text{m/min}$, $\gamma_n = -20^\circ$, $\alpha_n = 7^\circ$



Champs de déplacement mesurés et simulés, $V_c = 90\text{m/min}$, $\gamma_n = -20^\circ$, $\alpha_n = 7^\circ$

Solution analytique de Flamant-Boussinesq

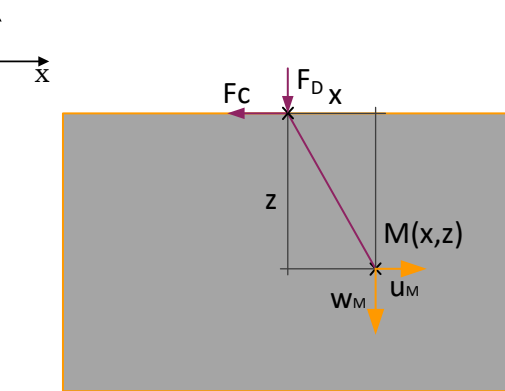
Champ de déplacement causé par une force linéique appliquée sur un massif élastique



Pour $\ell \gg (x \text{ et } z)$ et $y < \ell$ (du point de vue de la coupe) :

- $$u(x, y, z) = \frac{F_D}{2\pi\mu} \left(\frac{xz}{x^2+z^2} - \frac{\mu}{\lambda+\mu} \tan^{-1} \left(\frac{x}{z} \right) \right) + \frac{F_C}{2\pi\mu} \left(\frac{x^2}{x^2+z^2} - \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \log \left(\frac{2\ell}{\sqrt{x^2+z^2}} \right) \right)$$
- $$v(x, y, z) = 0$$
- $$w(x, y, z) = \frac{F_D}{2\pi\mu} \left(\frac{z^2}{x^2+z^2} - \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \log \left(\frac{2\ell}{\sqrt{x^2+z^2}} \right) \right) + \frac{F_C}{2\pi\mu} \left(\frac{xz}{x^2+z^2} + \frac{\mu}{\lambda+\mu} \tan^{-1} \left(\frac{x}{z} \right) \right)$$

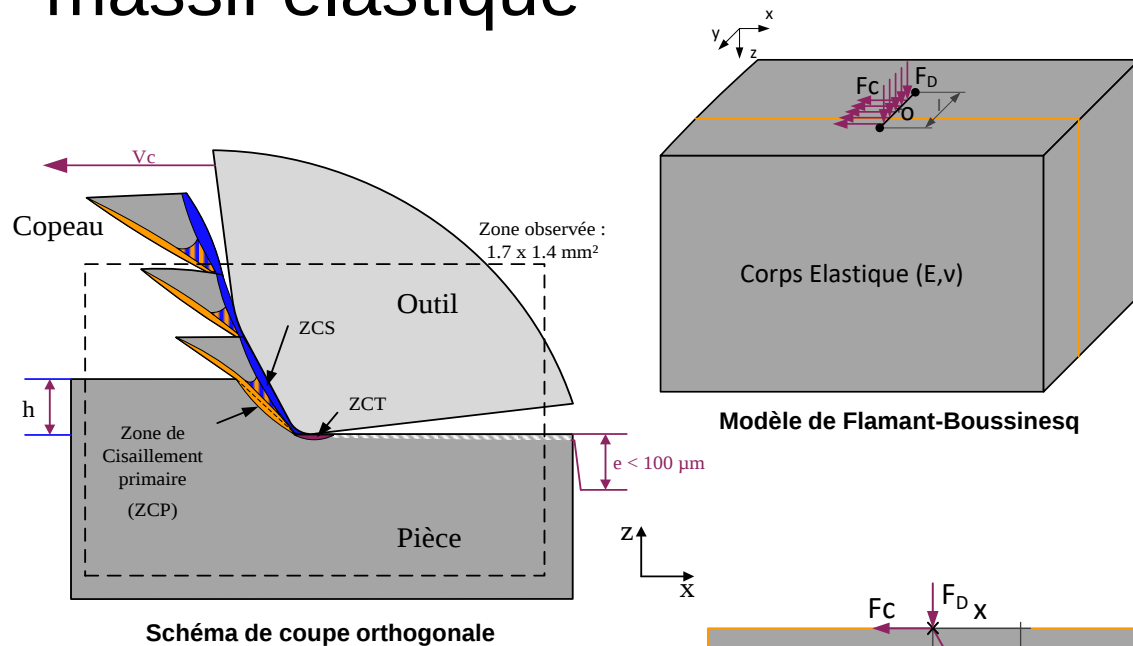
λ et μ : coefficients de Lamé



Paramétrage du modèle de Flamant-Boussinesq

Solution analytique de Flamant-Boussinesq

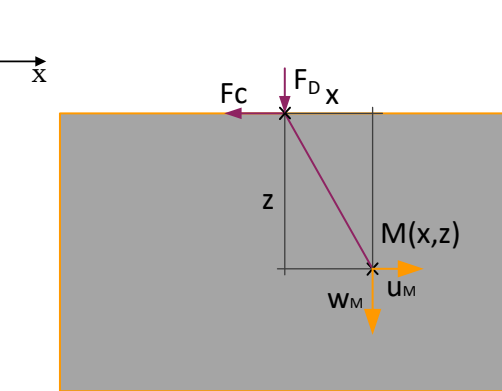
Champ de déplacement causé par une force linéique appliquée sur un massif élastique



Pour $\ell \gg (x \text{ et } z)$ et $y < \ell$ (du point de vue de la coupe) :

- $$u(x, y, z) = \frac{F_D}{2\pi\mu} \left(\frac{xz}{x^2+z^2} - \frac{\mu}{\lambda+\mu} \tan^{-1} \left(\frac{x}{z} \right) \right) + \frac{F_C}{2\pi\mu} \left(\frac{x^2}{x^2+z^2} - \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \log \left(\frac{2\ell}{\sqrt{x^2+z^2}} \right) \right)$$
- $$v(x, y, z) = 0$$
- $$w(x, y, z) = \frac{F_D}{2\pi\mu} \left(\frac{z^2}{x^2+z^2} - \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \log \left(\frac{2\ell}{\sqrt{x^2+z^2}} \right) \right) + \frac{F_C}{2\pi\mu} \left(\frac{xz}{x^2+z^2} + \frac{\mu}{\lambda+\mu} \tan^{-1} \left(\frac{x}{z} \right) \right)$$

λ et μ : coefficients de Lamé



Paramétrage du modèle de Flamant-Boussinesq

Mesure d'effort par CIN intégrée

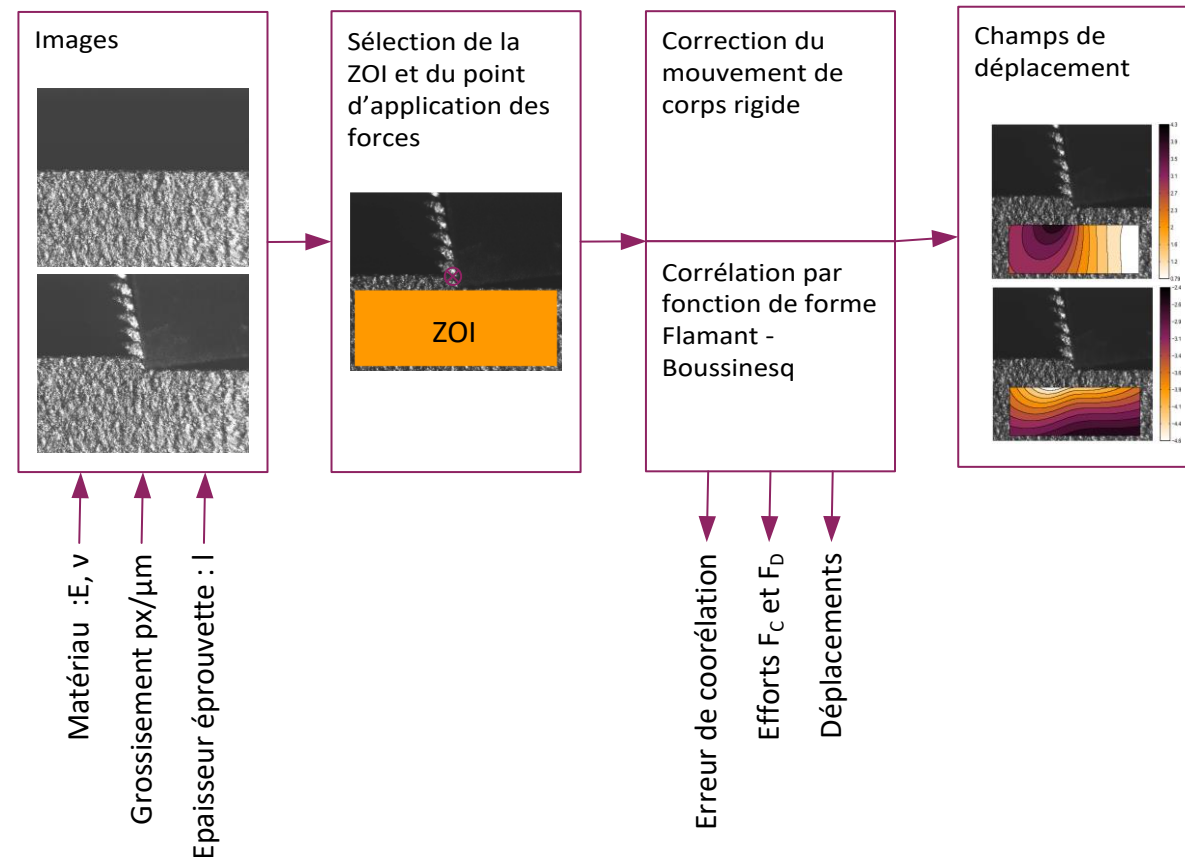
- Principe :

Utiliser l'élasticité du matériau comme capteur d'effort

Expression analytique des déplacements u et w pour caractériser les mouvements dans le massif pendant la coupe

Identification du couple F_C , F_D pour que l'erreur de corrélation soit minimale

- En pratique :



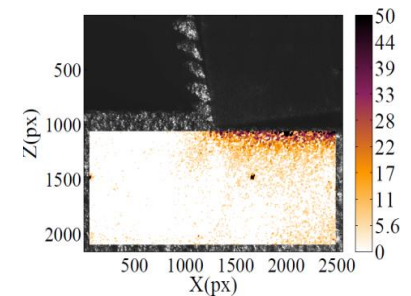
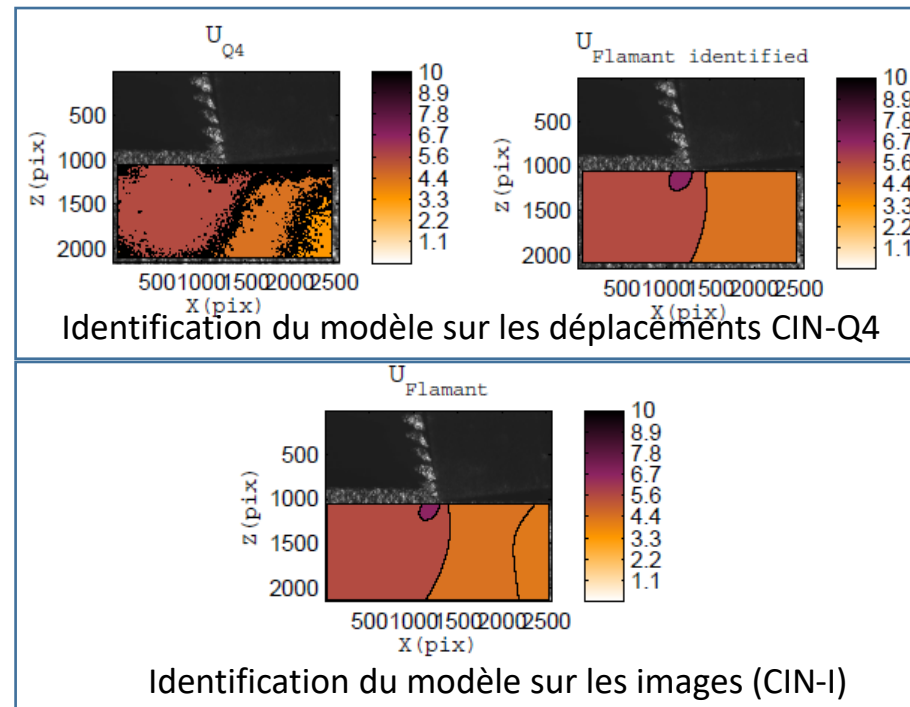
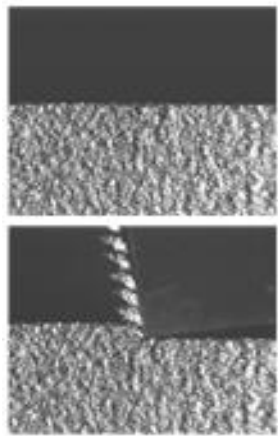
Mesure d'effort : Validation du modèle

- Validation du modèle utilisé :

Identification des paramètres avec des déplacements mesurés par CIN-Q4

Mesure CIN intégrée des efforts (et champ de déplacement)

Comparaison entre la solution CIN intégrée / déplacements CIN-Q4 interpolés



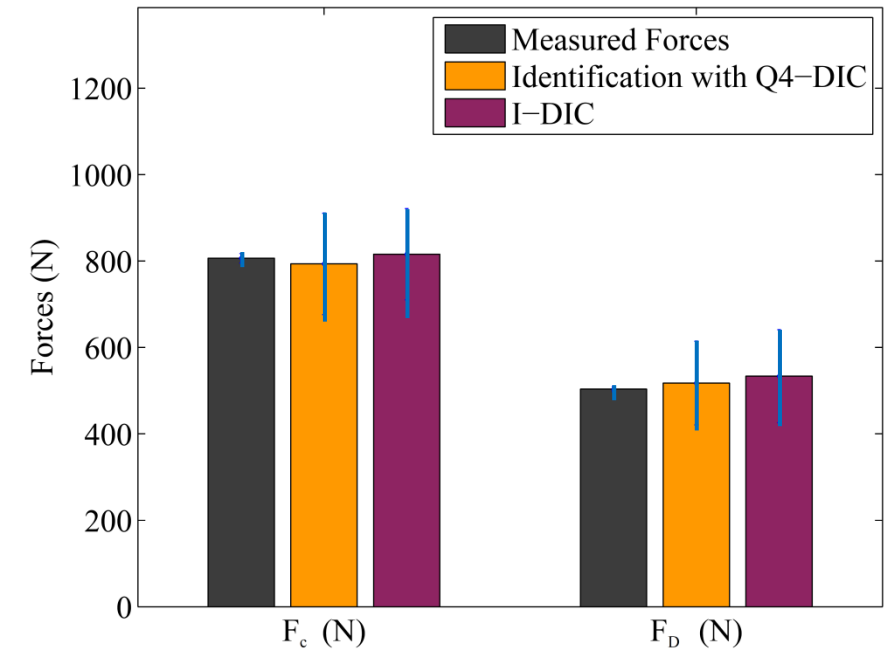
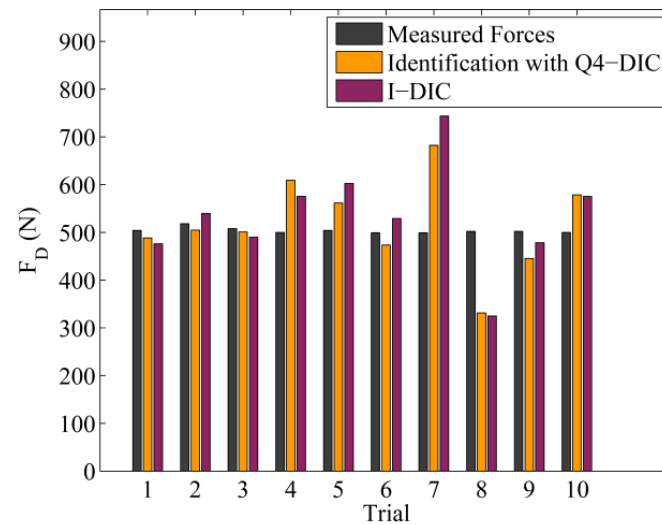
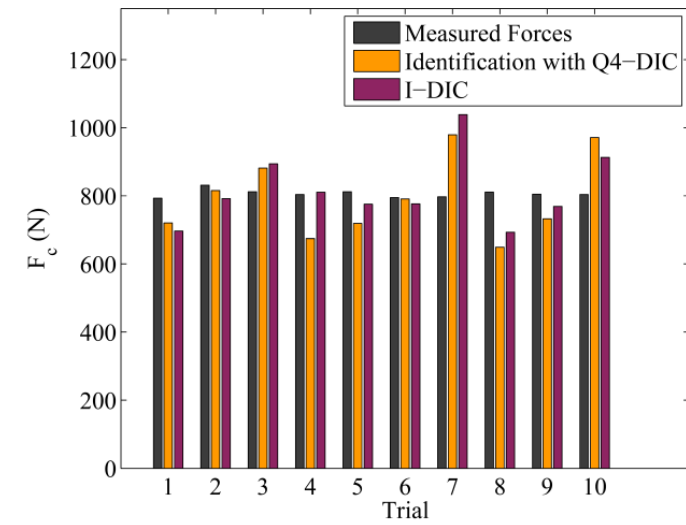
- Comparaison du modèle avec 2 moyens d'imagerie

sCMOS : très bonne résolution spatiale

SAZ : film

Mesure d'effort : résultats expérimentaux

- Point d'application des efforts : pointe d'outil
- Modèle 100CrMo7 : $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$
- Paramètres de coupe : $V_c = 90 \text{ m/min}$, $h = 0.10 \text{ mm}$, $\gamma = -20^\circ$, $\alpha = 7^\circ$
- Contrôle de l'identification : efforts mesurés par platine (moyenne)

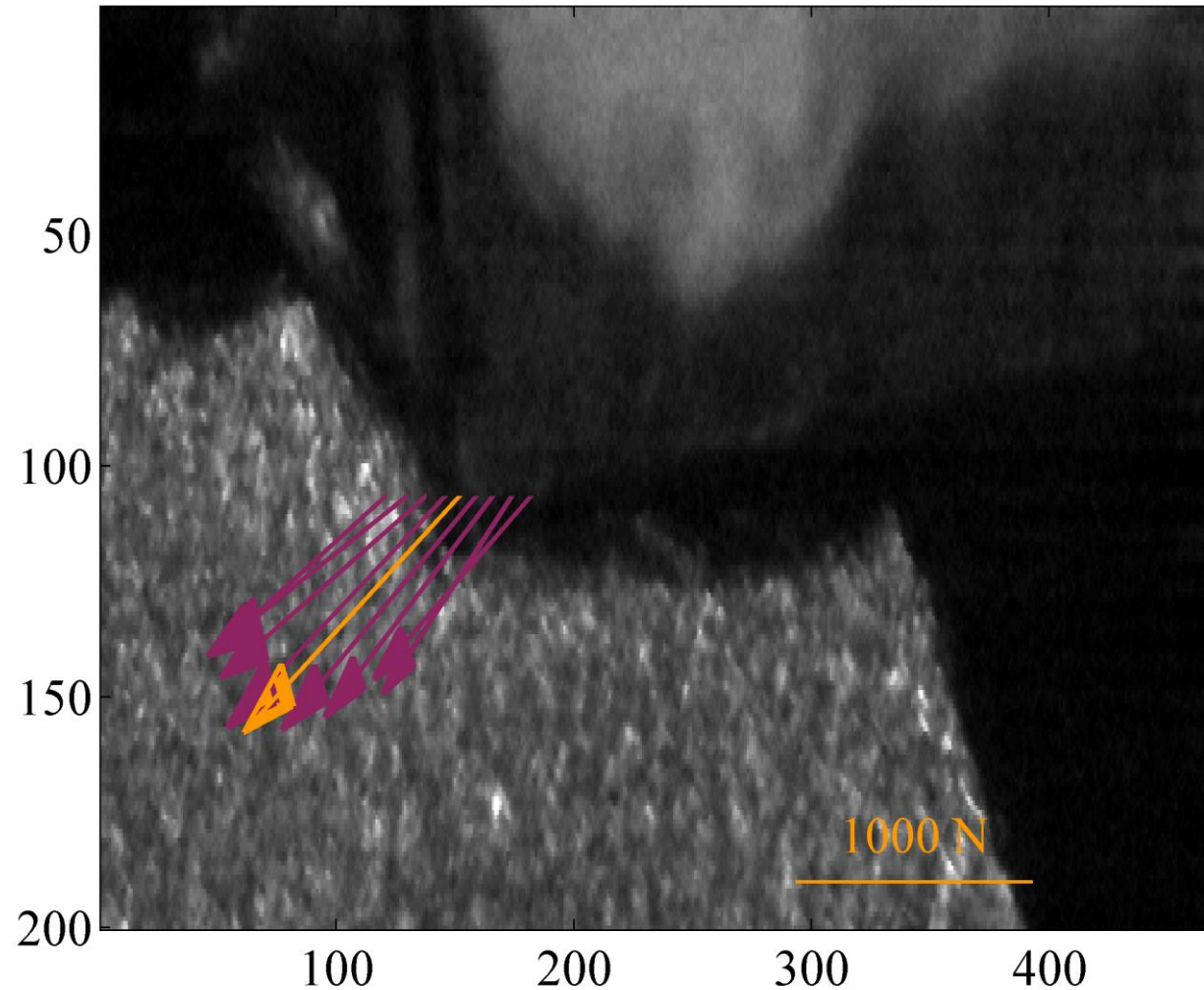


Mesure d'effort : étude du festonnement

- Traitement d'un film
 - $V_c = 90 \text{ m/min}$
 - $h = 0.1 \text{ mm}$
 - 50 000 fps

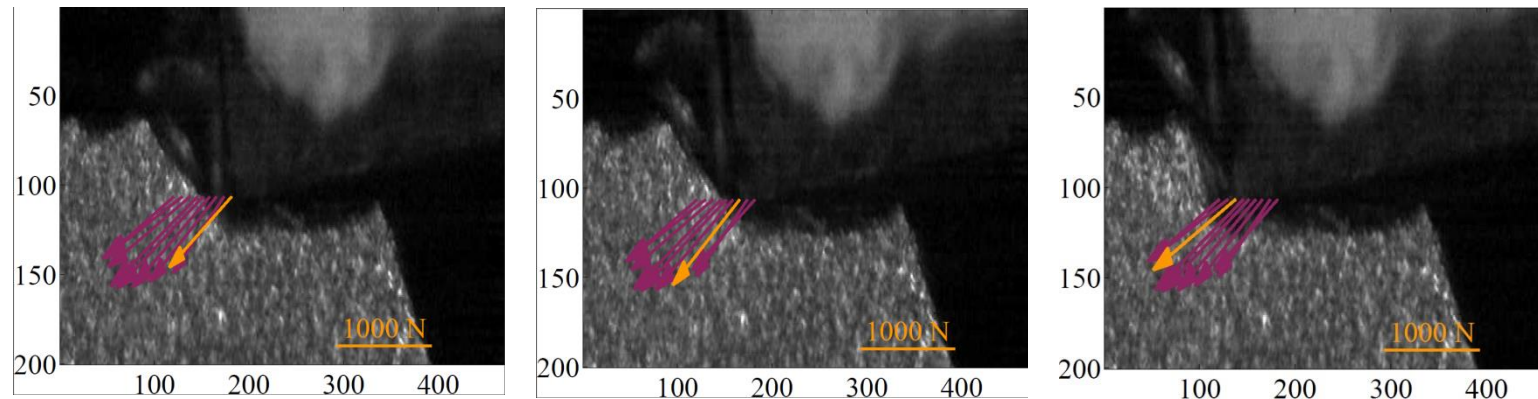
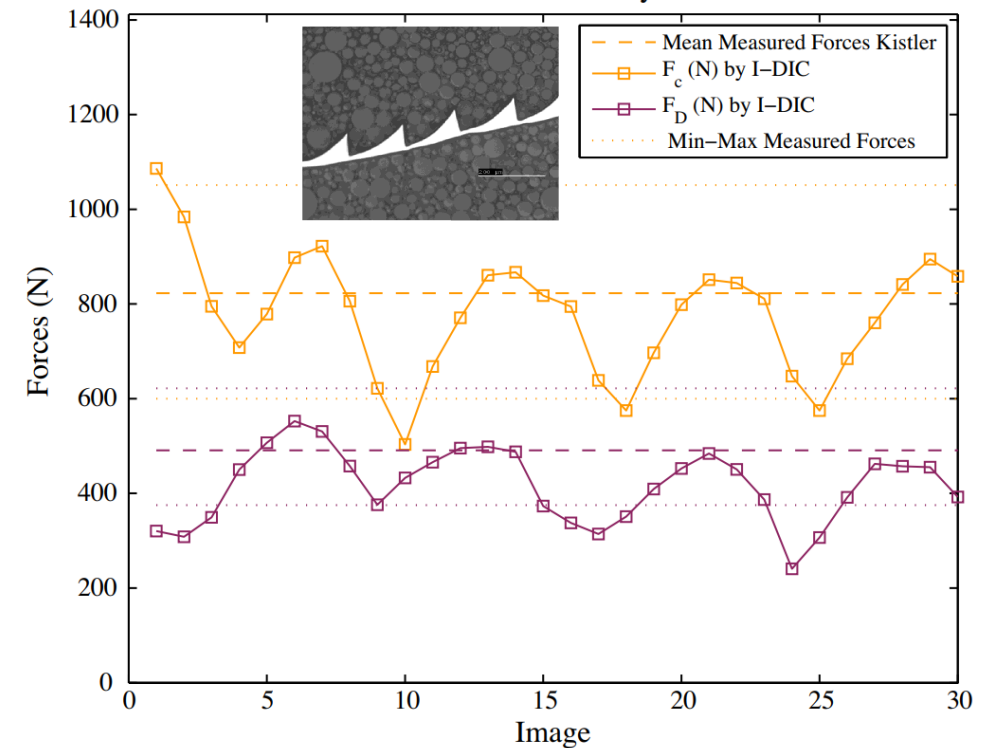
Mesure d'effort : étude du festonnement

- Traitement d'un film
 - $V_c = 90$ m/min
 - $h = 0.1$ mm
 - 50 000 fps



Mesure d'effort : étude du festonnement

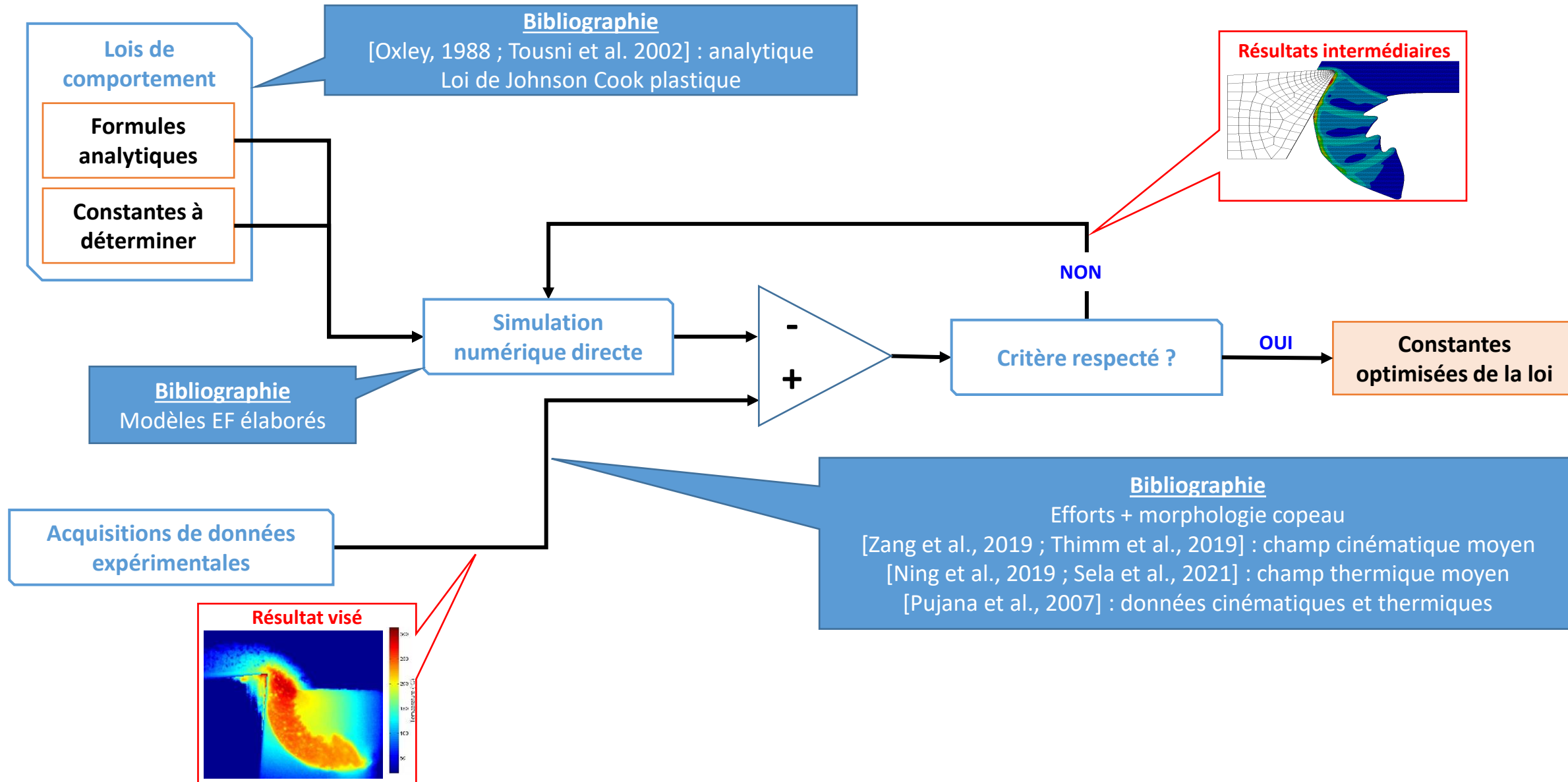
- Traitement d'un film
 - $V_c = 90$ m/min
 - $h = 0.1$ mm
 - 50 000 fps
- Mécanisme de coupe :
 - Fluctuations de 18% par rapport à la valeur moyenne mesurée (platine)
 - Fréquence de festonnement : 6.9 kHz (8 images/feston)



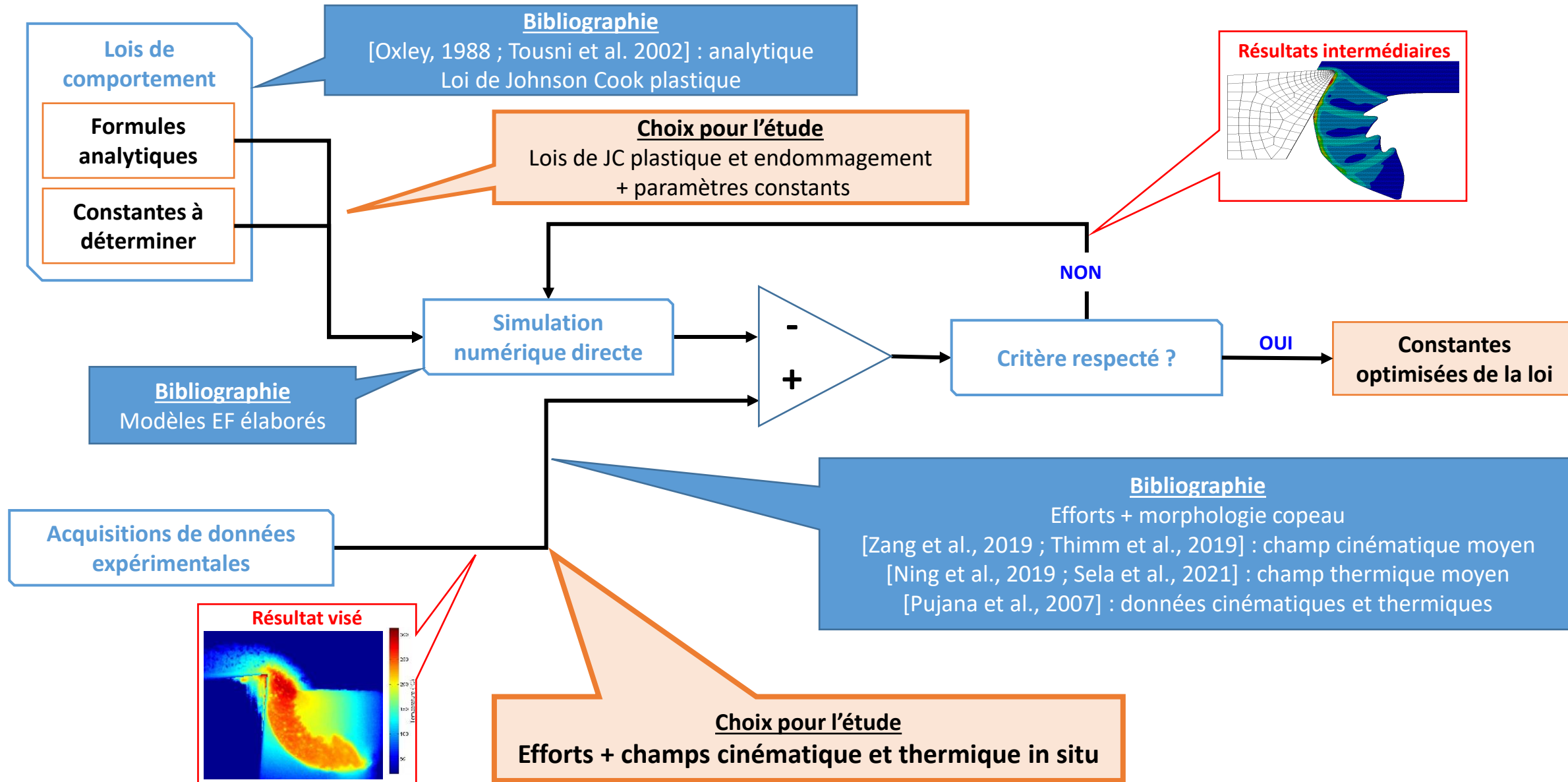
Plan de l'exposé

- Simulation des procédés
- Essais in situ et instrumentation
- Mesure des efforts de coupe par corrélation d'images
- **Mesures thermomécaniques in situ**
- Imagerie RX et procédés
- Conclusion et perspectives

Identification avec données in situ



Identification avec données in situ



Caméras utilisées

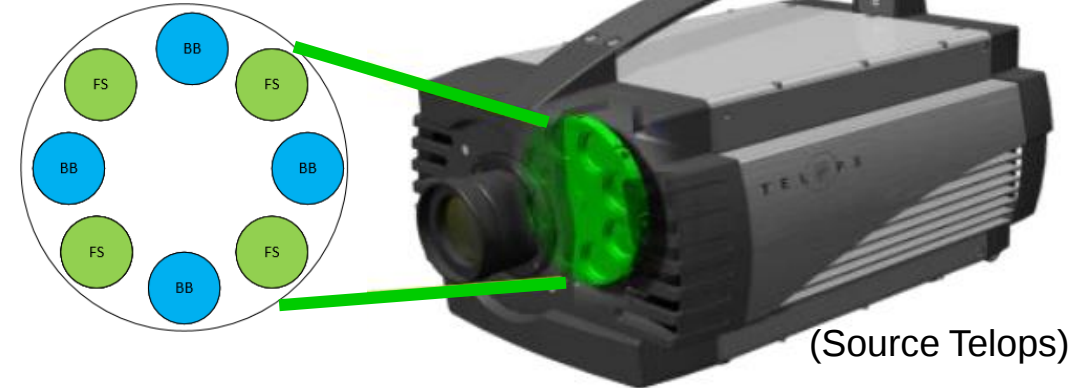
Caméra visible Photron FastCAM SA-Z



(Source Photron)

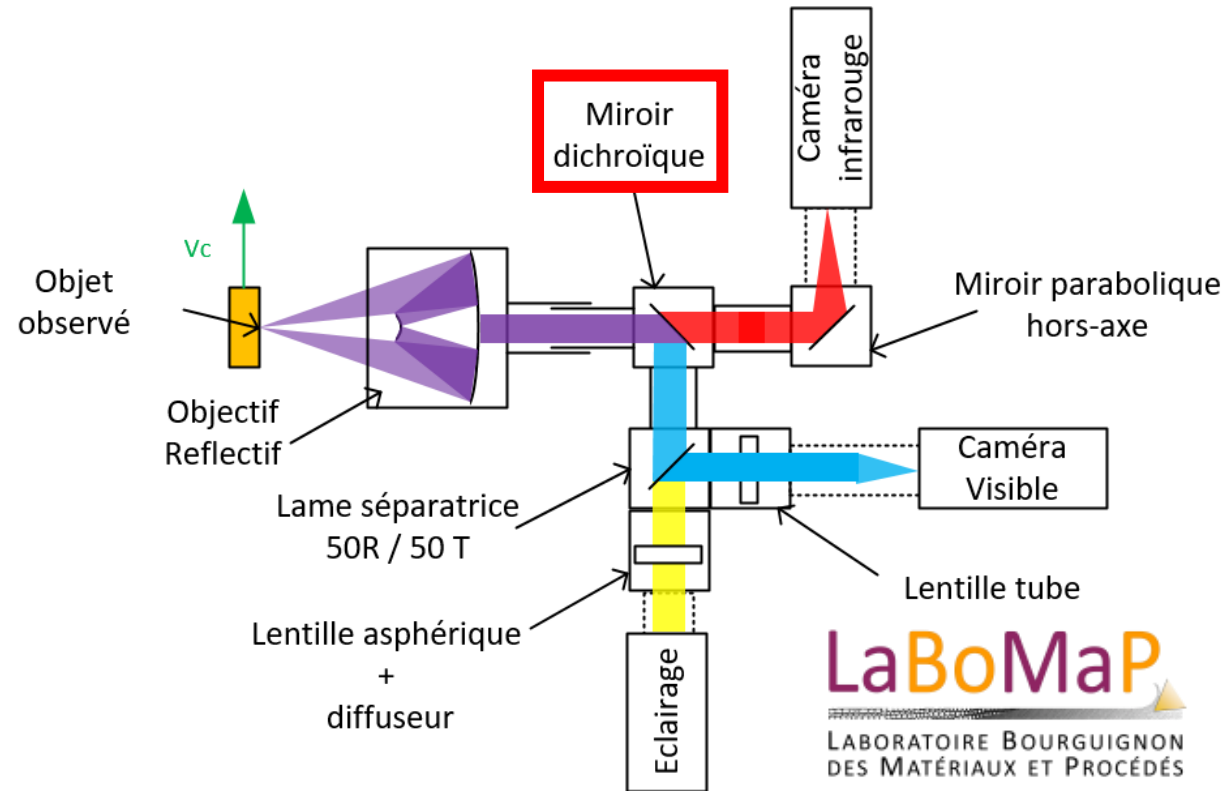
Caractéristiques	
Type de détecteur	CMOS
Plage spectrale caméra	0.4 – 1.0 μm
Définition capteur	1024 x 1024 px
Pitch	20 μm
Fréquence d'acquisition max	20 kHz (pleine définition) 2.1 MHz (fenêtrage 128 x 8 px)

Caméra infrarouge Telops MS-M3K



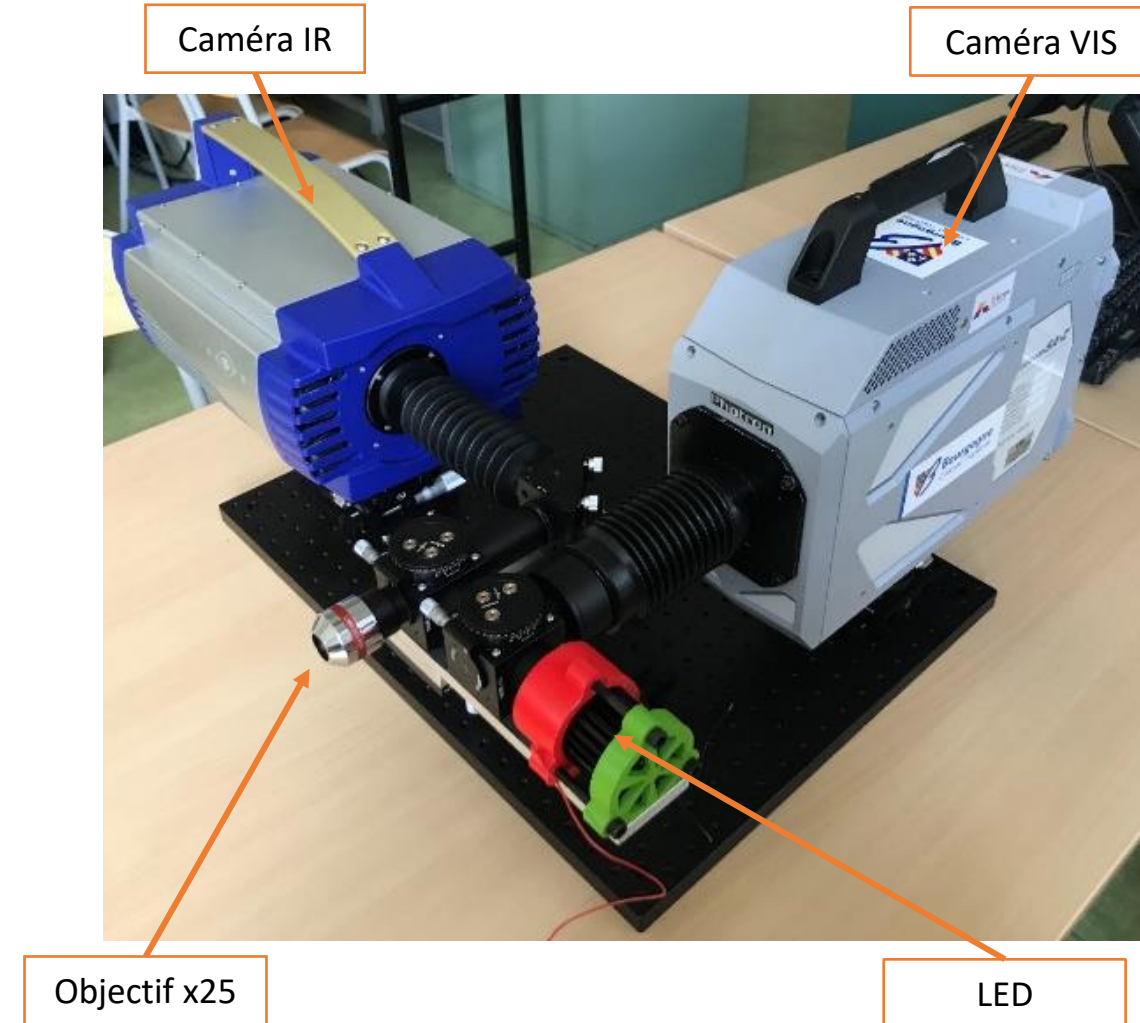
Caractéristiques	
Type de détecteur	InSb
Plage détecteur caméra	1.5 – 5.5 μm
Définition capteur	320 x 256 px
Pitch	30 μm
NETD spatiale à 25 °C	35 mK
Roue porte filtres	8 filtres
Températures radiométriques observables	Filtre Broadband : 0 - 180 °C Filtre spectral : 60 – 330 °C
Fréquence d'acquisition max (filtre fixe)	3.1 kHz (pleine définition) 100 kHz (fenêtrage 64 x 4 px)
Fréquence d'acquisition max (rotation de la roue)	800 Hz

Instrumentation multimodale

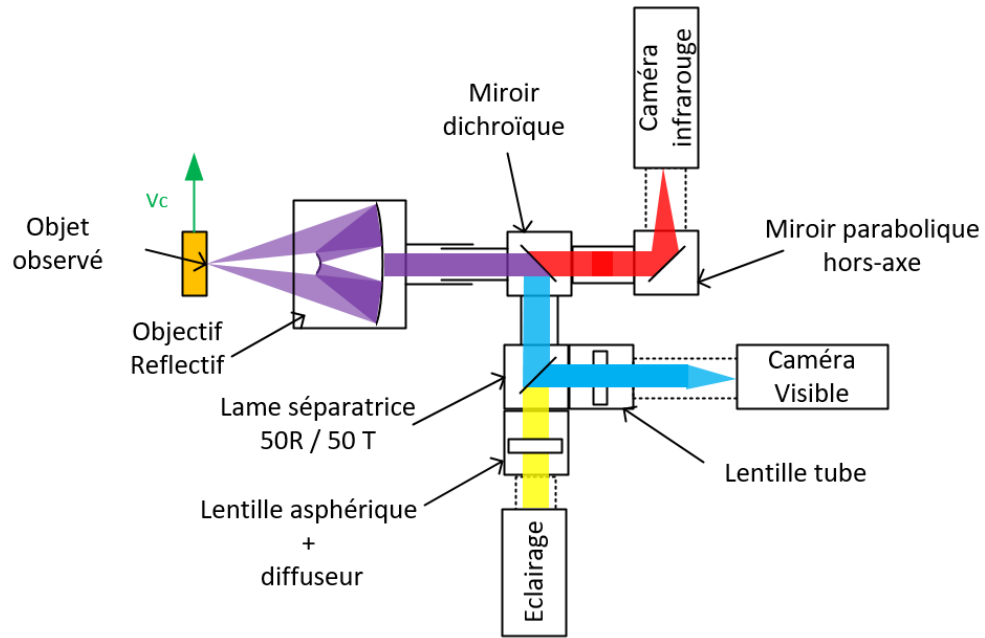


Caractéristiques optomécaniques :

- 7 platines de translation
- 6 platines de rotation
- 15 degrés de libertés



Instrumentation multimodale

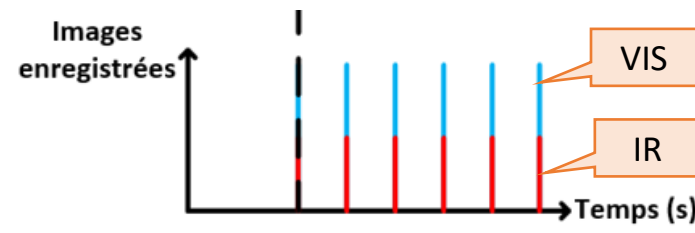


Caractérisation du système optique

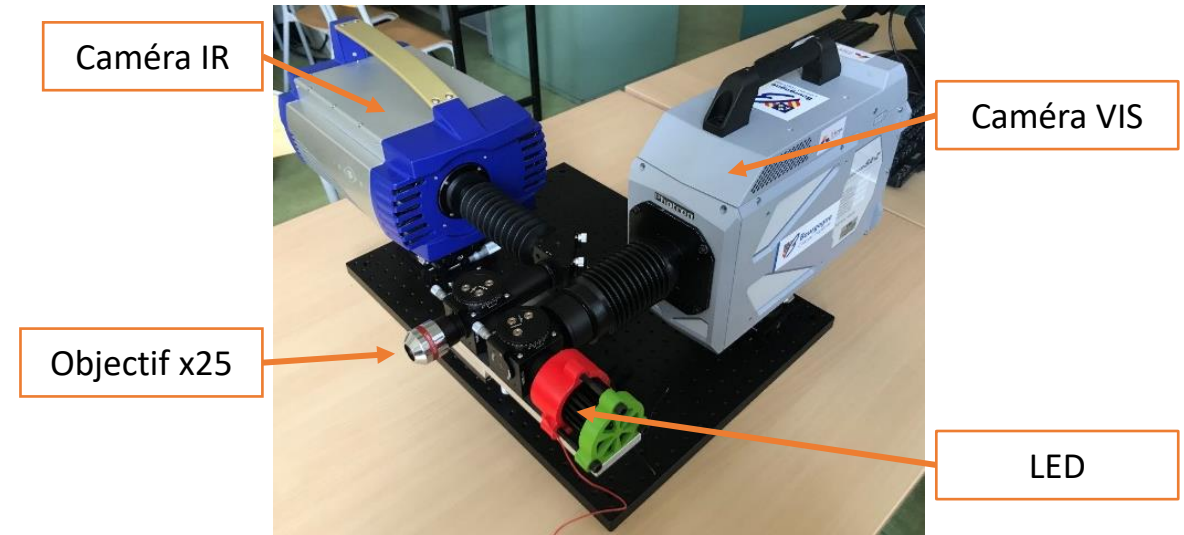
➤ Résolution spatiale

Ligne	RS [$\mu\text{m}/\text{px}$]
Visible	0.81
Infrarouge	0.12

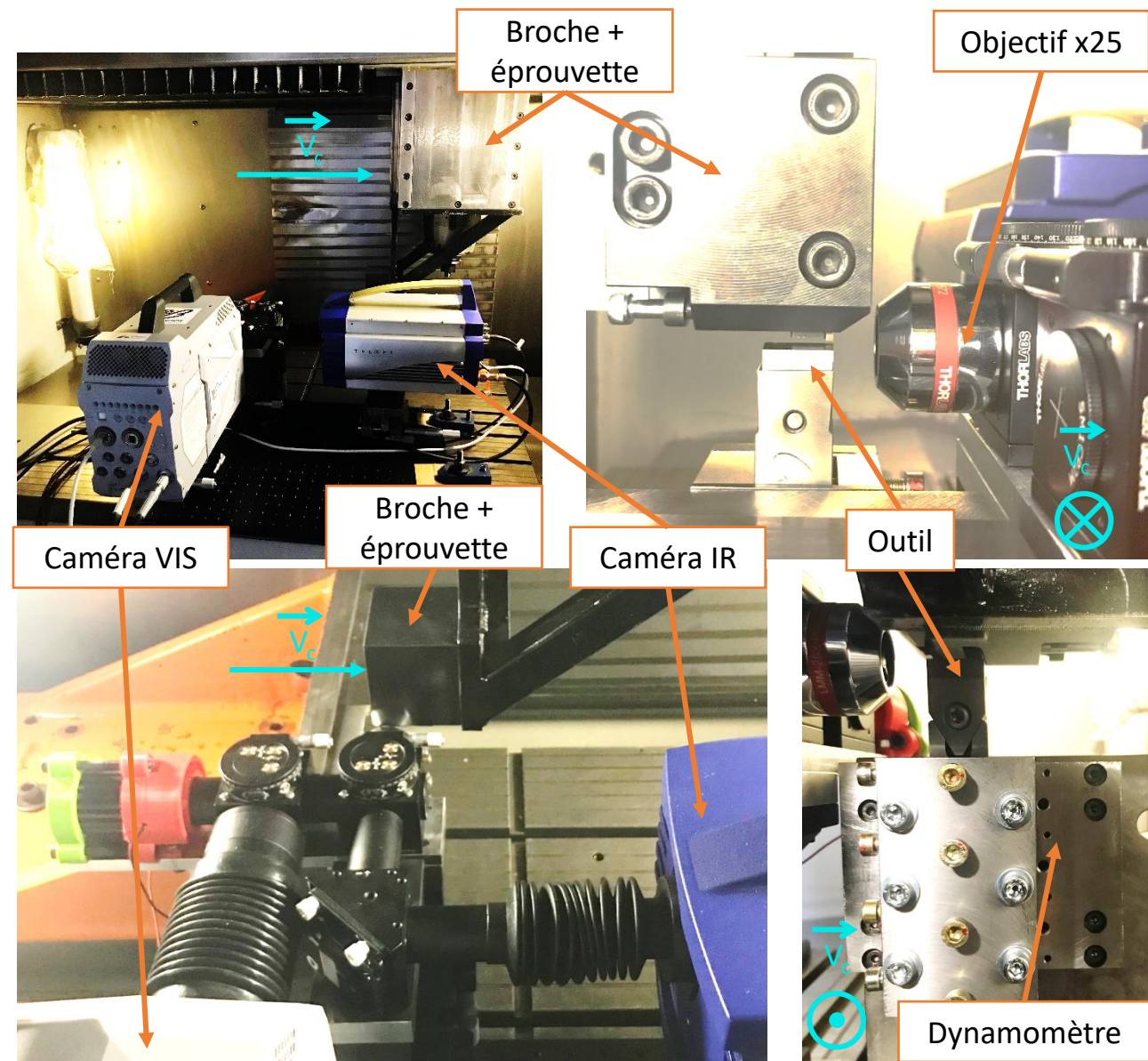
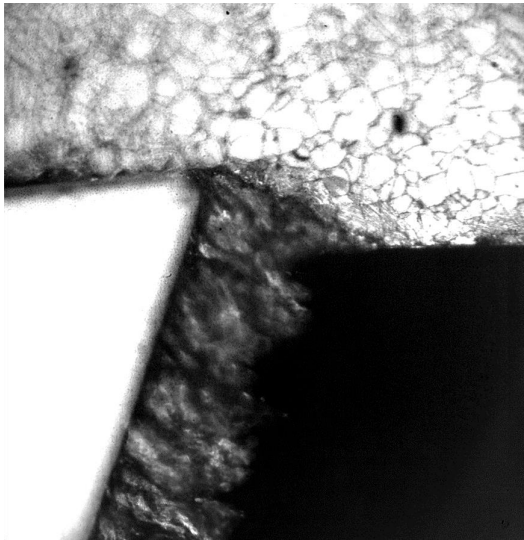
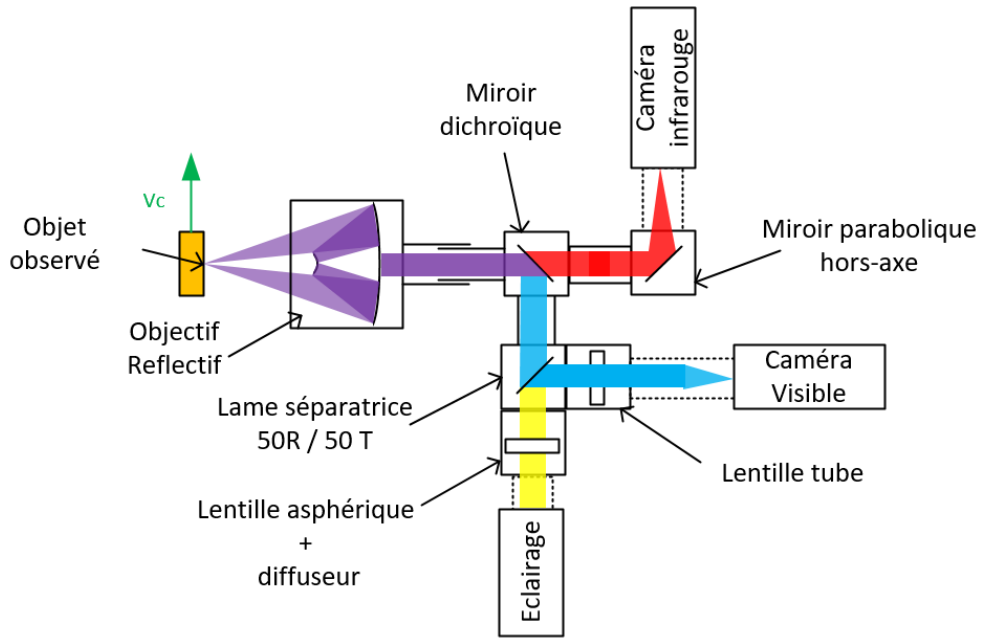
➤ Synchronisation des moyens de mesure



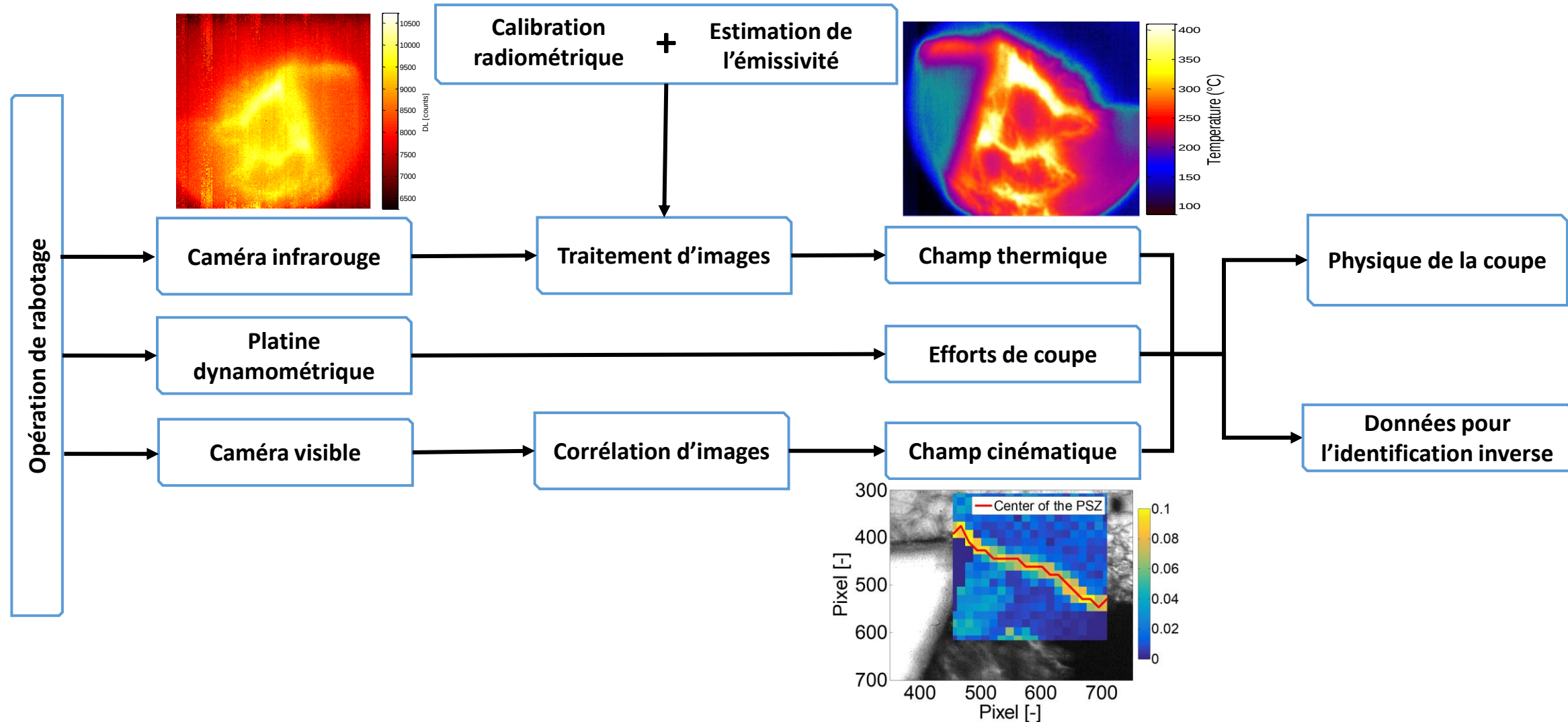
Synchronisation à la μs



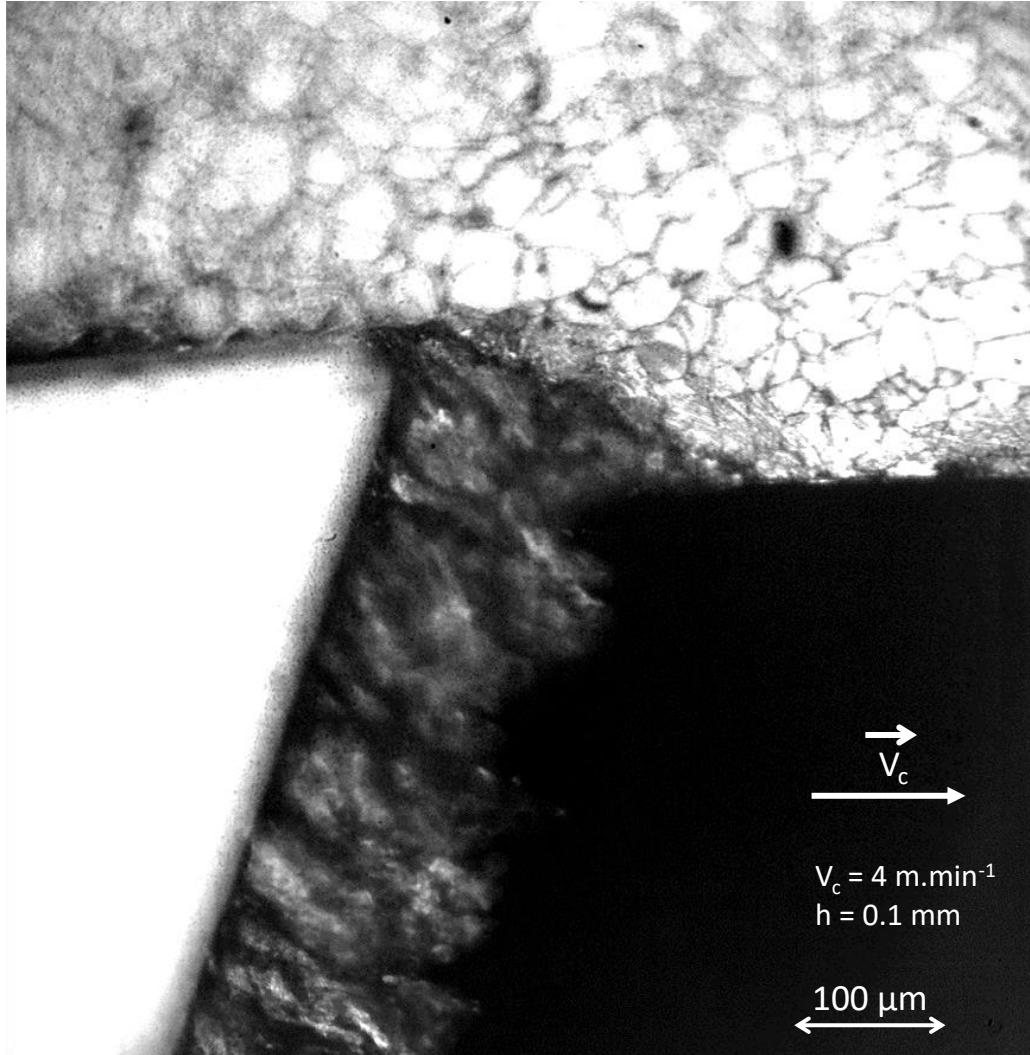
Instrumentation multimodale (robotage)



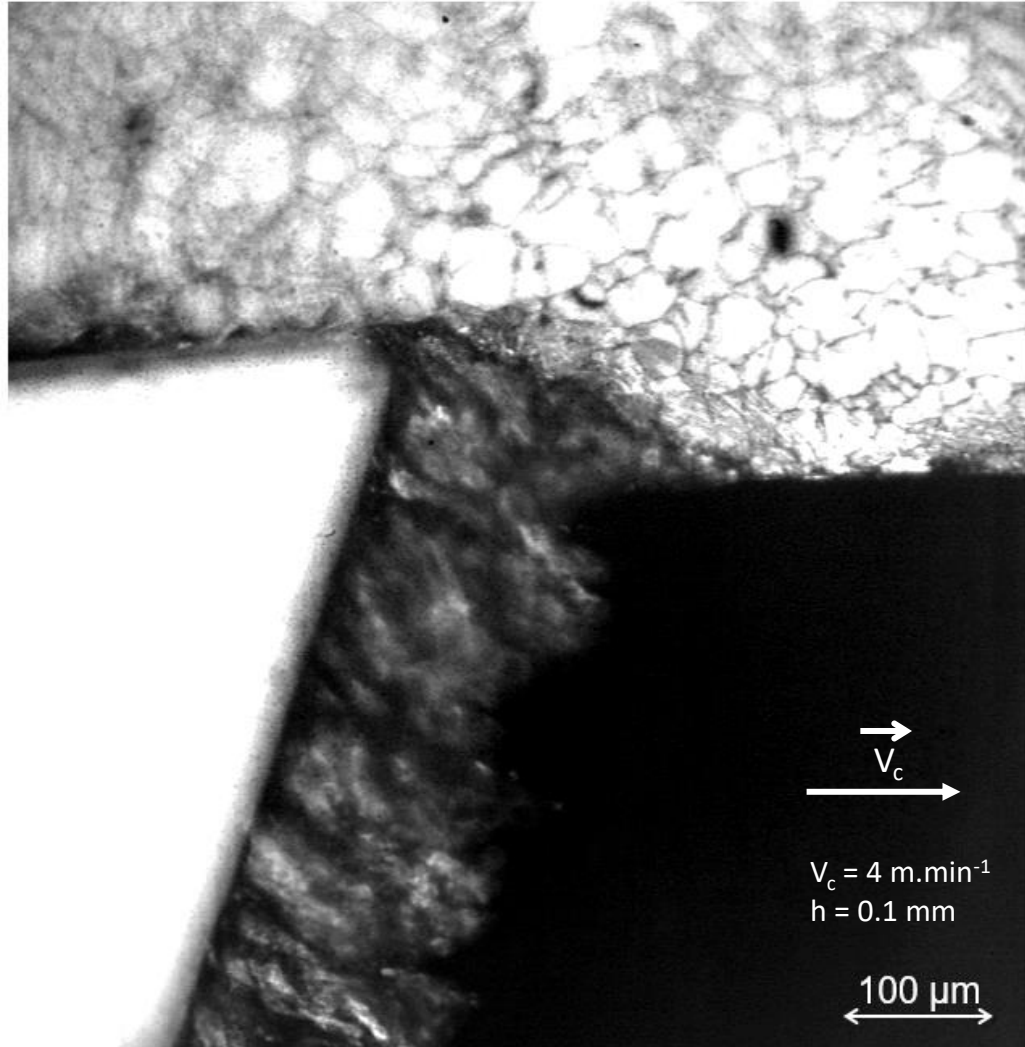
Instrumentation multimodale (rabotage)



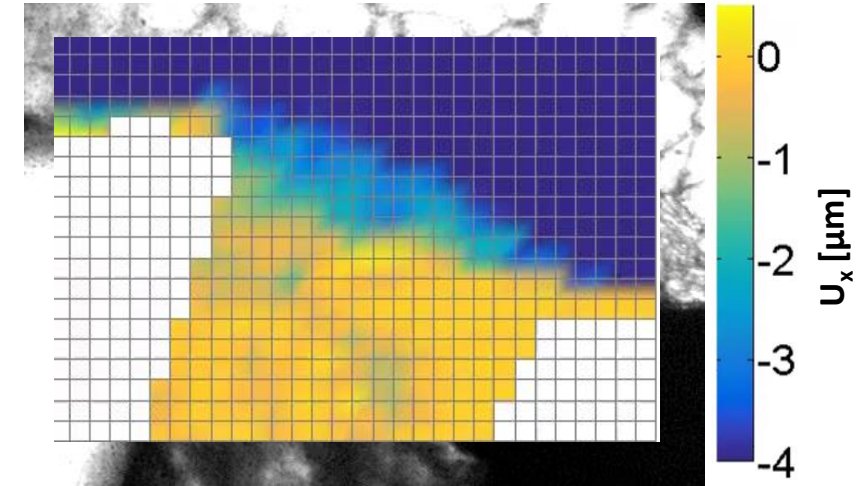
Champ cinématique de coupe



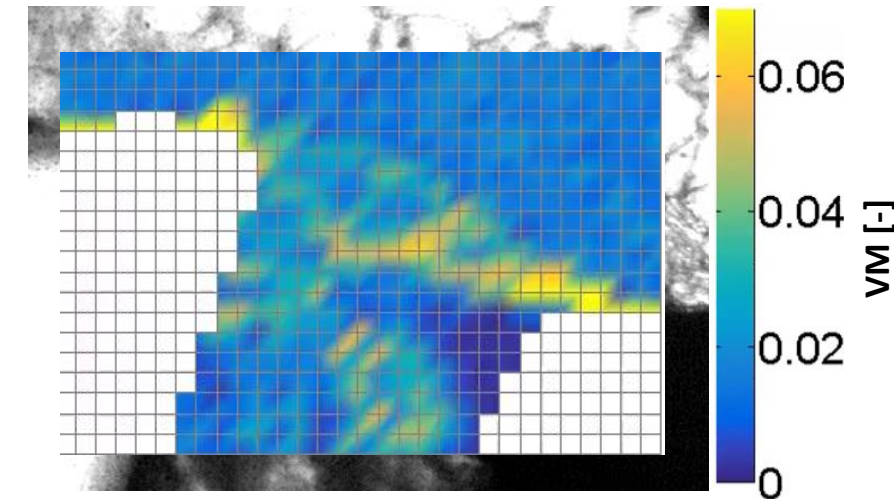
Champ cinématique de coupe



Déplacement U_x

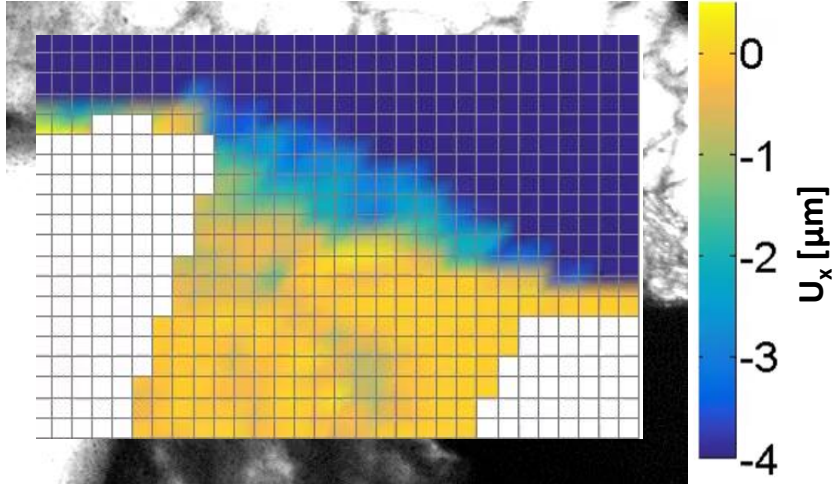


Déformation équivalente de von Mises

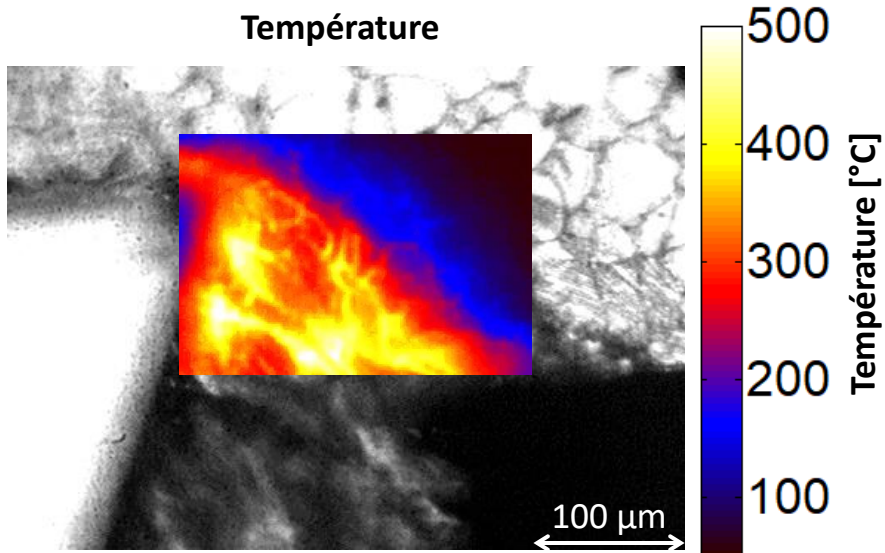


Champ thermomécanique de coupe

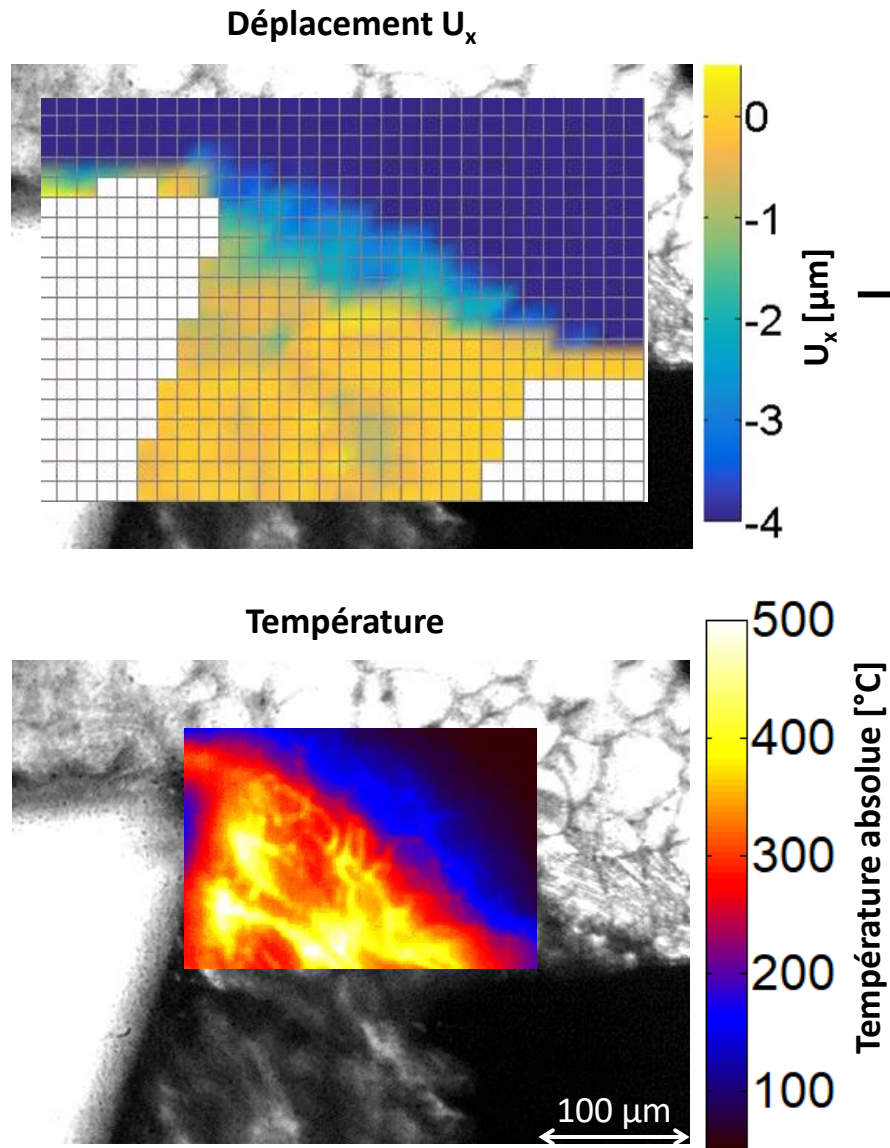
Déplacement U_x



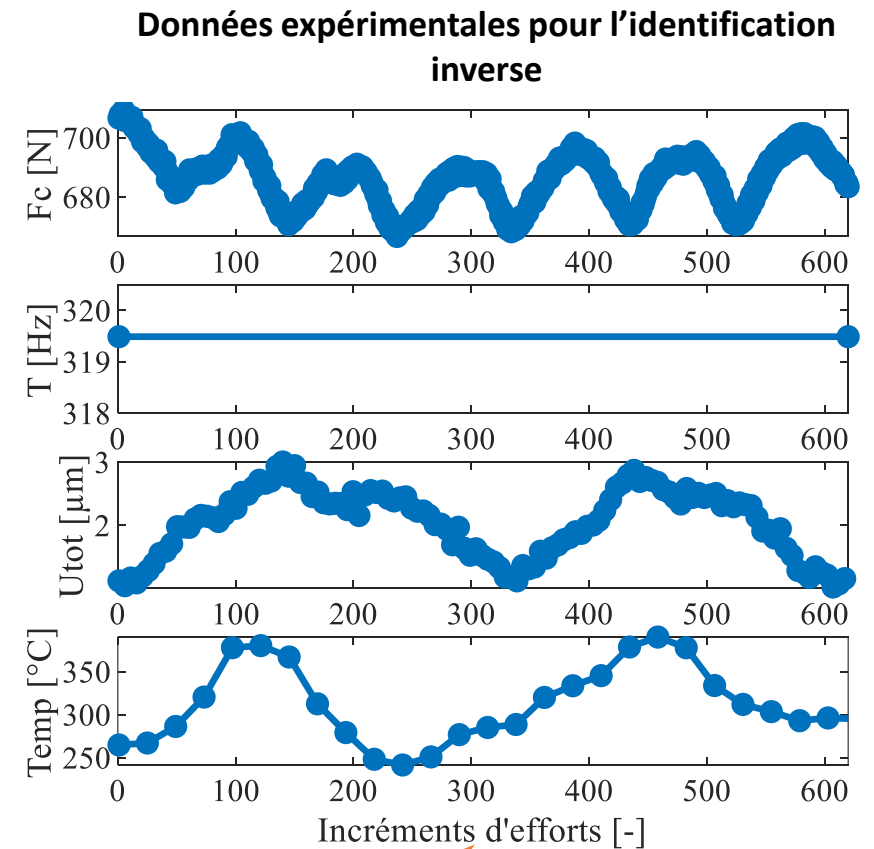
Température



Données acquises



Traitement
des données



Base temporelle
Fréquence acquisition dynamomètre

Vers la simulation de la coupe orthogonale

- **Plasticité : Johnson Cook (JC) plastique**

$$\sigma = [A + B \varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{amb}}{T_{fus} - T_{amb}} \right)^m \right]$$

- **Amorçage de l'endommagement : JC**

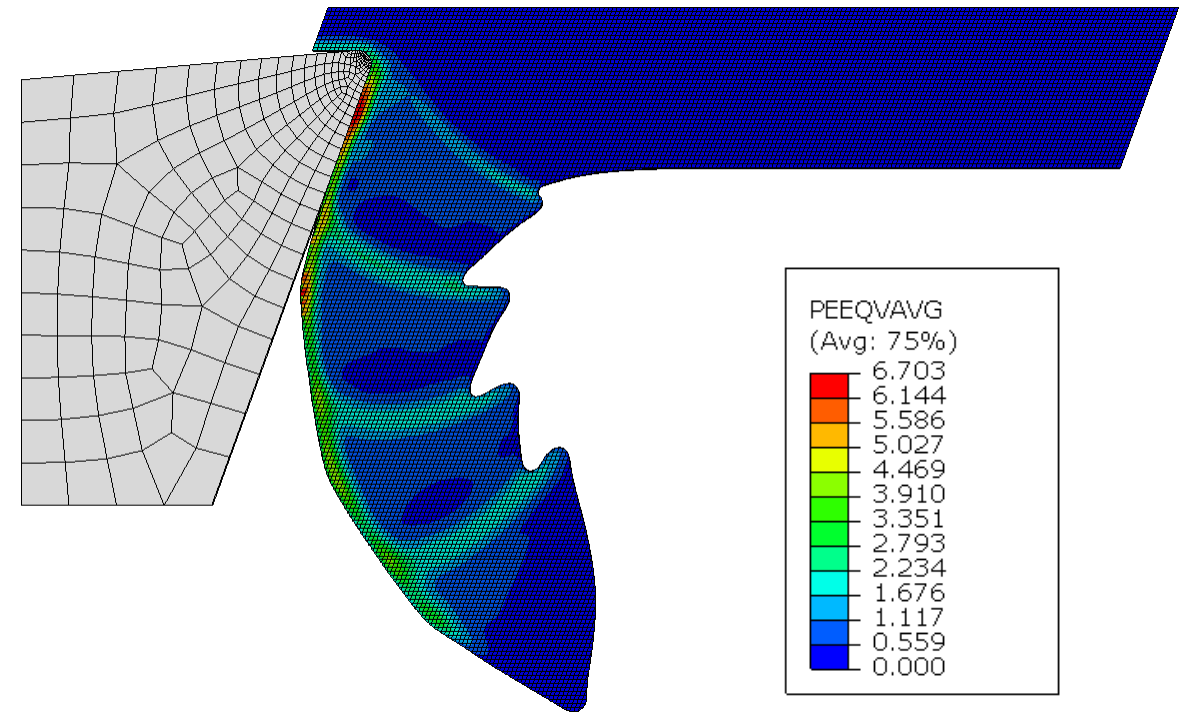
$$\bar{\varepsilon}_{0i} = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{P}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - D_5 \left(\frac{T - T_{amb}}{T_{fus} - T_{amb}} \right) \right]$$

- **Frottement outil / copeau : Coulomb**

$$F_T = \mu F_N$$

- **Coefficient de Taylor Quinney**

$$\beta_{int} = \frac{\rho C_p \Delta T}{\int d \omega_p} \text{ avec } \int d \omega_p = \int \sigma : \dot{\varepsilon}_p$$



Sorties : déplacements, températures, efforts
et période de festonnement

Analyse de sensibilité

- Sensibilité du mesurande M au paramètre p

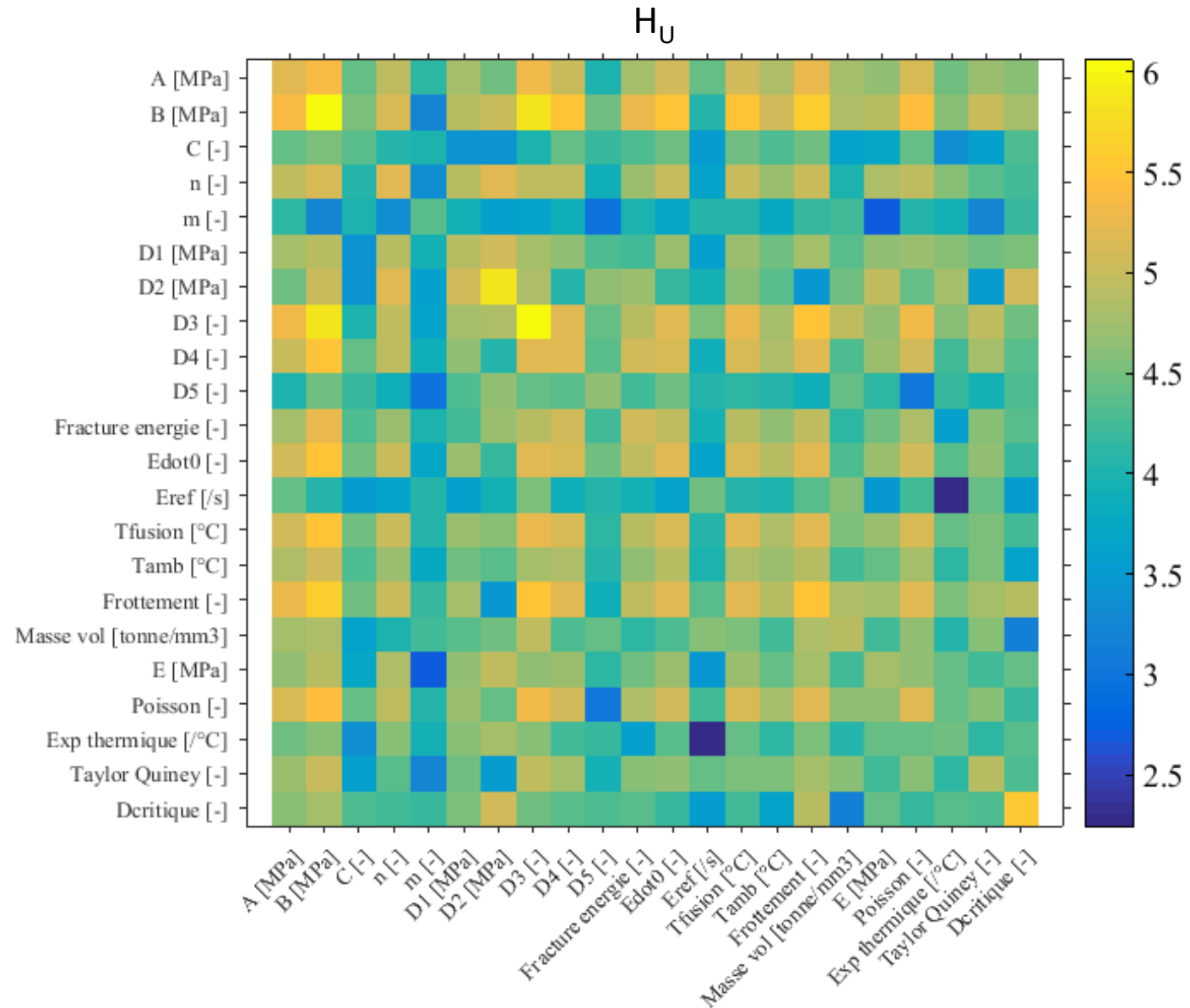
$$S_M(p, \mathbf{x}, t) = \frac{\partial M(p, \mathbf{x}, t)}{\partial p} \cong \frac{M(p + dp, \mathbf{x}, t) - M(p, \mathbf{x}, t)}{dp}$$

- Calcul des matrices hessiennes

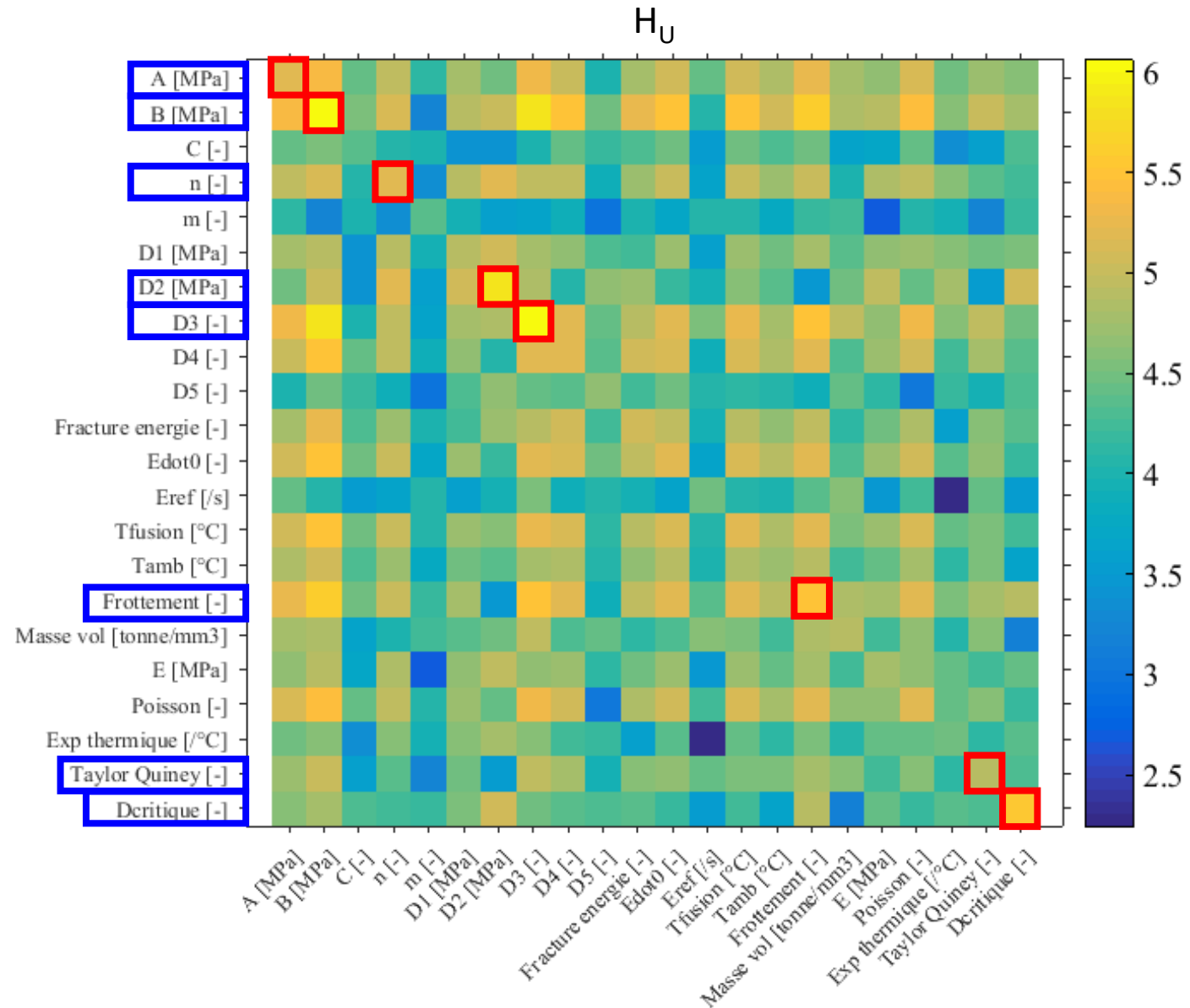
$$\hat{H}_M = \log_{10} \left(\left| \frac{[S_M]^t [S_M]}{\sigma_M^2 \text{card}(M)} \right| \right)$$

- Dépendances (corrélations) entres paramètres

Matrice hessienne cinématique



Matrice hessienne cinématique



Plan de l'exposé

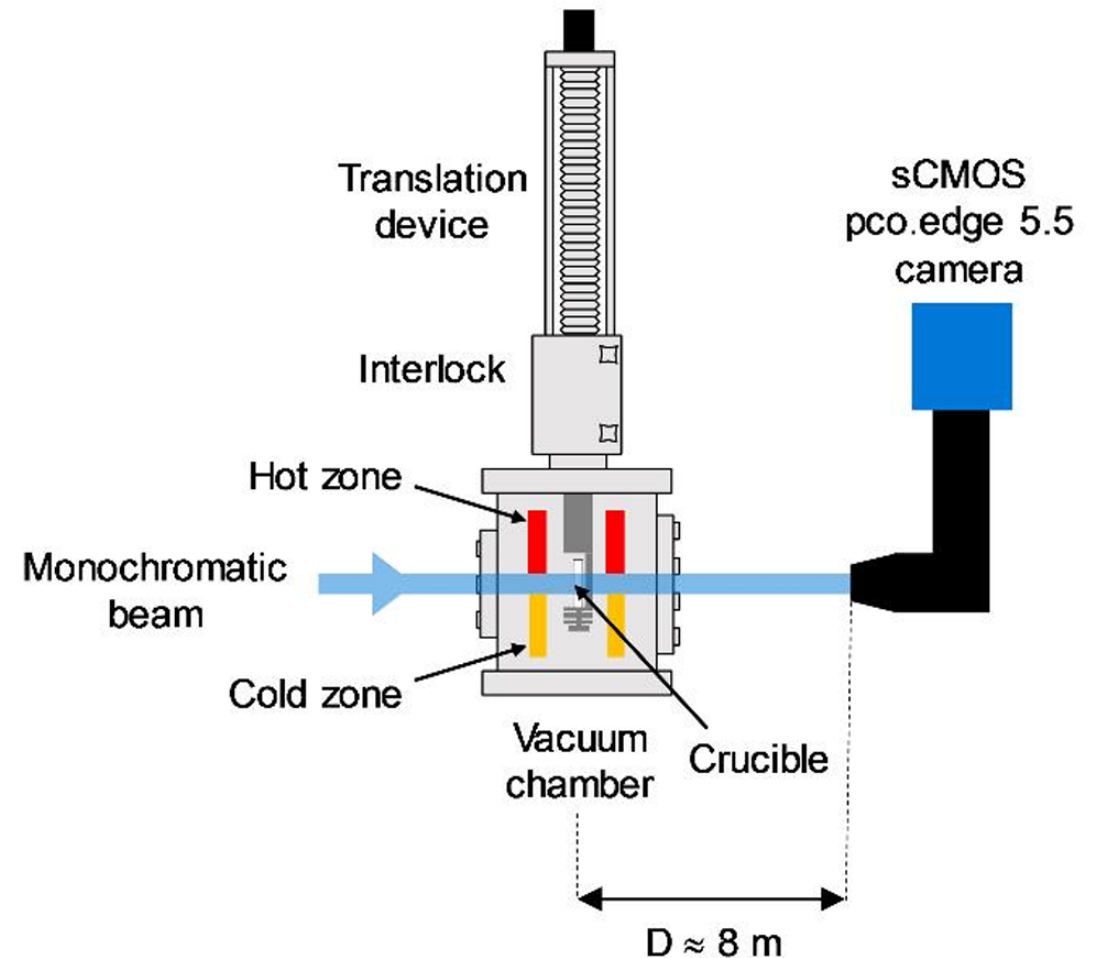
- Simulation des procédés
- Essais in situ et instrumentation
- Mesure des efforts de coupe par corrélation d'images
- Mesures thermomécaniques in situ
- **Imagerie RX et procédés**
- Conclusion et perspectives

Synchrotrons de 3^e génération



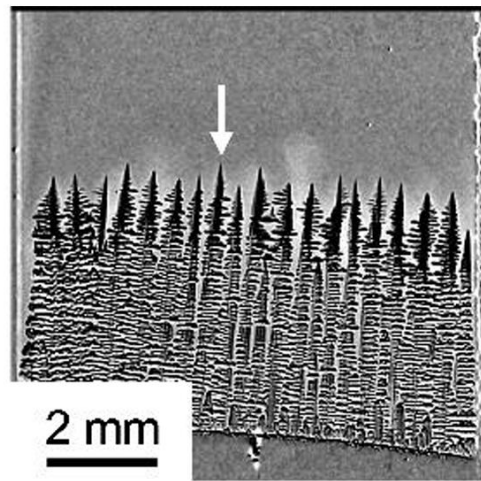
Solidification directionnelle du superalliage monocristallin CMSX-4

- Radiographie RX rapide (ESRF)
- Observations in situ de la solidification ($T_{\max} = 1475^{\circ}\text{C}$)
- Flot de soluté au cours de la croissance dendritique pour un superalliage à base de Ni

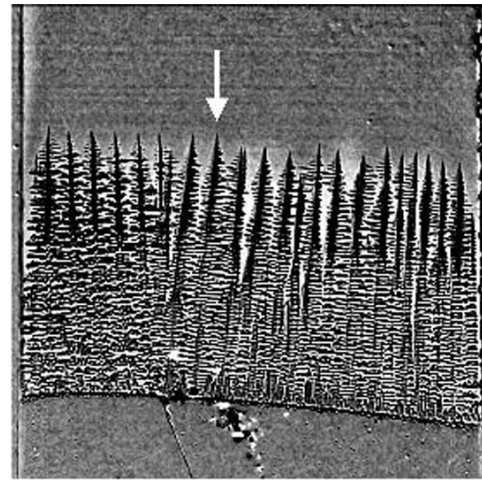


Croissance de la microstructure dendritique

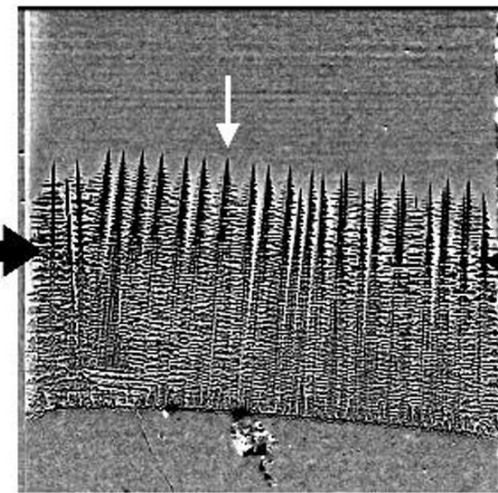
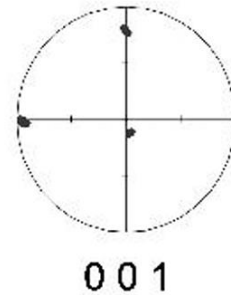
Effet de la vitesse de refroidissement



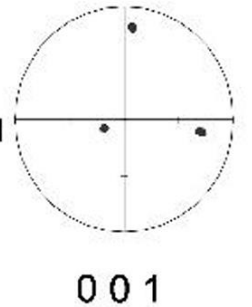
$R_1 = -2 \text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$



$R_2 = -4 \text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$

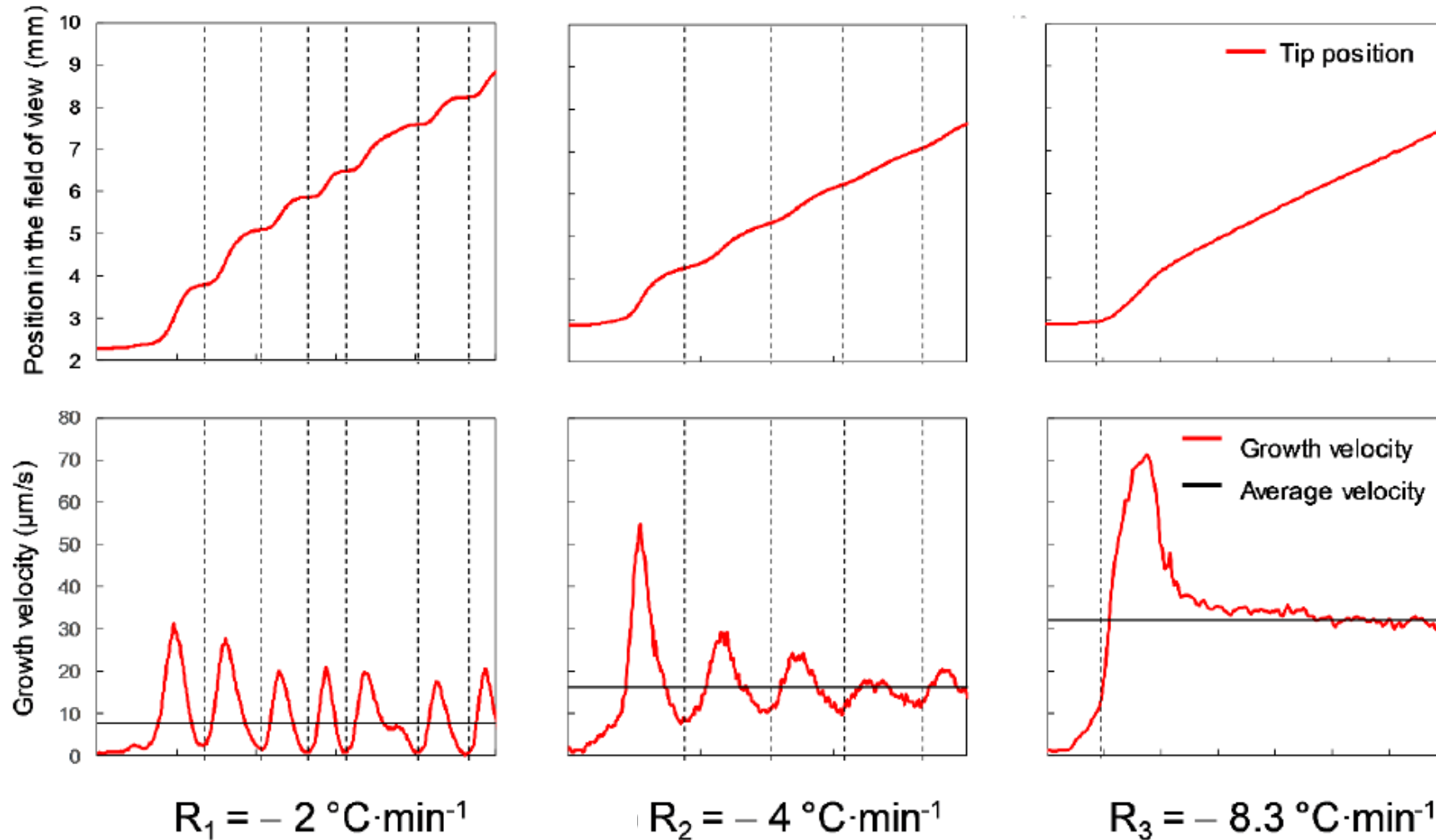


$R_3 = -8.3 \text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$

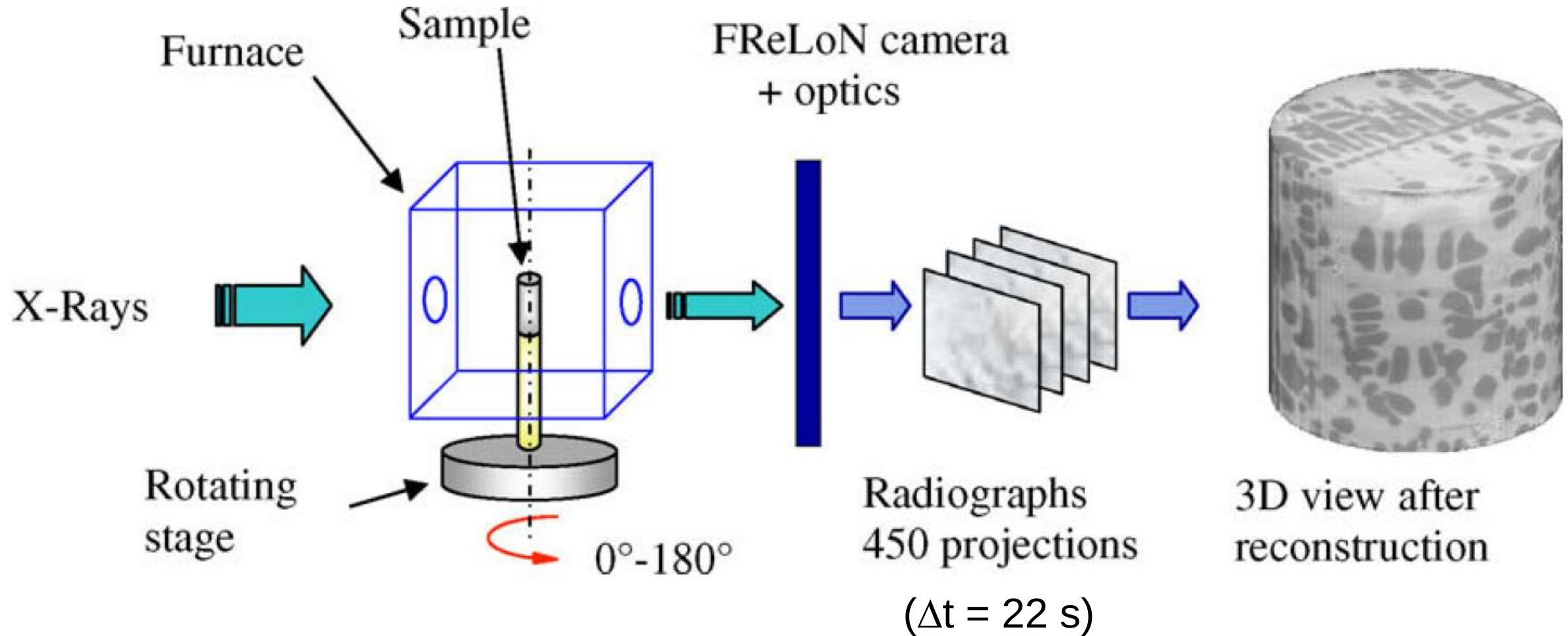


Croissance de la microstructure dendritique

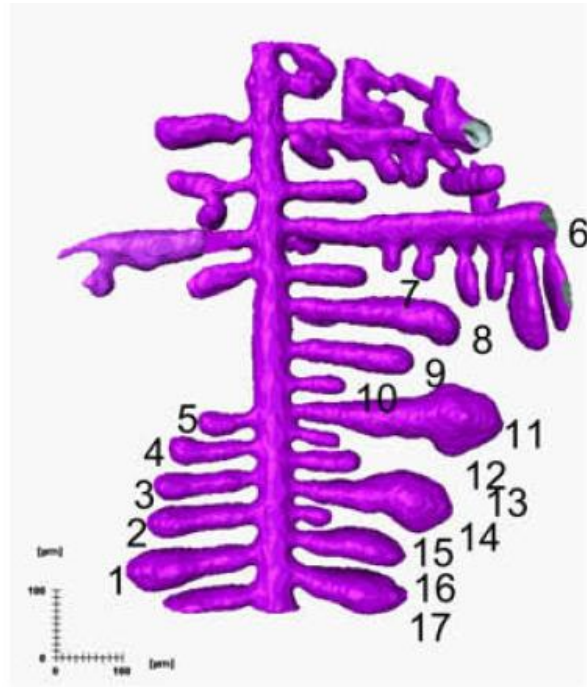
Effet de la vitesse de refroidissement



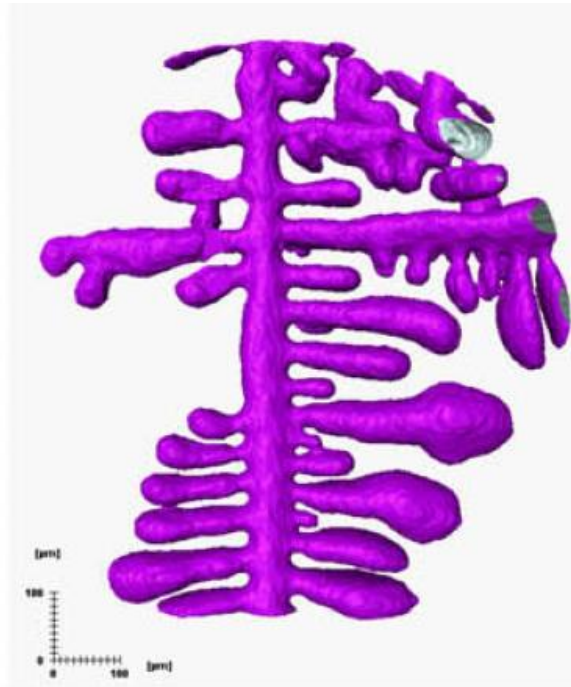
Solidification dendritique (Al–10w%Cu)



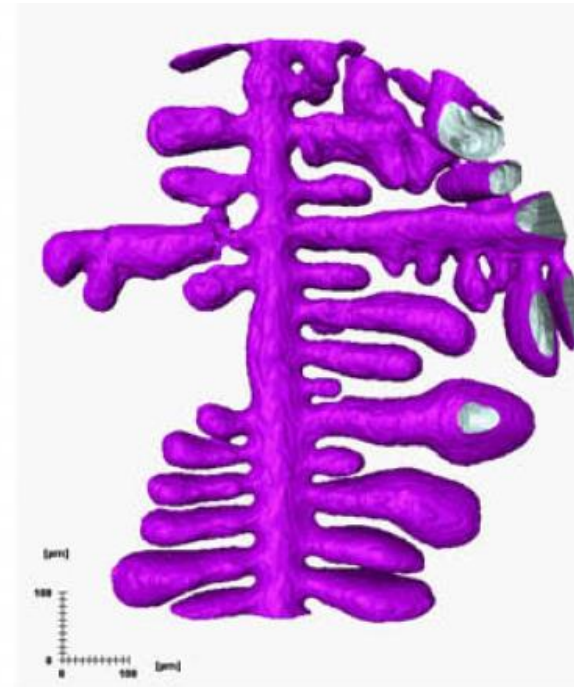
Solidification dendritique (Al–10w%Cu)



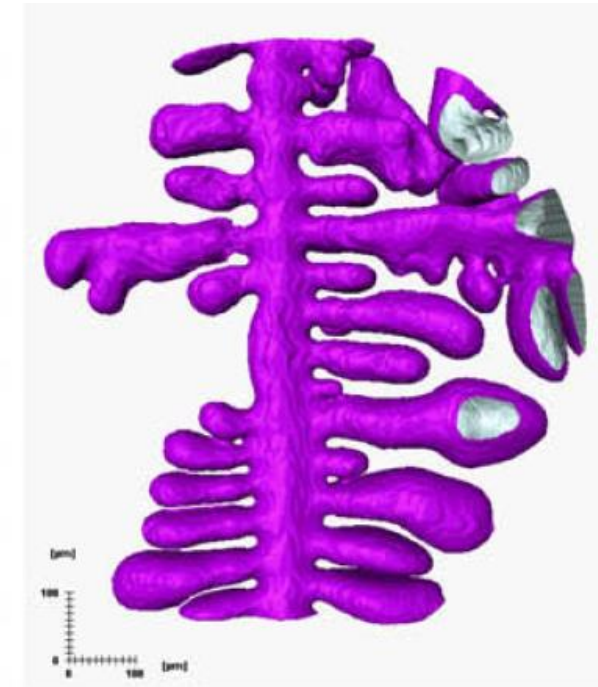
163s, 626°C, 0.19



219s, 623°C, 0.29

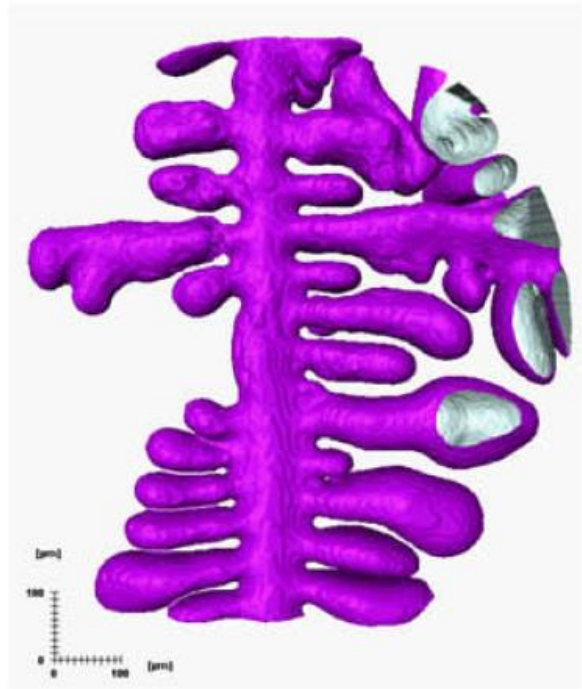


275s, 620°C, 0.37

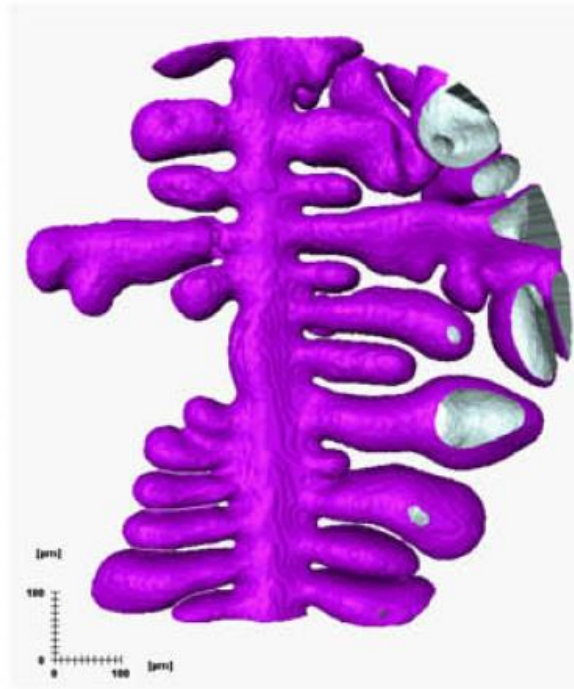


329s, 618°C, 0.42

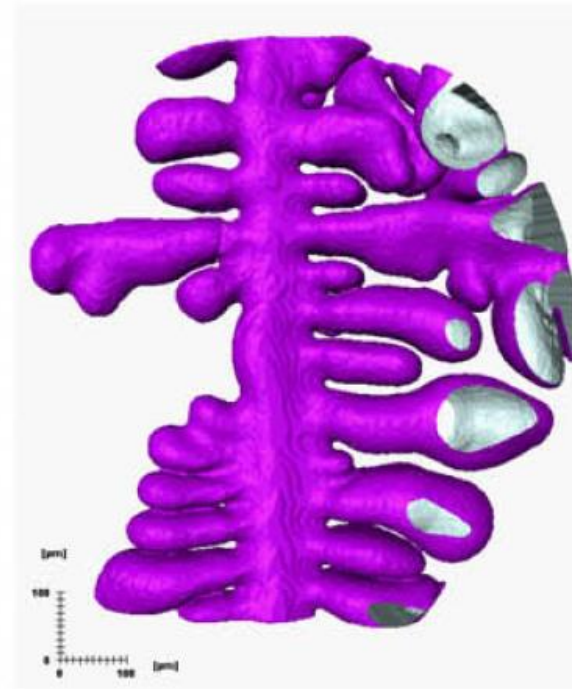
Solidification dendritique (Al–10w%Cu)



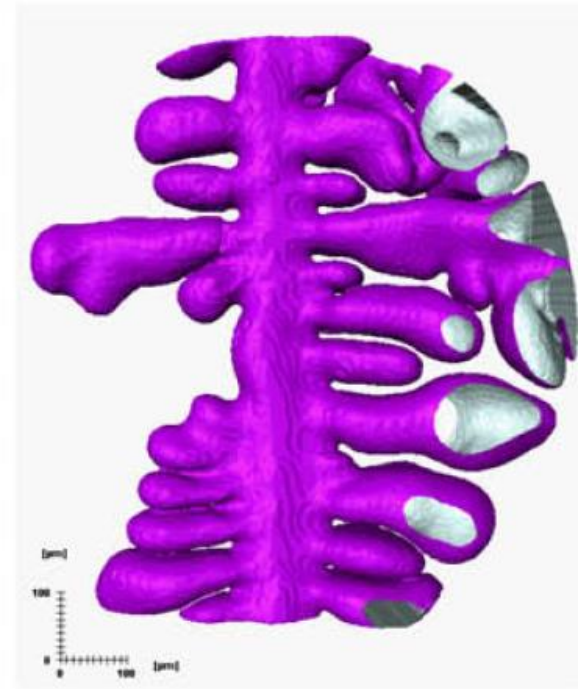
384s, 615°C, 0.46



440s, 612°C, 0.52

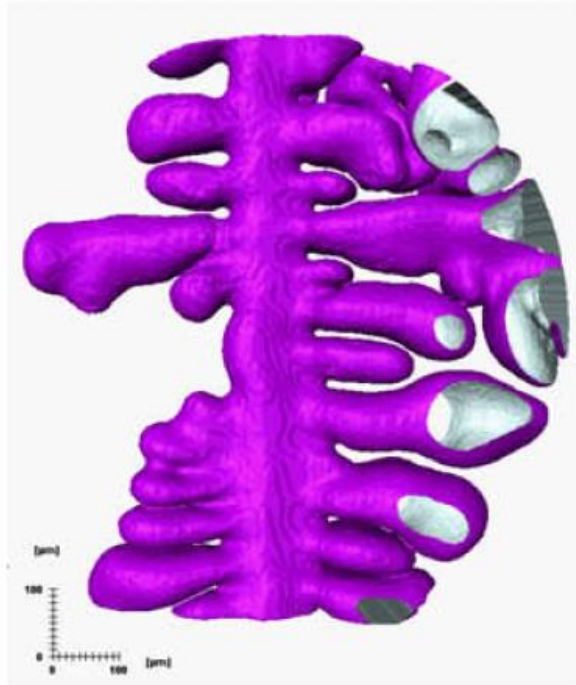


495s, 609°C, 0.56

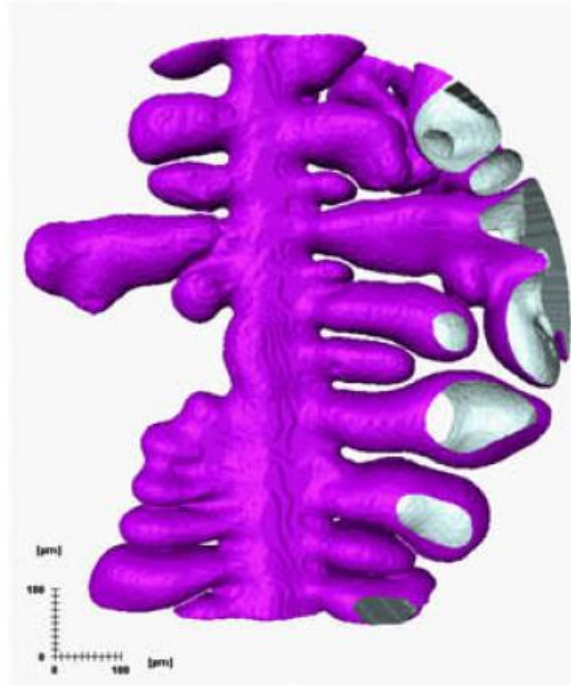


551s, 606°C, 0.58

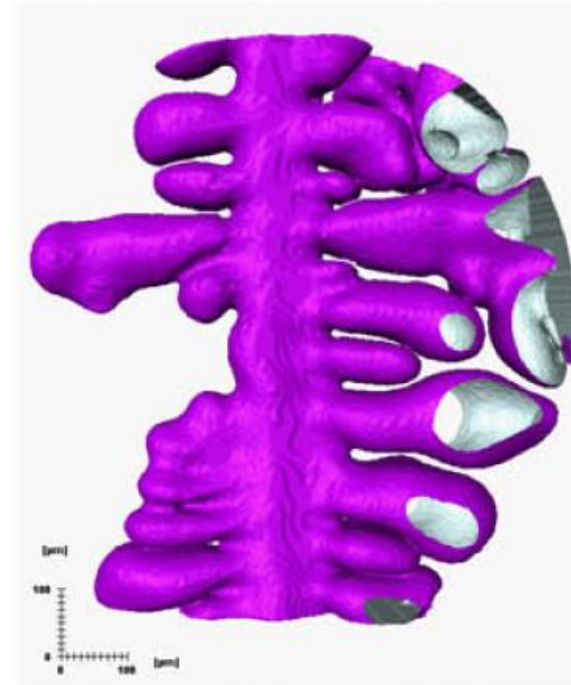
Solidification dendritique (Al–10w%Cu)



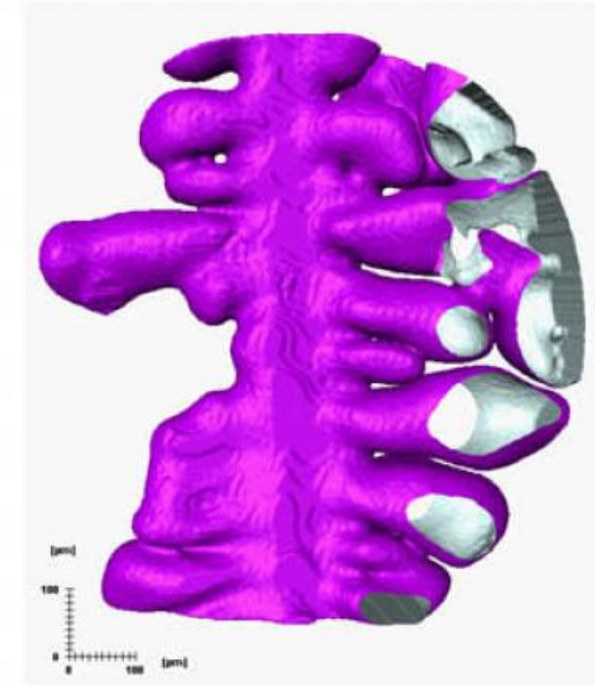
603s, 604°C, 0.60



658s, 601°C, 0.62

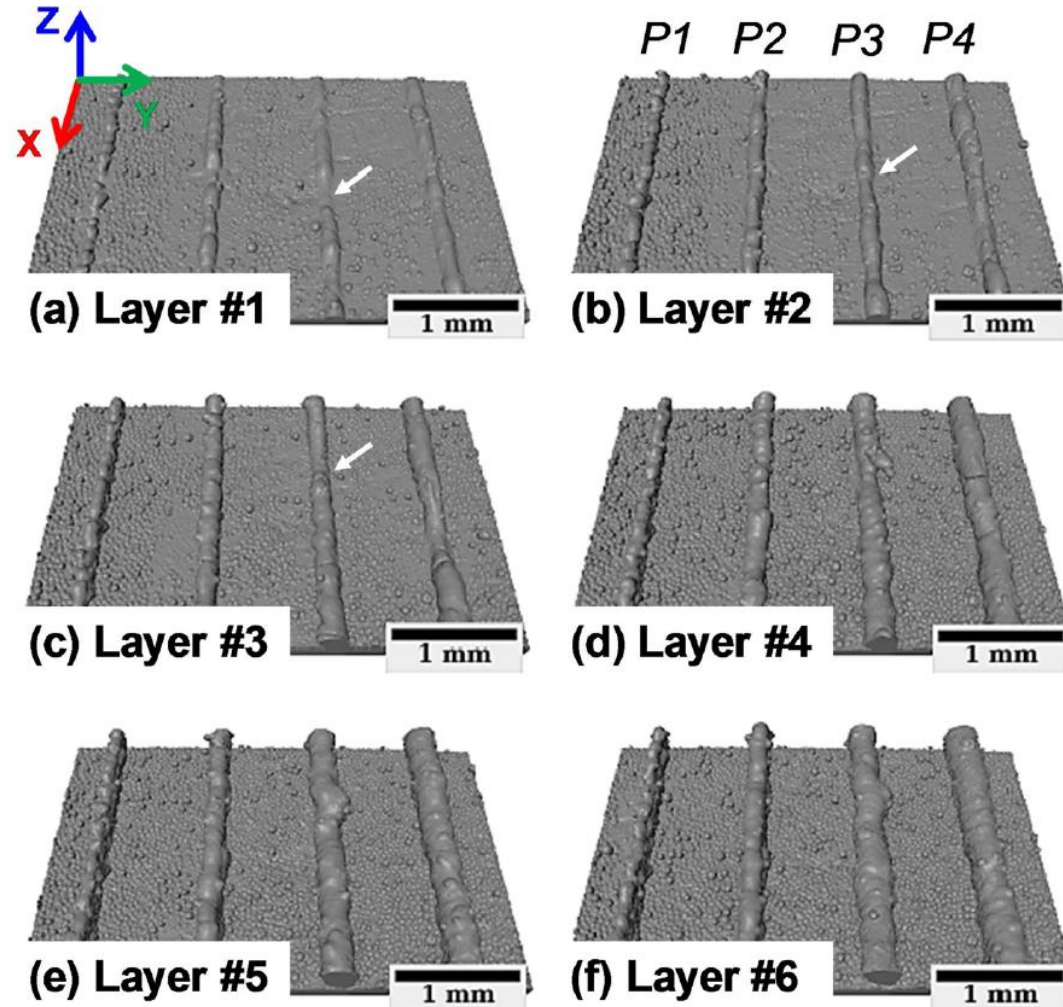


714s, 598°C, 0.65



1104s, 579°C, 0.77

Fusion laser sur lit de poudre (Ti-6Al-4V-ELI)

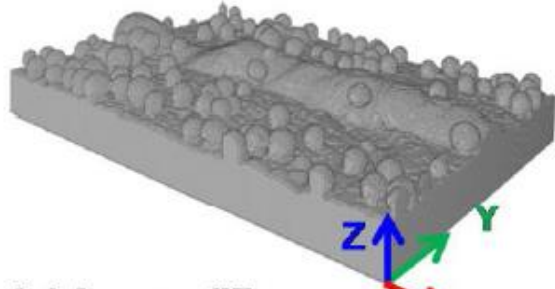


Paramètres de fabrication :

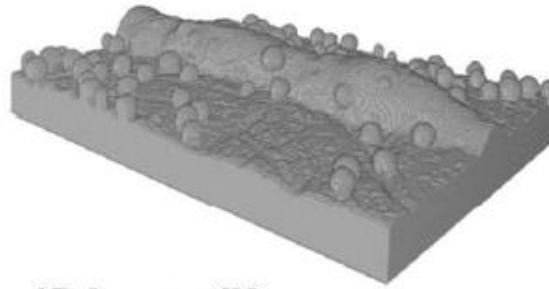
- $P1 = 50 \text{ W}$
- $P2 = 100 \text{ W}$
- $P3 = 125 \text{ W}$
- $P4 = 150 \text{ W}$
- $V_{\text{laser}} = 200 \text{ mm/s}$
- $e = 100 \text{ }\mu\text{m}$

Fusion laser sur lit de poudre (Ti-6Al-4V-ELI, P2 = 100 W)

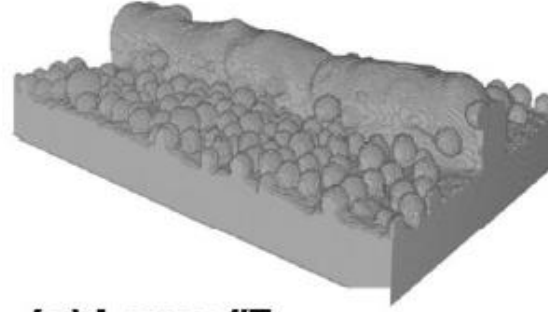
(a) Layer #1



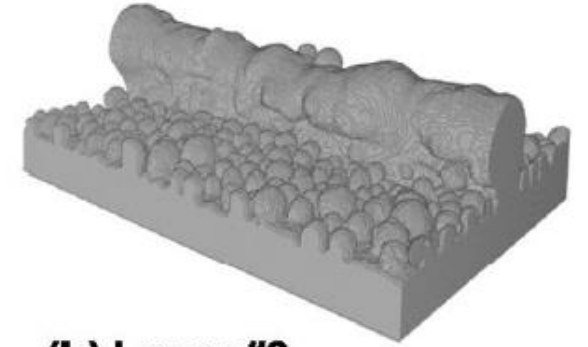
(b) Layer #2



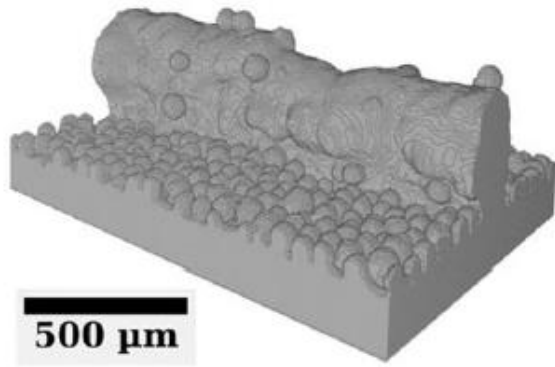
(c) Layer #3



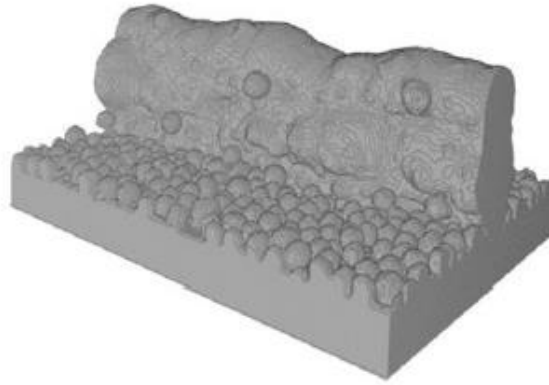
(d) Layer #4



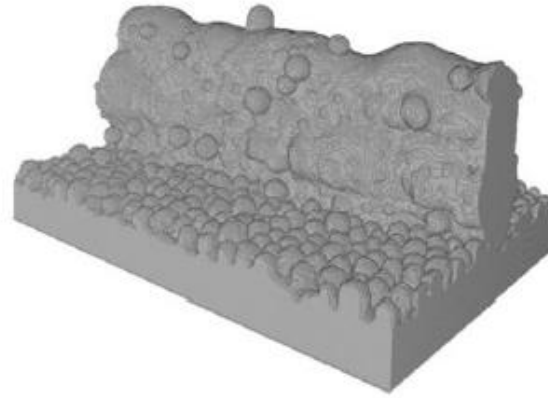
(e) Layer #5



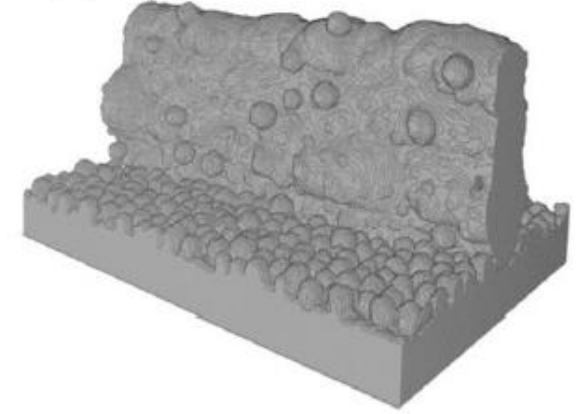
(f) Layer #6



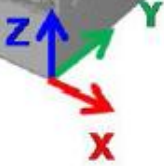
(g) Layer #7



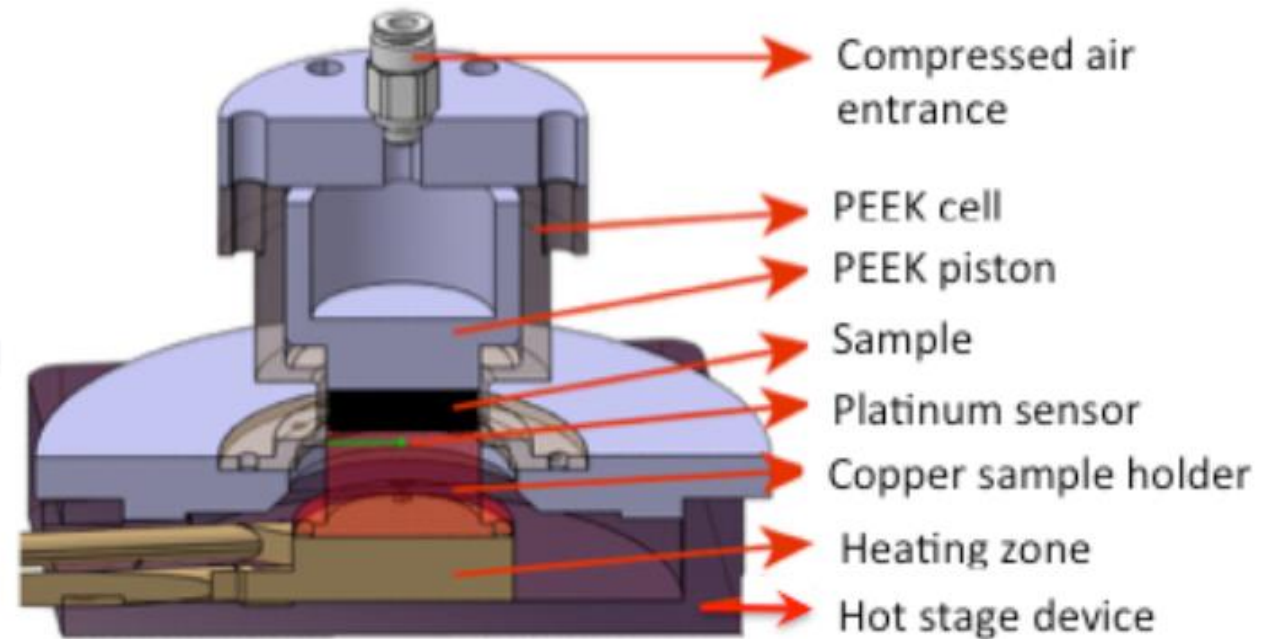
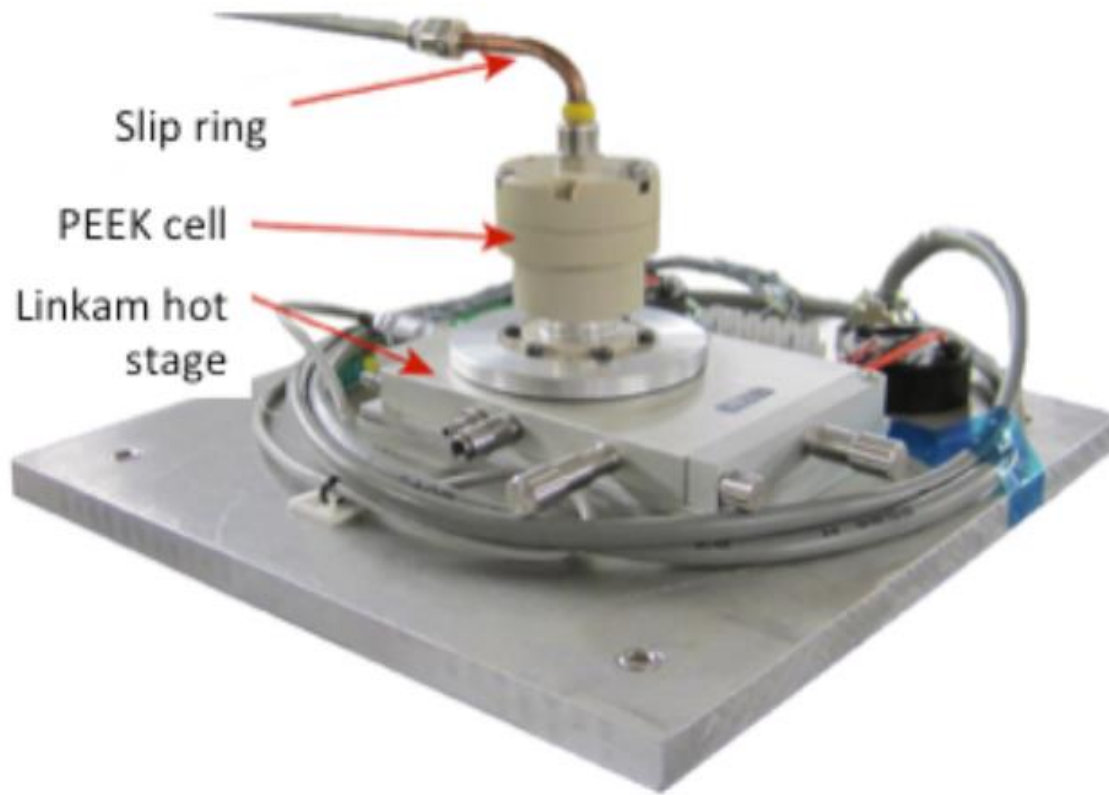
(h) Layer #8



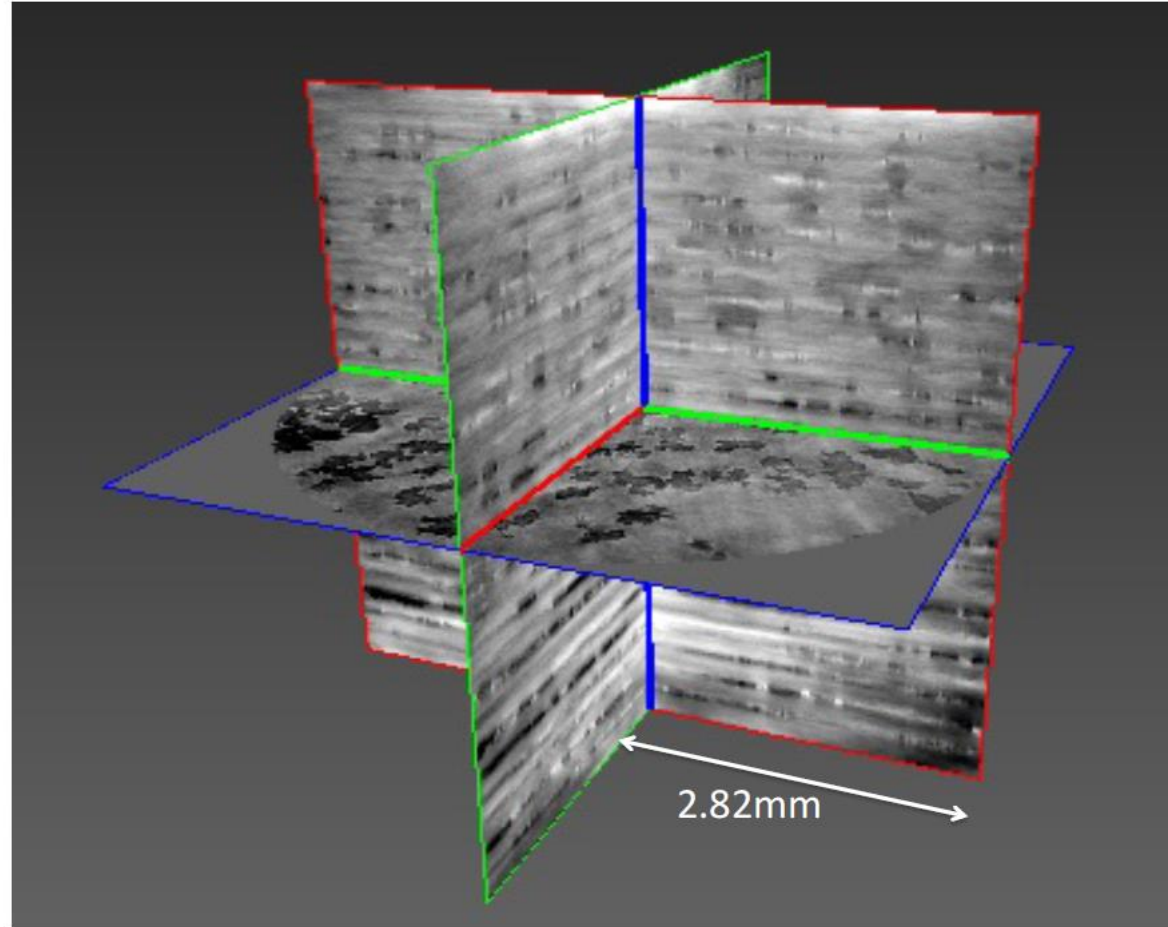
500 μm



Suivi in situ de la croissance de pores lors de la polymérisation (composite à matrice polymère)

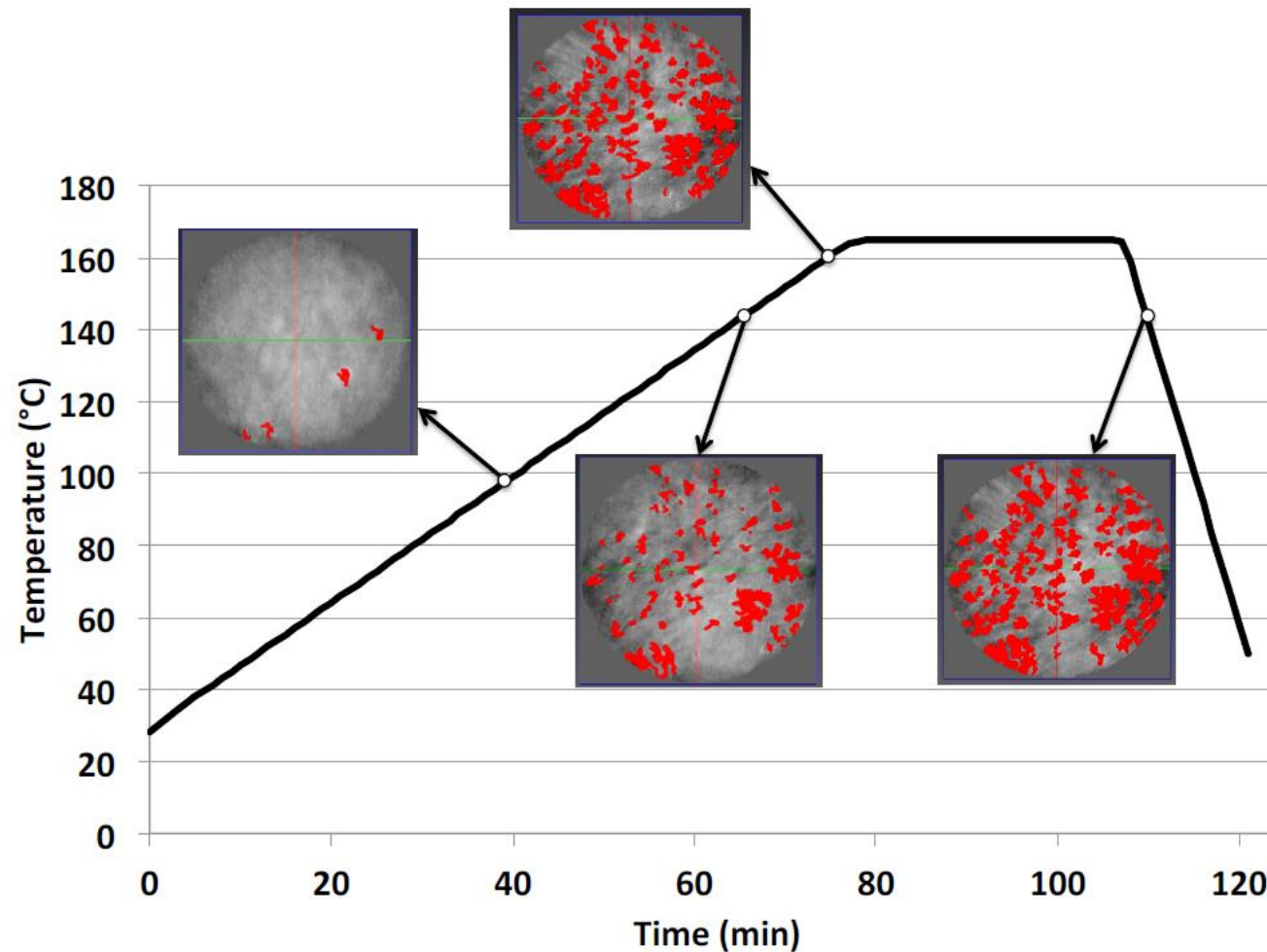


Coupes orthogonales

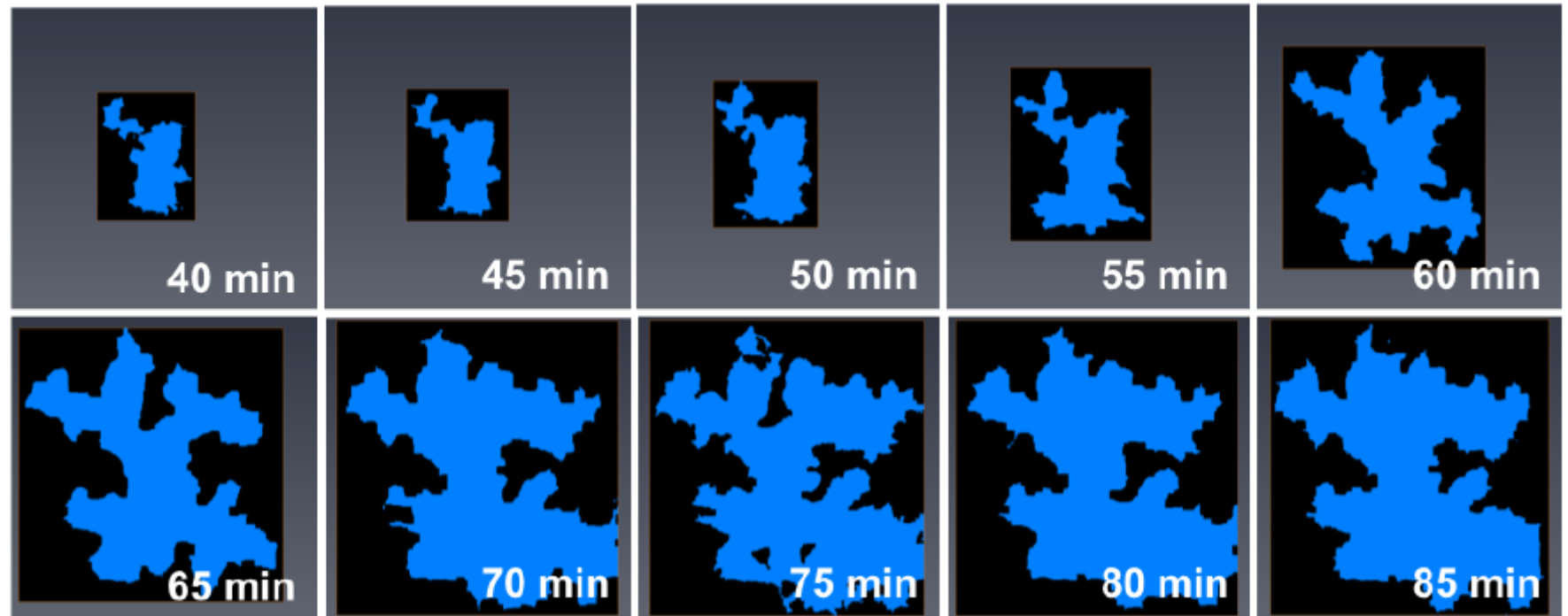
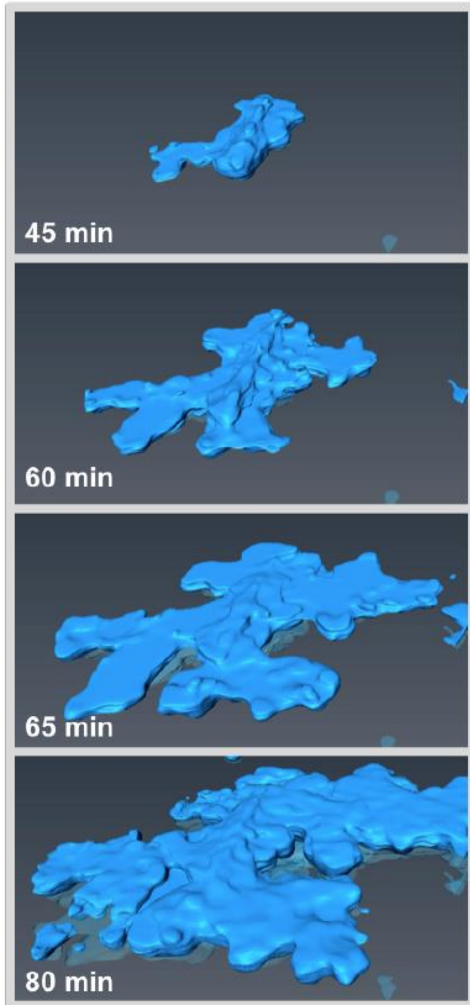


($\Delta t = 30$ s)

Développement de la porosité



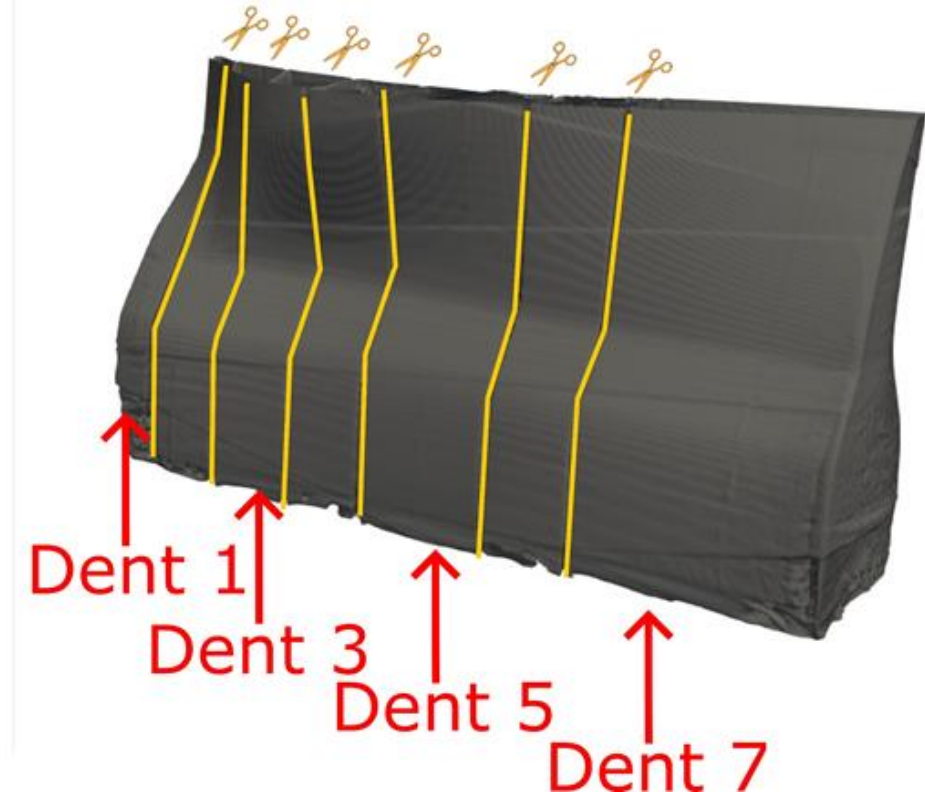
Croissance d'un pore au centre du composite



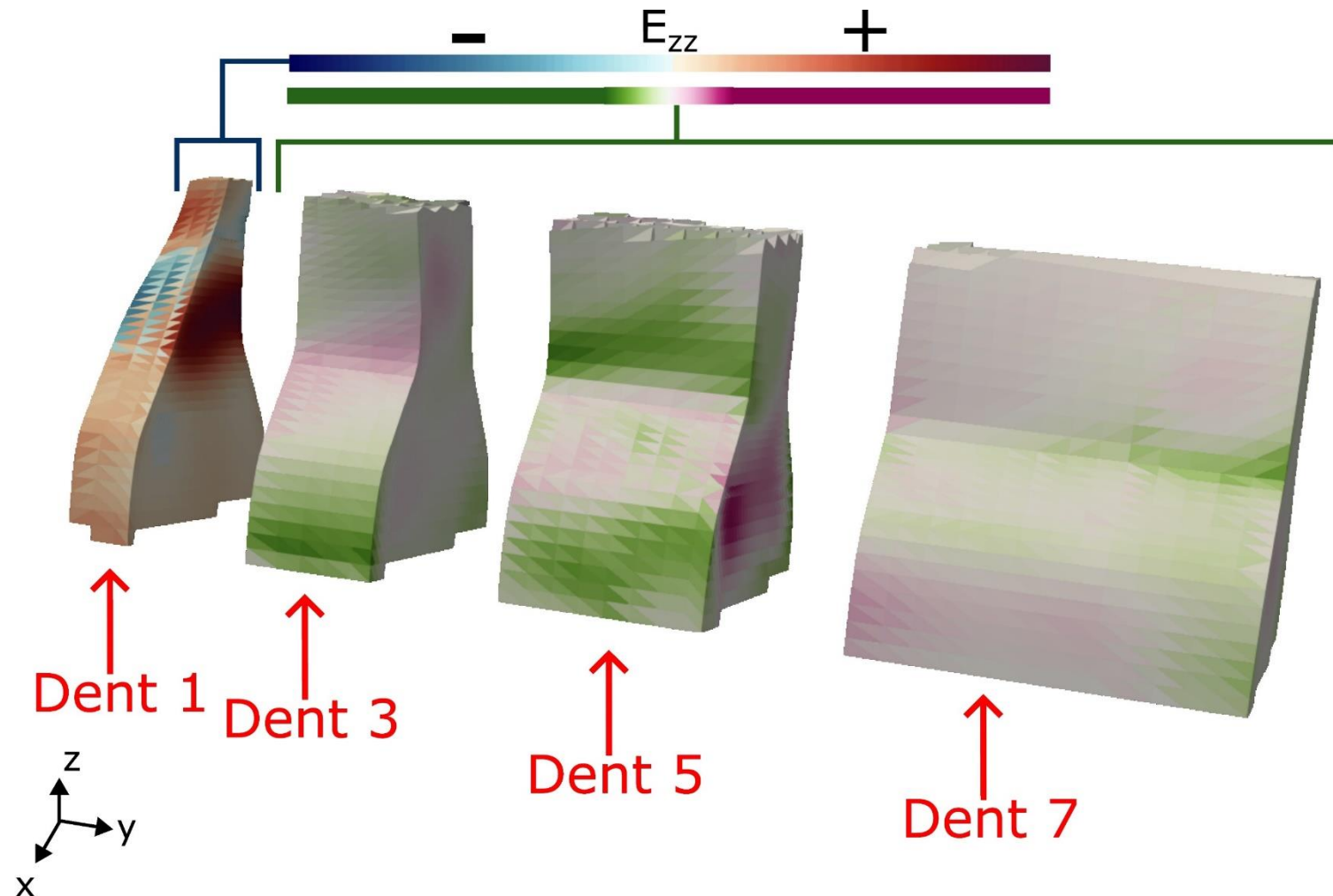
Tomographes de laboratoire / industriels



Contraintes résiduelles induites par le procédé RTM ?



Champ de déformation longitudinale mesuré par corrélation d'images volumiques

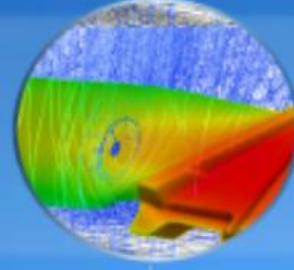
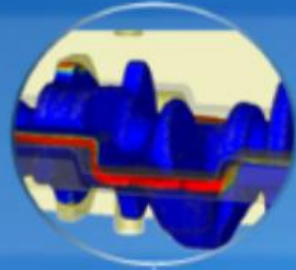


Plan de l'exposé

- Simulation des procédés
- Essais in situ et instrumentation
- Mesure des efforts de coupe par corrélation d'images
- Mesures thermomécaniques in situ
- Imagerie RX et procédés
- **Conclusion et perspectives**

Conclusion et perspectives

- Fil rouge de la présentation :
 - Le procédé est l'essai
 - Instrumentation multimodale in situ
 - Conditions extrêmes (fenêtre d'observation, τ , ϵ , $\dot{\epsilon}$, T , $\dot{T}$)
- Information essentiellement surfacique :
 - La majorité de l'imagerie actuelle reste surfacique
 - Imagerie 3D voire 4D possible
- De nombreux défis (malgré les progrès récents) :
 - Métrologie quantitative
 - Prévisions fidèles de l'intégrité de surface
 - Optimisation et contrôle des procédés

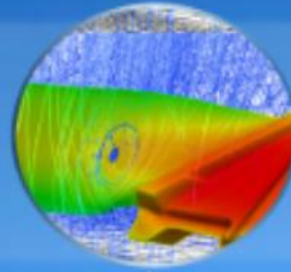
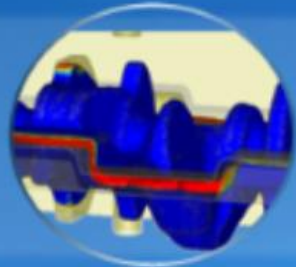


Remerciements

- T. Baizeau et C. Poissenot-Arrigoni
G. Fromentin, G. Poulachon, B. Marcon, F. Rossi
- L. Marcin et F. Pichot
- Vous !

Colloque National Aussois 2024

Simulation & instrumentation des Procédés de Fabrication



22-26 Janvier

Mécamat

Bon ski !