



Mastère Spécialisé Design des Matériaux et des Structures

Étude et automatisation du contrôle non destructif
surfacique de la qualité cristalline des aubes de turbine par
diffraction des rayons X

Présenté par

Marwa BEN BETTAIEB

Tuteur académique

Henry PROUDHON, *MINES Paris (CDM)*

Entreprise d'accueil

Safran Tech

Tutrice industrielle

Alexiane ARNAUD, *BARBEAU, Safran (PFX)*



Plan

- 1** Contexte et objectifs
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2 Aubes de turbine HP
- 3 Contrôle non destructif : DRX
- 4 Quelques résultats
- 5 Conclusion et perspectives

Plan

- 1** Contexte et objectifs
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2** Aubes de turbine HP
- 3 Contrôle non destructif : DRX
- 4 Quelques résultats
- 5 Conclusion et perspectives

Plan

- 1** Contexte et objectifs
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2** Aubes de turbine HP
- 3** Contrôle non destructif : DRX
- 4 Quelques résultats
- 5 Conclusion et perspectives

Plan

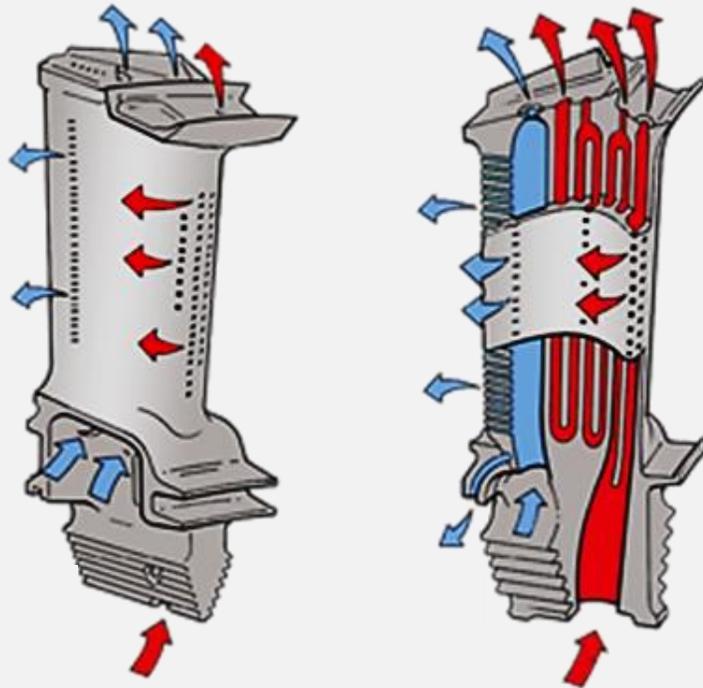
- 1 **Contexte et objectifs**
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2 **Aubes de turbine HP**
- 3 **Contrôle non destructif : DRX**
- 4 **Quelques résultats**
- 5 **Conclusion et perspectives**

Plan

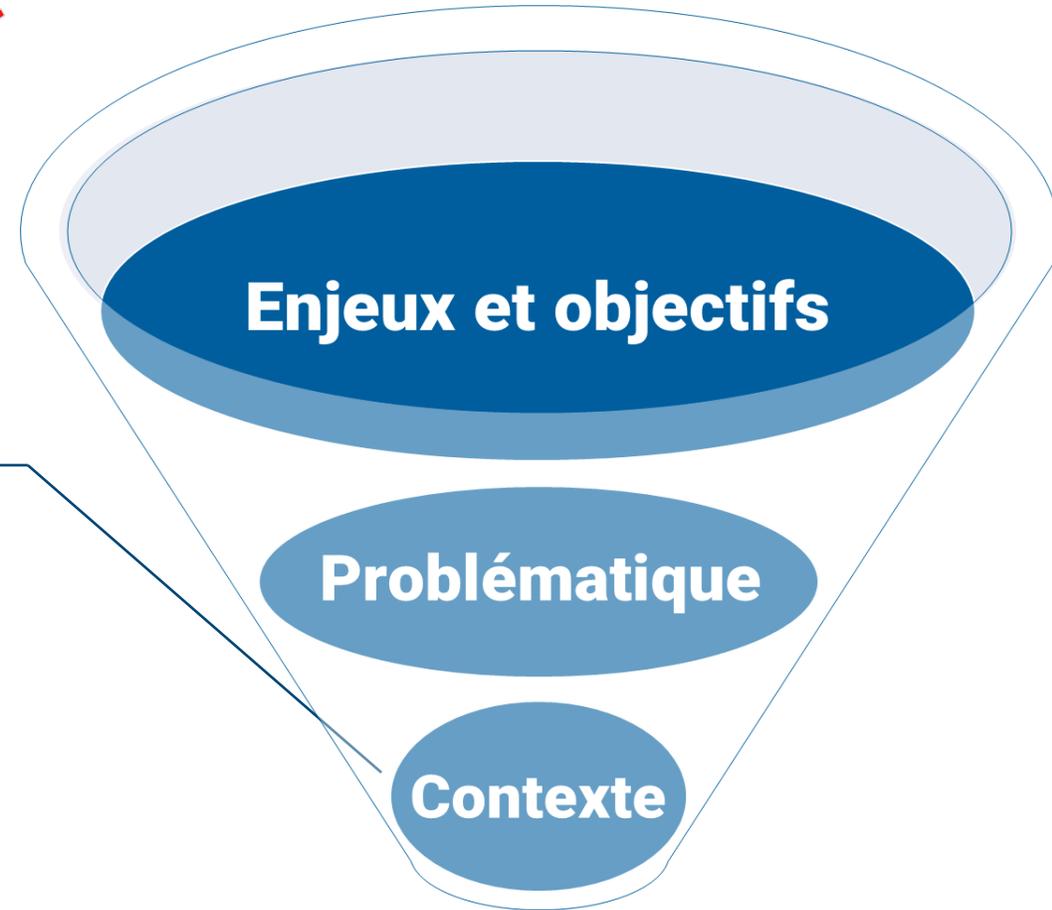
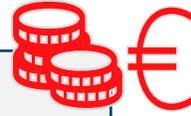
- 1 **Contexte et objectifs**
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2 **Aubes de turbine HP**
- 3 **Contrôle non destructif : DRX**
- 4 **Quelques résultats**
- 5 **Conclusion et perspectives**

- 1** Contexte et objectifs
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2 Aubes de turbine HP
- 3 Contrôle non destructif : DRX
- 4 Quelques résultats
- 5 Conclusion et perspectives

Optimisation du rendement des moteurs d'avion



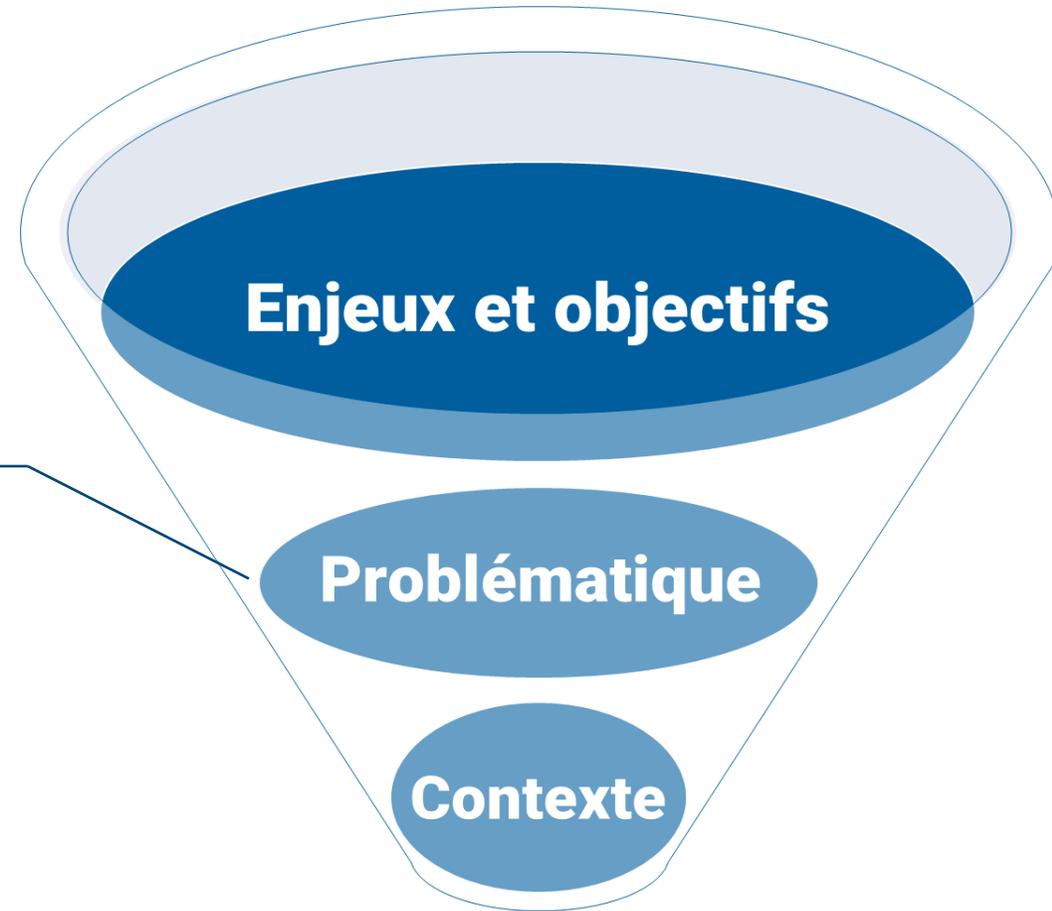
■ Air chaud
■ Air froid



Probabilité d'apparition de nouveaux grains accrus avec les nouveaux développements

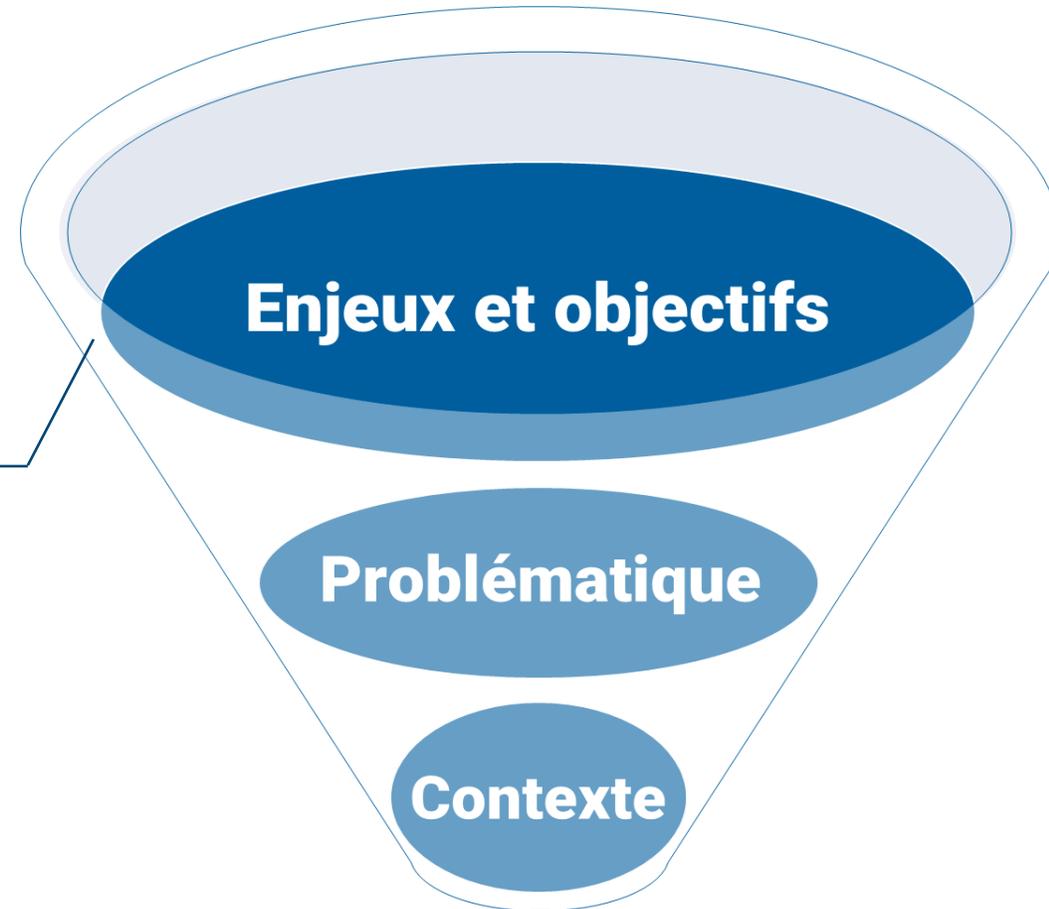
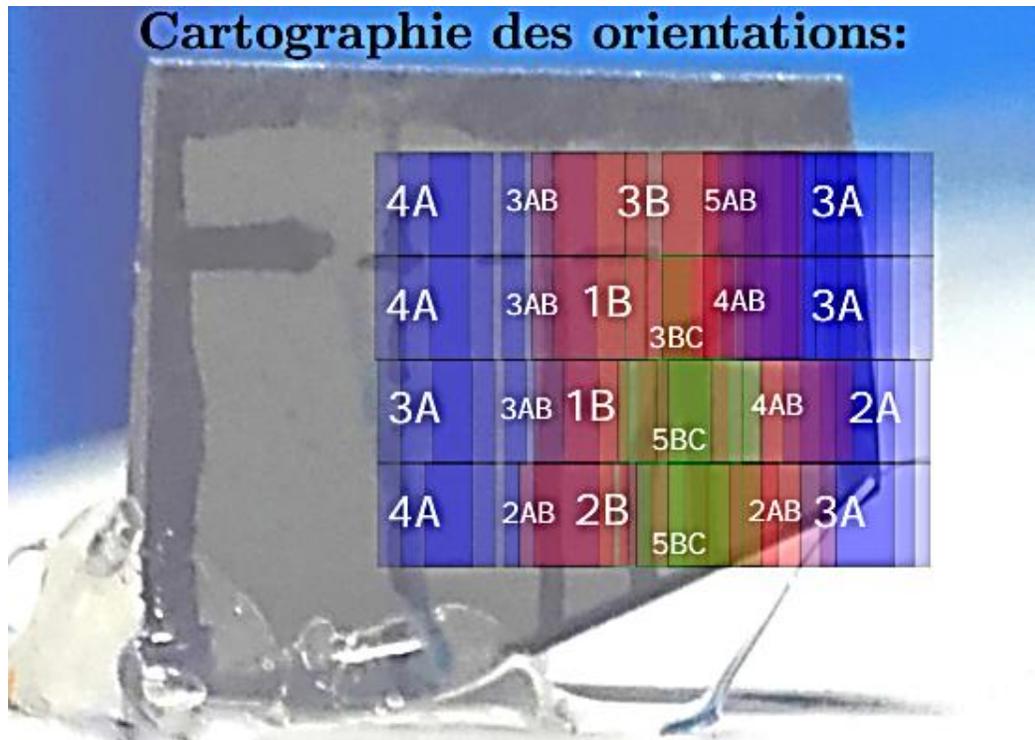


Exemple d'un grain



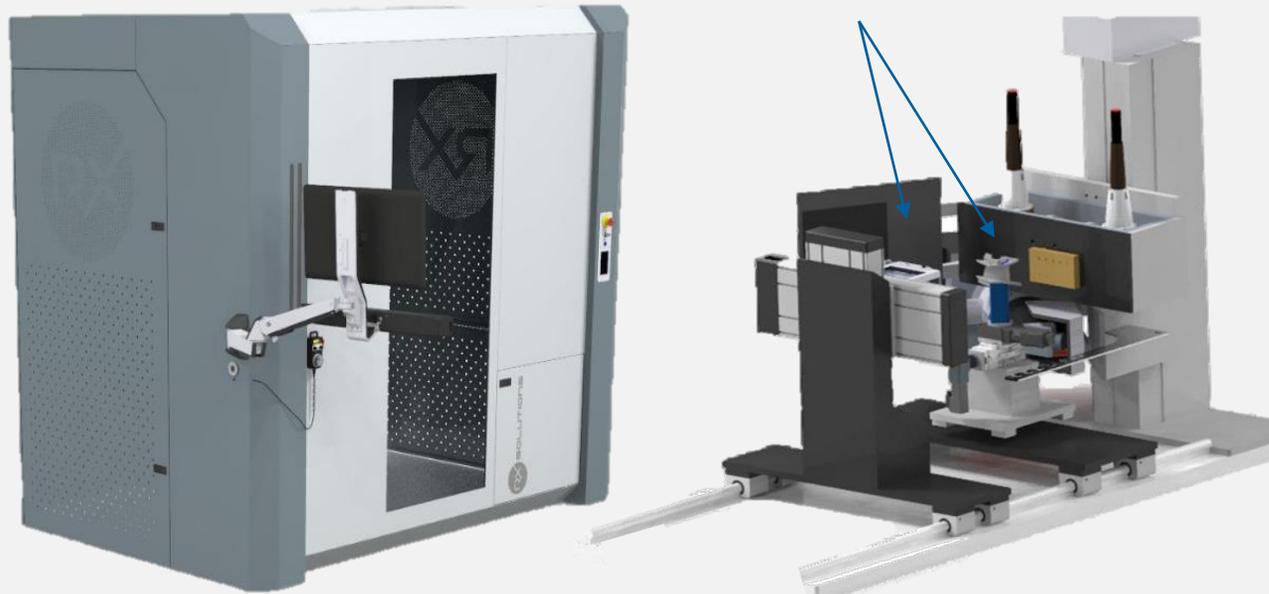
Quantifier la désorientation sur des zones précises

➔ Garantir la qualité cristalline des aubes



Machine 3DXPLORE

Détecteur flat panel
+
Source RX



Enjeux et objectifs

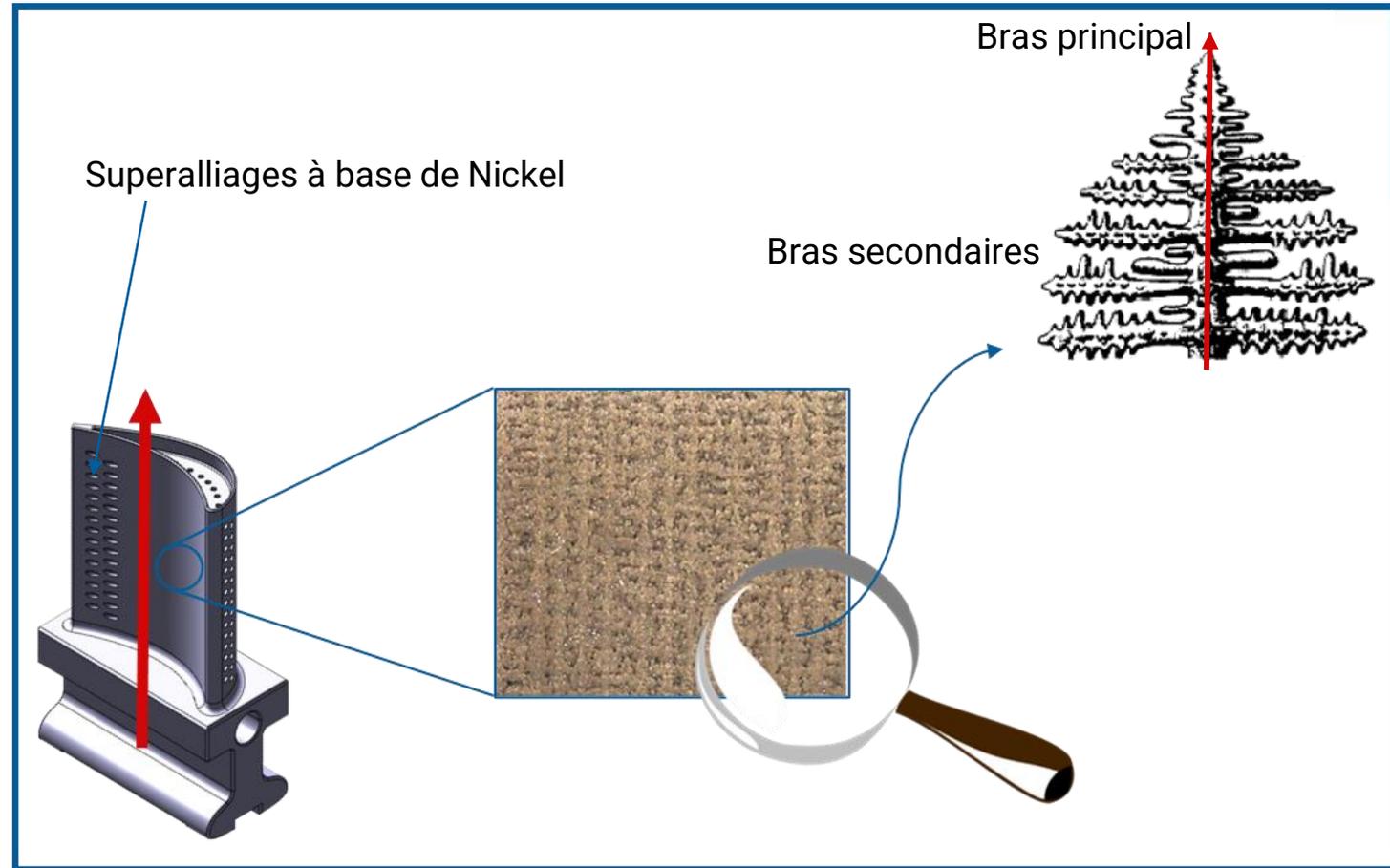
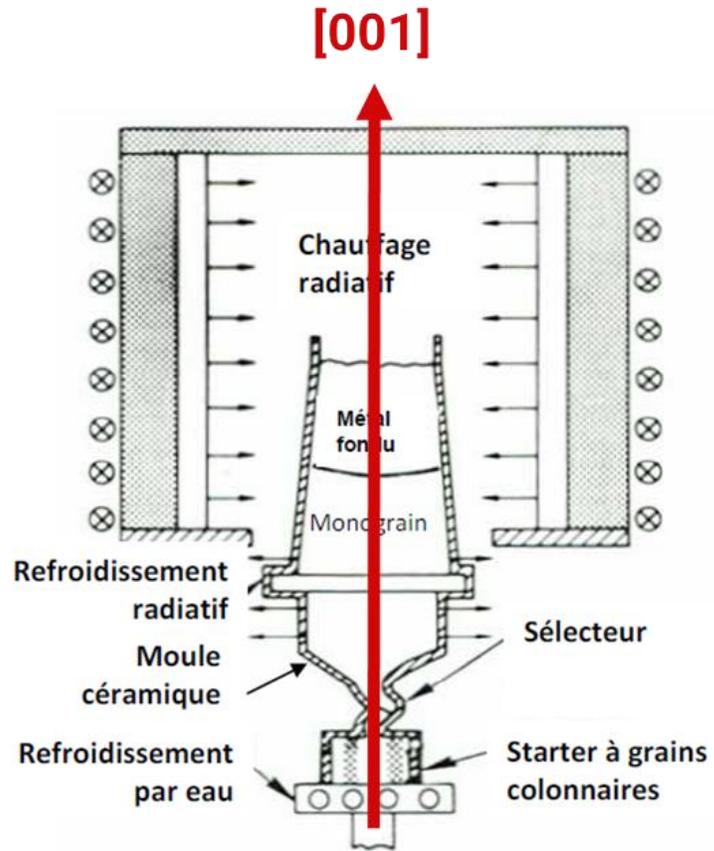
Problématique

Contexte

- 1 **Contexte et objectifs**
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2 **Aubes de turbine HP**
- 3 Contrôle non destructif : DRX
- 4 Quelques résultats
- 5 Conclusion et perspectives

Solidification dirigée

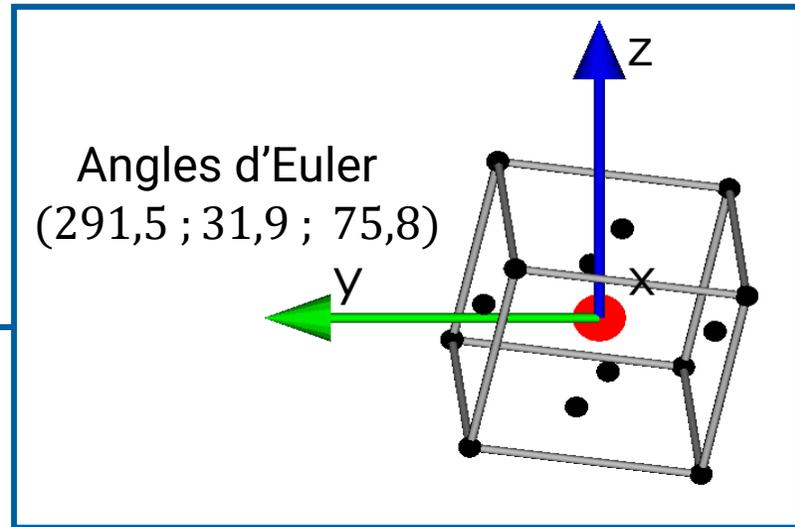
Four Bridgman



Orientation cristalline

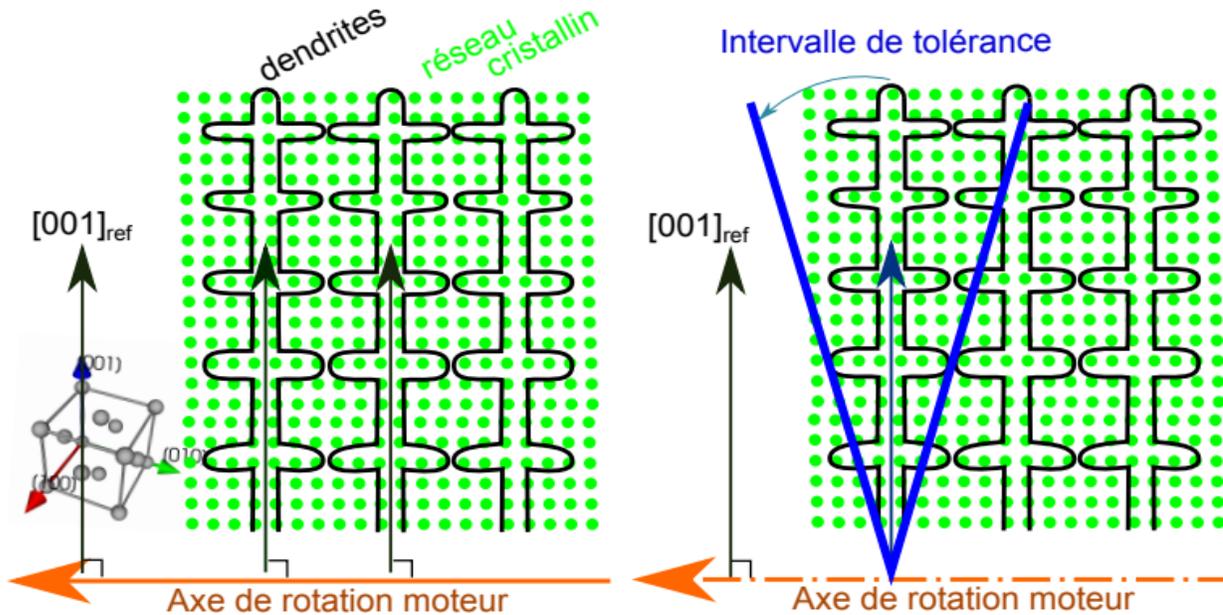
$$G_s = g^T G_c$$

$$g = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \phi & \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \phi & \sin \varphi_2 \sin \phi \\ -\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \phi & -\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \phi & \cos \varphi_2 \sin \phi \\ \sin \varphi_1 \sin \phi & -\cos \varphi_1 \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$



$(\varphi_1, \phi, \varphi_2)$ sont les angles d'Euler
 $\varphi_1 \in [0, 2\pi]$, $\phi \in [0, 2\pi]$ et $\varphi_2 \in [0, 2\pi]$

Critère d'acceptation de désorientation



Angle de désorientation relative

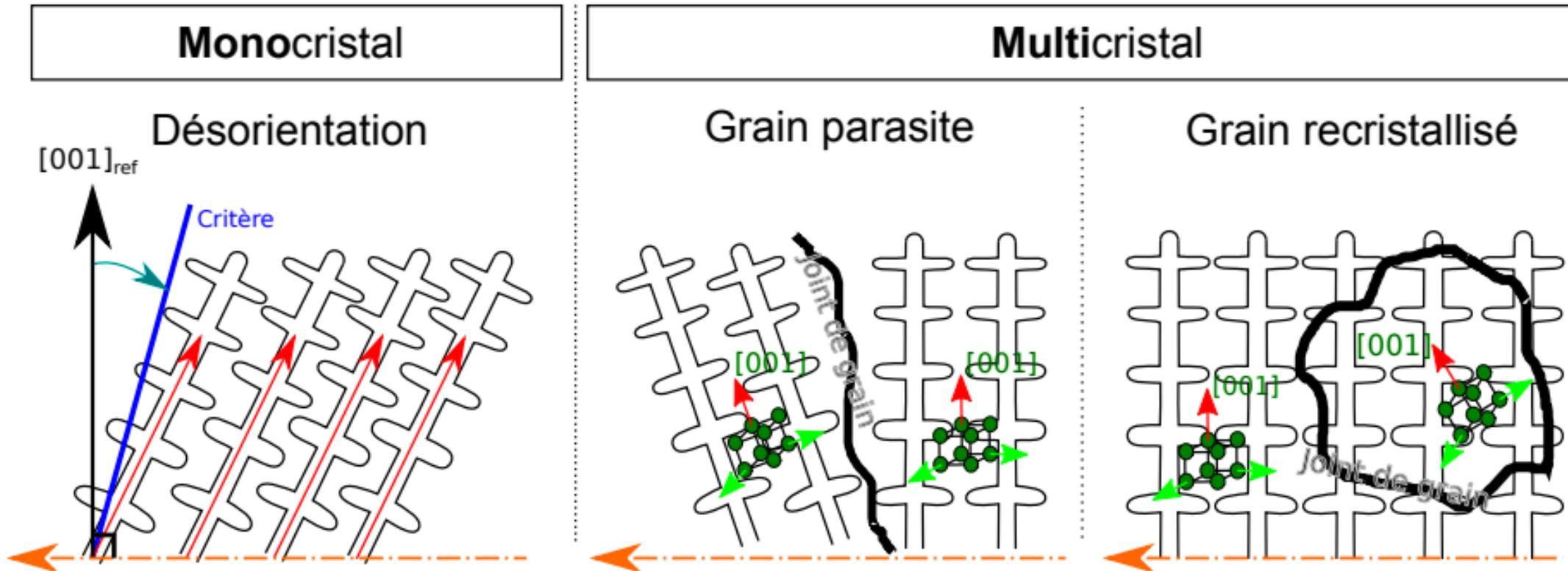
$$\alpha = \arccos \left(\frac{\text{trace}(R) - 1}{2} \right)$$

$$\alpha < \text{critère d'acceptation}$$

$$R = g^A \cdot g^{B^T}$$

g^A et g^B sont les matrices d'orientation de deux groupes de dendrites A et B

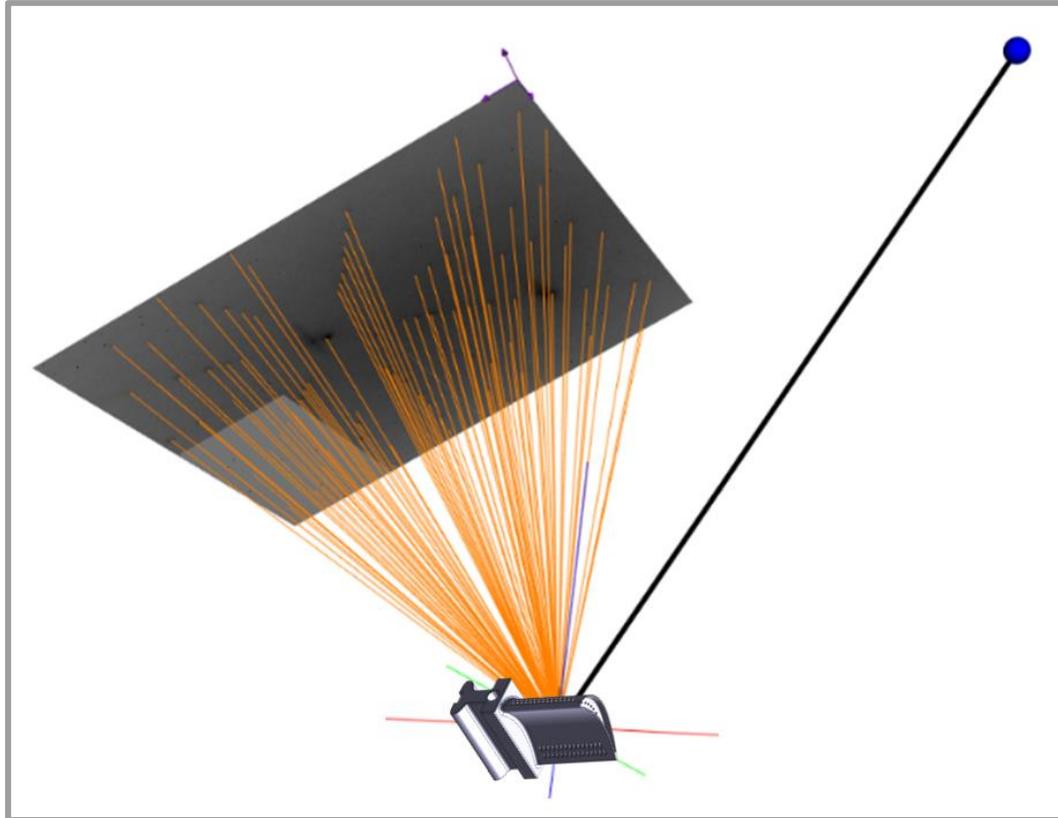
Défauts d'orientation



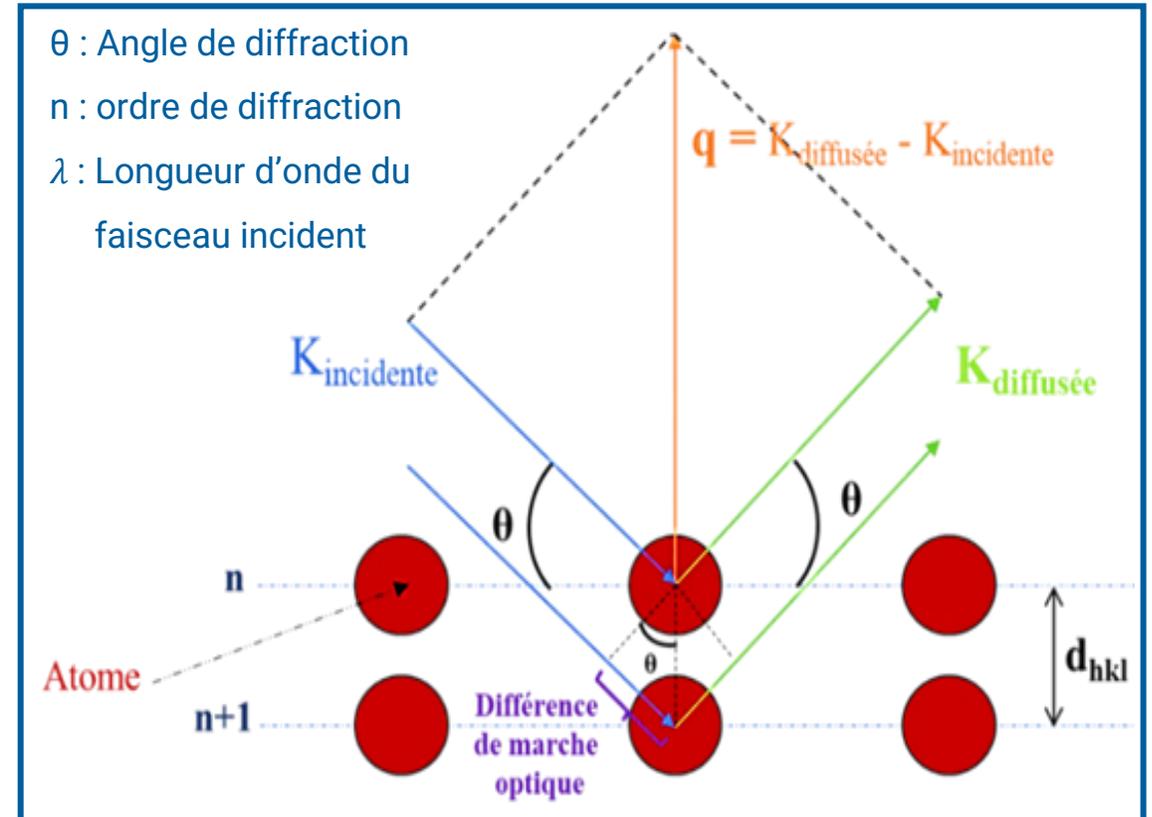
- 1 **Contexte et objectifs**
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2 **Aubes de turbine HP**
- 3 **Contrôle non destructif : DRX**
- 4 Quelques résultats
- 5 Conclusion et perspectives

Différentes géométries de diffraction RX

Méthode de diffraction Laue en réflexion



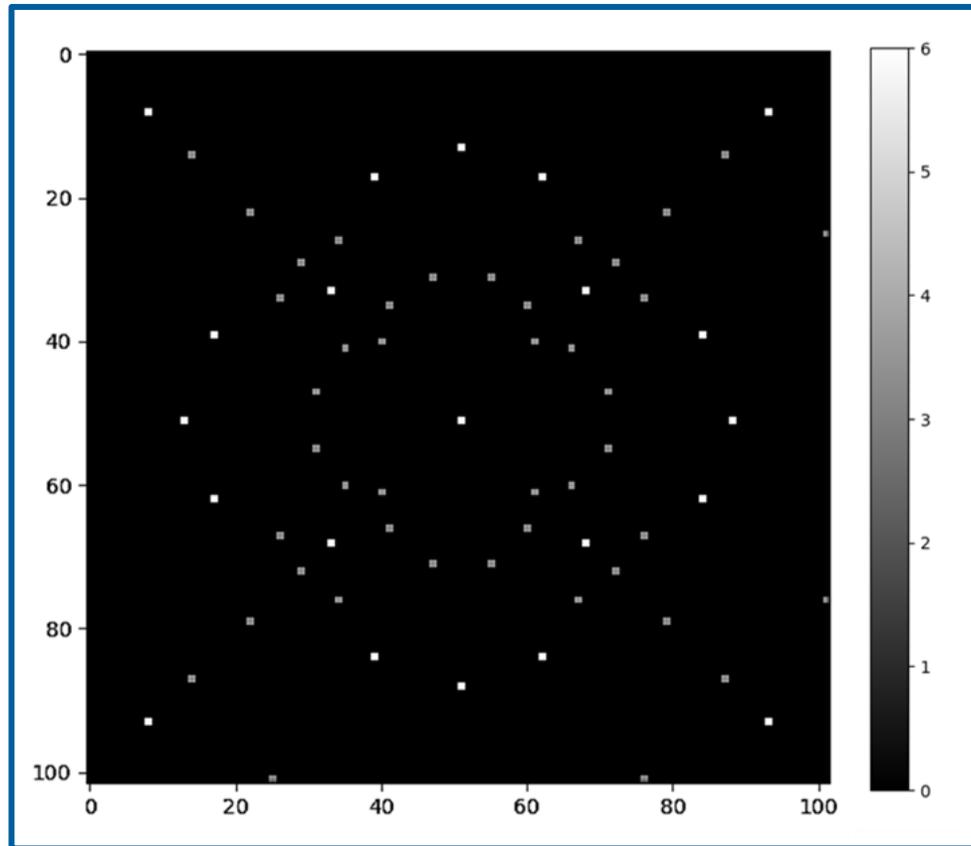
Méthode en réflexion



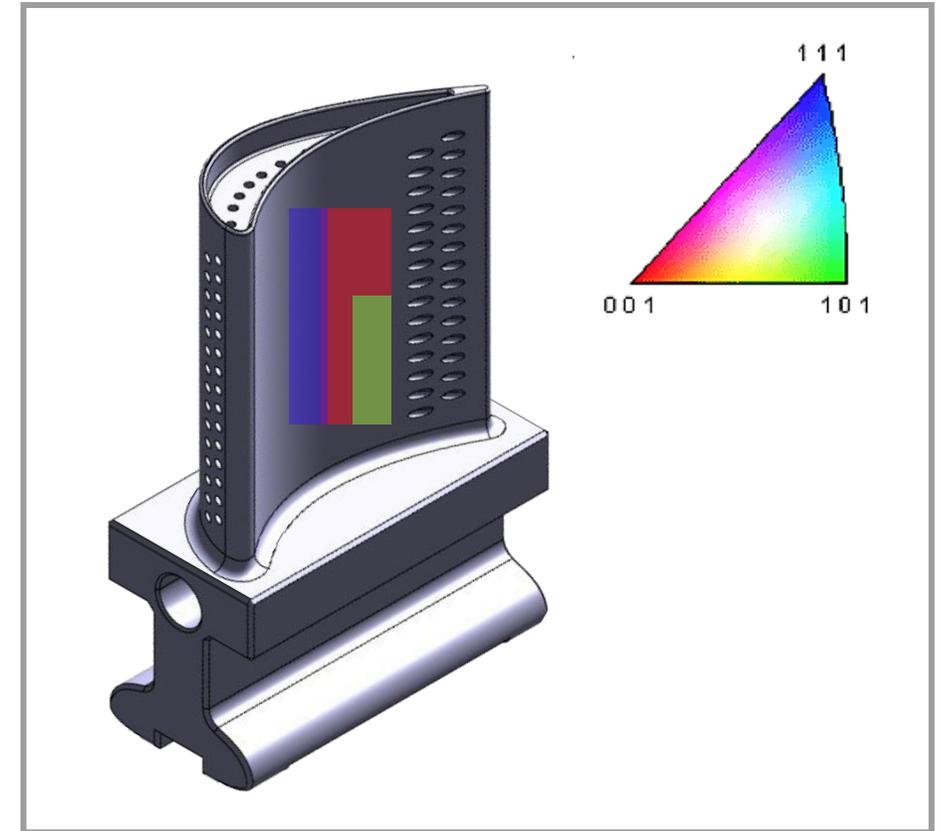
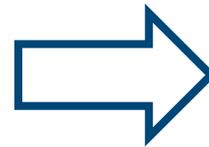
Loi de Bragg : $2d_{hkl} \sin(\theta) = n\lambda$

Différentes géométries de diffraction RX

Méthode de diffraction Laue en réflexion



Indexation

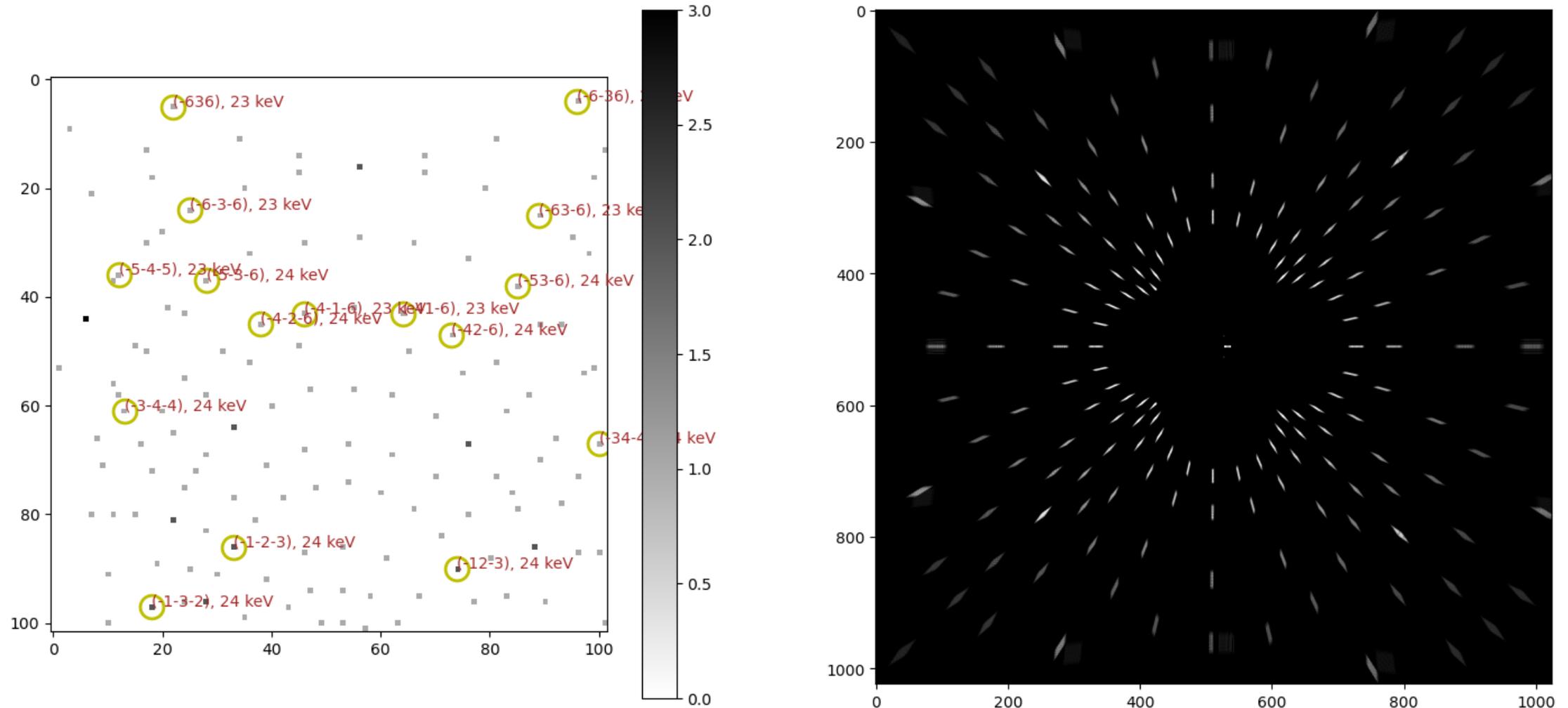


Cartographie d'orientation

- 1 **Contexte et objectifs**
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2 **Aubes de turbine HP**
- 3 **Contrôle non destructif : DRX**
- 4 **Quelques résultats**
- 5 **Conclusion et perspectives**

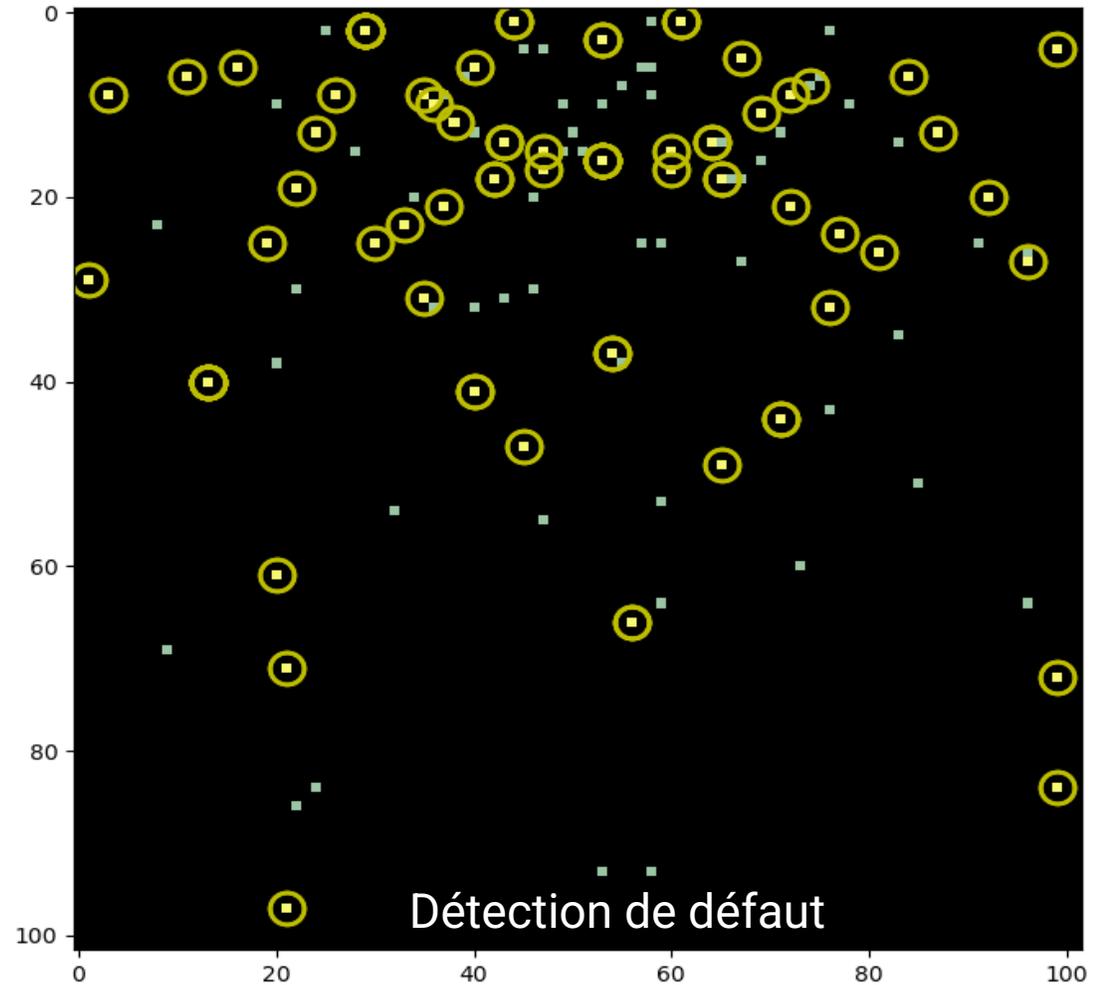
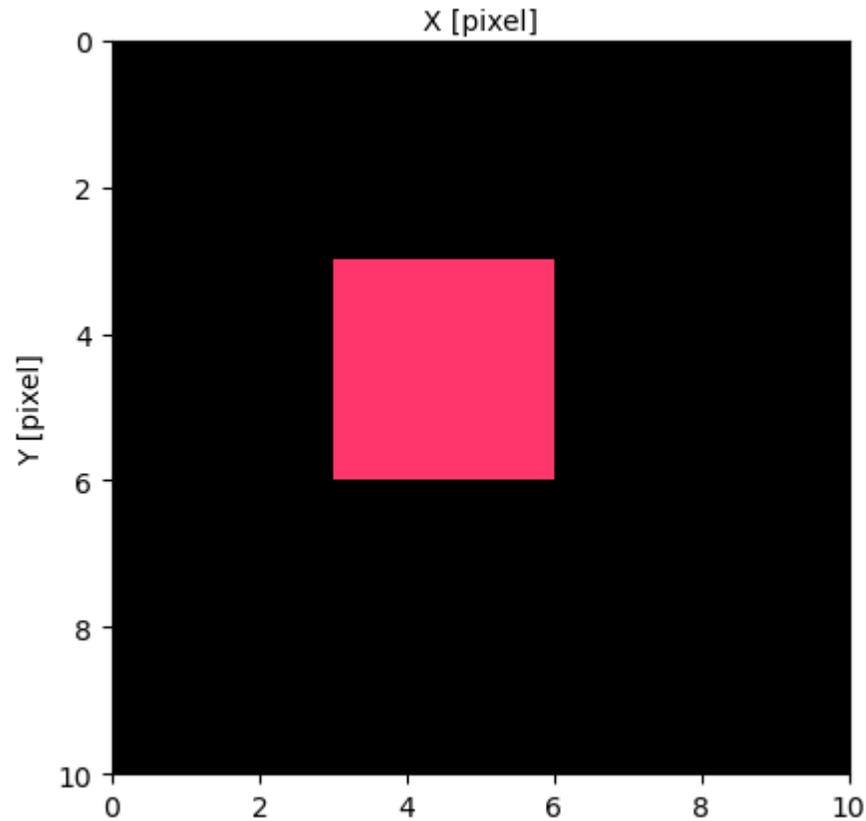
Simulation de la diffraction

Laue Forward Simulation



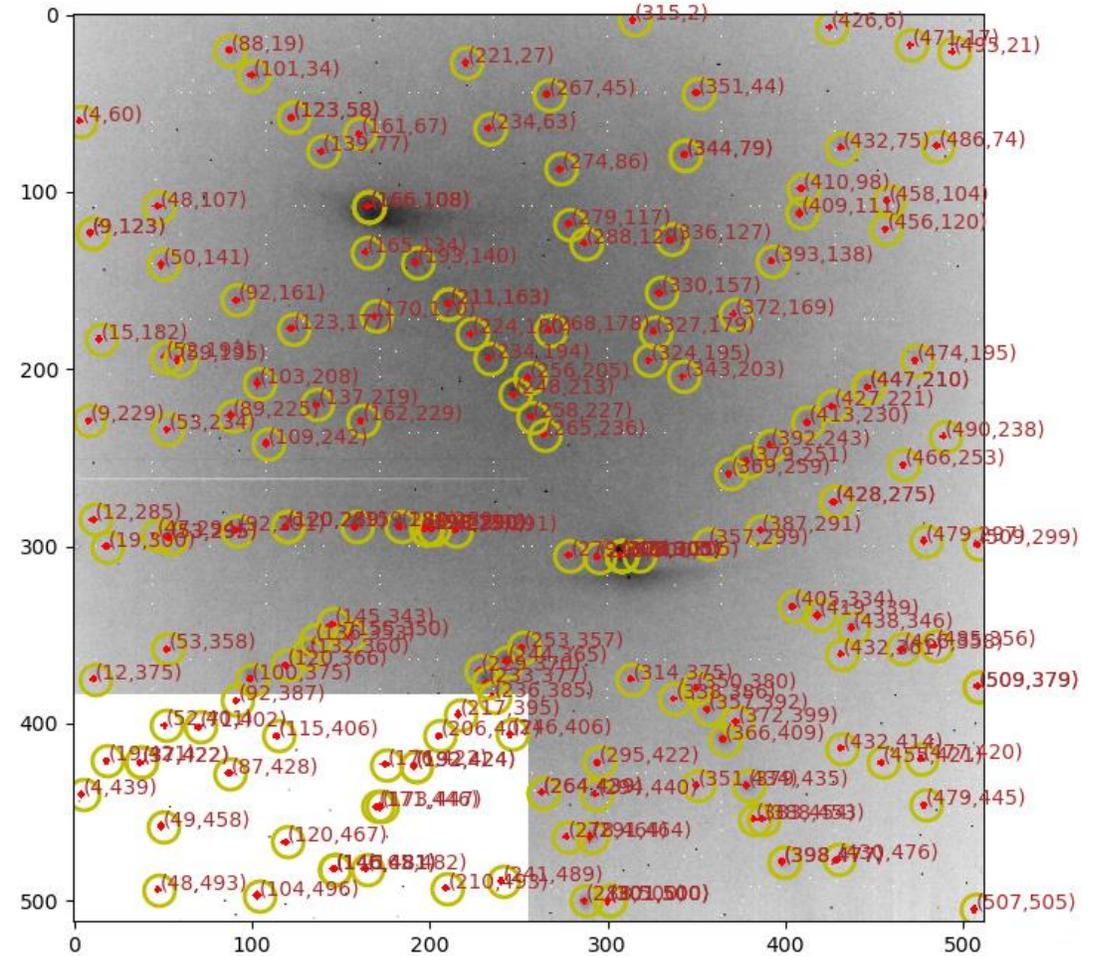
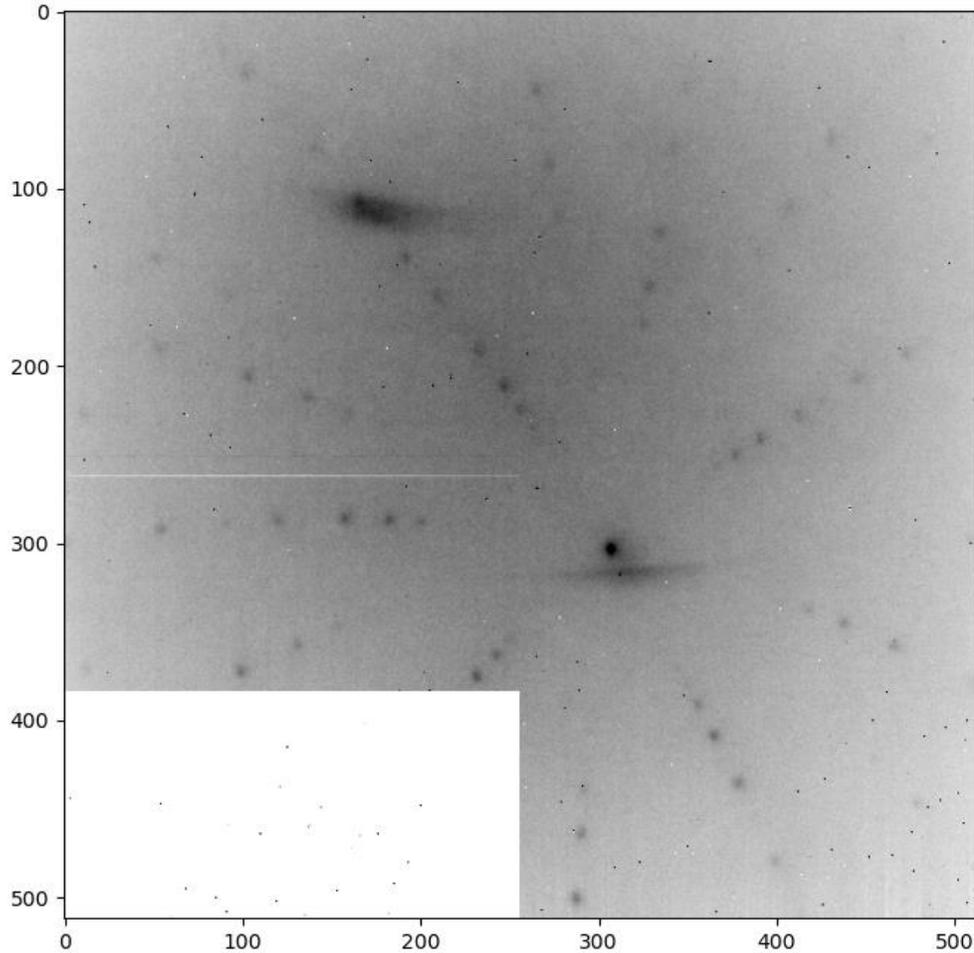
Simulation de la diffraction

Laue Forward Simulation



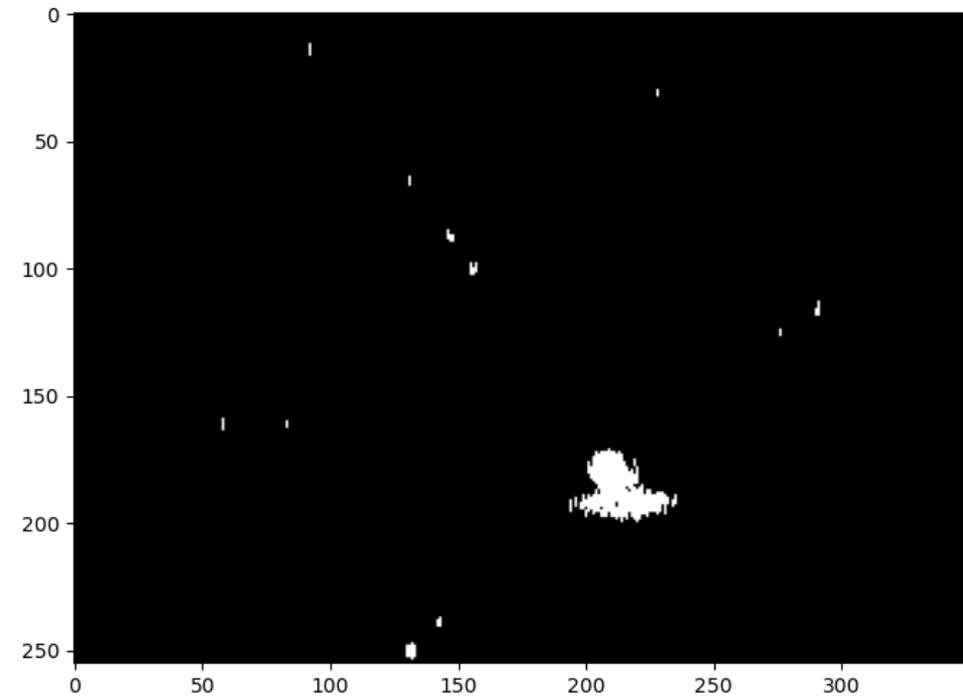
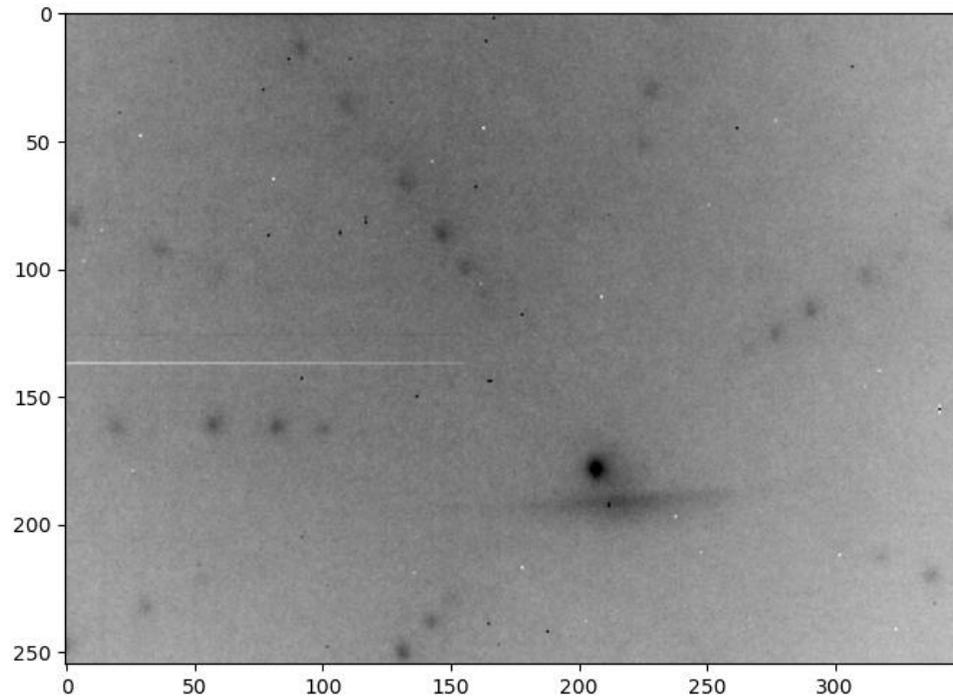
Avancement de l'indexation d'une image de diffraction réelle

Comparaison avec la simulation



Avancement de l'indexation d'une image de diffraction réelle

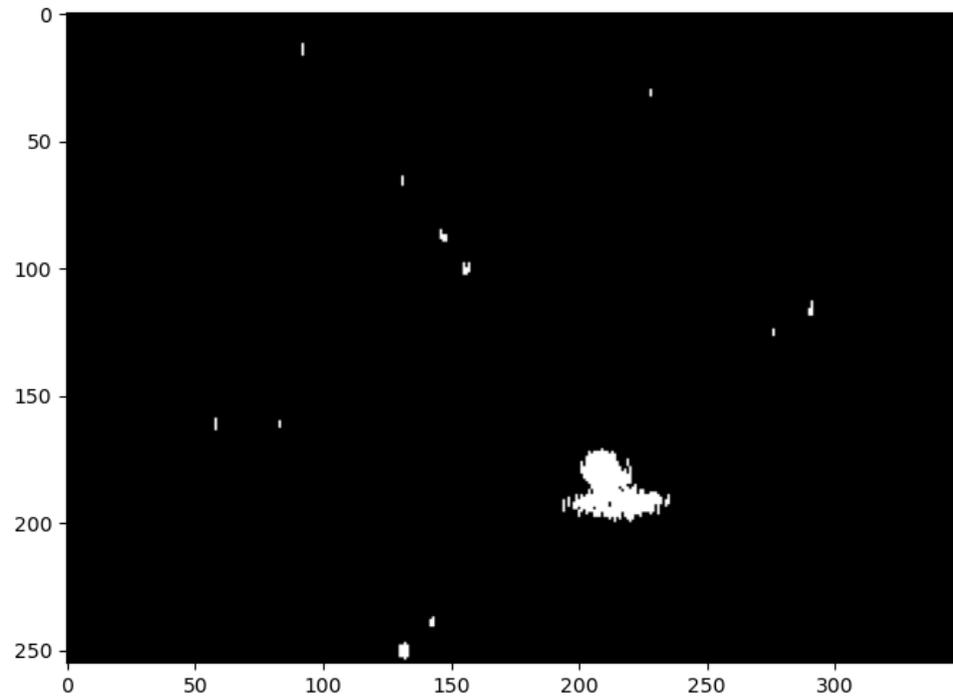
Traitement d'une image RXO



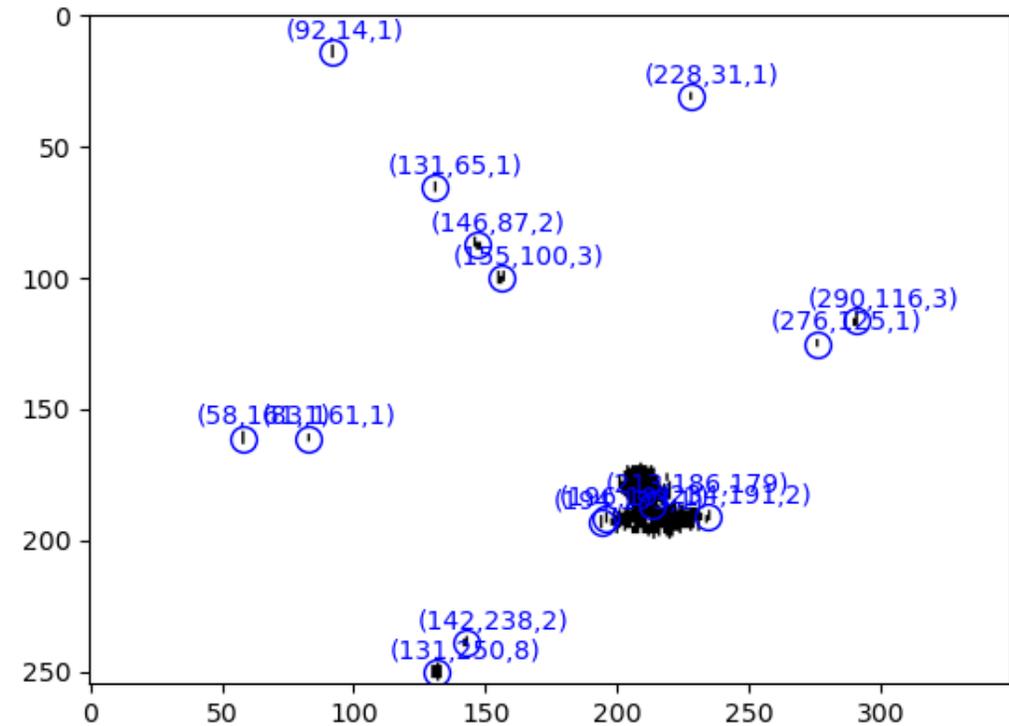
15 blobs

Avancement de l'indexation d'une image de diffraction réelle

Traitement d'une image RXO

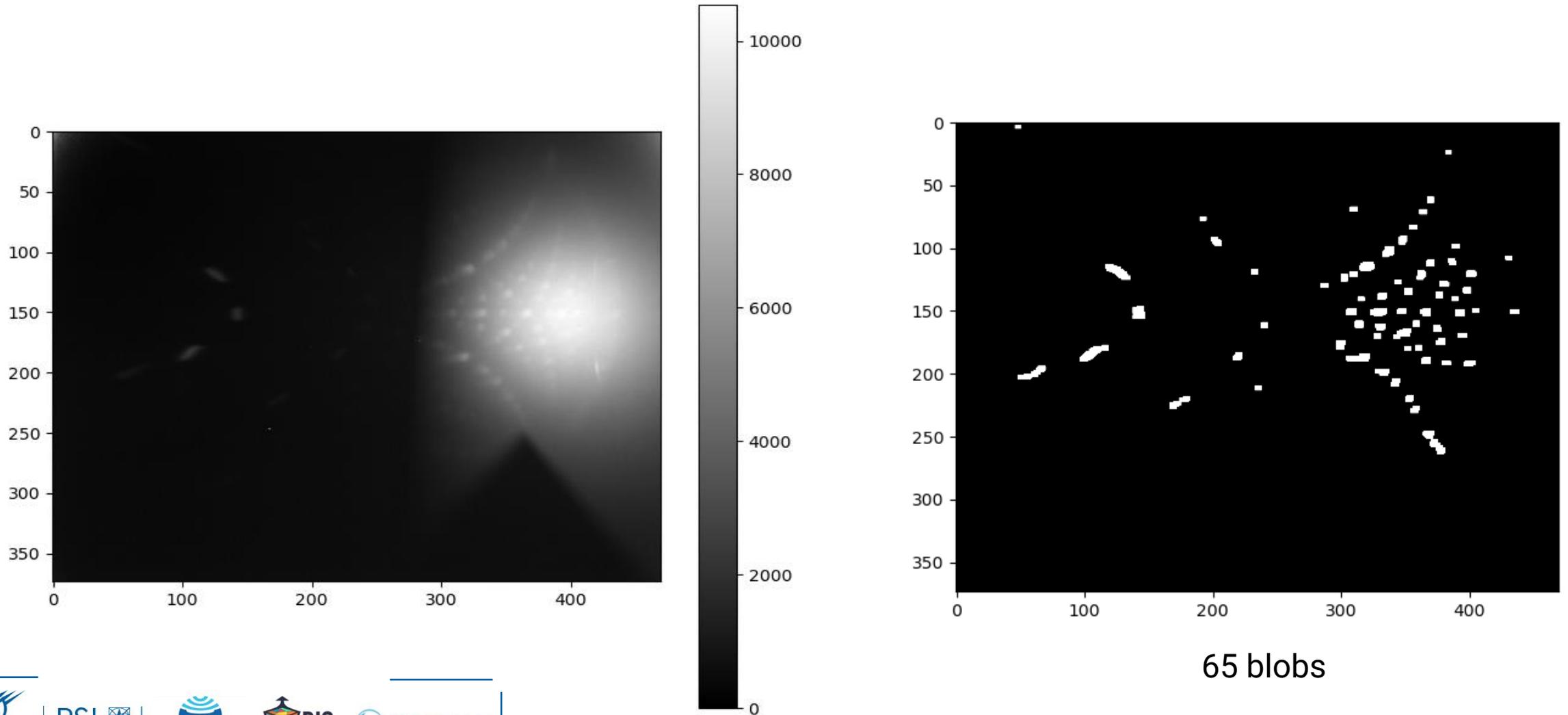


15 blobs



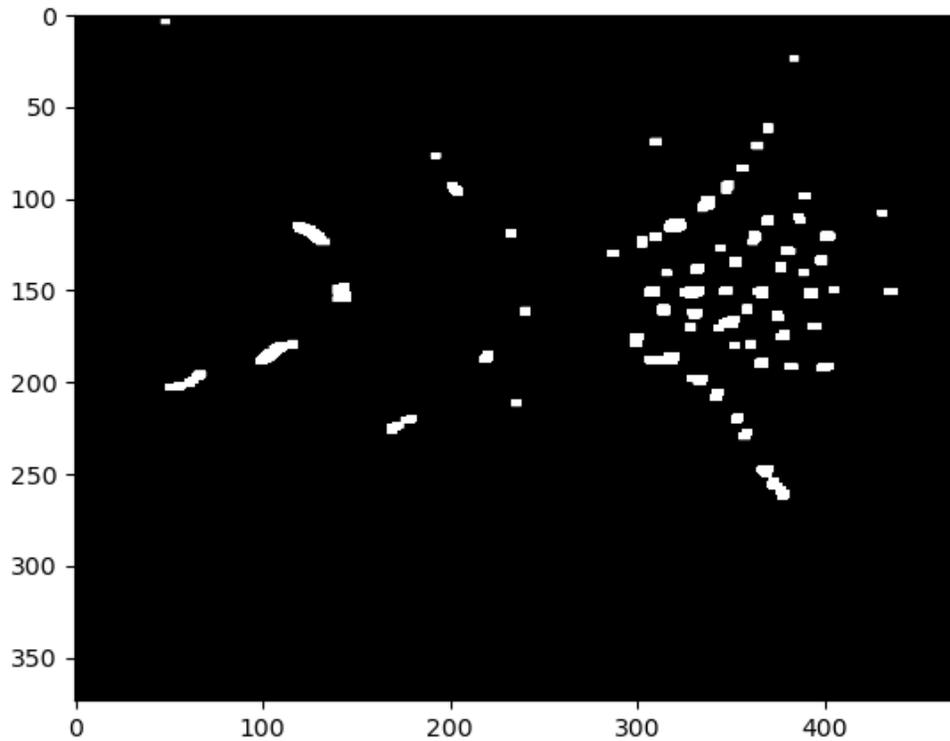
Avancement de l'indexation d'une image de diffraction réelle

Traitement d'une image 3DXPLORE

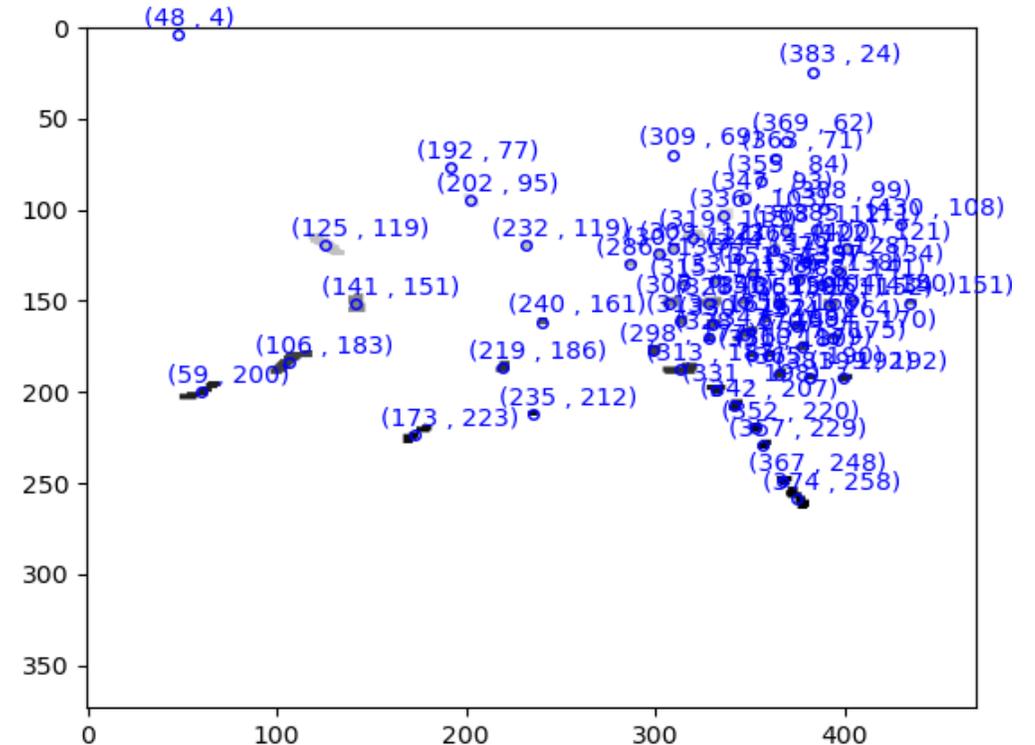


Avancement de l'indexation d'une image de diffraction réelle

Traitement d'une image 3DXPLORE



65 blobs



- 1 Contexte et objectifs**
Problématique industrielle, enjeux et objectifs du projet
- 2 Aubes de turbine HP**
Procédé de fabrication, matériau et défauts d'orientation
- 3 Contrôle non destructif : DRX**
Physique et lois derrière la DRX, diffraction Laue en réflexion et indexation des images de diffraction
- 4 Quelques premiers résultats**
Prise en main de la simulation
- 5 Conclusion et perspectives du semestre industriel**

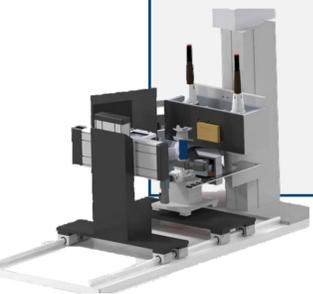


Rappelons les objectifs

- Contrôle de la qualité cristalline des aubes de turbine HP ;
- Reconstruction des cartographies d'orientation surfaciques ;
- Développement d'une gamme de contrôle pour améliorer la rapidité du processus.

Perspectives

- Prise en main de LaueTools et indexation des images traitées ;
- Prise en main de la machine et étude de performances du système de diffraction avec la configuration Laue en réflexion ;
- Mise en position de la pièce sur la machine : Détermination et choix précis des zones cibles pour le contrôle ;
- Reconstruction de cartographie d'orientation, automatisation du processus et gestion des exceptions.



Références

- [A. ARNAUD-2020] A. ARNAUD, Etude et développement d'un système de contrôle volumique de la qualité cristalline des aubes de turbines, Thèse de doctorat, 2020.
- [A. SOYER-1996] A. SOYER, LAUEX: a user-friendly program for the simulation and indexation of Laue diagrams on UNIX systems, Journal of Applied Crystallography, 1996.
- [Cannon Muskegon-2019] Cannon Muskegon, Catalogue des alliages sous vide de Cannon Muskegon.
- [D. TOUSSAINT-2011] D. TOUSSAINT, Approche de la fiche TP cristal tournant, Fiche TP, 2011.
- [Documentation Safran] Documentation Safran.
- [H. BEN-HAMOUDA-2012] H. BEN-HAMOUDA, Modélisation et simulation de la structure de solidification dans les superalliages base-nickel : application AM1, Thèse doctorale, 2012.
- [ISO 24173-2009] ISO 24173, Analyse par microfaisceaux, 2009.
- [J. SORO-2022] J. SORO, Le procédé de fonderie cire perdue, Article, 2022.

Références

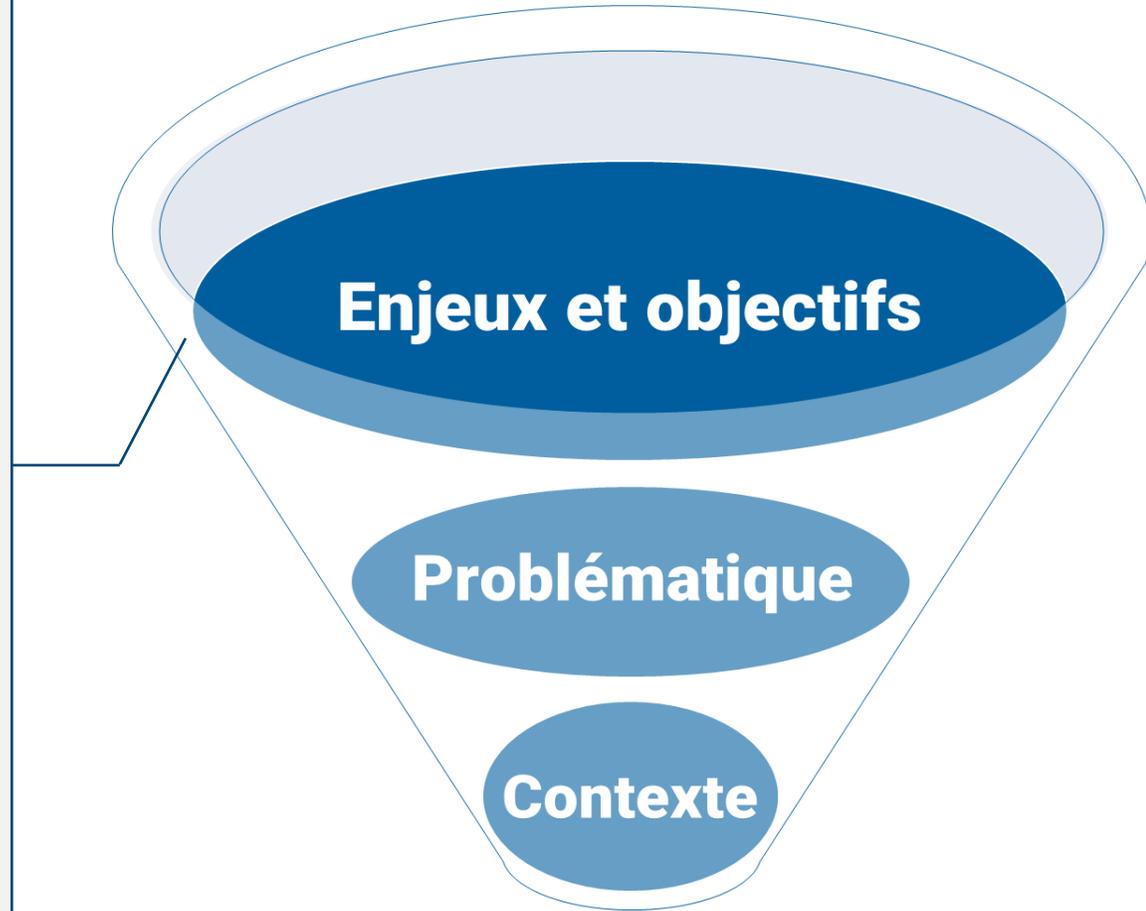
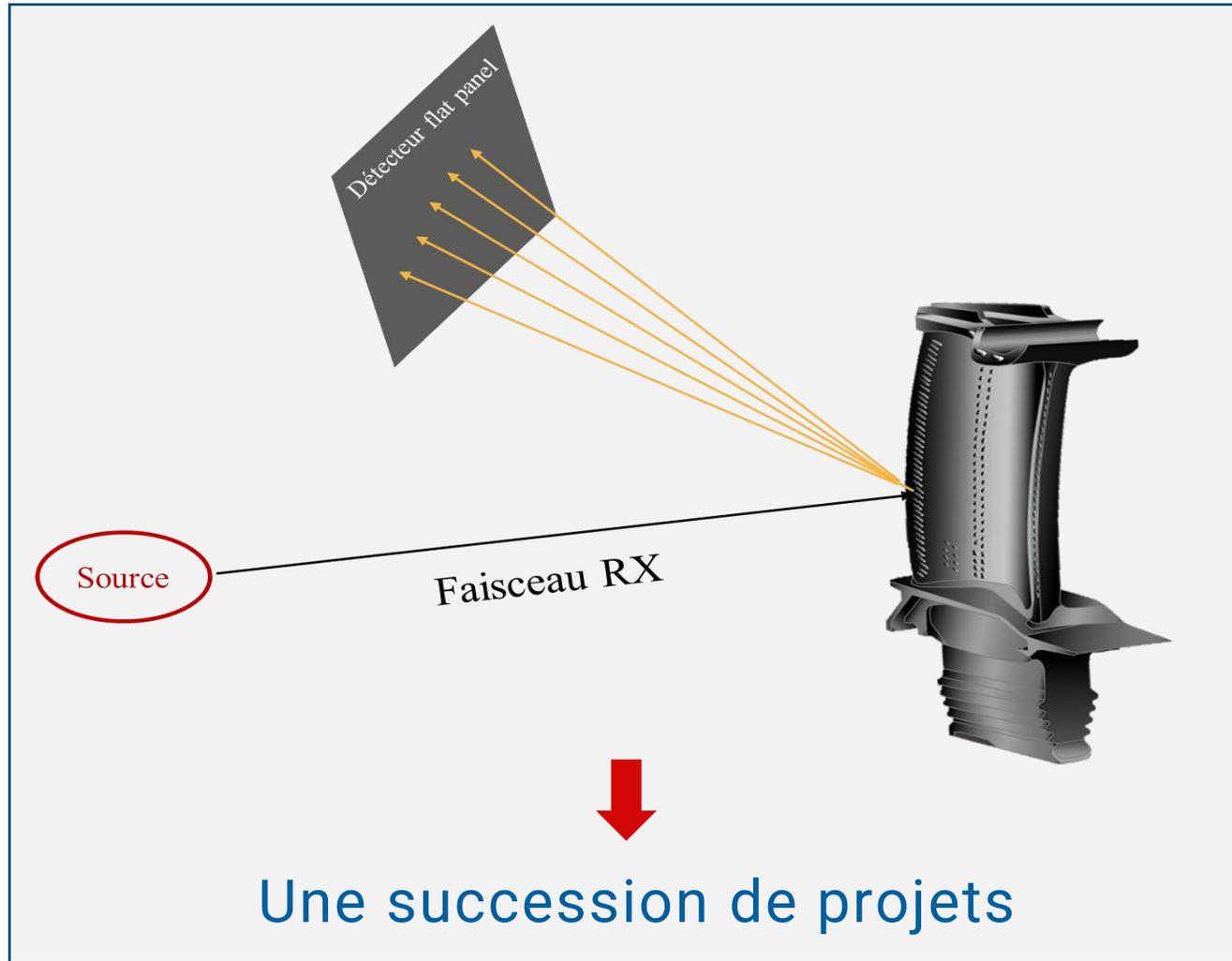
- [J.A. GARD- 1976] J.A. GARD, Interpretation of Electron Diffraction Patterns, Chapter 2.2 du livre Electron Microscopy in Mineralogy, 1976.
- [LaueTools] LaueTools LaueToolsWiki, Documentation LaueTools.
- [LAVIONNAIRE] LAVIONNAIRE, Les turbomachines : Circuit de refroidissement, Site web d'aviation.
- [M. LEROY-2013] M. LEROY, Étude de la nocivité d'un défaut de fonderie sur la durée de vie en fatigue à haute température d'une aube monocristalline, cas du joint de grains, Thèse doctorale, 2013.
- [M. GRAZIELLA] M. GRAZIELLA, La diffraction des rayons X.
- [Mines-Albi] Au cœur des matériaux cristallins, Cours IMT, École des Mines d'Albi-Carmaux.
- [N. TAMURA-2015] N. TAMURA, XMAS : A versatile tool for analyzing synchrotron X-ray microdiffraction data, Livre Strain and dislocation gradients from diffraction, Chapter 4, 2015.
- [Wikipédia Réseau Réciproque] Réseau réciproque, Wikipédia.

MERCI POUR

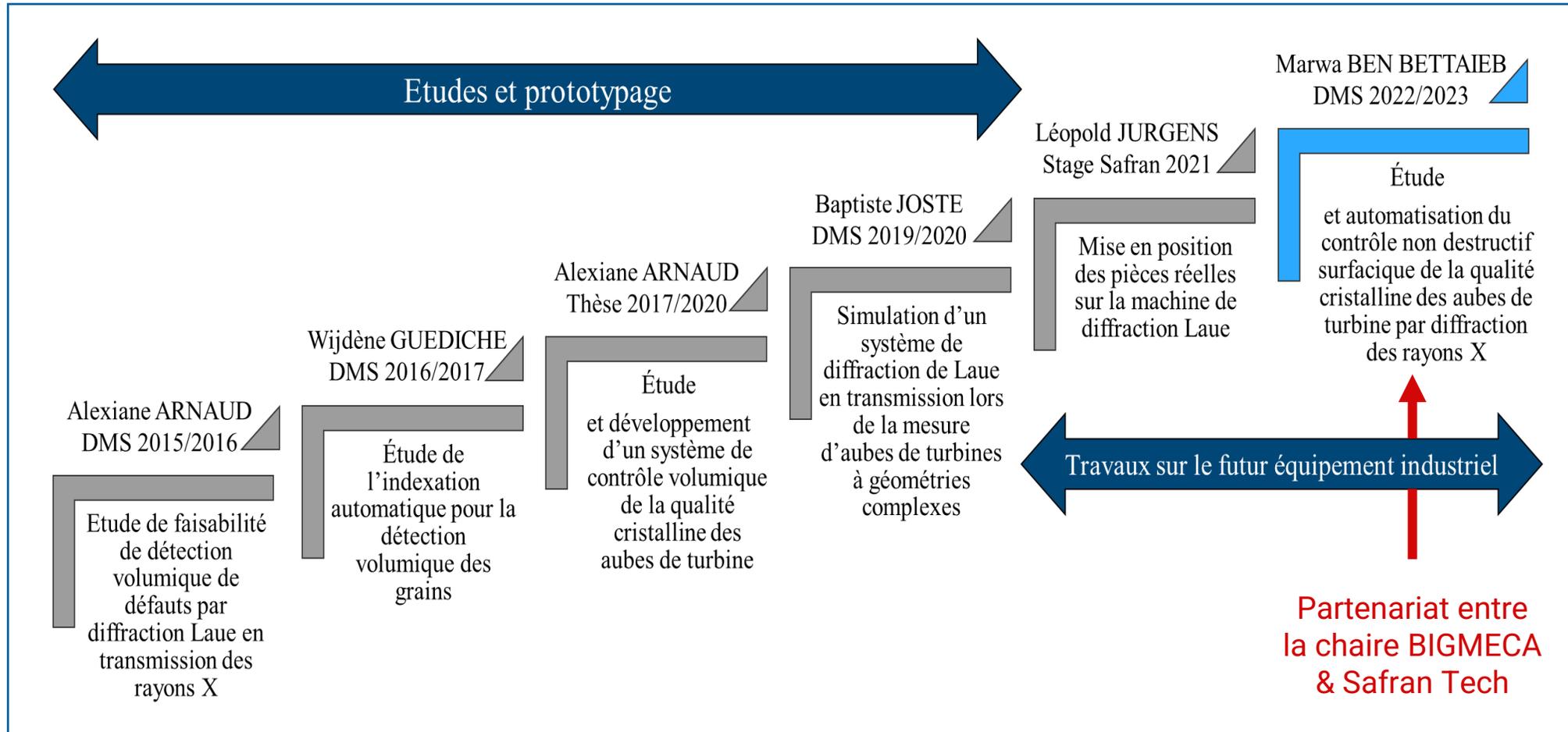
VOTRE

ATTENTION

Annexes

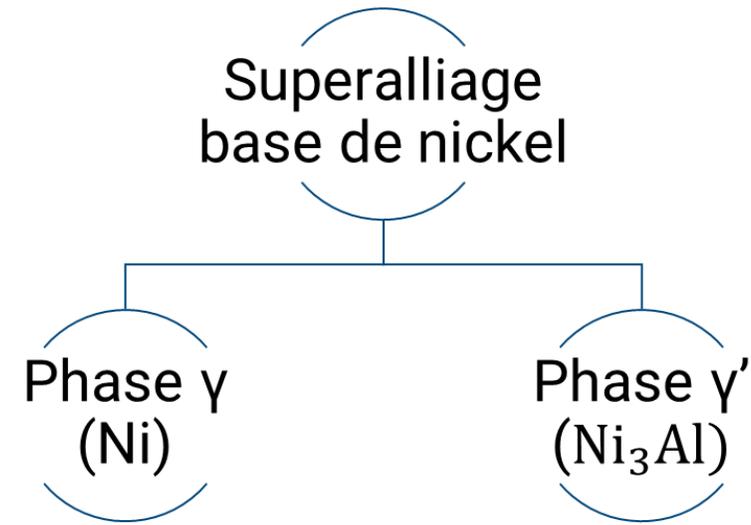
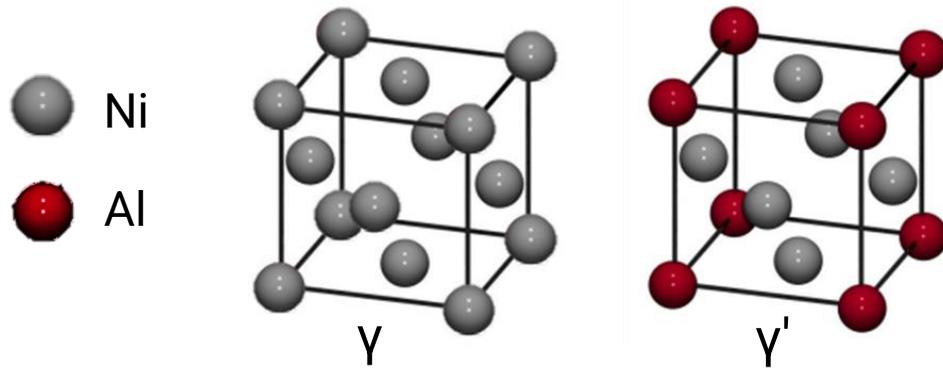


Enchaînement des études du contrôle par DRX sur les aubes de turbines HP

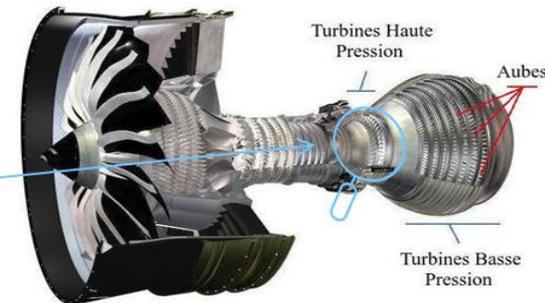
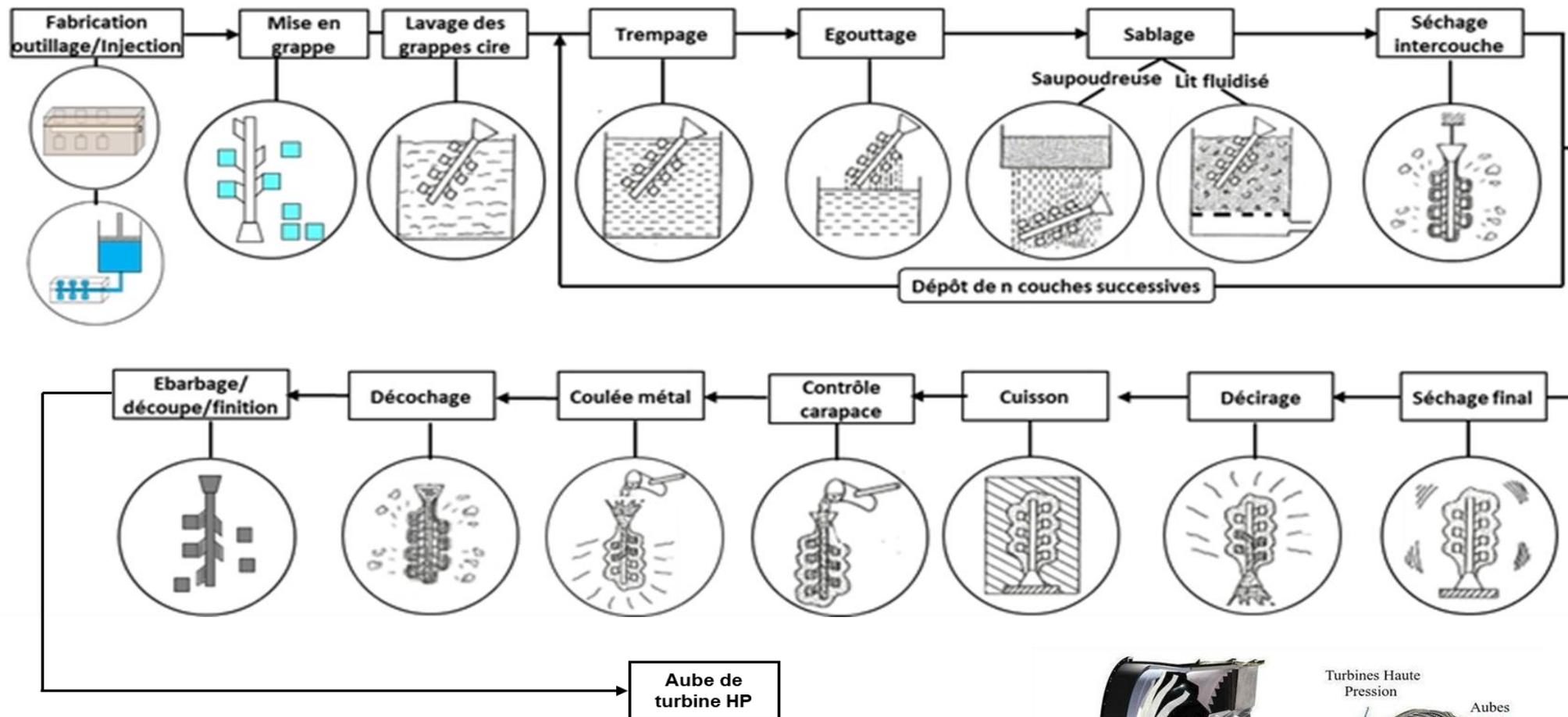


Matériau

Superaliage à base de nickel



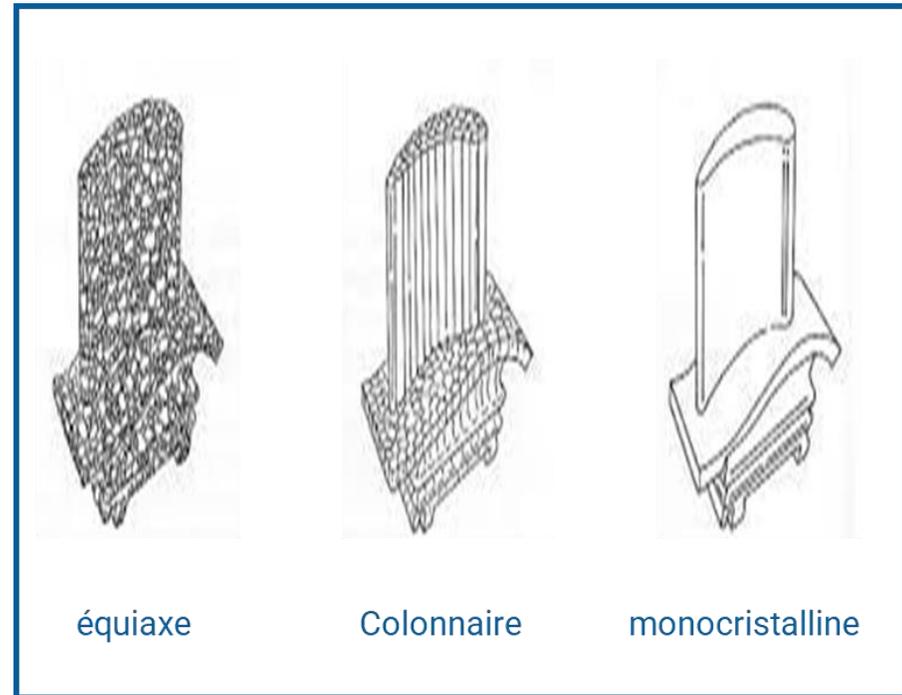
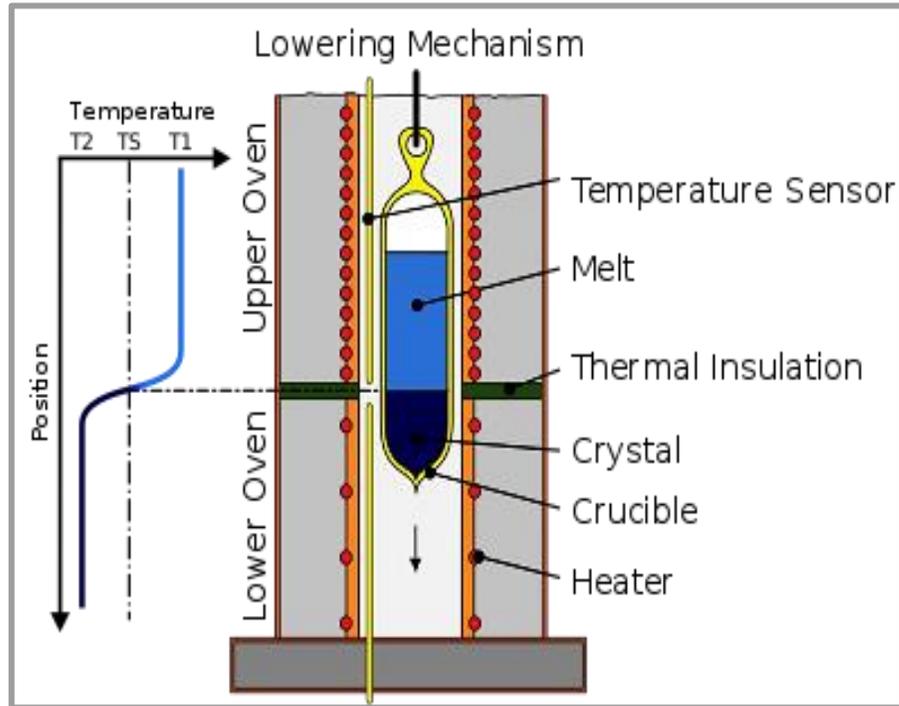
Superaliage	Ni	Cr	Co	Mo	Re	W	Al	Ti	Ta	Hf
AM1(1ère génération)	60 %	8 %	6 %	2 %	-	6 %	5,2 %	1,2 %	9 %	-
CMSX-4 (2ème génération)	60 %	6,5 %	9 %	0,6 %	3 %	6 %	5,6 %	1 %	6,5 %	0,2 %
CMSX-4-Plus (3ème génération)	60 %	3,5	10 %	0,6 %	4,8 %	6 %	5,7 %	0,9 %	8 %	0,1 %



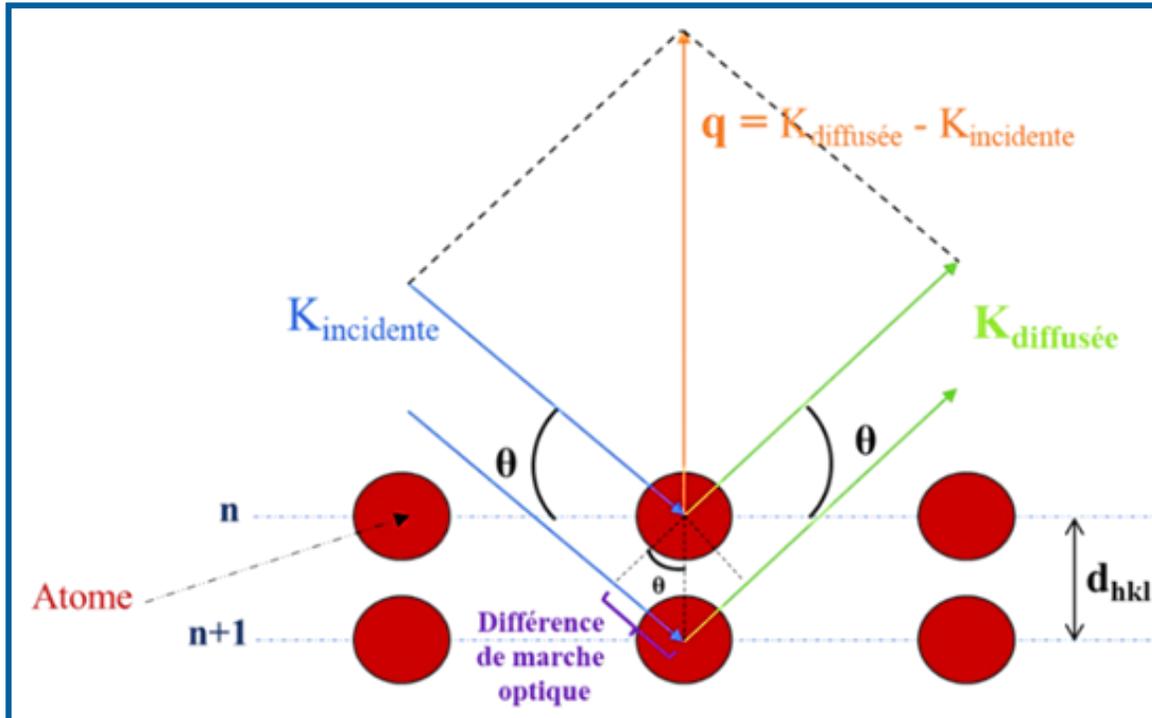
Fonderie de précision à cire perdue

Solidification dirigée

Four de Bridgman



Loi de Bragg



θ : Angle de diffraction

n : ordre de diffraction

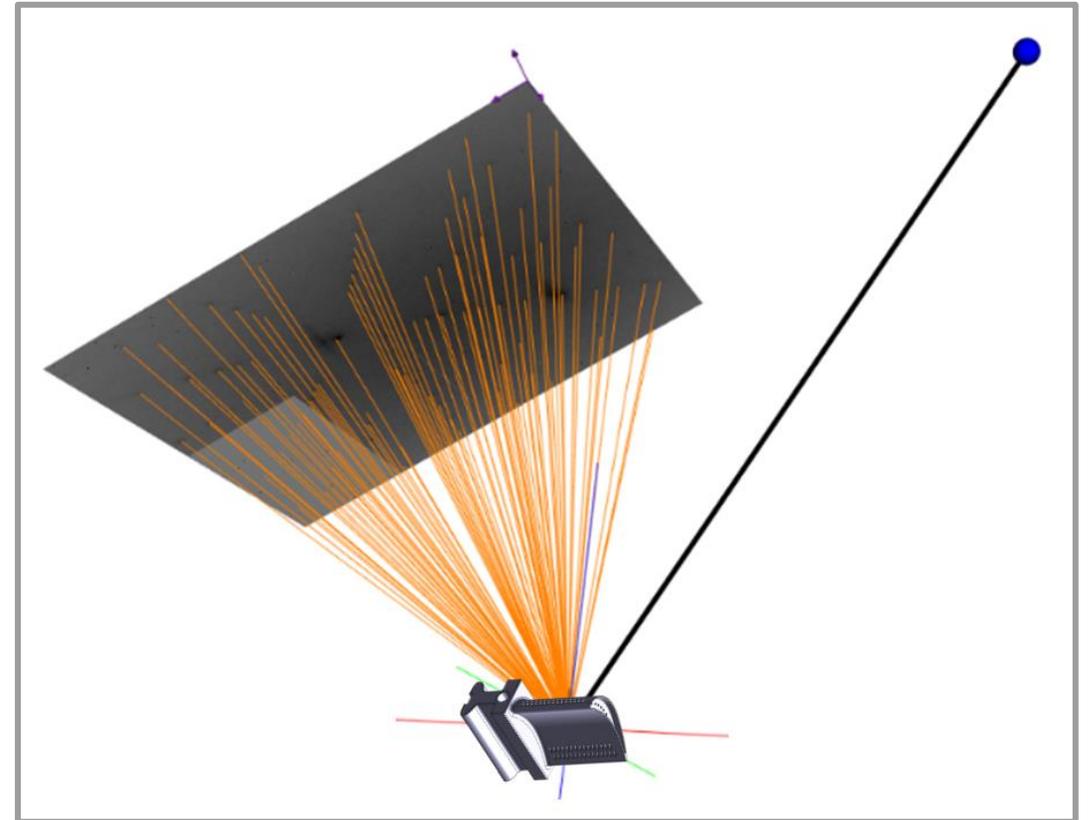
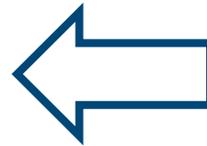
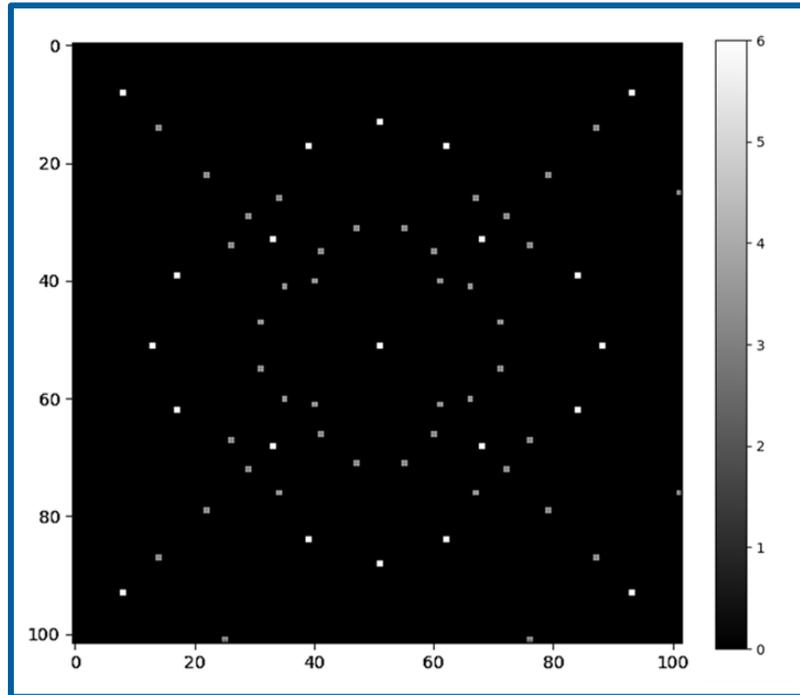
λ : Longueur d'onde du faisceau incident

- $2d_{hkl} \sin(\theta) = n\lambda$

- $d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$ (Symétrie cubique)

Différentes géométries de diffraction RX

Méthode de diffraction Laue en réflexion



Condition d'extinction

Condition d'extinction DRX : listes des plans diffractant du réseau CFC (marqué d'un X)

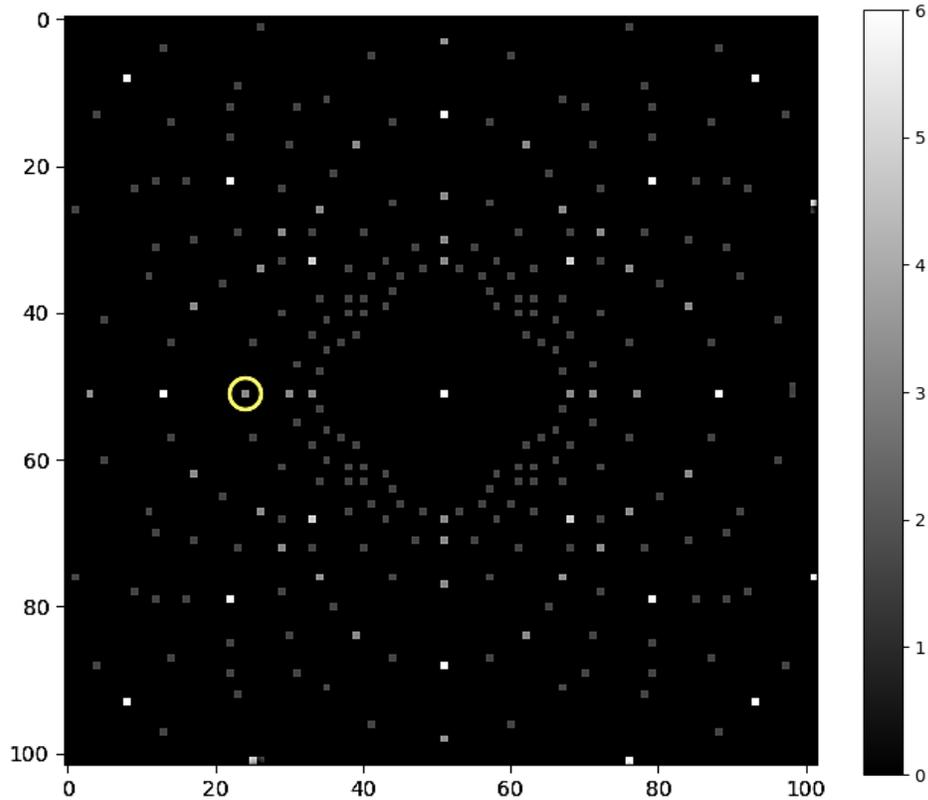
Facteur de structure pour un réseau CFC

$$F_{hkl} = 4 \sum_i f_i \exp[2\pi i (h x_i + k y_i + l z_i)]$$

Indices hkl	$h^2 + k^2 + l^2$	Cubique à faces centrées
100	1	
110	2	
111	3	X
200	4	X
210	5	
211	6	
220	8	X
221 et 300	9	
310	10	
311	11	X
222	12	X
320	13	
321	14	
400	16	X
410 et 322	17	
411 et 330	18	
331	19	X
420	20	X
421	21	
332	22	
422	24	X

Condition d'extinction

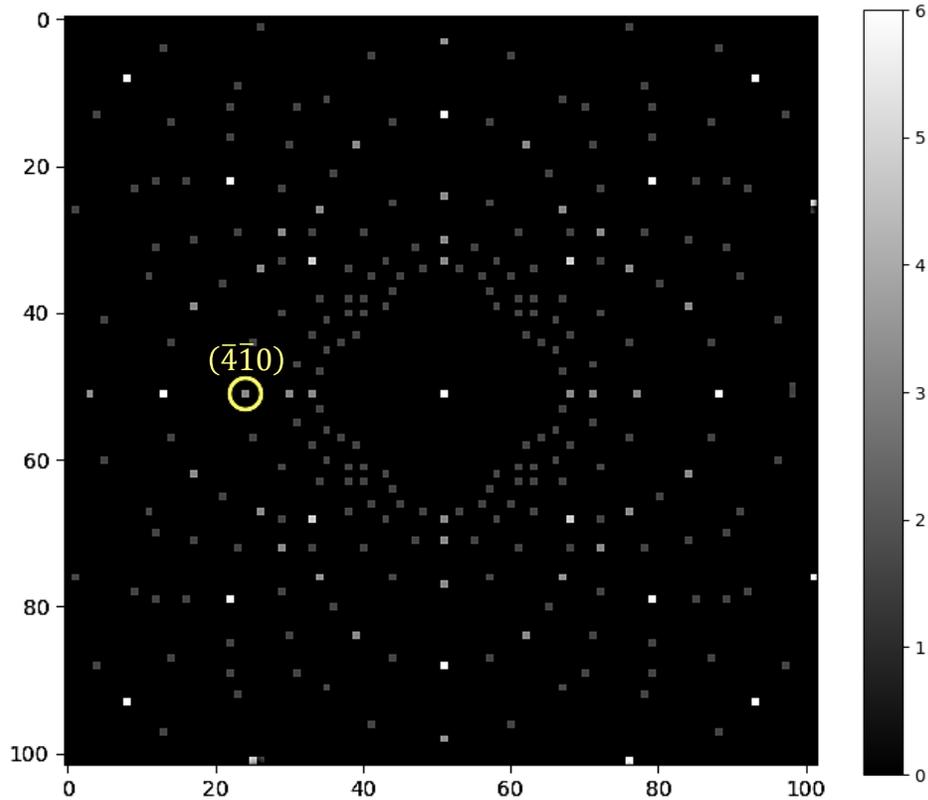
Condition d'extinction DRX : listes des plans diffractant du réseau CFC (marqué d'un X)



Indices hkl	$h^2 + k^2 + l^2$	Cubique à faces centrées
100	1	
110	2	
111	3	X
200	4	X
210	5	
211	6	
220	8	X
221 et 300	9	
310	10	
311	11	X
222	12	X
320	13	
321	14	
400	16	X
410 et 322	17	
411 et 330	18	
331	19	X
420	20	X
421	21	
332	22	
422	24	X

Condition d'extinction

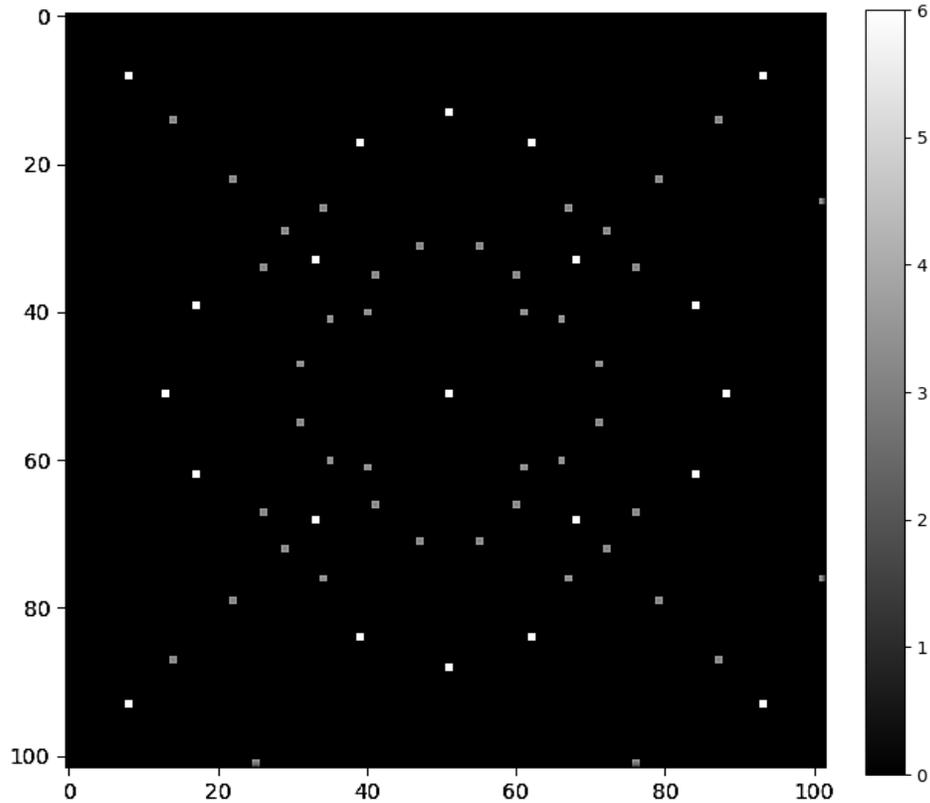
Condition d'extinction DRX : listes des plans diffractant du réseau CFC (marqué d'un X)



Indices hkl	$h^2 + k^2 + l^2$	Cubique à faces centrées
100	1	
110	2	
111	3	X
200	4	X
210	5	
211	6	
220	8	X
221 et 300	9	
310	10	
311	11	X
222	12	X
320	13	
321	14	
400	16	X
410 et 322	17	
411 et 330	18	
331	19	X
420	20	X
421	21	
332	22	
422	24	X

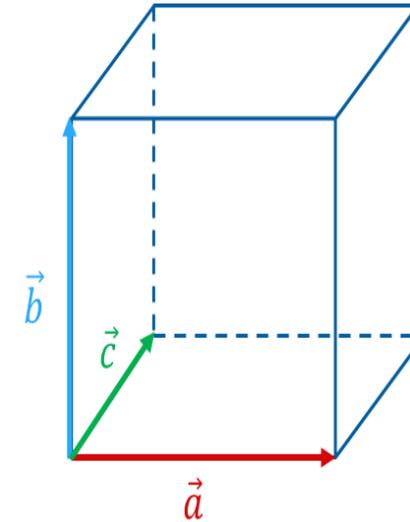
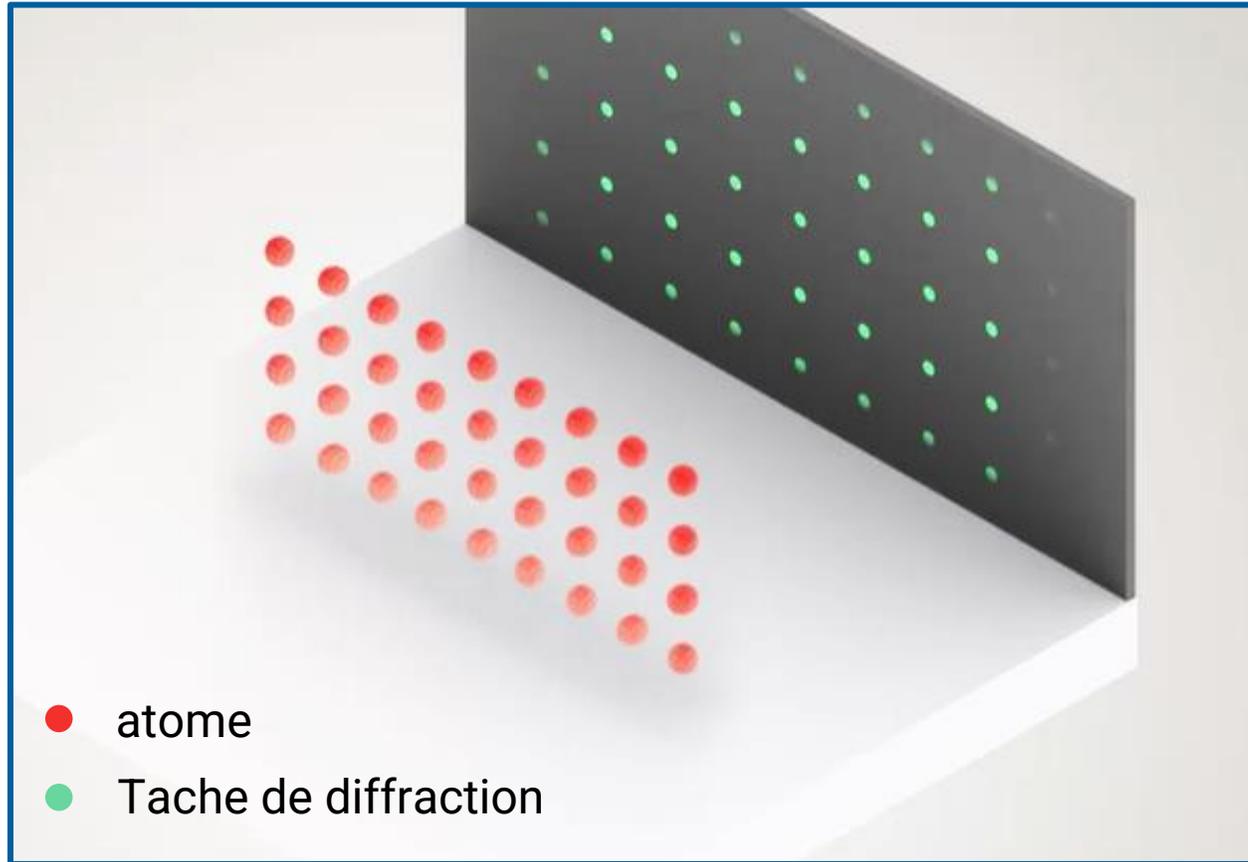
Condition d'extinction

Condition d'extinction DRX : listes des plans diffractant du réseau CFC (marqué d'un X)



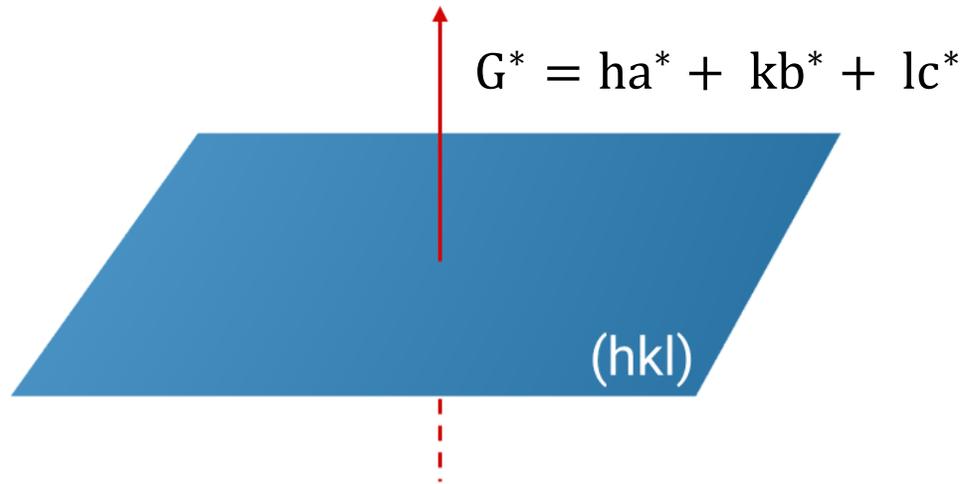
Indices hkl	$h^2 + k^2 + l^2$	Cubique à faces centrées
100	1	
110	2	
111	3	X
200	4	X
210	5	
211	6	
220	8	X
221 et 300	9	
310	10	
311	11	X
222	12	X
320	13	
321	14	
400	16	X
410 et 322	17	
411 et 330	18	
331	19	X
420	20	X
421	21	
332	22	
422	24	X

Notion du repère réciproque



$$a^* = \frac{b \wedge c}{V_{\text{maille}}} \quad b^* = \frac{c \wedge a}{V_{\text{maille}}} \quad c^* = \frac{a \wedge b}{V_{\text{maille}}}$$

Notion du repère réciproque



Condition de diffraction Laue
 $q = G^*$

Passage du repère réciproque au repère cartésien
du cristal

$$G_c = B G^*$$

Symétrie cubique :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{a} \end{bmatrix}$$

Méthodes d'indexation

Indexation par projection stéréographique

- Exploitation des abaques de Greninger (diffraction en retour) ;
- Exploitation des abaques de Leonhardt (diffraction en transmission) ;
- Projection stéréographique sur un canevas de Wulff.

Indexation par LAUEGEN

- Premier script d'automatisation d'indexation des clichés de diffraction ;
- Simulation des clichés de DRX → Obtention des symétries des cristaux ;
- Après amélioration → Connaissance directe de l'orientation cristalline.

Méthodes d'indexation

Indexation par X-ray Microdiffraction Analysis Software (XMAS)

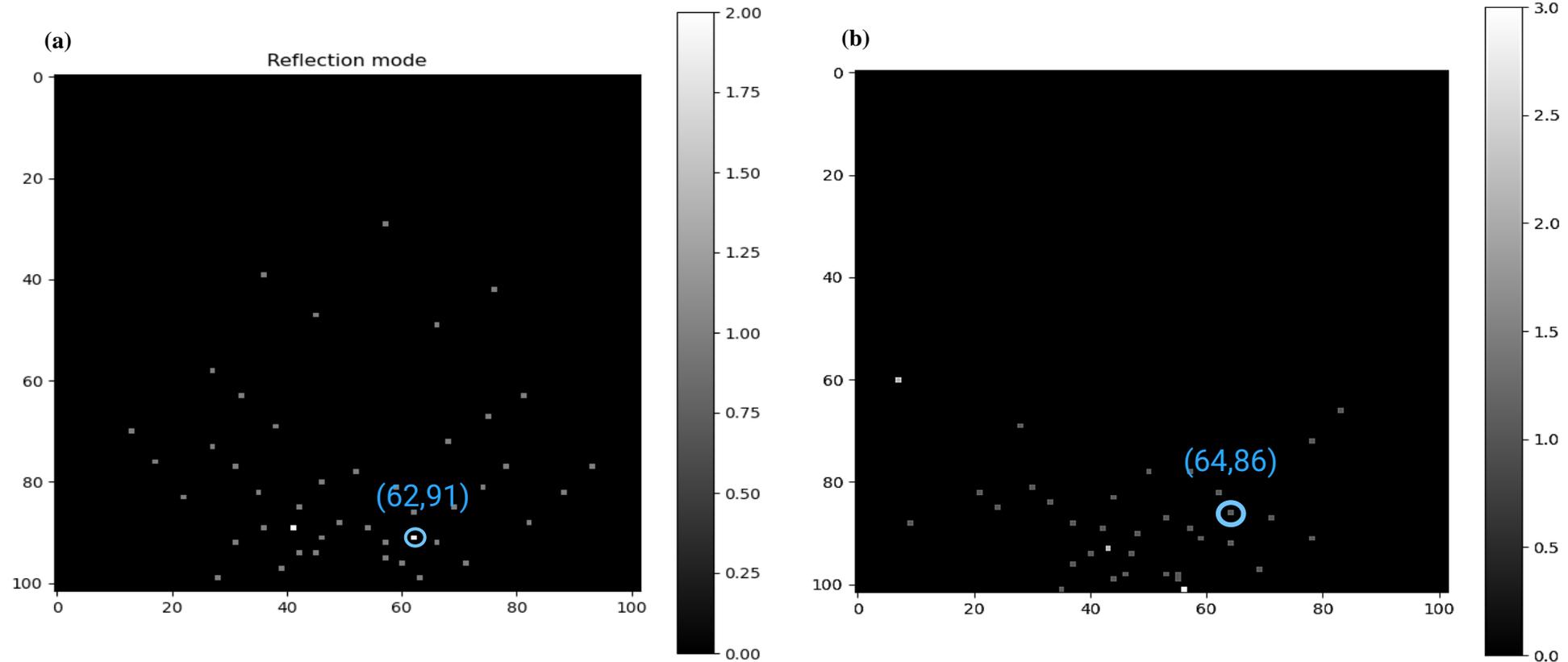
- Indexation des clichés DRX des pièces polycristallines ;
- Correction des figures obtenues expérimentalement ;
- Calculs de contraintes et de déformations.

Indexation par LaueTools

- Développé depuis 2006 au sein de l'équipe CRG-IF BM 32 à l'ESRF (Grenoble, France) ;
- Bibliothèque de Python ;
- Simulation et indexation automatique et directe micro et nano-structurale pour des monocristaux ou polycristaux.

Résultat de la simulation

Comparaison de simulations avec différentes orientations



Simulation ponctuelle (a) avec une direction $(0 ; 5 ; 0)$ du grain ; (b) avec une direction $(5 ; 0 ; 0)$ du grain.