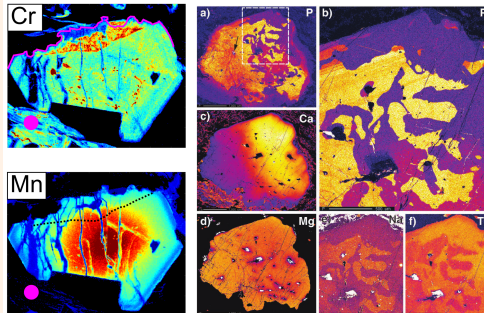


# LES ÉLÉMENTS MINEURS ET TRACES

## POUR COMPRENDRE L'HISTOIRE DE CRISTALLISATION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES



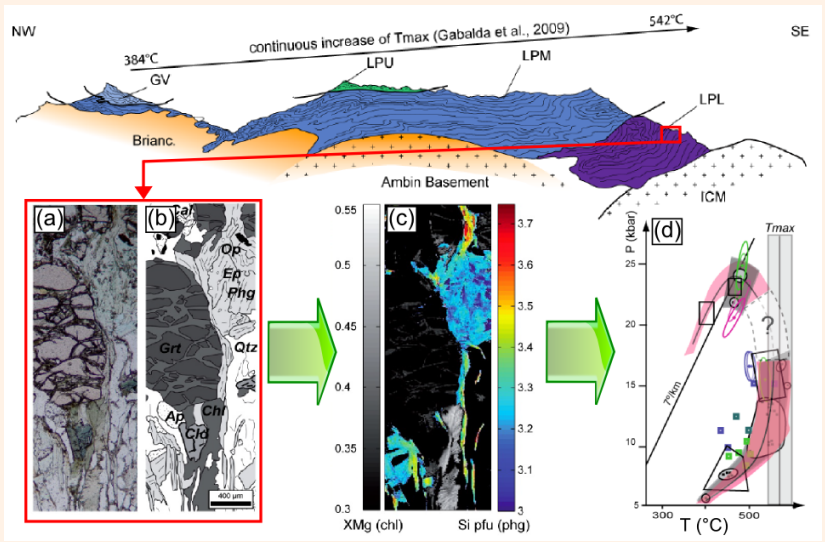
Par **BENOÎT DUBACQ<sup>1,2</sup>** ET **MICHEL FIALIN<sup>1</sup>**  
 Collaborateurs : **A. Plunder<sup>2</sup>**, **V. de Andrade<sup>3</sup>**, **A. Verlaguet<sup>2</sup>**, **P. Agard<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>C.N.R.S.

<sup>2</sup>INSTITUT DES SCIENCES DE LA TERRE PARIS, SORBONNE UNIVERSITÉS, U.P.M.C. (PARIS VI)

<sup>3</sup>ARBONNE NATIONAL LABORATORY (CHICAGO)

# THERMOBAROMÉTRIE ET CHEMINS PRESSION-TEMPÉRATURE



Plunder et al. (2012)

## THERMOBAROMÉTRIE ET CHEMINS PRESSION-TEMPÉRATURE

La thermodynamique à la rescousse:  $A + B \xrightarrow{\Delta G_{\text{reaction}}(P,T)=0?} C$

Composition fixe, 25°C, 1 bar:

$$\Delta G_{\text{reaction}}^0(P_0, T_0) = \Delta H_{\text{reaction}}^0(P_0, T_0) - T_0 \cdot \Delta S_{\text{reaction}}^0(P_0, T_0)$$

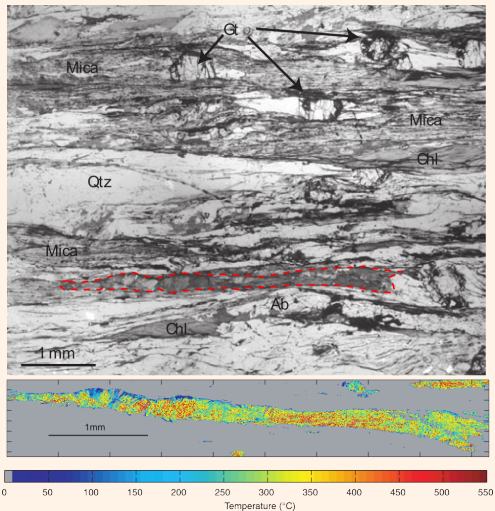
Composition fixe,  $P$  et  $T$  variables:

$$\Delta G_{\text{reaction}}^0(P, T) = \Delta H_{\text{reaction}}^0(P_0, T_0) + \int_{T_0}^T \Delta C_p \cdot dT + \int_{P_0}^P \Delta V \cdot dP - T \cdot \Delta S_{\text{reaction}}^0(P_0, T_0)$$

Composition,  $P$  et  $T$  variables:

$$\Delta G_{\text{reaction}}(P, T) = \Delta G_{\text{reaction}}^0(P, T) + R \cdot T \cdot \ln \prod_i^{\text{composants}} a_i^{\nu_i}$$

# APPROCHE CARTOGRAPHIQUE



Cartographie majeurs microsonde électronique  
+ modélisation thermodynamique équilibres

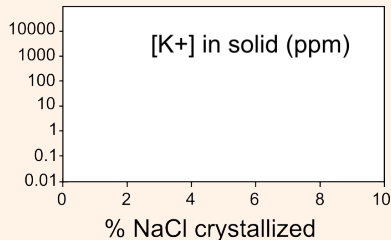
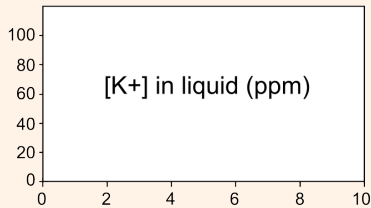
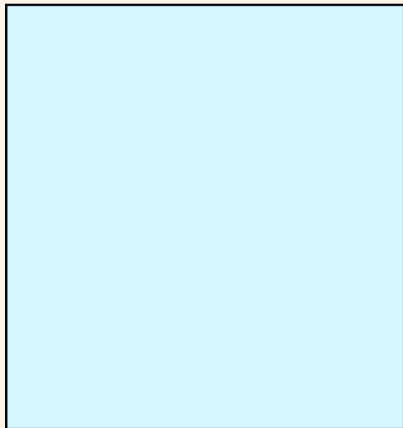
- carte de température de cristallisation
- lien texture -  $\Delta$ composition -  $\Delta P$ ,  $T$  cristallisation
- des chemins  $P - T$  continus?
- ⇒ Les éléments traces pour préciser l'histoire de la roche

Vidal et al. (2006)

# DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS MINEURS ET TRACES

1L at 10 mol. % NaCl(l)  
+ 100 ppm K<sup>+</sup>

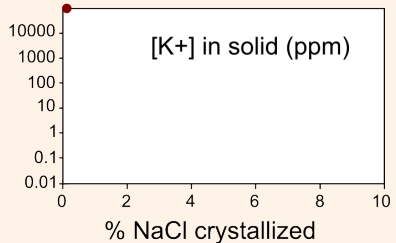
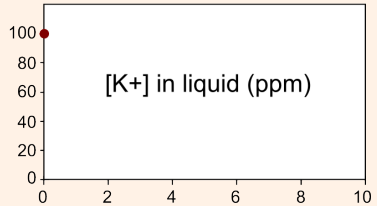
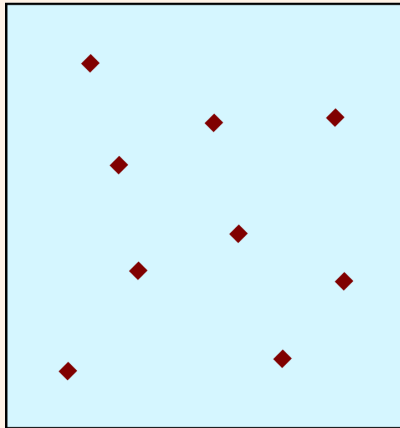
$$D^{S/L}(K^+) = 1000$$



# DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS MINEURS ET TRACES

1L at 10 mol. % NaCl(l)  
 + 100 ppm K<sup>+</sup>

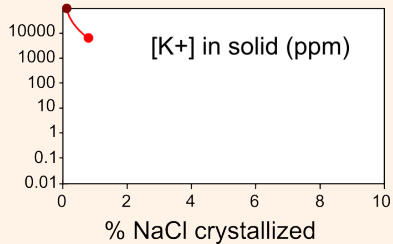
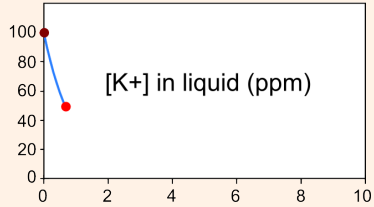
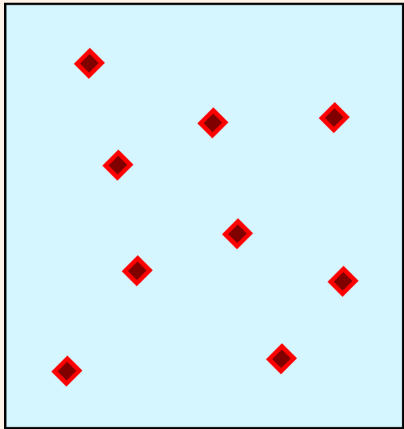
$$D^{S/L}(K^+) = 1000$$



# DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS MINEURS ET TRACES

1L at 10 mol. % NaCl(l)  
 + 100 ppm K<sup>+</sup>

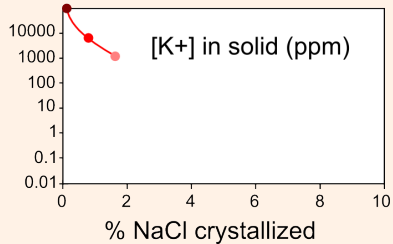
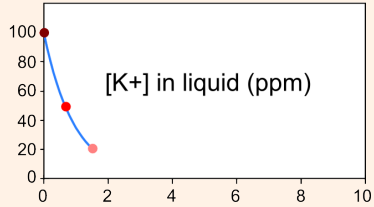
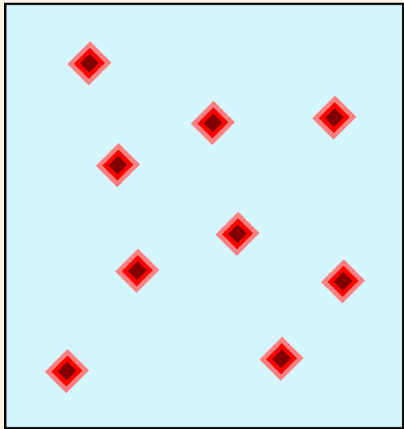
$$D^{S/L}(K^+) = 1000$$



# DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS MINEURS ET TRACES

1L at 10 mol. % NaCl(l)  
+ 100 ppm K<sup>+</sup>

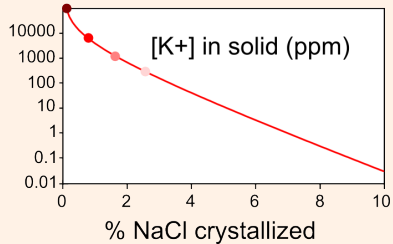
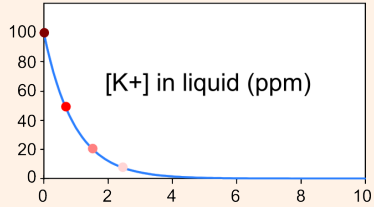
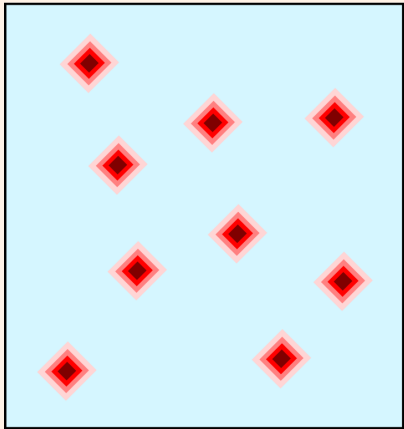
$$D^{S/L}(K^+) = 1000$$



# DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS MINEURS ET TRACES

1L at 10 mol. % NaCl(l)  
+ 100 ppm K<sup>+</sup>

$$D^{S/L}(K^+) = 1000$$

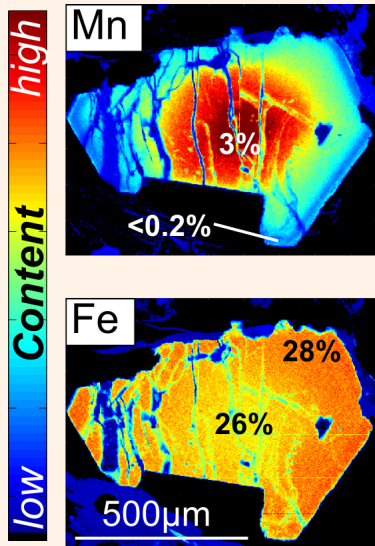


# DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS MINEURS ET TRACES

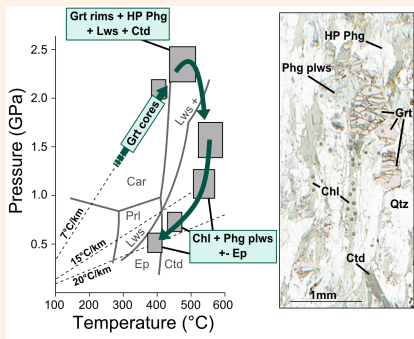
Exemple (classique) des genats zonés en manganèse

## QUESTIONS :

- Estimer les coefficients de partage entre minéraux et fluides ?
- Comportement des traces régi par des coefficients de partage ?
- qu'apprend-on sur la pétrologie des roches métamorphiques ?



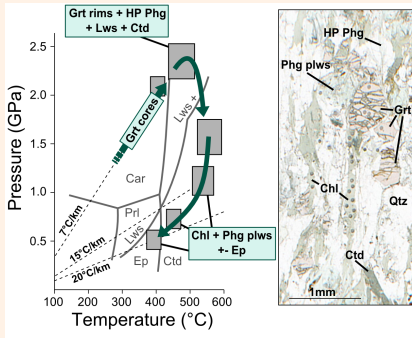
# PARTAGE ?



Composition moyenne du grenat type almandin (EPMA) :  
 $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

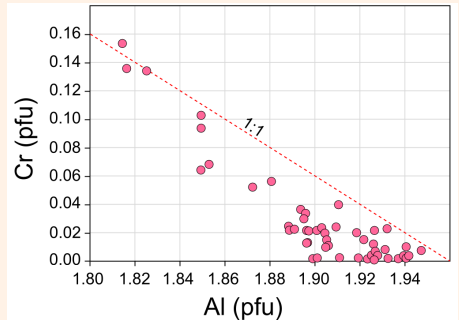
Méta-sédiment de Haute Maurienne, déposé dans l'Océan Alpin, enfoui (il y a ~45 Ma) puis exhumé lors de la création de la chaîne alpine.  
 ~ 1% pds de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

# PARTAGE ?



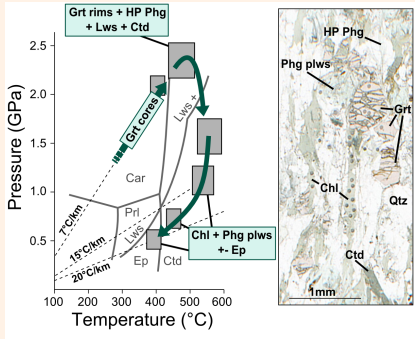
Méta-sédiment de Haute Maurienne, déposé dans l'Océan Alpin, enfoui (il y a ~45 Ma) puis exhumé lors de la création de la chaîne alpine.  
 ~ 1% pds de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Composition moyenne du grenat type almandin (EPMA) :  
 $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$



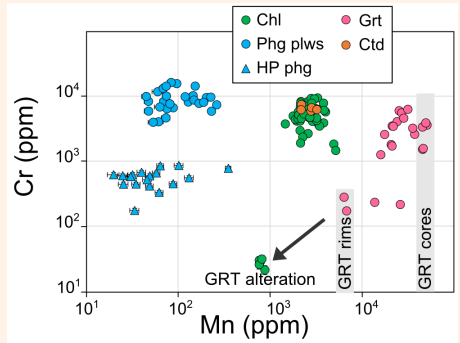
Echange de  $\text{Cr}^{3+}$  et  $\text{Al}^{3+}$  dans les mêmes sites cristallographiques

# PARTAGE ?

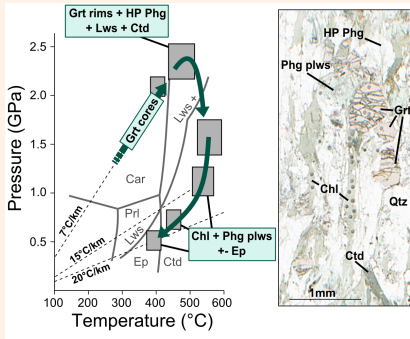


Méta-sédiment de Haute Maurienne, déposé dans l'Océan Alpin, enfoui (il y a ~45 Ma) puis exhumé lors de la création de la chaîne alpine.  
 ~ 1% pds de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## Distribution Cr-Mn dans les minéraux principaux (LA-ICP-MS):

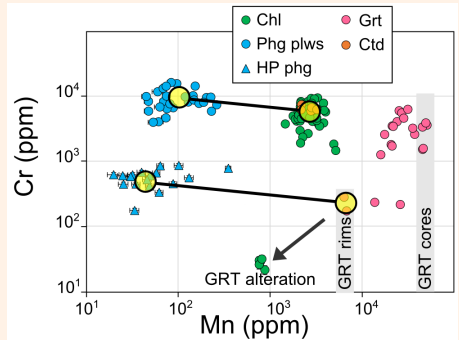


# PARTAGE ?



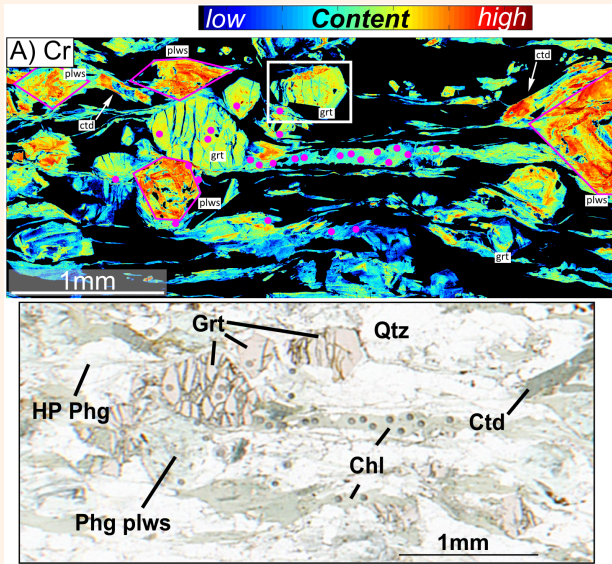
Méta-sédiment de Haute Maurienne, déposé dans l'Océan Alpin, enfoui (il y a ~45 Ma) puis exhumé lors de la création de la chaîne alpine.  
 ~ 1% pds de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Distribution Cr-Mn dans les minéraux principaux (LA-ICP-MS):

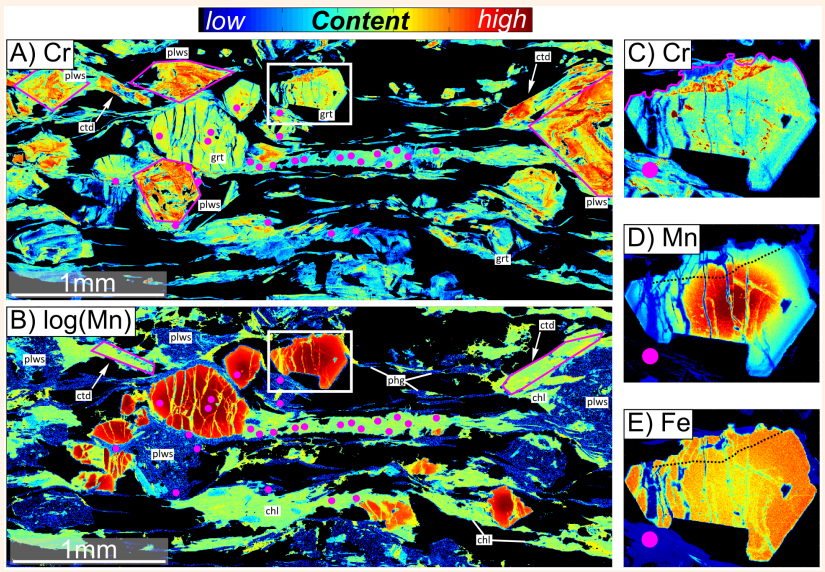


→ cohérent avec partage régi par un équilibre thermodynamique (coefficients de partage) !

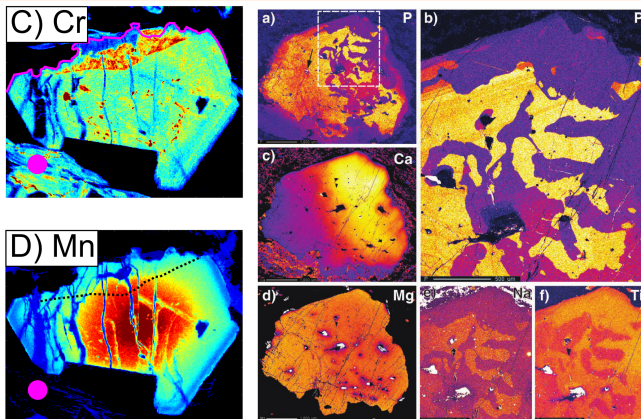
# PARTAGE ? APPORTS DE LA CARTOGRAPHIE CHIMIQUE



# PARTAGE ? APPORTS DE LA CARTOGRAPHIE CHIMIQUE



# PARTAGE ? APPORTS DE LA CARTOGRAPHIE CHIMIQUE



*Ague et al. (2016)*

- Désaccord avec partage régi par un équilibre thermodynamique (coefficients de partage) !
- Importance de la diffusivité des ions en solution !
- ⇒ vitesses de cristallisation des minéraux...

# RÉSUMÉ

## Conclusion 1 :

La mesure des éléments traces apporte de l'information pétrologique

## Conclusion 2 :

Pour les éléments "mobiles" (Mn), l'équilibre thermodynamique est atteint, la distribution élémentaire est régie par des coefficients de partage

## Conclusion 3 :

Pour les éléments "immobiles" (Al, REE...), l'équilibre thermodynamique n'est pas atteint car la distribution élémentaire est limitée par leur faible diffusivité / faible solubilité / haute réactivité

## Conclusion 4 :

L'approche cartographique est essentielle pour comprendre le comportement des éléments traces !

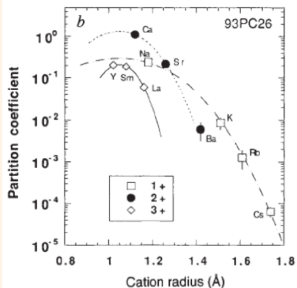
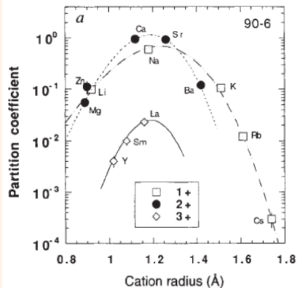
## LETTERS TO NATURE

### Prediction of crystal–melt partition coefficients from elastic moduli

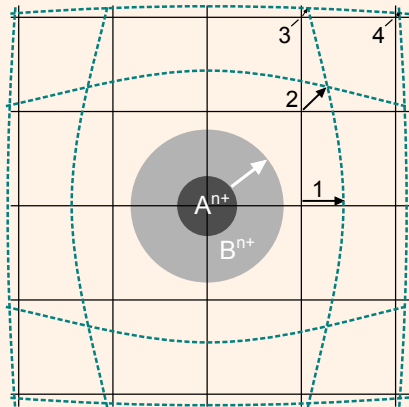
Jon Blundy & Bernard Wood

CETSEI, Department of Geology, Bristol University,  
Wills Memorial Building, Bristol BS8 1RJ, UK

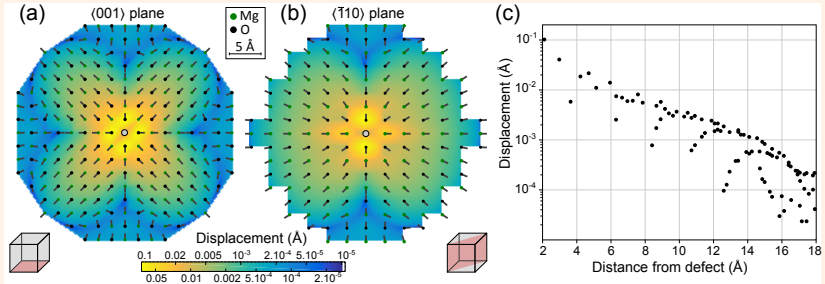
$$\Delta G_{\text{strain}} = 4\pi EN_A \left[ \frac{r_0}{2} (r_i - r_0)^2 + \frac{1}{3} (r_i - r_0)^3 \right]$$



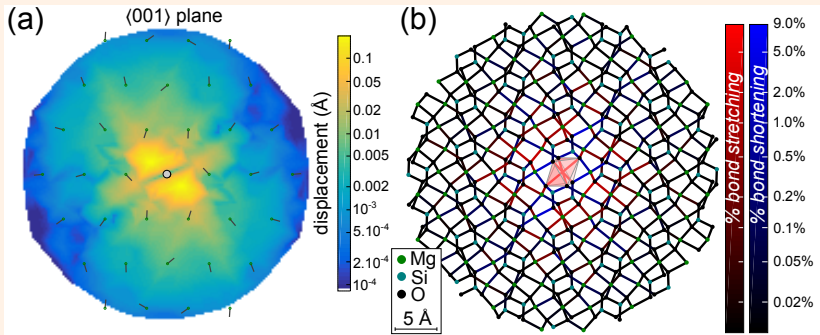
# ATOMISTIQUE



# ATOMISTIQUE



# ATOMISTIQUE



# ATOMISTIQUE

