



Réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

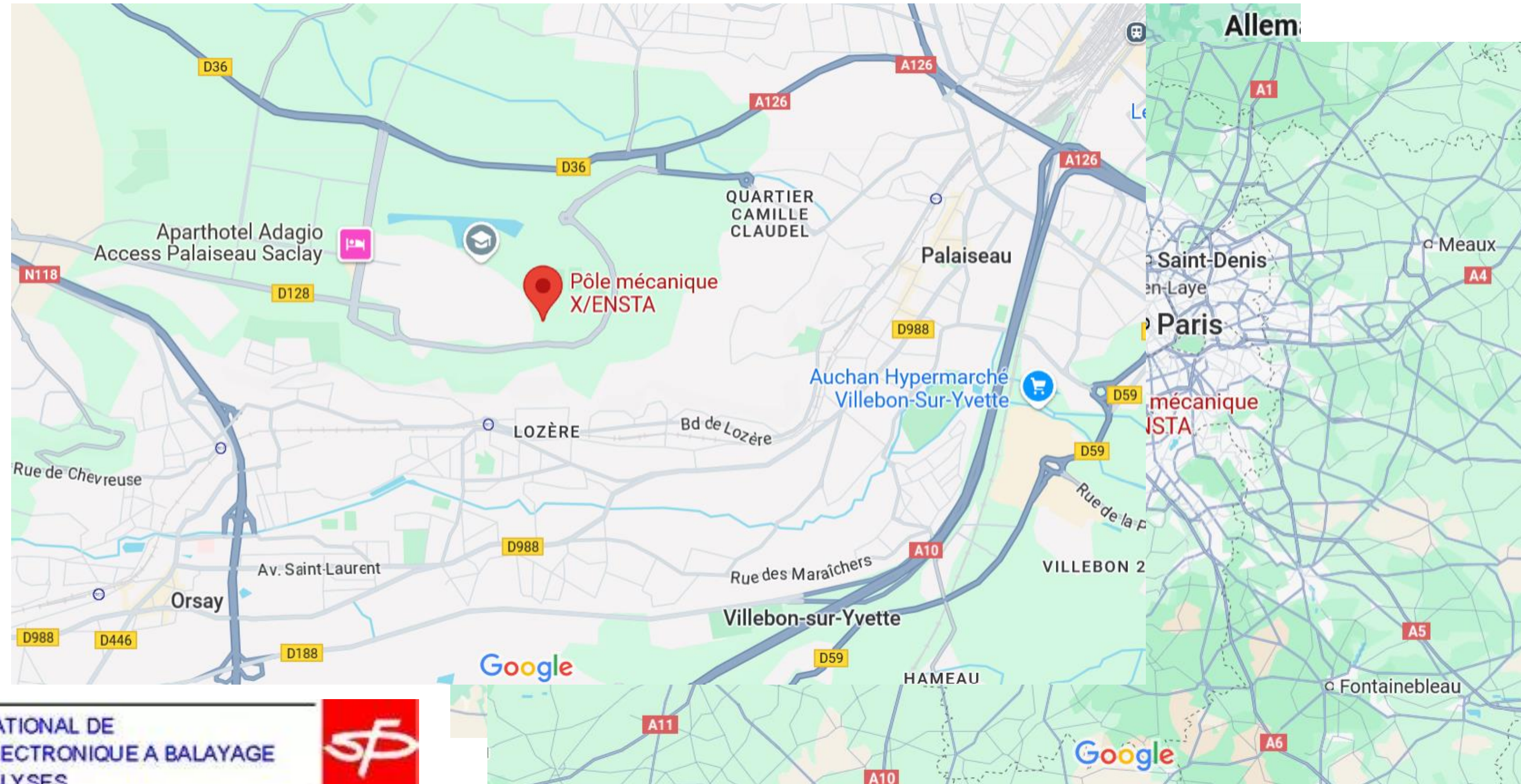
HEA : cartographie EBSD avec filtre EDS pour identification de phases

S

Laboratoire de Mécanique des Solides



UMR 7649



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

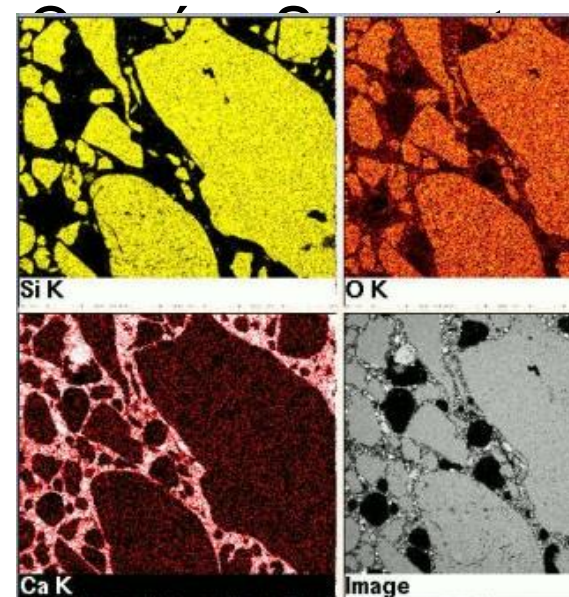


Laboratoire de Mécanique des Solides

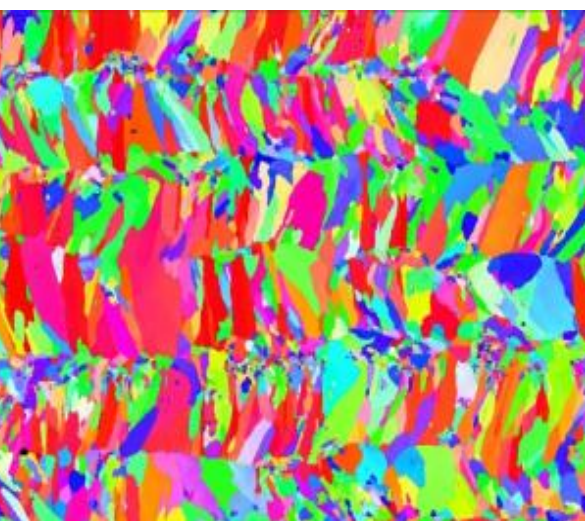


Thermofischer scientific
QUANTA 650 FEG ESEM

Oxford instrument :



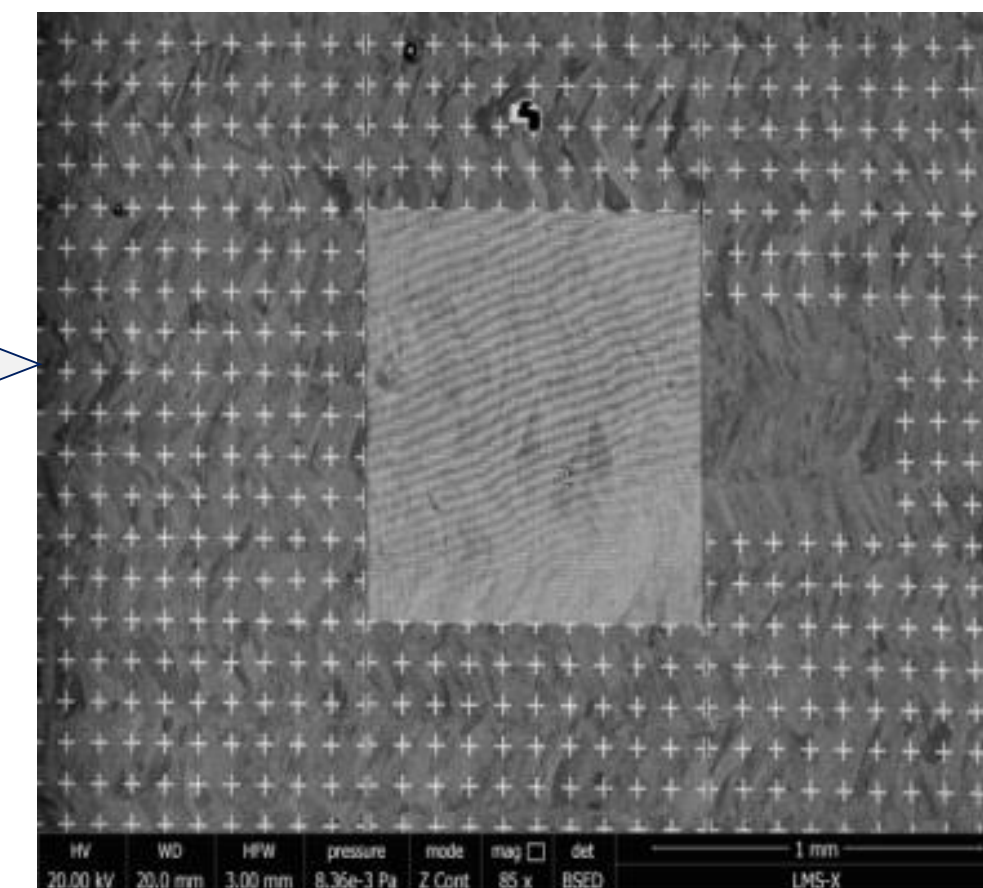
EDS



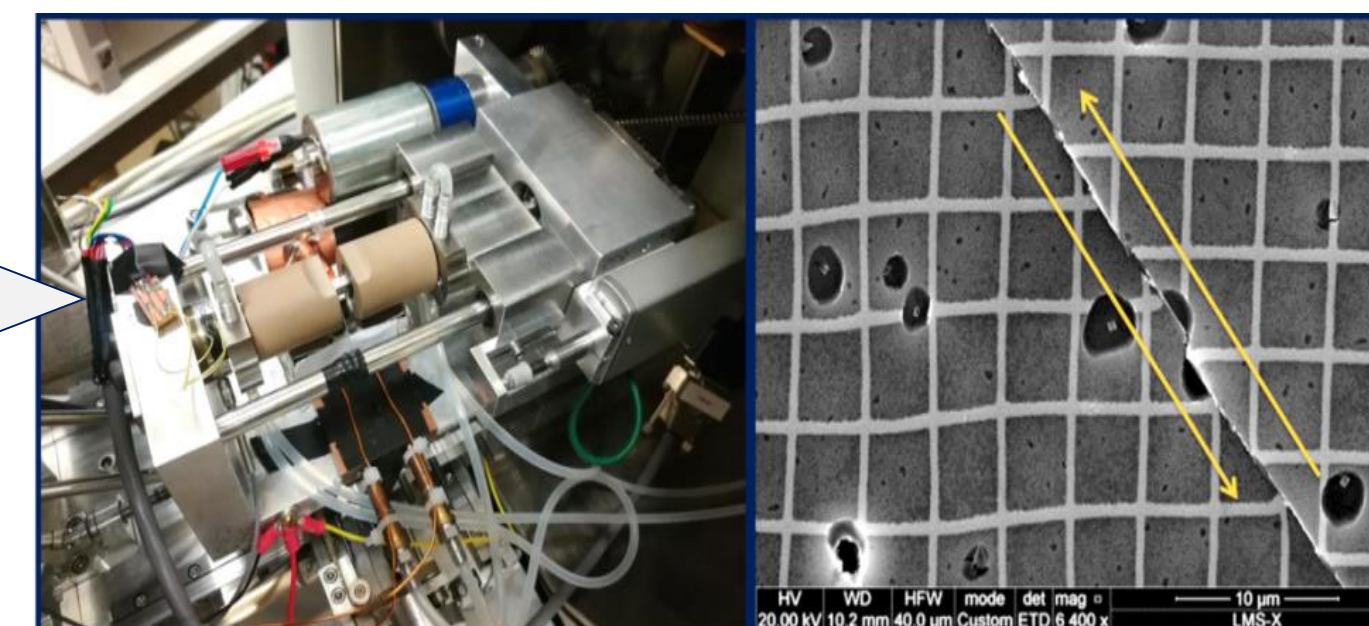
EBSD



Lithographie



In-situ



Essai mécanique à chaud. Ex: glissement au joint de grain. Aluminium 300°C

Mots clefs

MEB environnemental

Caractérisations chimique
et cristallographique

Marquage de surface multi
échelle

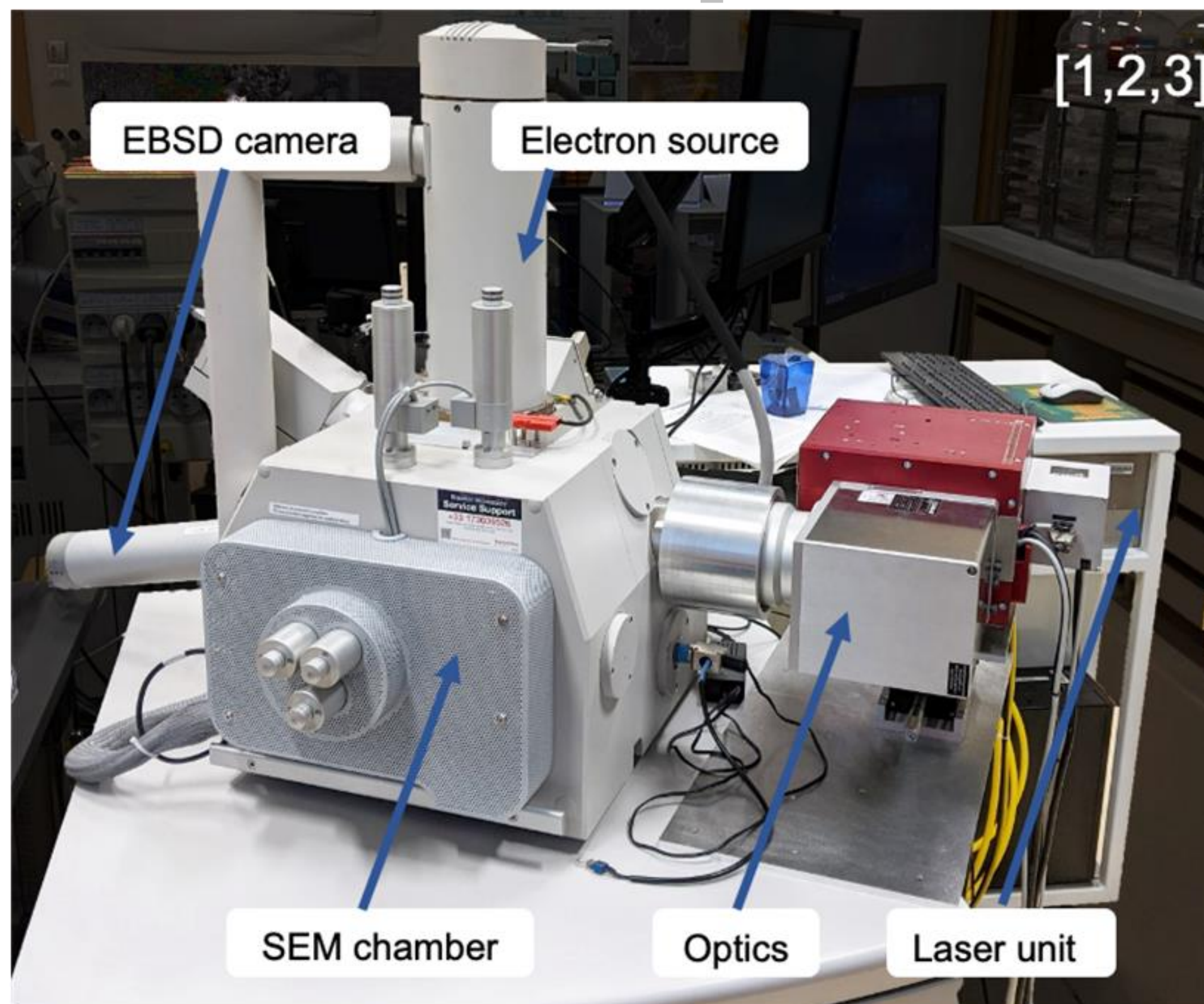
Mécanique in-situ
environnementale

Corrélation d'images
numériques





Laboratoire de Mécanique des Solides



LASER – MEB, Projet LASEM

- + Thermofischer scientific QUANTA 600 W ESEM
- + Source LASER continue : 20 – 200 W.
- + Taille de spot, vitesse et amplitude de balayage.

QCM de 11 questions < 5 min .

Scanner moi



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Laboratoire de Mécanique des Solides



Simon HALLAIS

39 ans

Ingénieur d'étude

simon.hallais@polytechnique.edu



Alexandre TANGUY

43 ans

Ingénieur d'étude

alexandre.tanguy@polytechnique.edu



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



L' Electron Back Scattered Diffraction (EBSD) une technique de caractérisation des solides cristallins



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



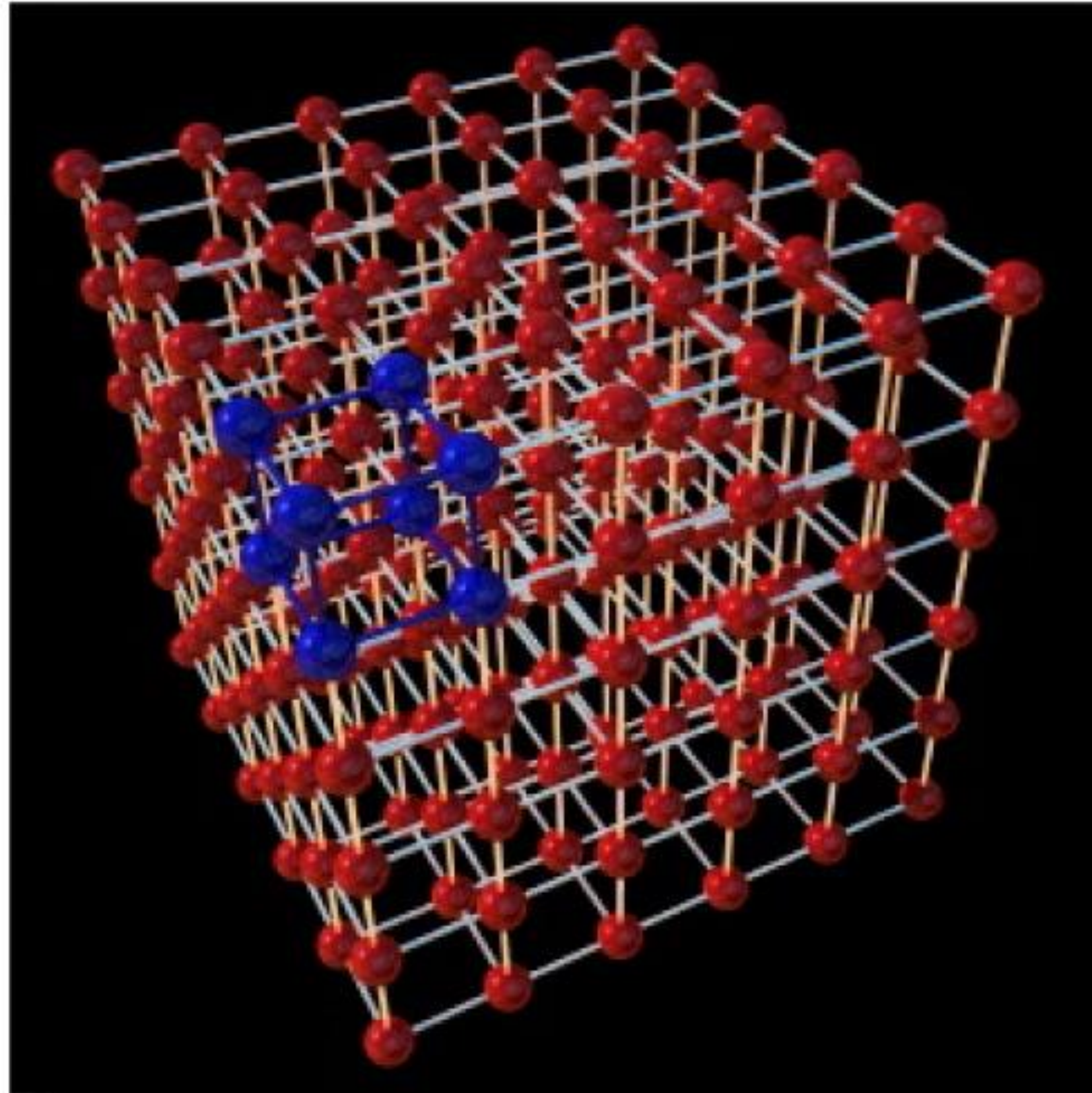
réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Rappels théoriques



Rappels



Les atomes s'ordonnent dans les solides cristallins sous forme de réseau tripériodique.

A chaque nœud du réseau, se trouve des atomes.

auteur : Equipe Gr.A.M.M.E.S., Université Bordeaux 1 - 2005



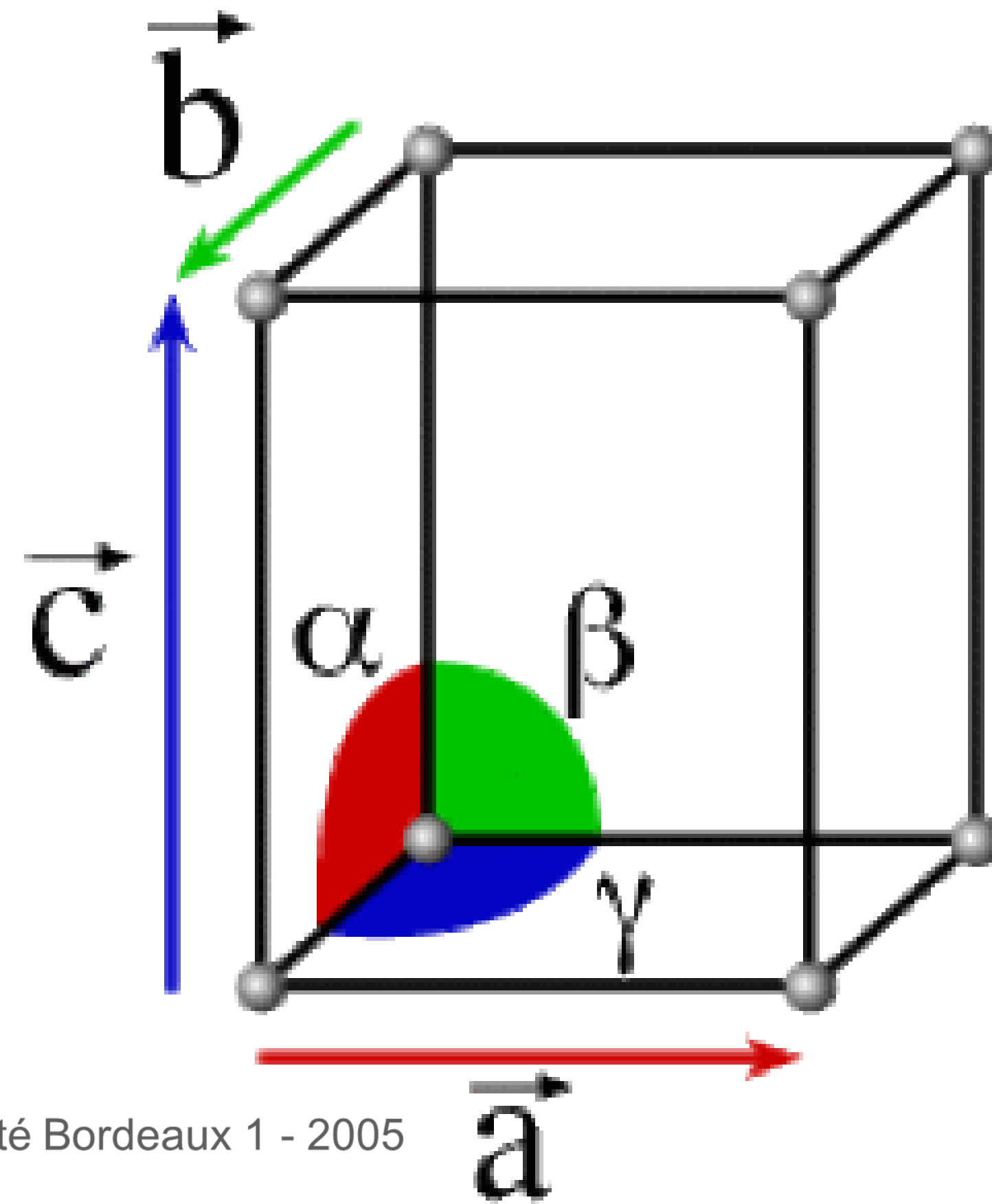
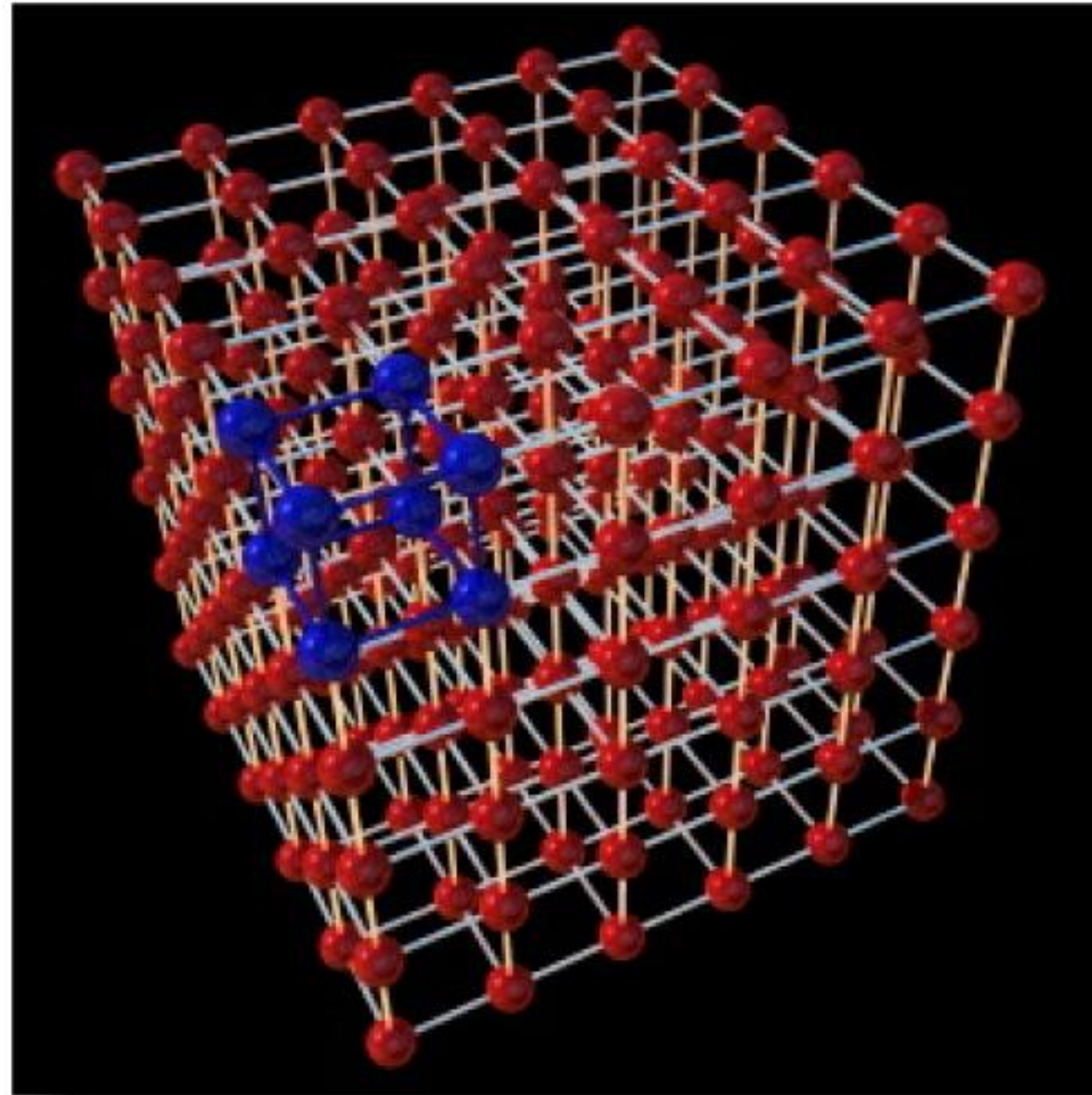
GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

Rappels



auteur : Equipe Gr.A.M.M.E.S., Université Bordeaux 1 - 2005

Dans ce réseau nous pouvons isoler un motif unitaire, que nous appelons maille élémentaire, définie par des vecteurs a, b, c et les angles α, β, γ entre ces vecteurs.

La répétition au nœud du réseau de la maille élémentaire (mise en commun de faces) conduit à **un cristal**.



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

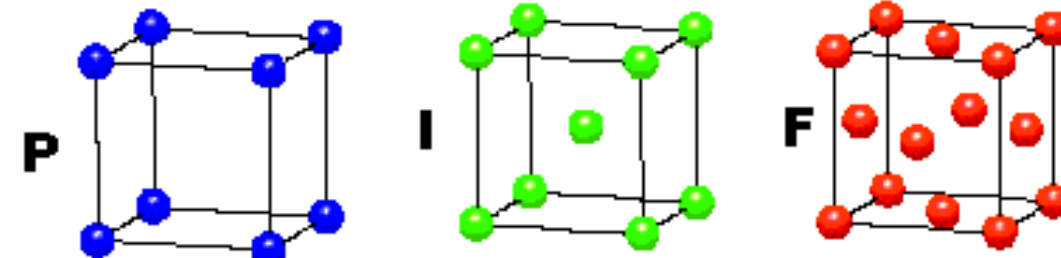
Classification des cristaux.

7 systèmes cristallins et réseau dérivé

Cubique

$$a = b = c$$

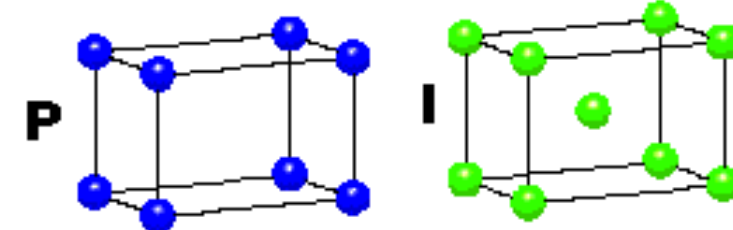
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Quadratique

$$a = b \neq c$$

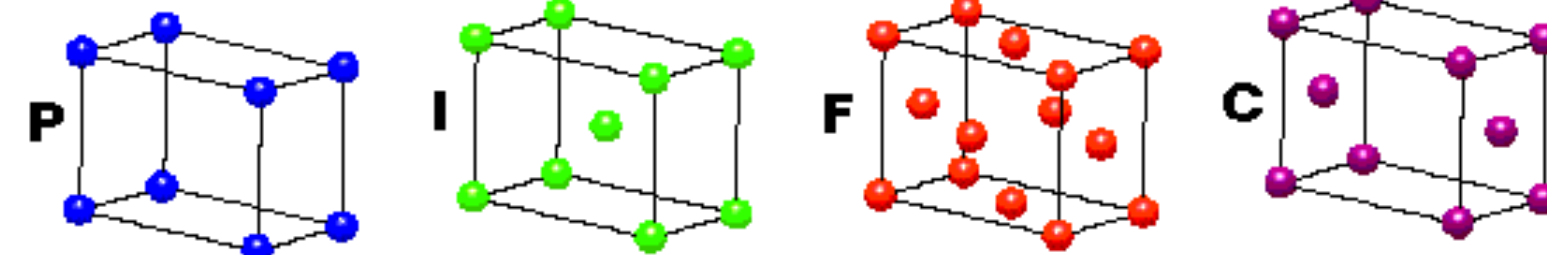
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Orthorhombique

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

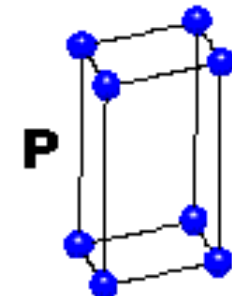


Hexagonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

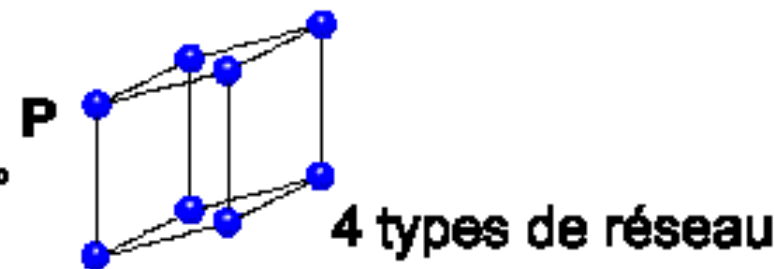
$$\gamma = 120^\circ$$



Trigonal

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$



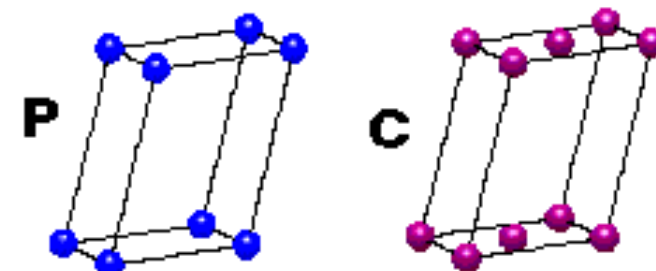
4 types de réseau

Monoclinique

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \gamma = 90^\circ$$

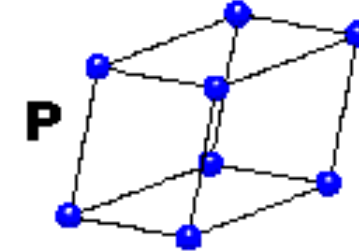
$$\beta \neq 120^\circ$$



Triclinique

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



4 types de réseau

- P Primitif
- I centré
- F toutes faces centrées
- C 1 face centrée

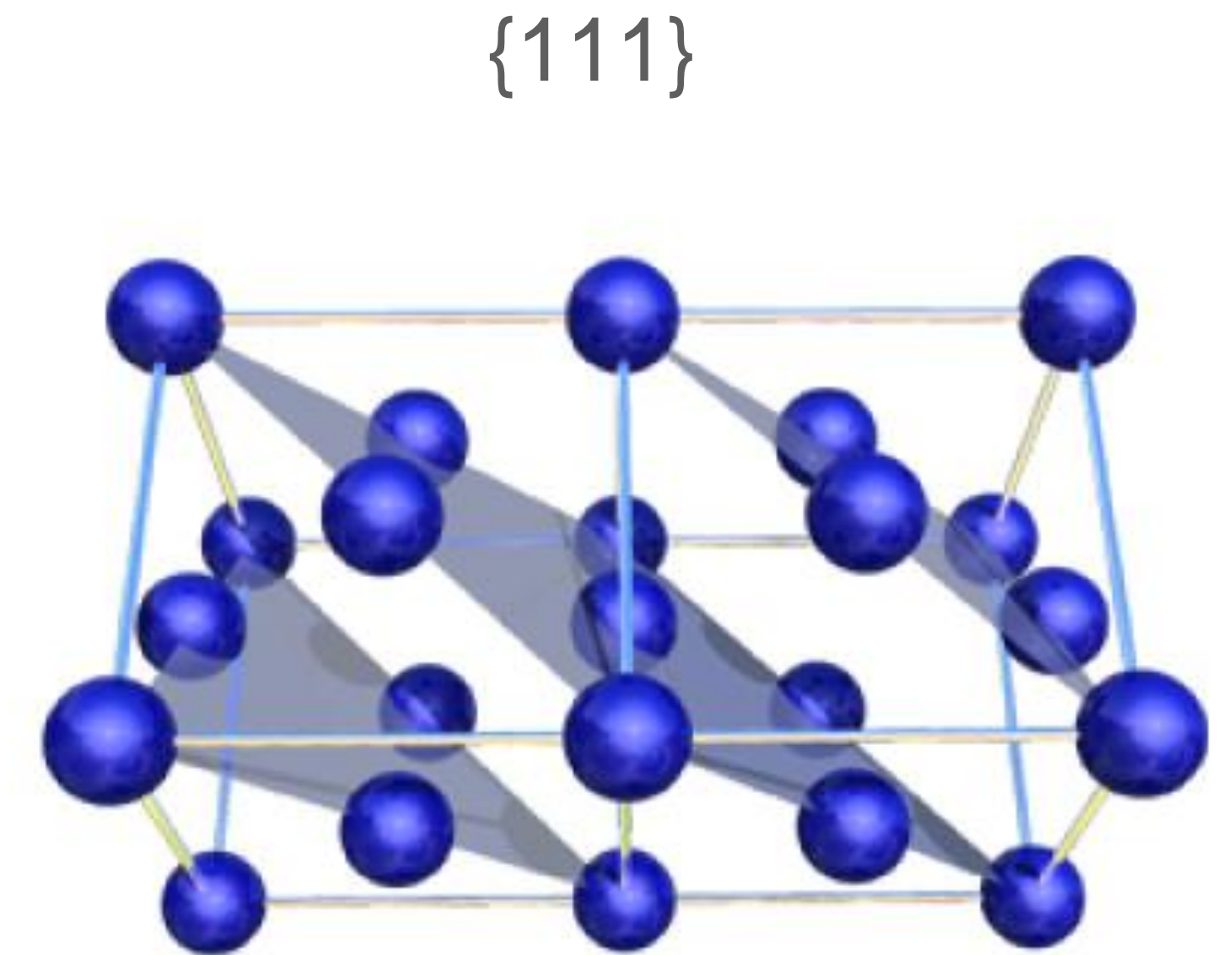
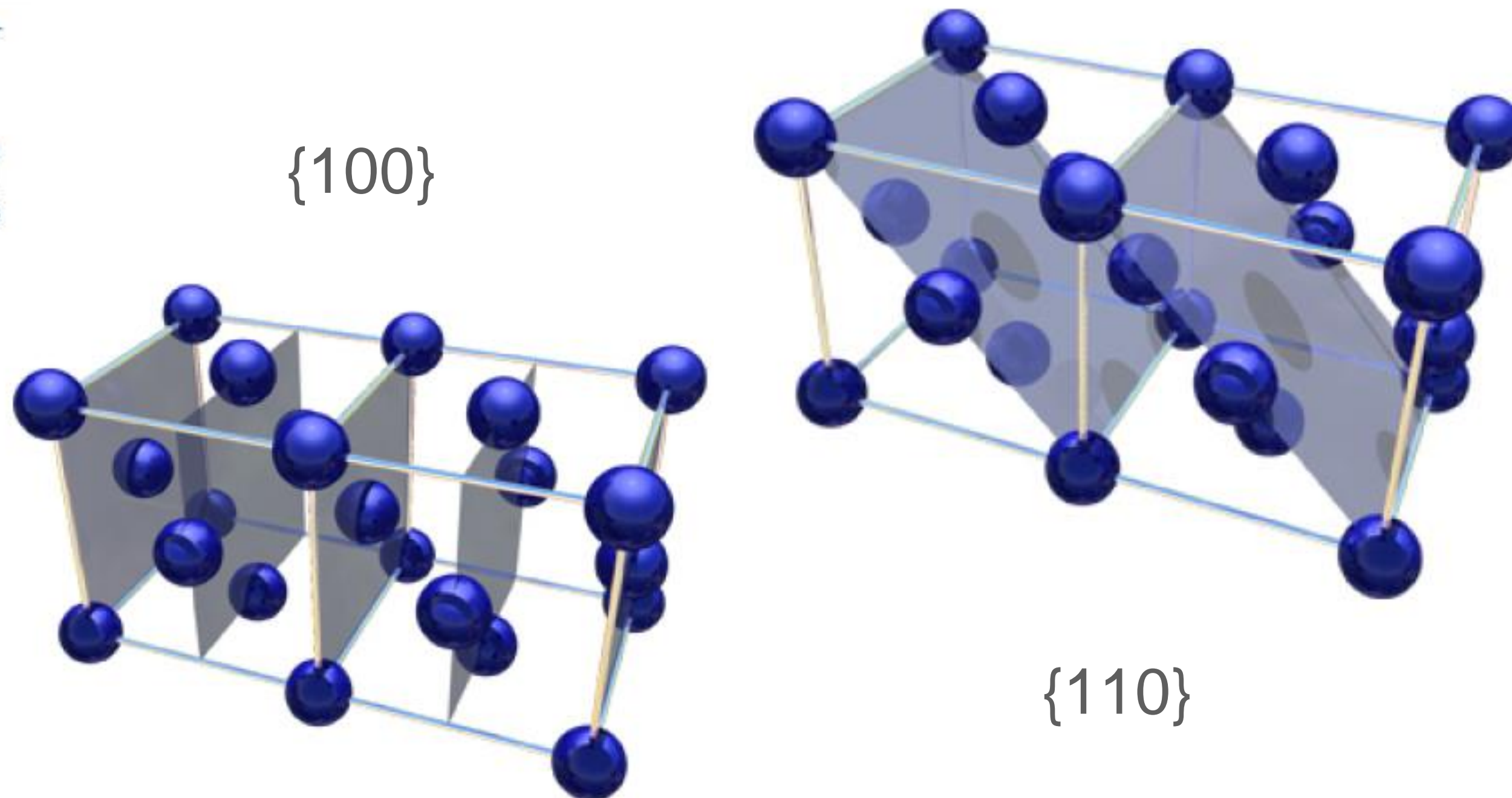
+ 7 systèmes cristallins
= 14 réseaux de BRAVAIS

<https://ressources.univ-lemans.fr>



Les plans réticulaires.

Dans le système cubique face centré



auteur : Equipe Gr.A.M.M.E.S., Université Bordeaux 1 - 2005

La distance inter-réticulaire agit comme une fente permettant le phénomène de diffractions



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



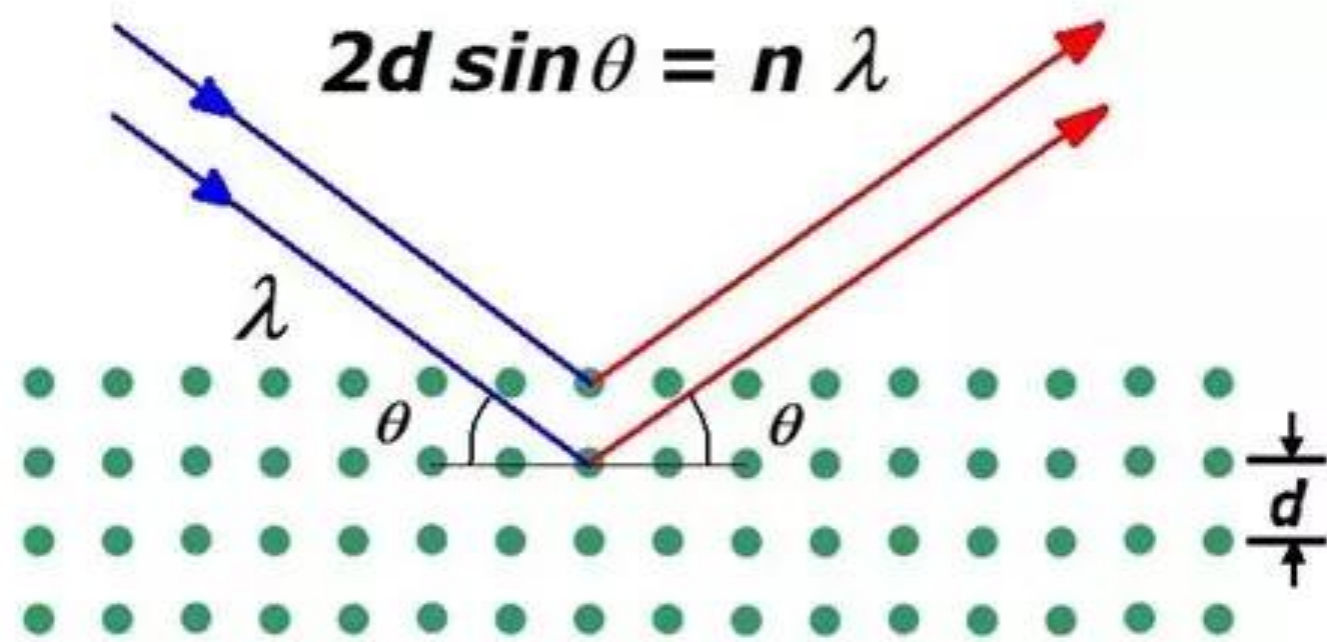
réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

Alexandre TANGUY



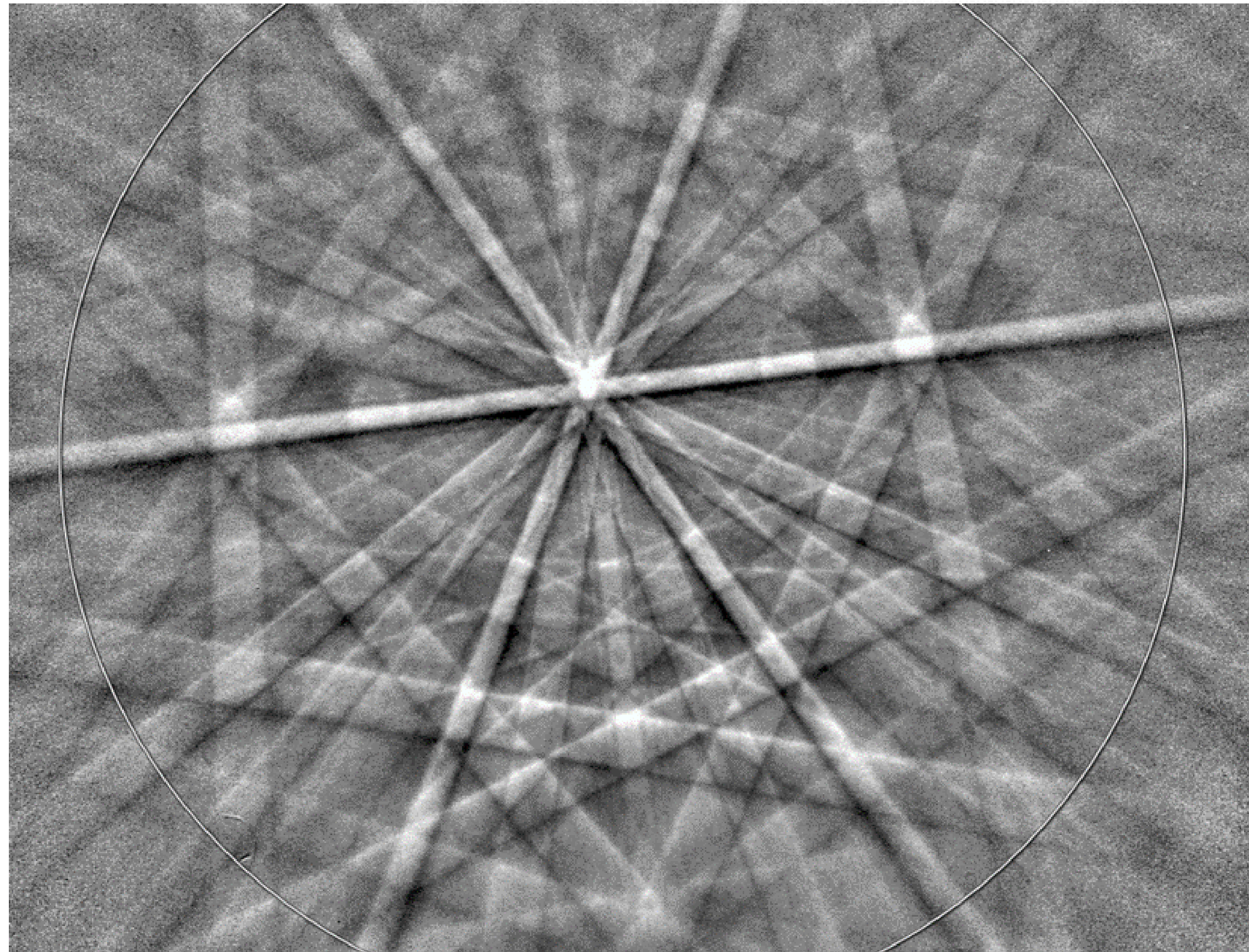
La diffraction

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



Thermofischer scientific XRD academy

Cliché de Kikuchi



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



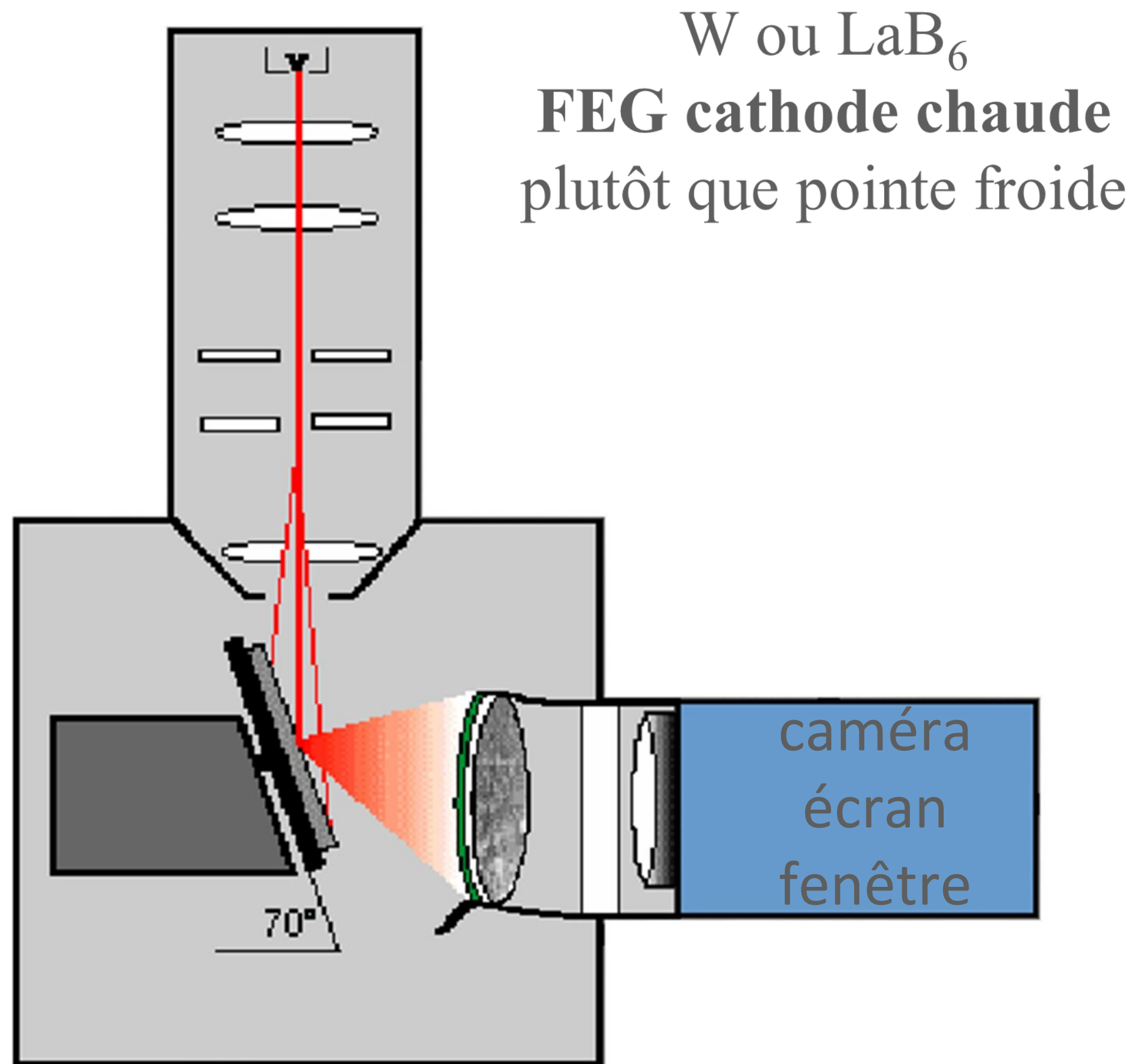
réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



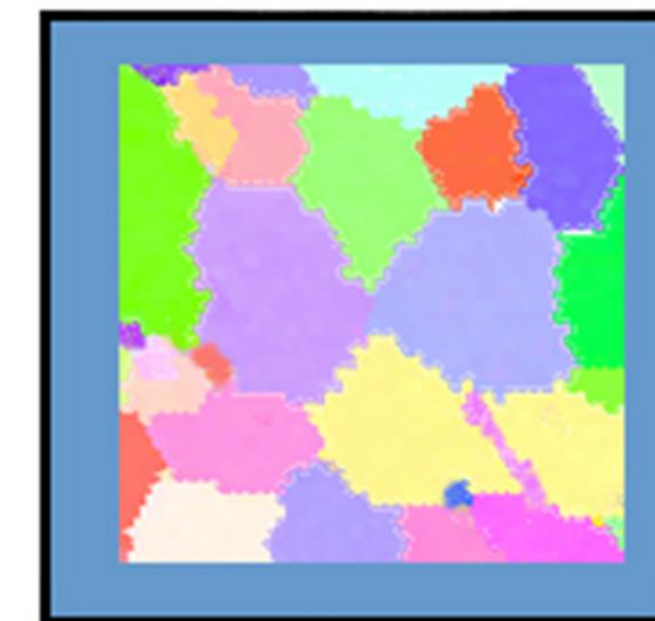
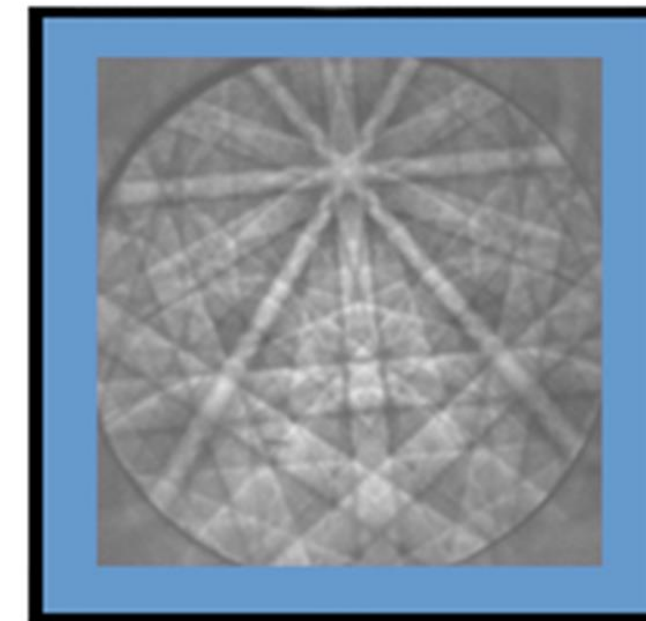
Mise en oeuvre dans un MEB



Le principe de détection



Indexation Cartographie



PC
contrôles :
camera, balayage, platine

Détecteurs associés possibles :
BSE ou FSD, AED et EDS



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

François BRISSET:
EBSD : Analyse par diffraction des électrons rétrodiffusées
application et techniques couplées „EDP science 2015

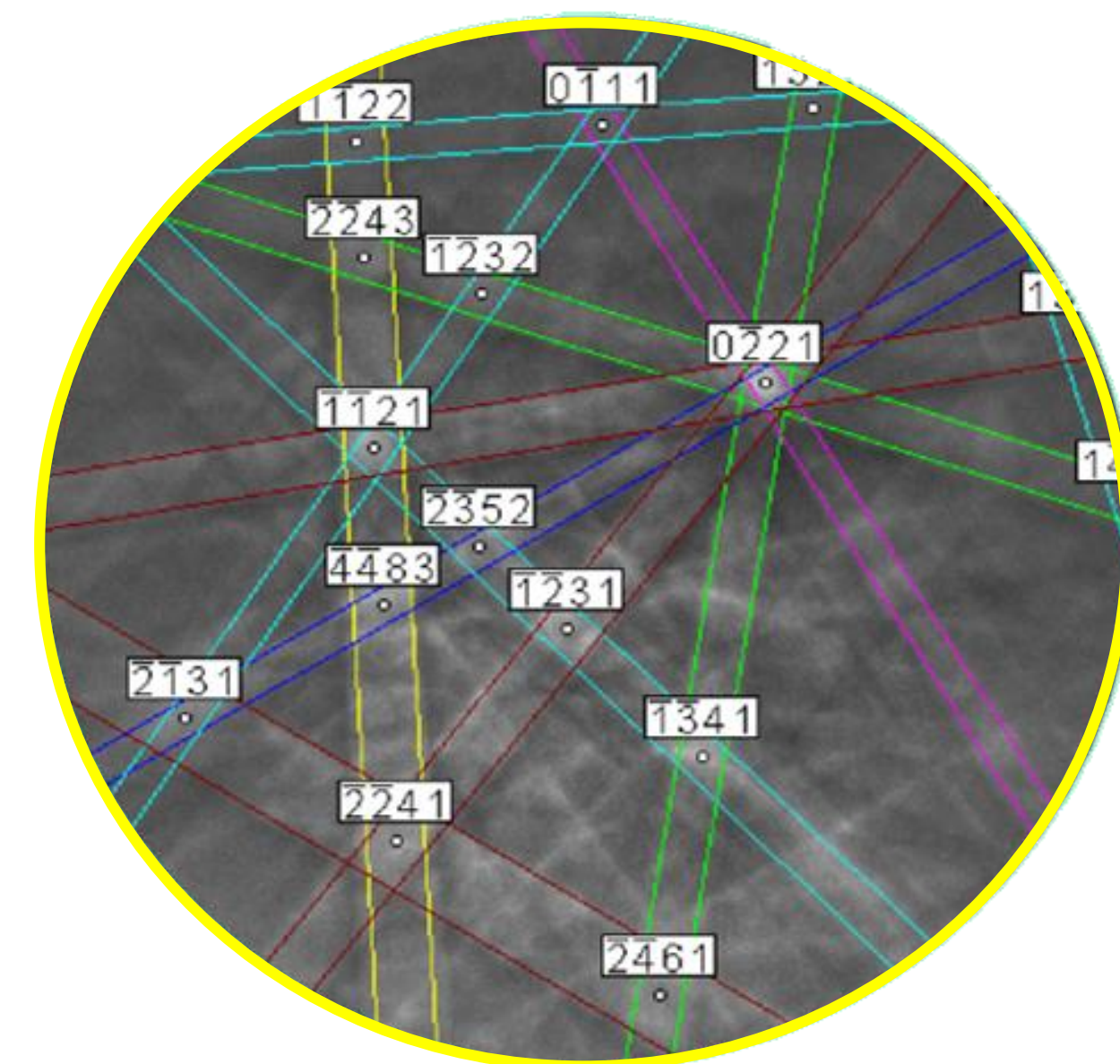
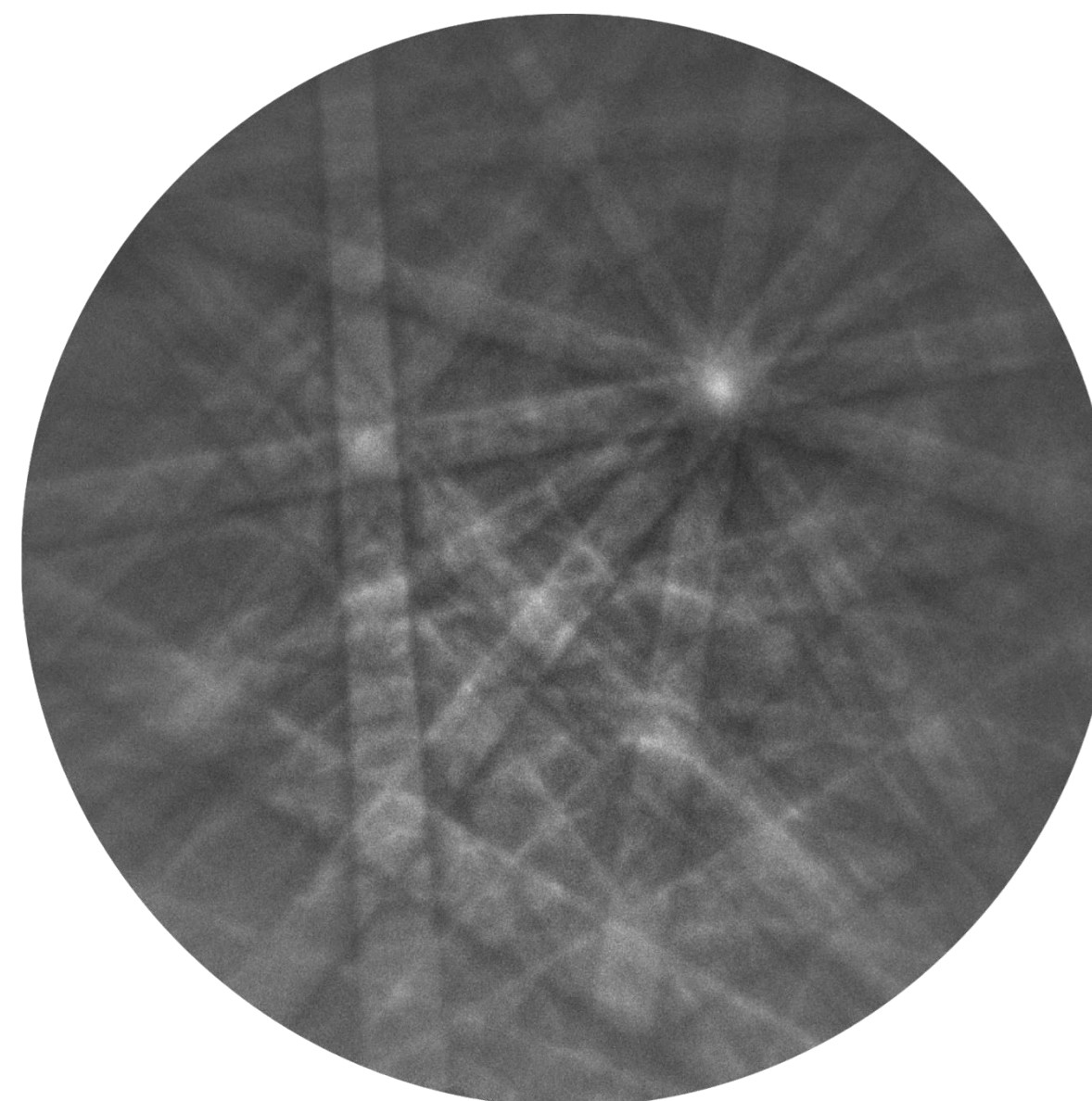
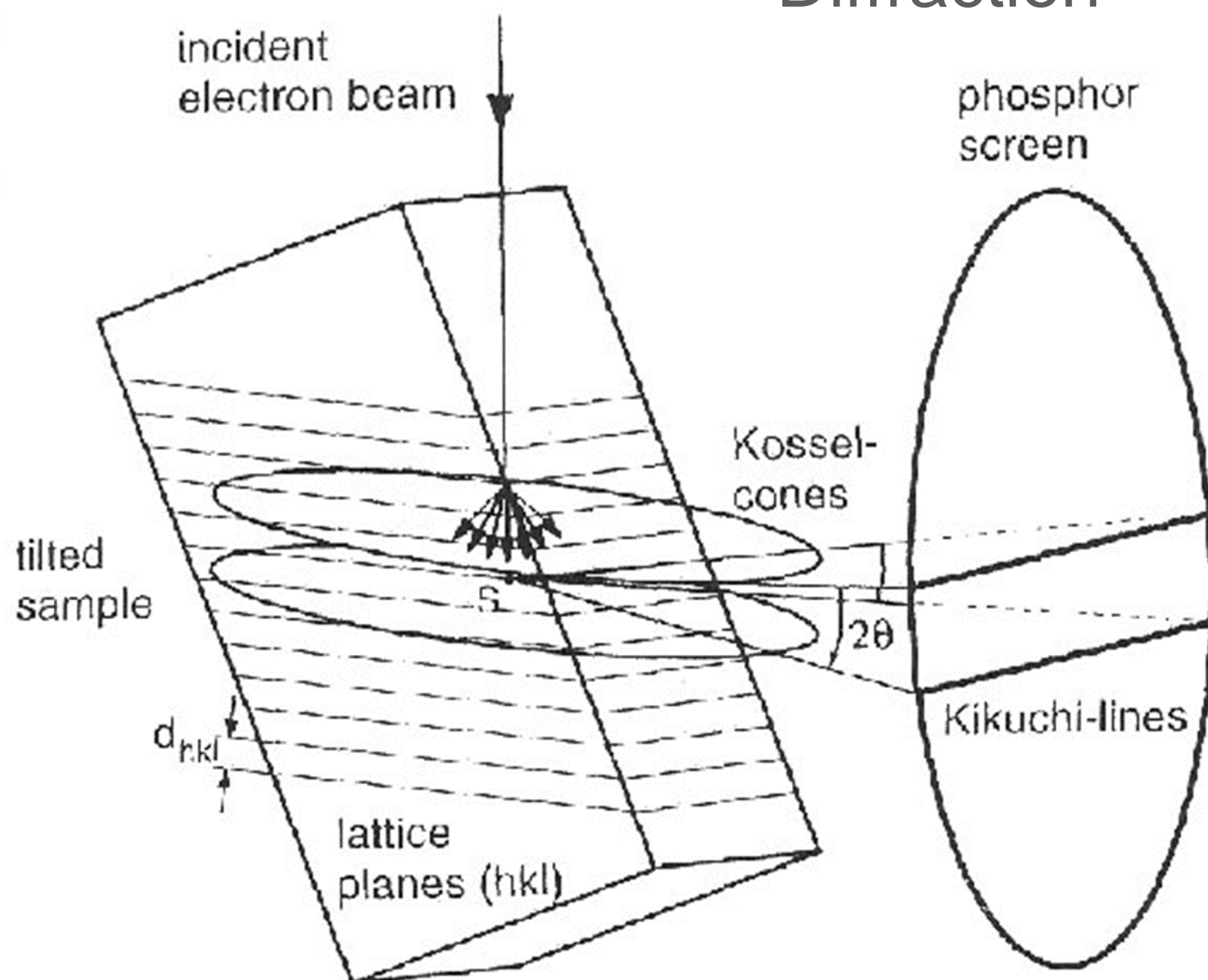
Le principe de détection

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

Diffraction

capture du cliché EBSD

Indexation des bandes



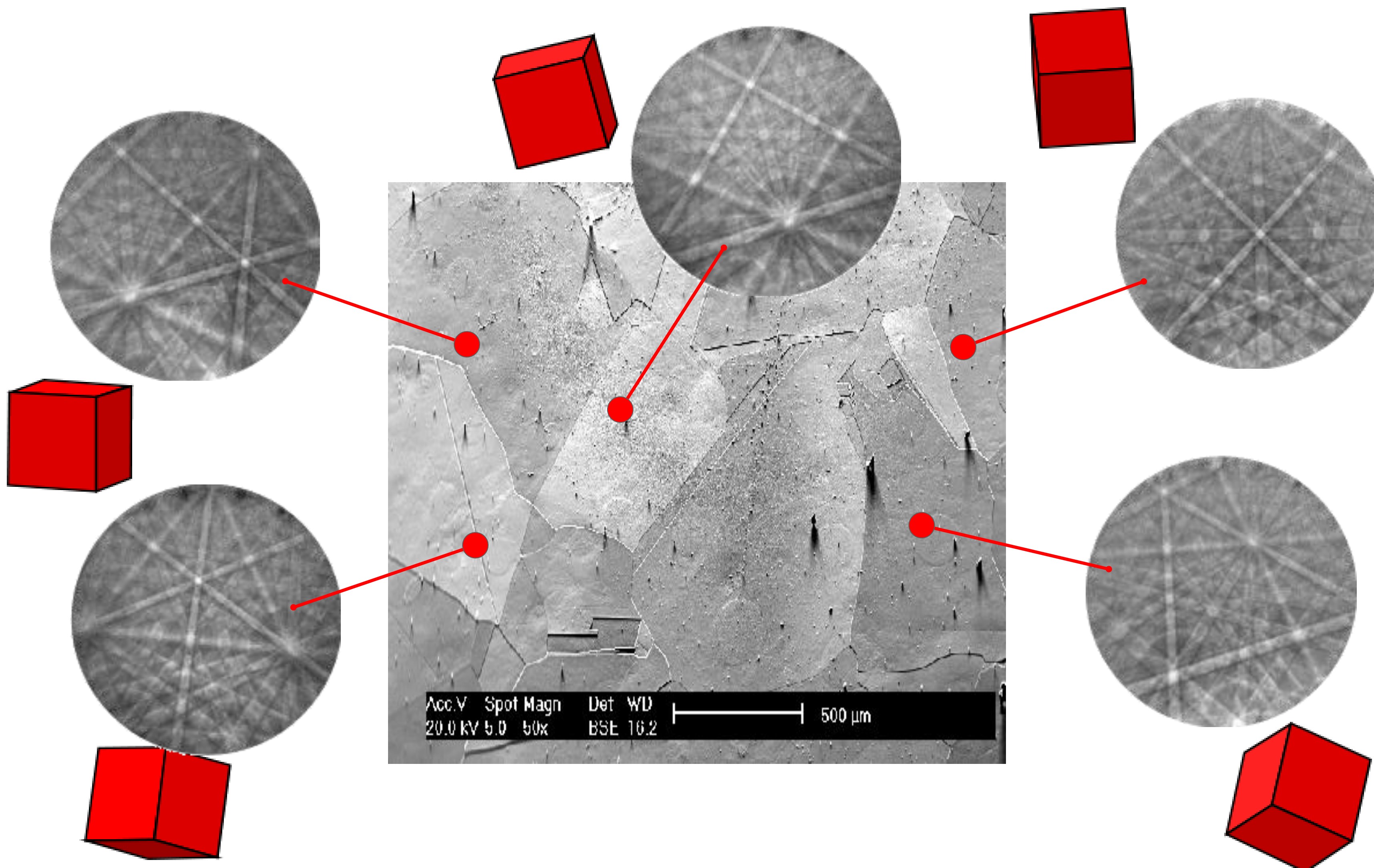
A partir d'un cliché et de son orientation

Choix d'une solution, par validation de la concordance du motif avec la phase cristallographique déclarée dans le système.

Affectation au point de diffraction une phase et une orientation.



La différenciation des clichés EBSD



Acc.V Spot Magn Det WD
20.0 kV 5.0 50x BSE 16.2 500 μm



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



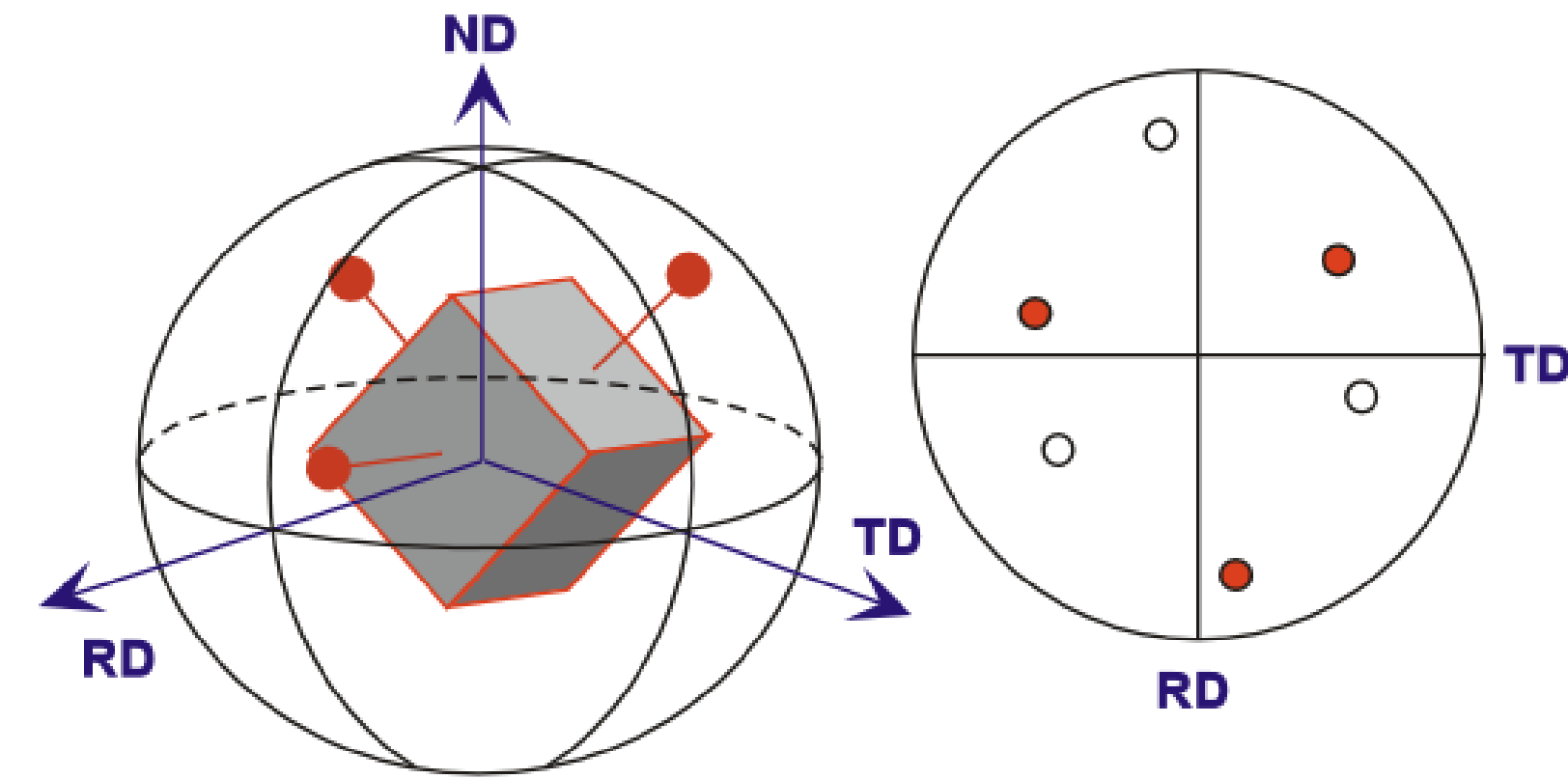
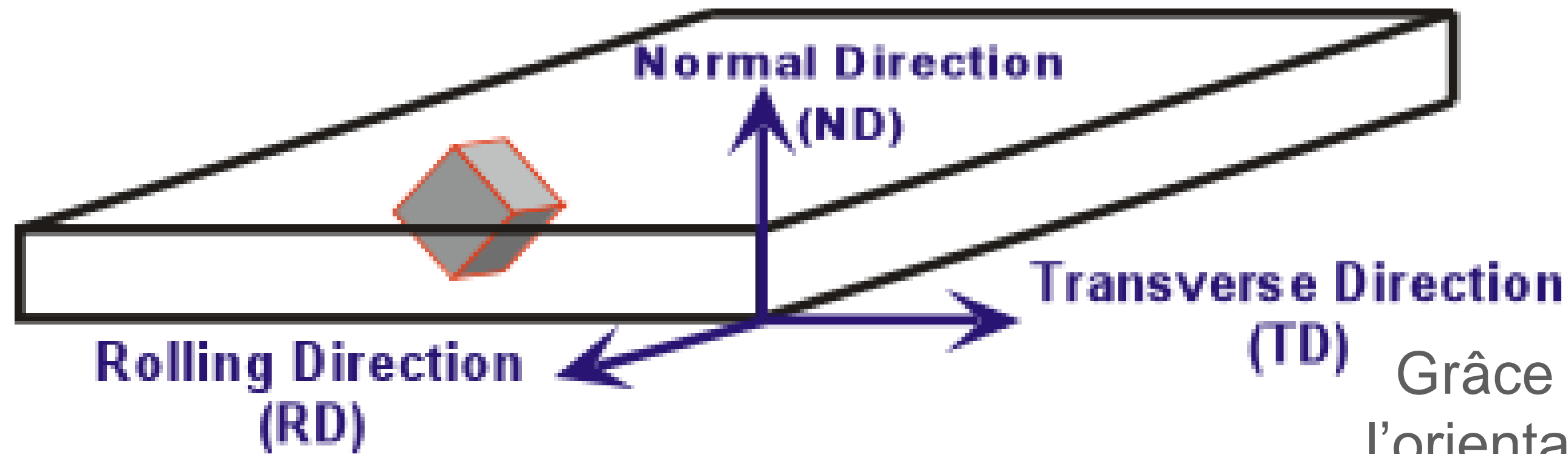
réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

François BRISSET:
EBSD : Analyse par diffraction des électrons rétrodiffusés
application et techniques couplées ,.EDP science 2015

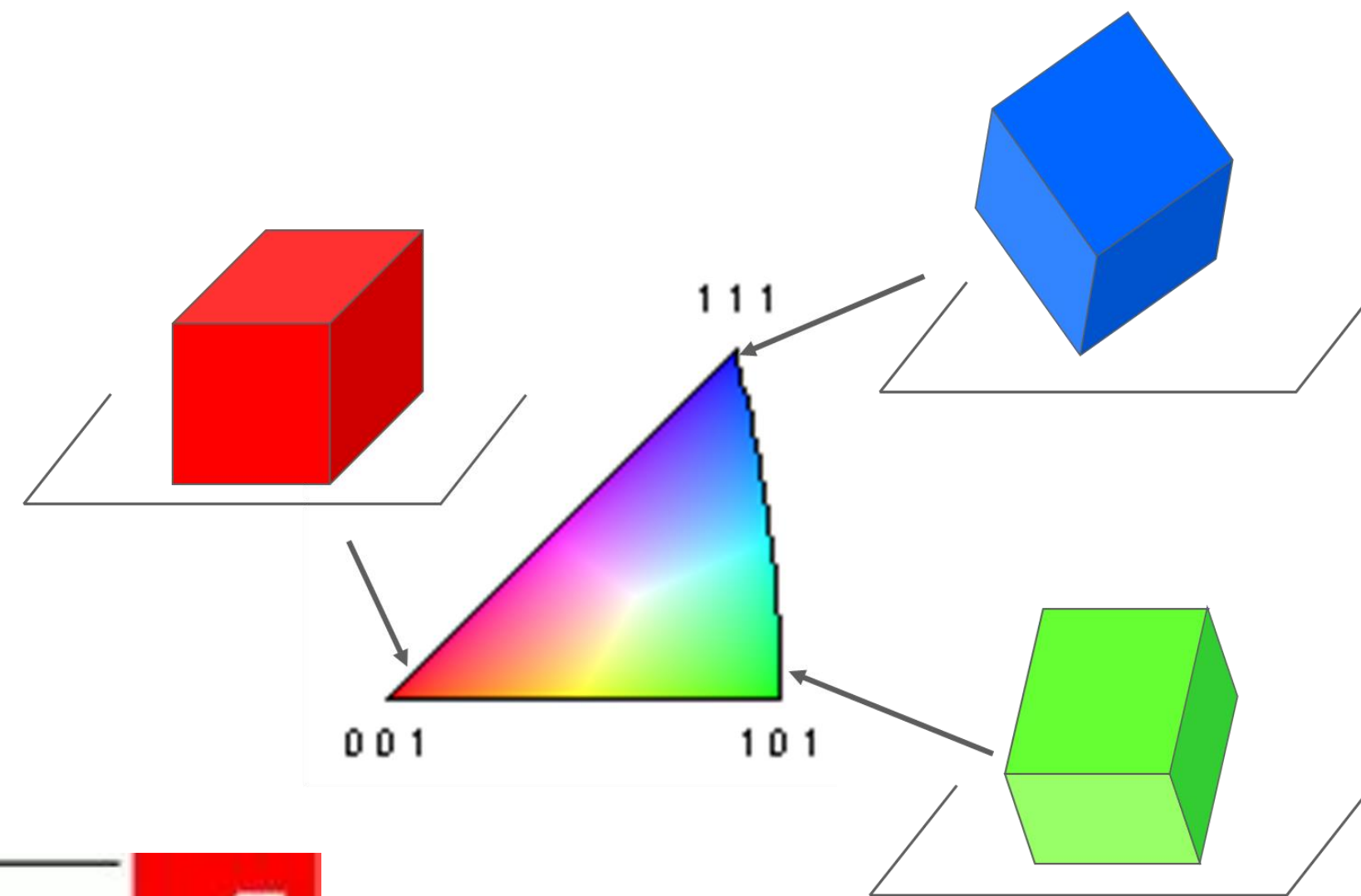
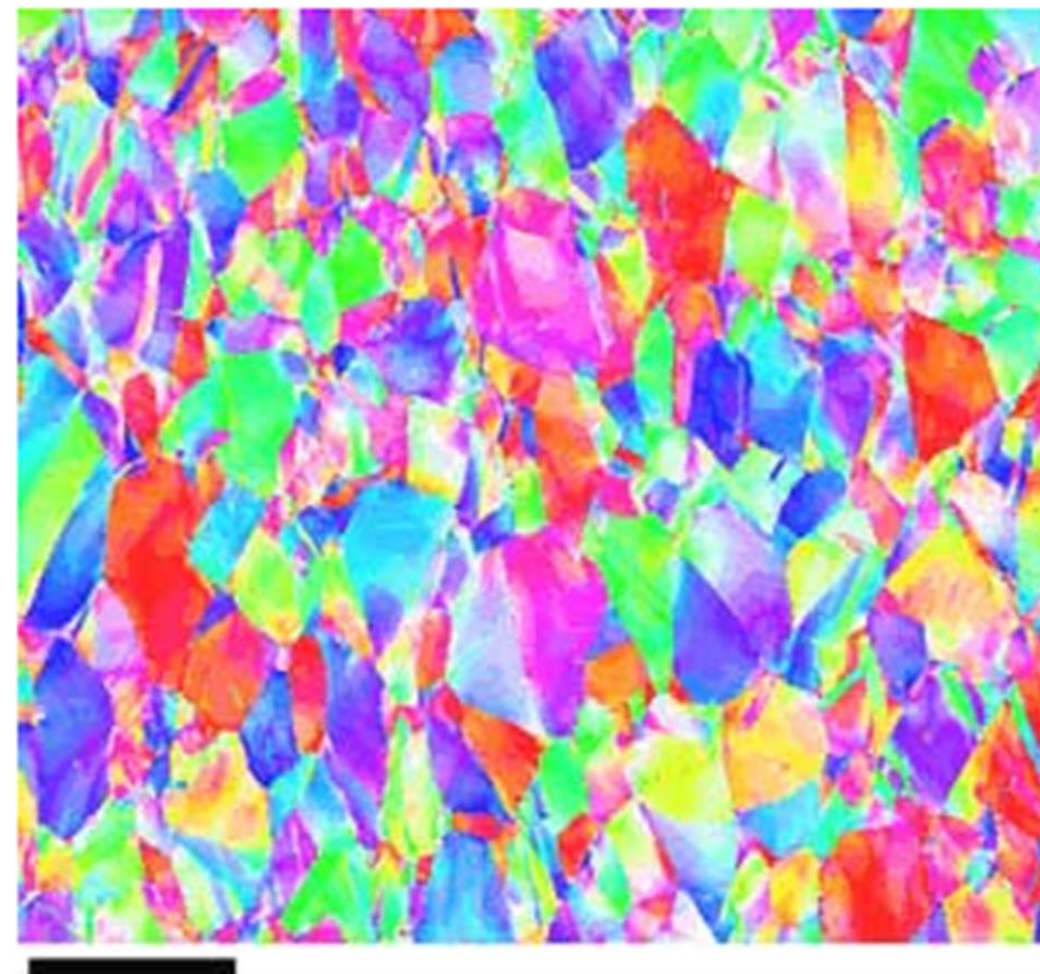
Alexandre TANGUY



Orientation cristallographique



Grâce aux figures de pôles directes, on décrit l'orientation du cristal dans le repère échantillon



Visualisation des grains selon leurs orientations avec un code couleur figure de pole inverse.



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique

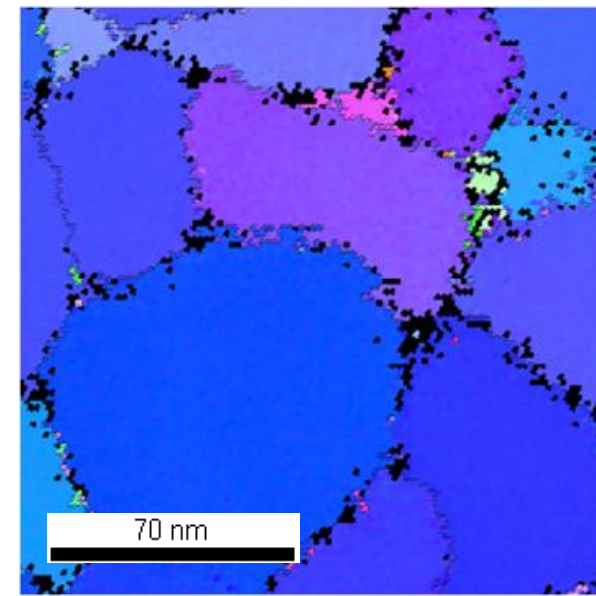


réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

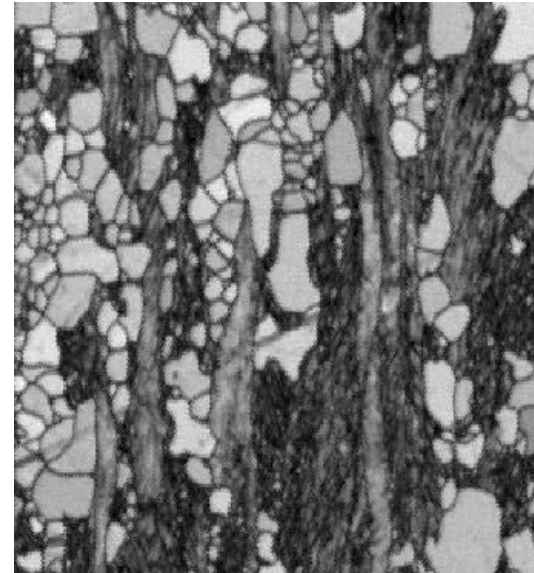
François BRISSET:
EBSD : Analyse par diffraction des électrons rétrodiffusées
application et techniques couplées ,EDP science 2015

Alexandre TANGUY

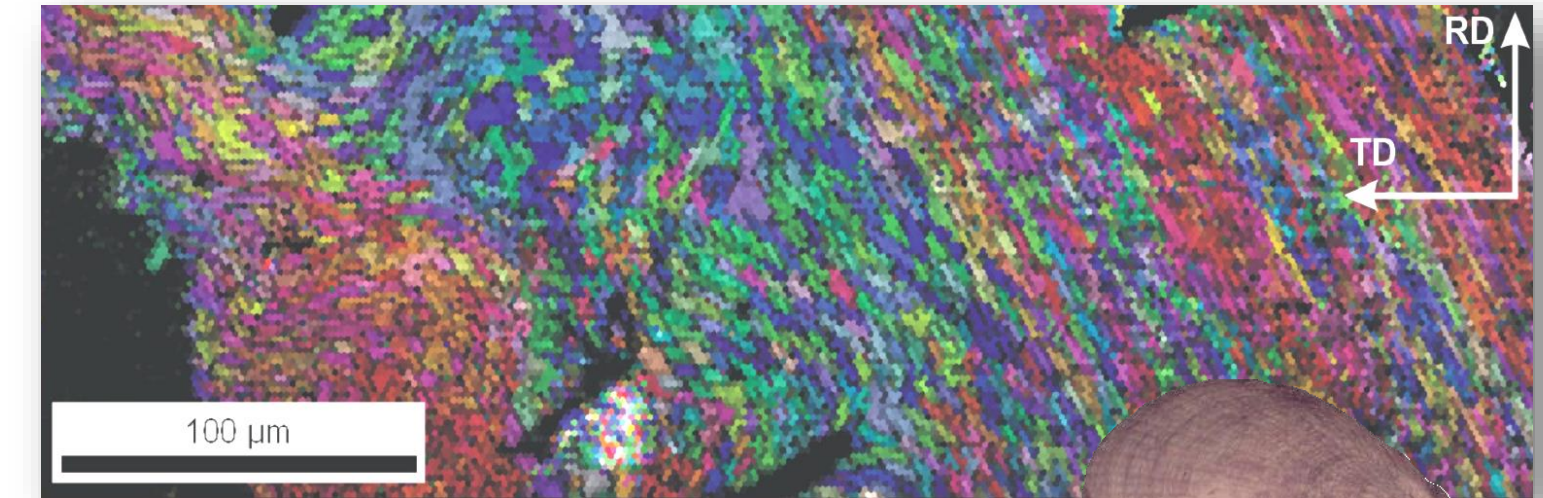
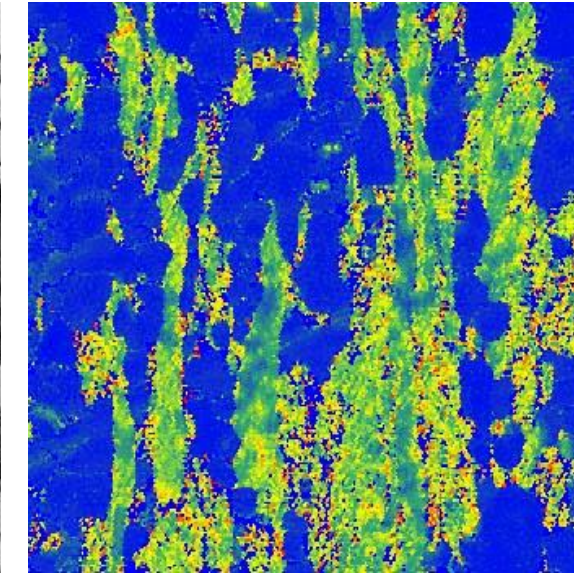
Exemples de résultats sur toutes sortes de matériaux



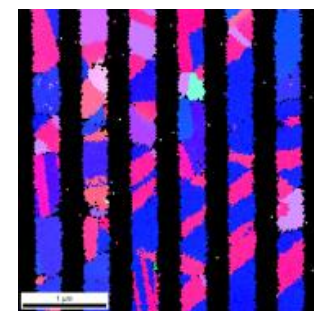
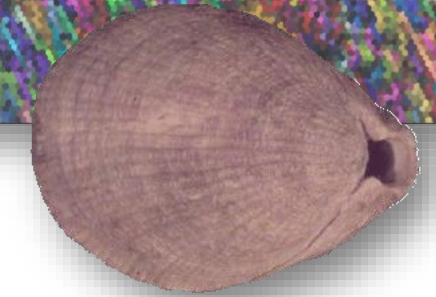
Dépôt PVD



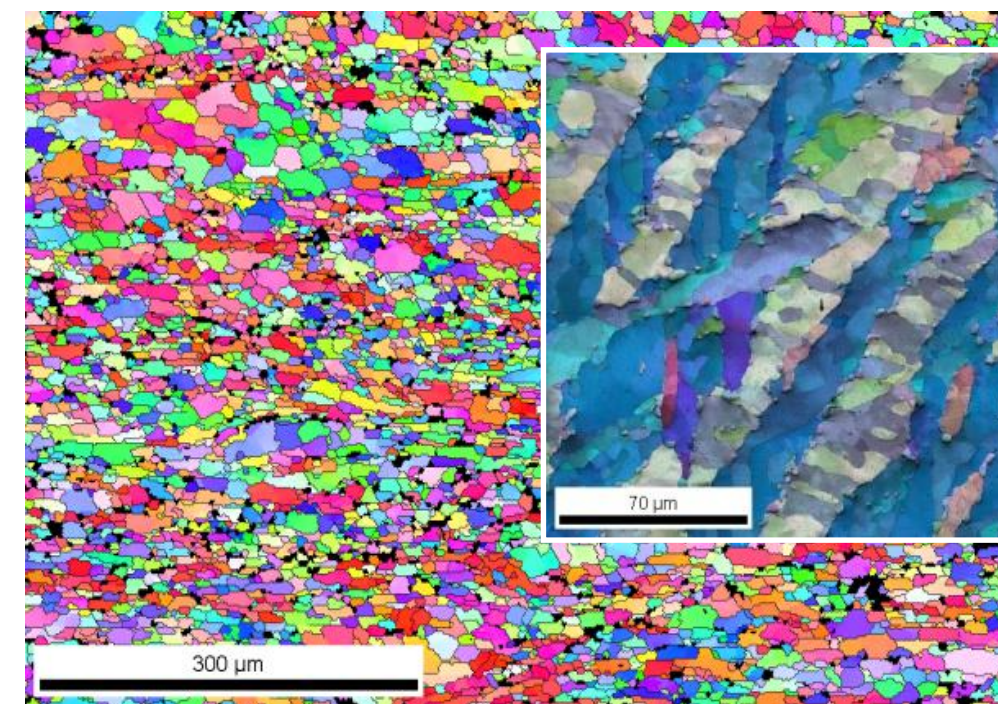
Matériaux partiellement recristallisés



Coquilles



Semi-conducteurs

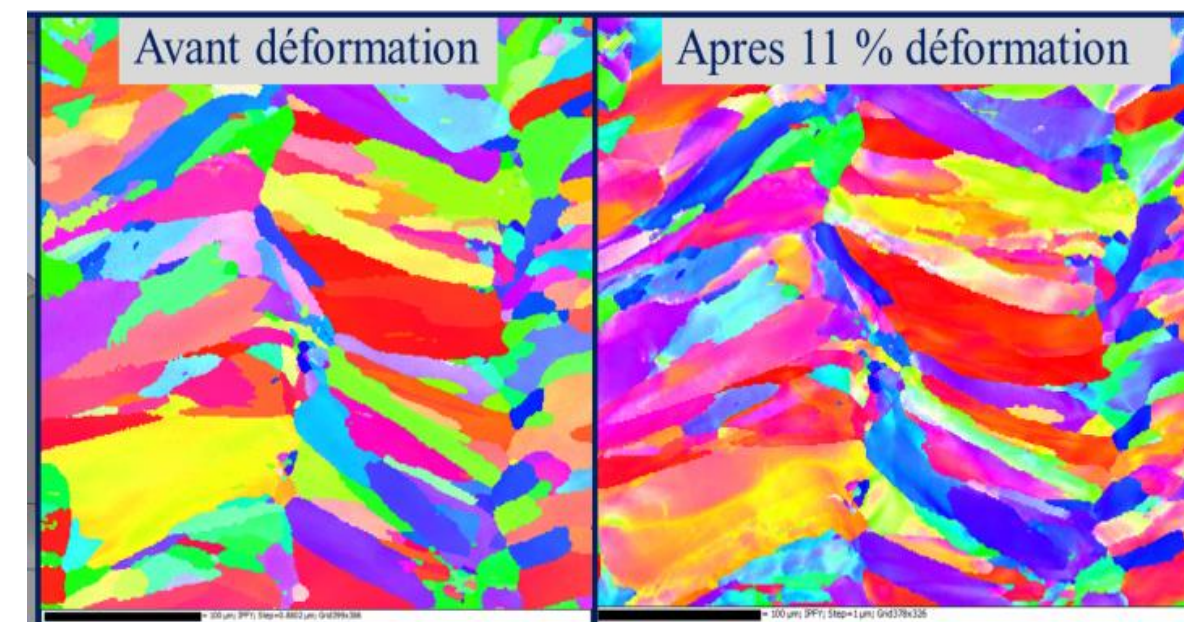


Roches et météorites

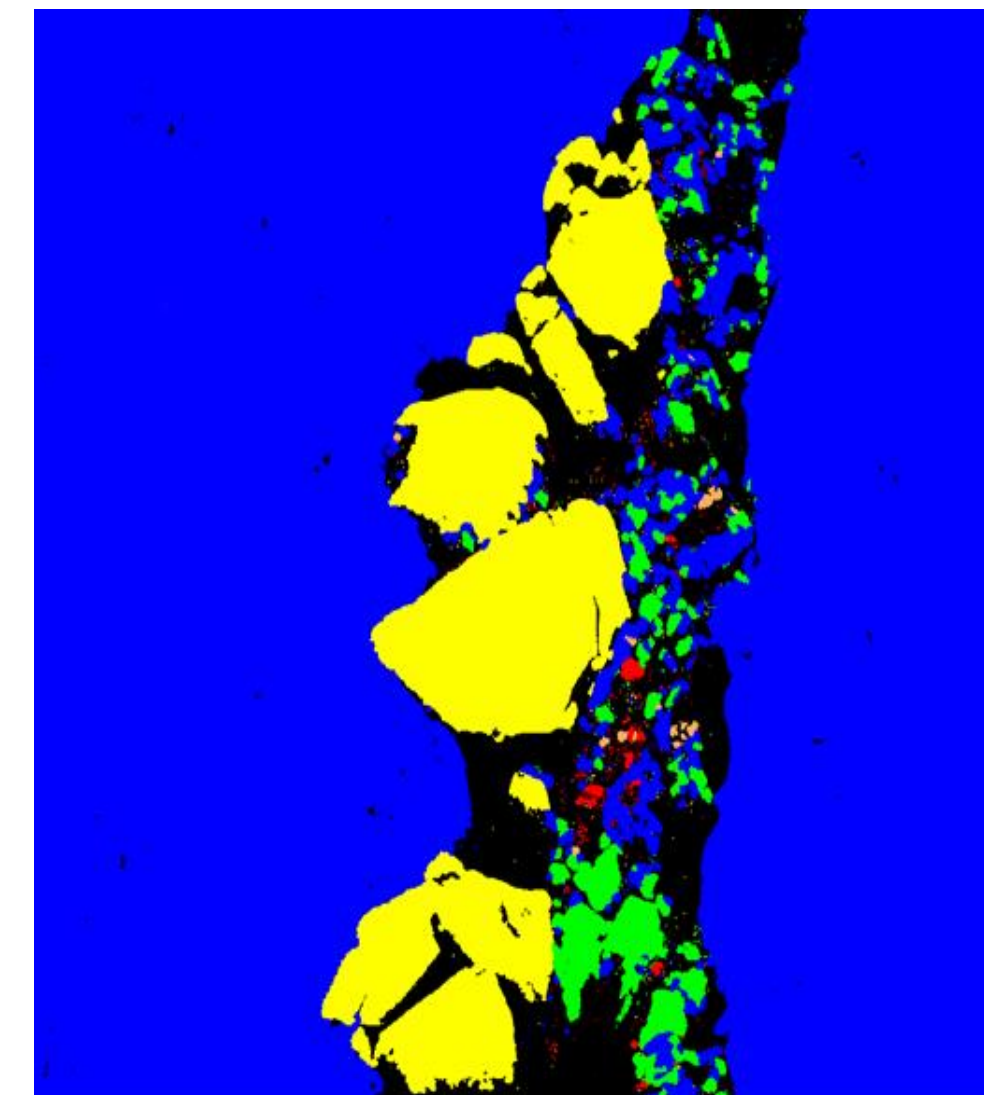


Verres

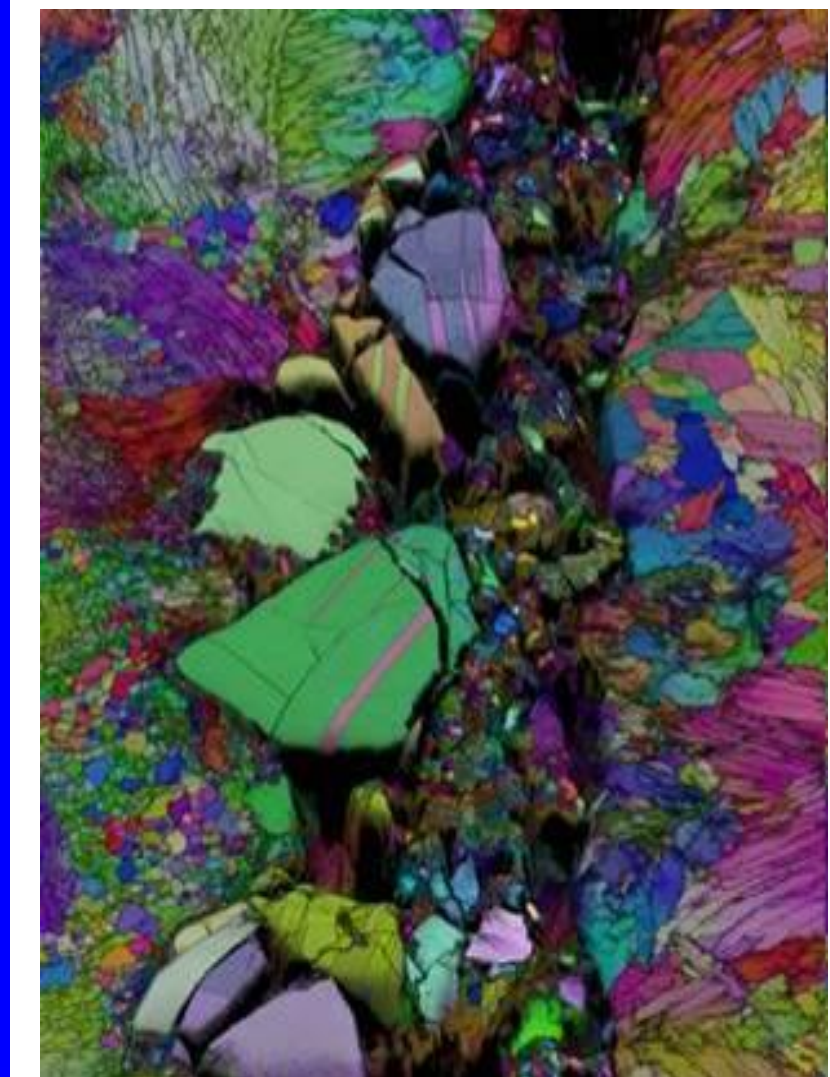
Essais in-situ



un INOX 316L réalisé par Fabrication additive



100.0 μm = 100 steps Phase



Matériaux multiphasés

■ Titanium

■ Alumina

■ Erbium Oxide

■ Monoclinic Zirconium Oxide

■ Tetragonal Zirconium Oxide

François BRISSET:
EBSD : Analyse par diffraction des électrons rétrodiffusées
application et techniques couplées, EDP science 2015



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



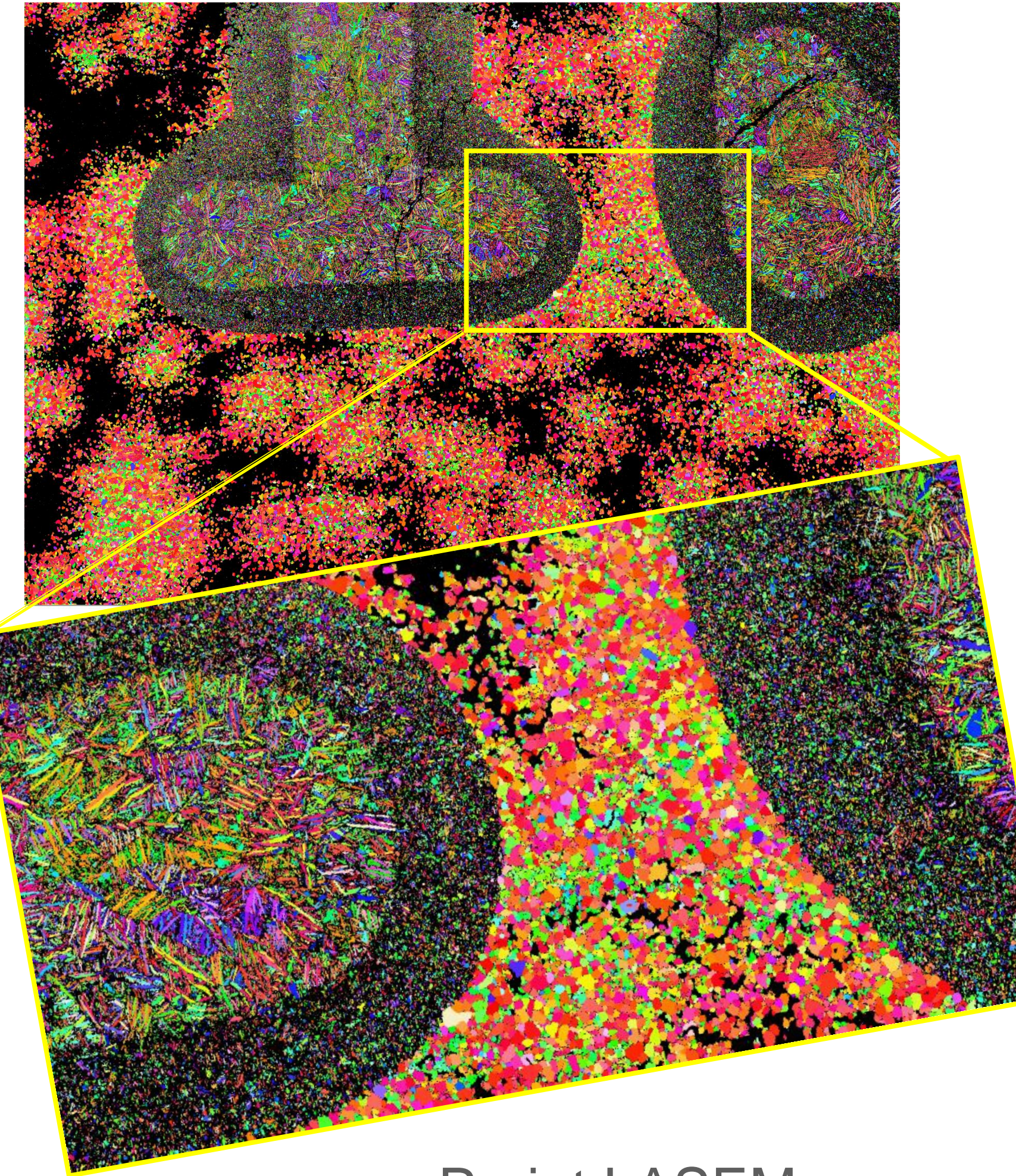
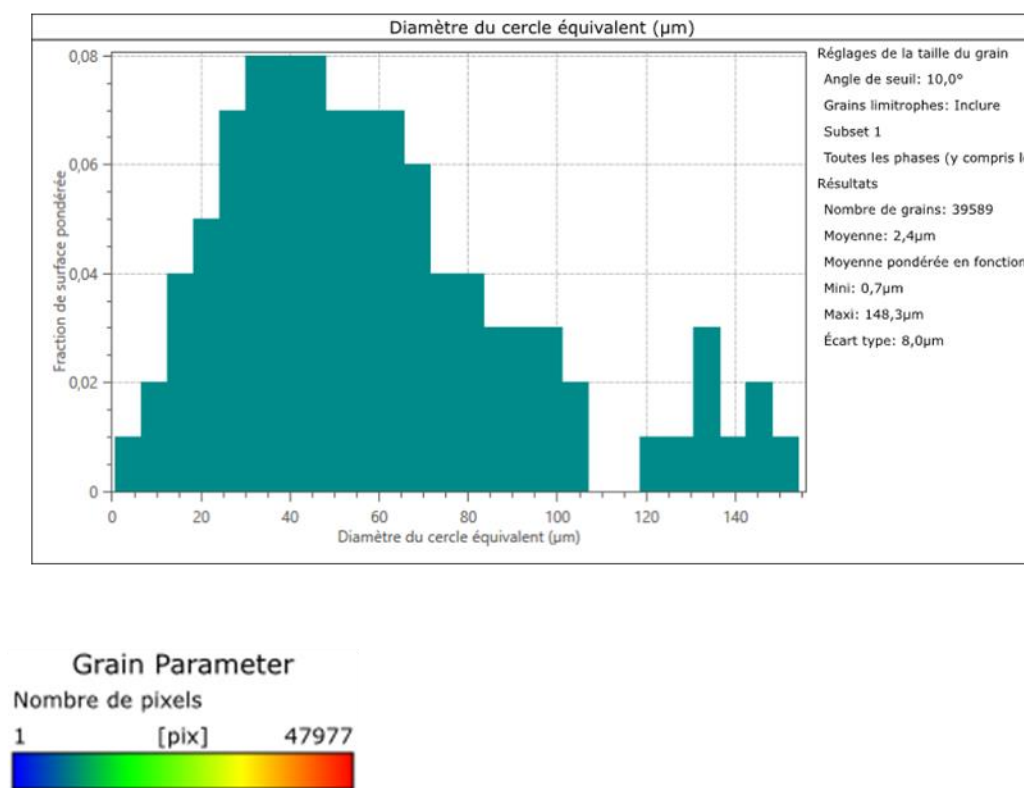
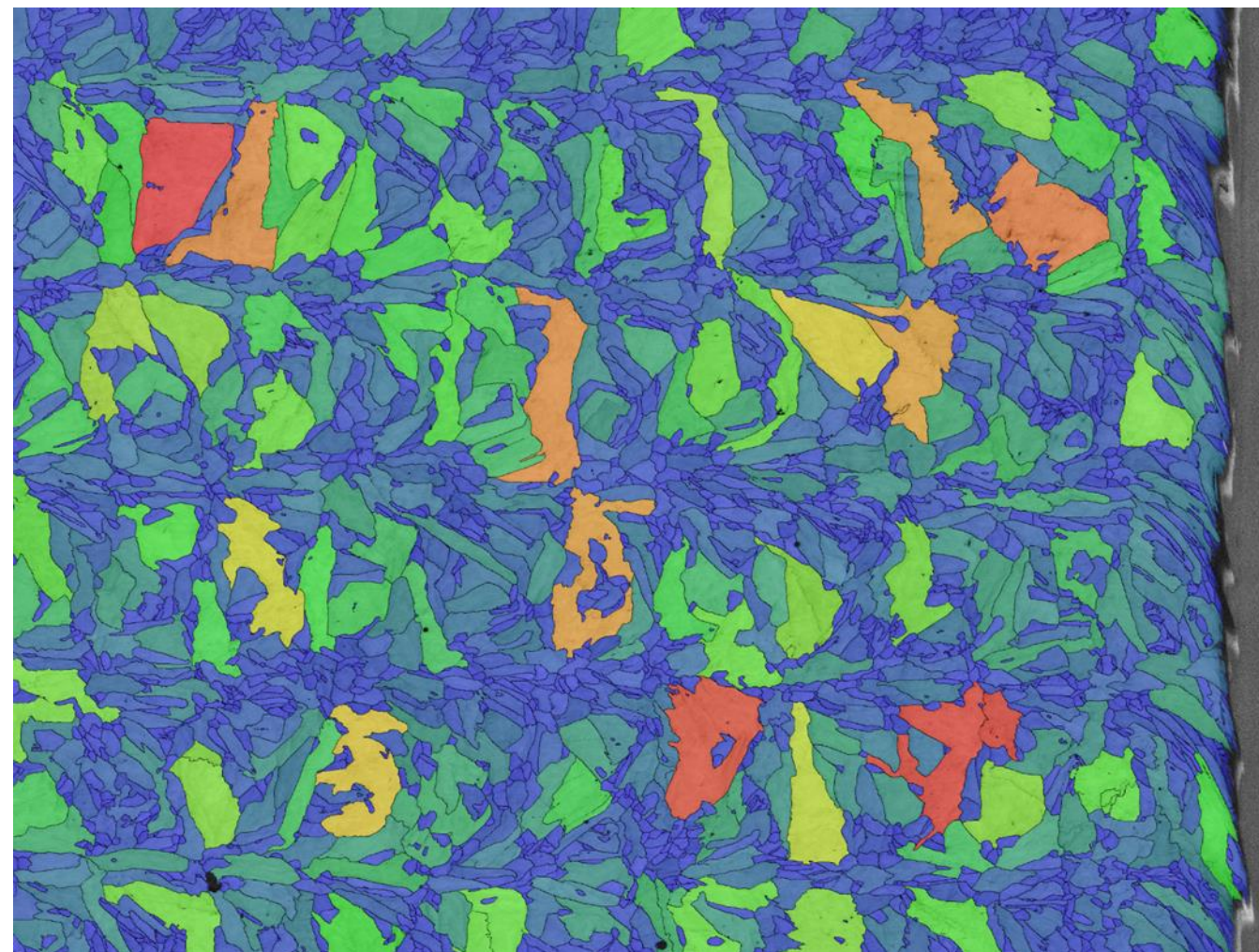
réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

Alexandre TANGUY

Conclusion sur L'EBSD

Outil puissant pour décrire les microstructures cristallines .

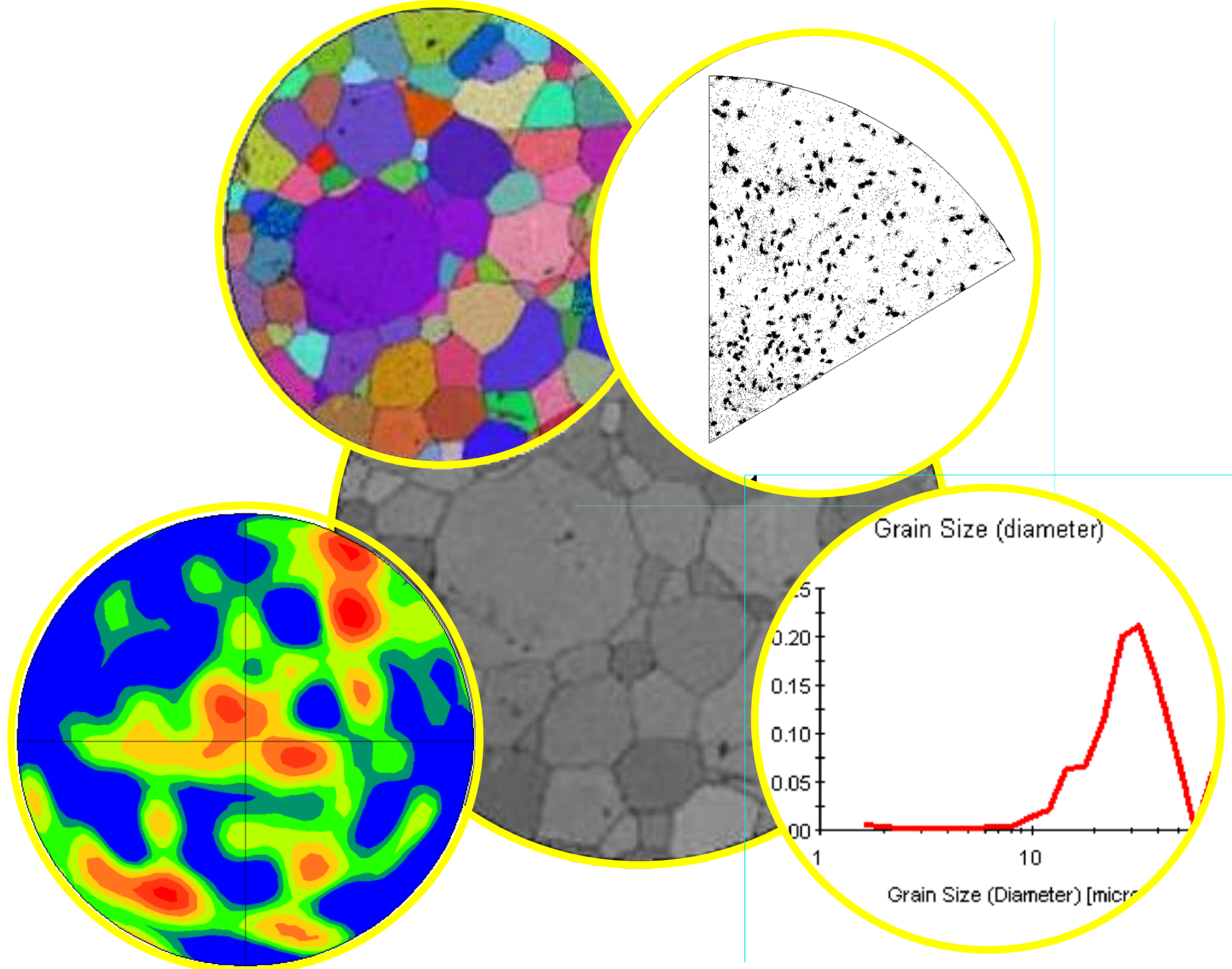
- Taille de grain
- Orientation du cristal
- Désorientation local du cristal
- Caractérisation des joints des grains
- Différentiation des phases cristallographiques
- etc...



Projet LASEM



De multiples autres représentations



cliquez sur l'image pour l'agrandir

2015 * 308 pages

ISBN :

978-2-7598-1912-6

François BRISSET:
EBSD : Analyse par diffraction des électrons rétrodiffusées
application et techniques couplées ,.EDP science 2015



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Cas des Alliages à architecture chimiques. High Entropy Alloy

Comment l'EBSD trouve une limite ?



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

Composition HEA (%) at.

Ni 20%

Fe 20%

Co 20%

Mn 20%

Cr 20%

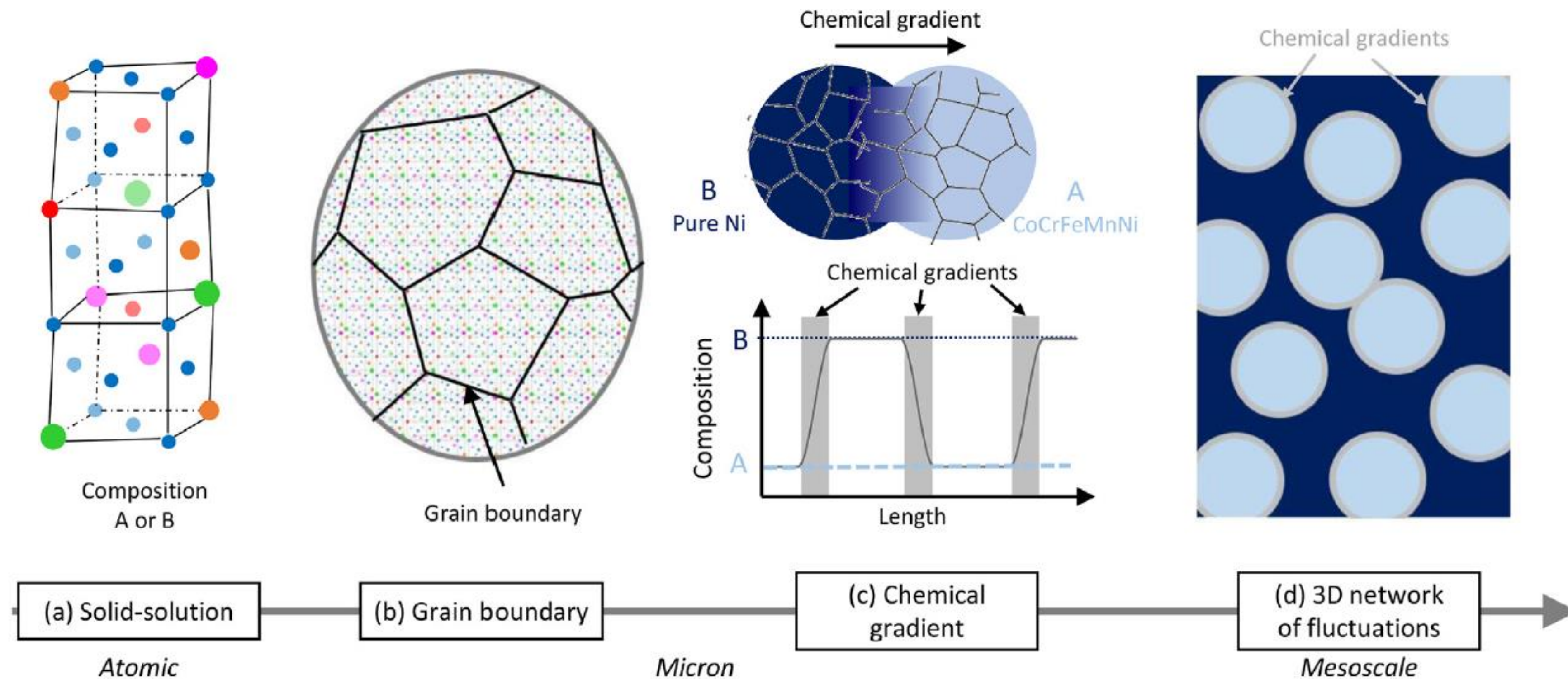


Fig. 1. Scheme of the concept of chemically architected metallic alloys. The microstructure is represented at various length scales.

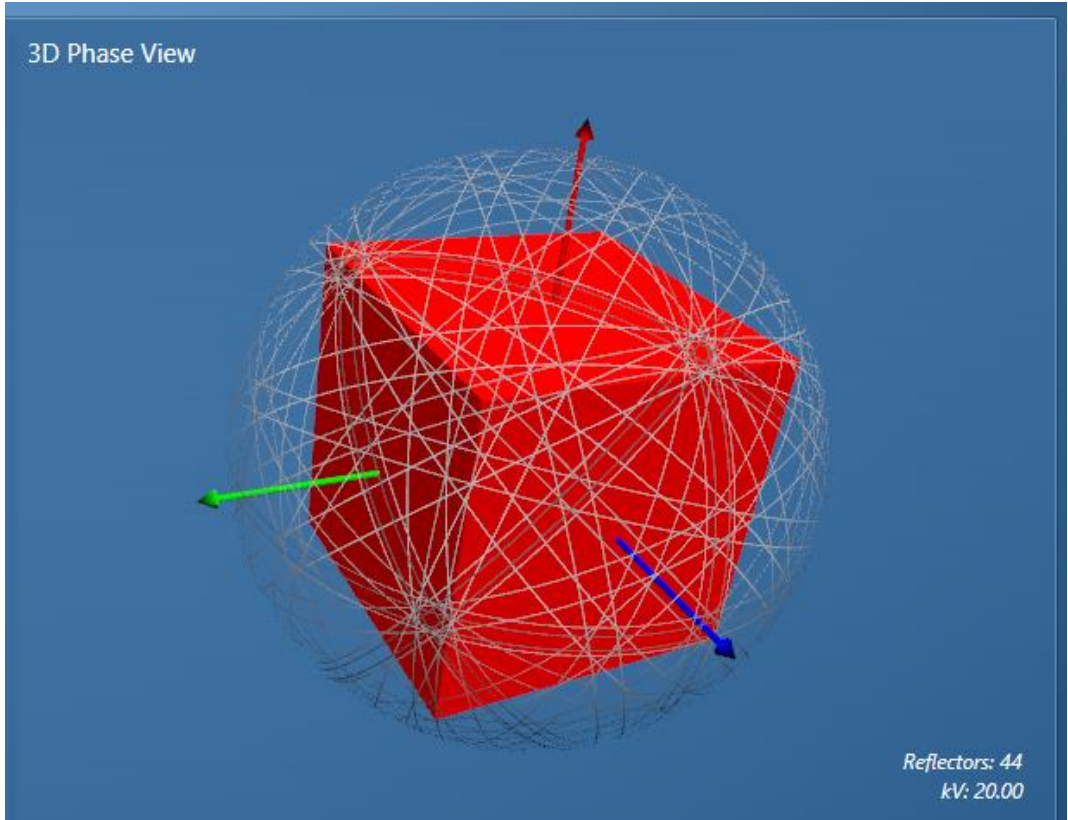
Chemical achitecture of high entropy alloys through powder metallurgy : Mathilde Laurent-Brocd, Diaa Mereib, Glwady's Garcin, Judith Monnier, Loïc Perrière, Benjamin Villeroy, Journal of Alloys and Compounds, 835 (2020) 155279



Paramètres cristallographiques

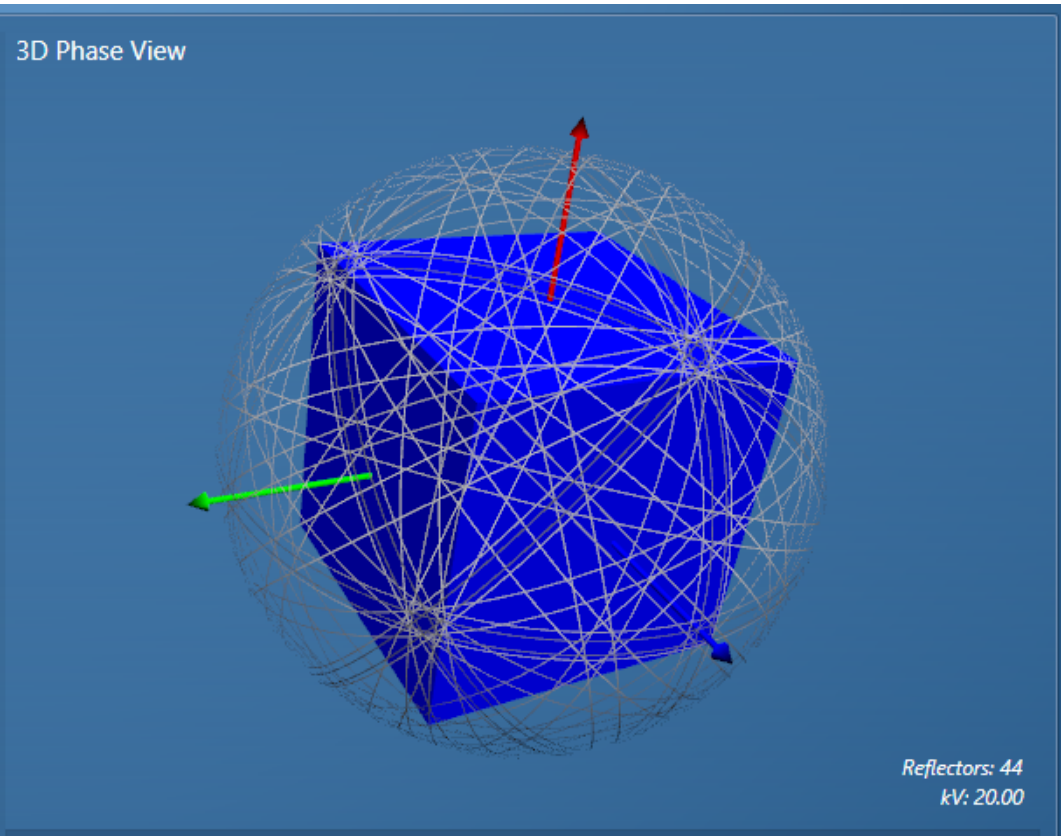
Ni - Matrice

Phase Details		Reflectors
Description		
Name:	Nickel	
Reference:	[NICKEL.CRY]	
Structure		
Crystal System:	Cubic - High	
Laue Group:	11 (m-3m)	
Space Group:	225 (F m -3 m)	
Unit Cell		
a [Å]:	3.5232	
b [Å]:	3.5232	
c [Å]:	3.5232	
Alpha [°]:	90.0	
Beta [°]:	90.0	
Gamma [°]:	90.0	



HEA

Phase Details		Reflectors
Description		
Name:	High entropy alloy	
Reference:	Ni-Co-Cr-Fe-Mn	
Structure		
Crystal System:	Cubic - High	
Laue Group:	11 (m-3m)	
Space Group:	225 (F m -3 m)	
Unit Cell		
a [Å]:	3.5700	
b [Å]:	3.5700	
c [Å]:	3.5700	
Alpha [°]:	90.0	
Beta [°]:	90.0	
Gamma [°]:	90.0	



Différentiations cristallographiques



Phase Details				Reflectors		
#	h	k	l	d [Å]	Intensity	Family
1	1	1	1	2.0341	100.0	1 - {111}
2	1	1	-1	2.0341	100.0	1 - {111}
3	1	-1	1	2.0341	100.0	1 - {111}
4	1	-1	-1	2.0341	100.0	1 - {111}
5	2	0	0	1.7616	77.5	2 - {200}
6	0	2	0	1.7616	77.5	2 - {200}
7	0	0	2	1.7616	77.5	2 - {200}
8	2	2	0	1.2456	39.1	3 - {220}
9	2	0	2	1.2456	39.1	3 - {220}
10	2	0	-2	1.2456	39.1	3 - {220}
11	2	-2	0	1.2456	39.1	3 - {220}
12	0	2	2	1.2456	39.1	3 - {220}
13	0	2	-2	1.2456	39.1	3 - {220}
14	3	1	1	1.0623	27.4	4 - {311}
15	3	1	-1	1.0623	27.4	4 - {311}
16	3	-1	1	1.0623	27.4	4 - {311}
17	3	-1	-1	1.0623	27.4	4 - {311}

Phase Details				Reflectors		
#	h	k	l	d [Å]	Intensity	Family
1	1	1	1	2.0611	100.0	1 - {111}
2	1	1	-1	2.0611	100.0	1 - {111}
3	1	-1	1	2.0611	100.0	1 - {111}
4	1	-1	-1	2.0611	100.0	1 - {111}
5	2	0	0	1.7850	77.6	2 - {200}
6	0	2	0	1.7850	77.6	2 - {200}
7	0	0	2	1.7850	77.6	2 - {200}
8	2	2	0	1.2622	39.4	3 - {220}
9	2	0	2	1.2622	39.4	3 - {220}
10	2	0	-2	1.2622	39.4	3 - {220}
11	2	-2	0	1.2622	39.4	3 - {220}
12	0	2	2	1.2622	39.4	3 - {220}
13	0	2	-2	1.2622	39.4	3 - {220}
14	3	1	1	1.0764	27.7	4 - {311}
15	3	1	-1	1.0764	27.7	4 - {311}
16	3	-1	1	1.0764	27.7	4 - {311}
17	3	-1	-1	1.0764	27.7	4 - {311}

Différence au 1/100 d'angström : l'EBSD en indexation classique ne distinguera pas les deux phases !?



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

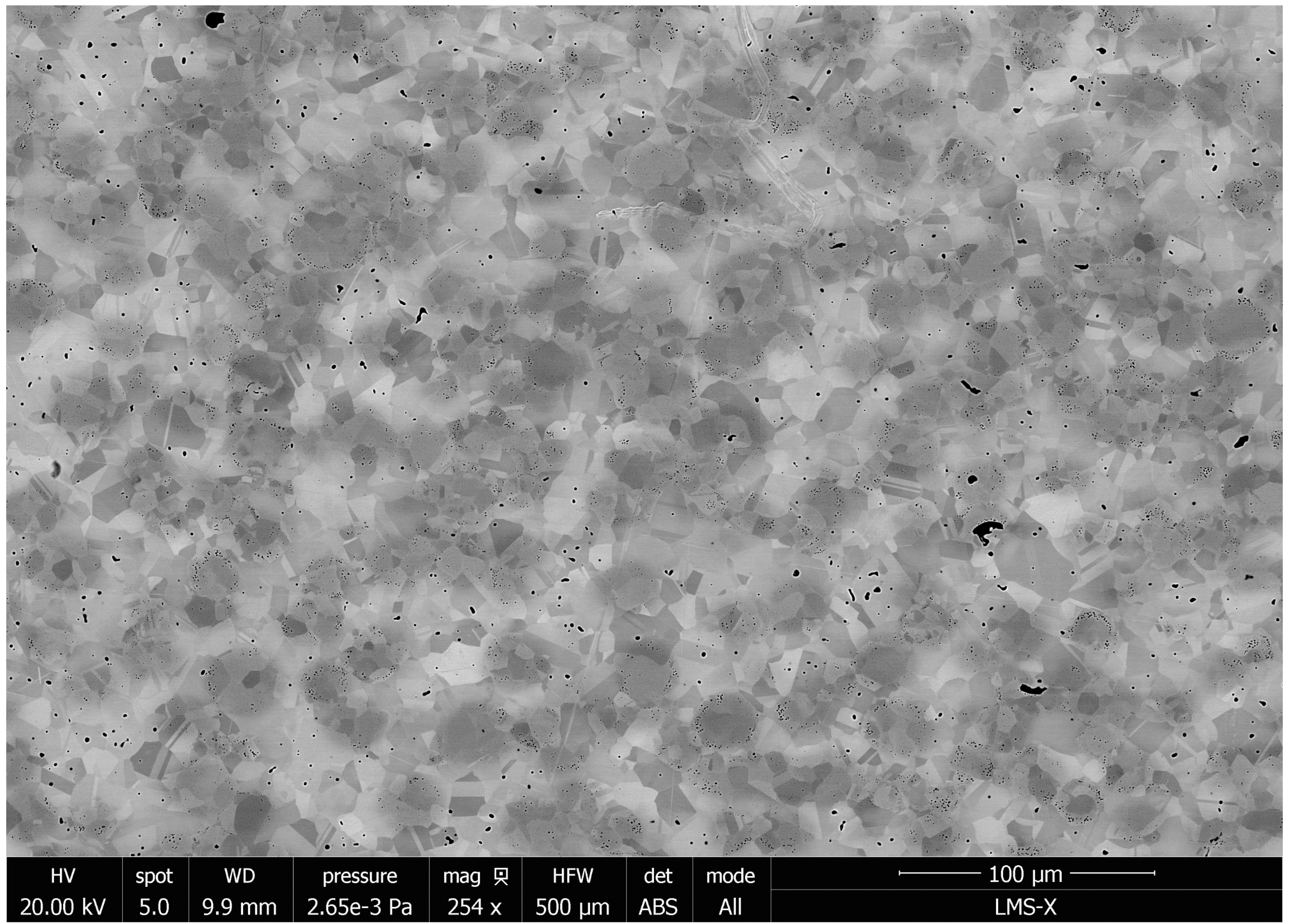
En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

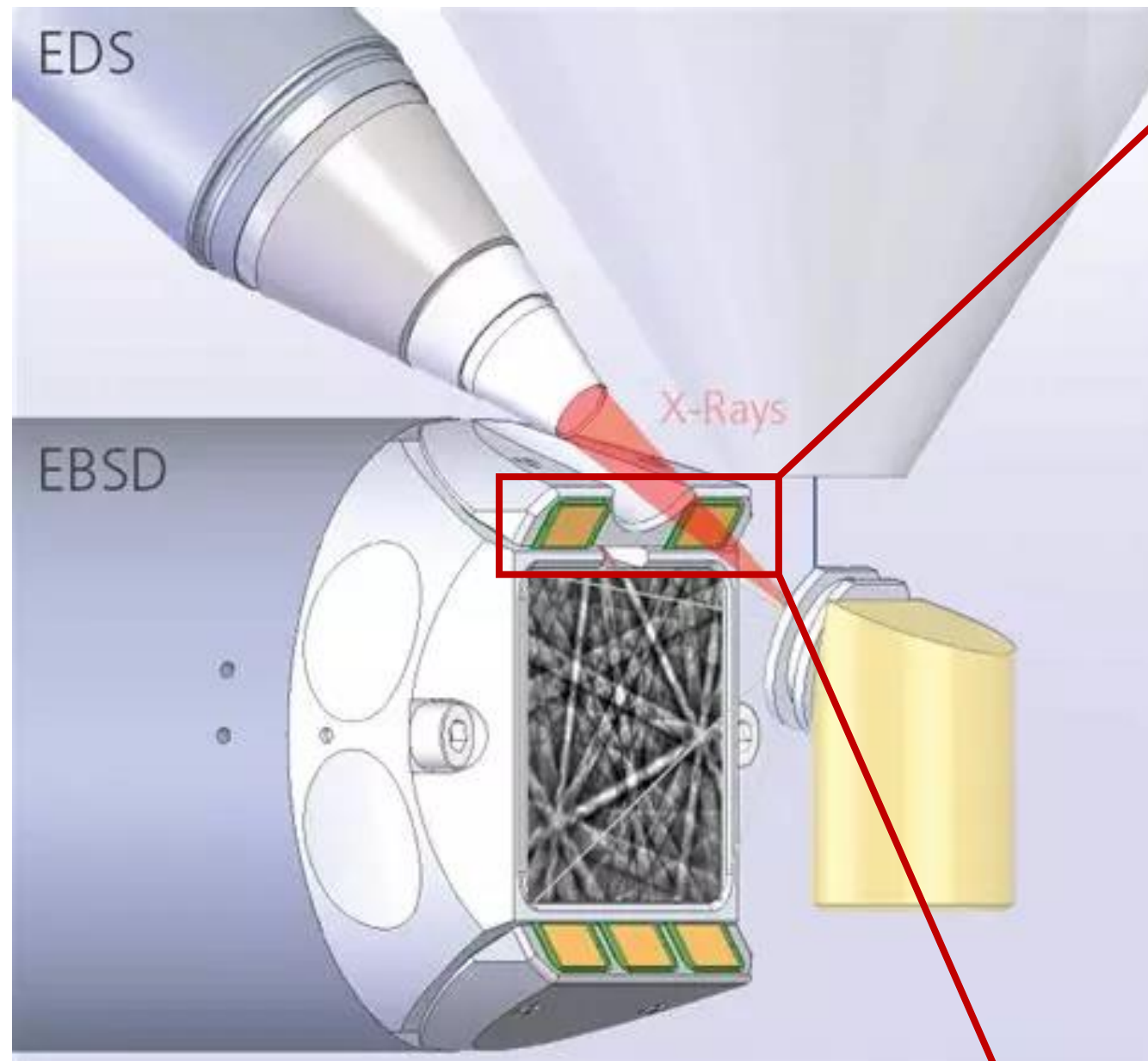


Imagerie BSE du matériau



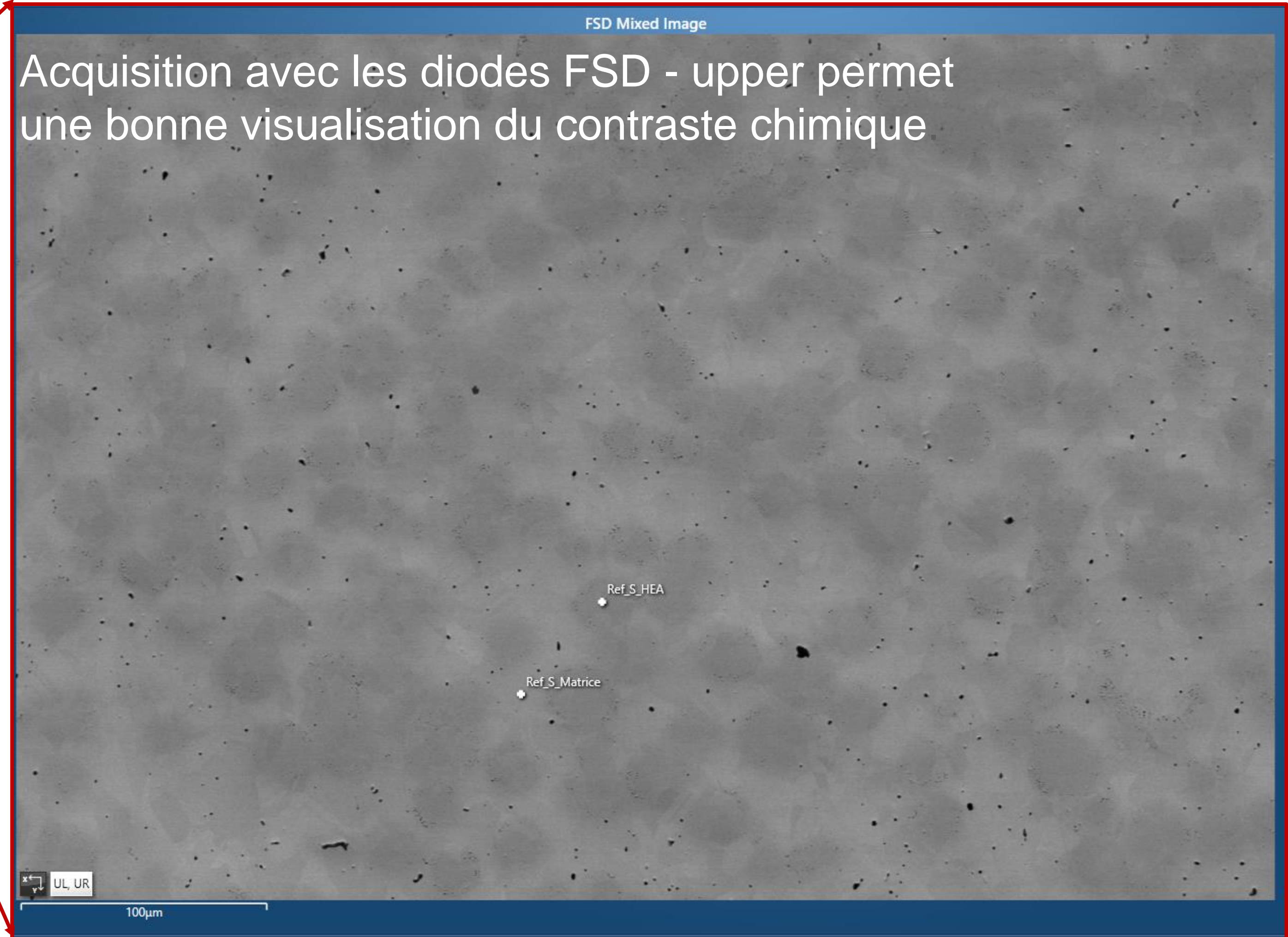
Microstructure complexe :
Contraste chimique
Contraste cristallin

Mise en condition EBSD + EDS.



<https://www.ebsd.com/>

Acquisition avec les diodes FSD - upper permet une bonne visualisation du contraste chimique



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

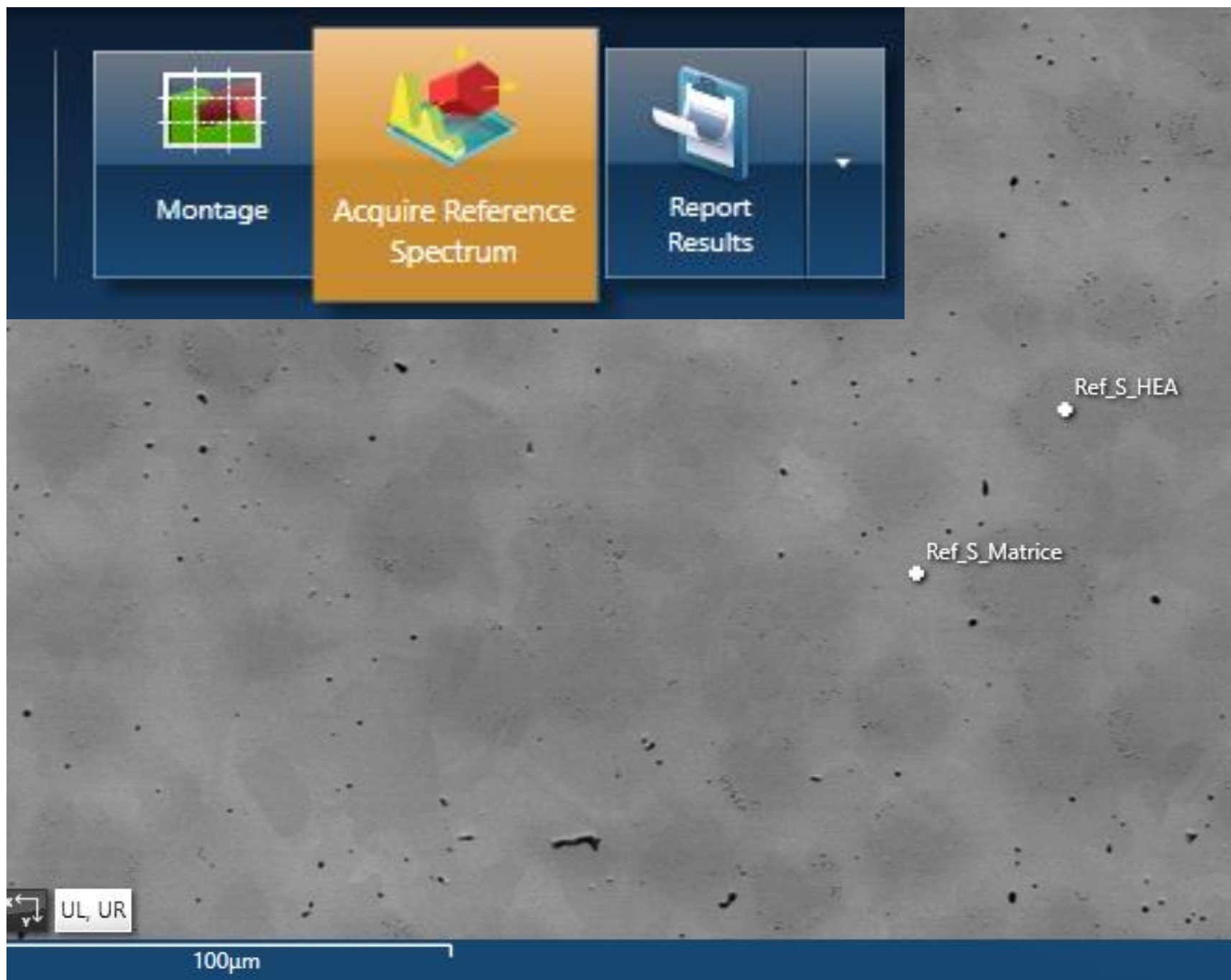
En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Acquisition des spectres de références



Ref_S_Matrice		Ref_S_HEA	
Source:	Acquired	Source:	Acquired
Created:	11/02/2020 16:41:45	Created:	11/02/2020 16:35:03
Livetime:	13.6s	Livetime:	17.2s
Process Time:	1	Process Time:	1
Accelerating Voltage:	20.00kV	Accelerating Voltage:	20.00kV
Magnification:	254 x	Magnification:	254 x
Working Distance:	9.7mm	Working Distance:	9.7mm
Stage X:	1.251mm	Stage X:	1.251mm
Stage Y:	12.8mm	Stage Y:	12.8mm
Stage Z:	38.0mm	Stage Z:	38.0mm
Stage Tilt:	69.00°	Stage Tilt:	69.00°
Specimen Tilt (degrees):	69.00	Specimen Tilt (degrees):	69.00
Stage Rotate:	-179.4°	Stage Rotate:	-179.4°
Elevation (degrees):	35.0	Elevation (degrees):	35.0
Azimuth (degrees):	0.0	Azimuth (degrees):	0.0
Number Of Channels:	2048	Number Of Channels:	2048
Energy Range (keV):	20 keV	Energy Range (keV):	20 keV
Energy per Channel (eV):	10.0eV	Energy per Channel (eV):	10.0eV
Detector Type:	x-act	Detector Type:	x-act
Detector Type Id:	26	Detector Type Id:	26
Window Type:	SATW	Window Type:	SATW
Spectrum Area (counts):	615553	Spectrum Area (counts):	618571
Spectrum Count Rate (cps):	39911.6	Spectrum Count Rate (cps):	32572.5
Pulse Pile Up Correction:	Succeeded	Pulse Pile Up Correction:	Succeeded
Primary Detector:	X-Act	Primary Detector:	X-Act
Primary Detector Serial Number:	66095	Primary Detector Serial Number:	66095



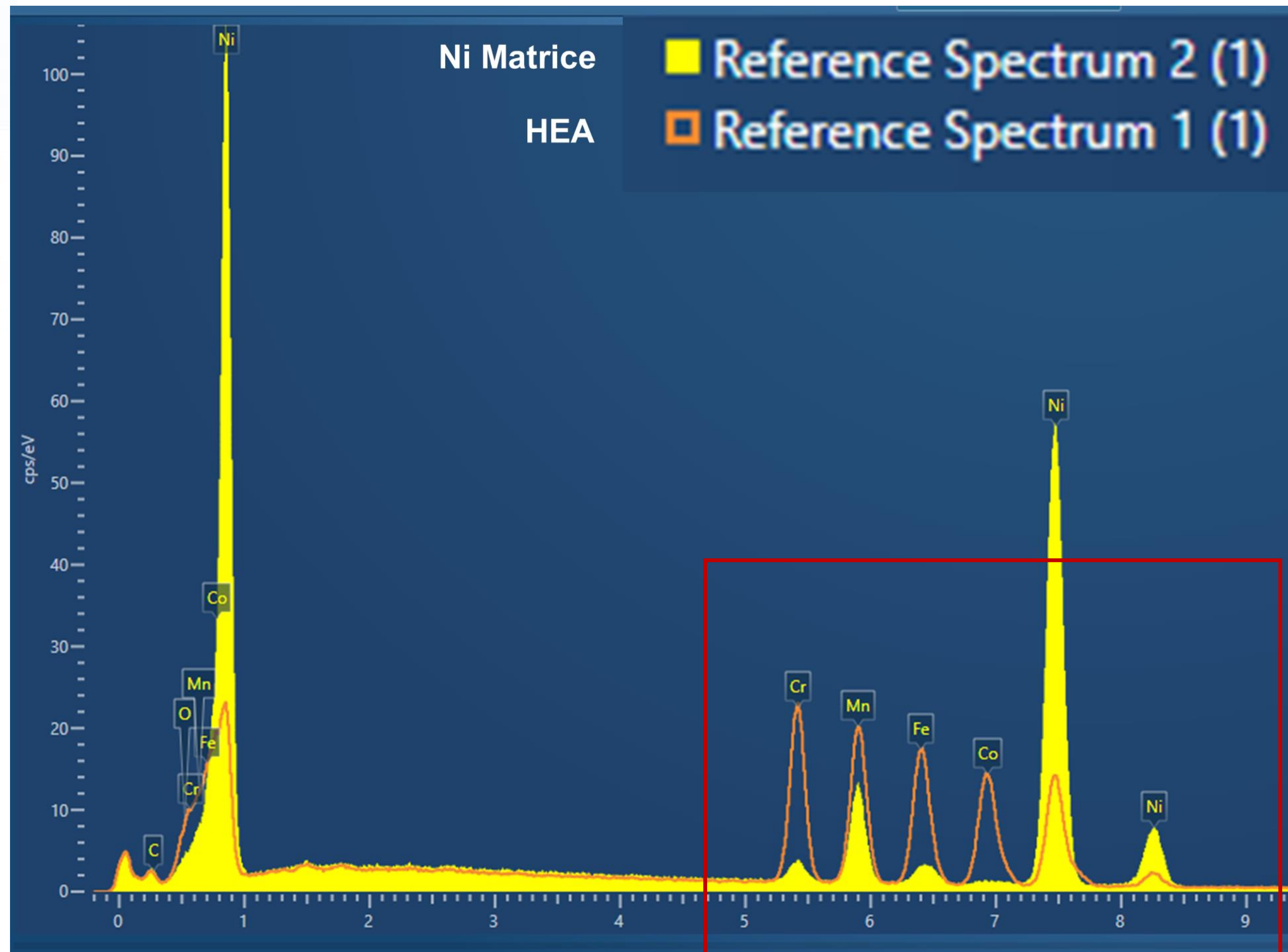
GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

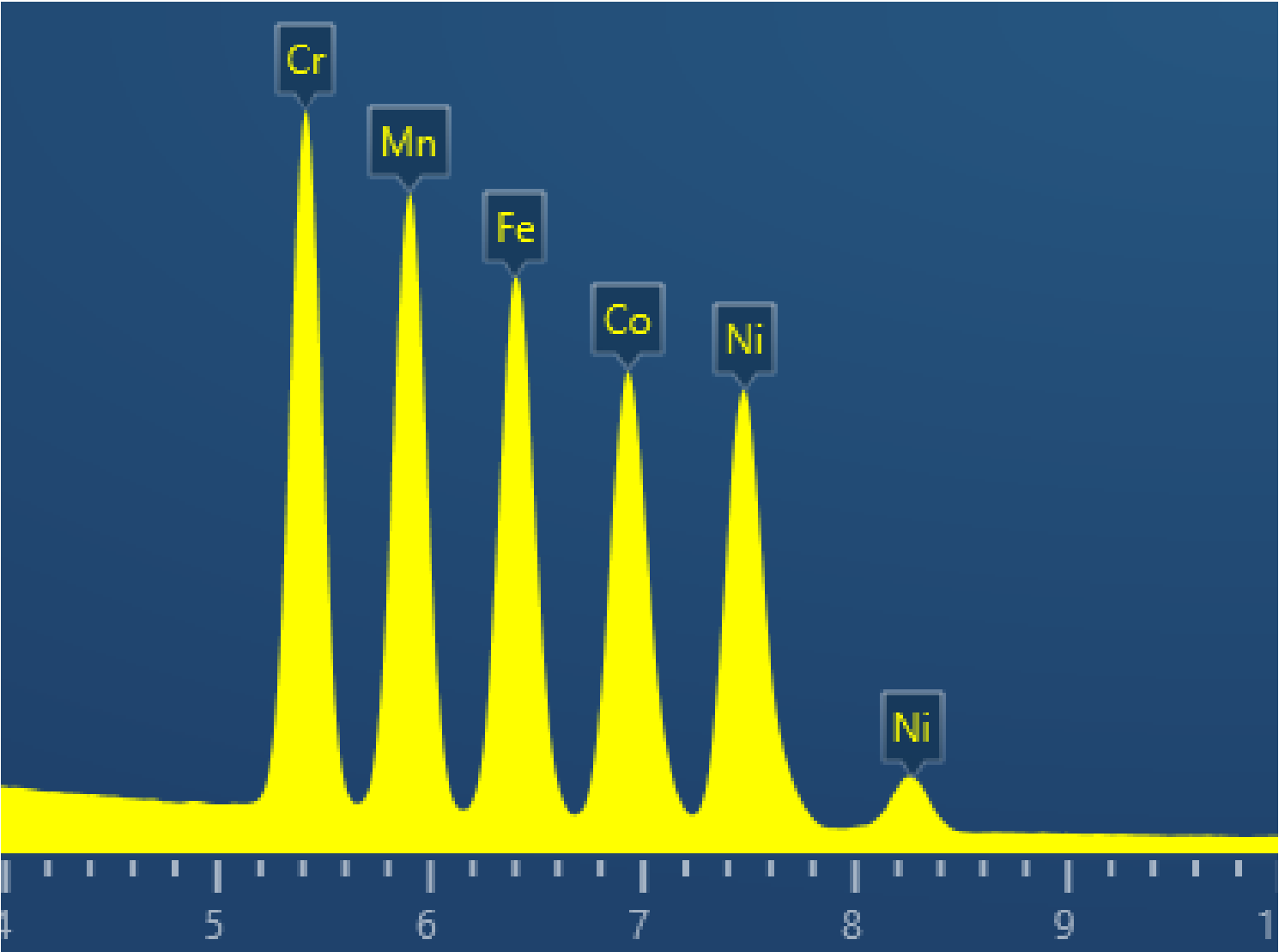
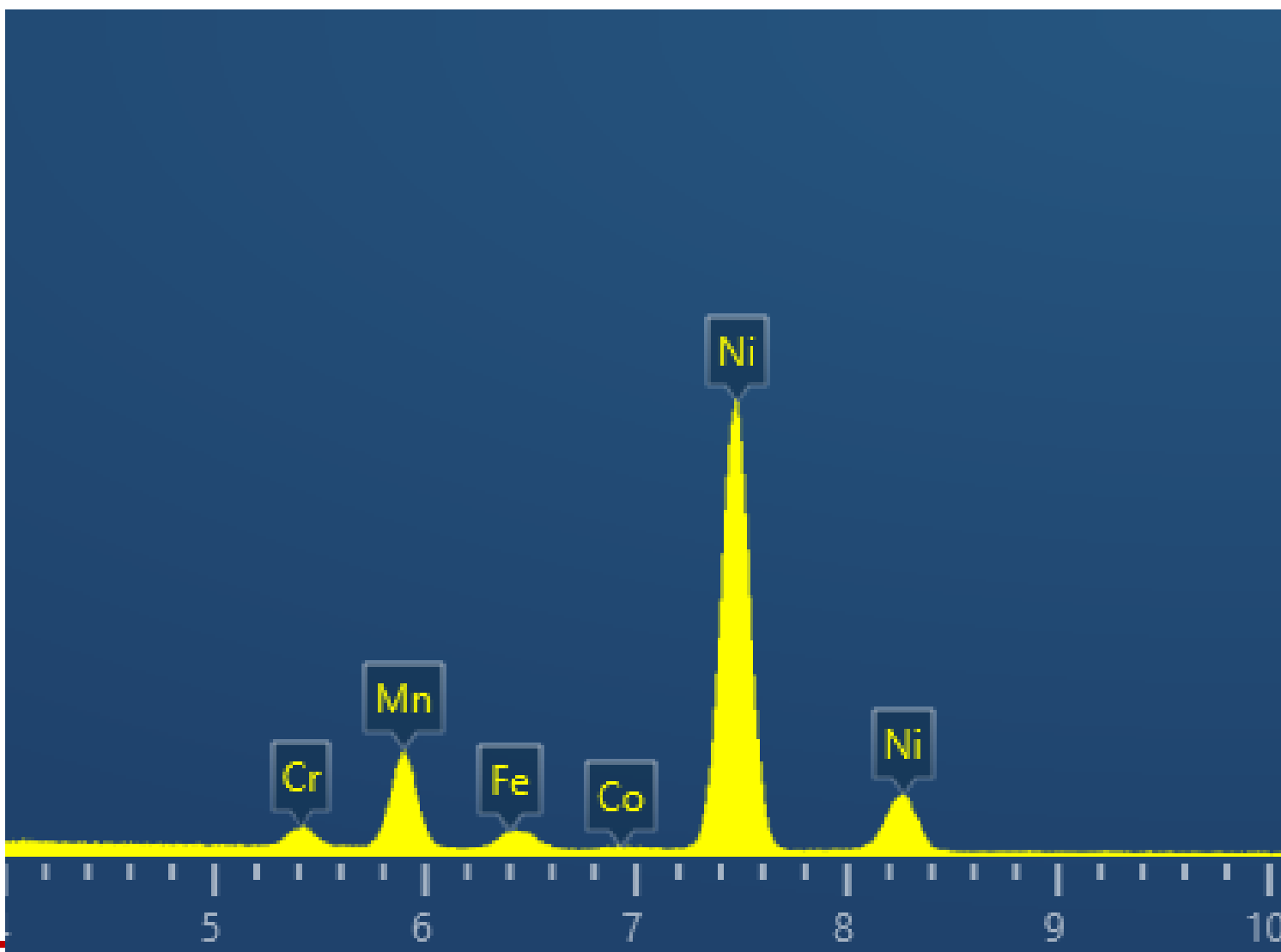
Résultat de l'acquisition des spectres de références.



- Bonne différenciation entre :
- Ni matrice
 - HEA



Différentiation des phases par un critère chimique.



Ni - Matrice

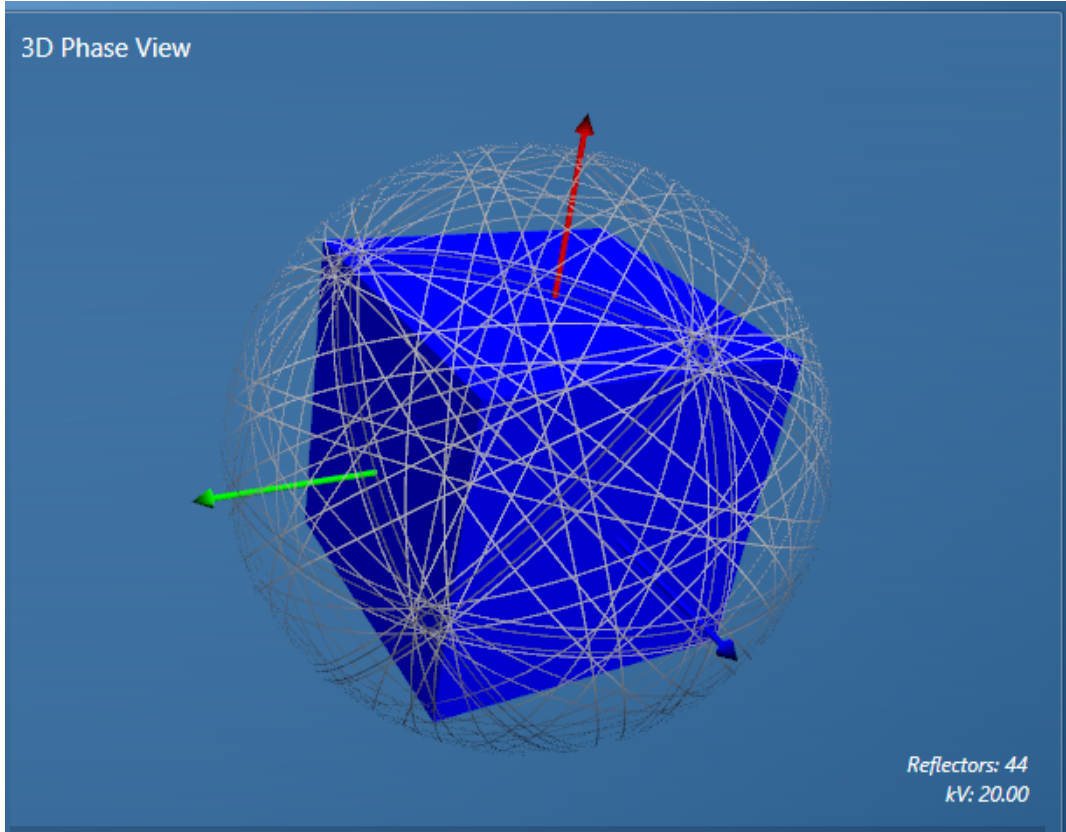
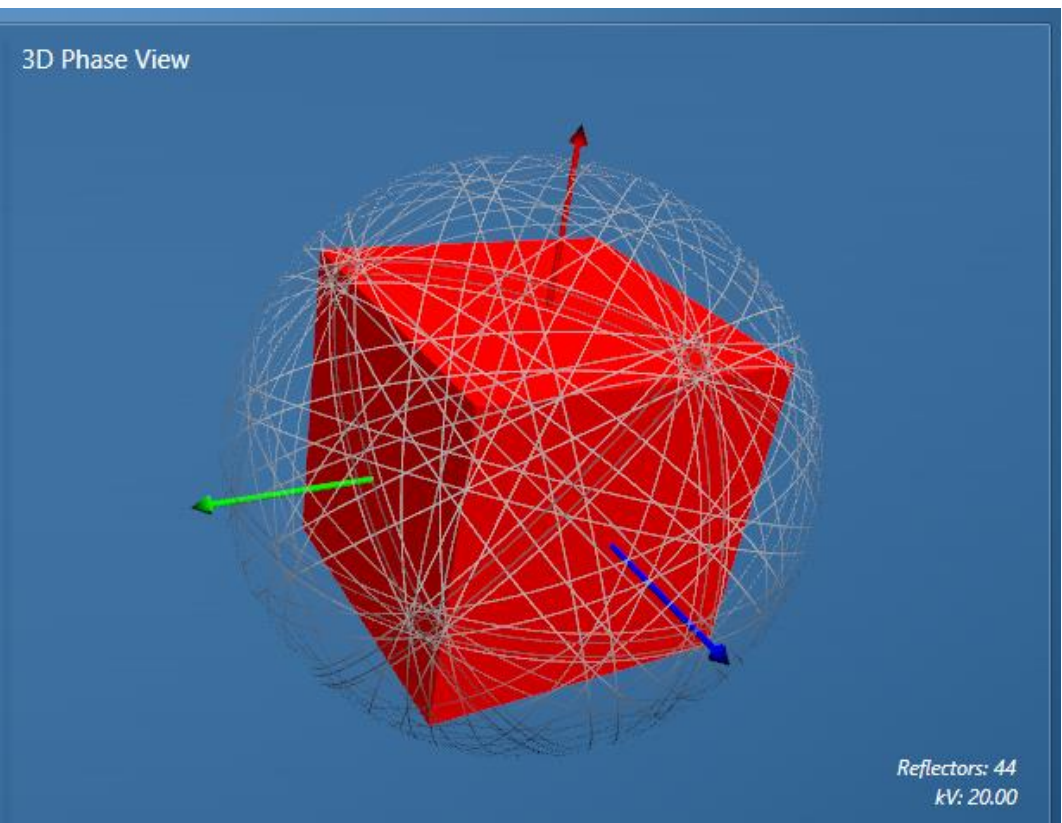
HEA

Unit Cell

a [Å]:	3.5232
b [Å]:	3.5232
c [Å]:	3.5232
Alpha [°]:	90.0
Beta [°]:	90.0
Gamma [°]:	90.0

Unit Cell

a [Å]:	3.5700
b [Å]:	3.5700
c [Å]:	3.5700
Alpha [°]:	90.0
Beta [°]:	90.0
Gamma [°]:	90.0



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

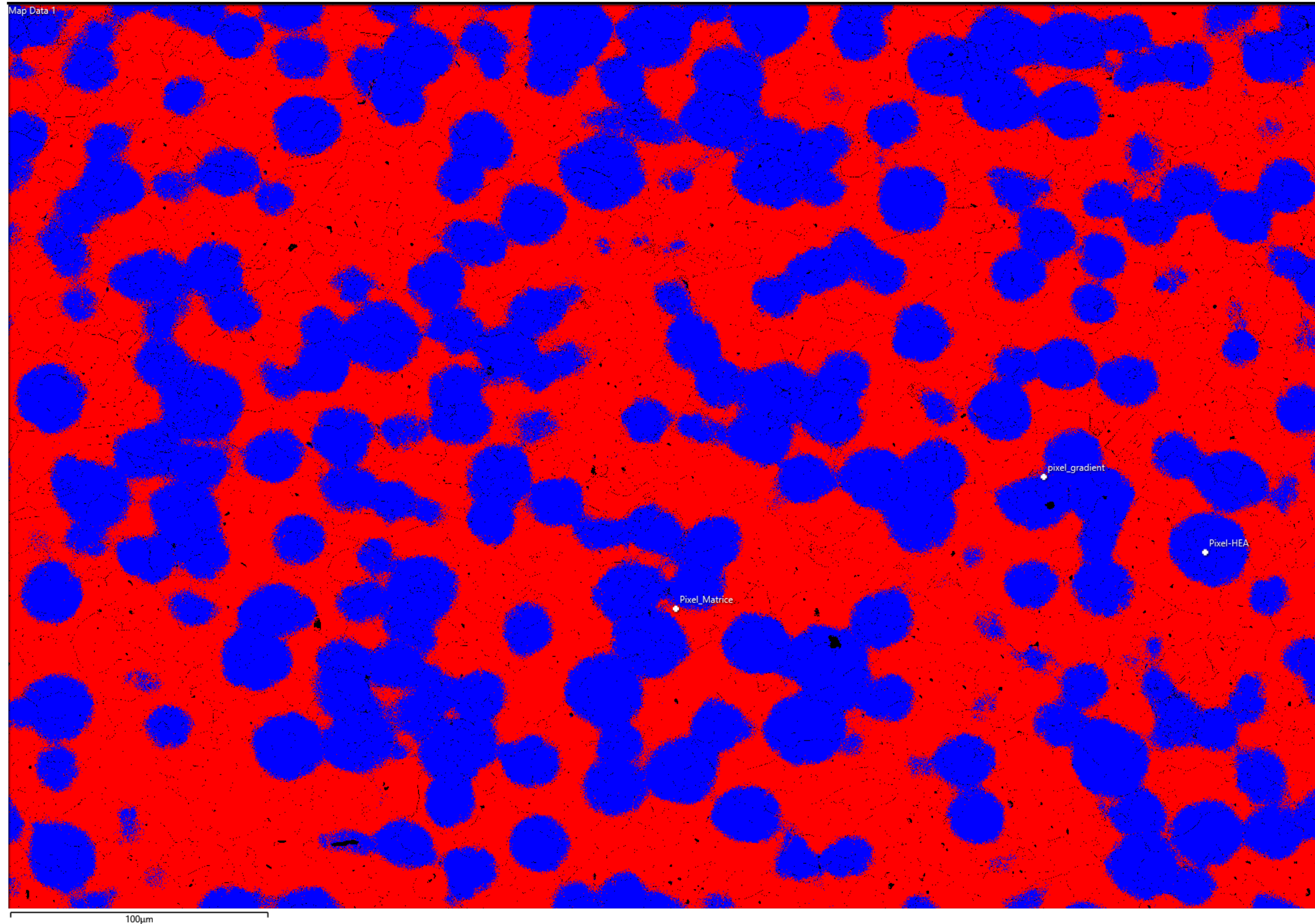


Acquisition en cours ...



...suspense...

Résultat de la cartographie.



Paramètres d'acquisitions :

Taille 500 x 350 µm

Pas de 0,3 µm

Définition 1666x1166 1942556.

Fréquence 230 Hz

Temps d'exposition 4,3 ms

2 heure 20 min d'acquisition

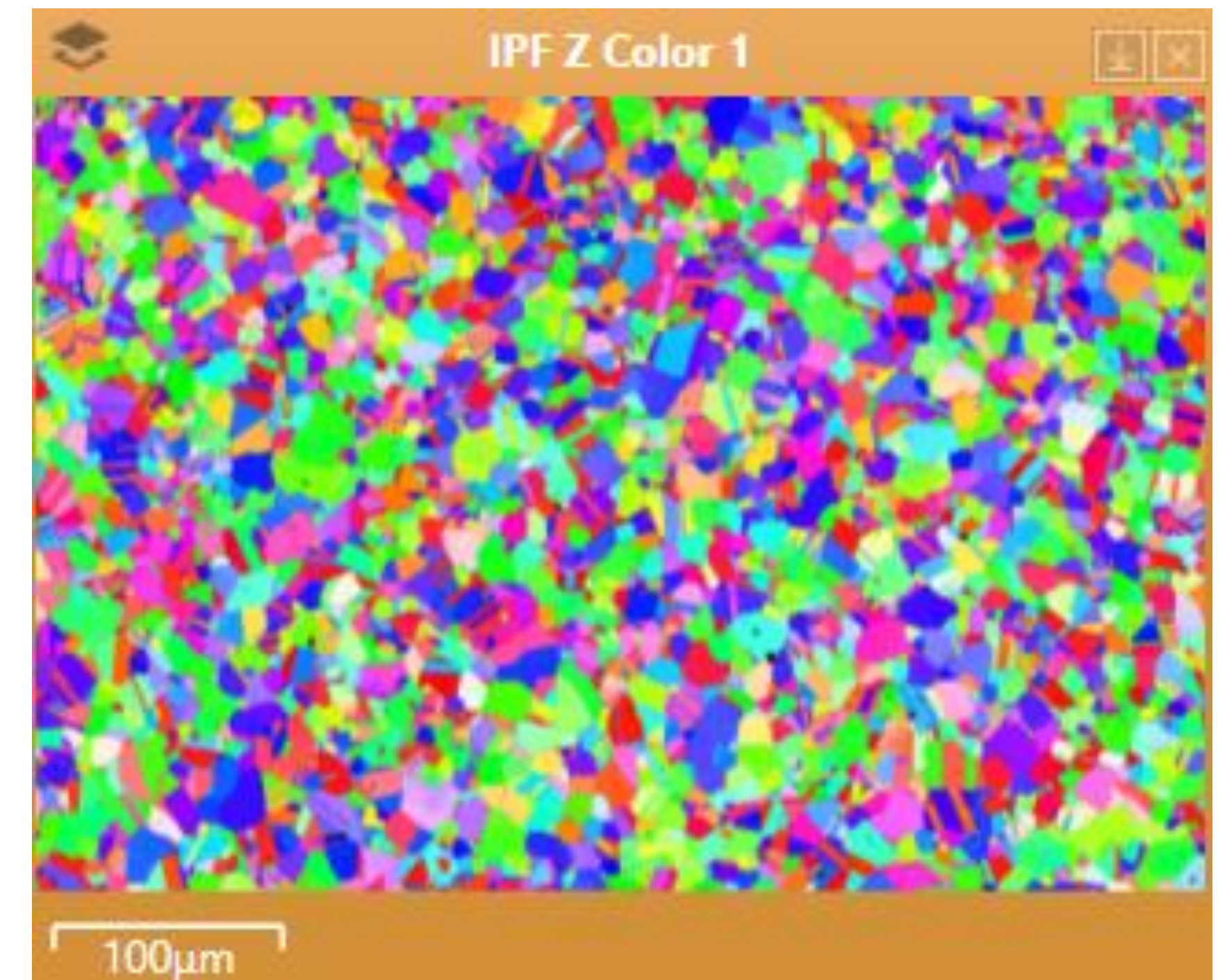
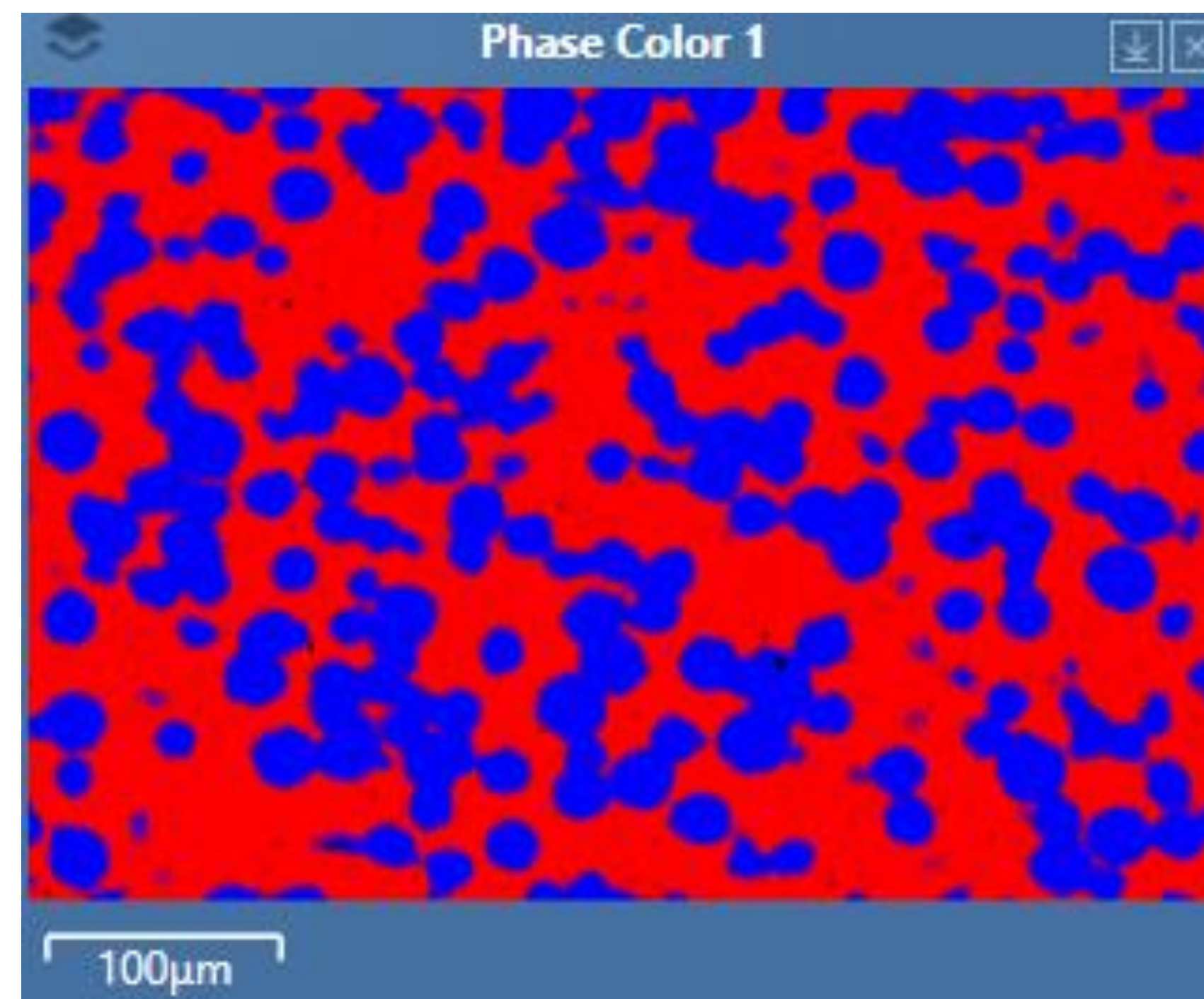
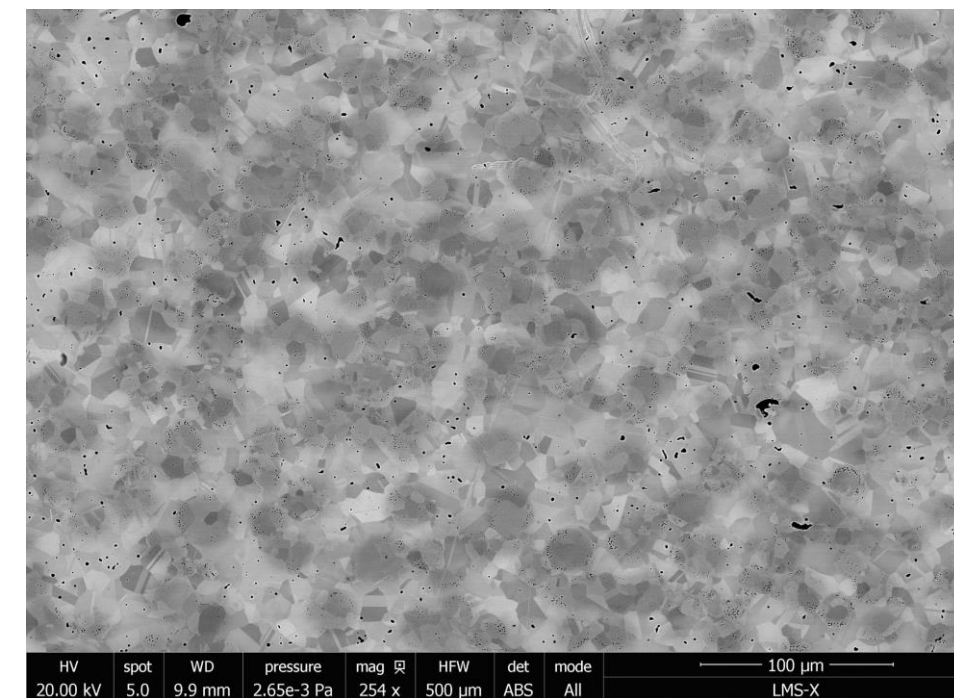
En chaque point :

- Une phase identifiée à l'aide l'EDS.
- Une orientation cristallographique





Résultat de la cartographie.



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

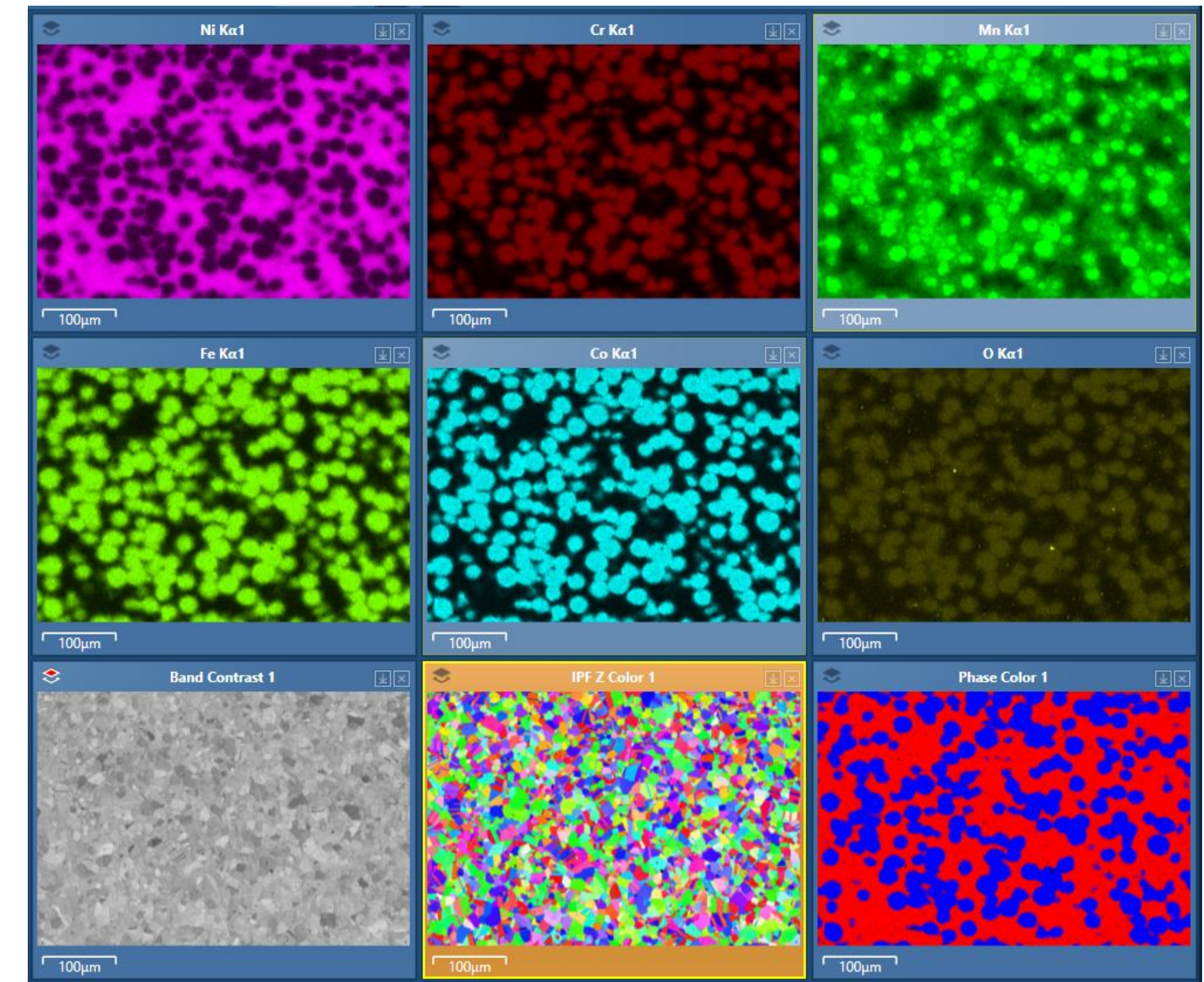
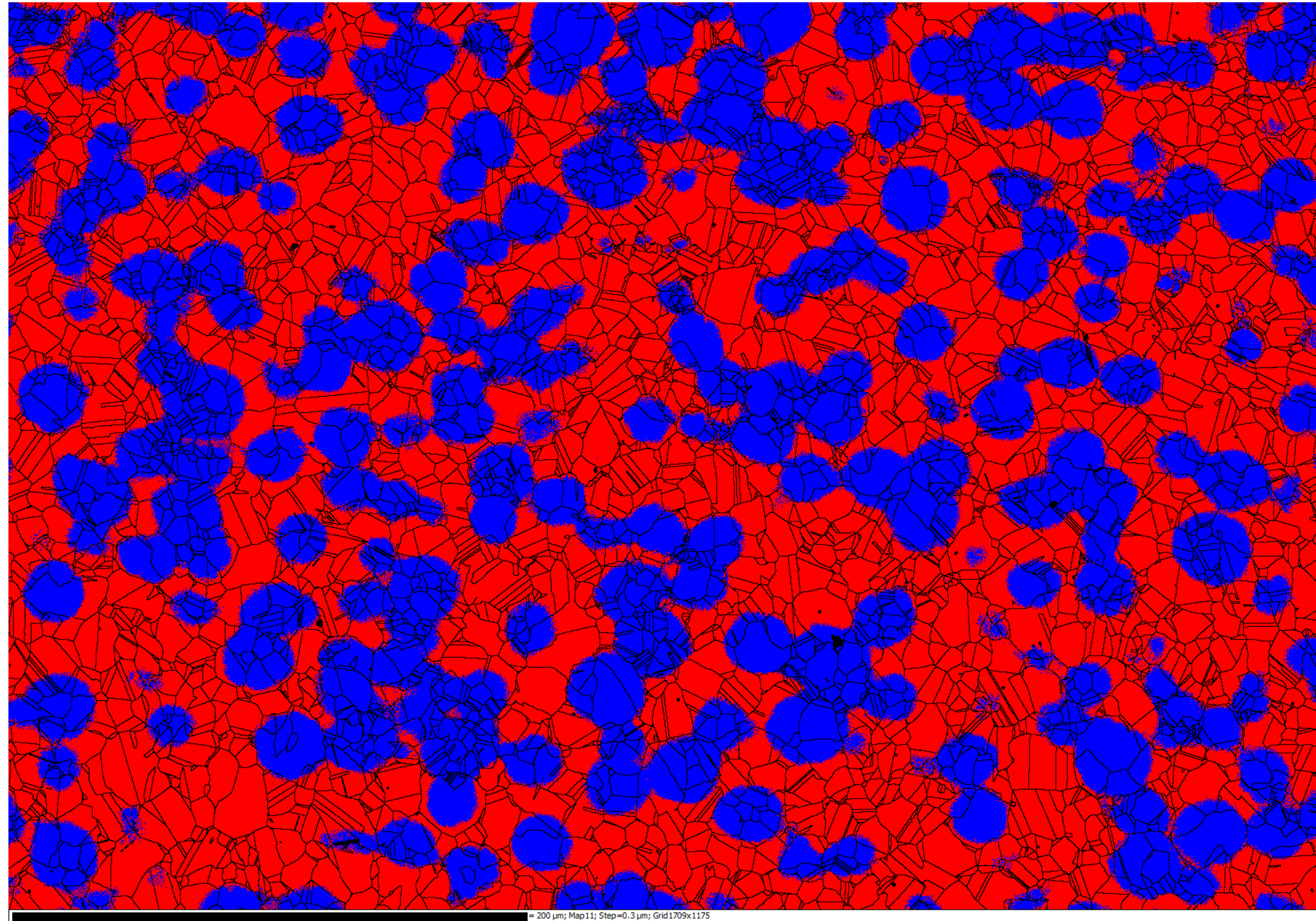
En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Résultat de la cartographie.



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Imagerie corrélative

Comment identifier la contribution des phases sur comportement mécanique ?



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

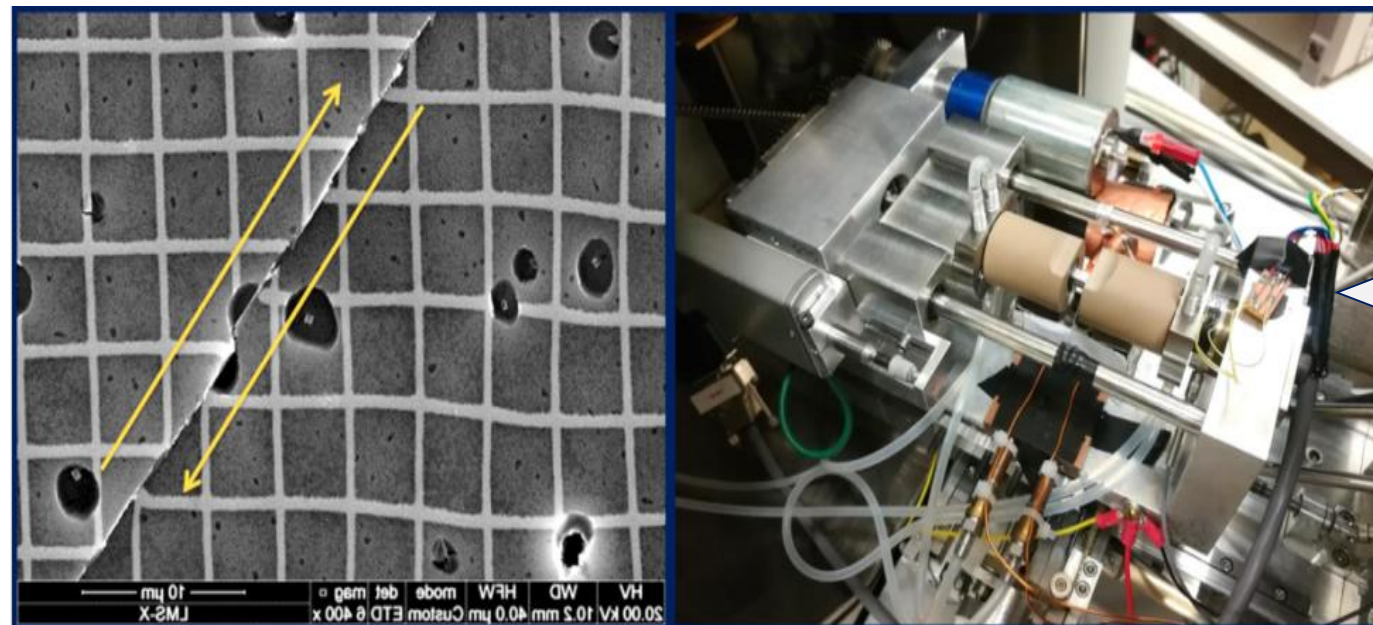
En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Savoir faire du LMS.



In-situ

Mots clefs

MEB environnemental

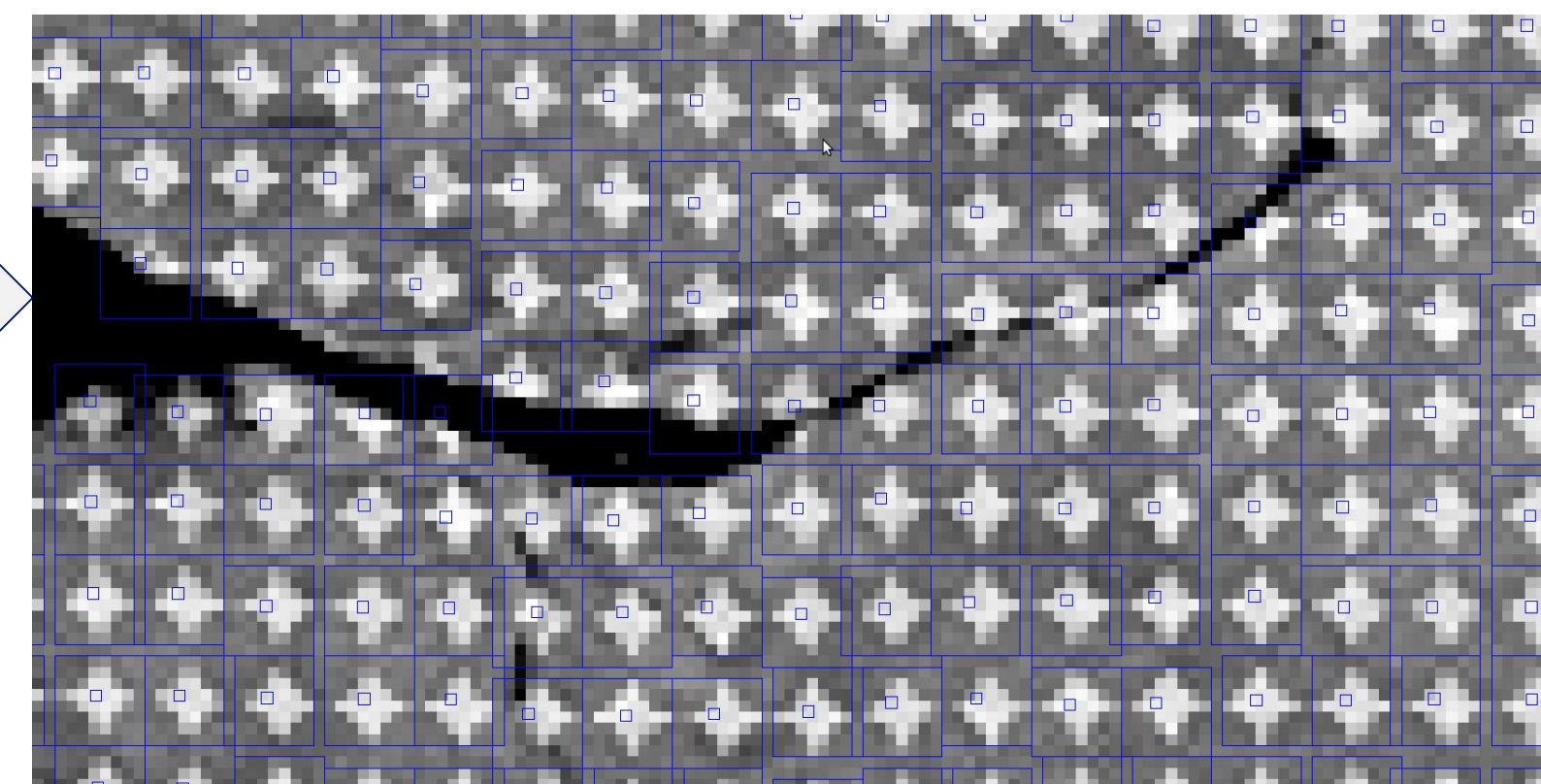
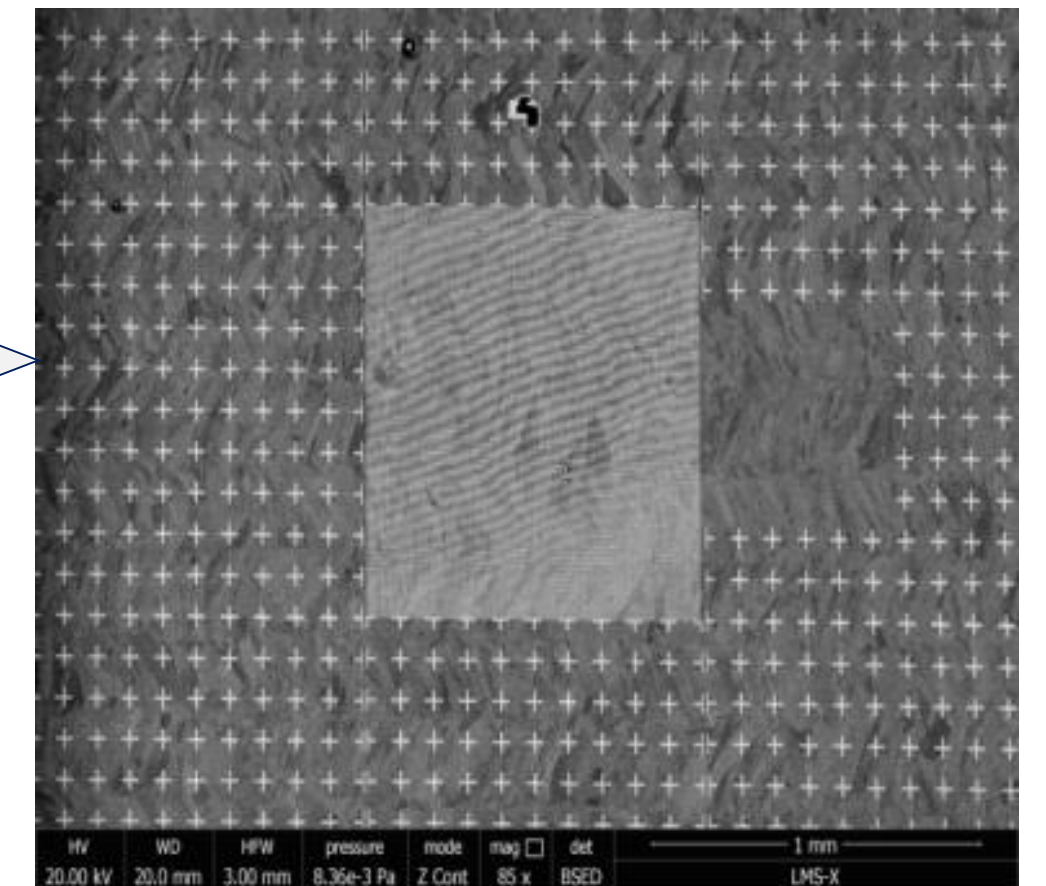
Caractérisations chimique
et cristallographique

Marquage de surface multi
échelle

Mécanique in-situ
environnementale

Corrélation d'images
numériques

Lithographie



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique

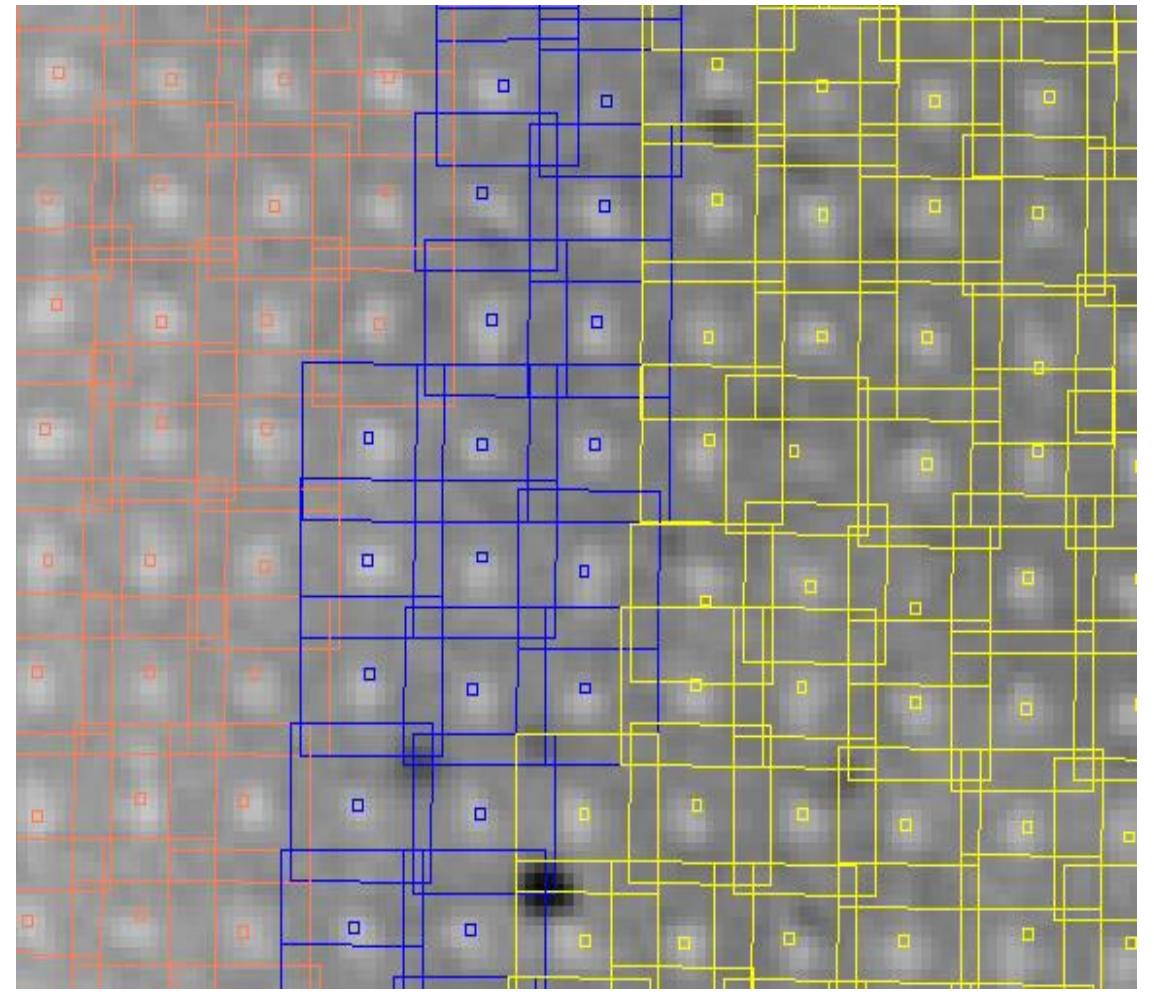
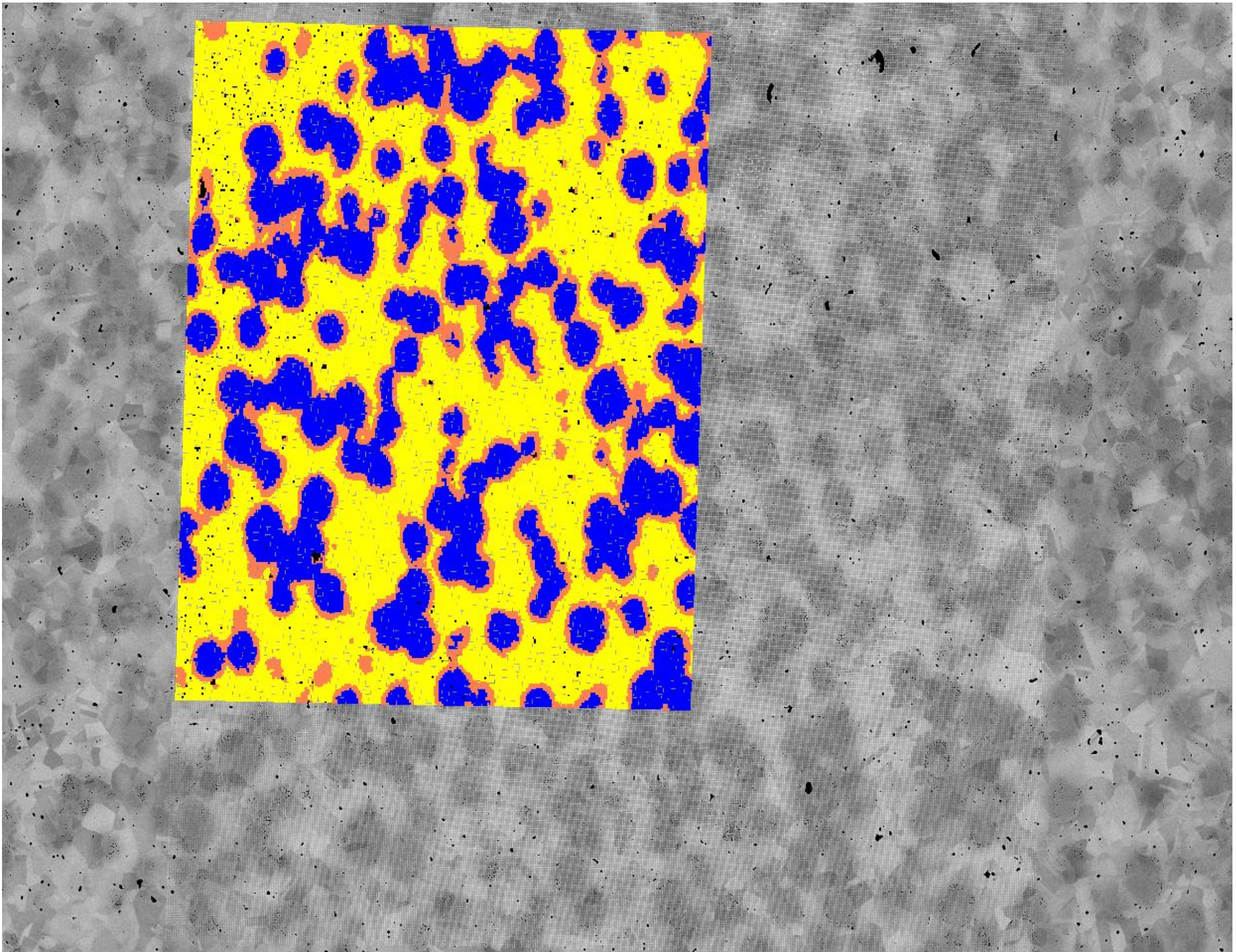


réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025

Alexandre TANGUY



Grille de ségmentation.

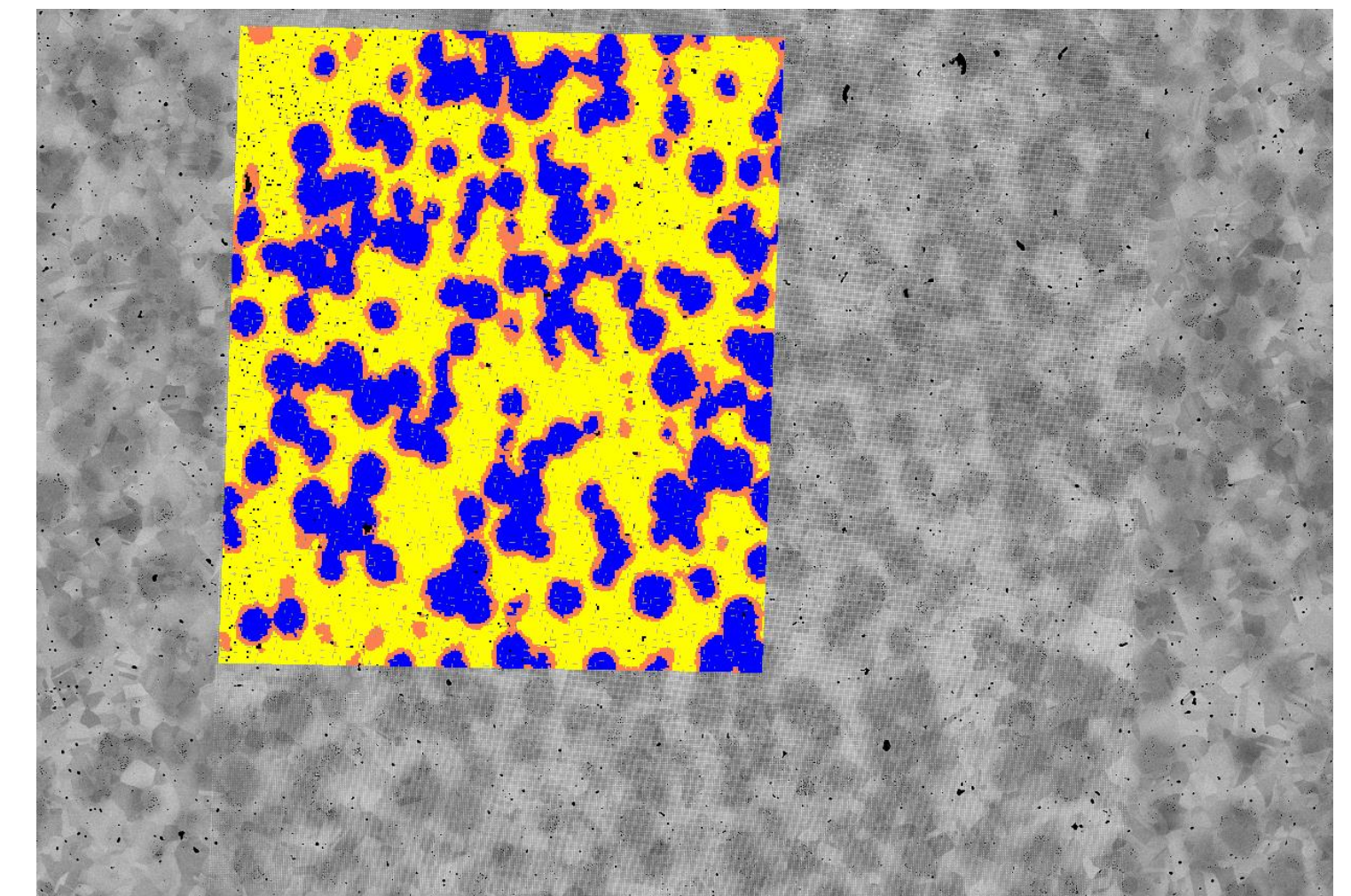
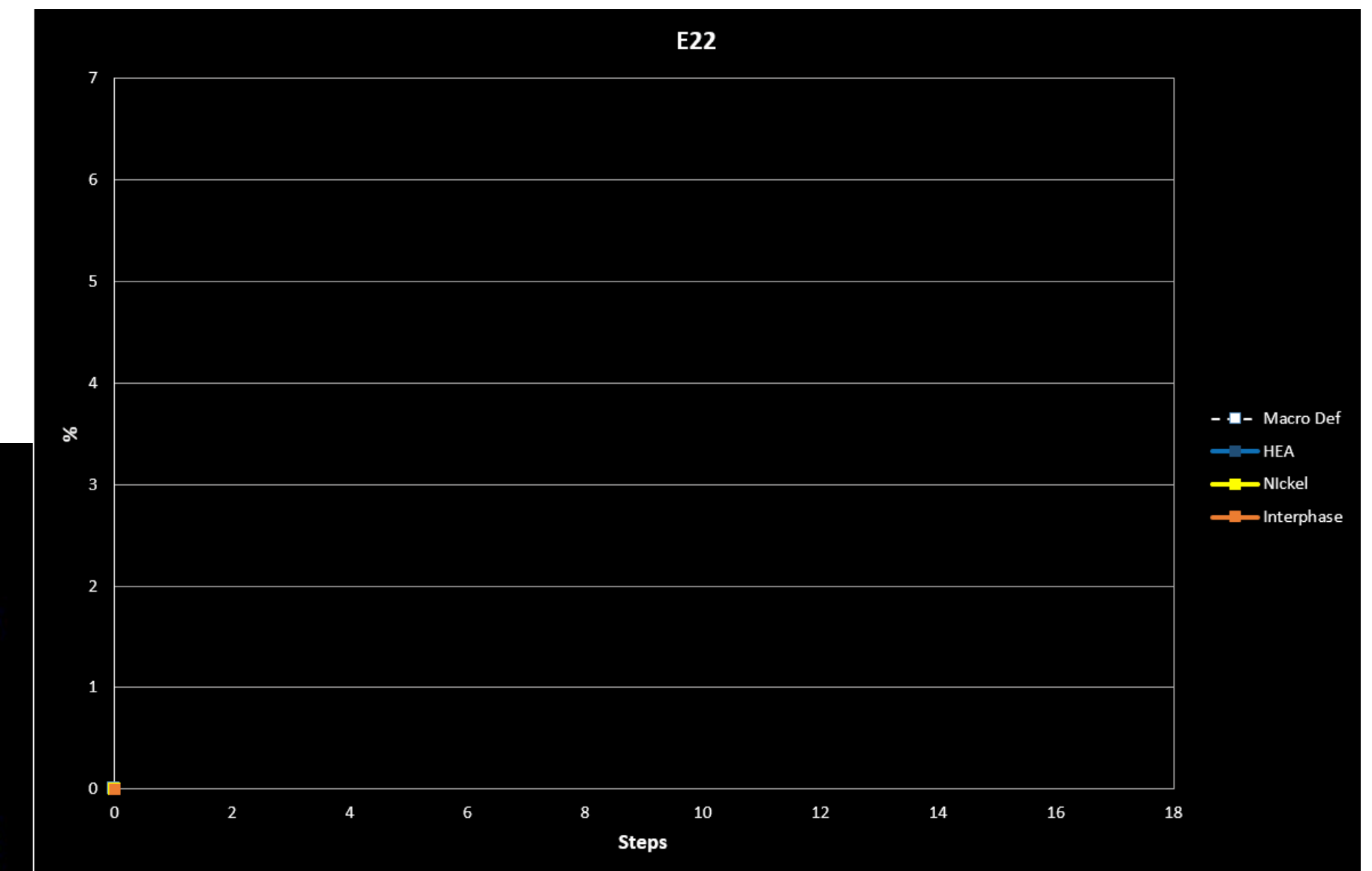
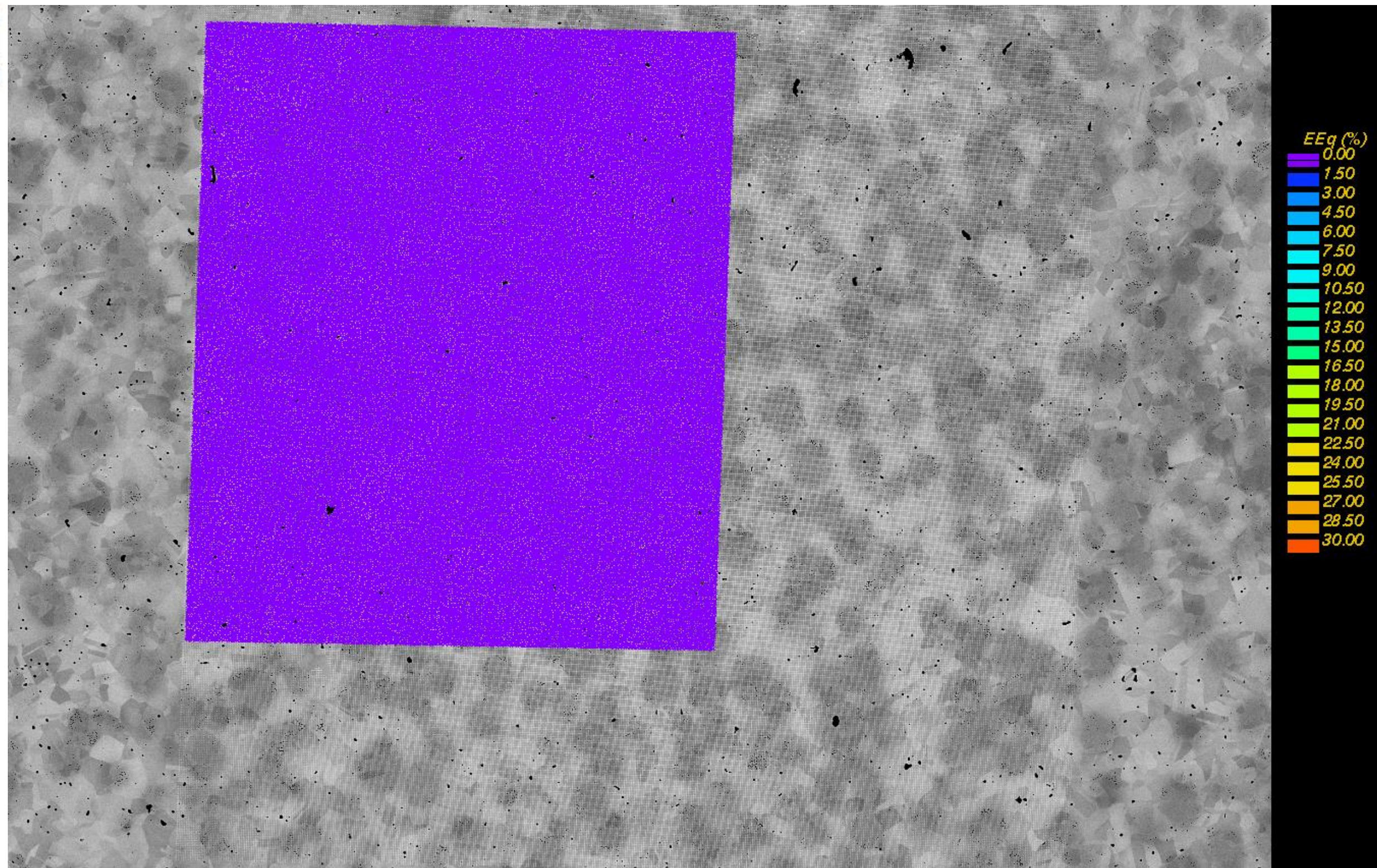


- Grid Segmentation :
- HEA
 - Nickel Matrix
 - Interphases



Résultat de la corrélation d'image

- Observation de l'évolution du champ de déformation
- Identification de la contribution des phases lors la déformation.



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique

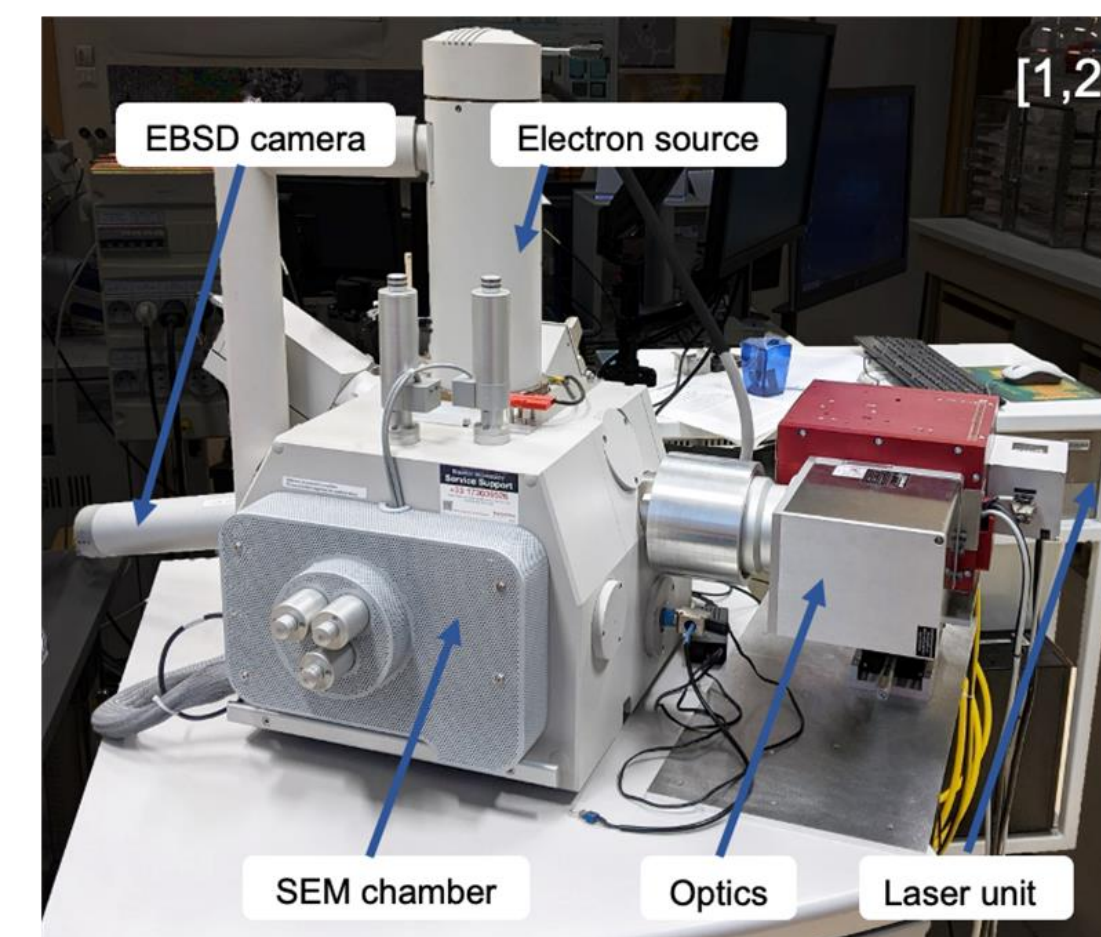
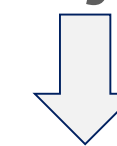


réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Merci de votre attention

Projet LASEM



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

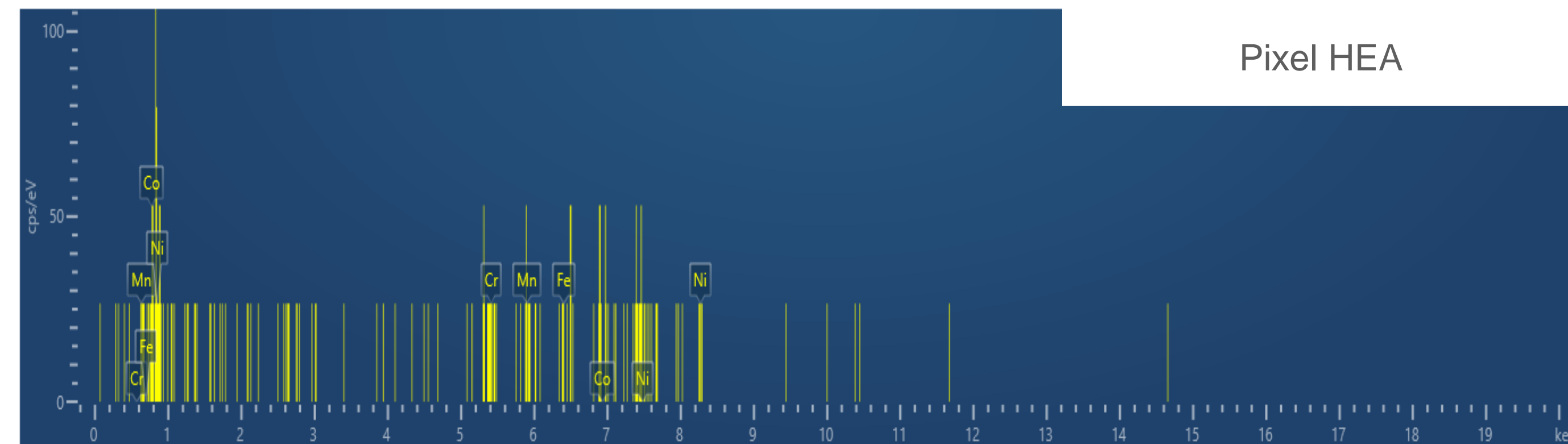
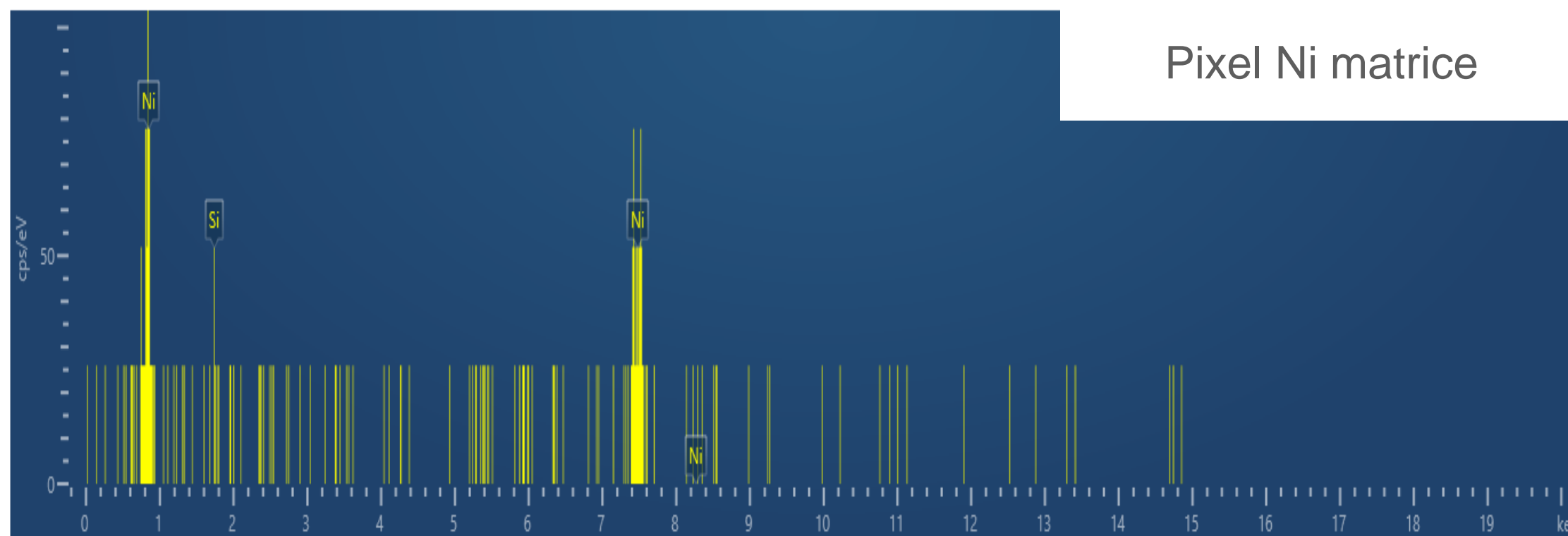
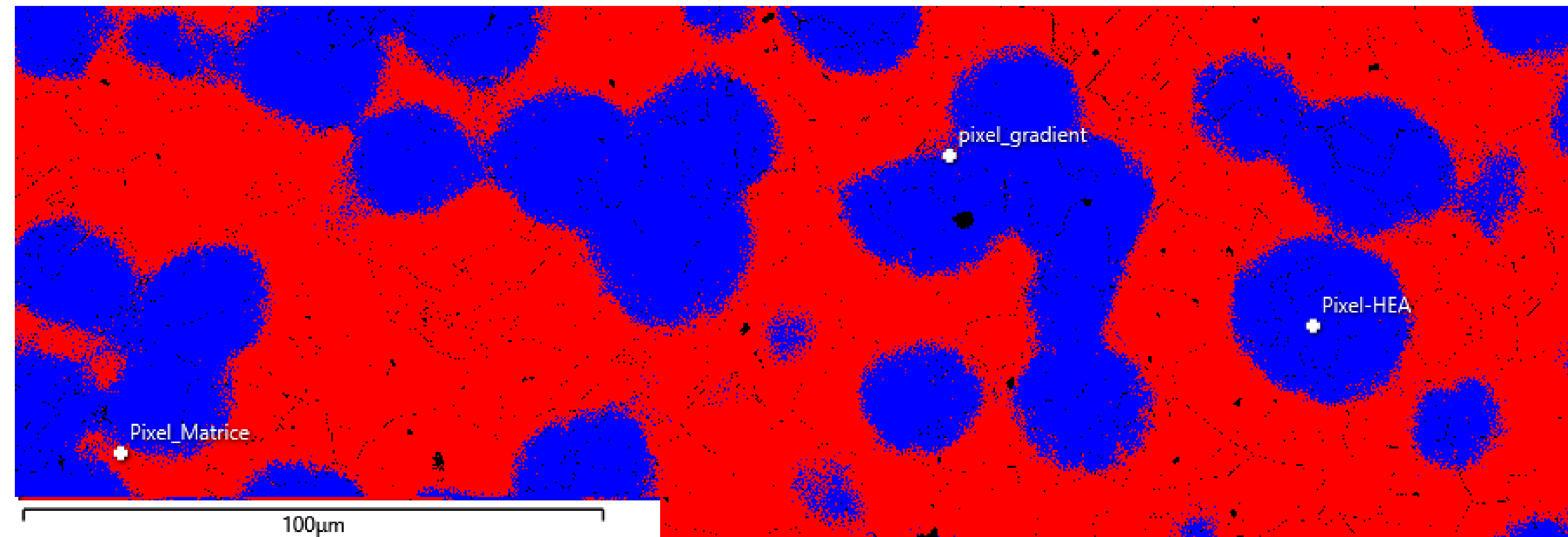
En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025



Questions



350 million de counts sur la caratographie



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



réunion pédagogique 4 et 5 décembre 2025