

Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

Raphael Aeschlimann

Parcours académique

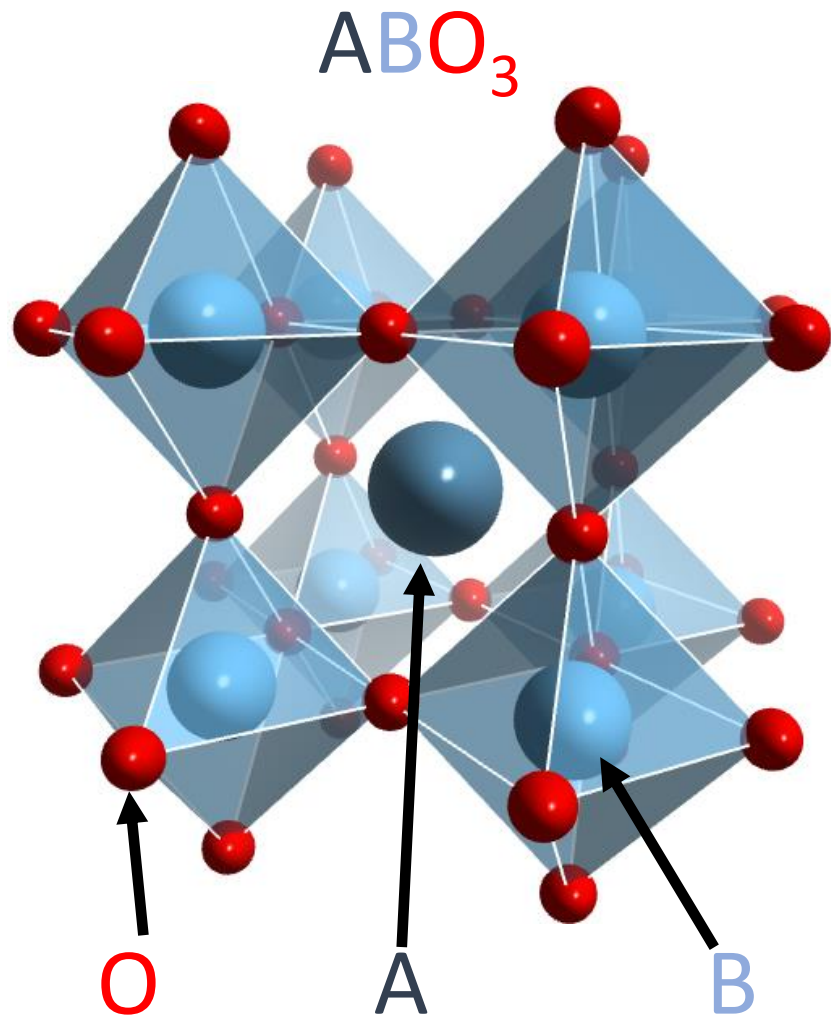
Parcours

<u>2011-2013</u>	CPGE PCSI-PC, <i>Lycée Condorcet</i>
<u>2013-2016</u>	Magistère de Physique fondamentale d'Orsay, <i>Université Paris-Saclay</i>
<u>2016-2020</u>	Doctorat en physique sous la direction de Manuel Bibes : <i>Propriétés magnétiques et de transport des couches minces et hétérostructures de titanates de terre rare</i>
<u>2020-2021</u>	Préparation à l'agrégation au centre de Montrouge

Expérience

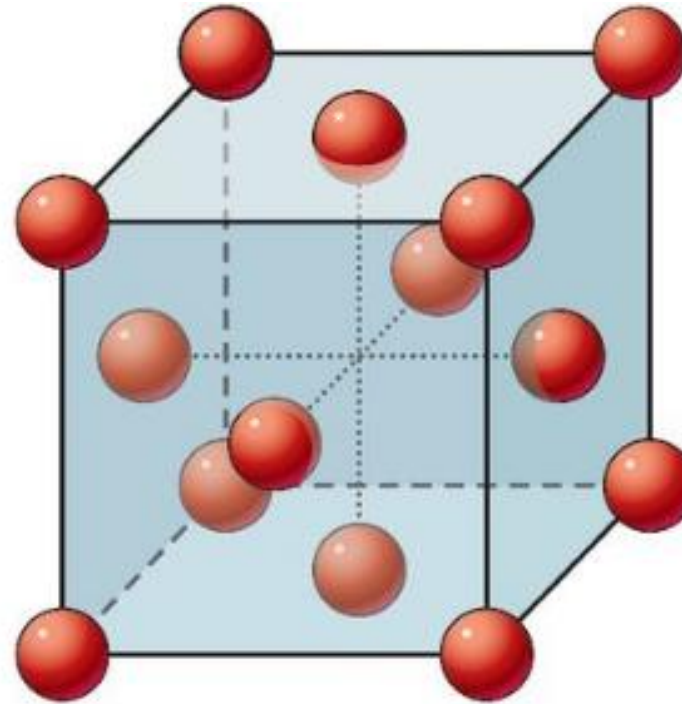
<u>2014-2016</u>	Cours particuliers de physique et de mathématiques
<u>2017-2019</u>	Responsable de TP d'électromagnétisme et électrocinétique DUT mesures physiques, Orsay

Structure pérovskite

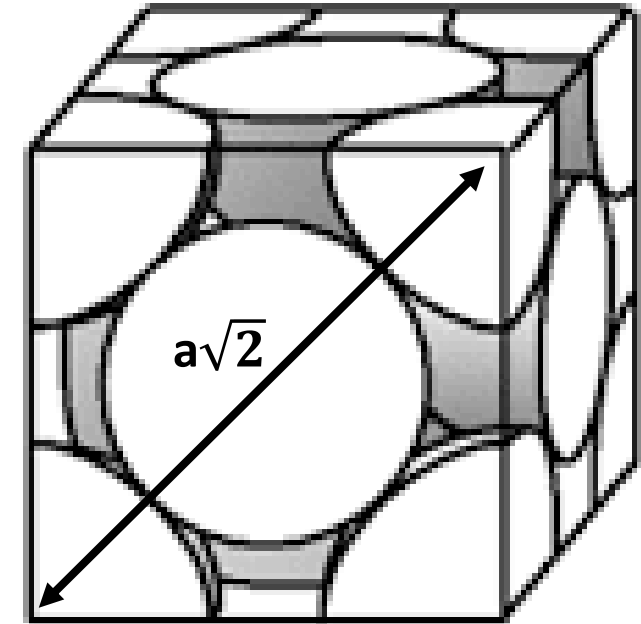
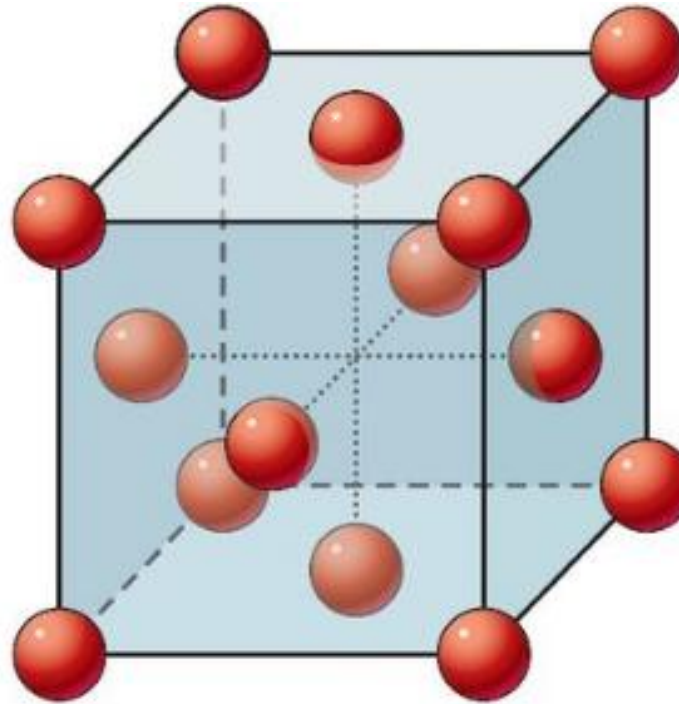


- site A : cation de valence 2+/3+
- site B : cation de valence 4+/3+ usuellement un métal de transition
- O: 2- oxygènes formant un octaèdre

- **Retour sur la structure cfc**

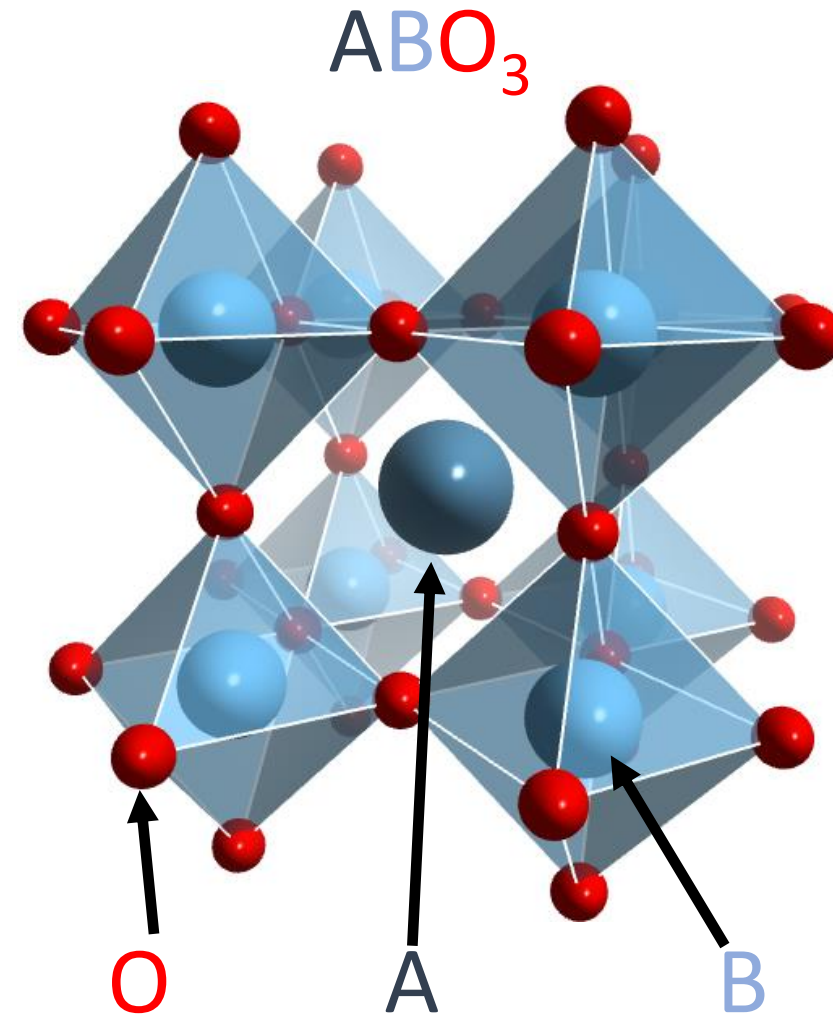


- Retour sur la structure cfc
- **Calcul de compacité**

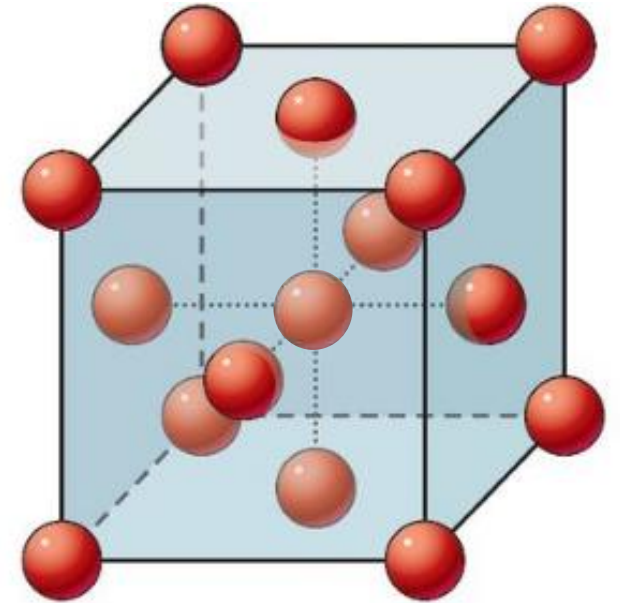
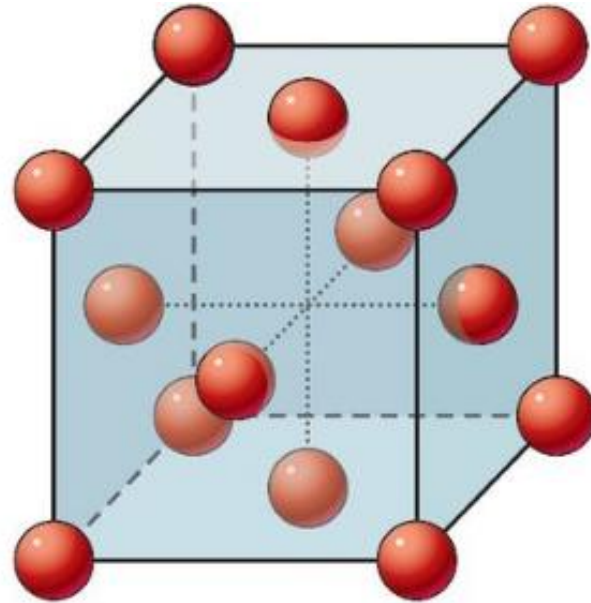


Avec **a** le paramètre de la maille cubique

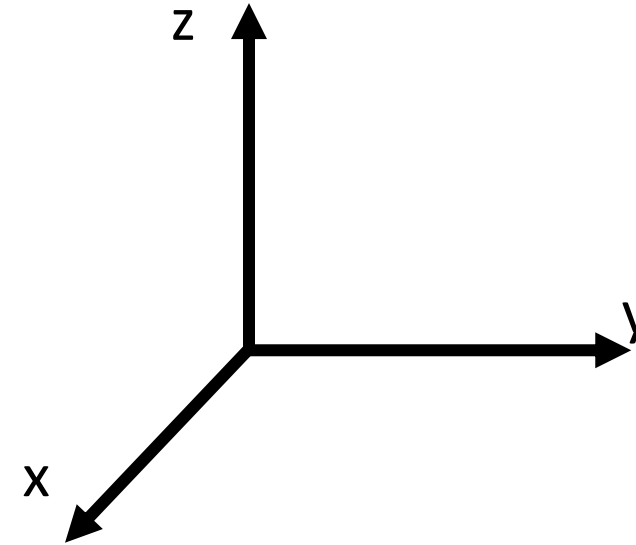
- Retour sur la structure cfc
- Calcul de compacité
- **Introduction de la structure pérovskite**



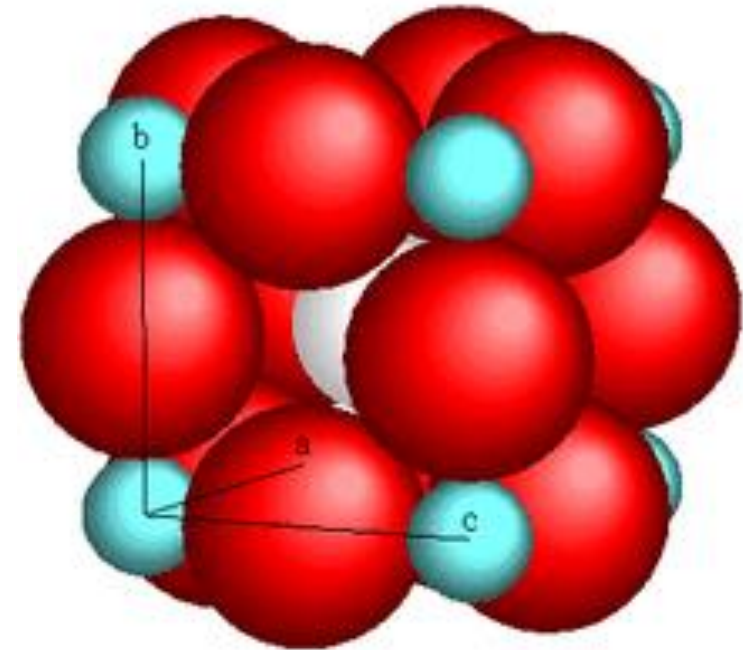
- Retour sur la structure cfc
- Calcul de compacité
- Introduction de la structure pérovskite
- **Structure cfc avec un atome supplémentaire au centre.**



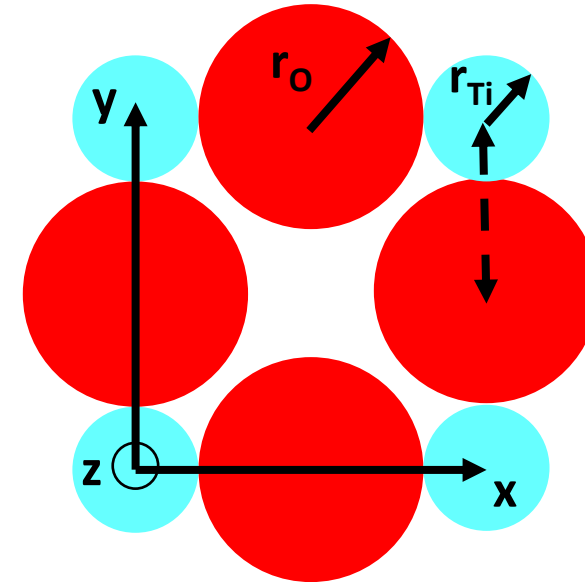
- Retour sur la structure cfc
- Calcul de compacité
- Introduction de la structure pérovskite
- Structure cfc avec un atome supplémentaire au centre.
- **Représentez la maille en perspective cavalière. Calculez sa multiplicité.**



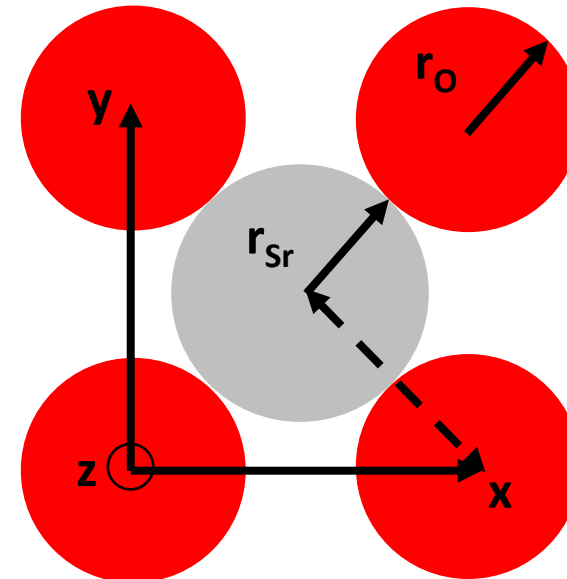
- Retour sur la structure cfc
- Calcul de compacité
- Introduction de la structure pérovskite
- Structure cfc avec un atome supplémentaire au centre.
- Représentez la maille en perspective cavalière. Calculez sa multiplicité.
- **Calcul de compacité et densité de SrTiO_3**



- Retour sur la structure cfc
- Calcul de compacité
- Introduction de la structure pérovskite
- Structure cfc avec un atome supplémentaire au centre.
- Représentez la maille en perspective cavalière. Calculez sa multiplicité.
- **Calcul de compacité et densité de SrTiO_3**

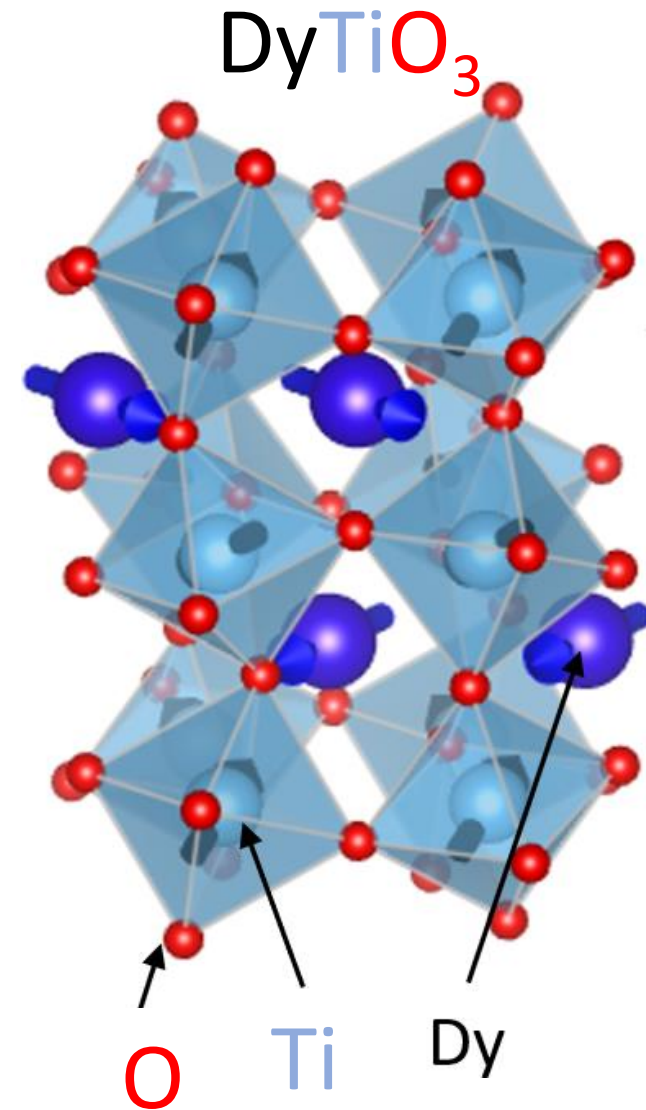
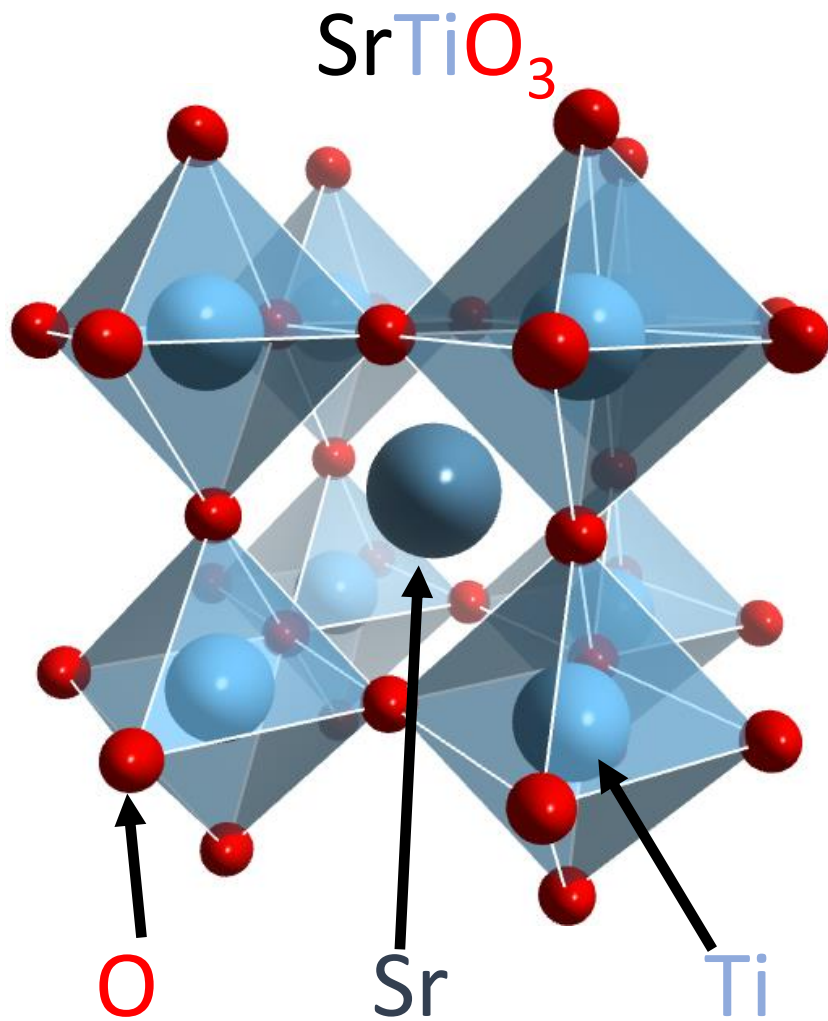


$$\frac{a}{2} = r_O + r_{Ti}$$



$$\frac{a}{\sqrt{2}} = r_O + r_{Sr}$$

Ouverture : Au-delà de la structure cubique



Giant Magnetoresistance (GMR)

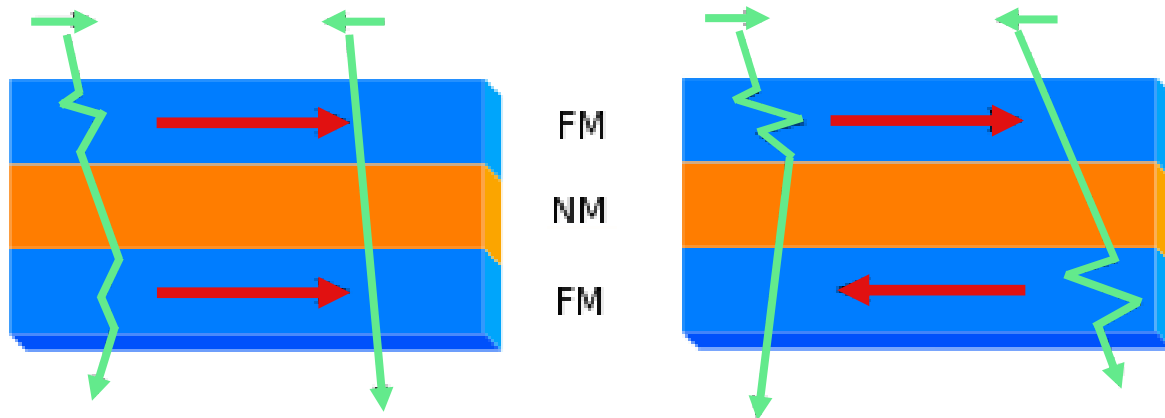
Prix Nobel 2007



Albert Fert



Peter Grünberg



FM : ferromagnétique

NM : non magnétique

Giant Magnetoresistance (GMR)

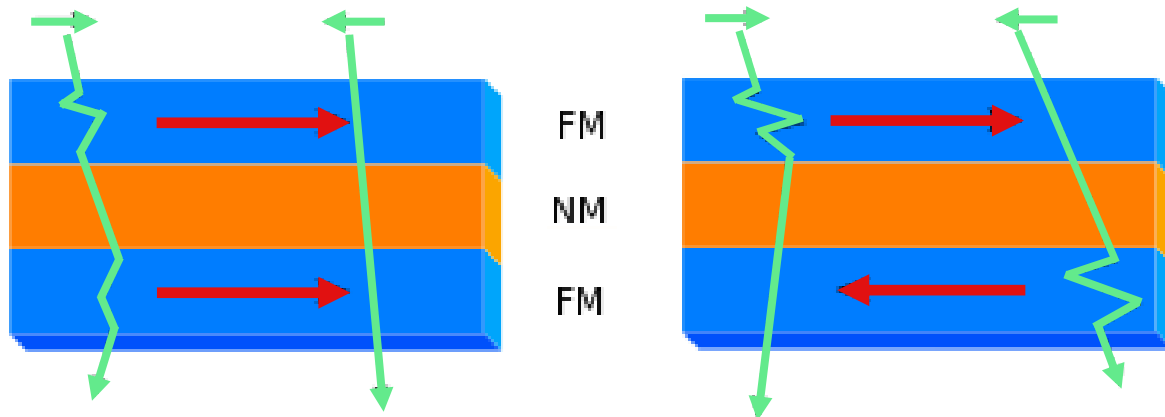
Prix Nobel 2007



Albert Fert



Peter Grünberg



FM : ferromagnétique
NM : non magnétique



Giant Magnetoresistance (GMR)

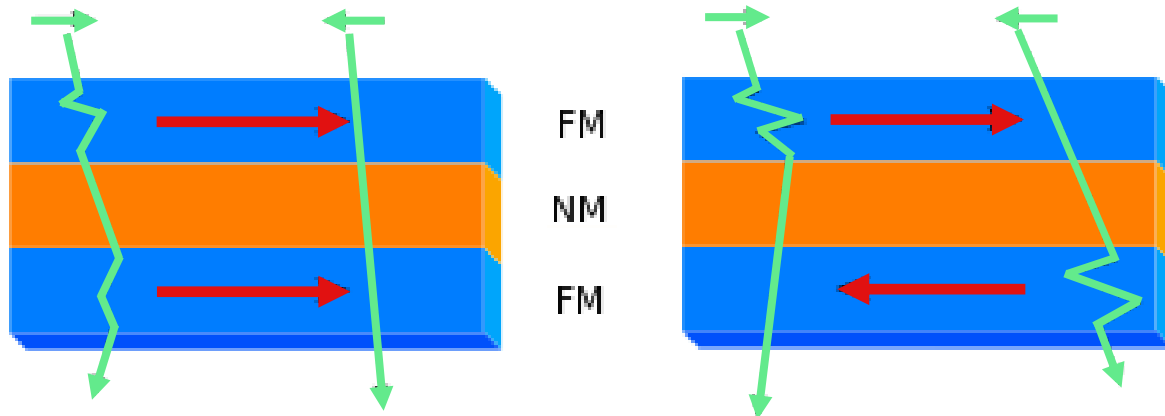
Prix Nobel 2007



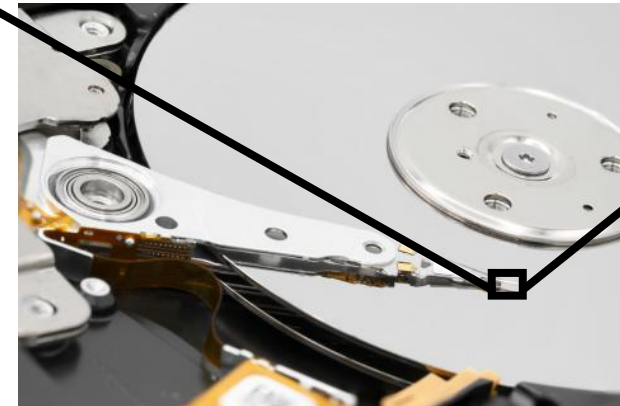
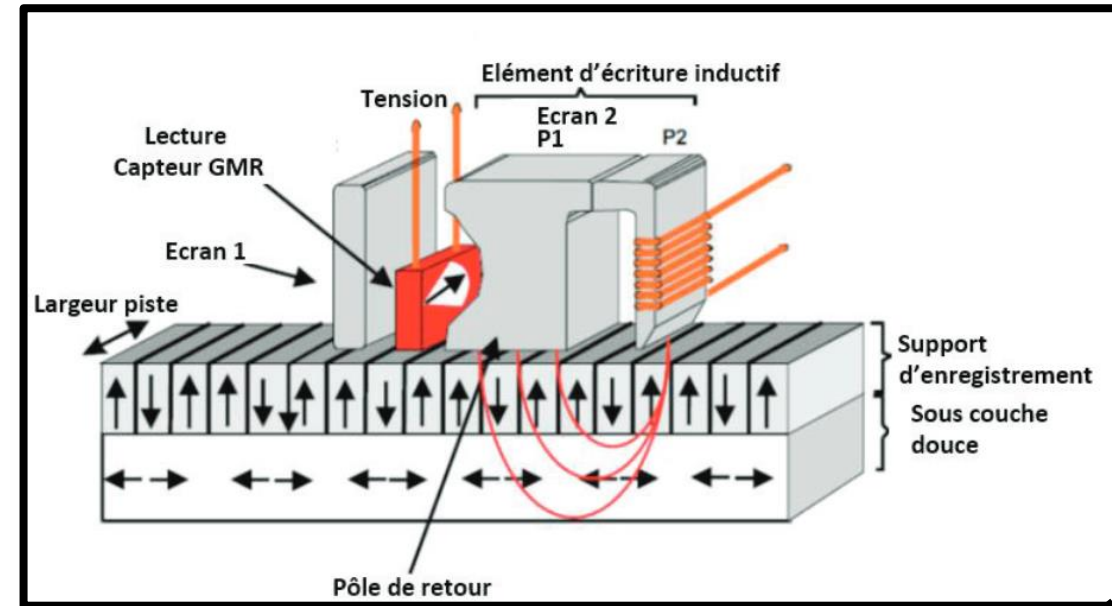
Albert Fert



Peter Grünberg



FM : ferromagnétique
NM : non magnétique



Giant Magnetoresistance (GMR)

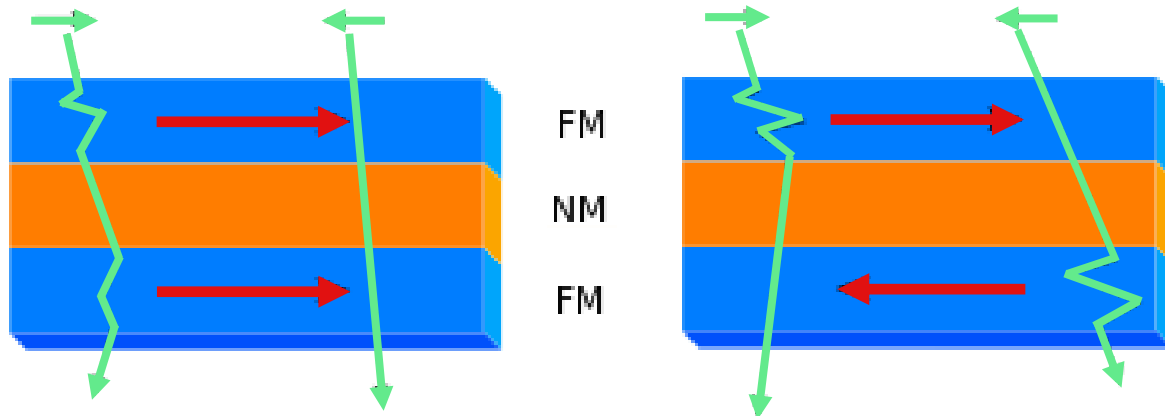
Prix Nobel 2007



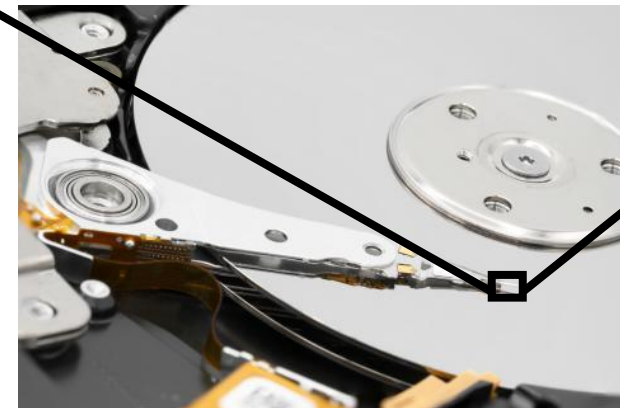
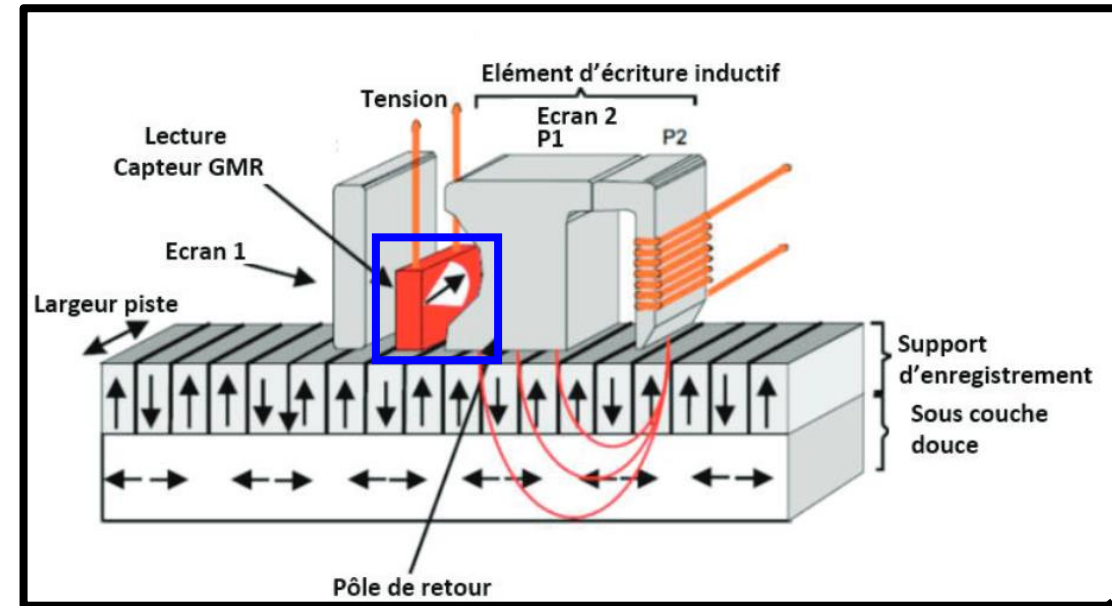
Albert Fert



Peter Grünberg



FM : ferromagnétique
NM : non magnétique



Giant Magnetoresistance (GMR)

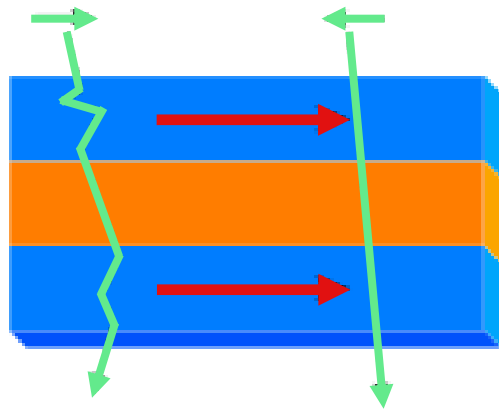
Prix Nobel 2007



Albert Fert



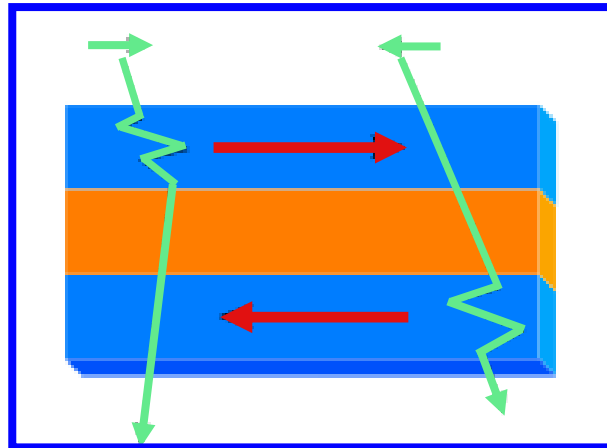
Peter Grünberg



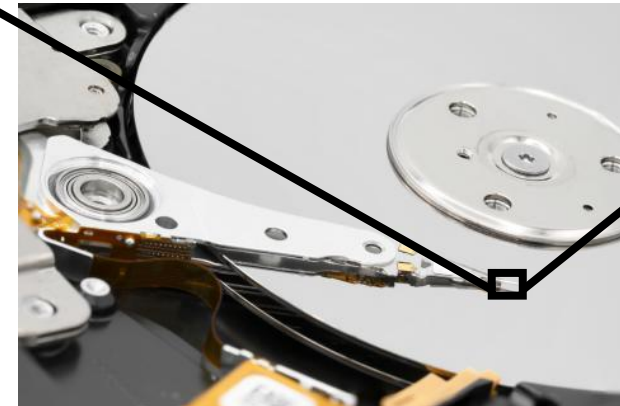
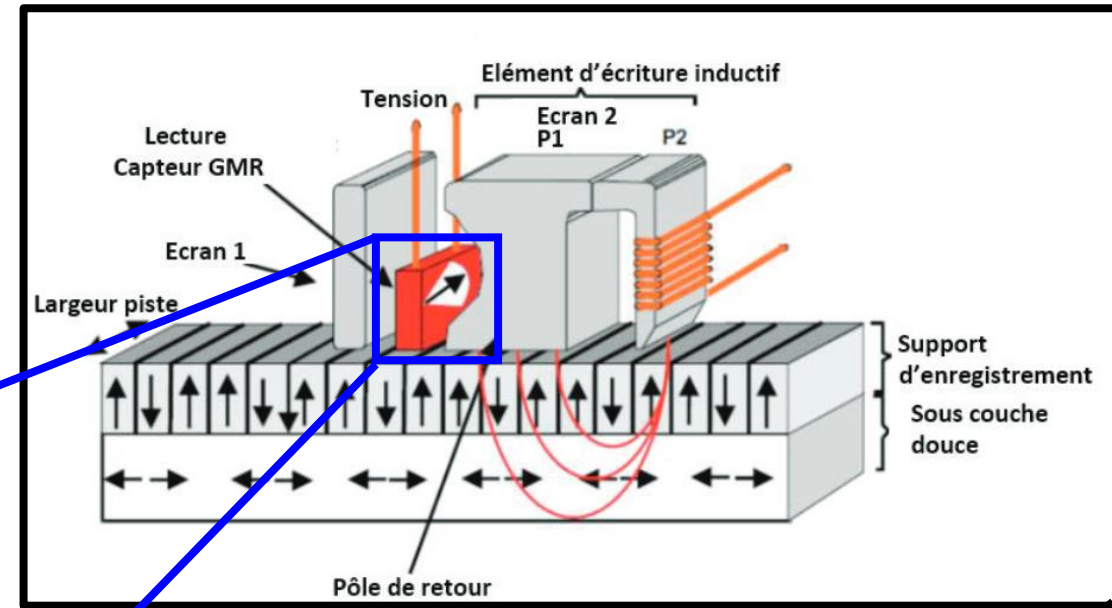
FM

NM

FM

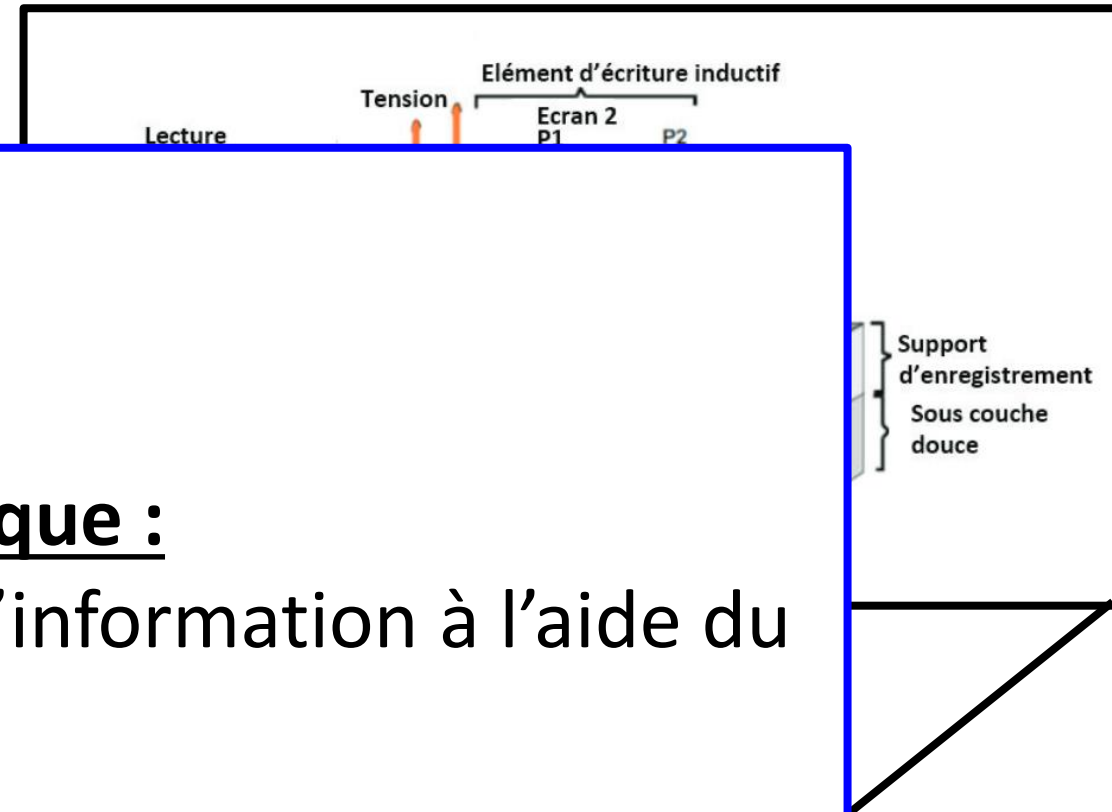
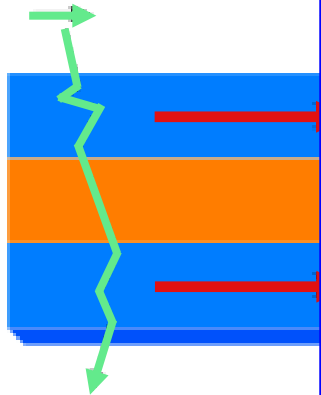


FM : ferromagnétique
NM : non magnétique



Giant Magnetoresistance (GMR)

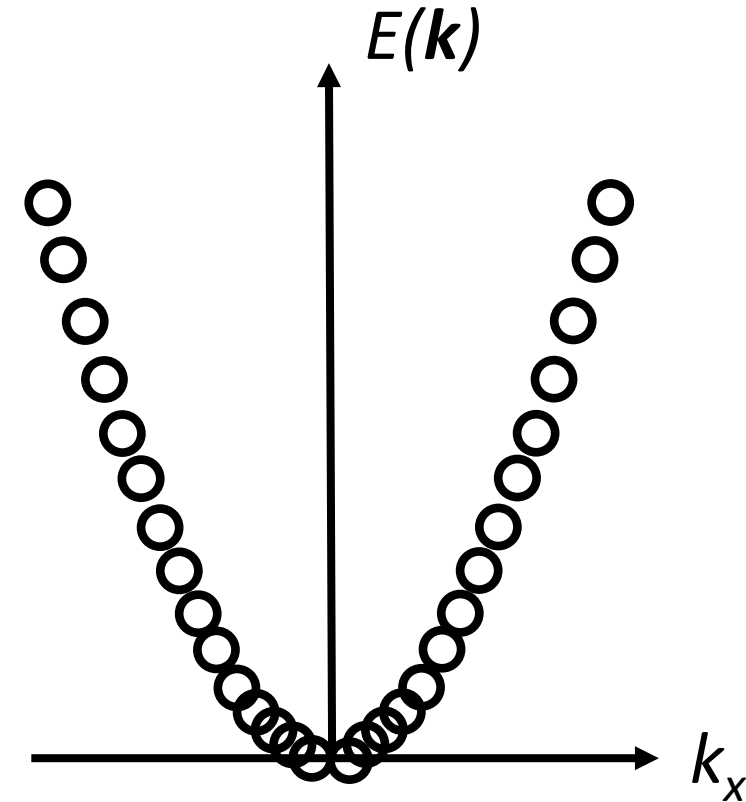
Prix Nobel 2007



Spintronique :
transport et traitement de l'information à l'aide du
spin

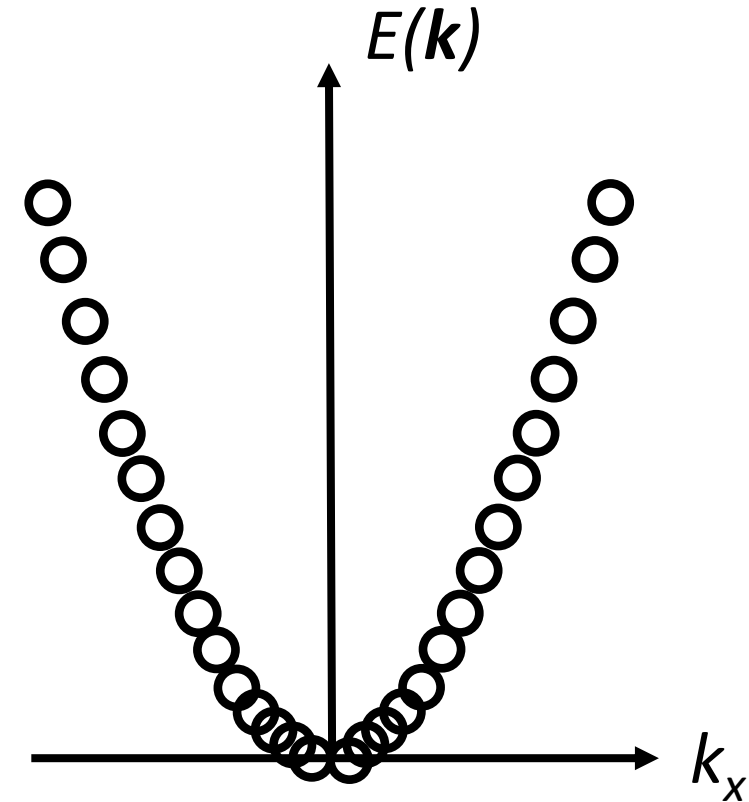
Hamiltonien \leftrightarrow Énergie mécanique

$$H = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$



Hamiltonien \leftrightarrow Énergie mécanique

$$H = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + H_R$$



Conditions nécessaires :

- **Brisure de symétrie**
- Couplage **spin orbite**

$$H_R = \alpha_R (\boldsymbol{\sigma} \wedge \mathbf{p}) \cdot \hat{\mathbf{z}}$$

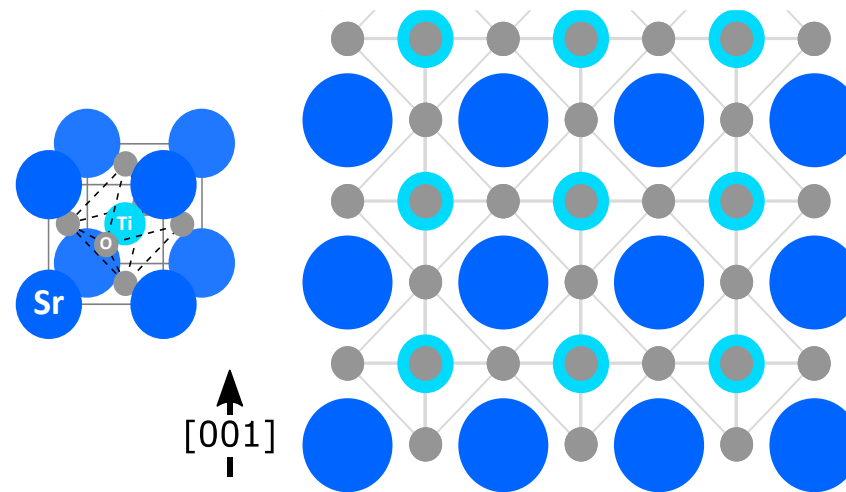
Diagram illustrating the Rashba Hamiltonian $H_R = \alpha_R (\boldsymbol{\sigma} \wedge \mathbf{p}) \cdot \hat{\mathbf{z}}$ with annotations:

- $\boldsymbol{\sigma}$ (red) is labeled "Matrices de Pauli" and "SPIN".
- \mathbf{p} (blue) is labeled "Impulsion des particules" and "COURANT".
- $\hat{\mathbf{z}}$ (green) is labeled "Vecteur unitaire selon z".

Conséquences :

courant de charge \rightleftharpoons courant de spin

Croissance en couche mince



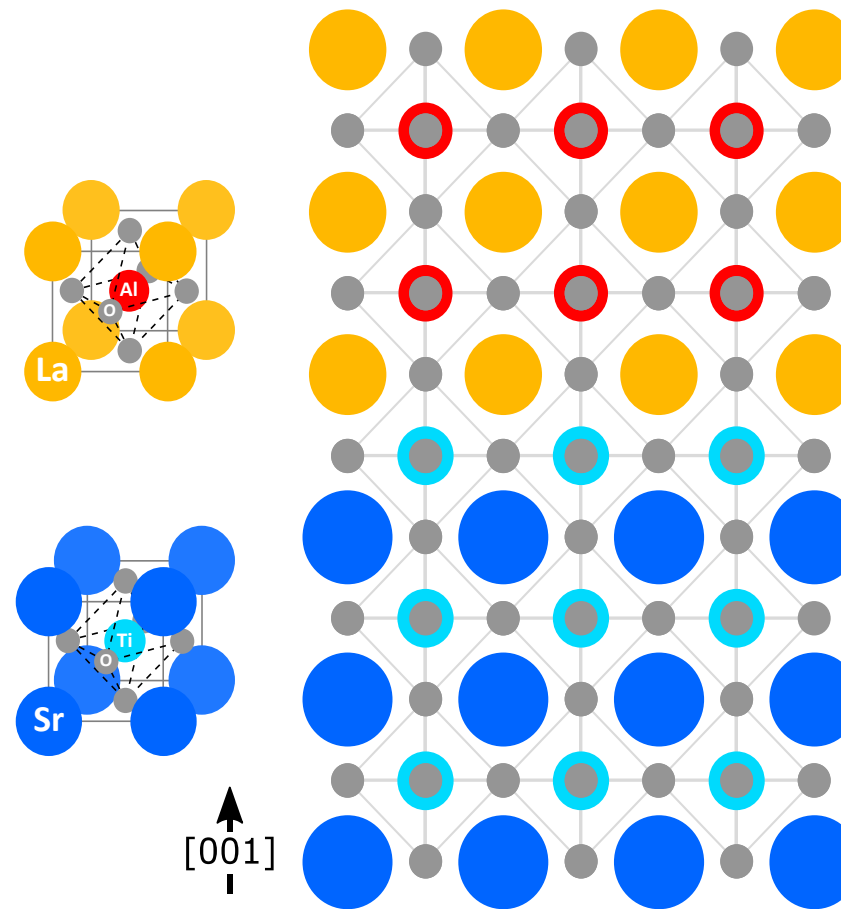
SrTiO₃
(STO)

A. Ohtomo & H. Y. Hwang, *Nature* **423**, 427 (2004)

Formation d'un système Rashba à l'interface

Croissance en couche mince

→ hétérostructures



LaAlO₃
(LAO)

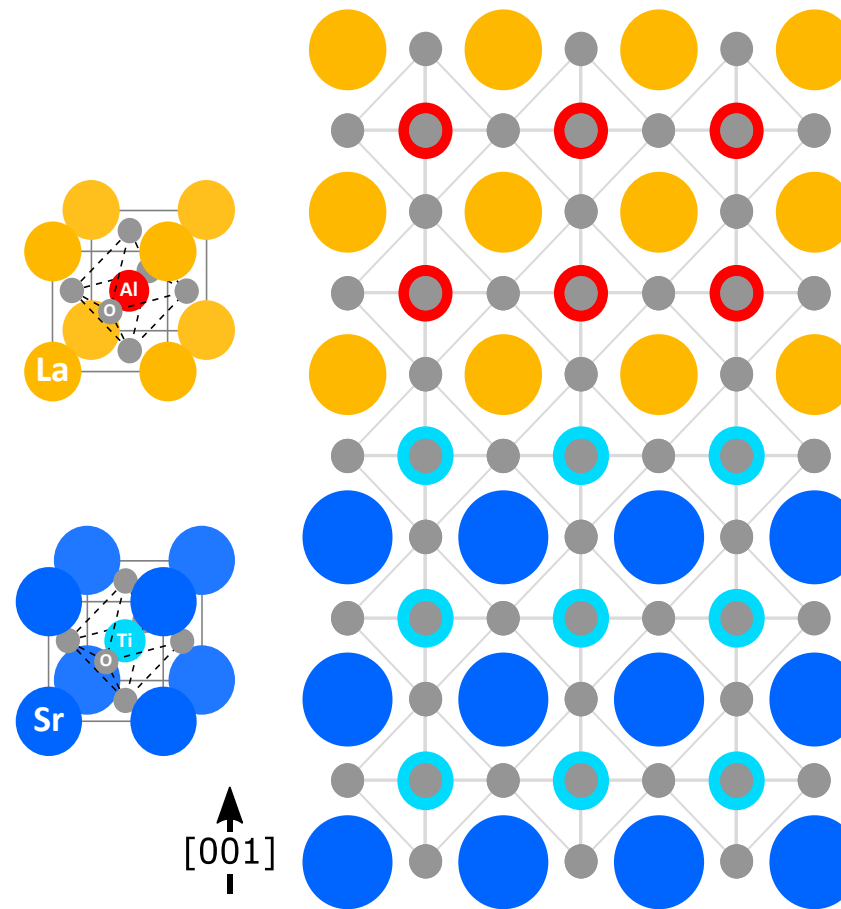
SrTiO₃
(STO)

A. Ohtomo & H. Y. Hwang, *Nature* **423**, 427 (2004)

Formation d'un système Rashba à l'interface

Croissance en couche mince

→ hétérostructures



LaAlO₃
(LAO)

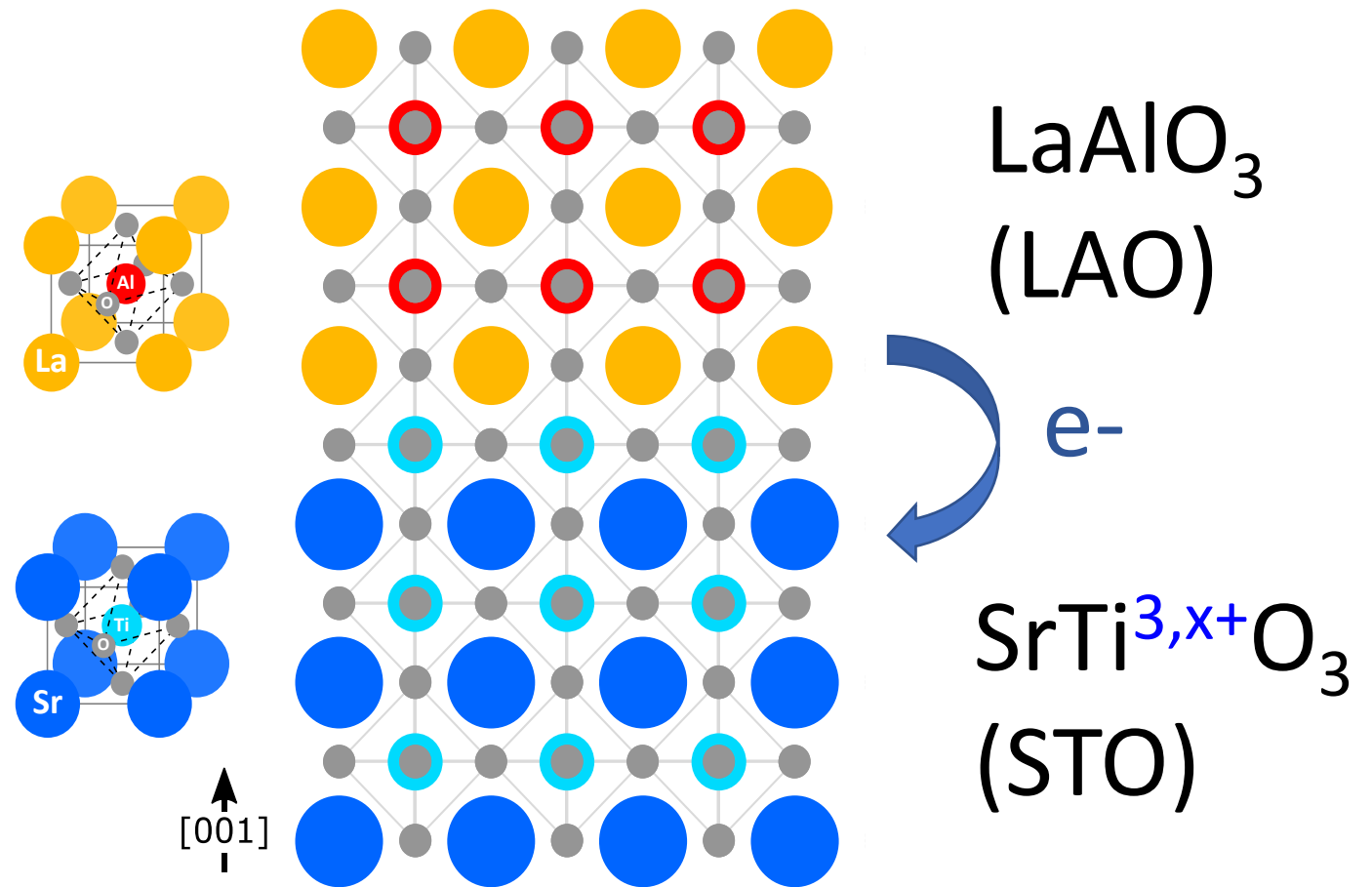
SrTi⁴⁺O₃
(STO)

A. Ohtomo & H. Y. Hwang, *Nature* **423**, 427 (2004)

Formation d'un système Rashba à l'interface

Croissance en couche mince

→ hétérostructures



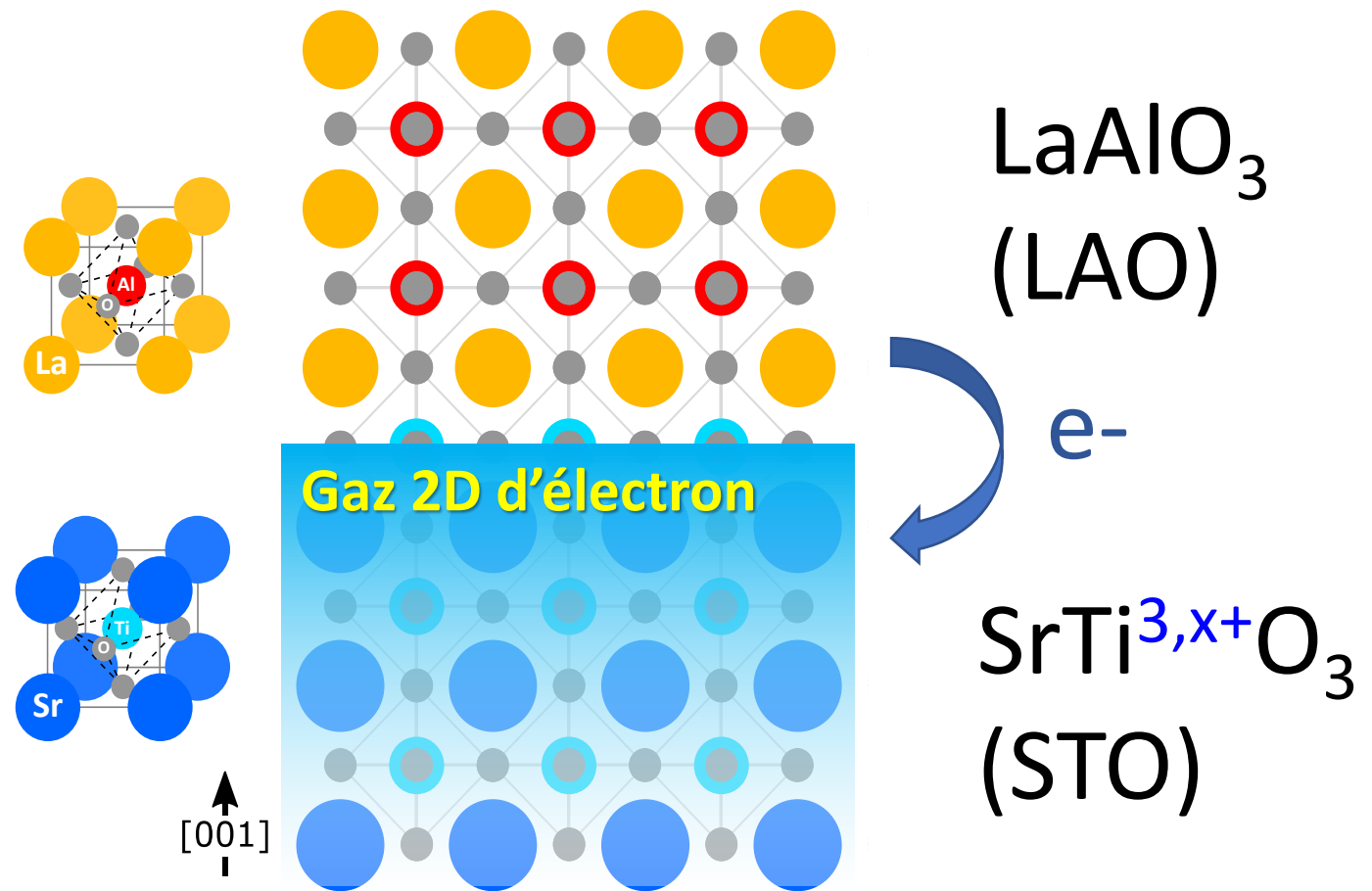
A. Ohtomo & H. Y. Hwang, *Nature* **423**, 427 (2004)

Formation d'un système Rashba à l'interface

Croissance en couche mince

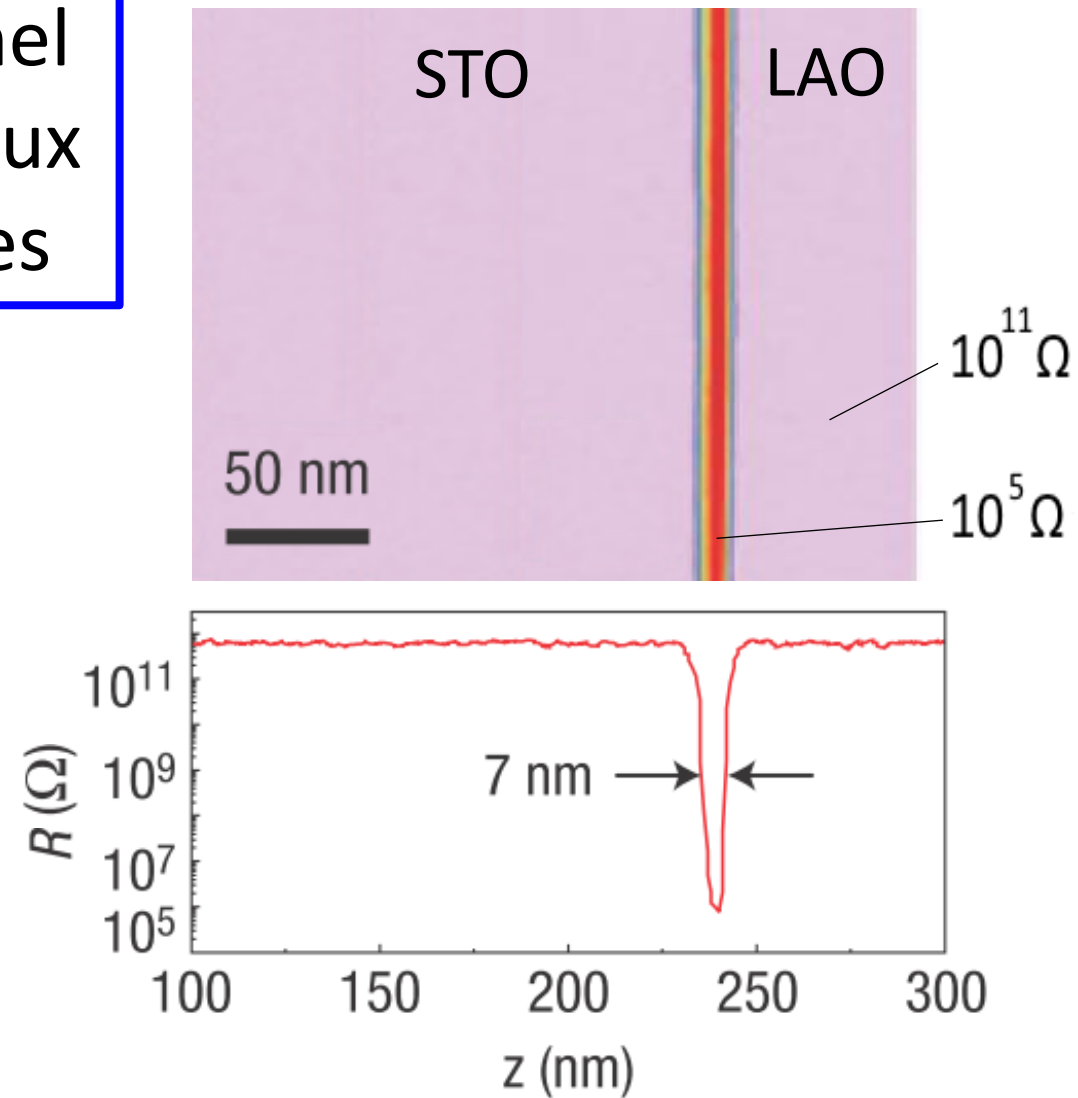
→ hétérostructures

→ Nouvelles propriétés à l'interface !



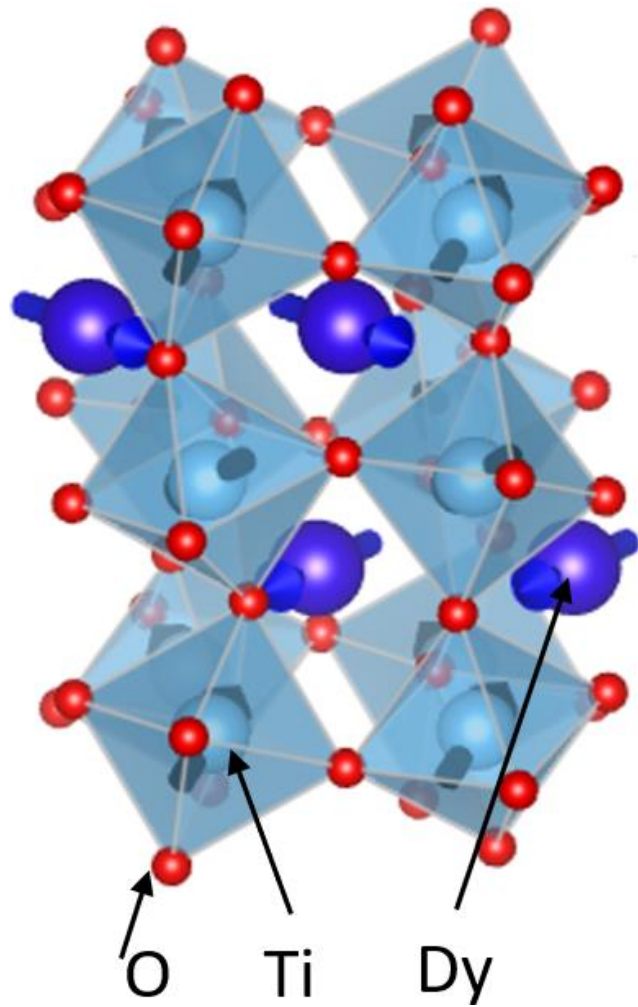
A. Ohtomo & H. Y. Hwang, *Nature* **423**, 427 (2004)

Gaz bidimensionnel
à l'interface de deux
isolants de bandes



M. Basletic et al. Nat. Mater. **7**, 621 (2008)

- 1) Établir les conditions de croissance optimale des titanates de terres rares magnétiques (DyTiO_3)
- 2) Étude de la valence des différents éléments de la structure
- 3) *Réalisation d'une interface entre deux matériaux*

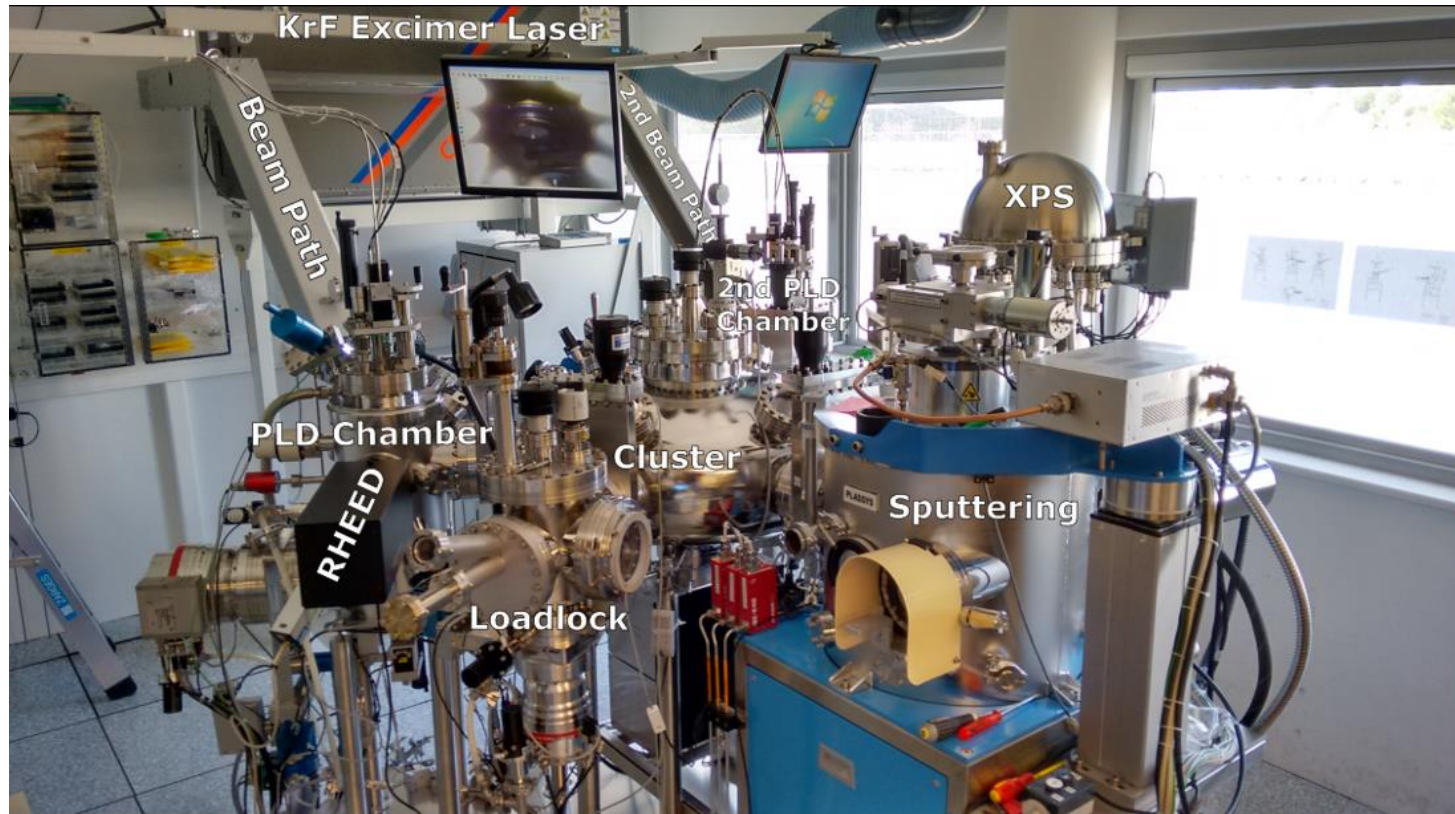


- ❖ Ti³⁺ : possède un electron *d*
- ❖ Magnétique
- ❖ Plus grand couplage spin orbite
- ❖ Valence Ti³⁺ complexe à obtenir

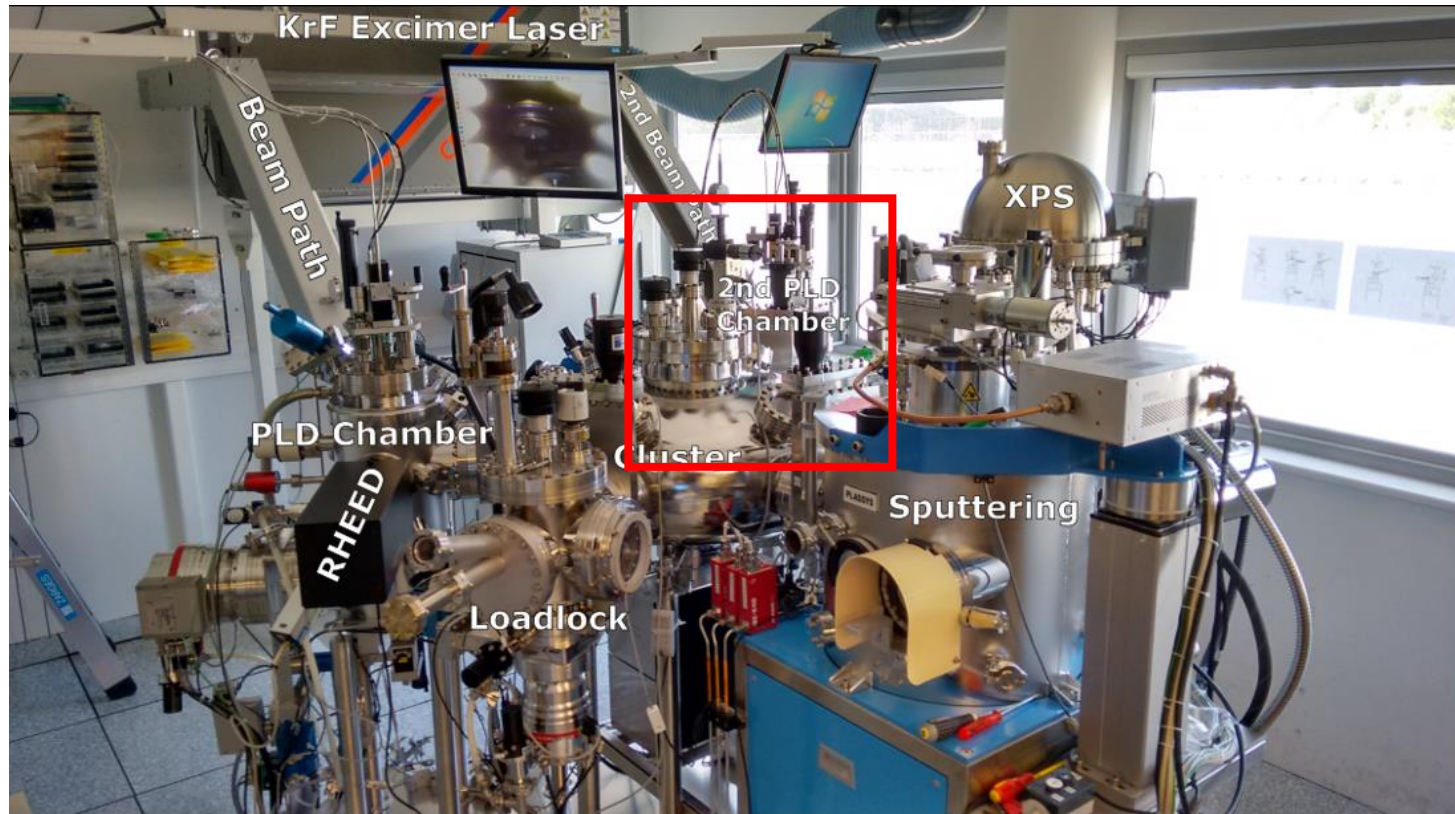


Substrat

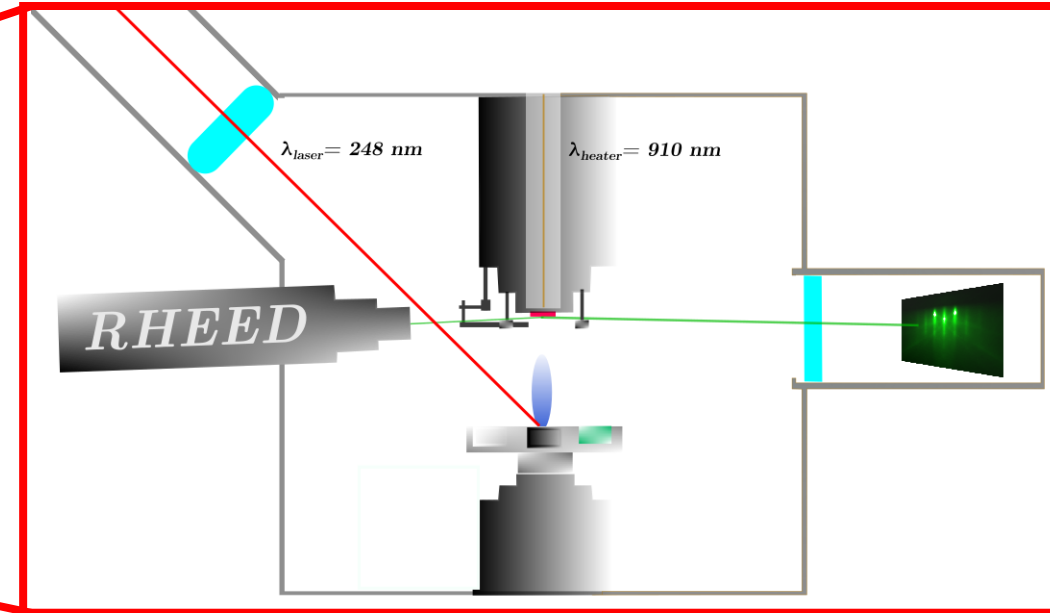
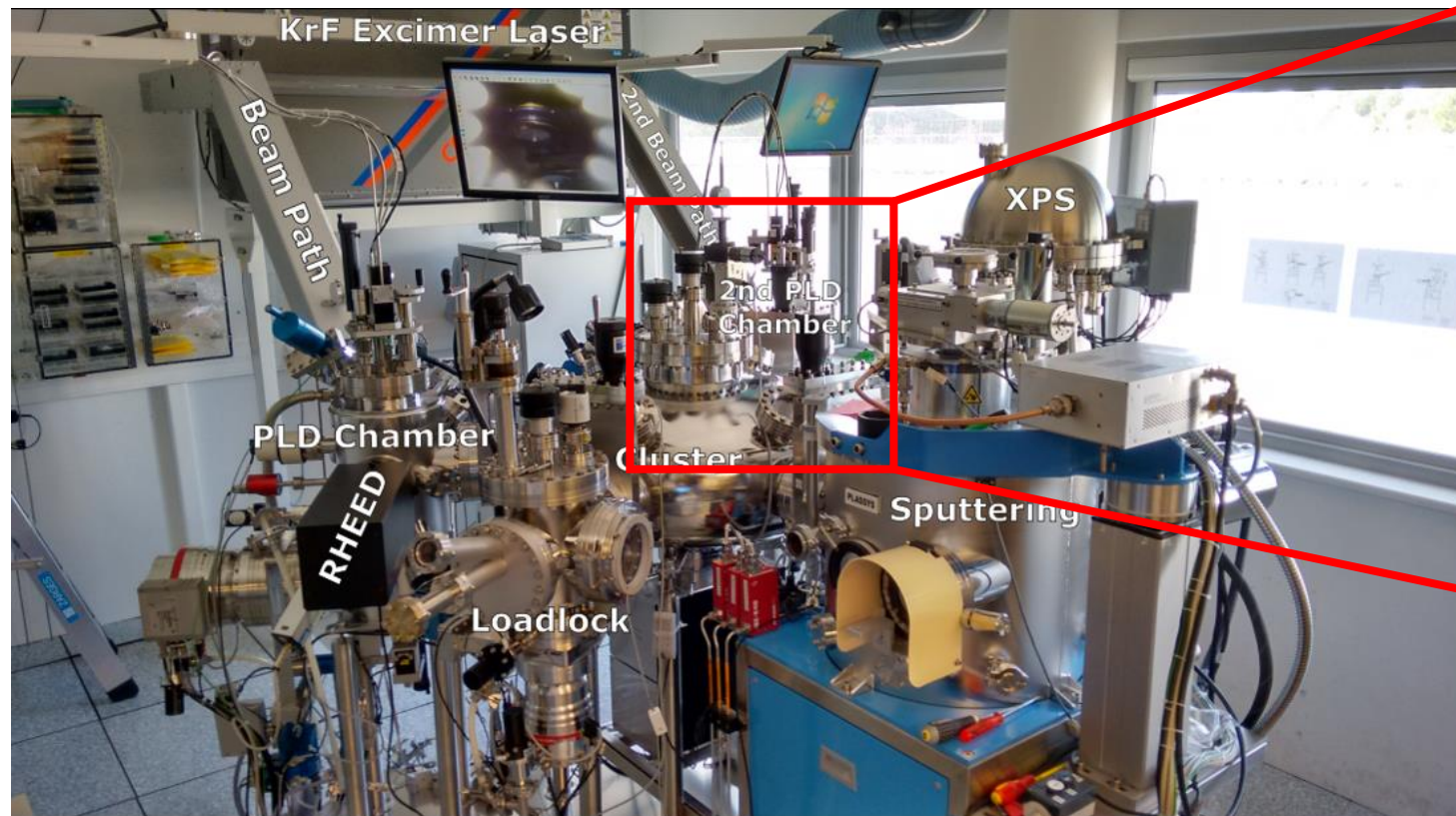
Fabrication des échantillons : ablation laser pulsé



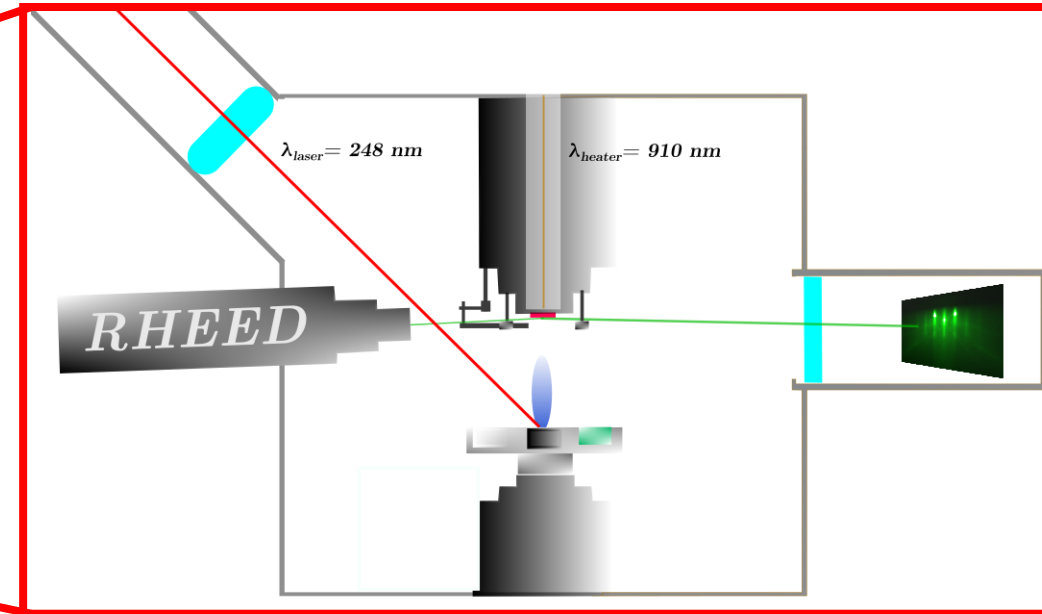
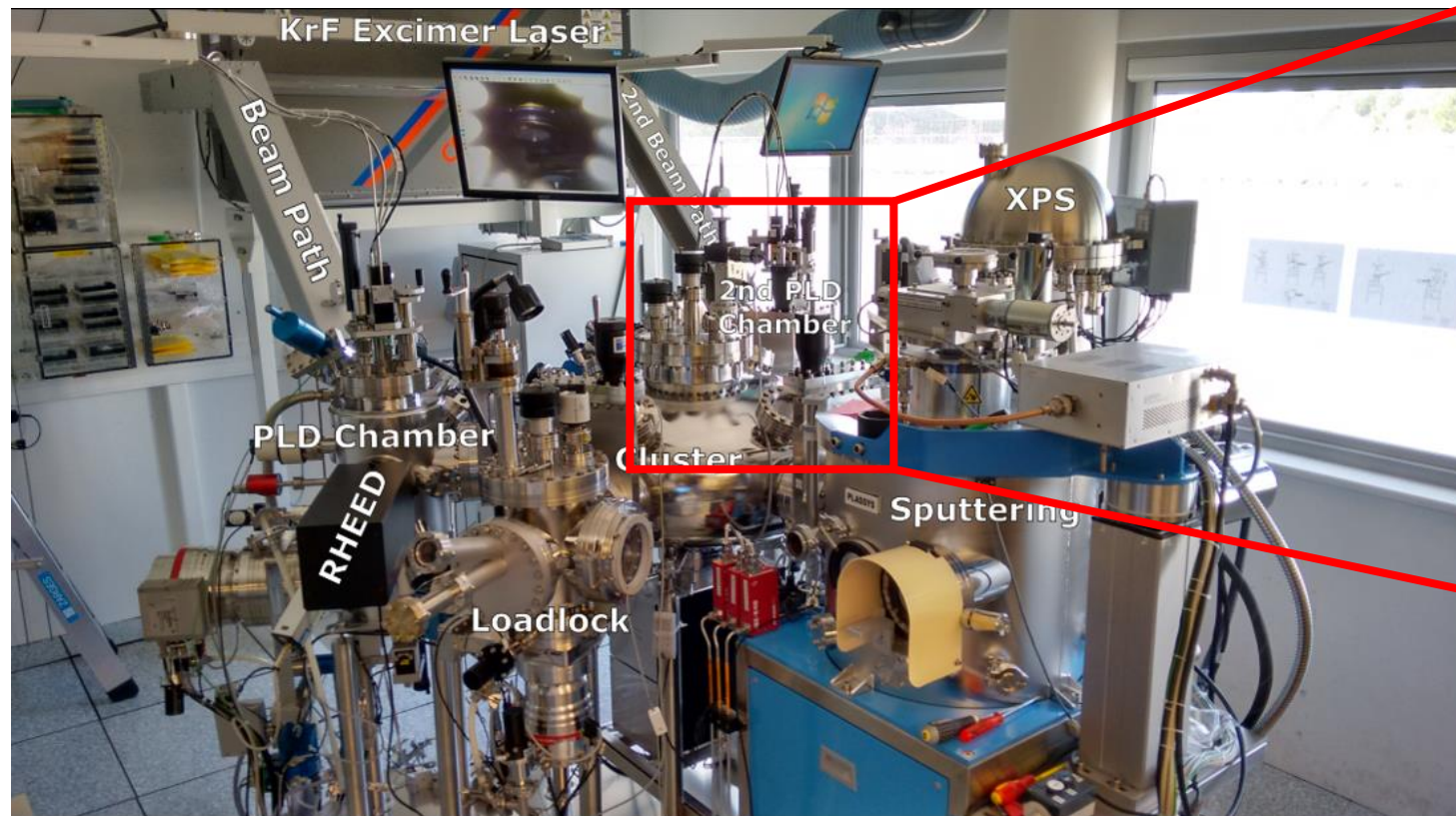
Fabrication des échantillons : ablation laser pulsé



Fabrication des échantillons : ablation laser pulsé



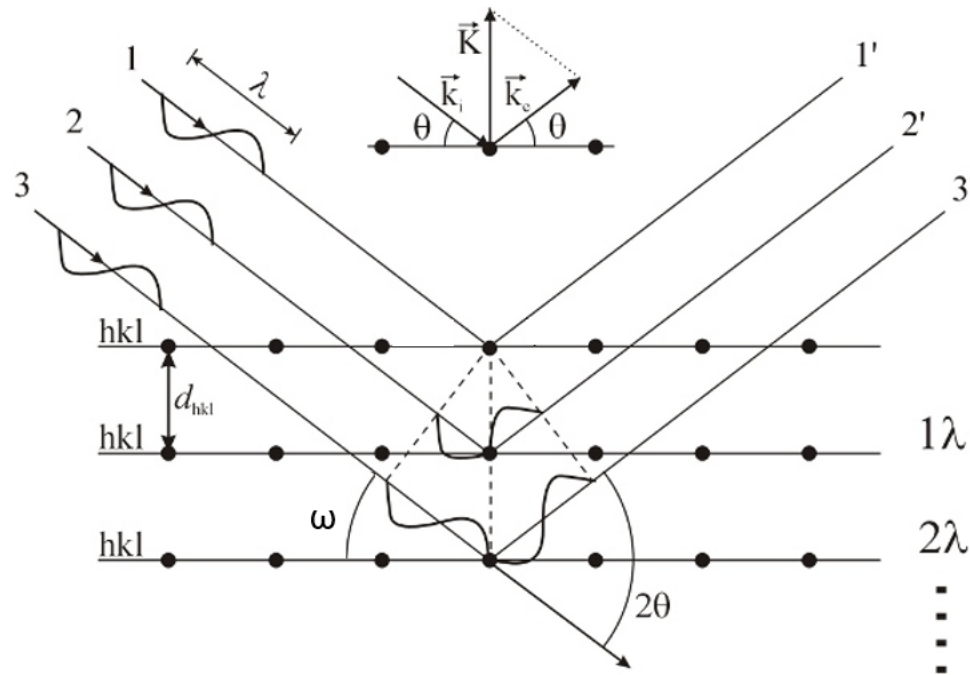
Fabrication des échantillons : ablation laser pulsé



Contrôle fin des conditions de croissance de nos couches minces

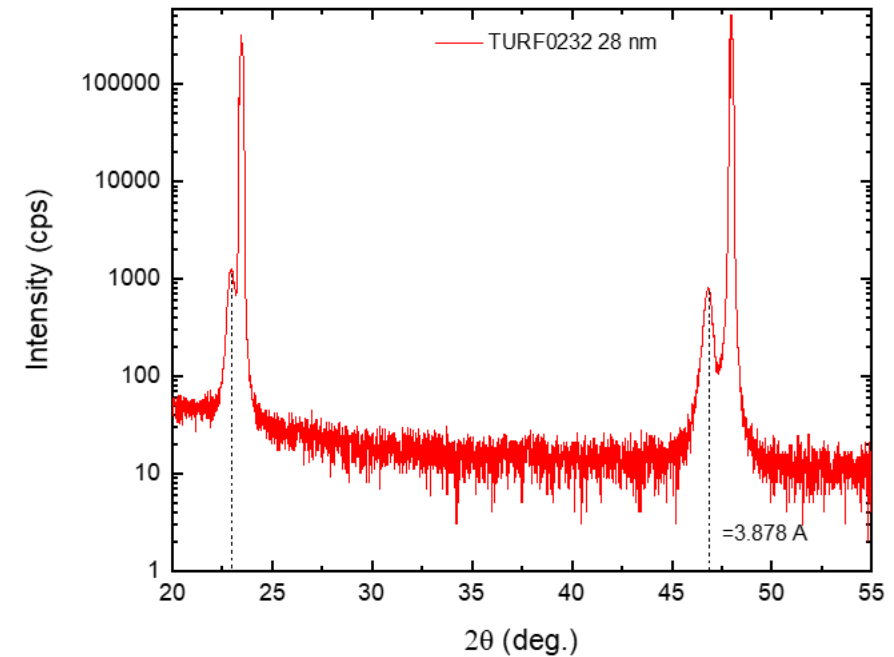
- Pulvérisation cathodique et XPS
- Suivi in-situ (RHEED)
- Pyromètre laser
- Laser excimer 248 nm
- Contrôle de la pression (Ar/O₂)

Caractérisation structurale par diffraction de rayons X



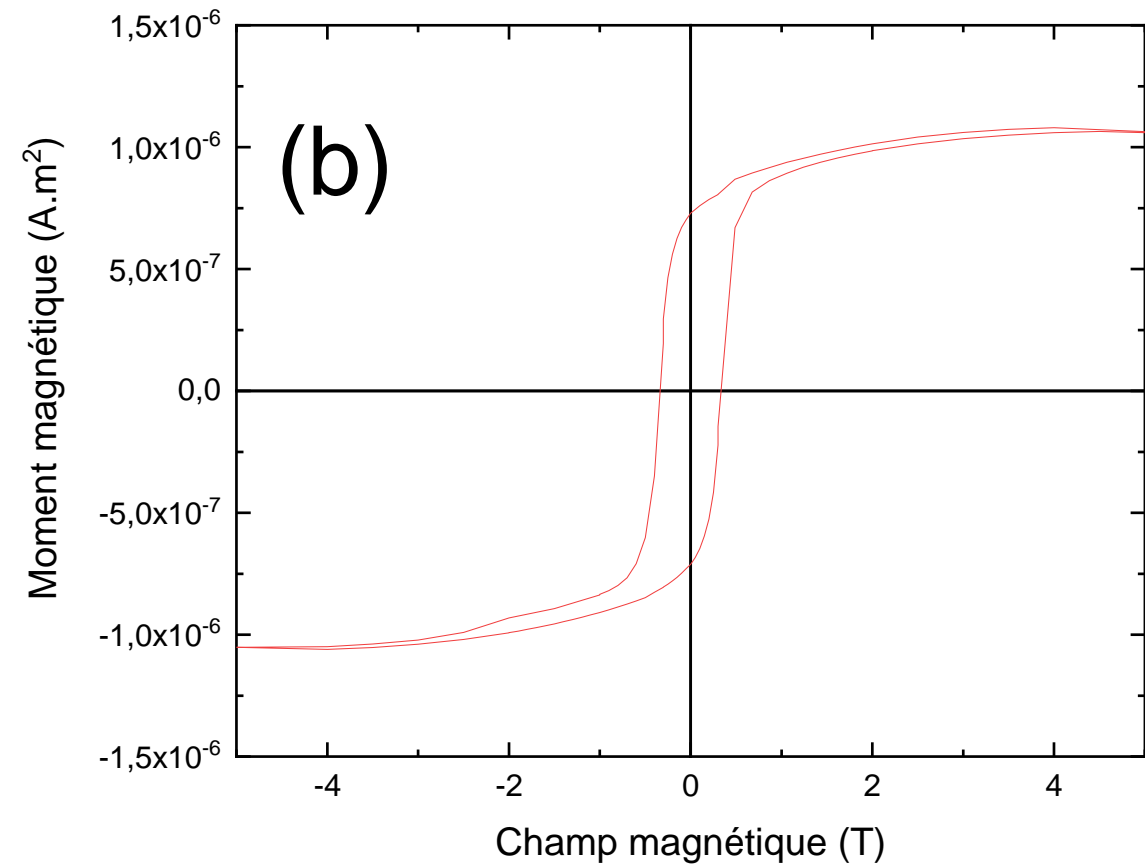
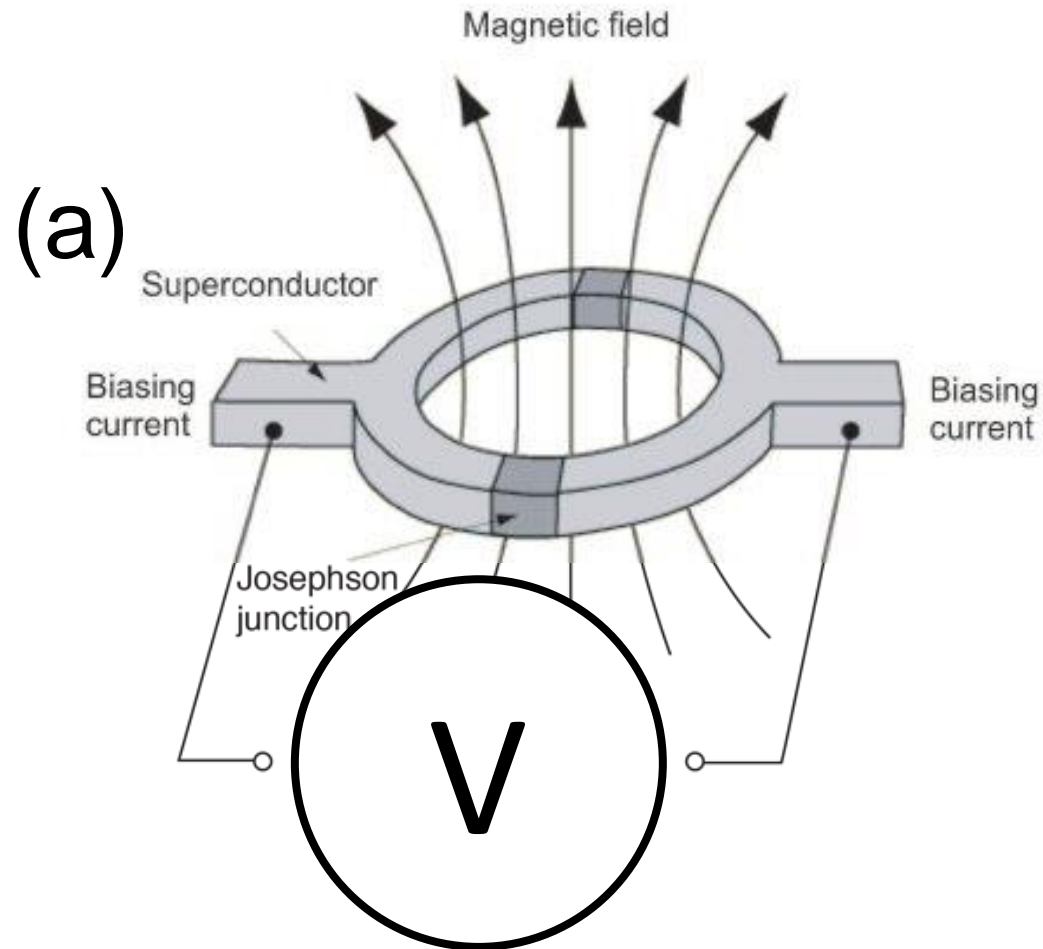
$$2d \sin(\theta) = p\lambda$$

Diffractogramme

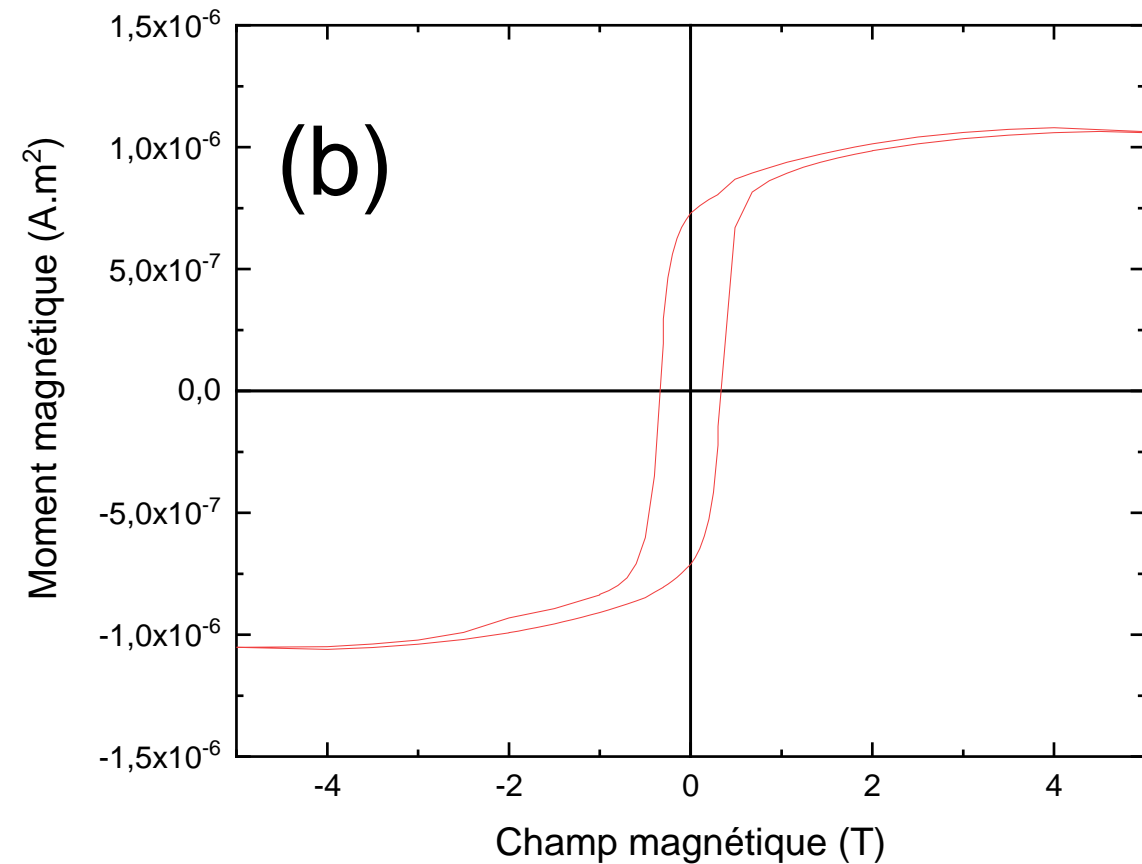
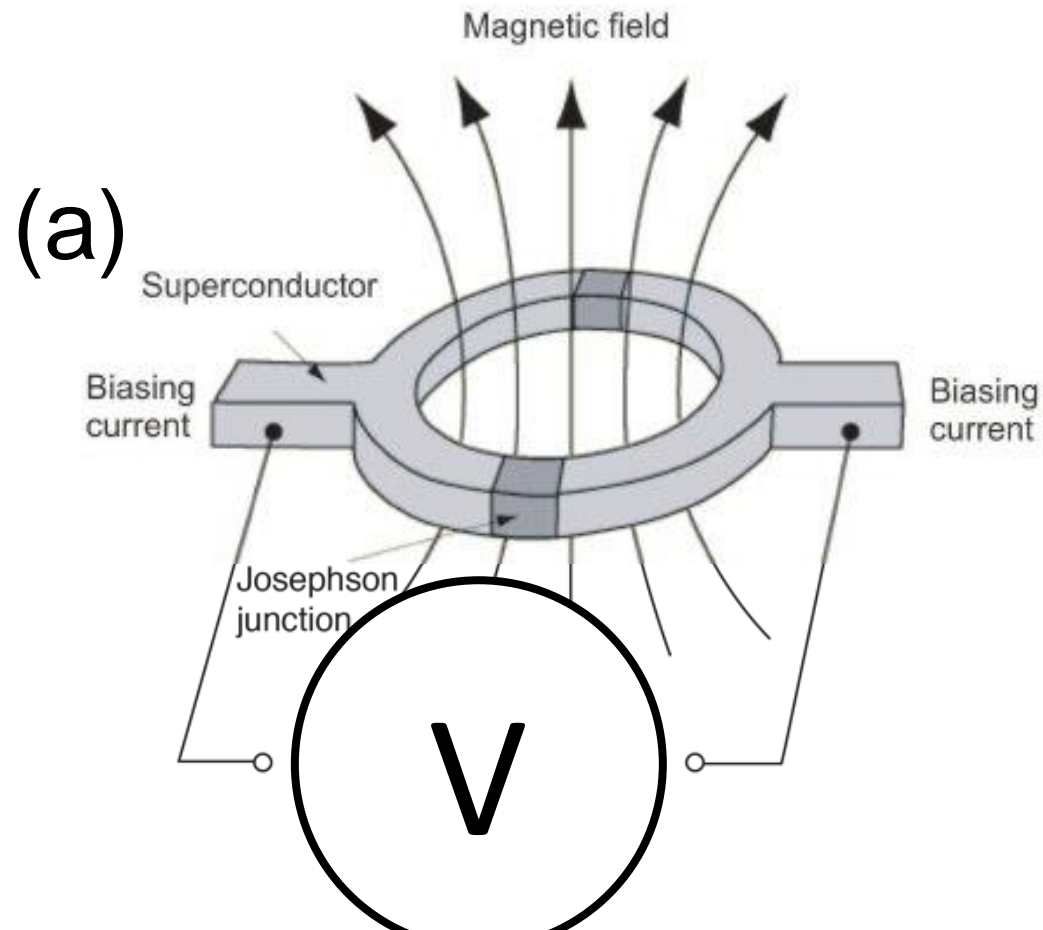


Permet la caractérisation de nos échantillons au niveau structural

Mesure de champ magnétique : fonctionnement d'un SQUID

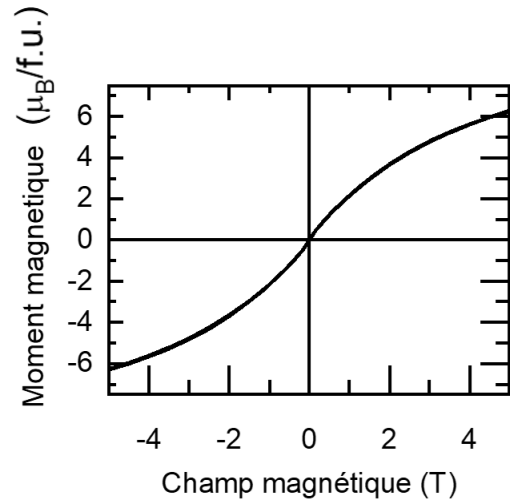
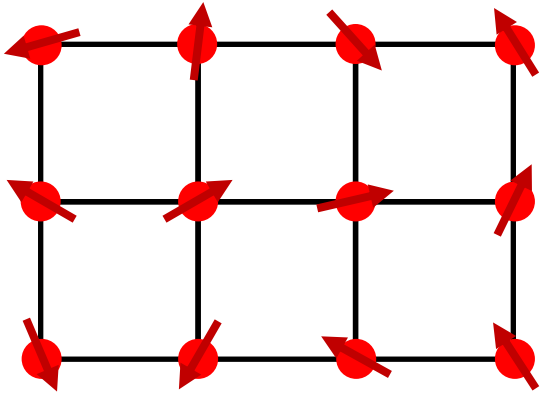


Mesure de champ magnétique : fonctionnement d'un SQUID

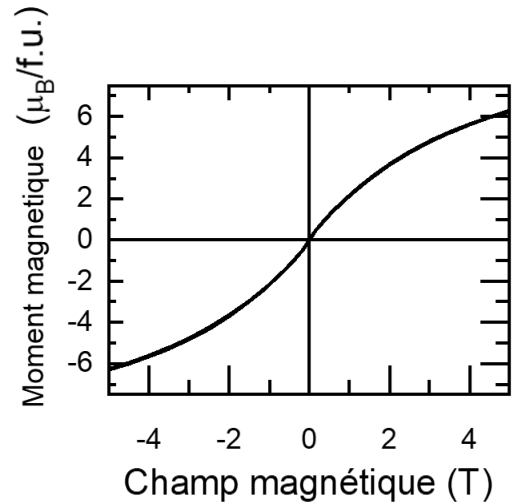
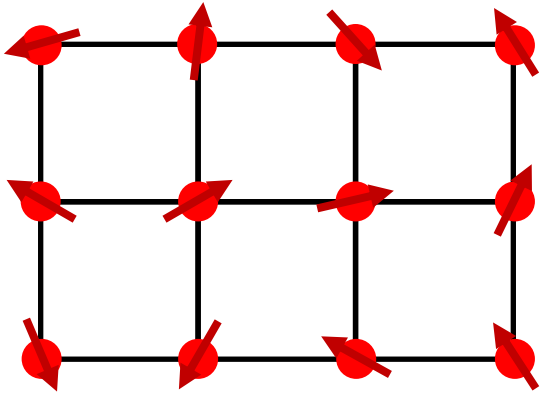


La quantification du flux magnétique dans un supraconducteur permet de mesurer précisément le moment magnétique des échantillons.

Paramagnétisme



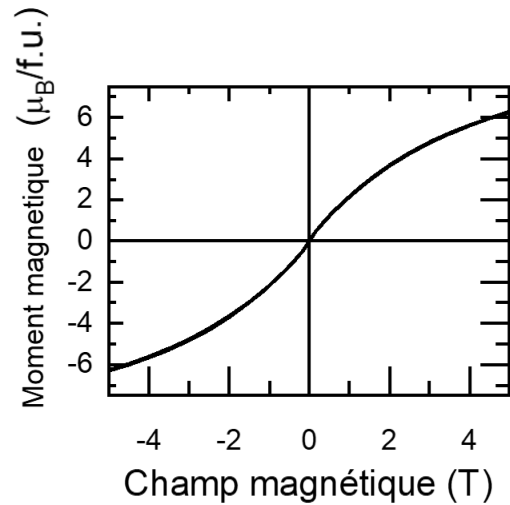
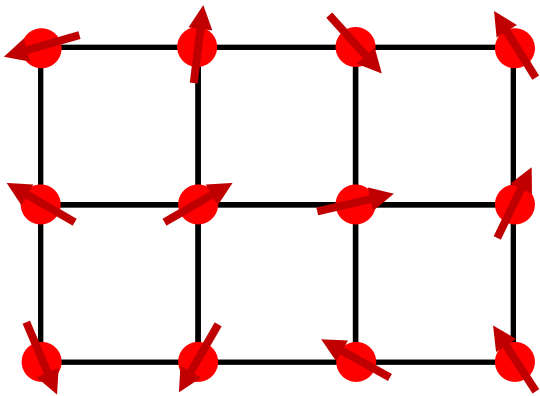
Paramagnétisme



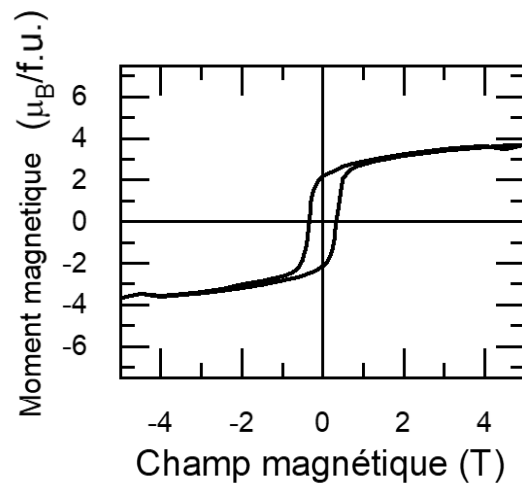
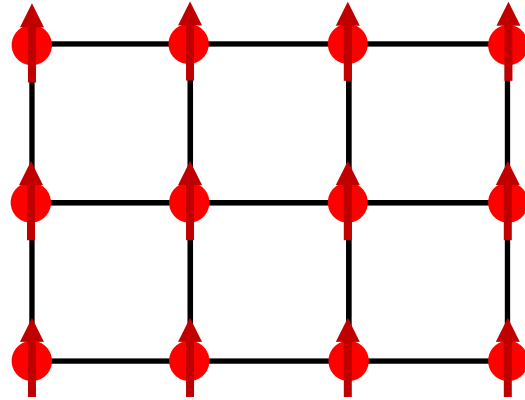
Magnéton de Bohr

$$\mu_B = -\frac{e\hbar}{2m_e}$$

Paramagnétisme

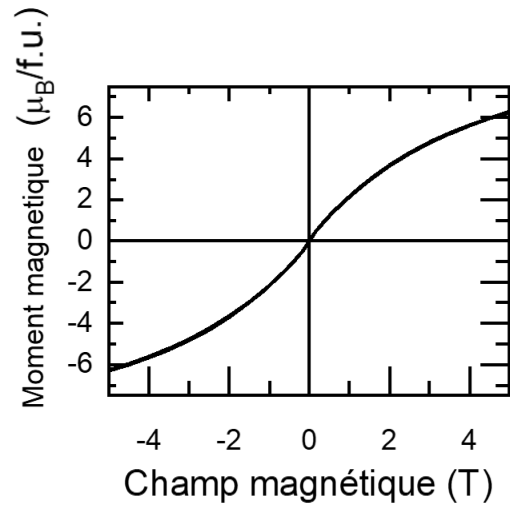
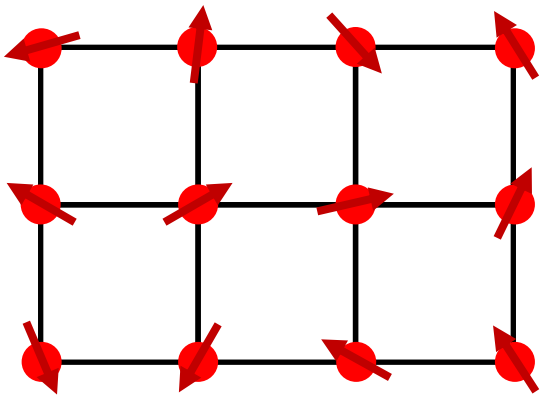


Ferromagnétisme

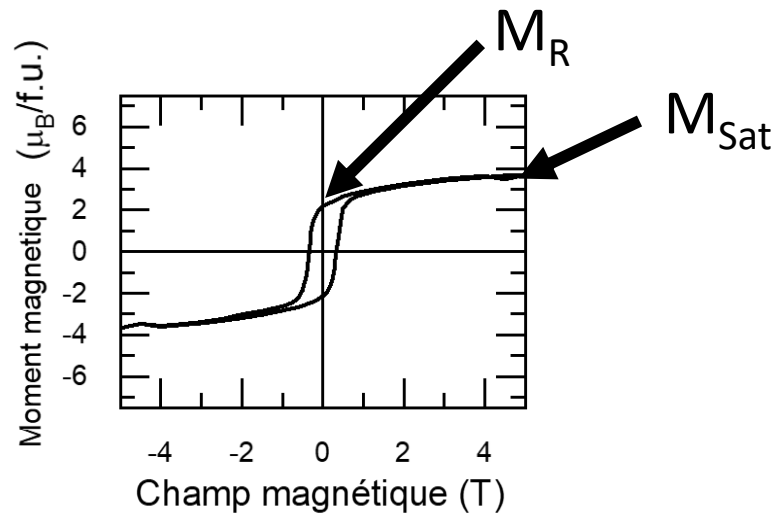
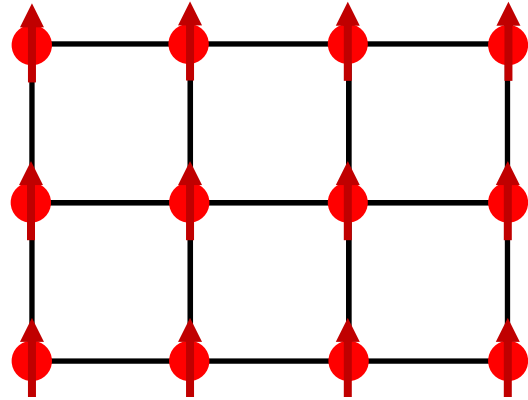


Richesse du magnétisme

Paramagnétisme

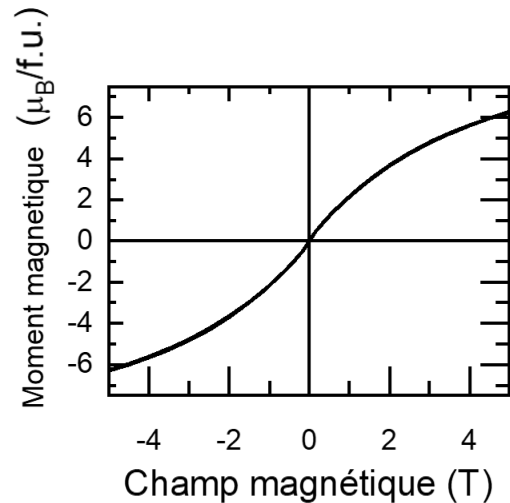
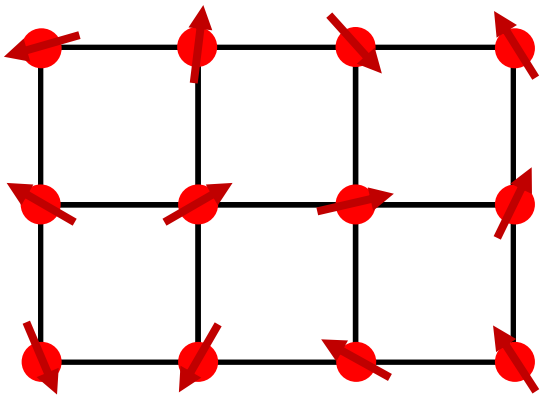


Ferromagnétisme

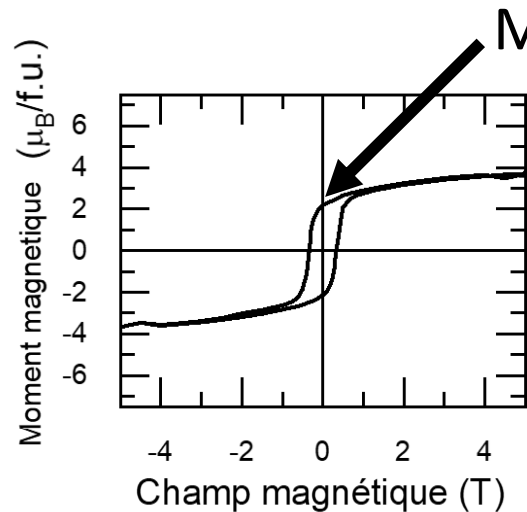
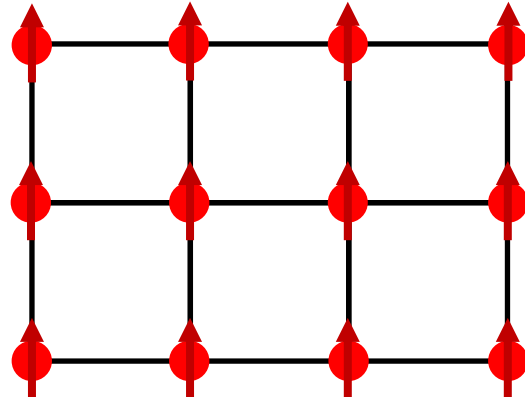


Richesse du magnétisme

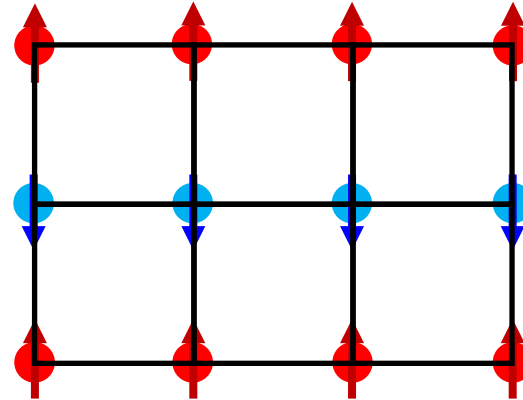
Paramagnétisme



Ferromagnétisme



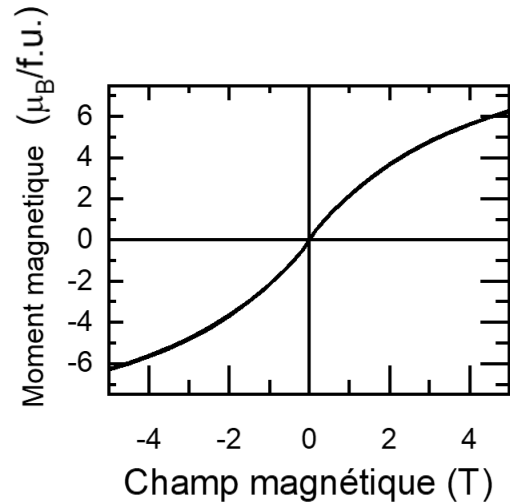
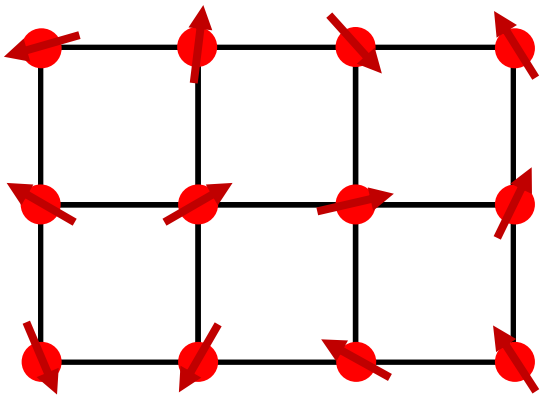
Antiferromagnétisme



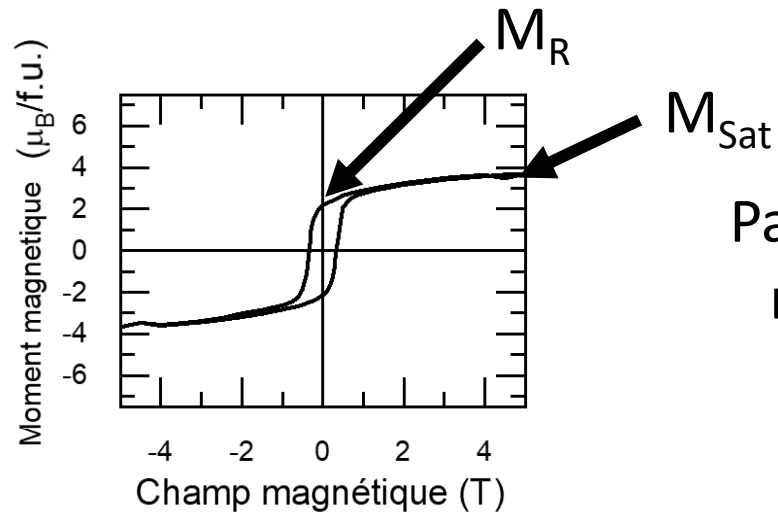
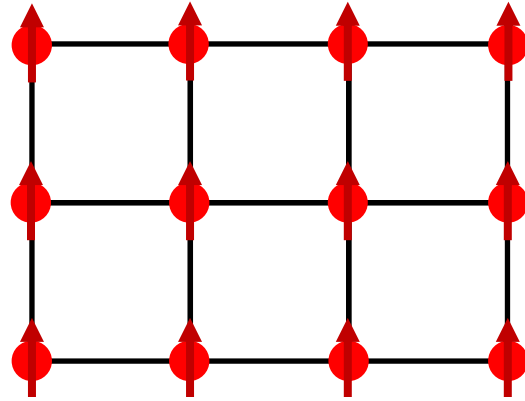
M_R
 M_{Sat}
Pas de réponse
magnétique

Richesse du magnétisme

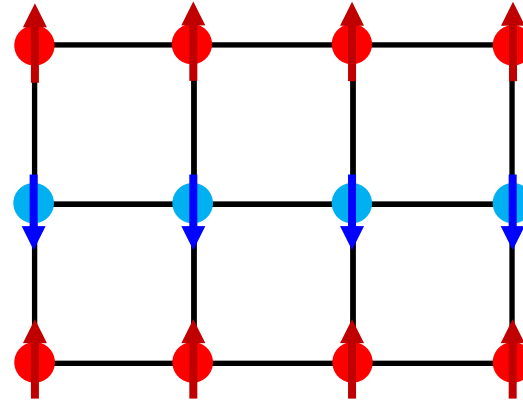
Paramagnétisme



Ferromagnétisme

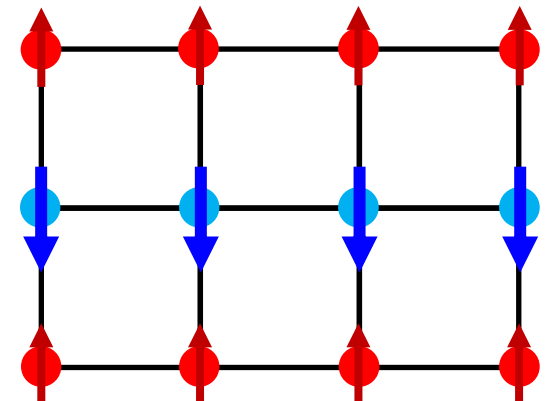


Antiferromagnétisme



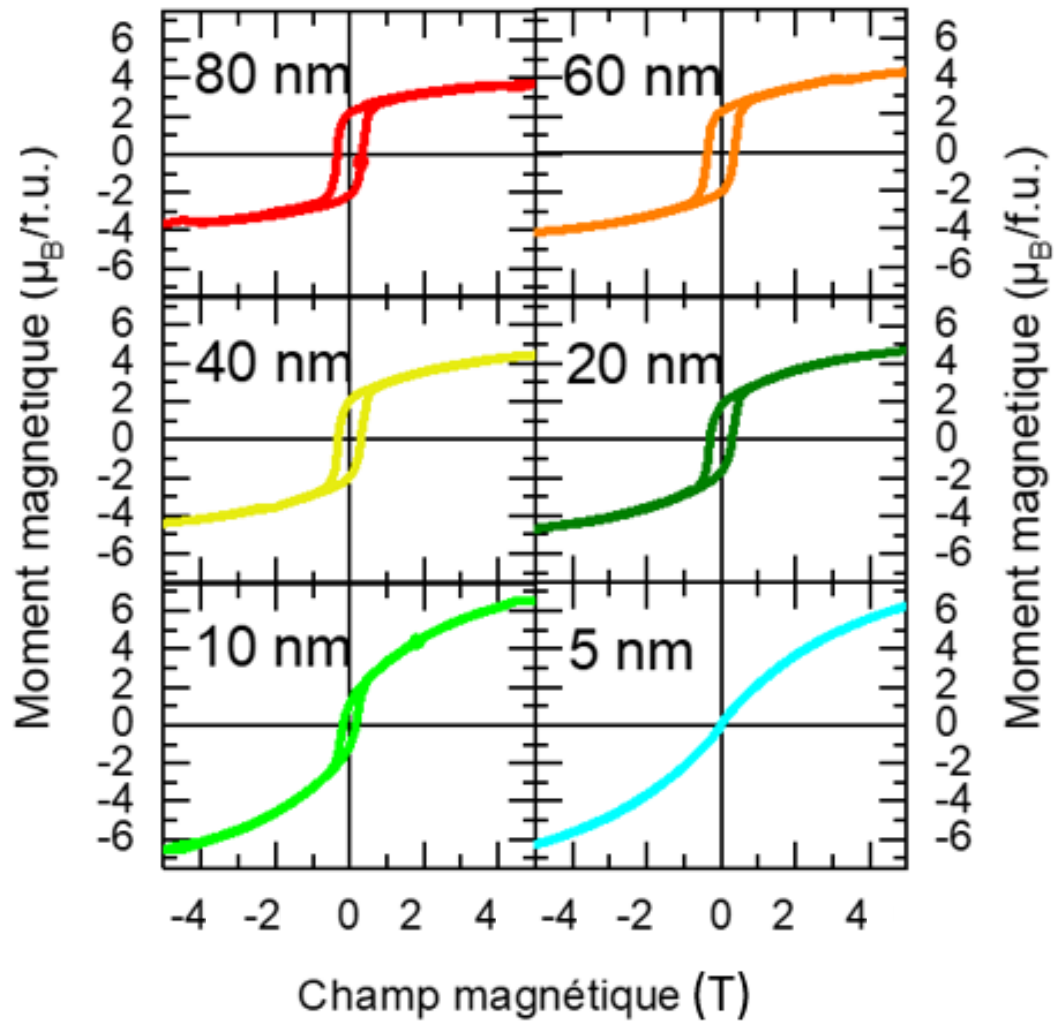
Pas de réponse
magnétique

Ferrimagnétisme

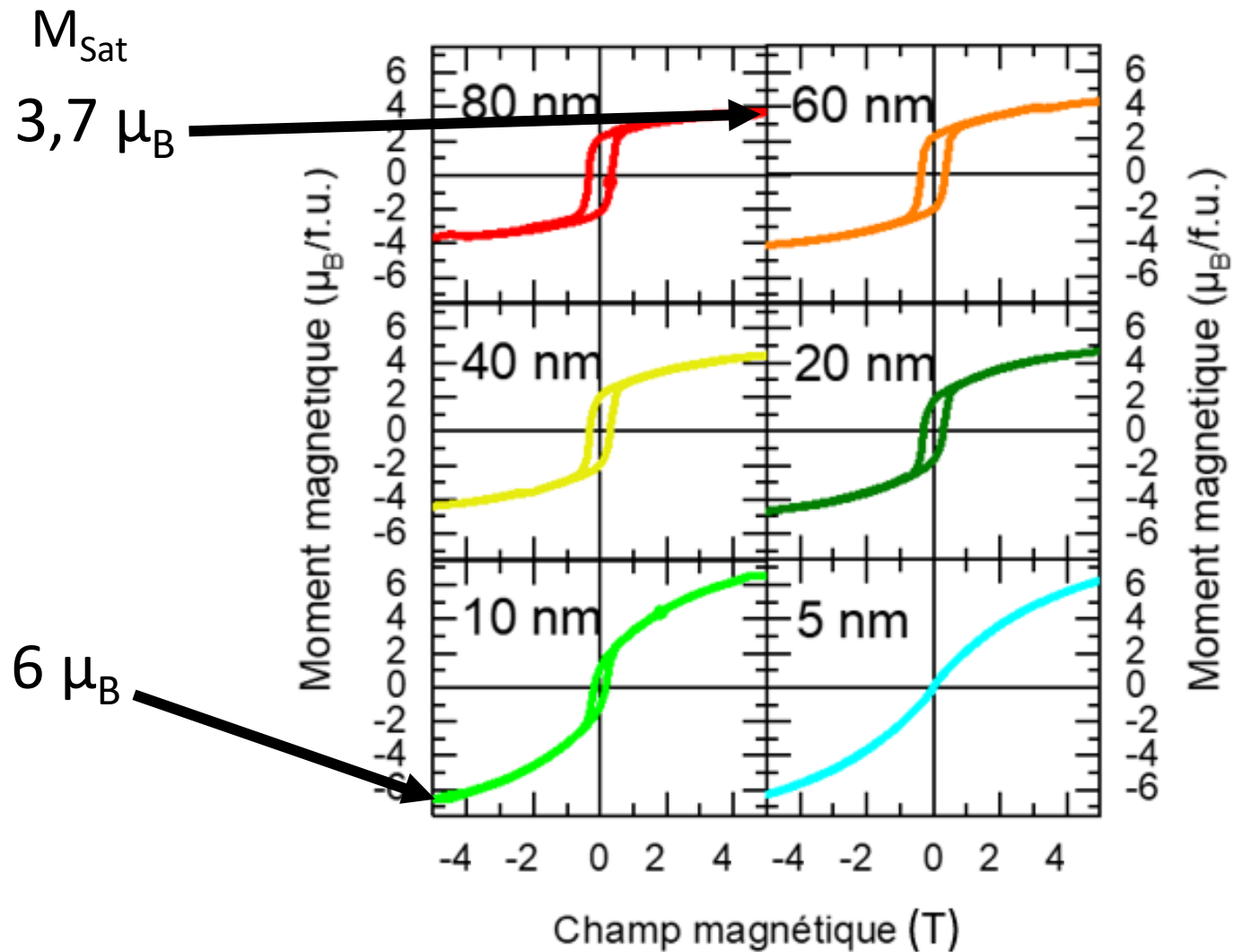


Idem
ferromagnétisme

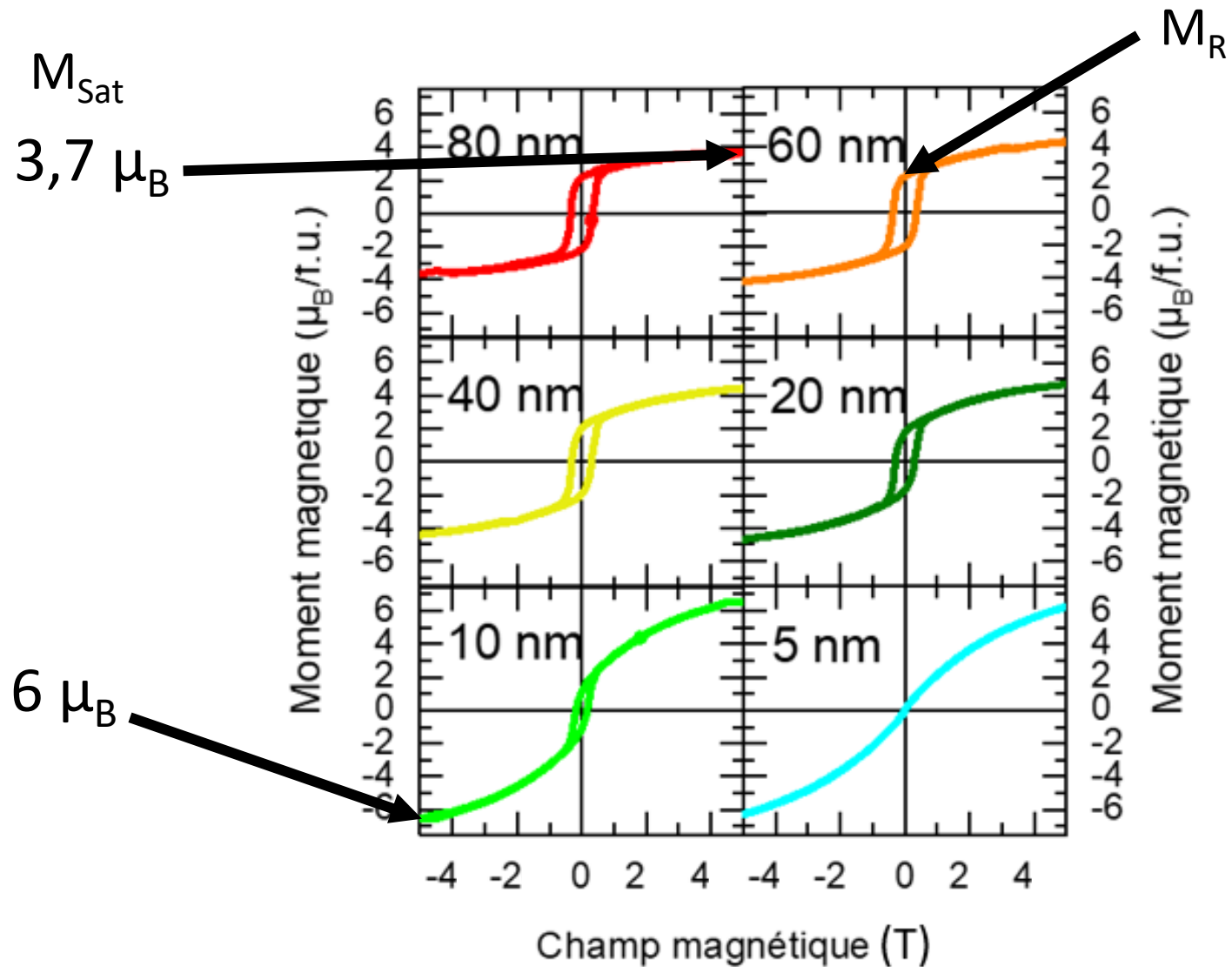
Dépendance en épaisseur des propriétés magnétiques



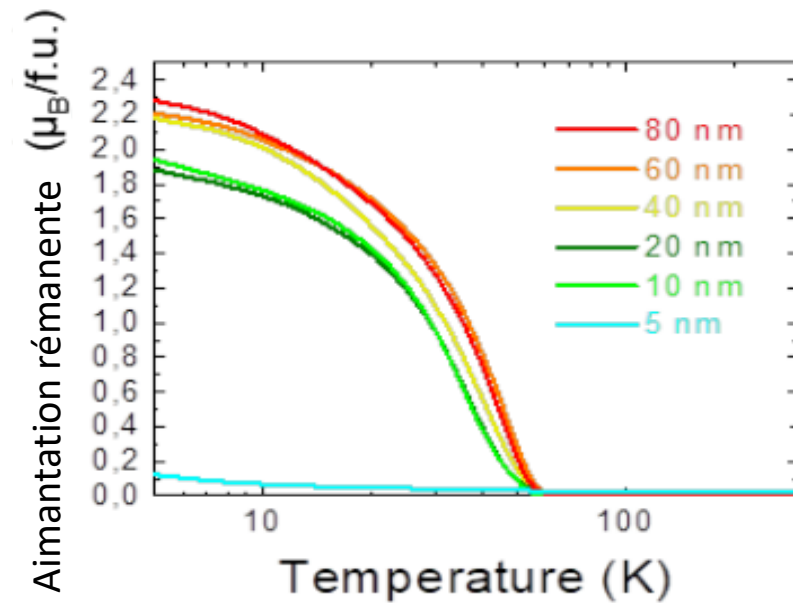
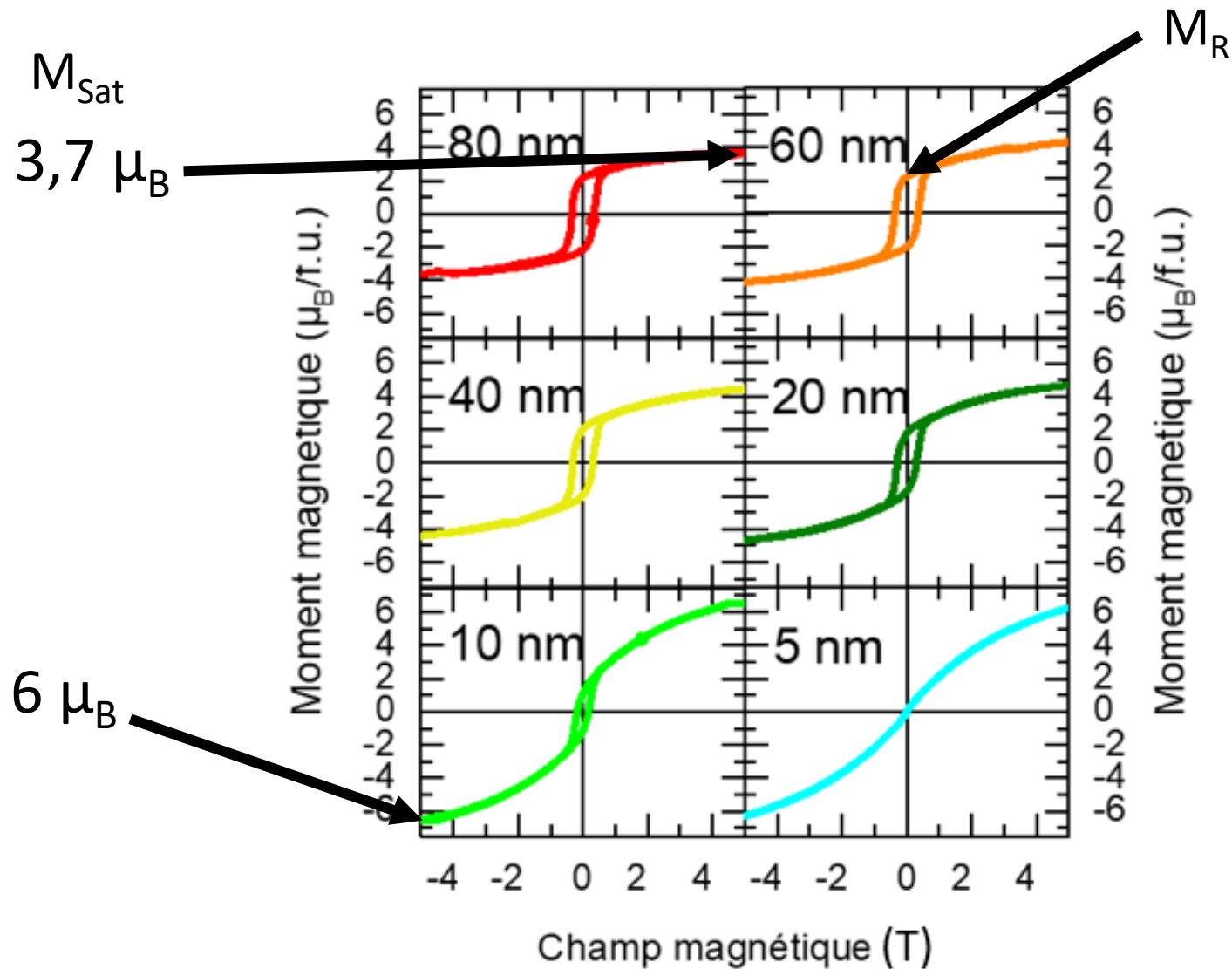
Dépendance en épaisseur des propriétés magnétiques



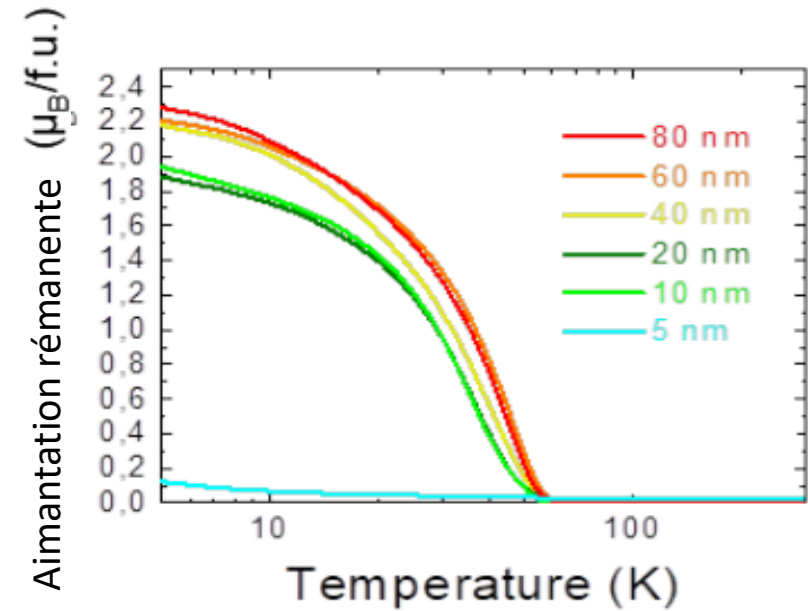
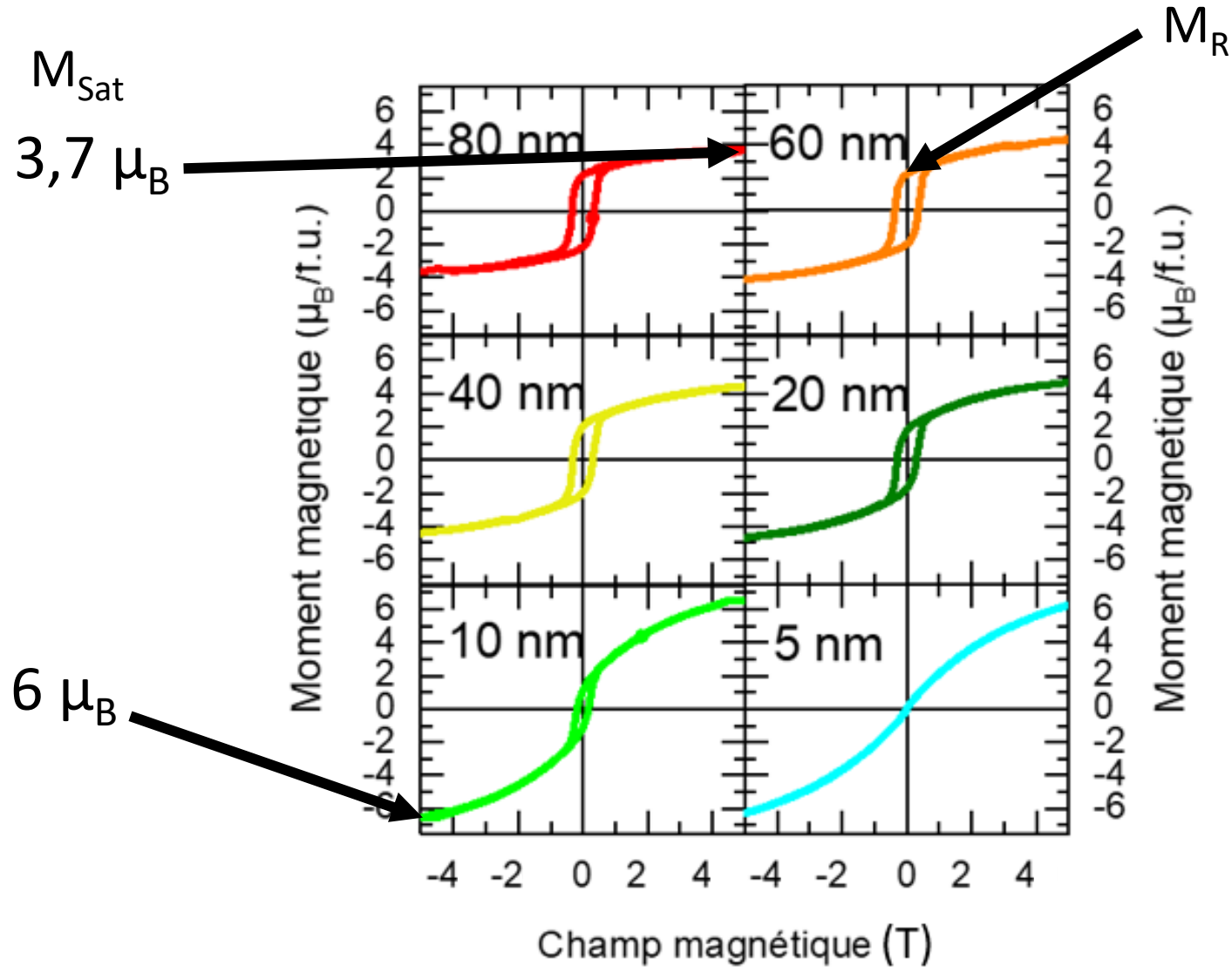
Dépendance en épaisseur des propriétés magnétiques



Dépendance en épaisseur des propriétés magnétiques



Dépendance en épaisseur des propriétés magnétiques

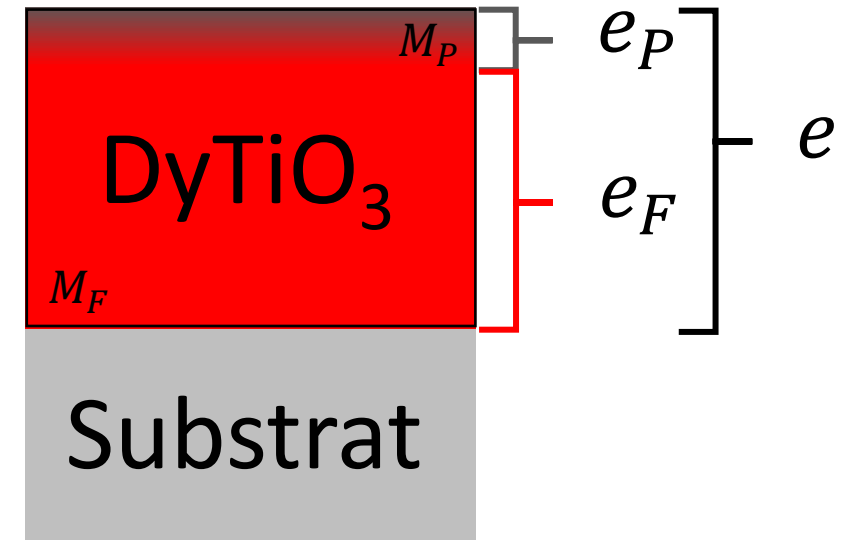
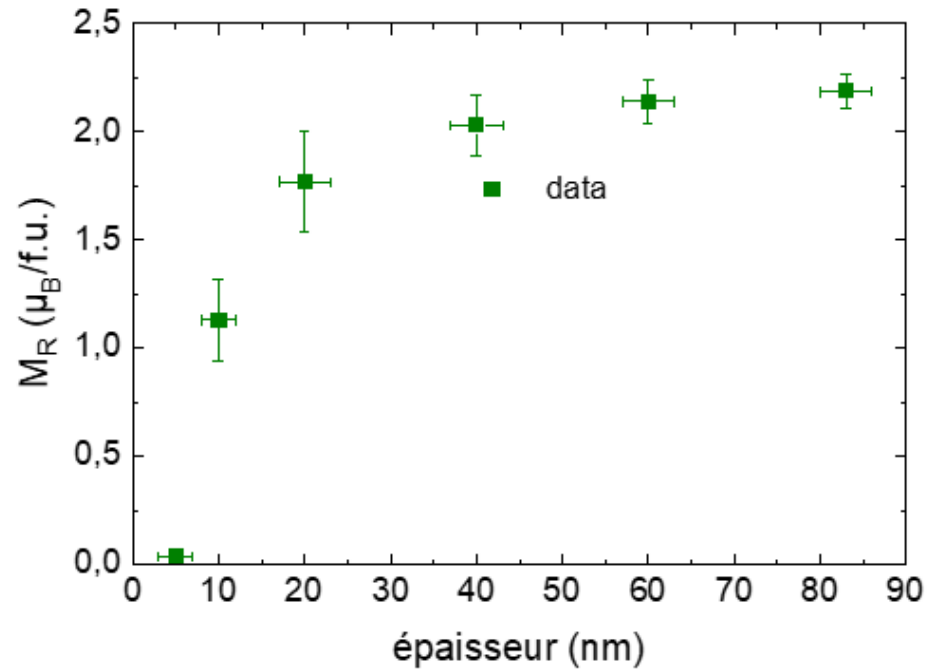


Observations

- M_R ↘ quand e ↘
- M_{sat} ↗ quand e ↘

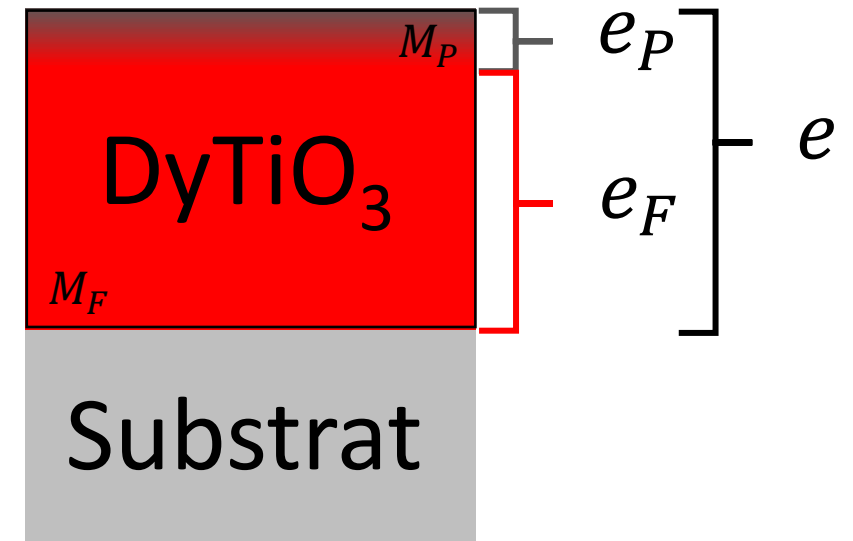
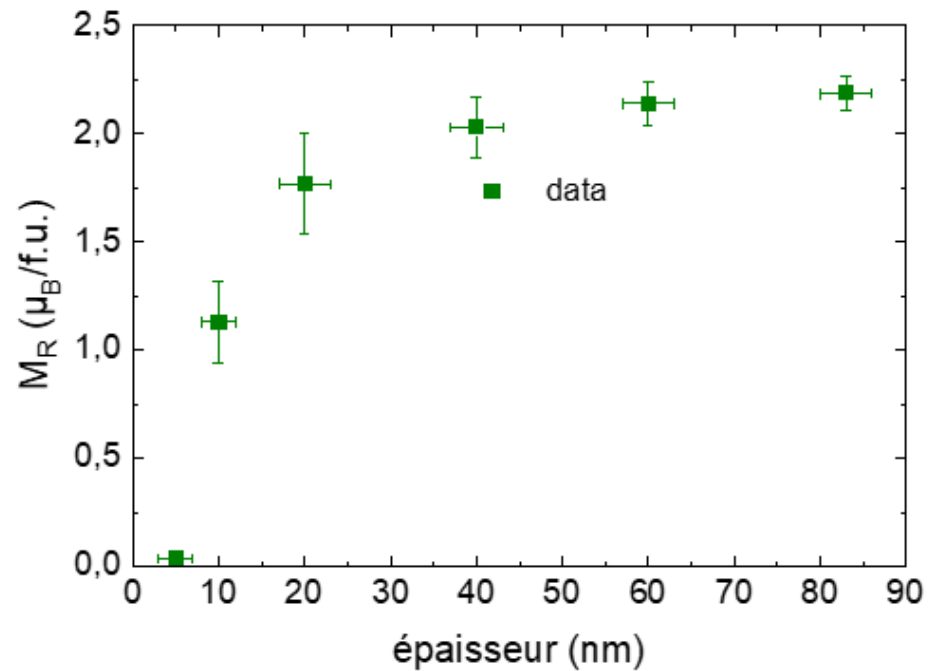
Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**



Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

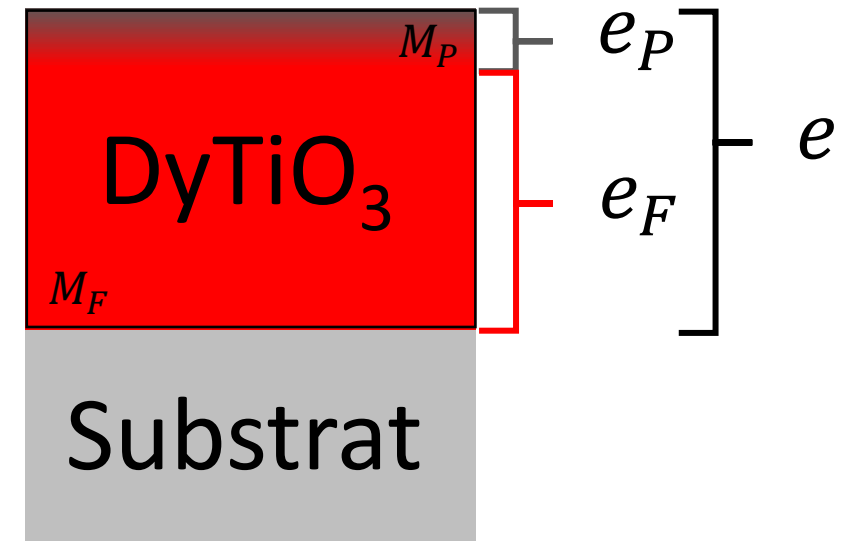
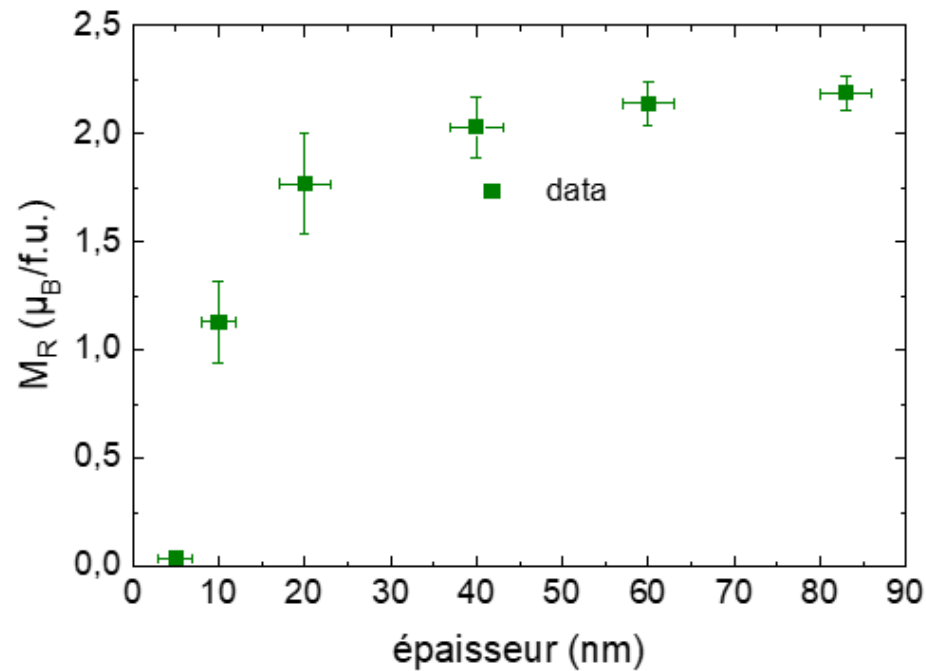
$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**



$$M_{\text{total}} \cdot e = M_P \cdot e_P + M_F \cdot e_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

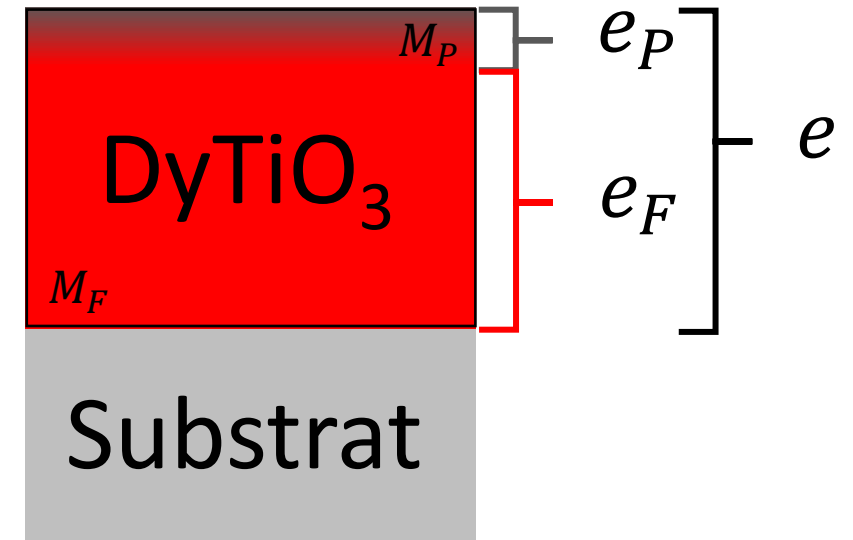
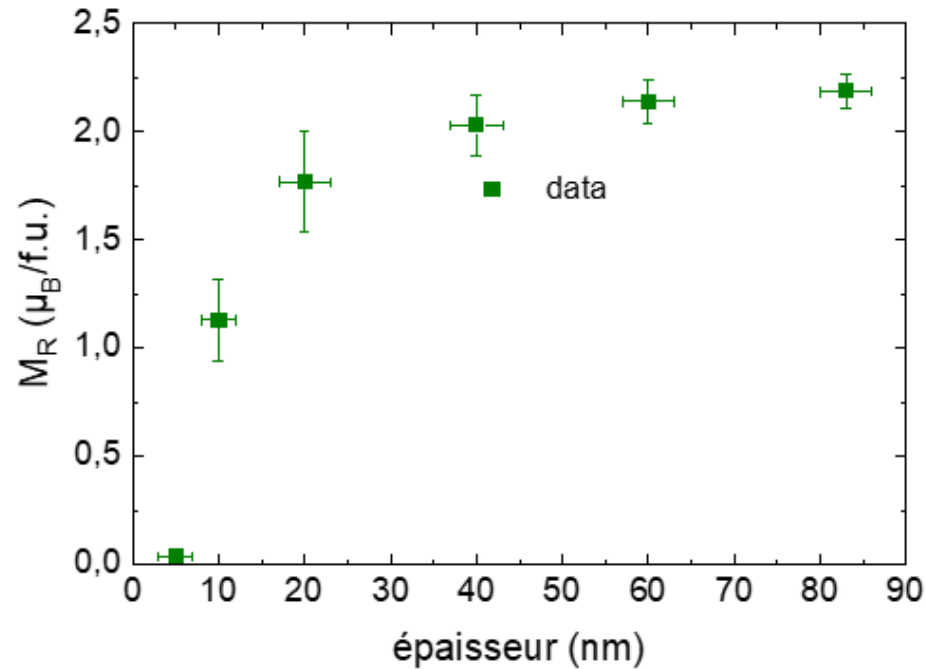


$$M_{\text{total}} \cdot e = M_P \cdot e_P + M_F \cdot e_F$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

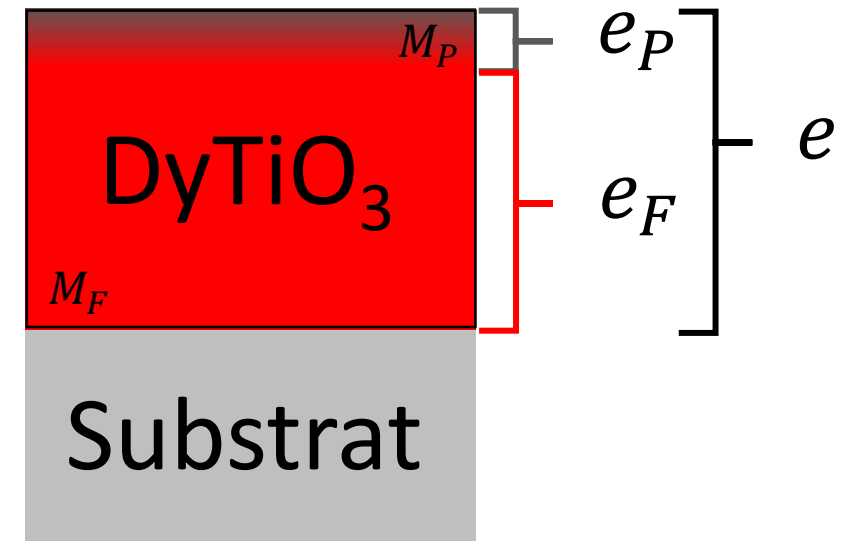
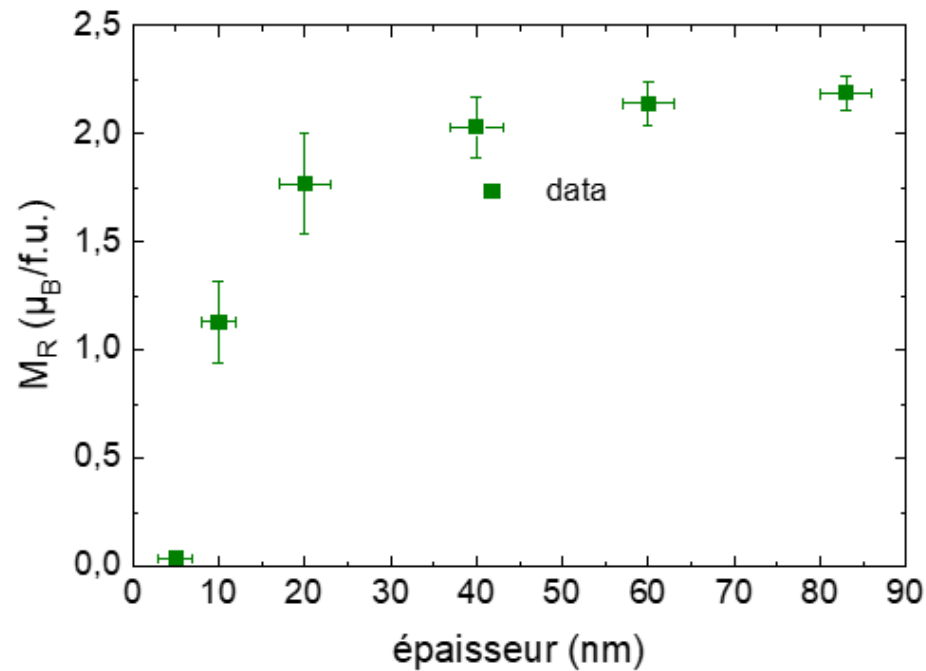


$$(M_P - M_F) < 0$$

$$M_{total} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

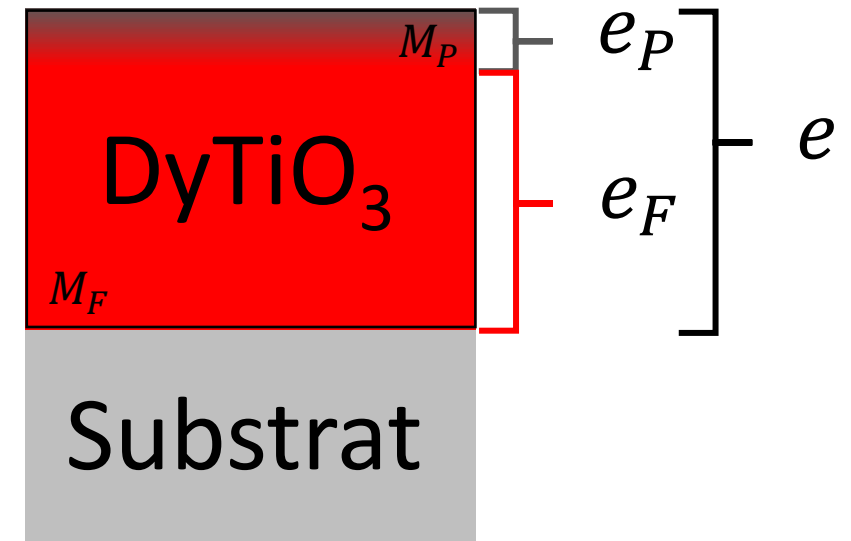
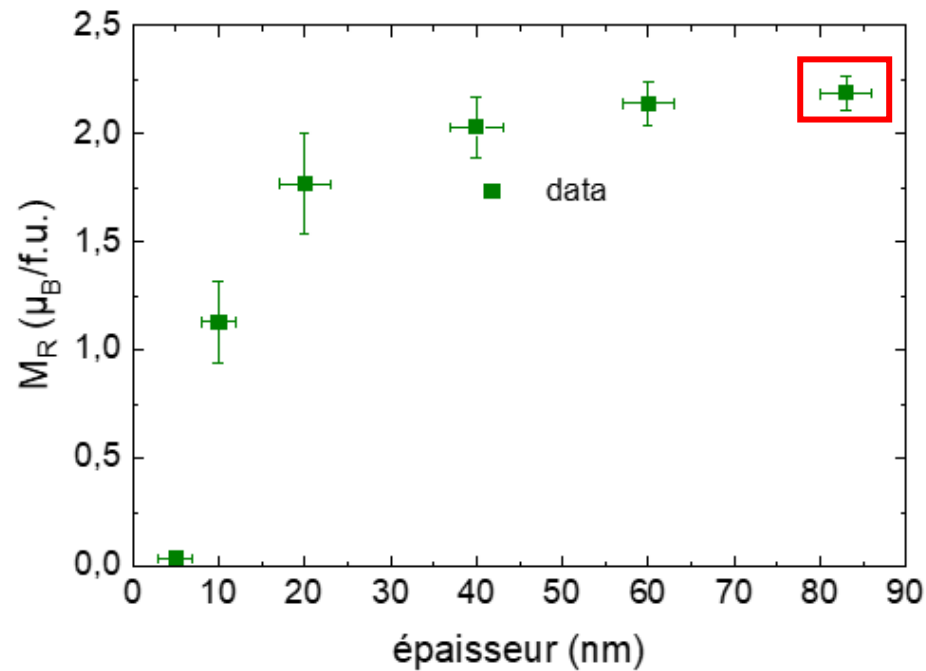


$$(M_P - M_F) < 0$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

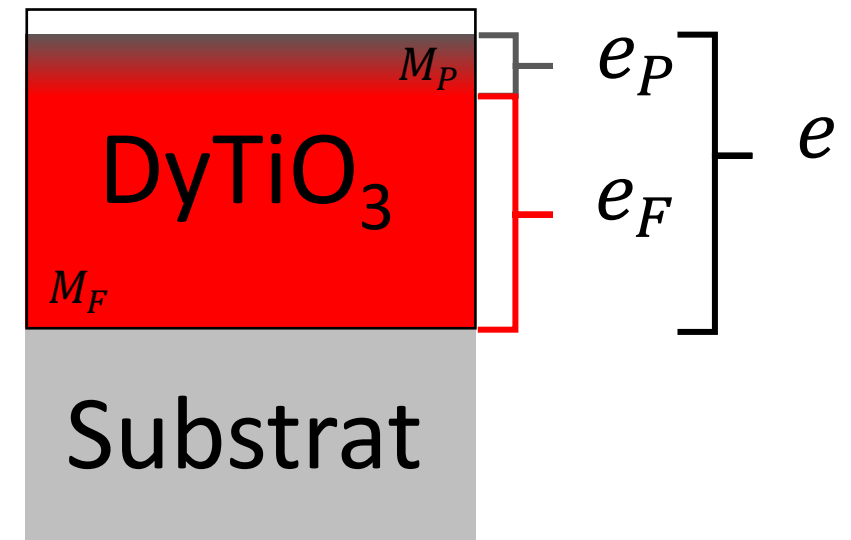
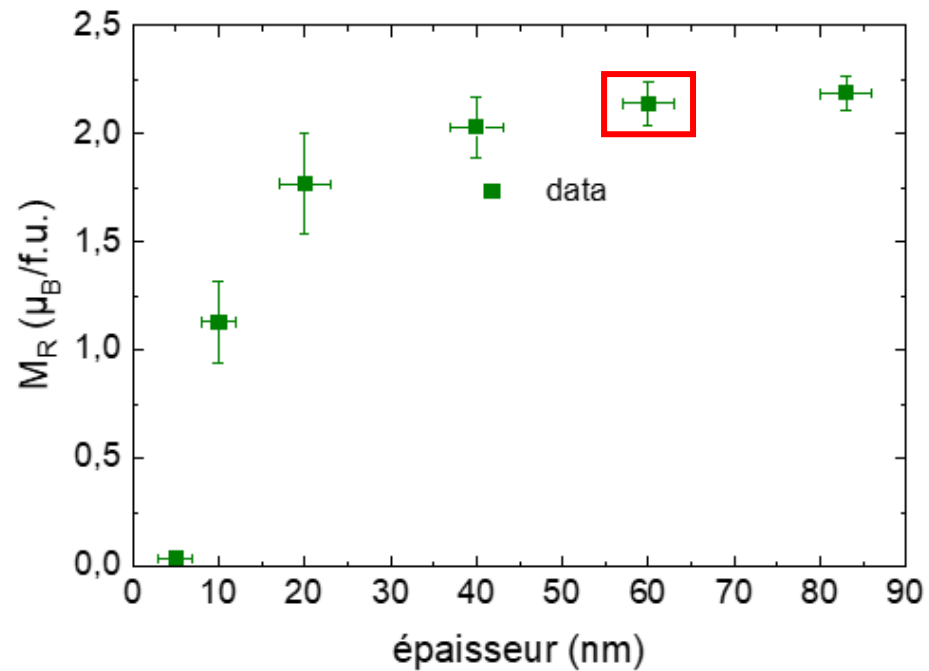


$$(M_P - M_F) < 0$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

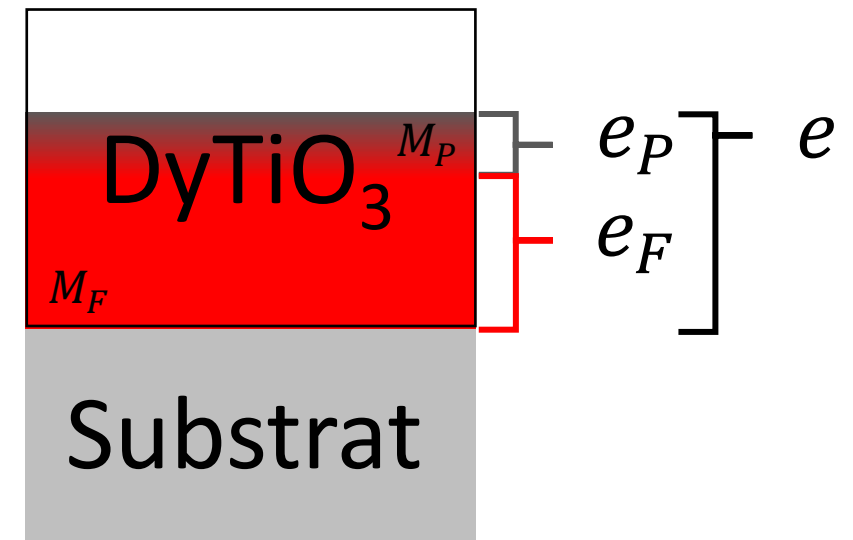
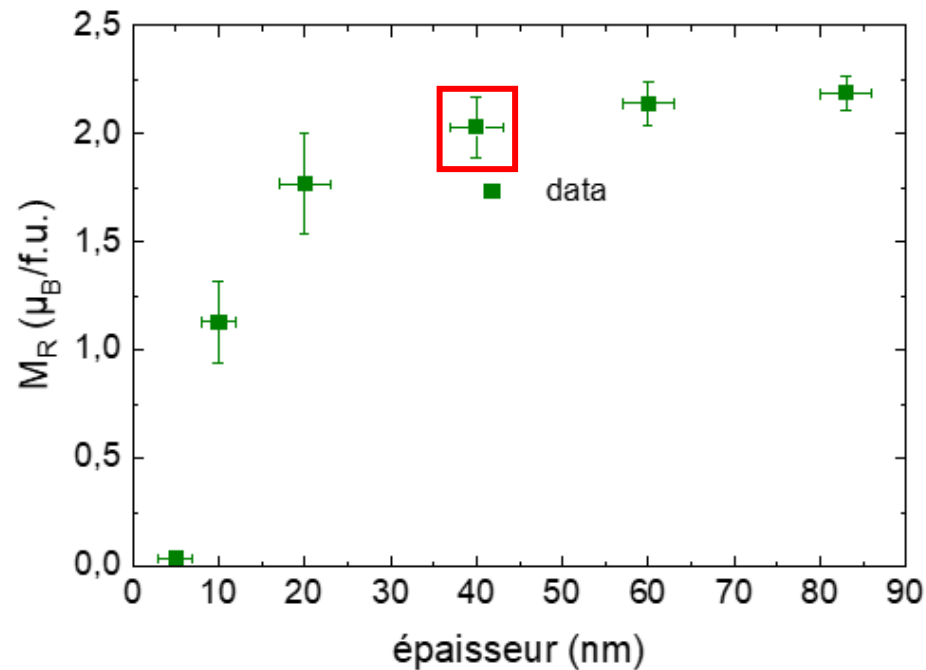


$$(M_P - M_F) < 0$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

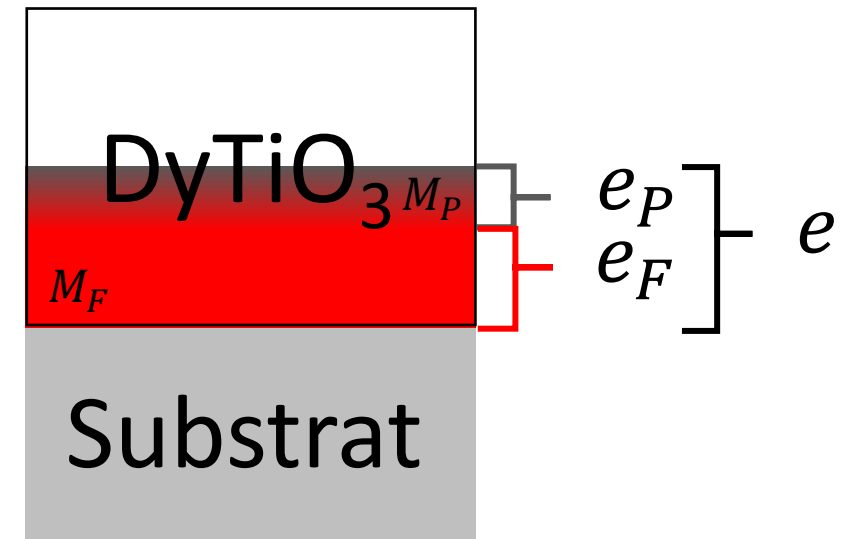
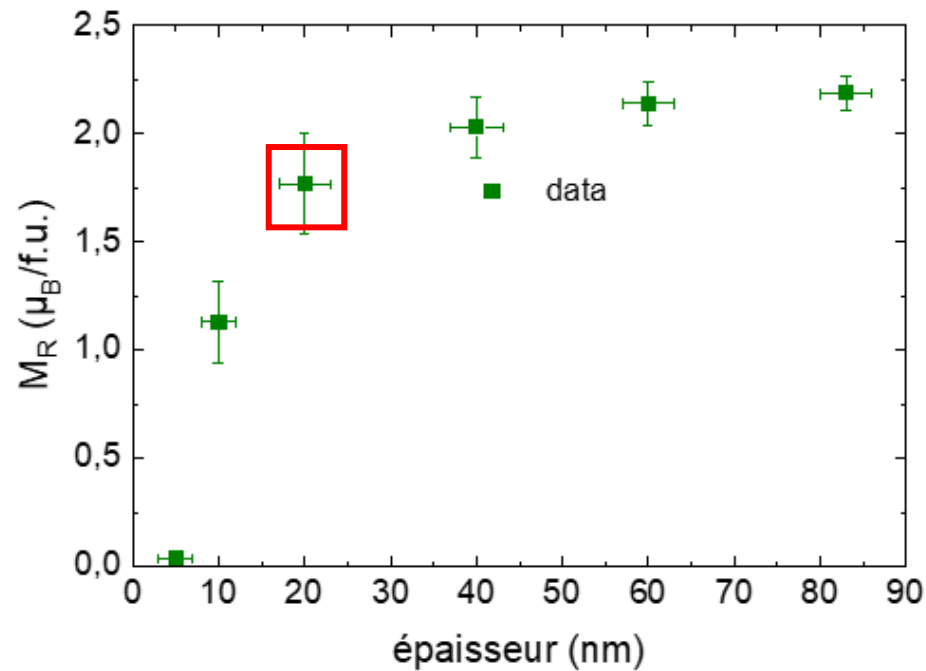


$$(M_P - M_F) < 0$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

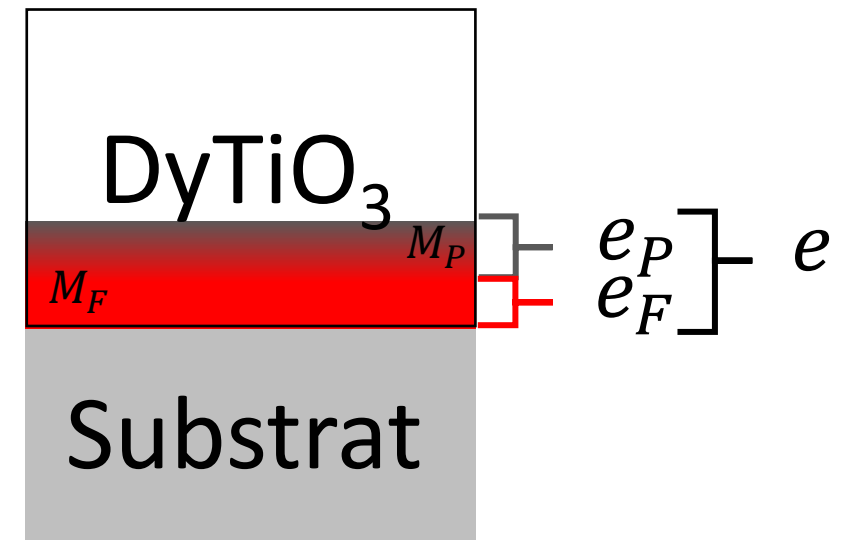
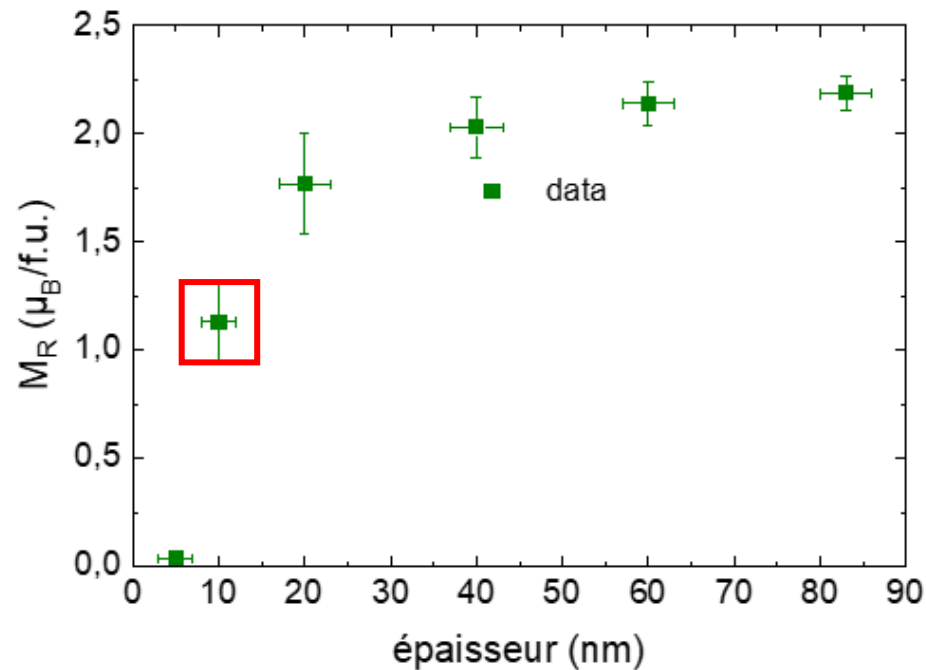


$$(M_P - M_F) < 0$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

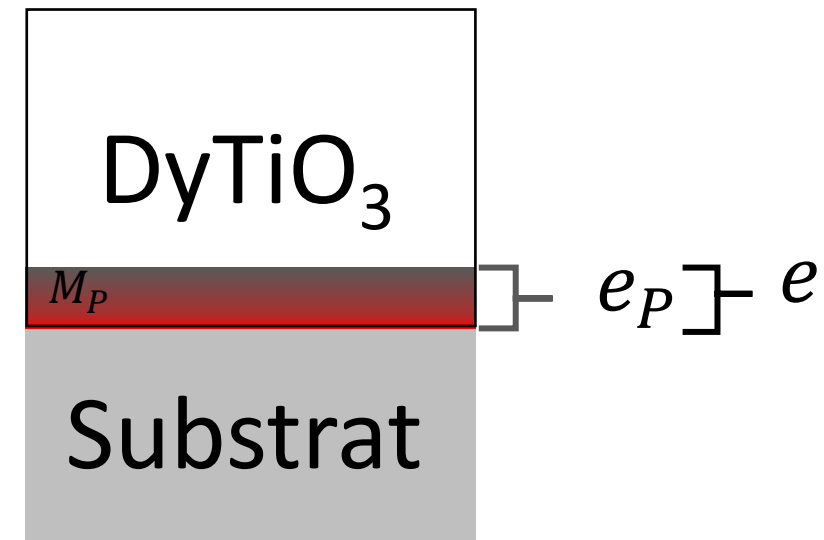
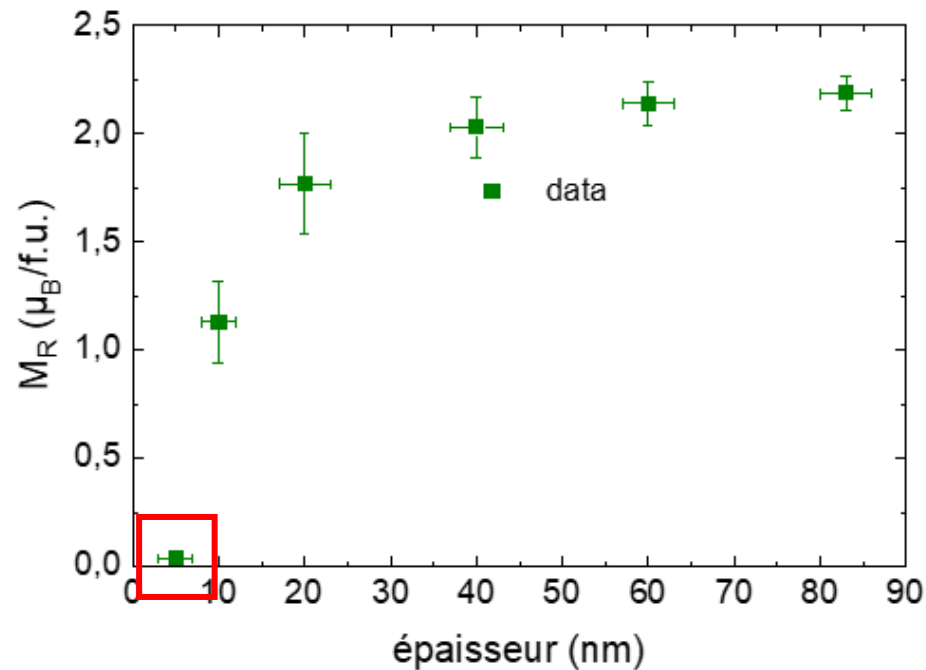


$$(M_P - M_F) < 0$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

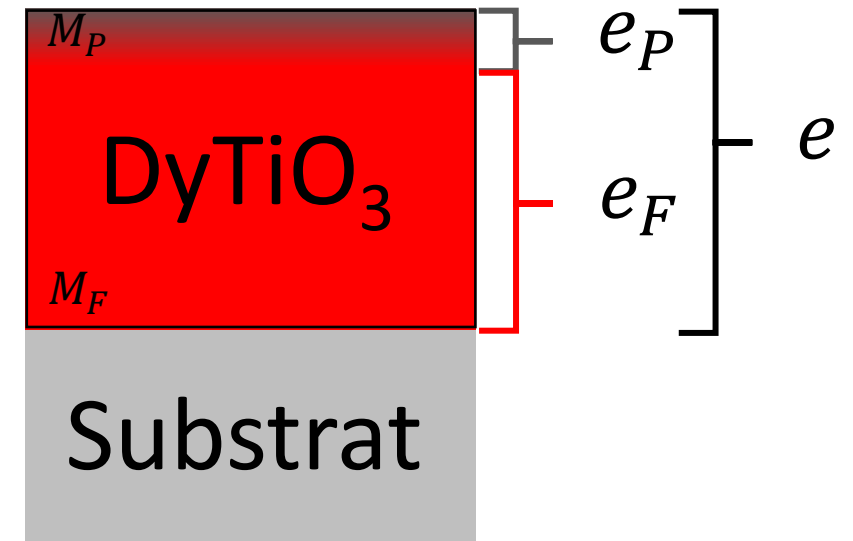
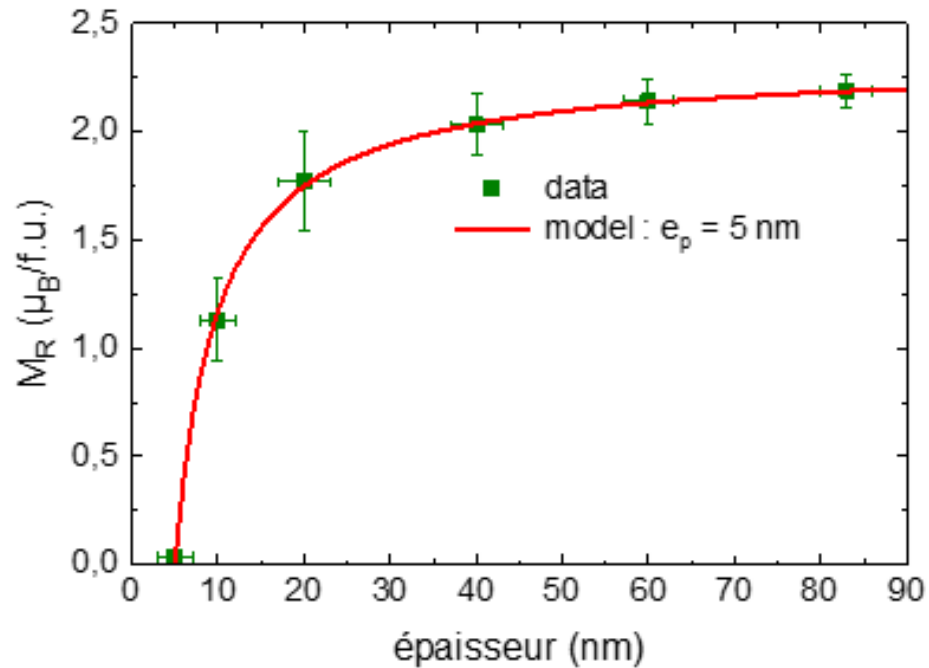


$$(M_P - M_F) < 0$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ nul

$M_R \searrow$ quand $e \searrow \rightarrow$ présence d'une **couche non magnétique**

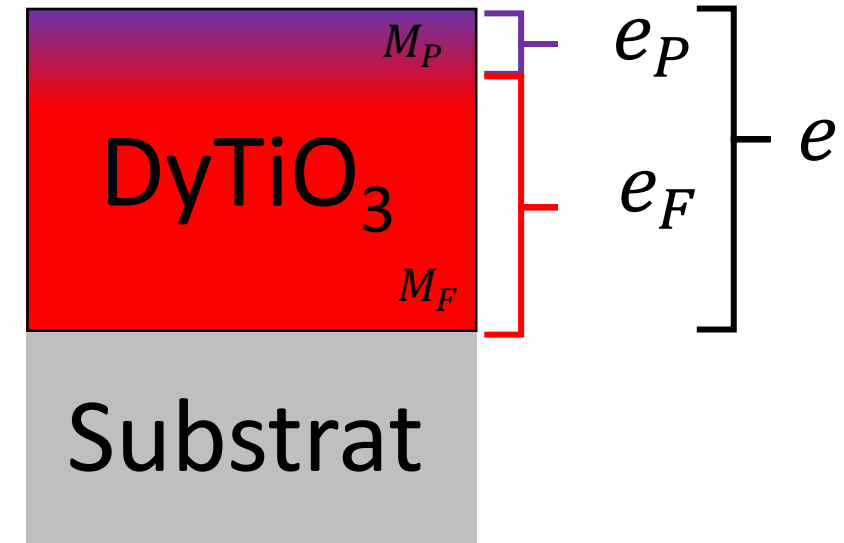
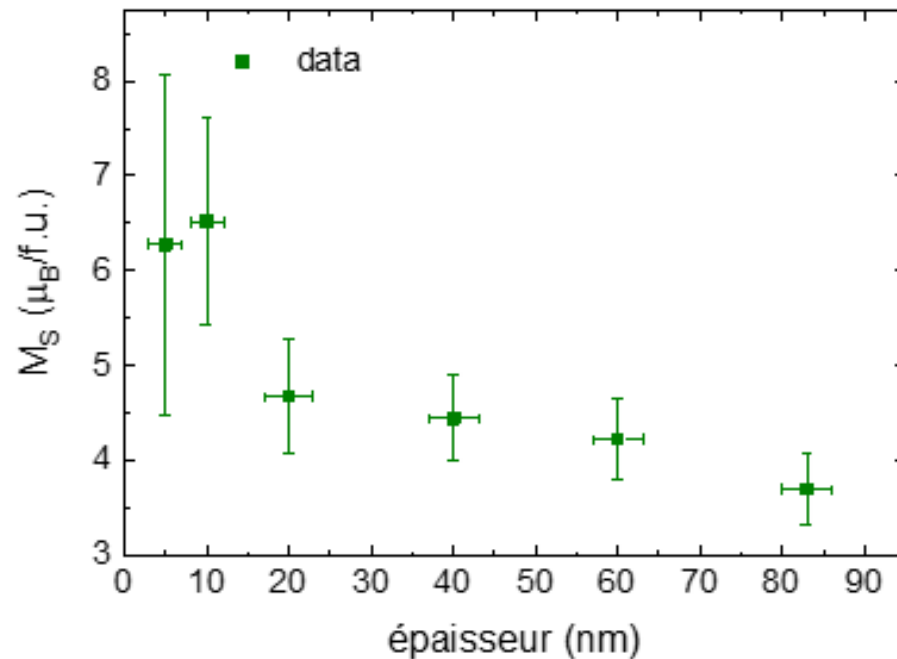


$$(M_P - M_F) < 0, \quad M_P = 0, \quad e_P = cste$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ fort

M_{sat} ↗ quand e ↘ → présence d'une **couche paramagnétique**

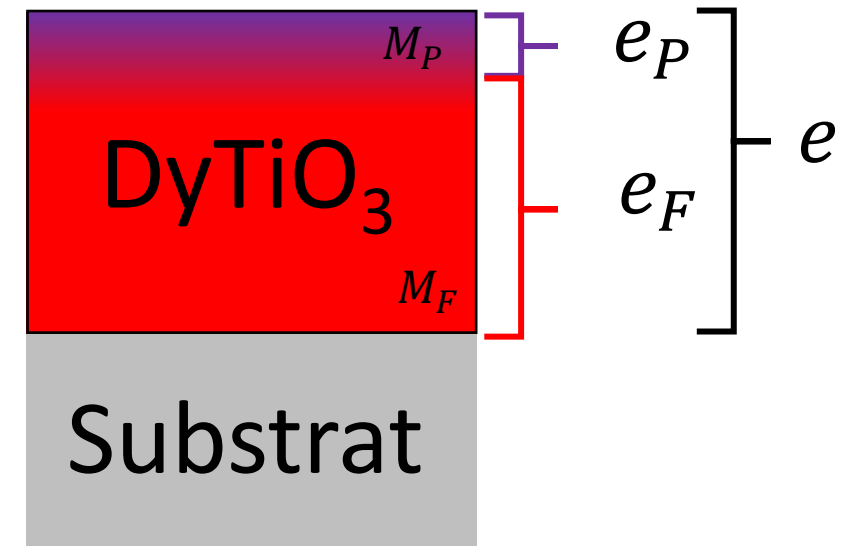
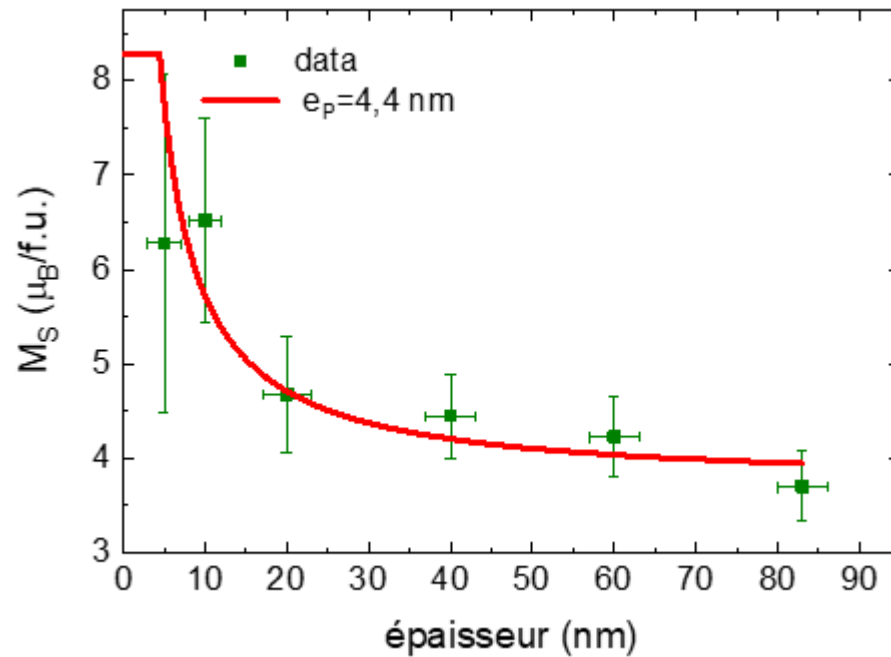


$$(M_P - M_F) > 0$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

Modélisation de la réponse magnétique sous champ fort

M_{sat} ↗ quand e ↘ → présence d'une **couche paramagnétique**

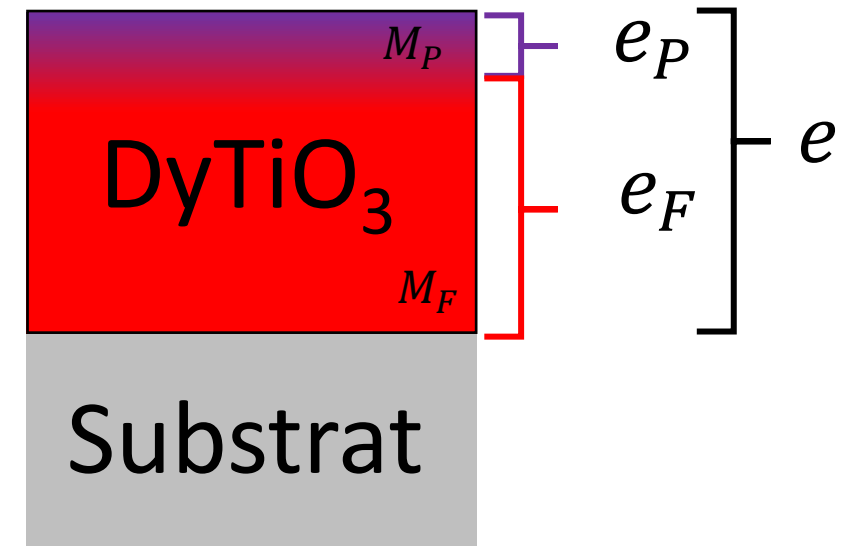
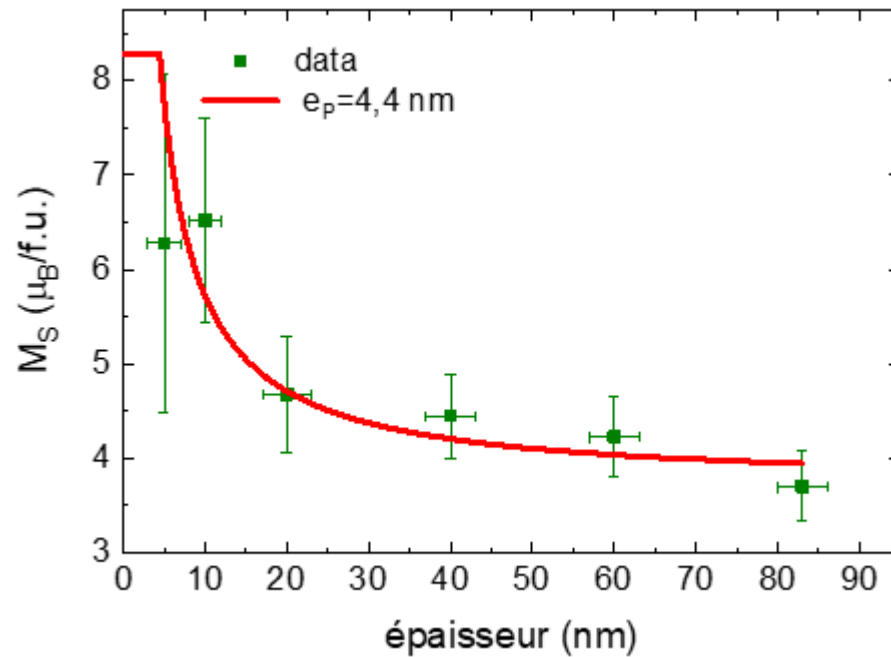


$$(M_P - M_F) > 0, \quad M_P \neq 0, \quad e_P = \text{cste}$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

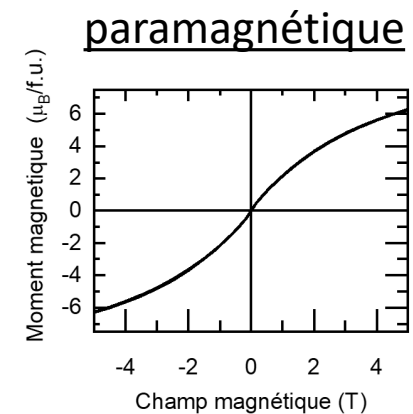
Modélisation de la réponse magnétique sous champ fort

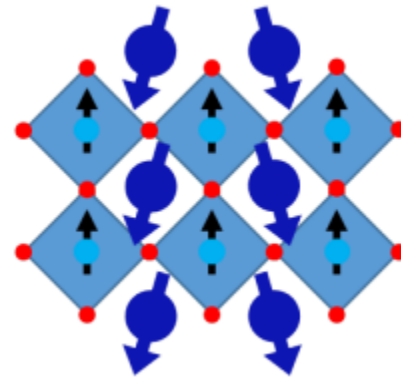
M_{sat} ↗ quand e ↘ → présence d'une **couche paramagnétique**



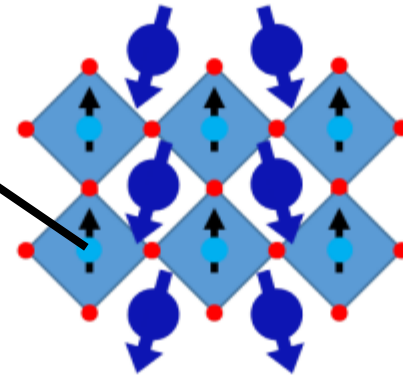
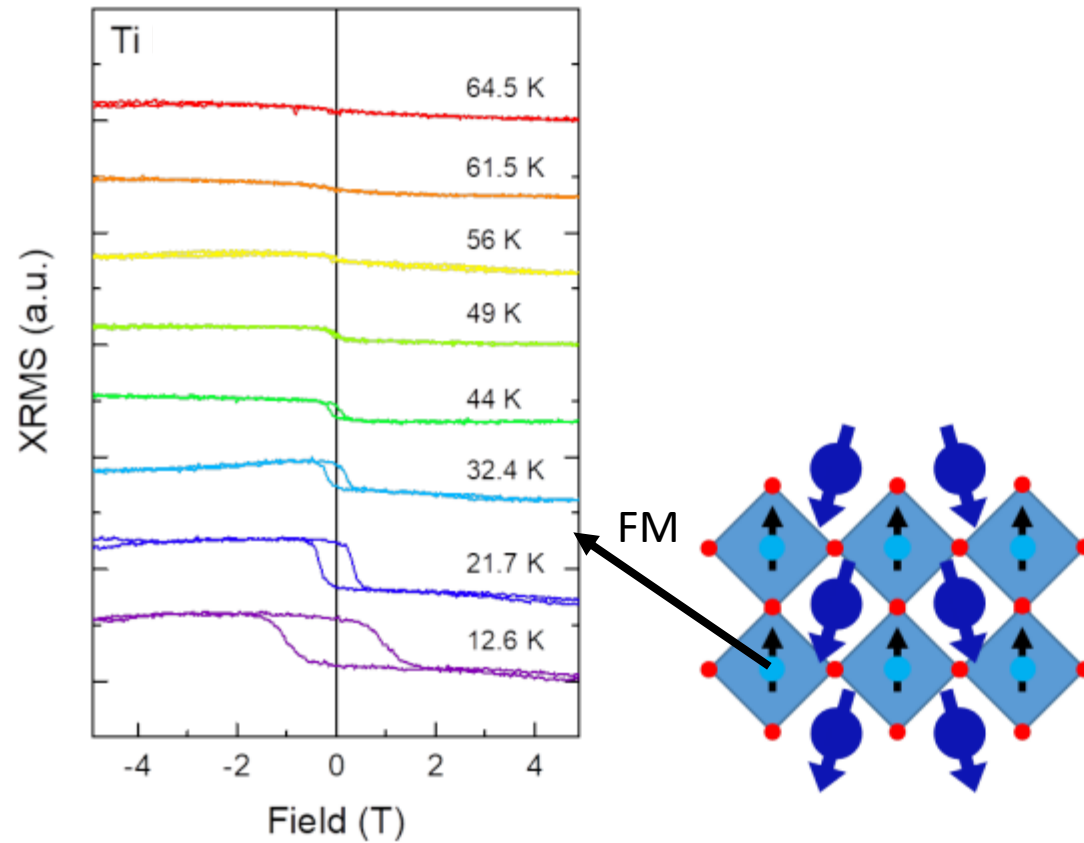
$$(M_P - M_F) > 0, \quad M_P \neq 0, \quad e_P = \text{cste}$$

$$M_{\text{total}} = \frac{(M_P - M_F)e_P}{e} + M_F$$

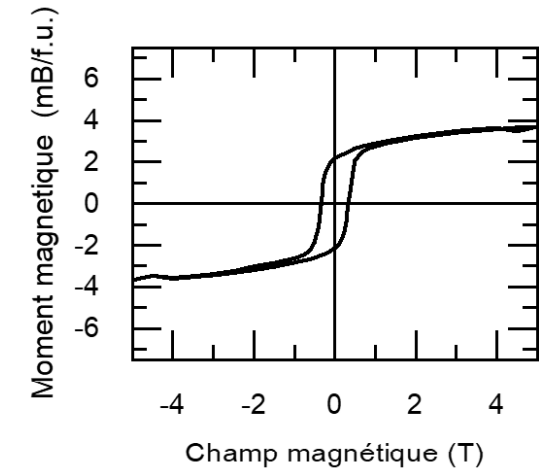




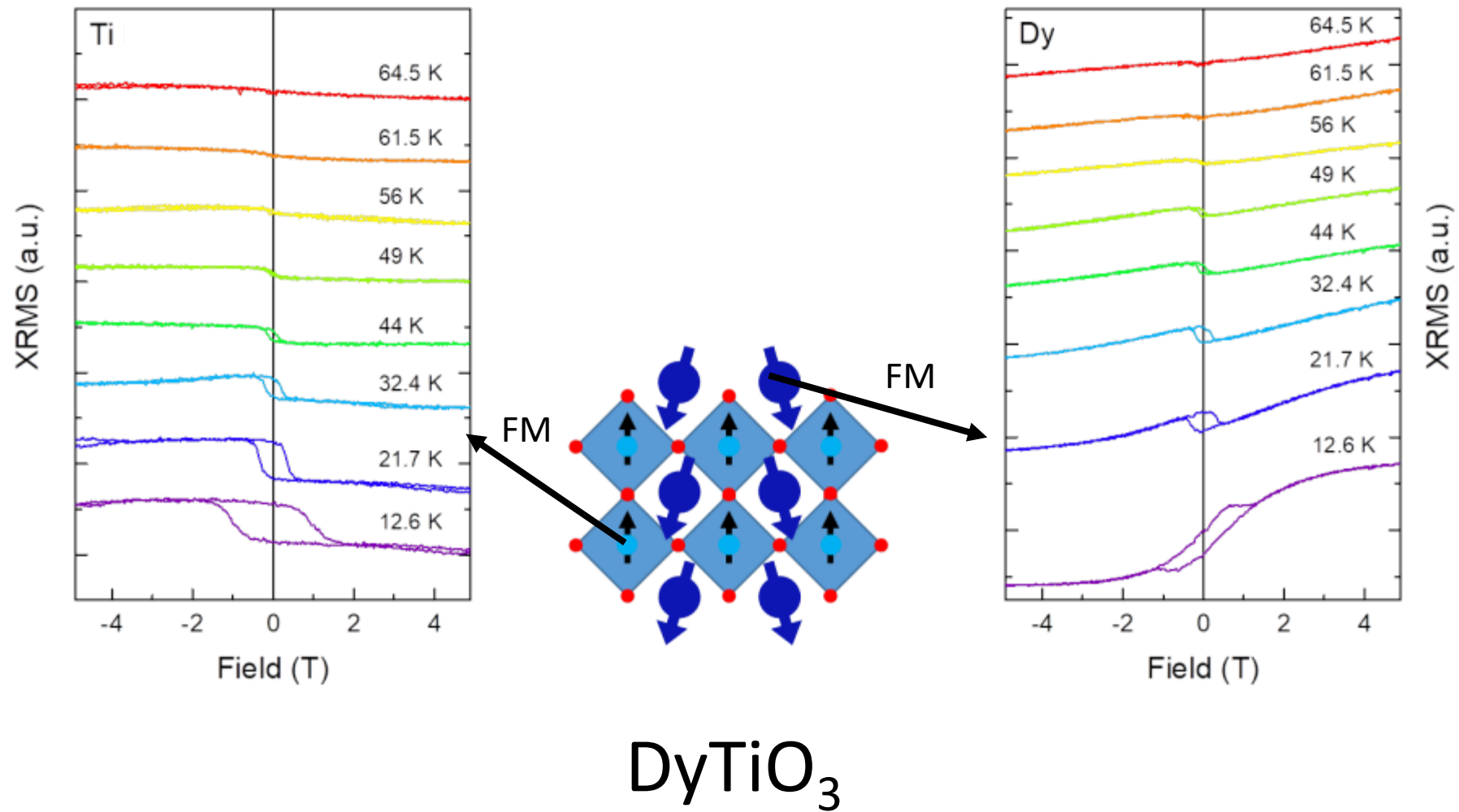
Origine de la couche paramagnétique



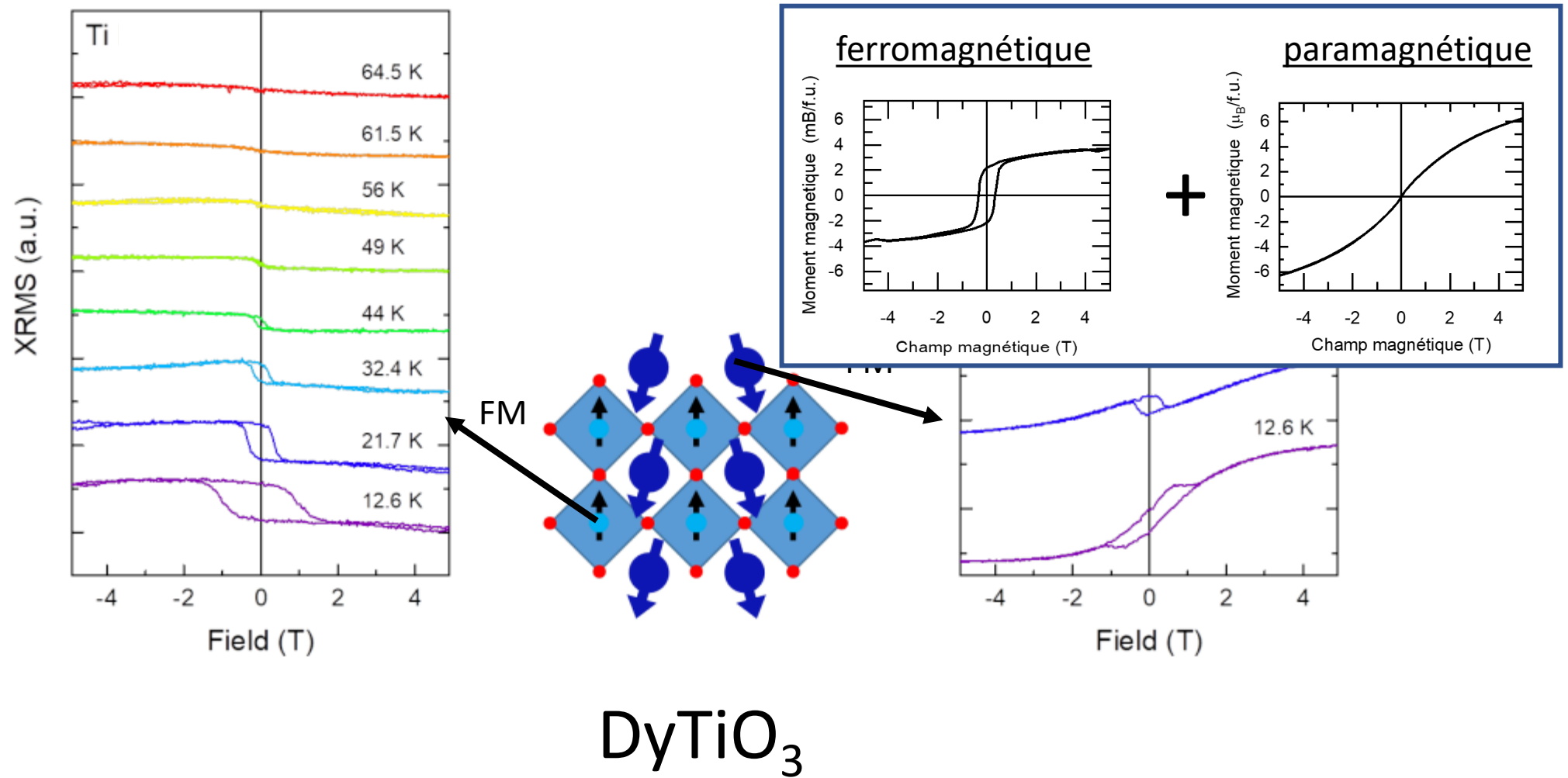
Ferromagnétisme



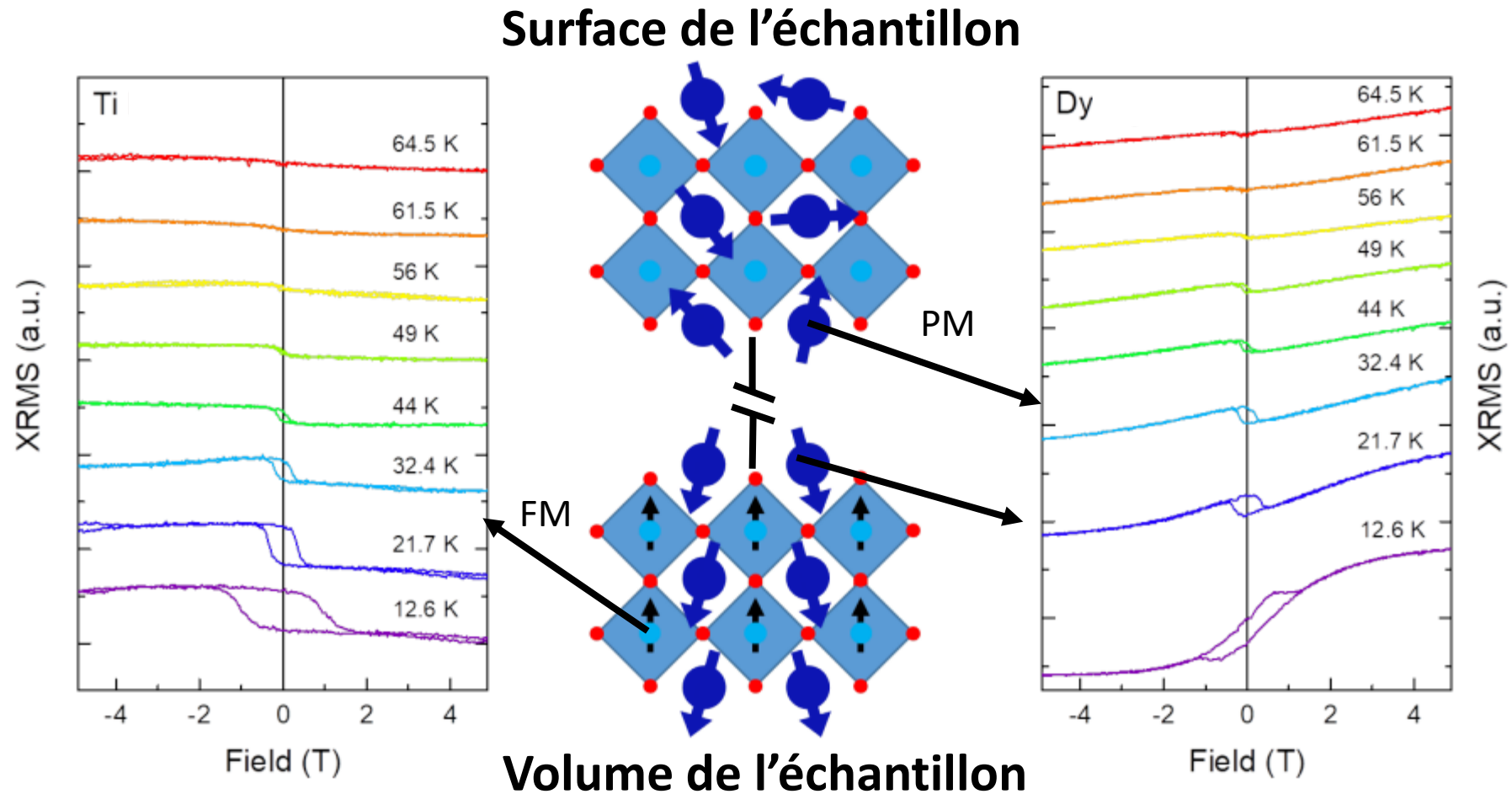
Origine de la couche paramagnétique



Origine de la couche paramagnétique



Origine de la couche paramagnétique

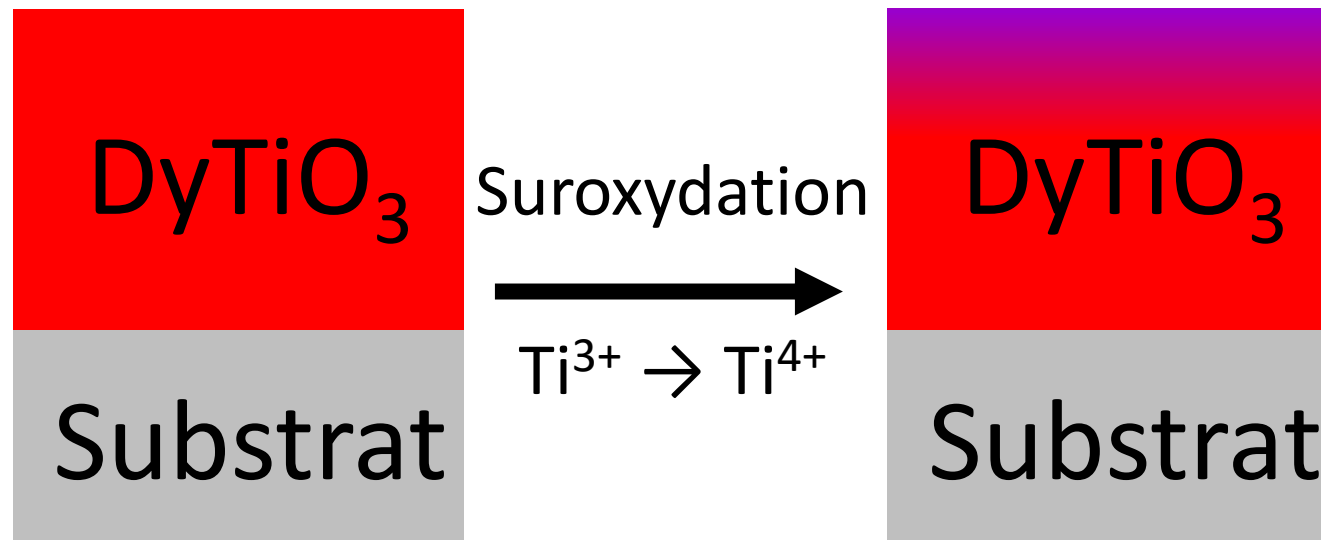


Nous avons établi le lien entre le changement de valence du titane et le comportement paramagnétique observé.

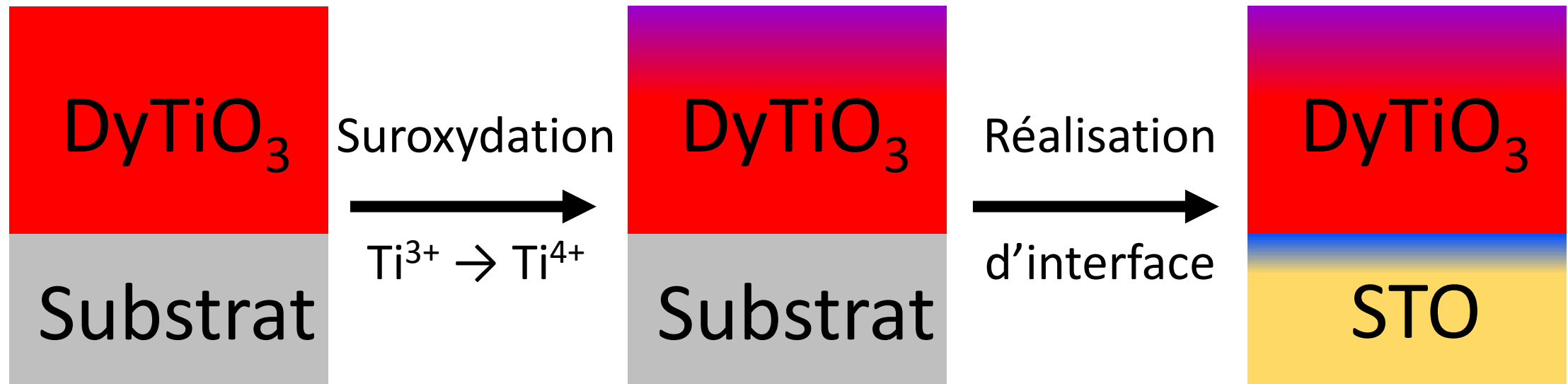
- ❖ Optimisation des paramètres de croissance



- ❖ Optimisation des paramètres de croissance
- ❖ Mise en place d'une méthode de contrôle de qualité des couches minces par mesure du paramagnétisme



- ❖ Optimisation des paramètres de croissance
- ❖ Mise en place d'une méthode de contrôle de qualité des couches minces par mesure du paramagnétisme
- ❖ **Il faut réaliser notre système bidimensionnel à l'interface inférieure de DyTiO₃**



Fin

Annexe 1

Physique

5.3. Équation de Schrödinger dans un potentiel $V(x)$ uniforme par morceaux	
Quantification de l'énergie dans un puits de potentiel rectangulaire de profondeur infinie.	Établir les expressions des énergies des états stationnaires. Faire l'analogie avec la recherche des pulsations propres d'une corde vibrante fixée en ses deux extrémités. Retrouver qualitativement l'énergie minimale à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale.
Énergie de confinement quantique.	Associer le confinement d'une particule

Physique

5.3. Équation de Schrödinger dans un potentiel $V(x)$ uniforme par morceaux	
Quantification de l'énergie dans un puits de potentiel rectangulaire de profondeur infinie.	Établir les expressions des énergies des états stationnaires. Faire l'analogie avec la recherche des pulsations propres d'une corde vibrante fixée en ses deux extrémités. Retrouver qualitativement l'énergie minimale à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale.
Énergie de confinement quantique.	Associer le confinement d'une particule

Chimie

Notions et contenus	Capacités exigibles
3.1 Orbitales atomiques	
Fonctions d'onde de l'atome d'hydrogène.	Interpréter $ \psi ^2$ comme la densité de probabilité de présence d'un électron en un point et le relier à la densité de charge.
Énergie et rayon associés à une orbitale atomique.	Prévoir qualitativement, pour l'atome d'hydrogène et les ions hydrogénoïdes, l'évolution du rayon et de l'énergie associés à une orbitale atomique en fonction du nombre quantique principal.
Représentation graphique conventionnelle d'une orbitale atomique.	Identifier la phase de la fonction d'onde.
Orbitales des atomes polyélectroniques ; énergie associée à une orbitale, dégénérescence des niveaux d'énergie.	Dessiner l'allure des orbitales atomiques s, p et d.
Notion qualitative de charge effective.	Établir la configuration électronique d'un atome ou d'un ion dans son état fondamental . Relier l'évolution du rayon associé à une orbitale atomique à la charge effective. Relier l'évolution de l'énergie associée à une orbitale atomique à l'électronégativité. Relier le rayon associé aux orbitales de valence d'un atome à sa polarisabilité.

Physique

- Concertation avec le professeur de chimie en PC pour que les élèves aient été introduit à l'atome d'hydrogène et à la dégénérescence

Physique

- Concertation avec le professeur de chimie en PC pour que les élèves aient été introduit à l'atome d'hydrogène et à la dégénérescence
- La quantification de l'énergie des électrons passe par l'introduction de **nombre quantiques** n et l

Physique

- Concertation avec le professeur de chimie en PC pour que les élèves aient été introduit à l'atome d'hydrogène et à la dégénérescence
- La quantification de l'énergie des électrons passe par l'introduction de **nombres quantiques** n et l
- Il est nécessaire expérimentalement d'introduire un nouveau nombre quantique $s = \pm 1/2$

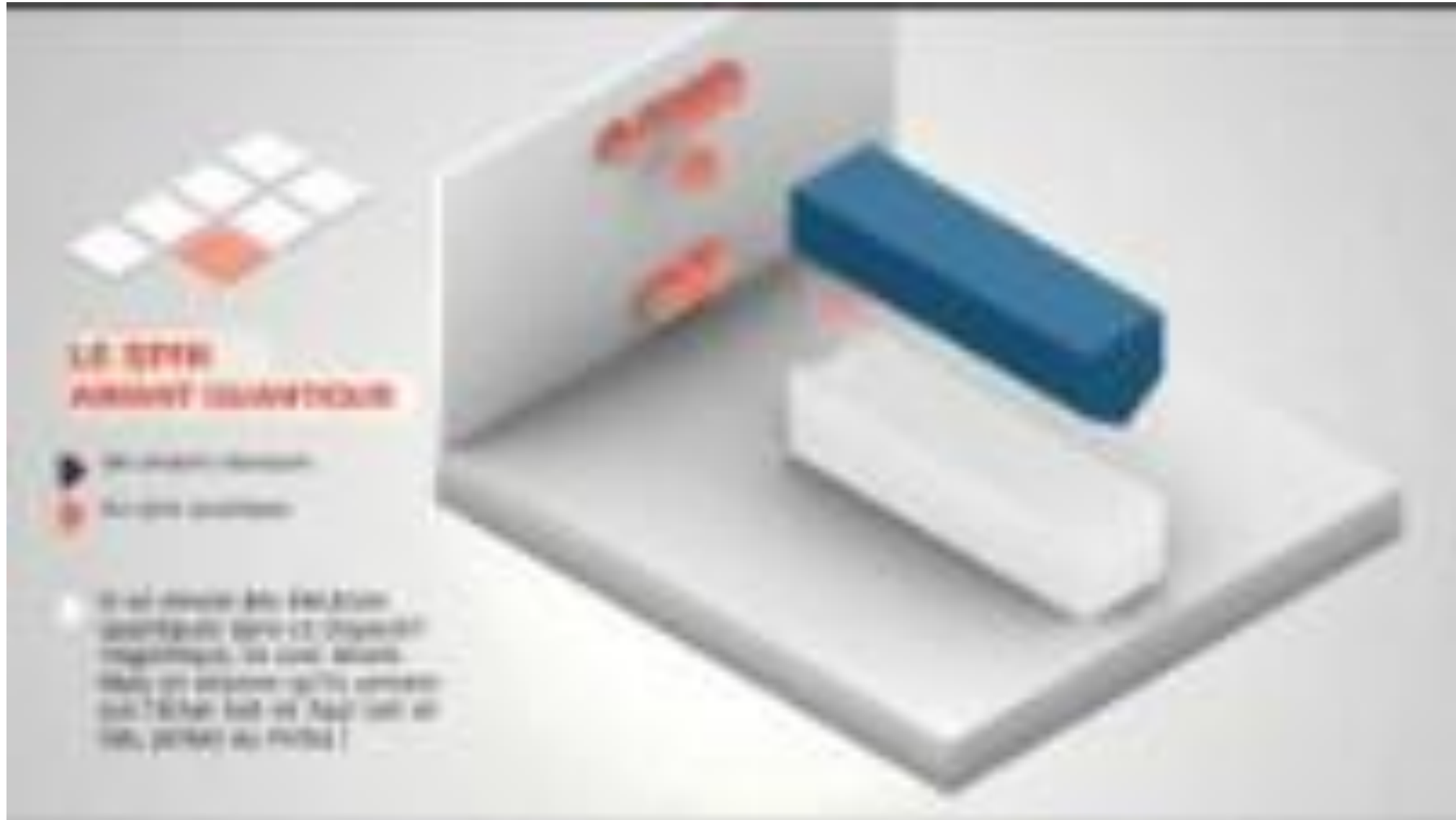
Physique

- Concertation avec le professeur de chimie en PC pour que les élèves aient été introduit à l'atome d'hydrogène et à la dégénérescence
- La quantification de l'énergie des électrons passe par l'introduction de **nombres quantiques** n et l
- Il est nécessaire expérimentalement d'introduire un nouveau nombre quantique $s = \pm 1/2$

Il s'agit d'un moment magnétique quantique !

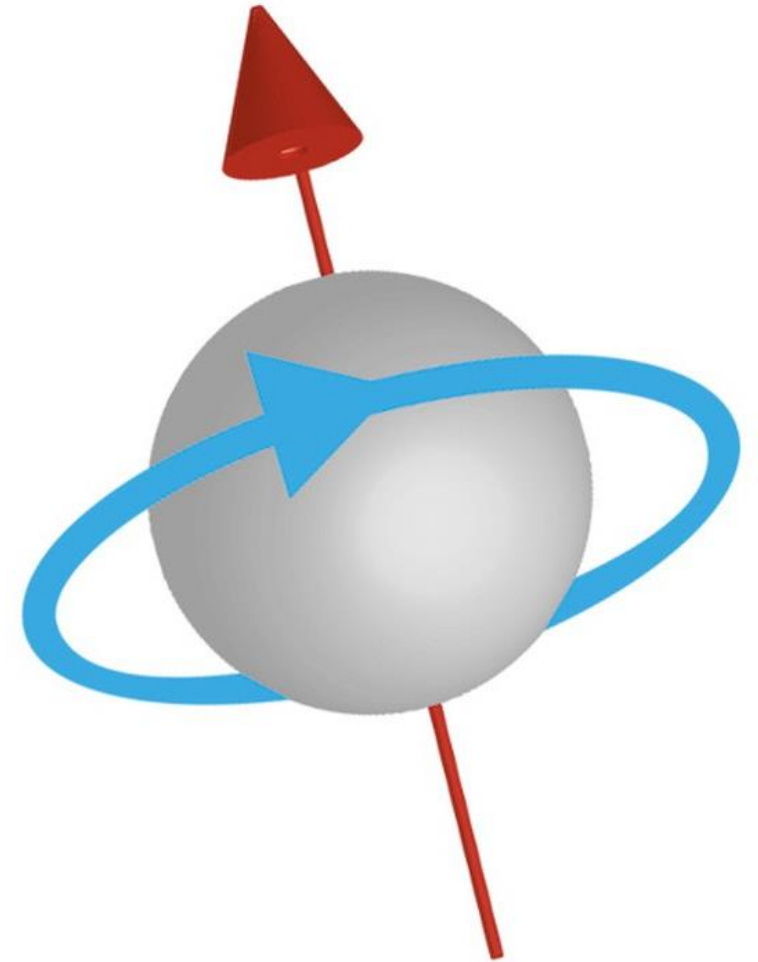
Question : spin

<https://www.youtube.com/watch?v=8wS4IOzAhFA>



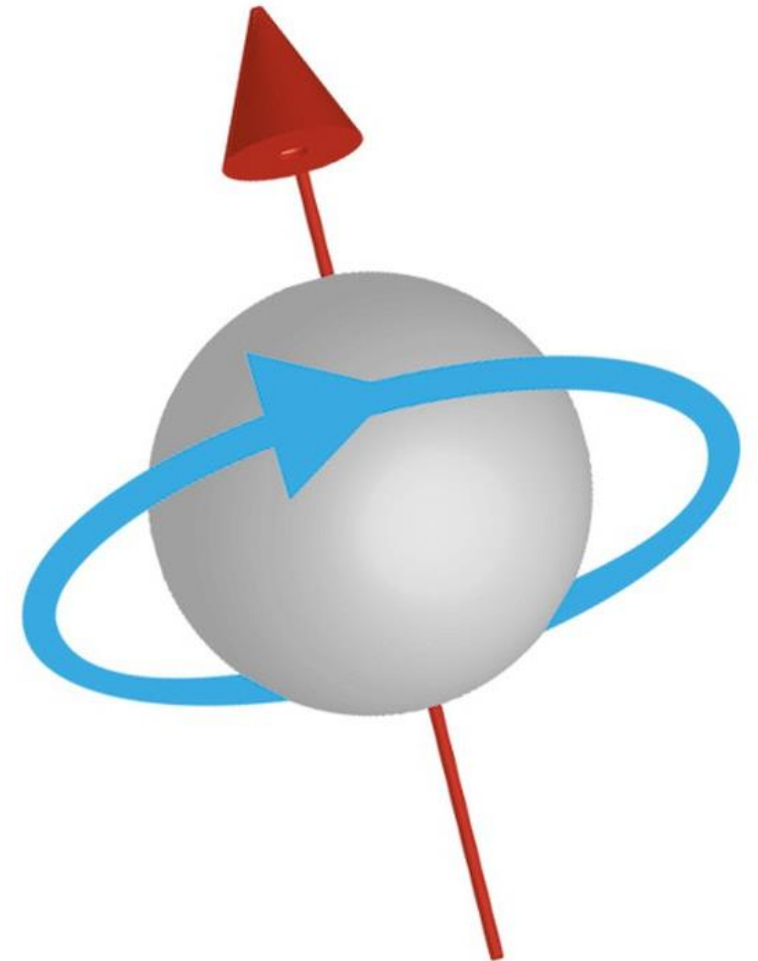
Question : spin

- L'électron se comporte **comme** si il tournait sur lui-même



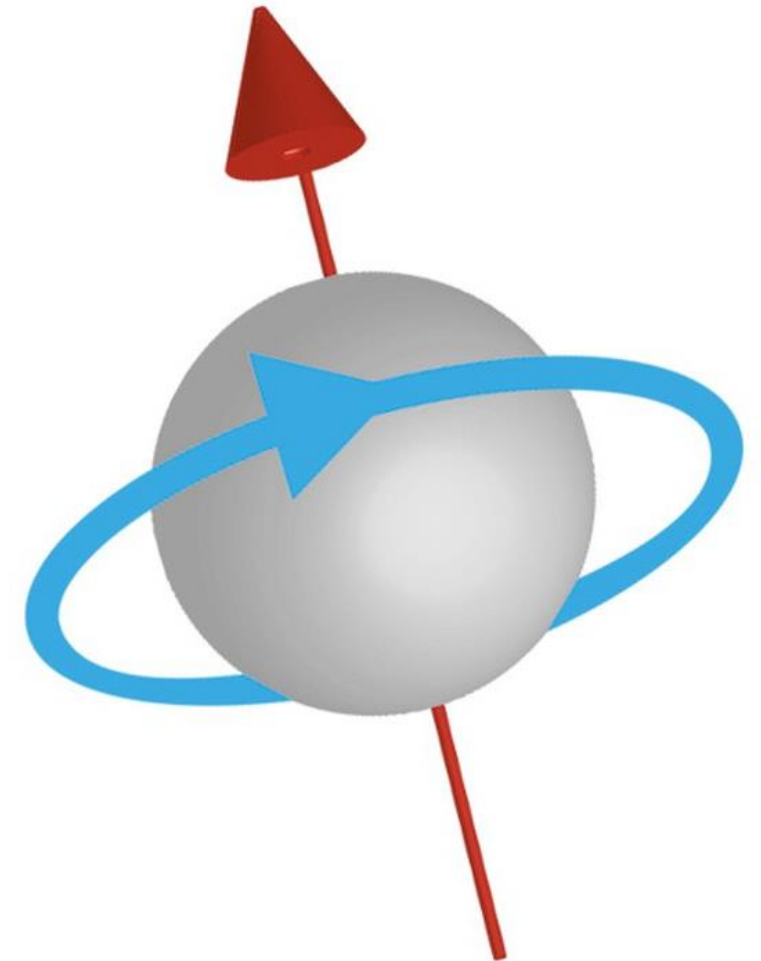
Question : spin

- L'électron se comporte **comme** si il tournait sur lui-même
- Mais cette rotation est quantifiée et ne peut prendre qu'une valeur dans un sens ou dans l'autre !



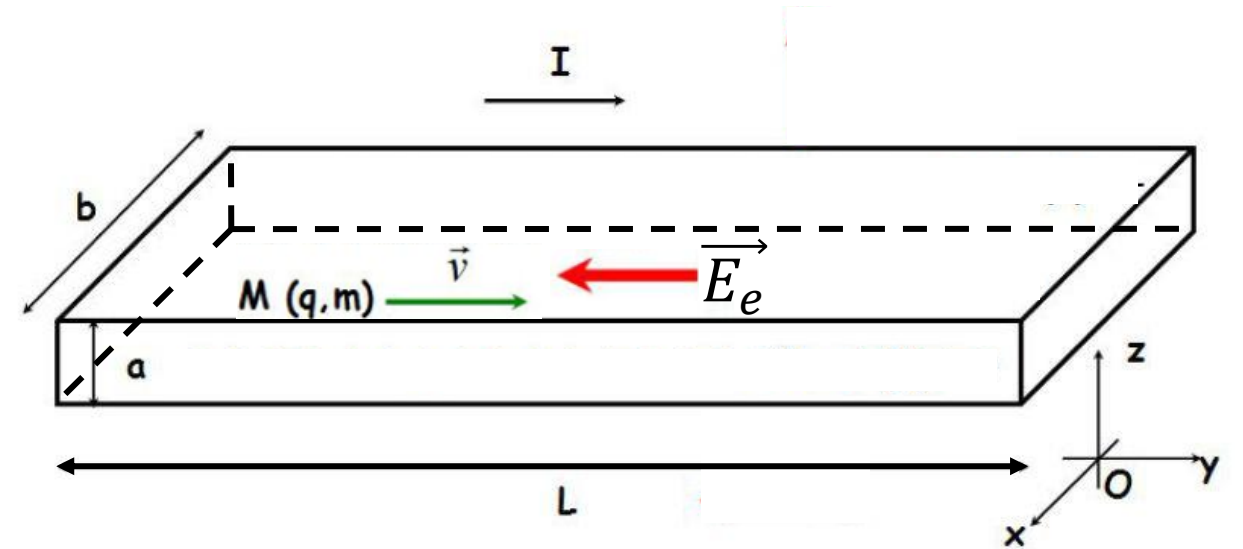
Question : spin

- L'électron se comporte **comme** si il tournait sur lui-même
- Mais cette rotation est quantifiée et ne peut prendre qu'une valeur dans un sens ou dans l'autre !
- Cependant ce modèle est faux car **l'électron est ponctuel**

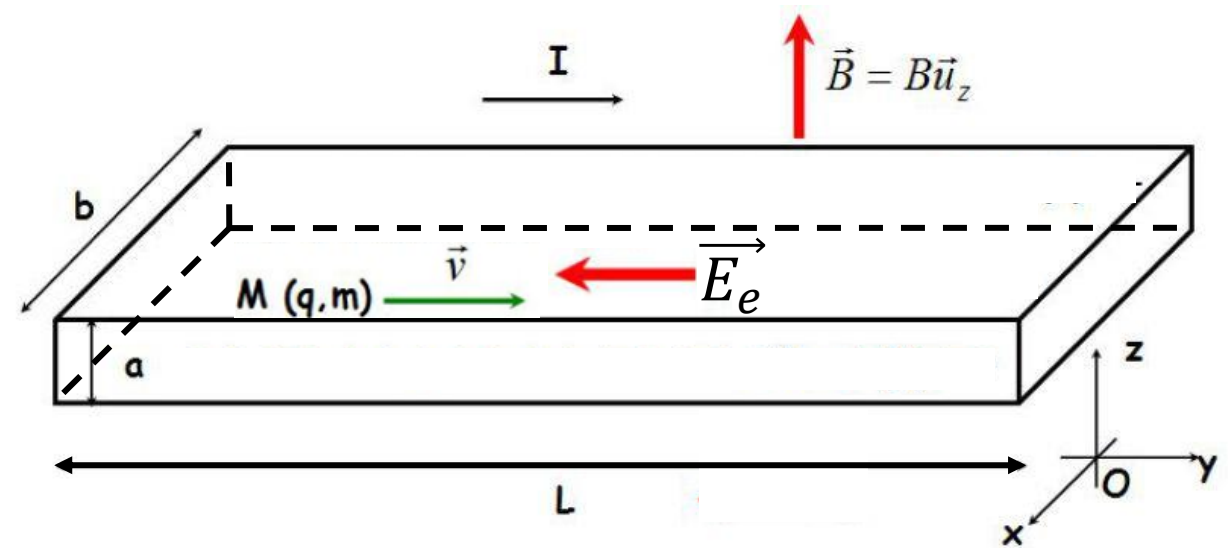


Modèle de Drude :

- Les électrons sont libres entre les collisions avec les ions
- Les collisions sont instantanées
- Durant dt un électron a une probabilité dt/τ avec τ le temps caractéristique entre les collisions
- Les collisions thermalisent les électrons

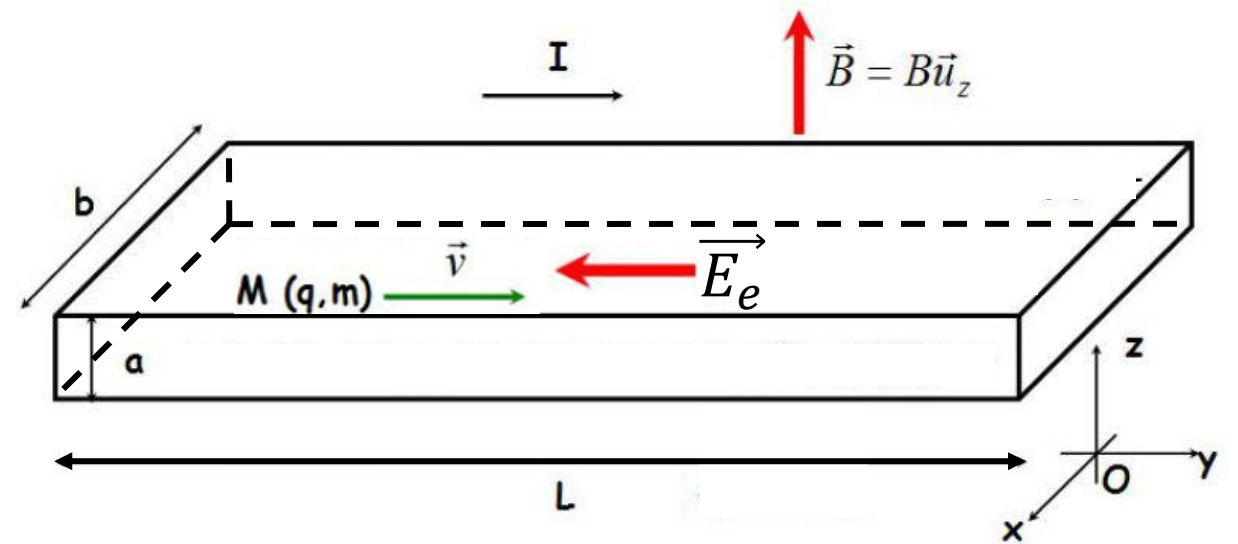


$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$



$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

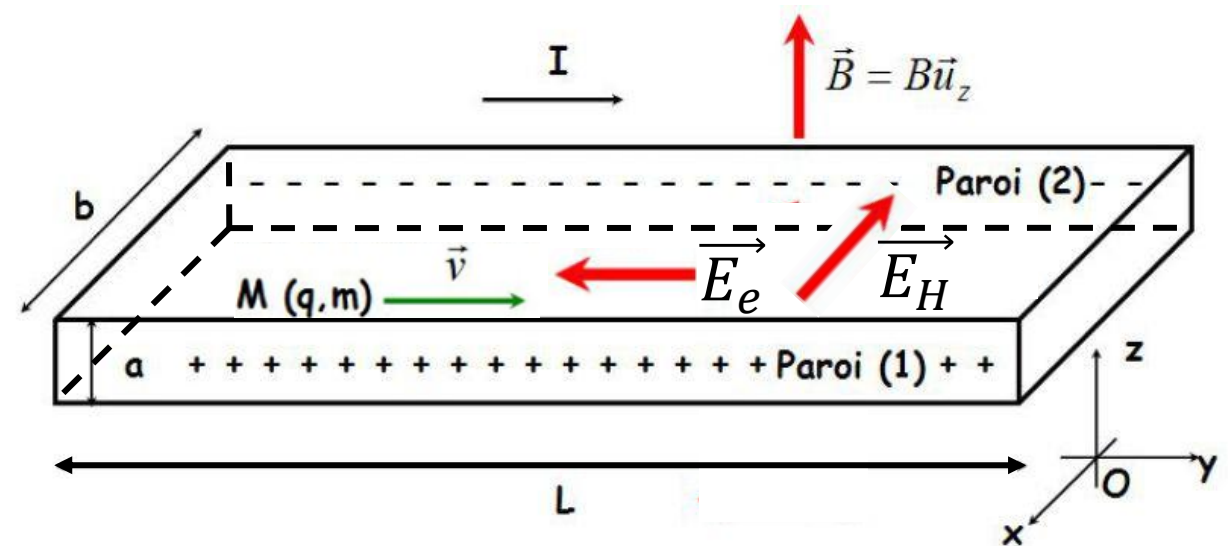
$$\vec{v} = \frac{\tau q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$



$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{v} = \frac{\tau q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

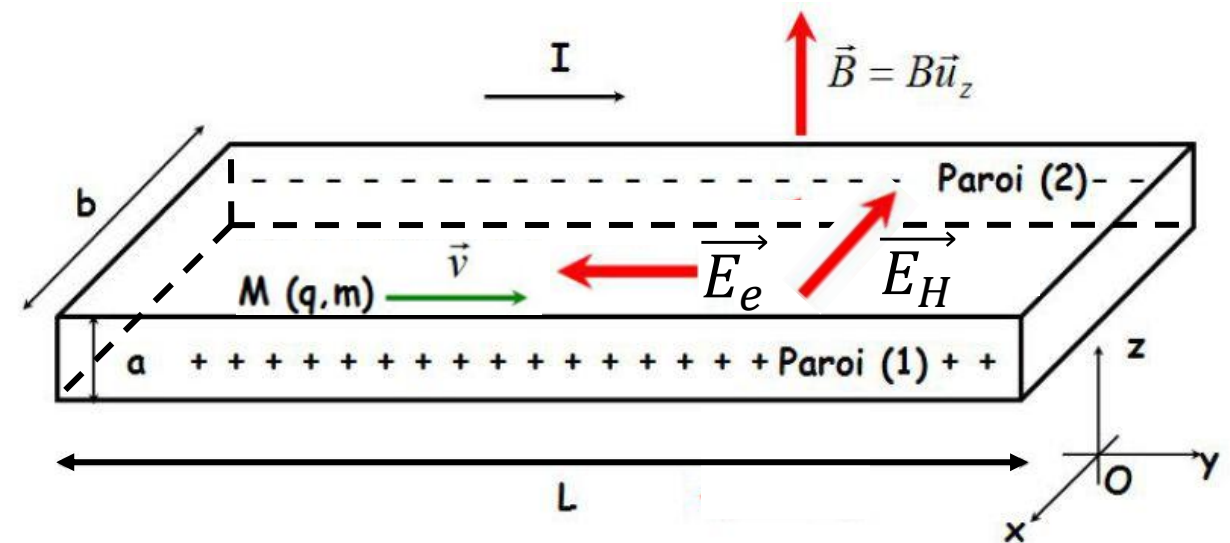
$$\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}_H$$



$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{v} = \frac{\tau q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}_H$$



En régime permanent

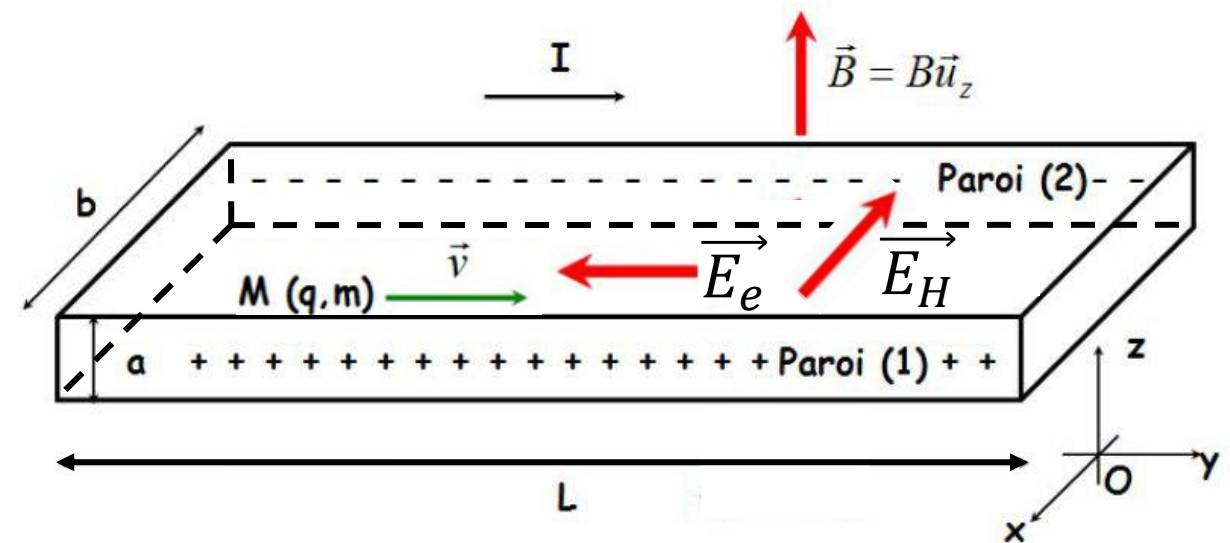
$$\vec{E}_x = \vec{v} \wedge \vec{B} + \vec{E}_H = \vec{0}$$

$$\vec{E}_H = -vB\vec{u}_x$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{v} = \frac{\tau q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}_H$$



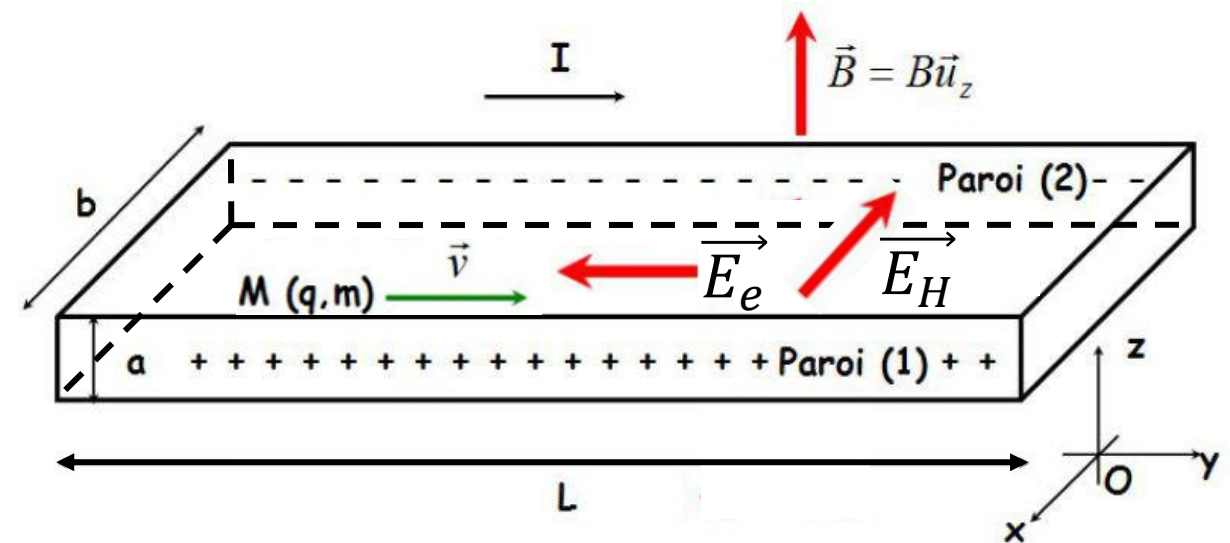
$$\vec{E} = \vec{v} \wedge \vec{B} + \vec{E}_H = \vec{0}$$

$$\vec{E}_H = -vB\vec{u}_x$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v} = \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{v} = \frac{\tau q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

$$\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}_H$$



$$\vec{E} = \vec{v} \wedge \vec{B} + \vec{E}_H = \vec{0}$$

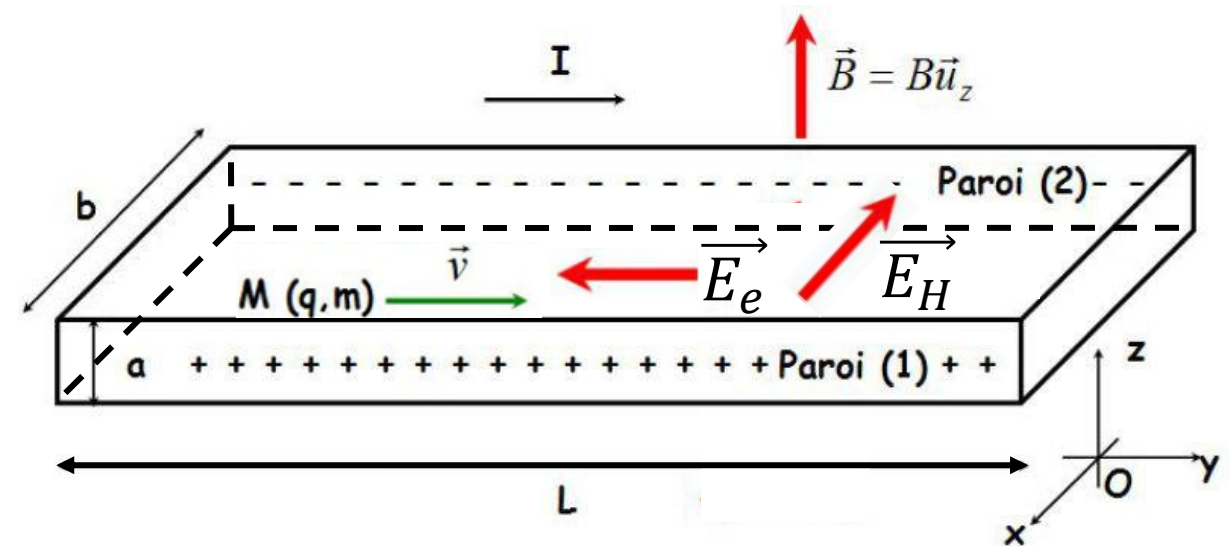
$$\vec{E}_H = -vB\vec{u}_x$$

$$\vec{E}_H = -vB\vec{u}_x$$

$$\Delta V_H = vBb$$

$$\Delta V_H = \frac{-1}{en} \frac{IB}{a} = -R_H \frac{IB}{a}$$

$$R_H = \frac{-1}{en} \quad \text{Constante de Hall}$$



Modèle de Drude :

- Les électrons sont libres entre les collisions avec les ions
- Les collisions sont instantanées
- Durant dt un électron a une probabilité dt/τ avec τ le temps caractéristique entre les collisions
- Les collisions thermalisent les électrons

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{q\vec{E}t}{m} + \frac{f(t)}{m}$$

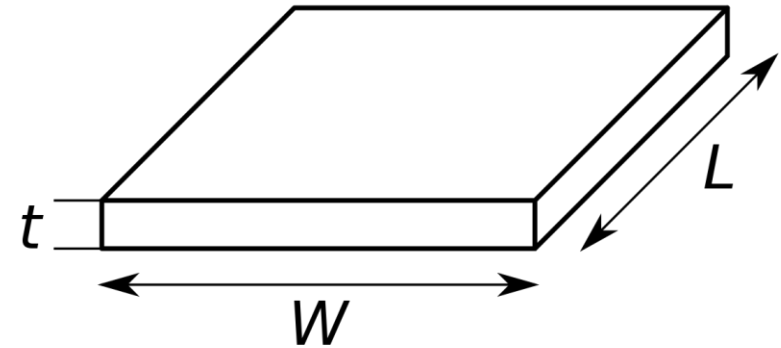
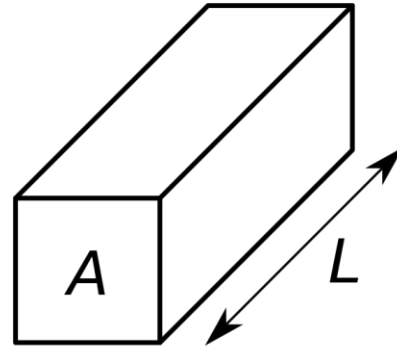
$$\vec{v} = \mu \vec{E}$$

$$\mu = \frac{q\tau}{m}$$

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{Wt},$$

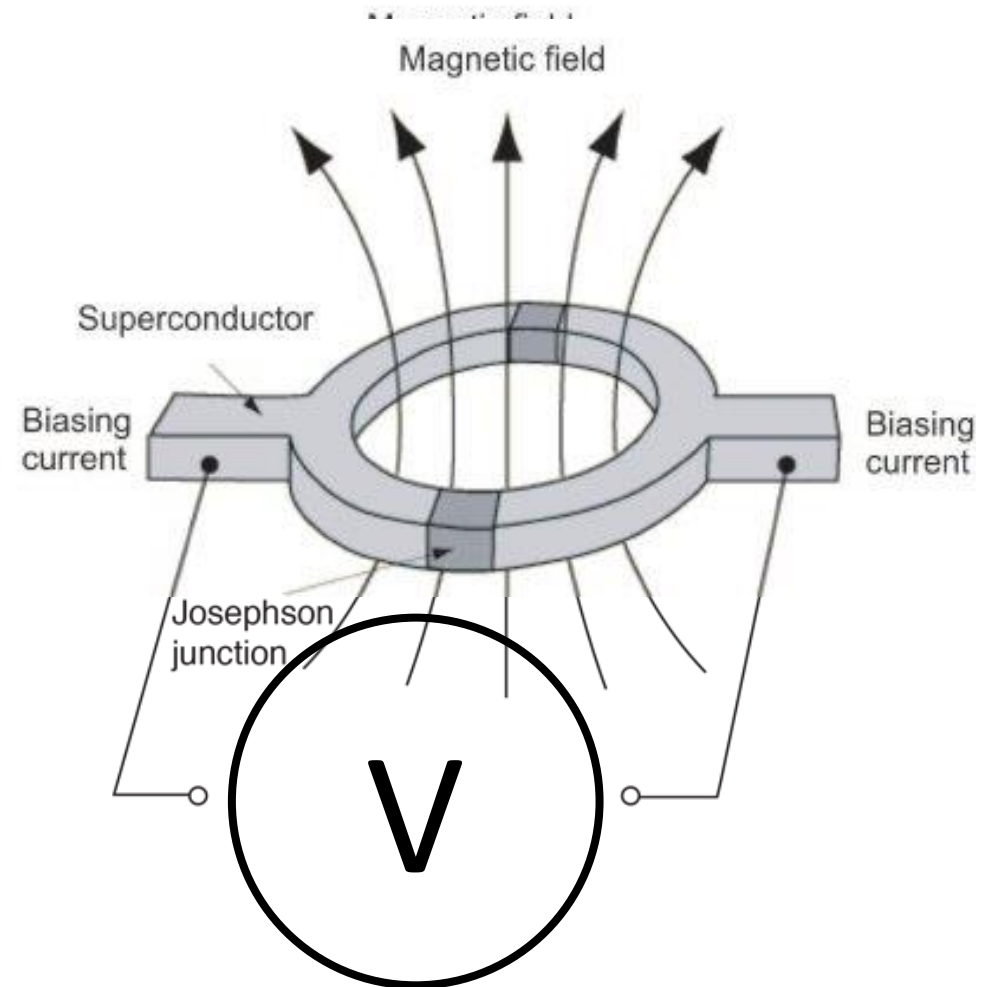
$$R = \frac{\rho}{t} \frac{L}{W} = R_s \frac{L}{W}$$

$$\rho = R_s \cdot t$$

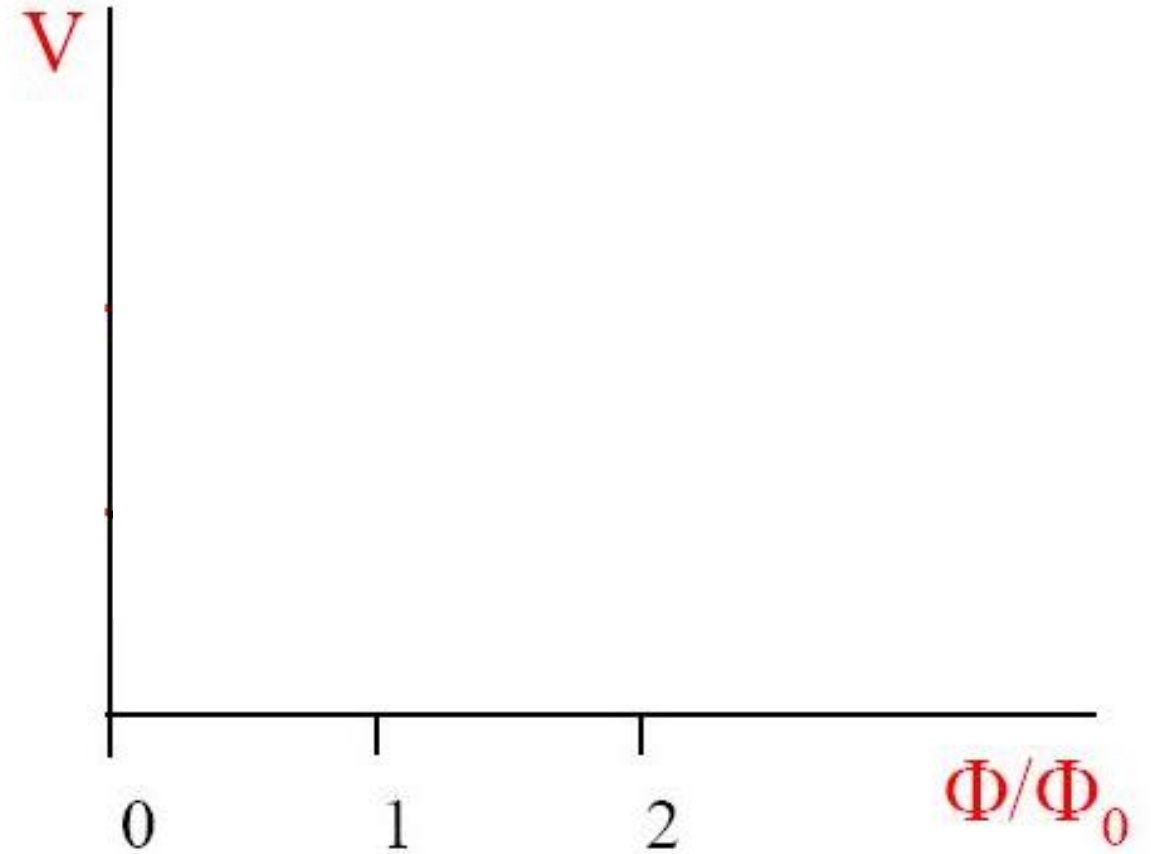
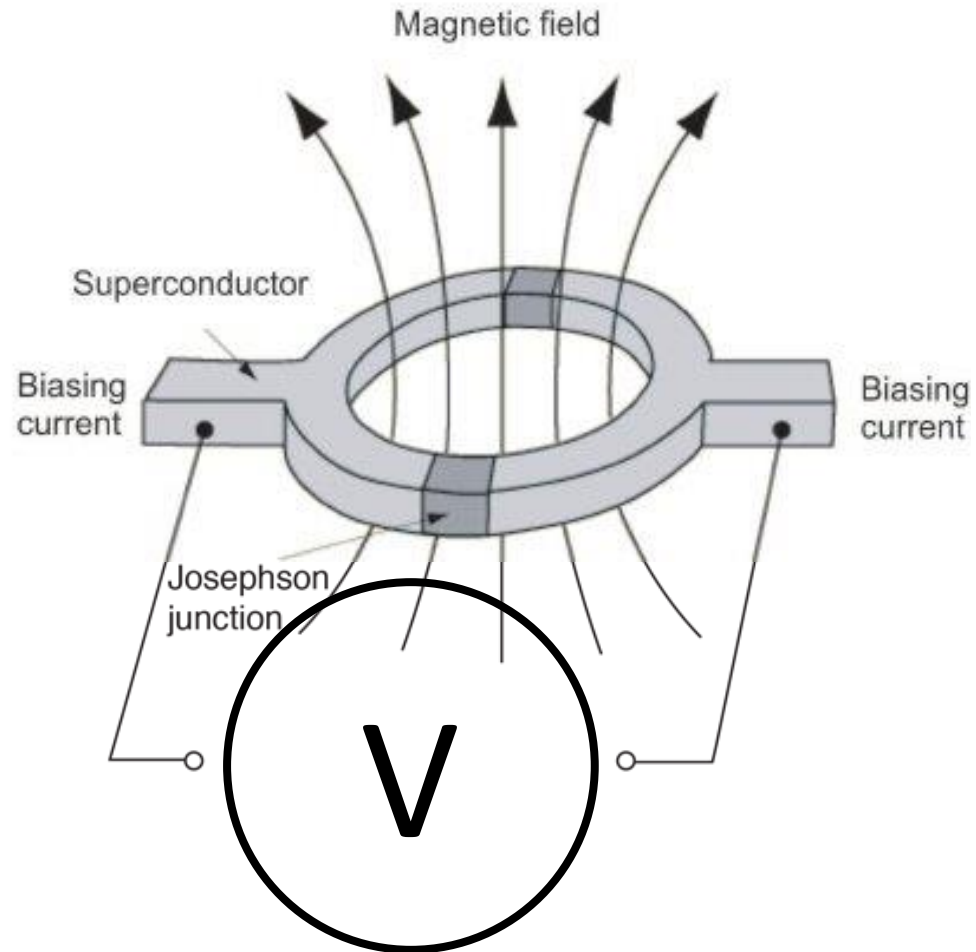


Question : SQUID

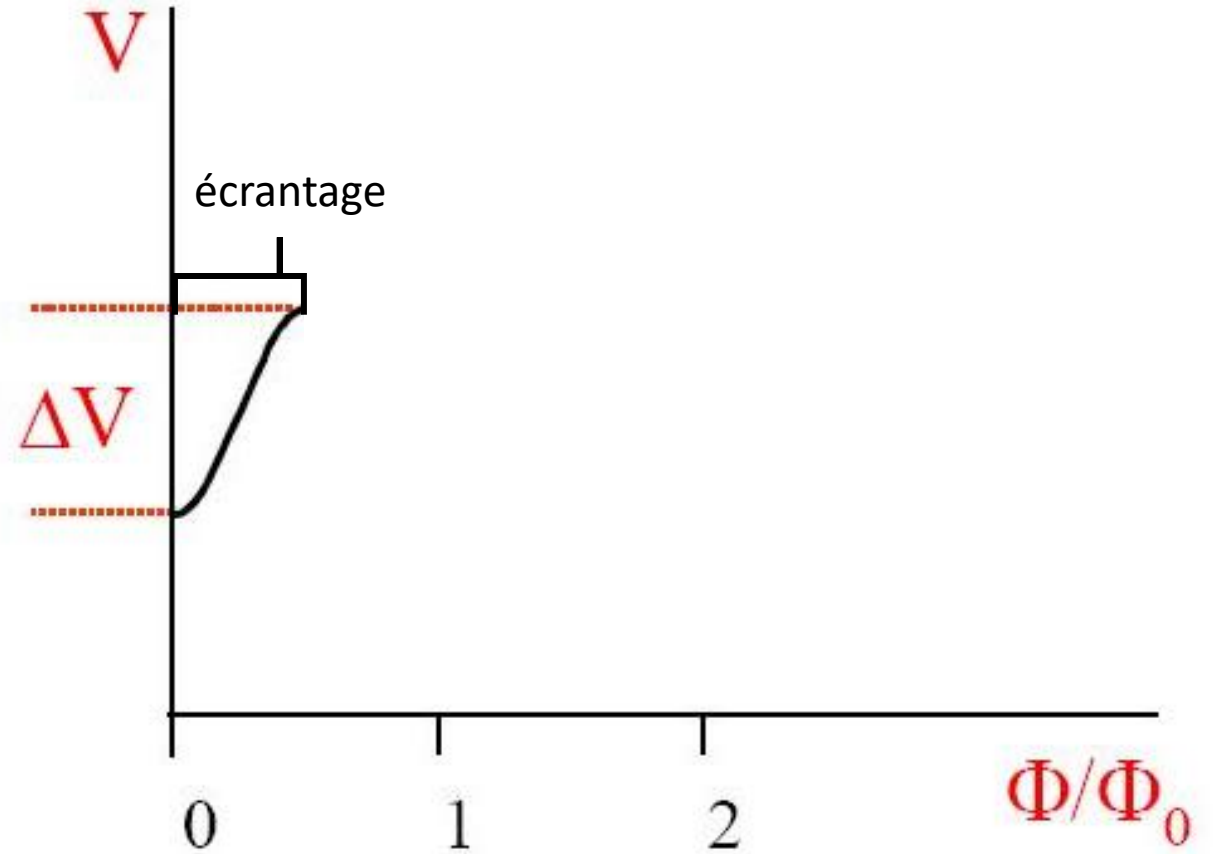
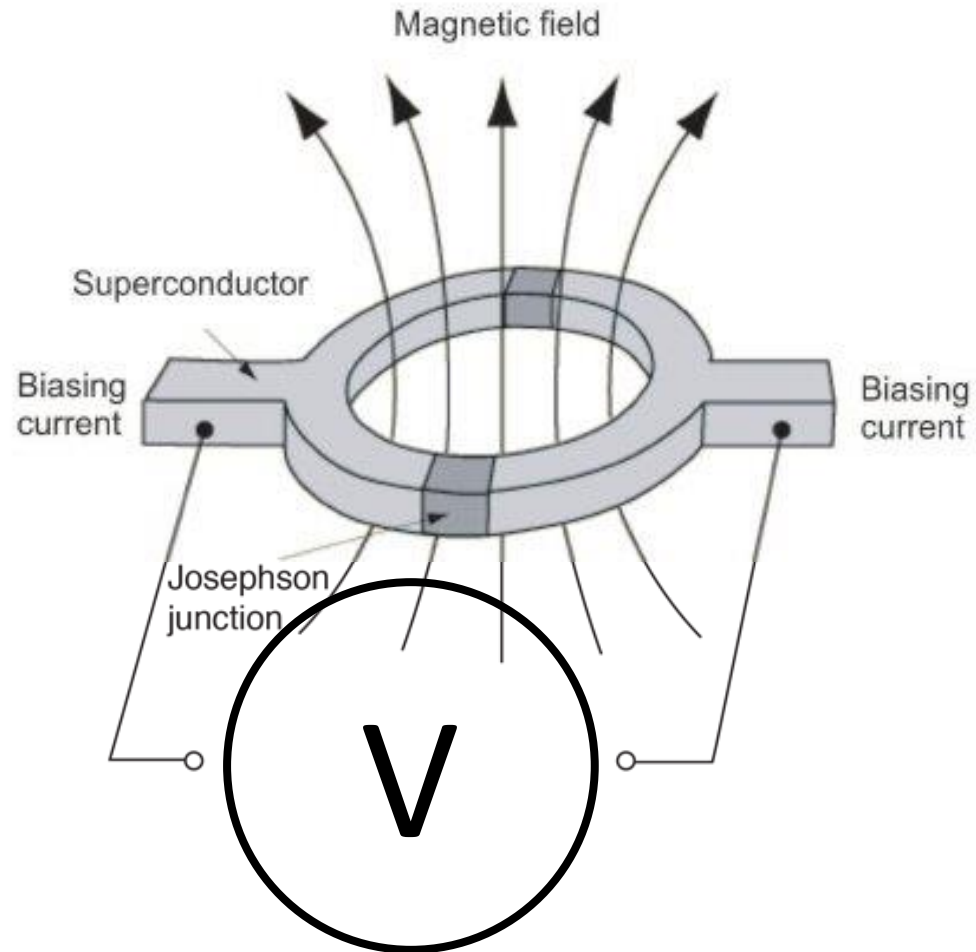
- Supraconducteur la phase est définie macroscopiquement
- Effet Aharonov-Bohm
- Effet Josephson
- https://tp.physique.usherbrooke.ca/notes_de_cours/Squids.pdf



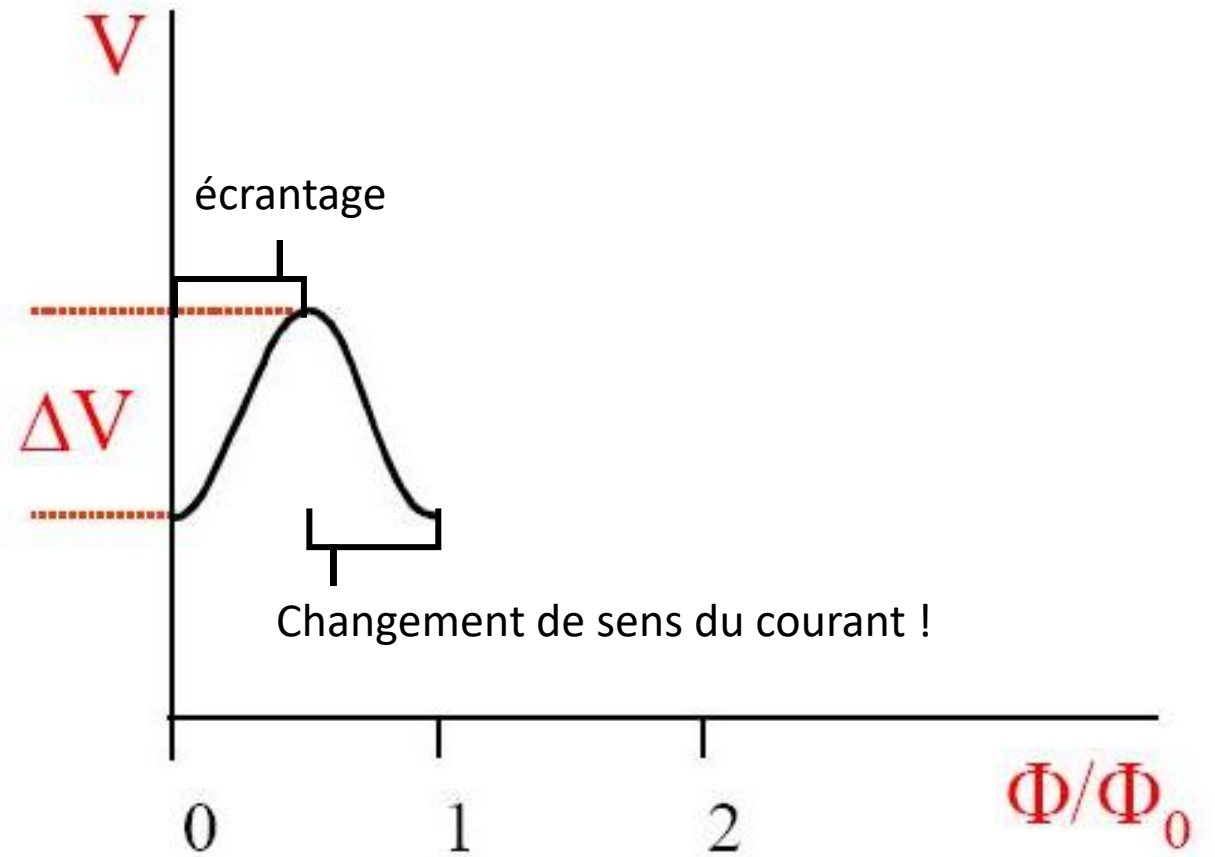
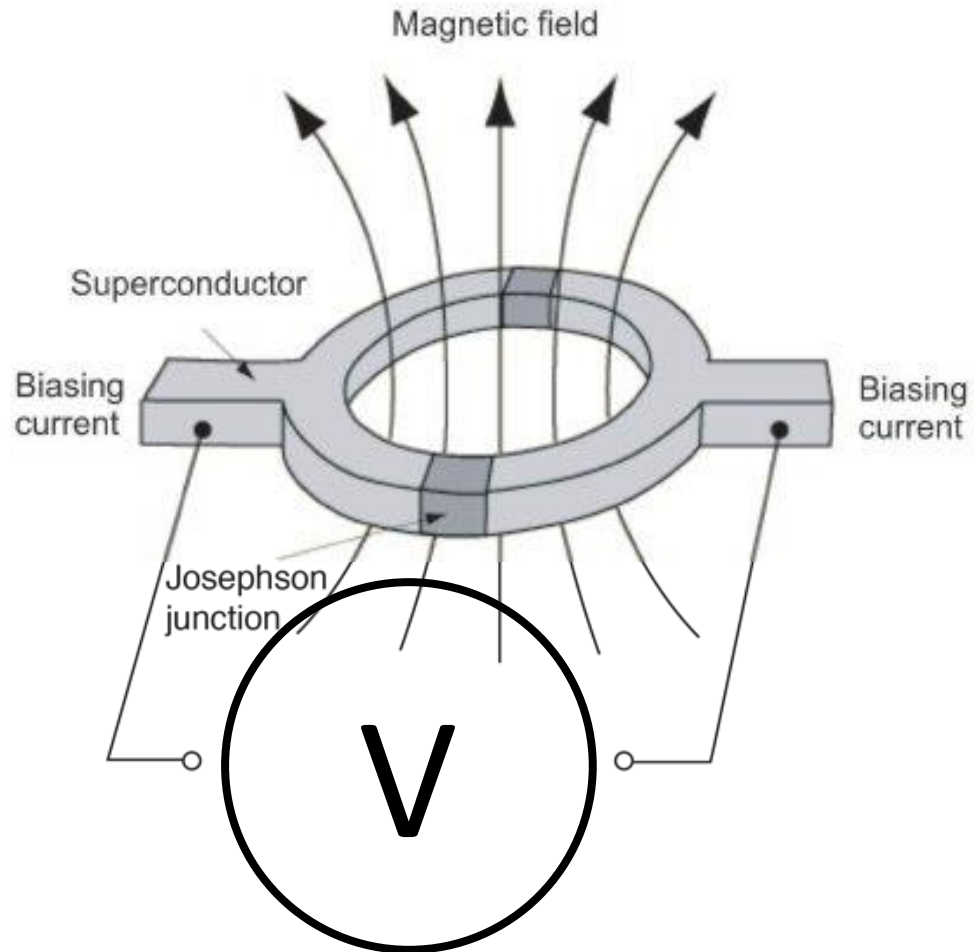
Question : SQUID



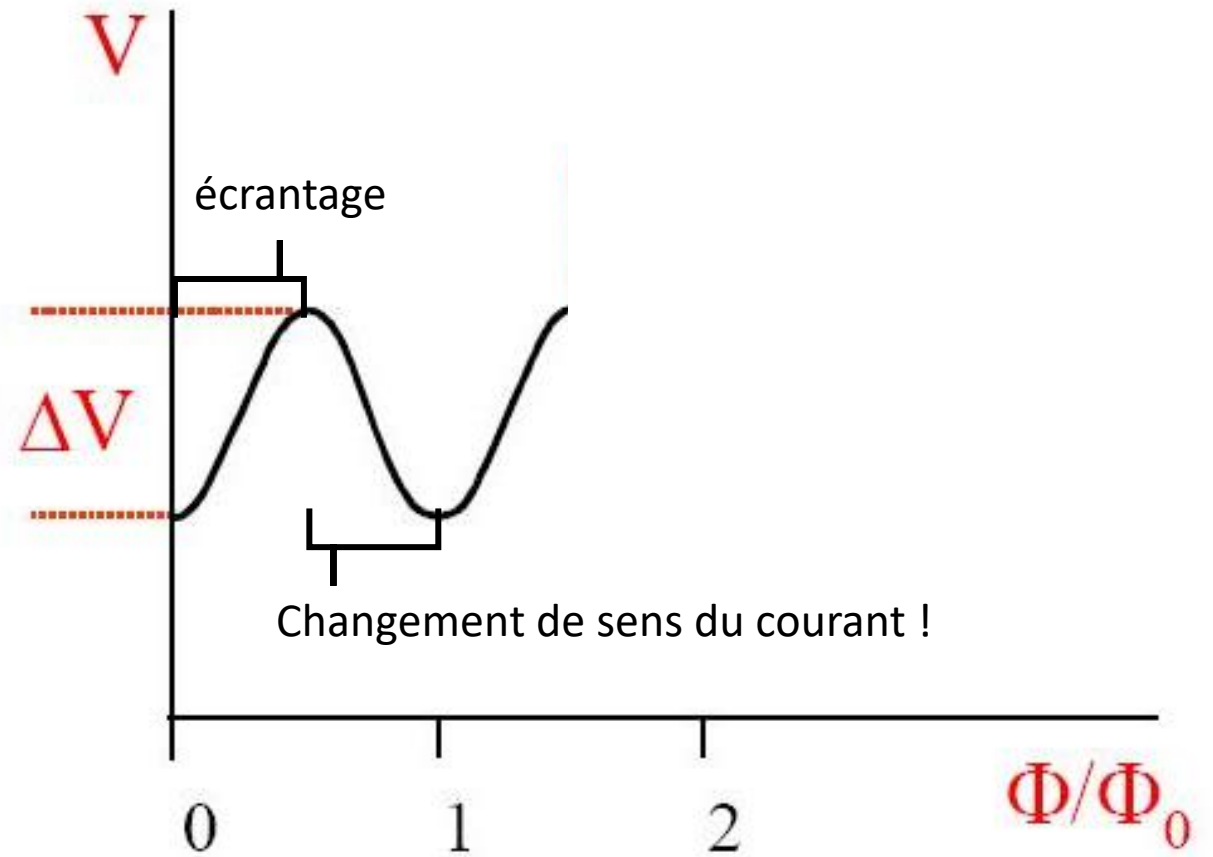
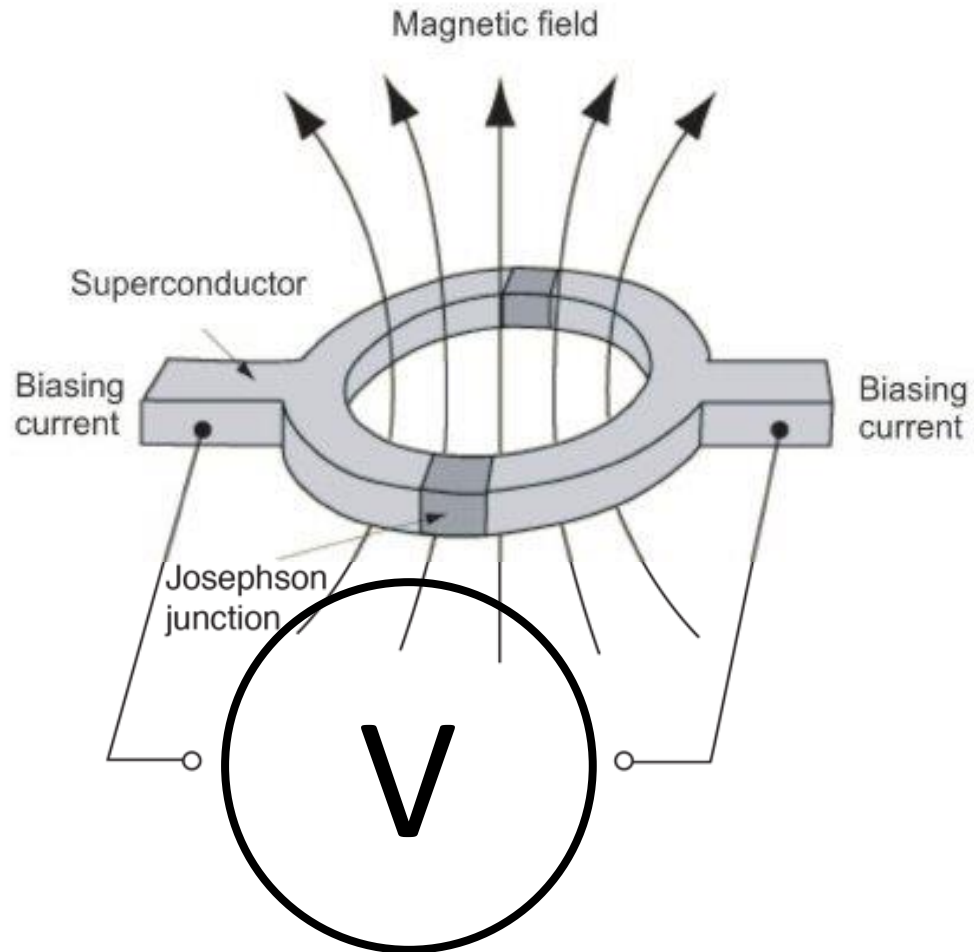
Question : SQUID



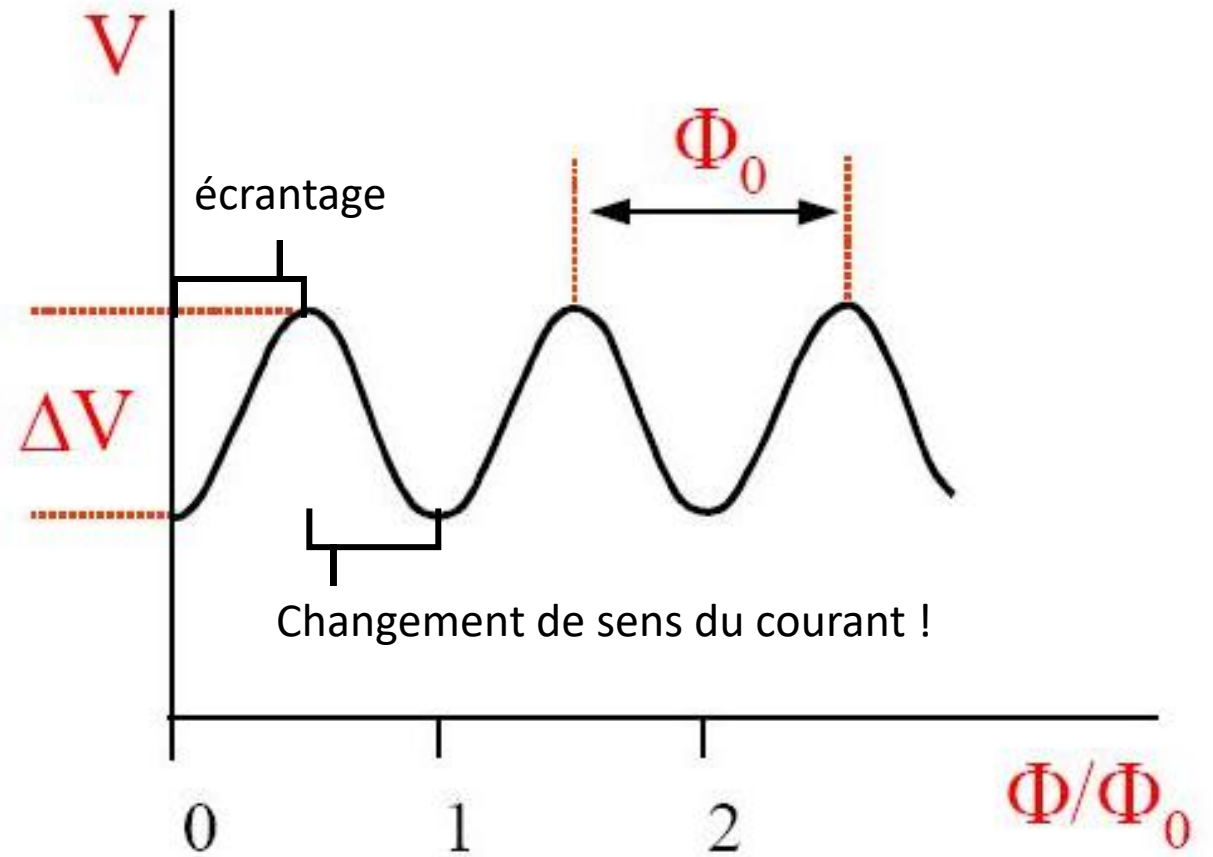
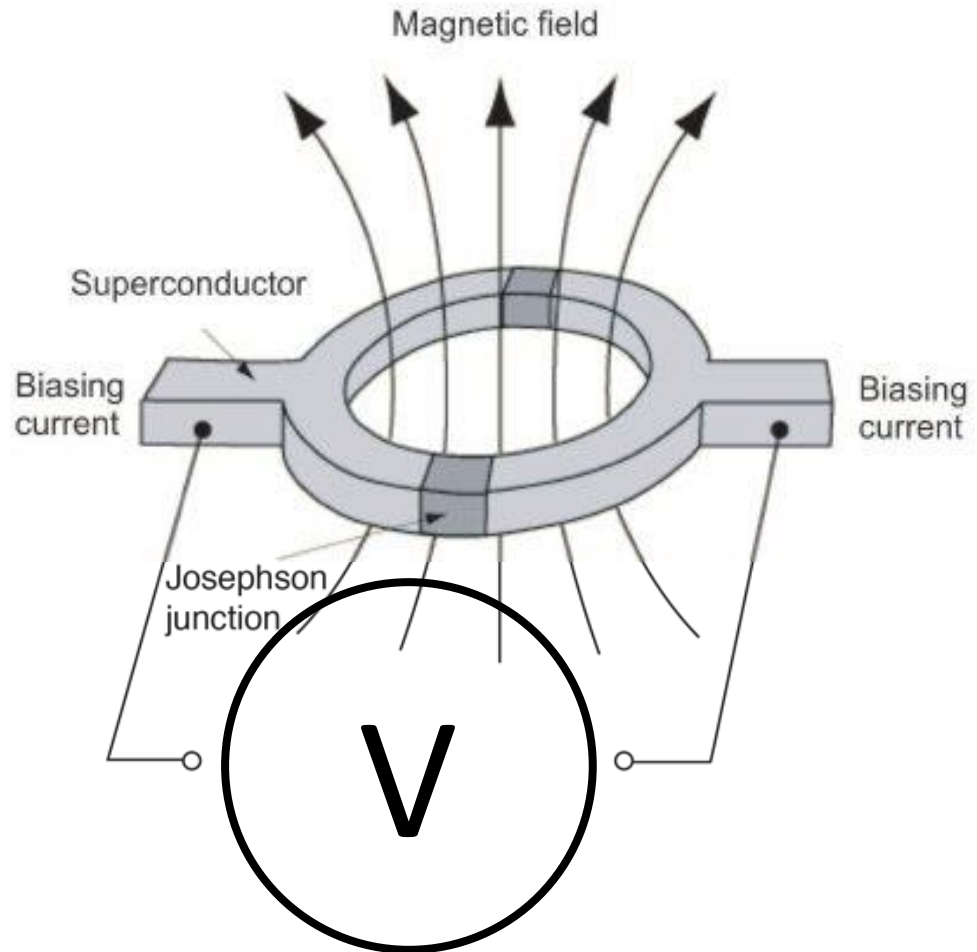
Question : SQUID



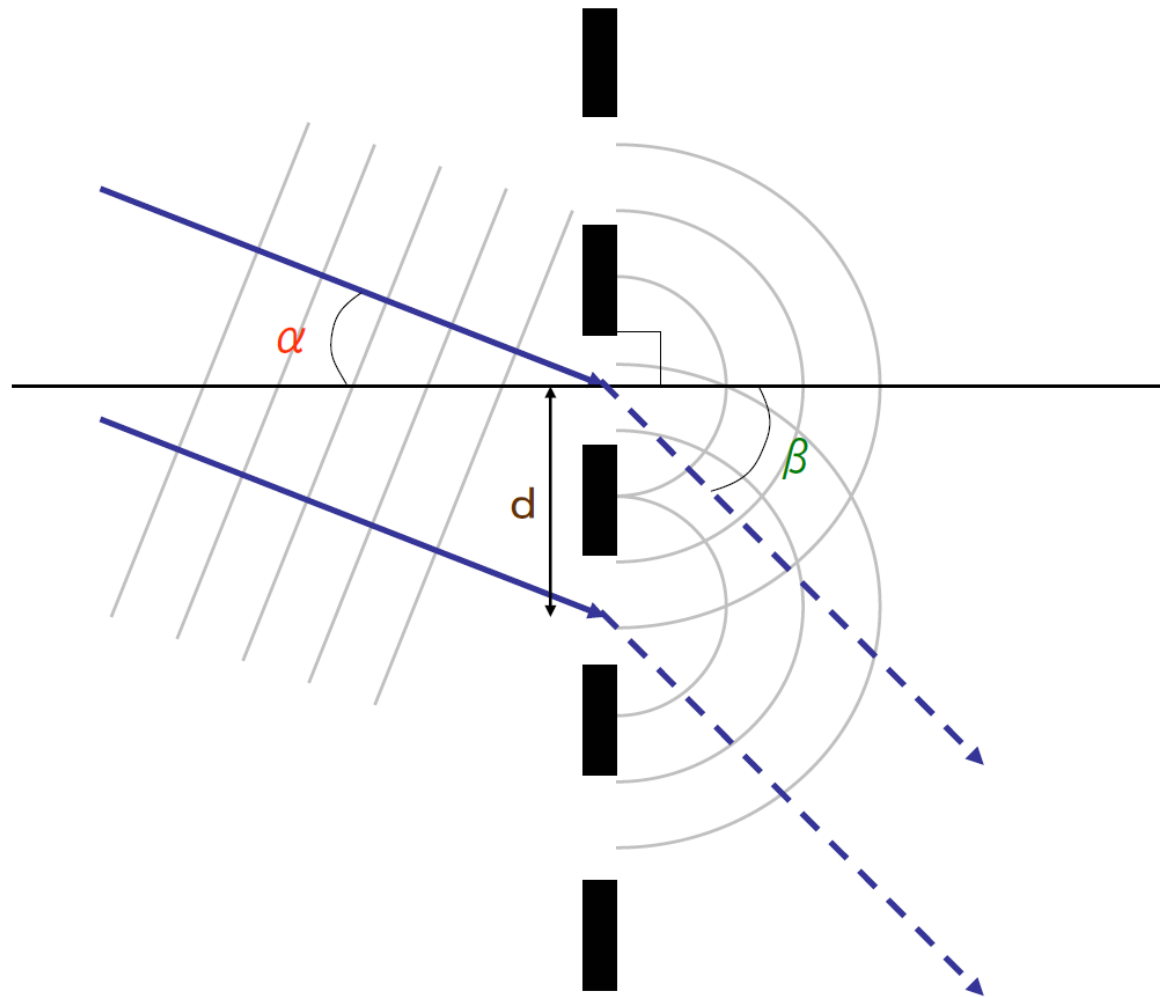
Question : SQUID



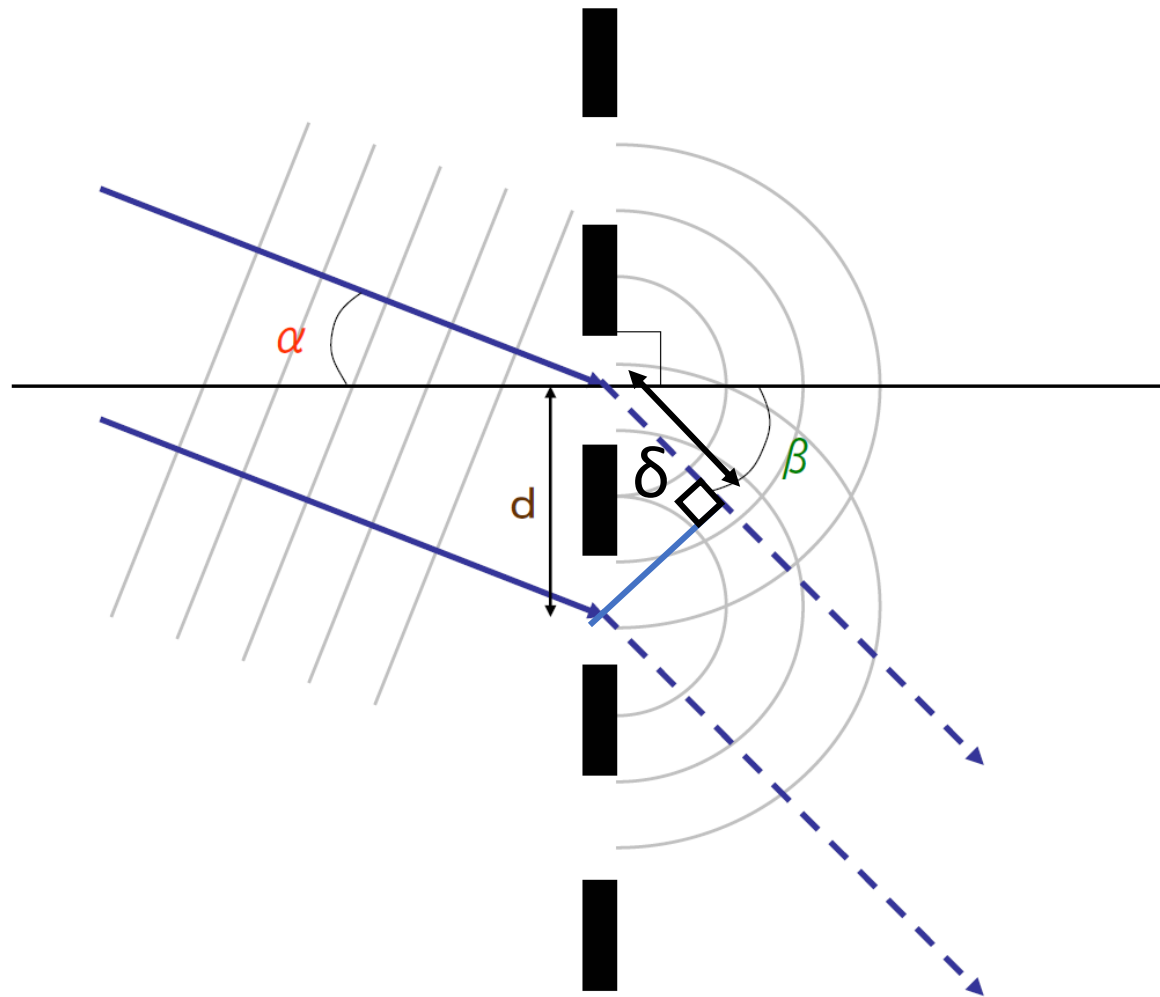
Question : SQUID



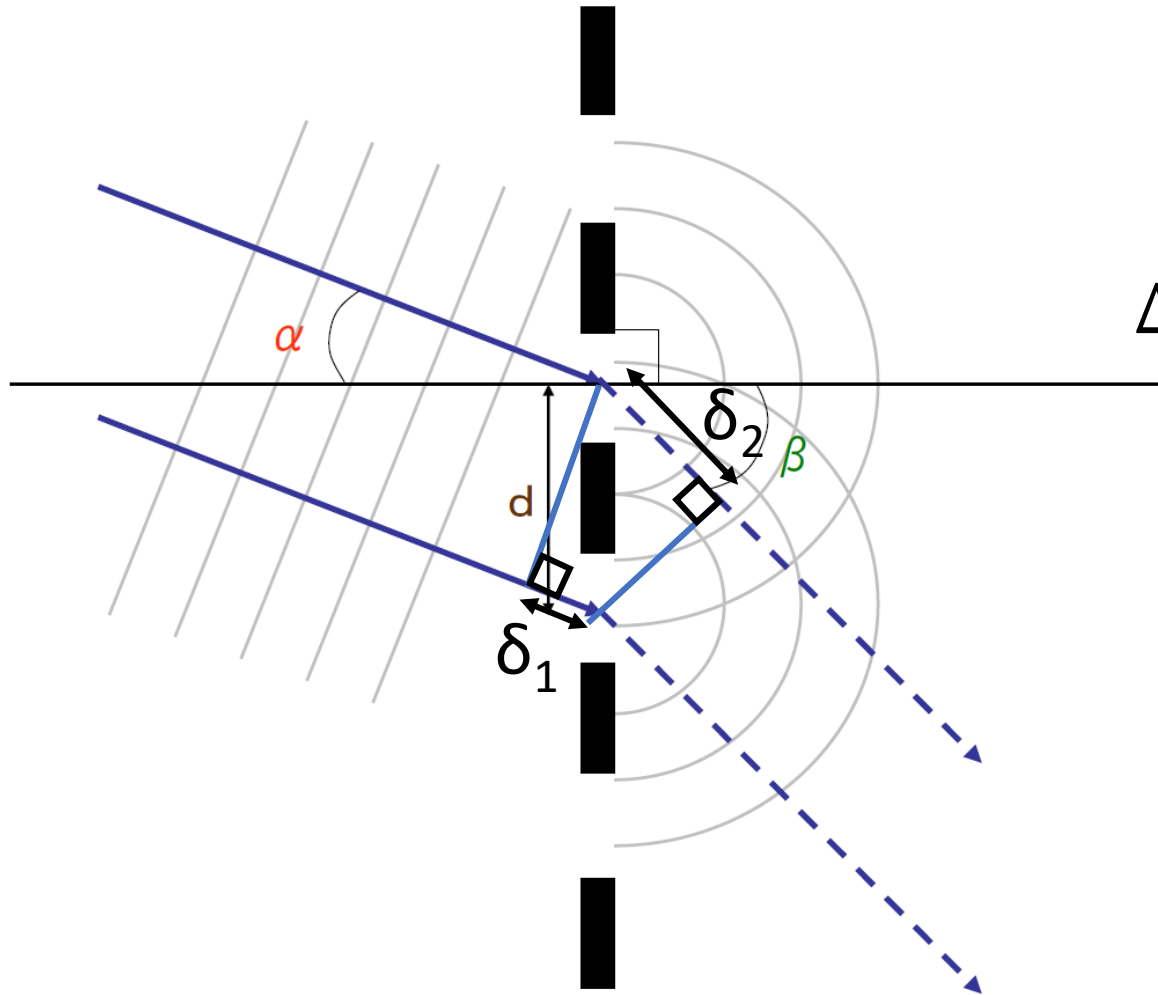
Rappel : diffraction par un réseau plan



Rappels : diffraction par un réseau plan



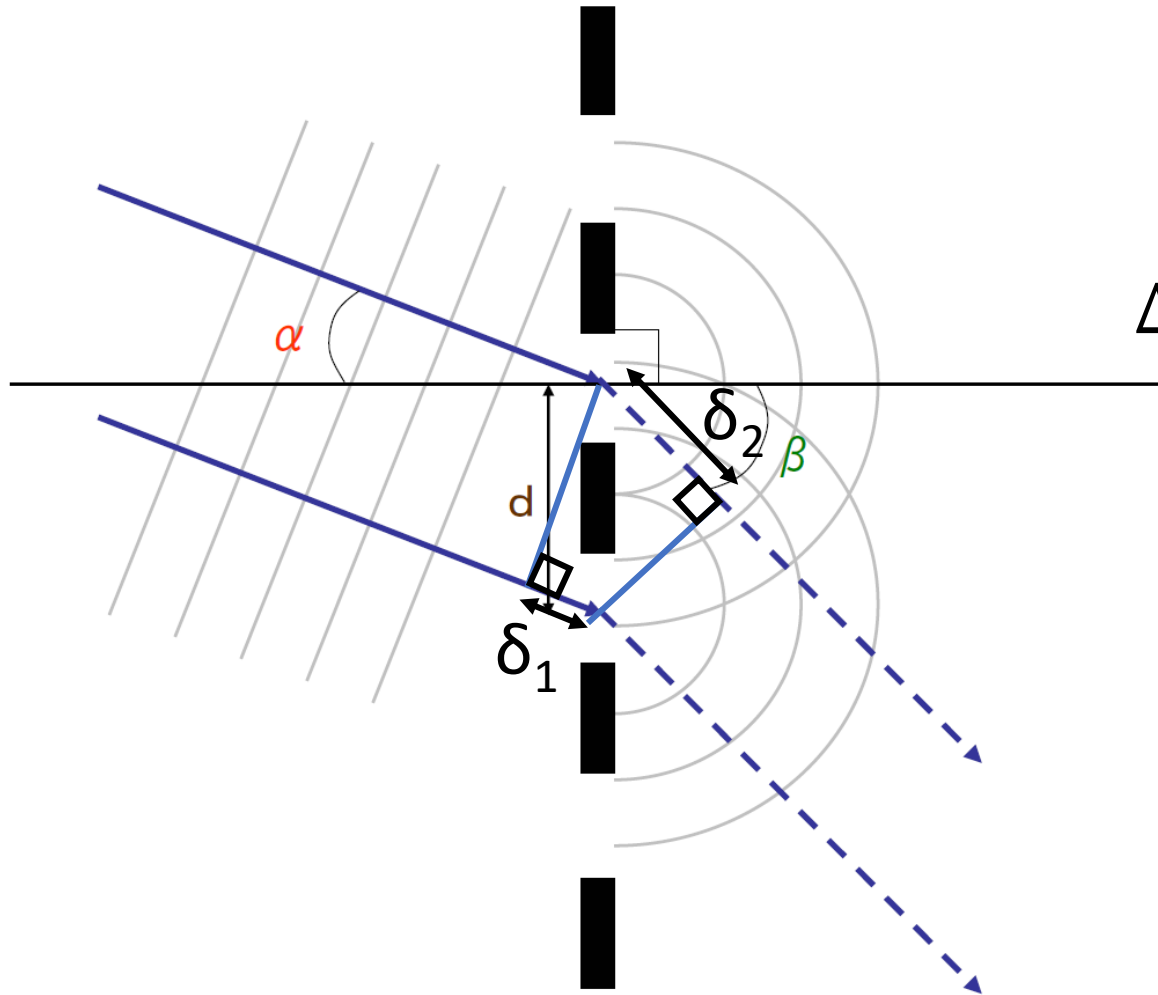
Rappels : diffraction par un réseau plan



Différence de marche → condition d'interférence

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} |\delta_2 - \delta_1| \quad \Delta\Phi = 2\pi p \quad \delta = \lambda p$$

Rappels : diffraction par un réseau plan

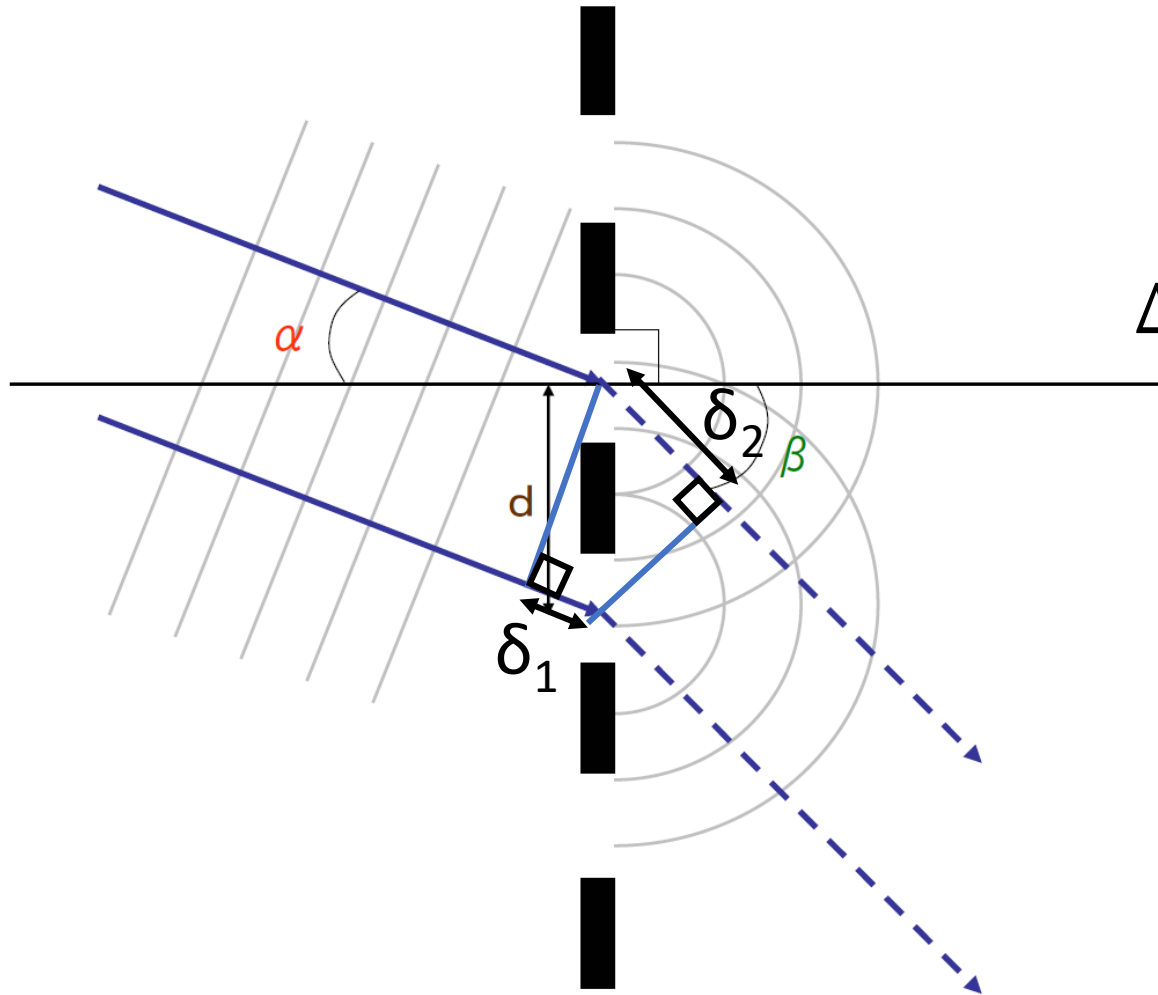


Différence de marche \rightarrow condition d'interférence

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} |\delta_2 - \delta_1| \quad \Delta\Phi = 2\pi p \quad \delta = \lambda p$$

$$d(\sin\alpha - \sin\beta) = p\lambda \quad \text{avec } p \text{ un entier}$$

Rappels : diffraction par un réseau plan



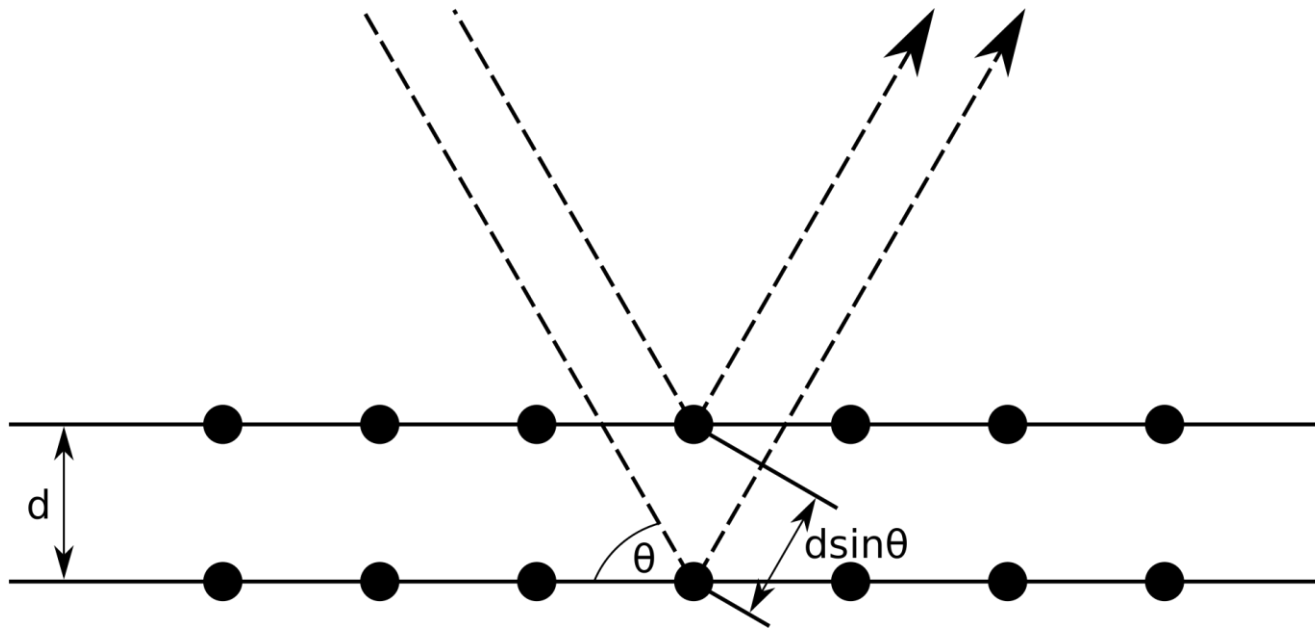
Différence de marche \rightarrow condition d'interférence

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} |\delta_2 - \delta_1| \quad \Delta\Phi = 2\pi p \quad \delta = \lambda p$$

$$d(\sin\alpha - \sin\beta) = p\lambda \quad \text{avec } p \text{ un entier}$$

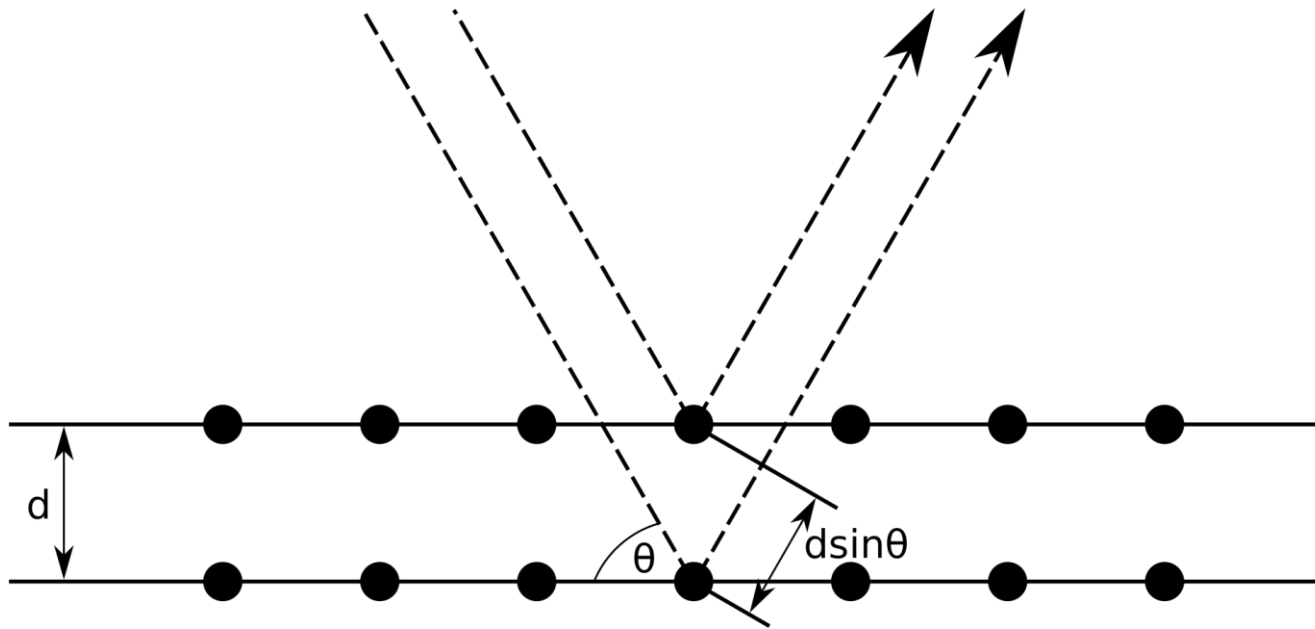
Formule des réseaux

Cas de la diffraction par un réseau 3D



$$d(\sin \theta - \sin(-\theta)) = \lambda p$$

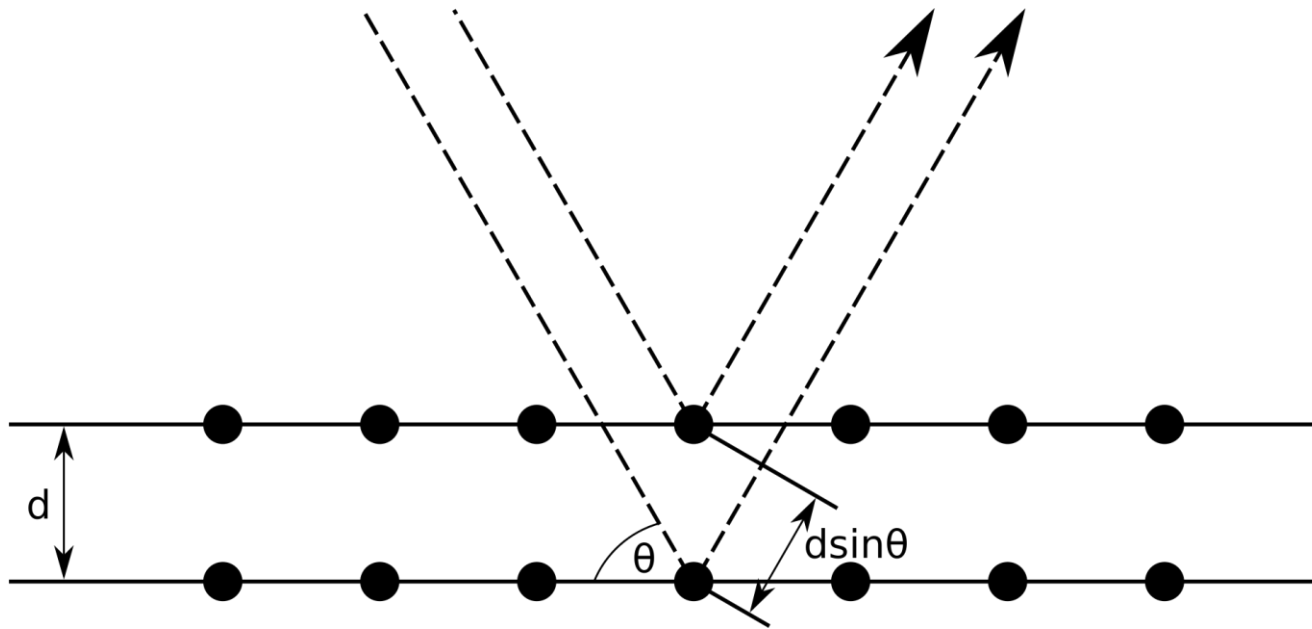
Cas de la diffraction par un réseau 3D



$$d(\sin \theta - \sin(-\theta)) = \lambda p$$

$$2d \sin \theta = \lambda p$$

Cas de la diffraction par un réseau 3D

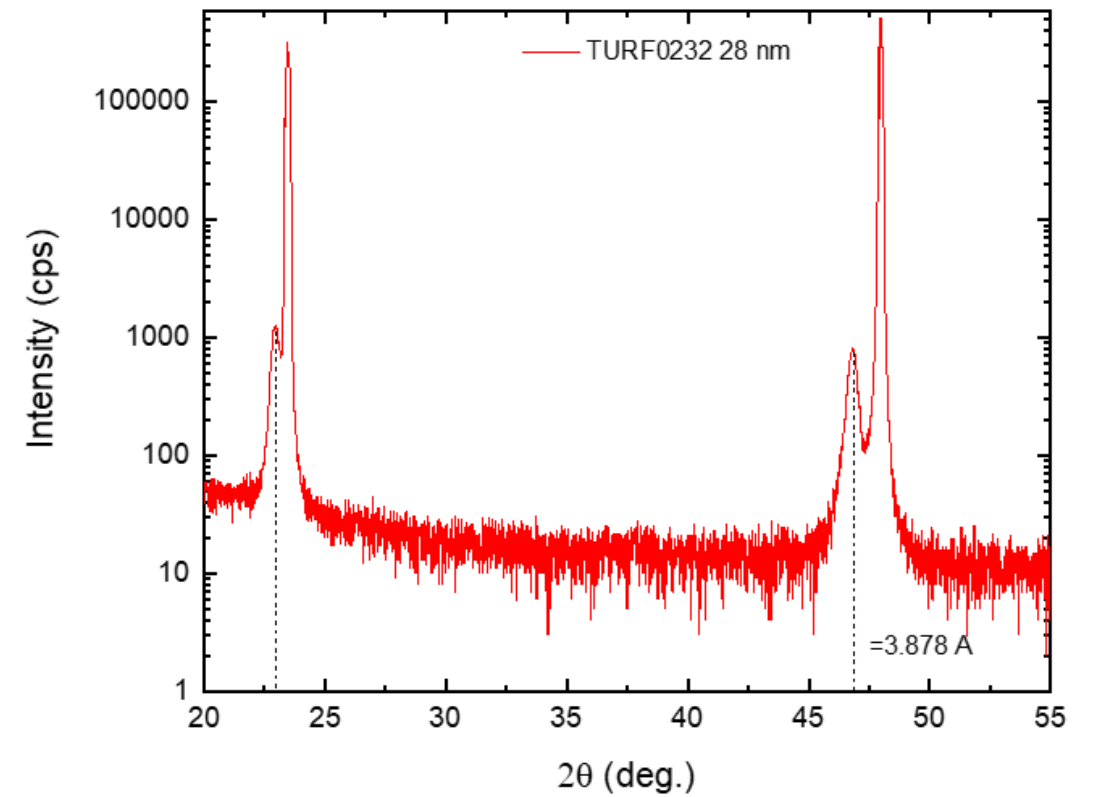
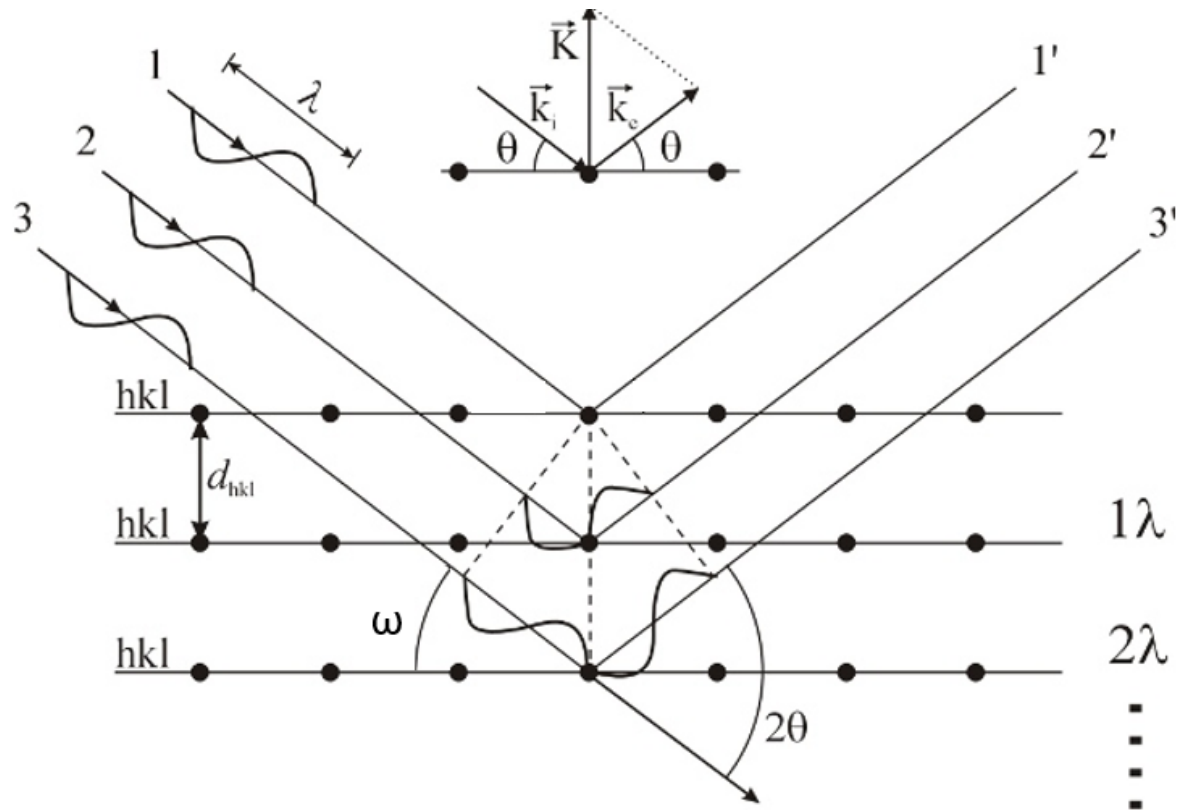


$$d(\sin \theta - \sin(-\theta)) = \lambda p$$

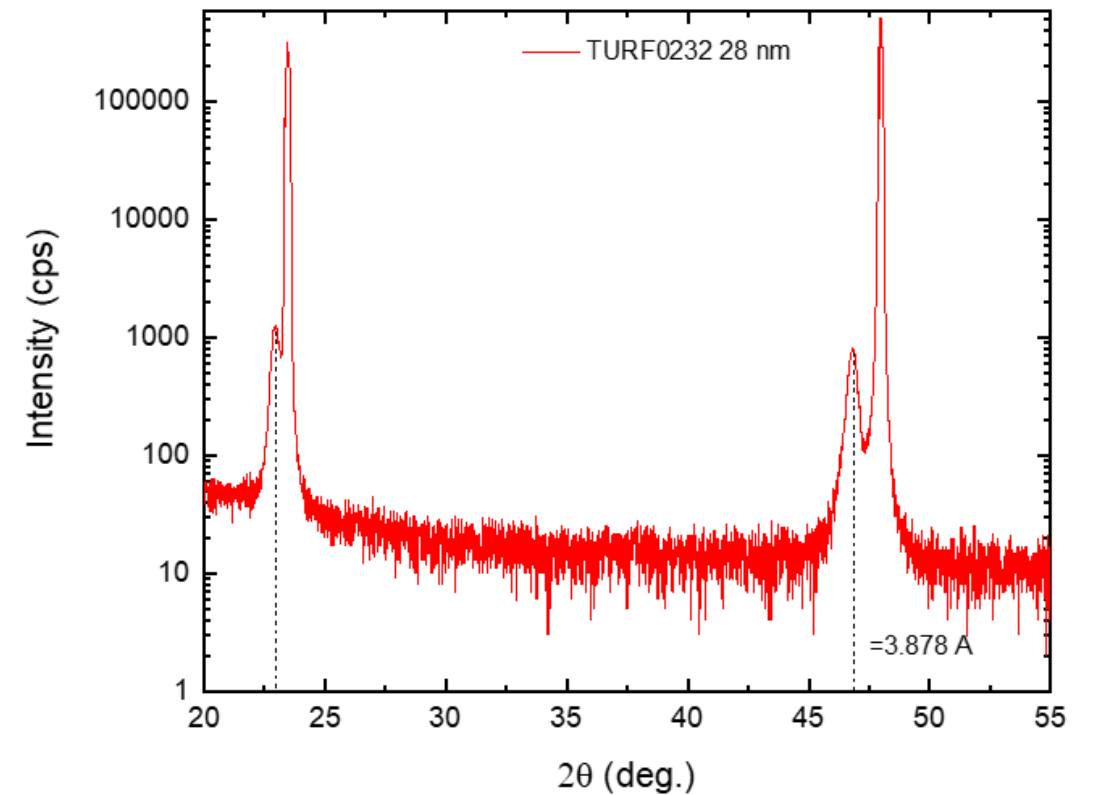
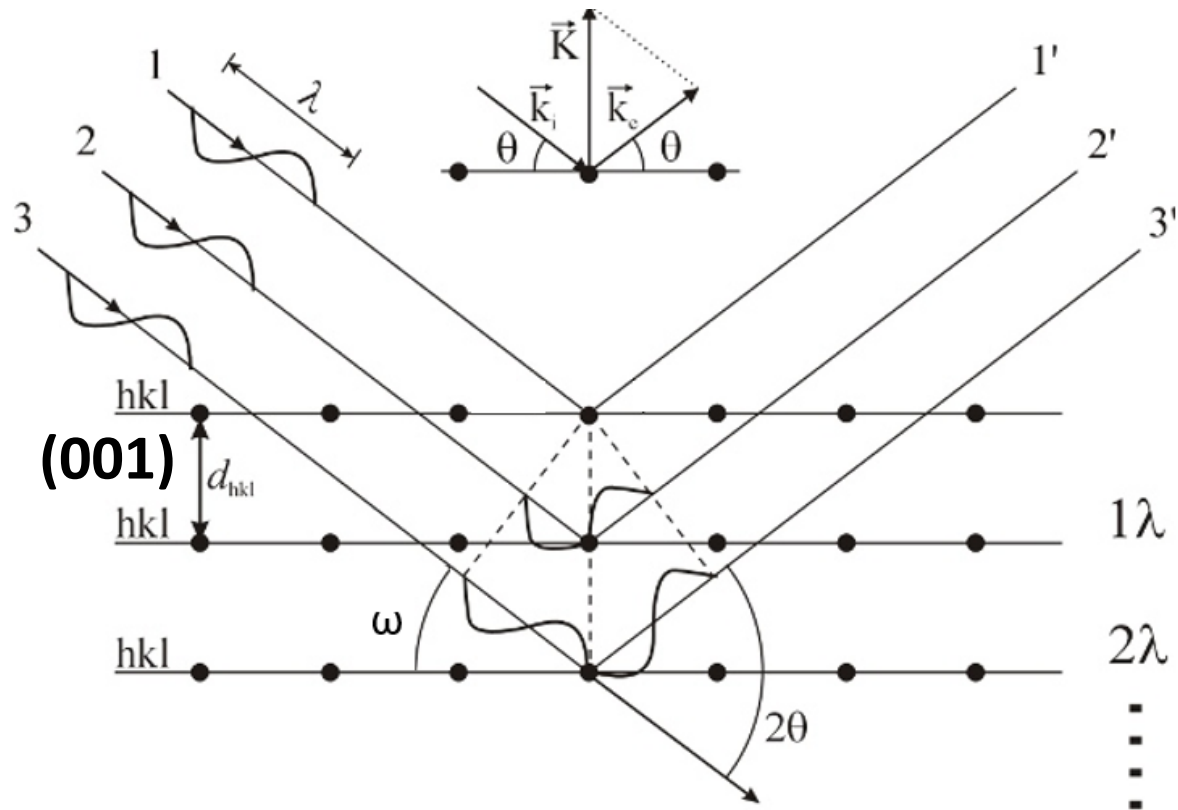
$$2d \sin \theta = \lambda p$$

Loi de Bragg

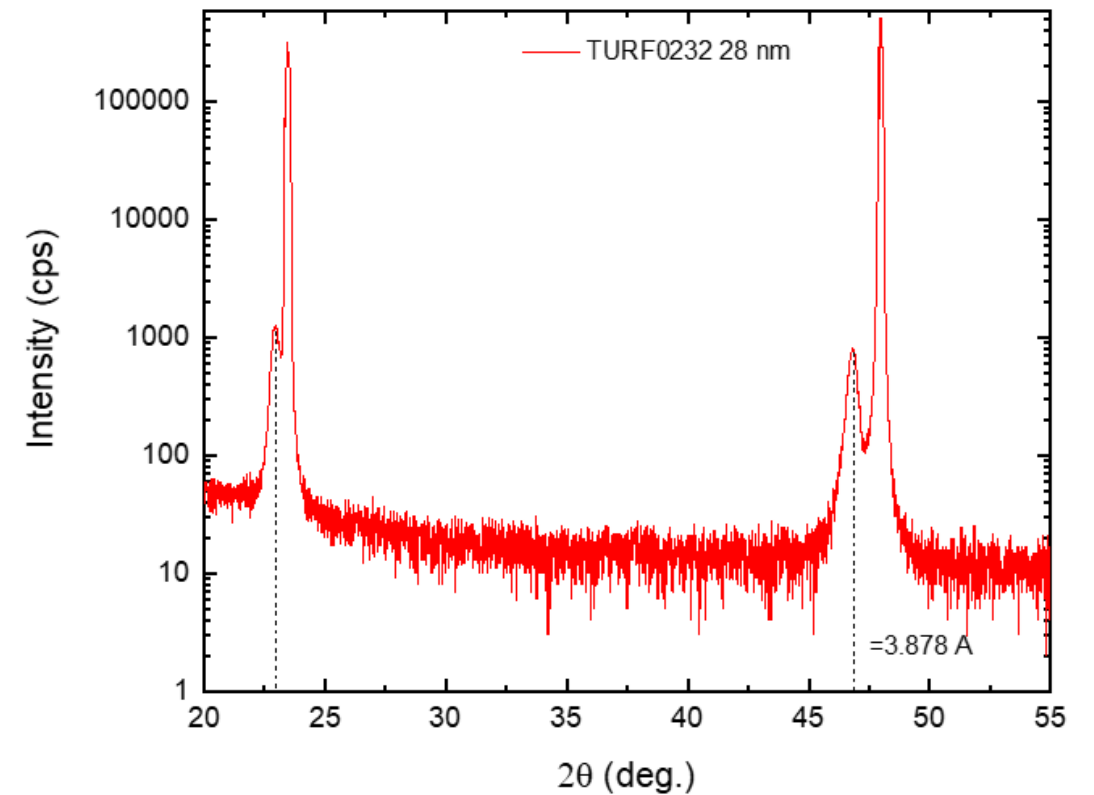
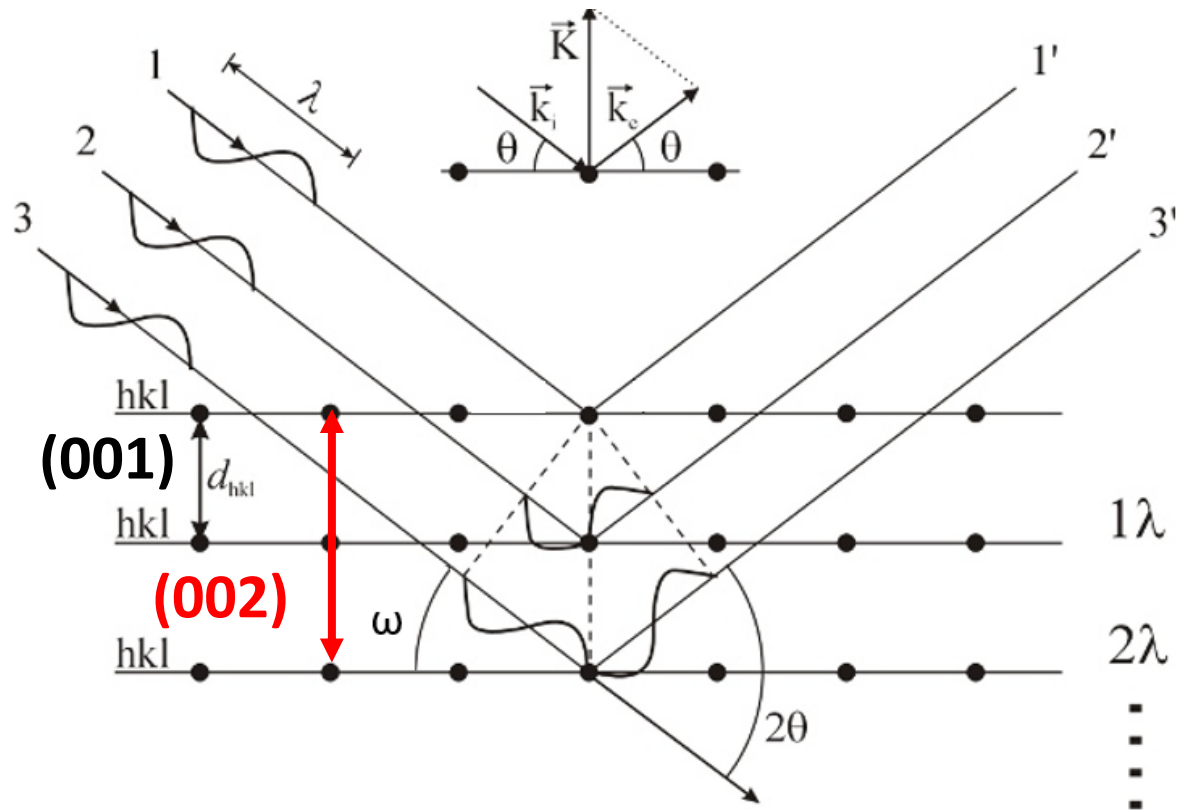
Cas de la diffraction par un réseau 3D



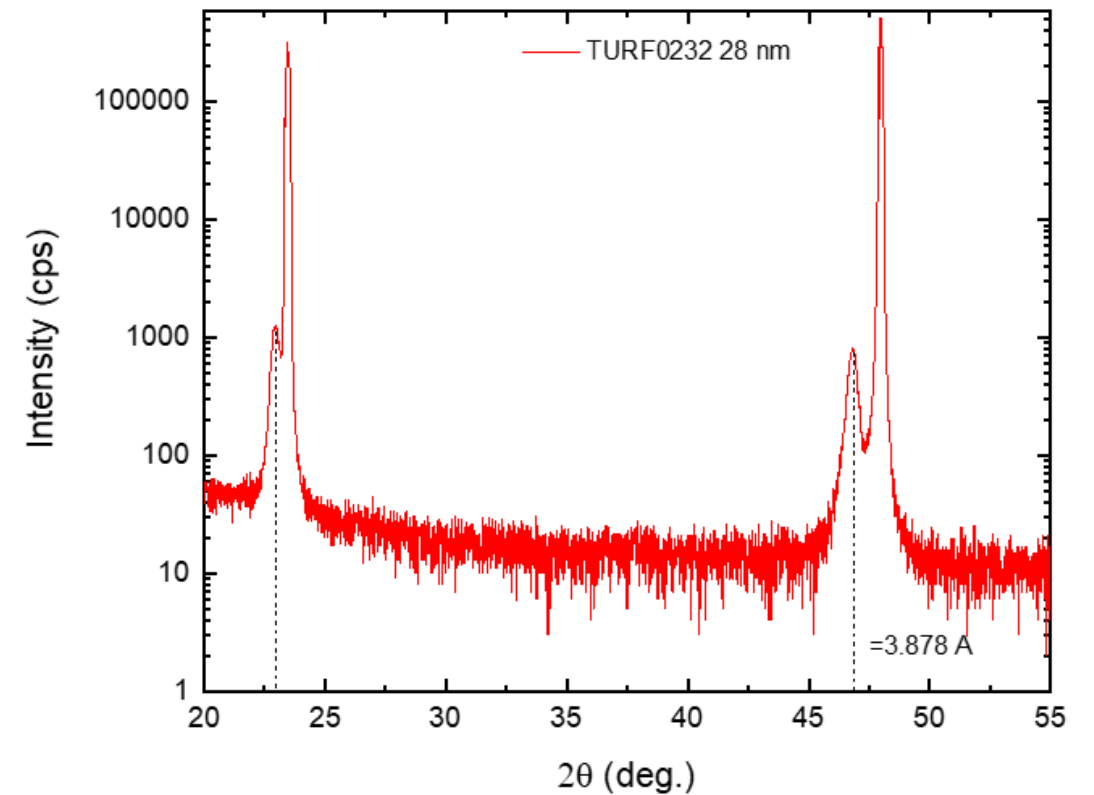
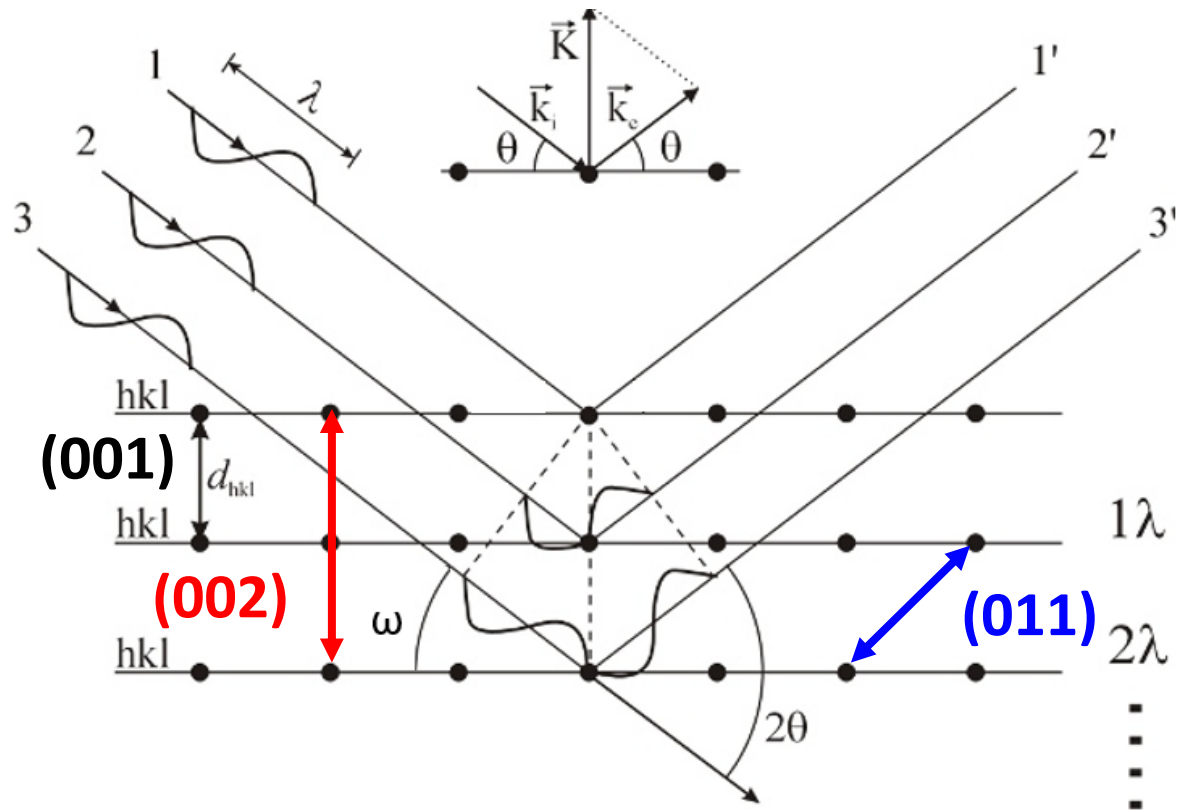
Cas de la diffraction par un réseau 3D



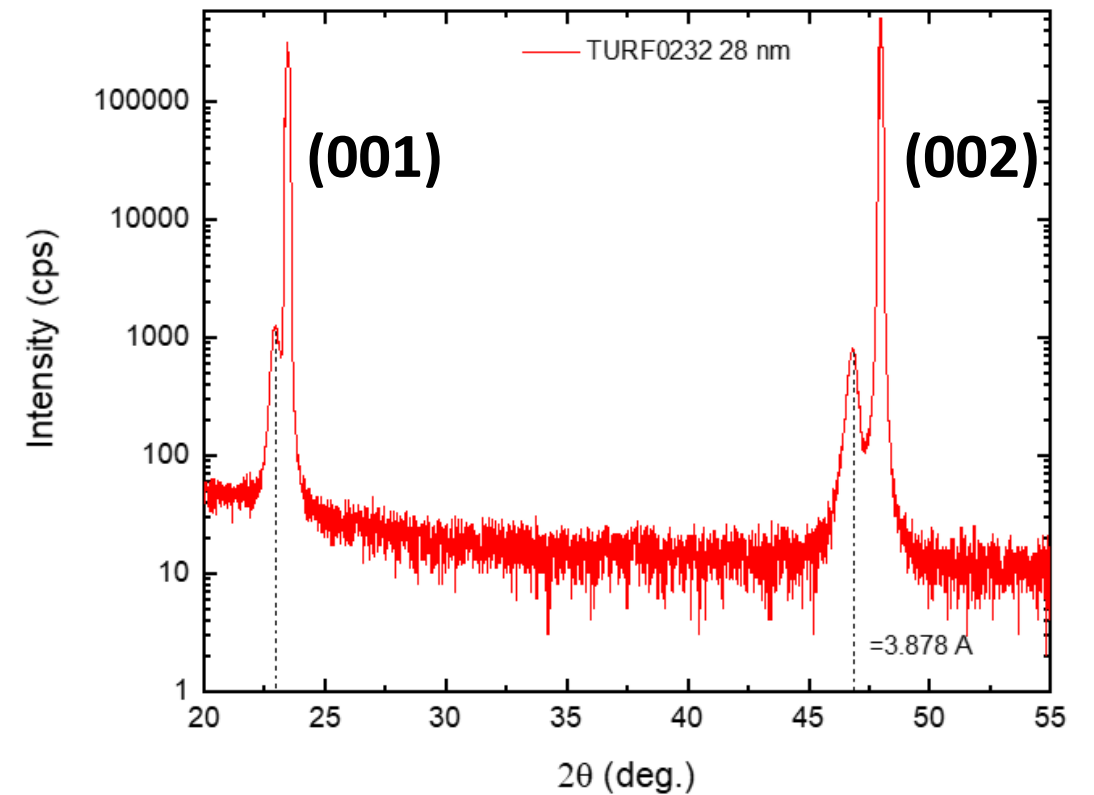
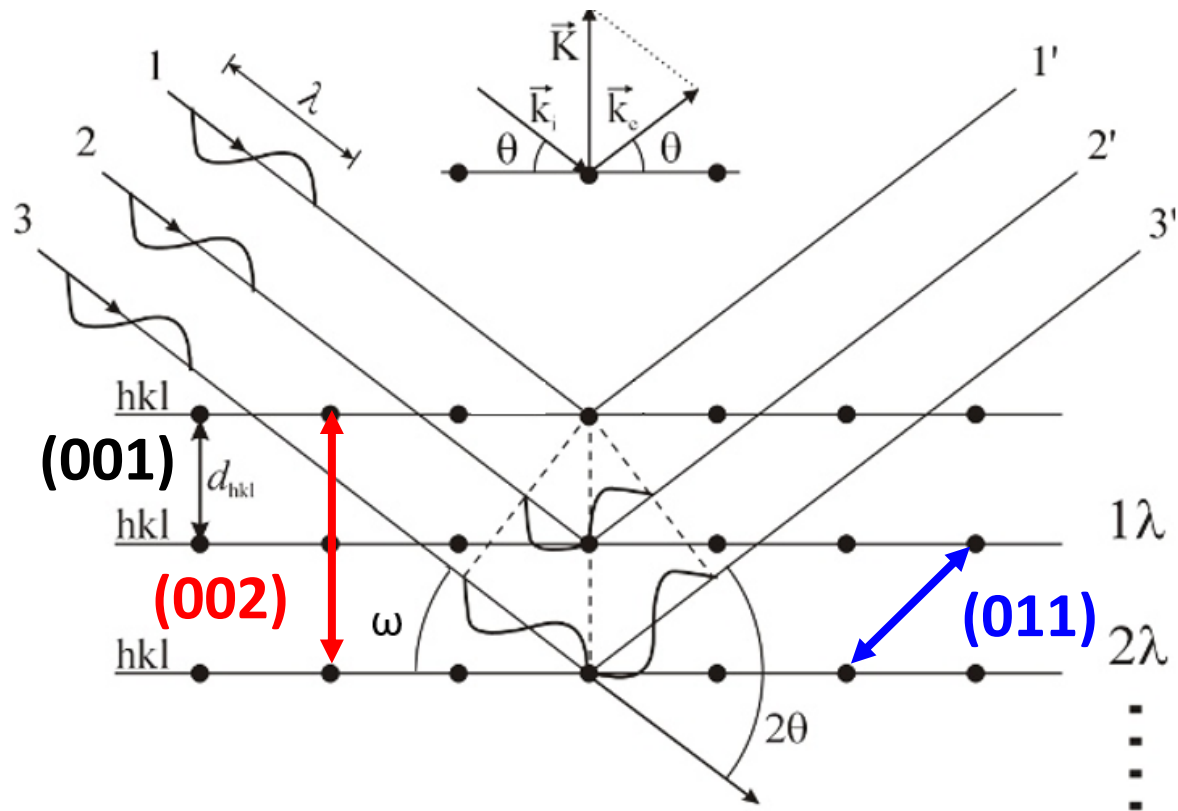
Cas de la diffraction par un réseau 3D



Cas de la diffraction par un réseau 3D

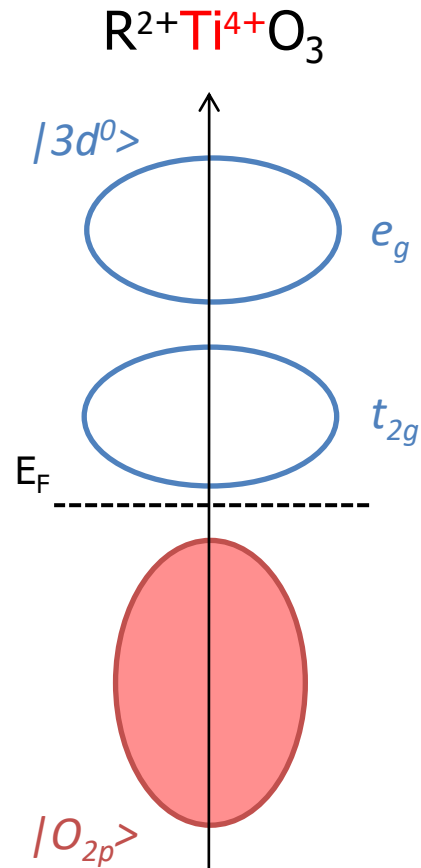


Cas de la diffraction par un réseau 3D



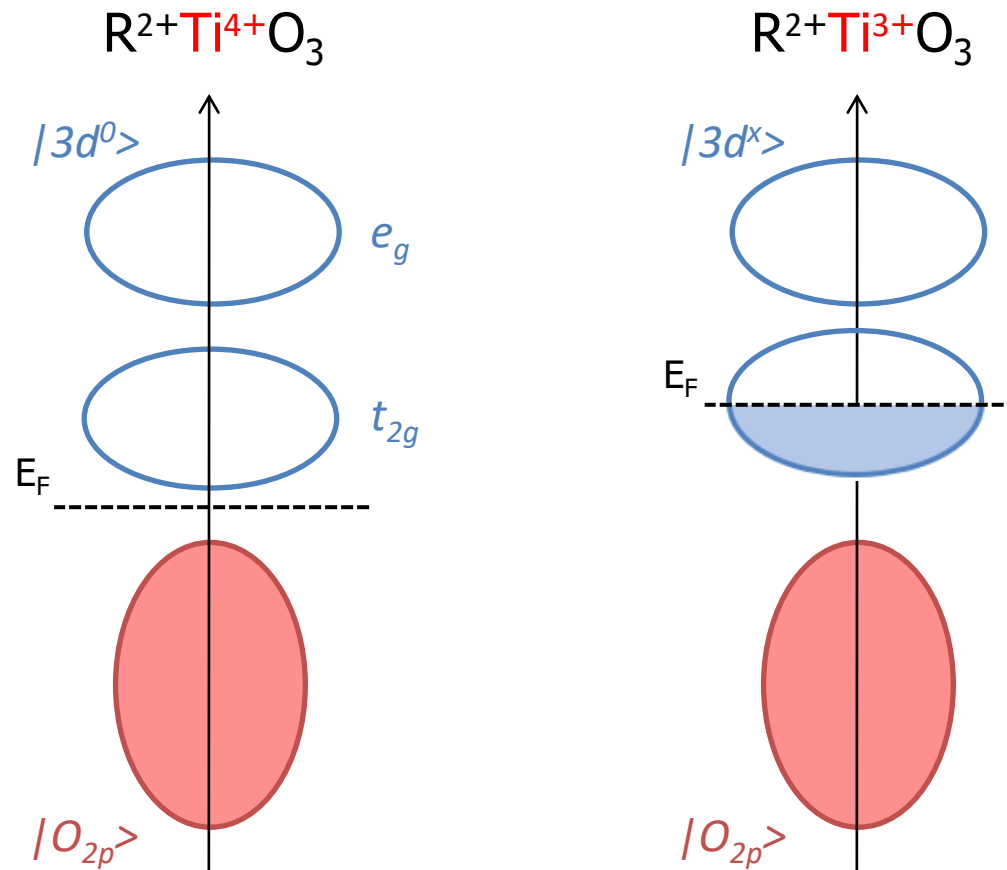
Annexe 2

Mott insulator vs Band insulator



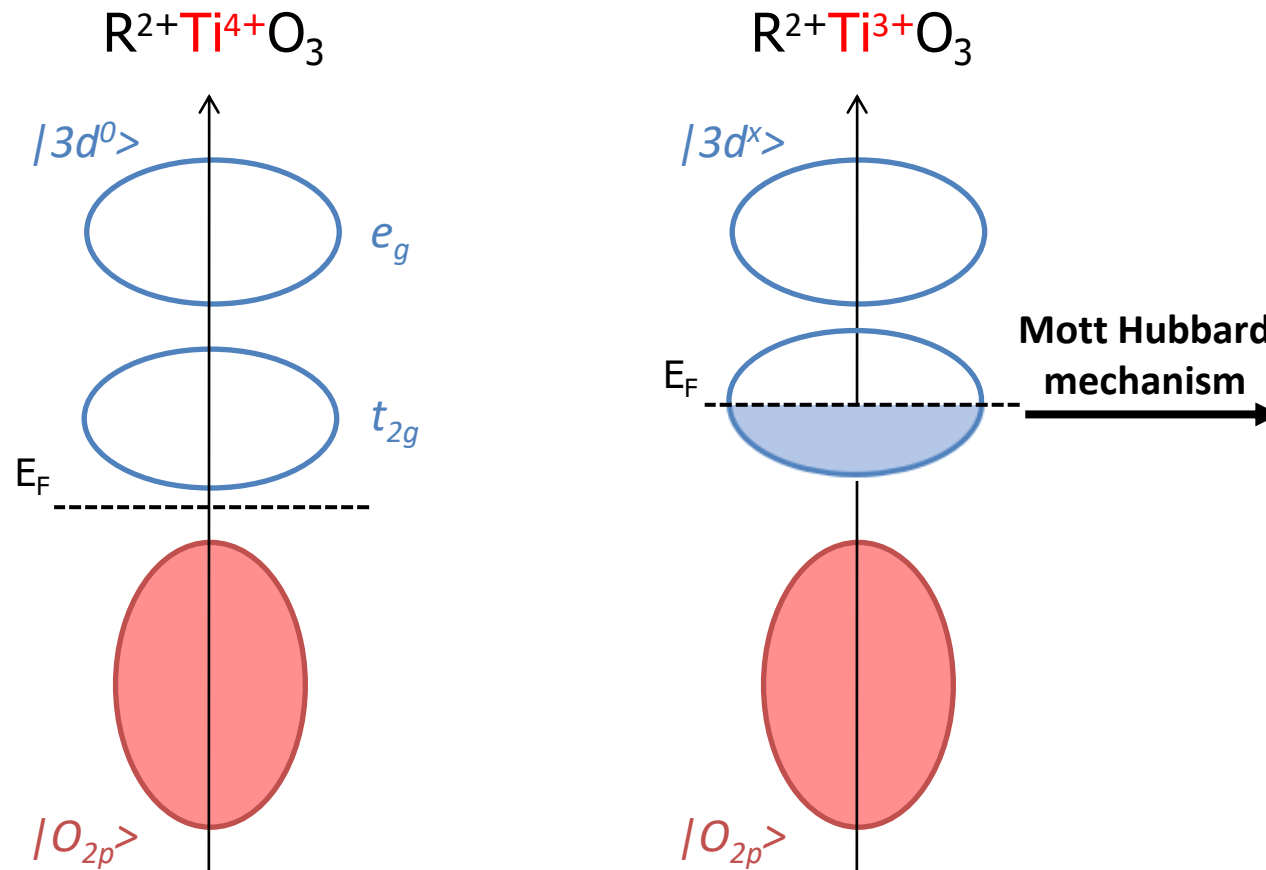
- No ***d*** electrons
- No magnetism
- **Band insulator**

Mott insulator vs Band insulator



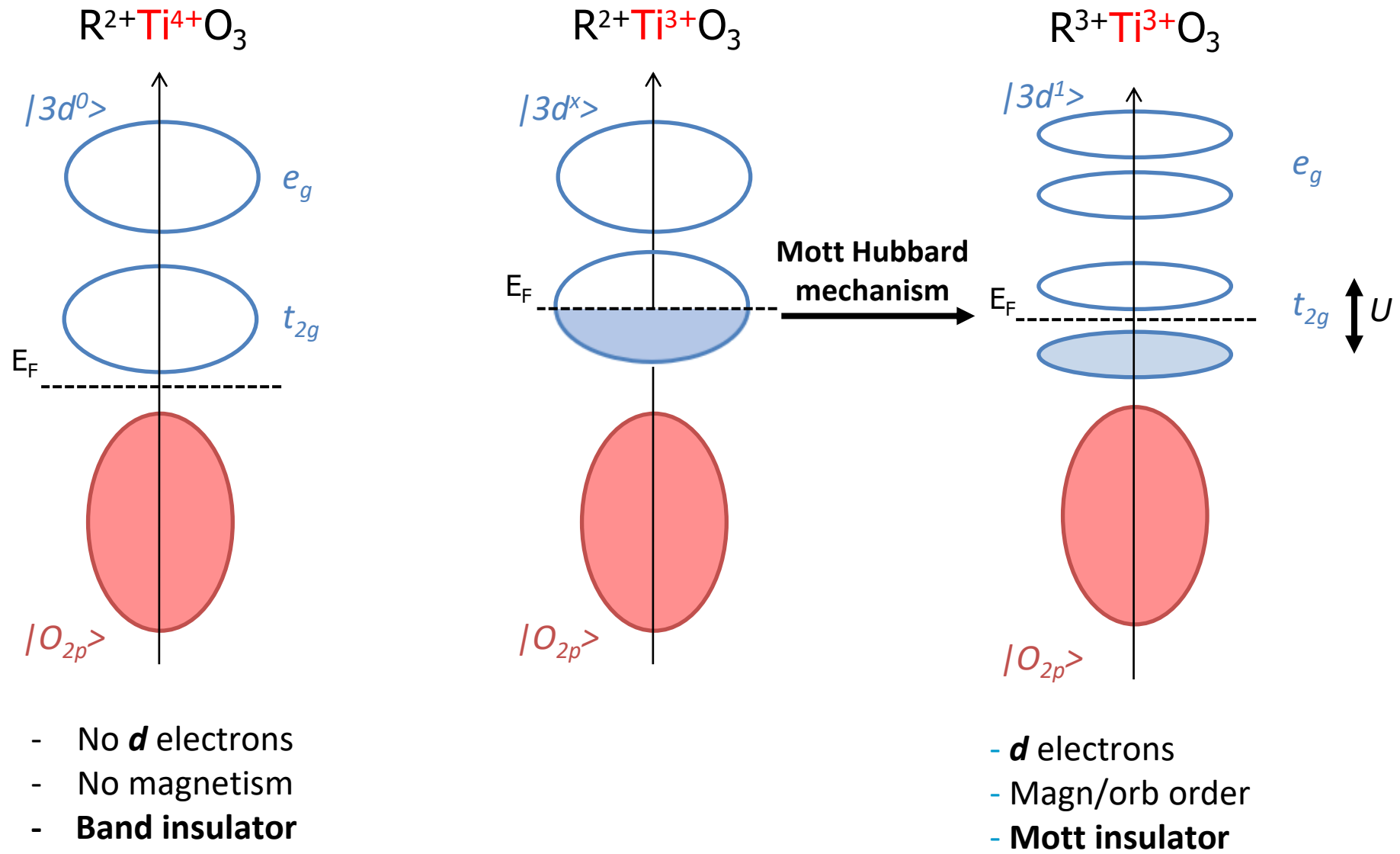
- No ***d*** electrons
- No magnetism
- **Band insulator**

Mott insulator vs Band insulator

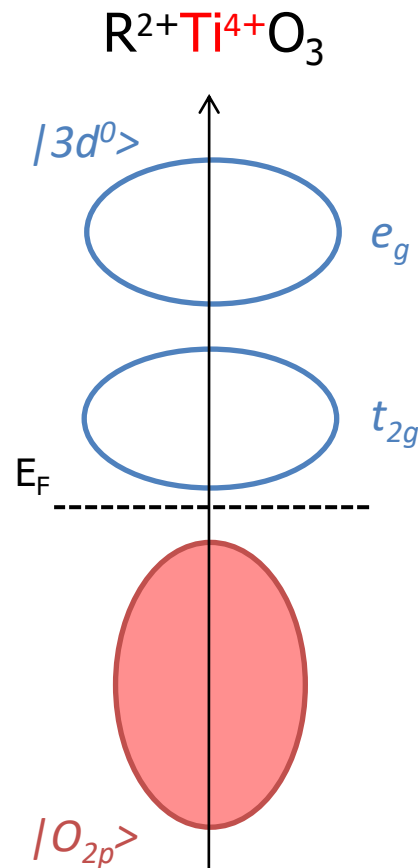


- No ***d*** electrons
- No magnetism
- **Band insulator**

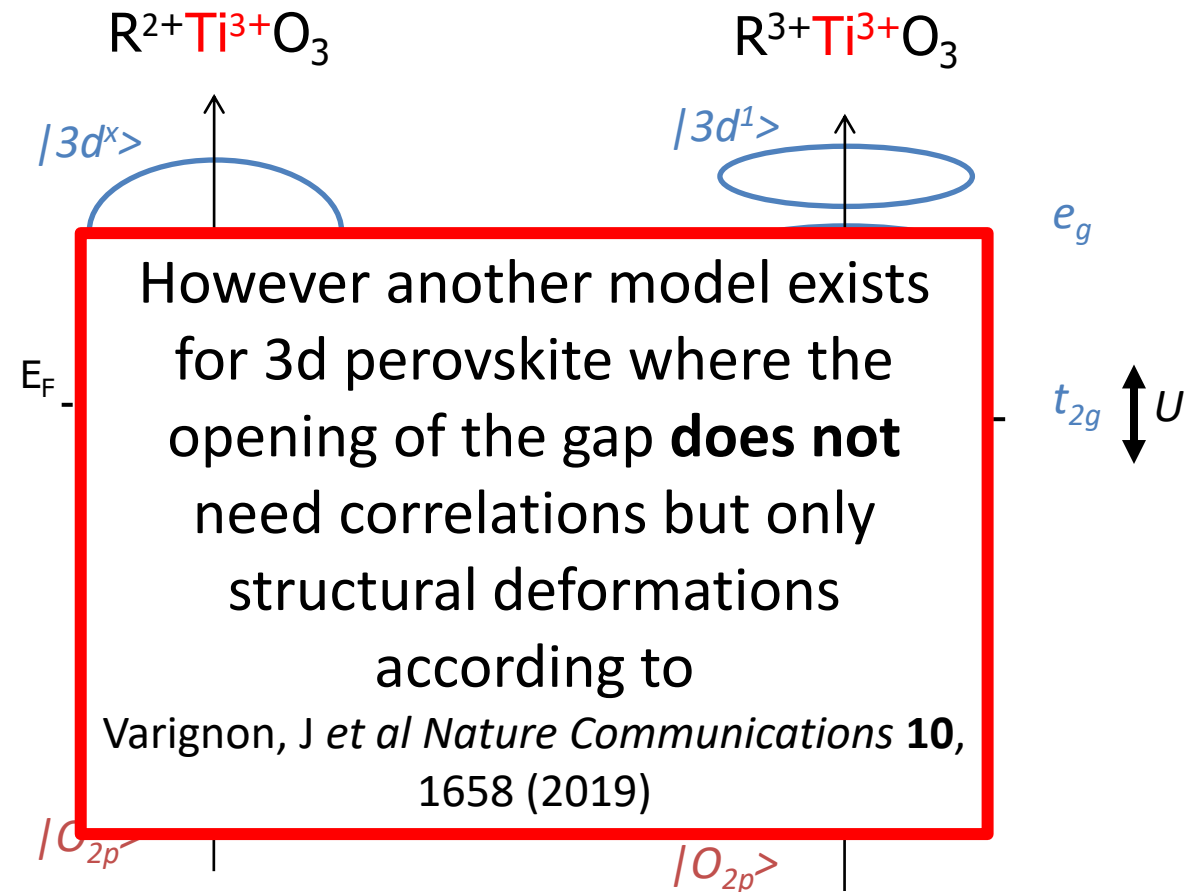
Mott insulator vs Band insulator



Mott insulator vs Band insulator



- No **d** electrons
- No magnetism
- **Band insulator**

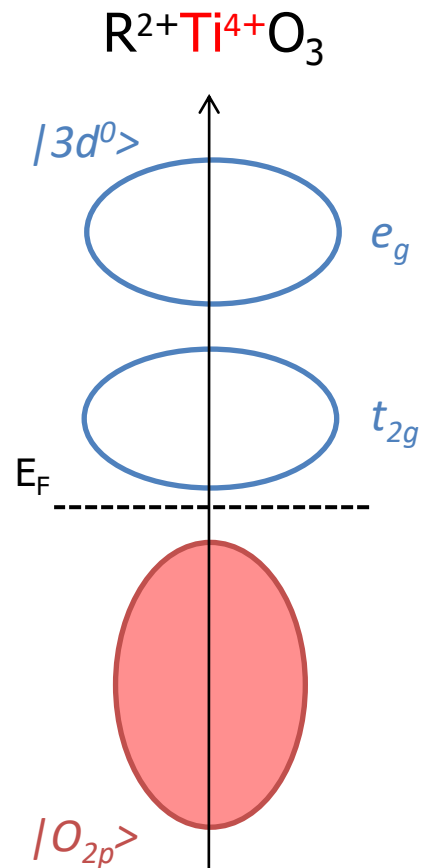


However another model exists
for 3d perovskite where the
opening of the gap **does not**
need correlations but only
structural deformations
according to

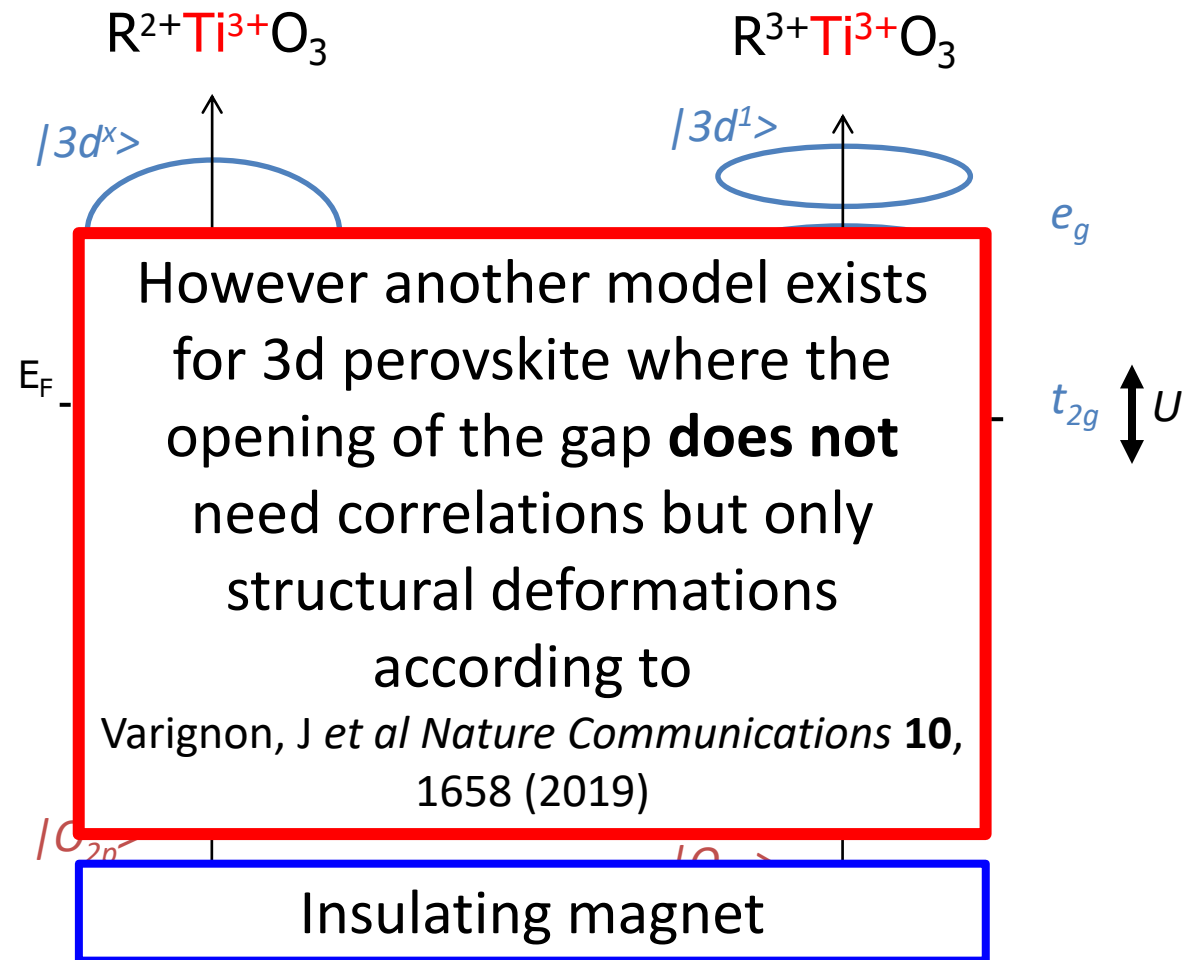
Varignon, J *et al Nature Communications* **10**,
1658 (2019)

- **d** electrons
- Magn/orb order
- **Mott insulator**

Mott insulator vs Band insulator



- No **d** electrons
- No magnetism
- **Band insulator**



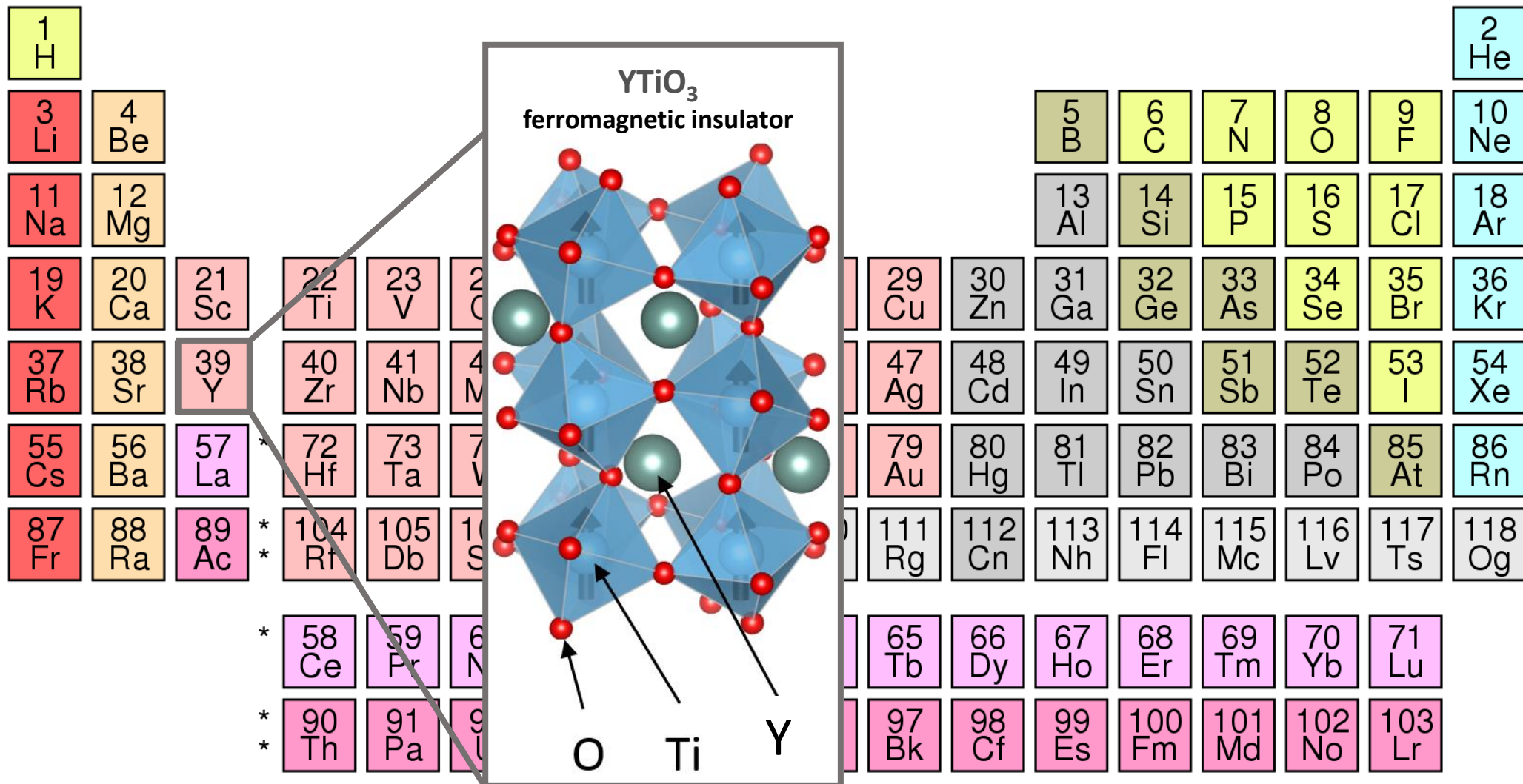
Insulating magnet

- **d** electrons
- Magn/orb order
- **Mott insulator**

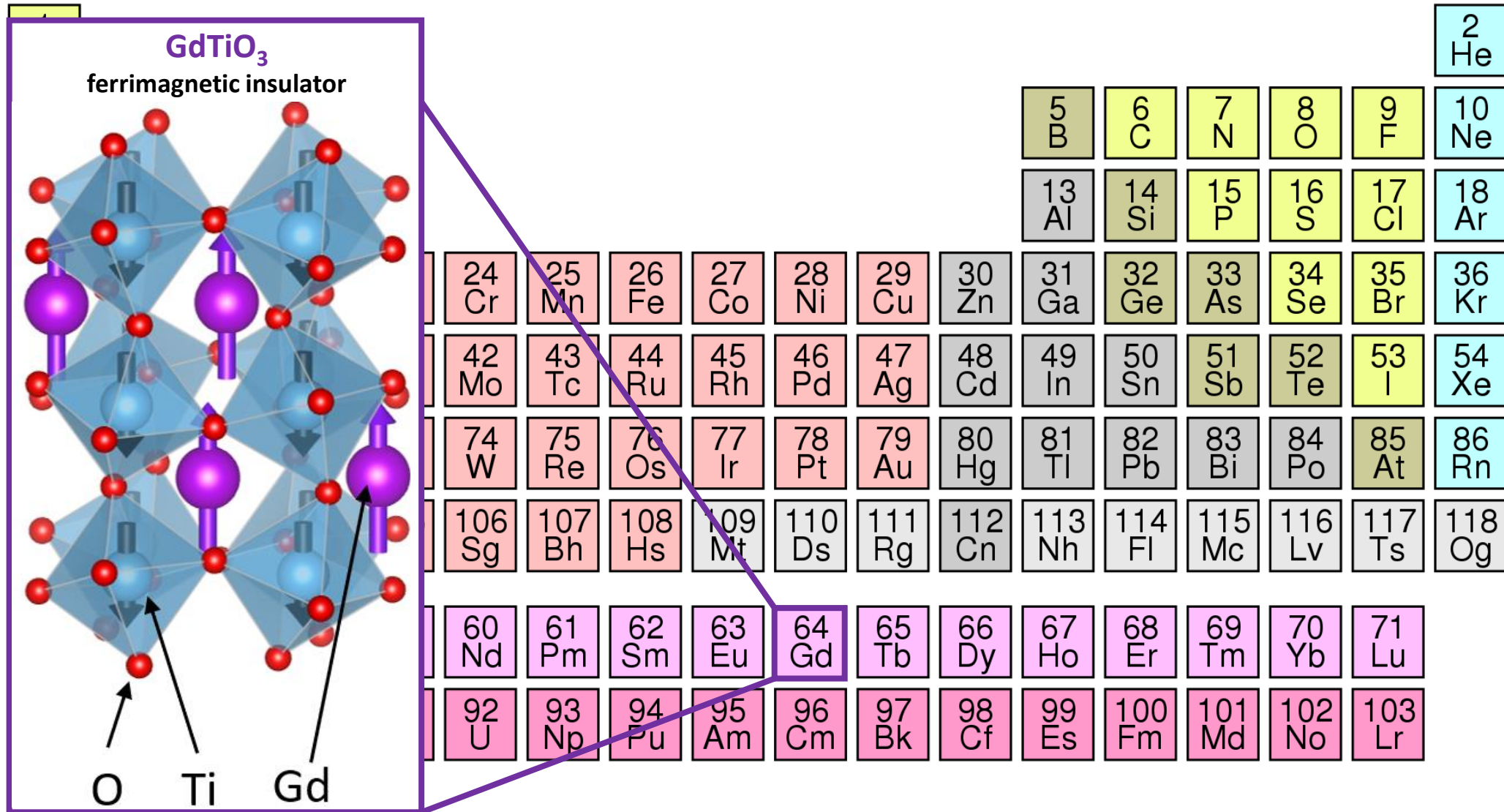
Electronic and magnetic structures of the rare-earth titanates

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57 La	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	* *	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			*	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			* *	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

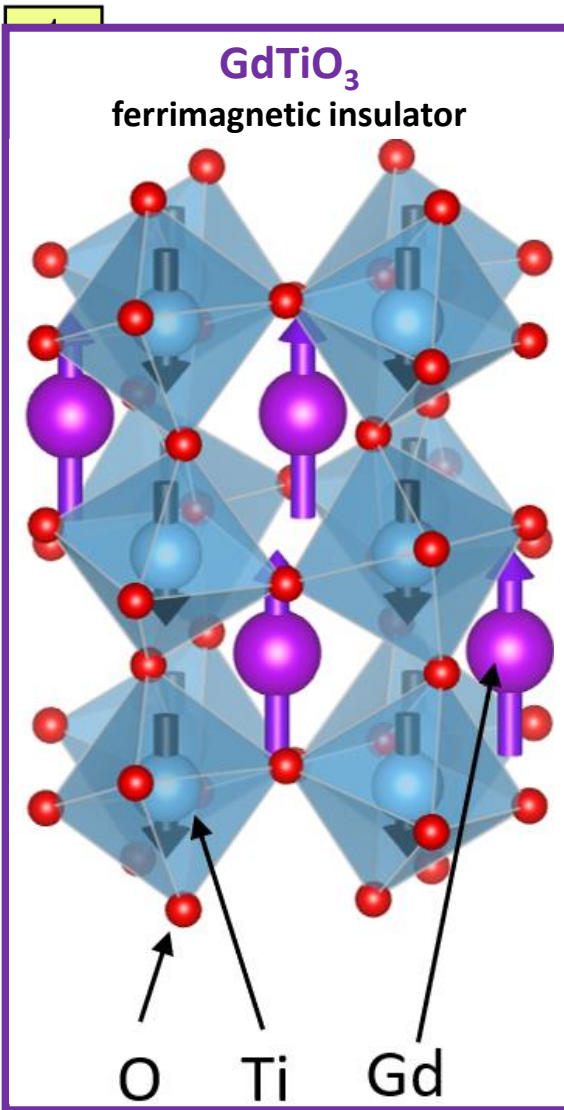
Electronic and magnetic structures of the rare-earth titanates



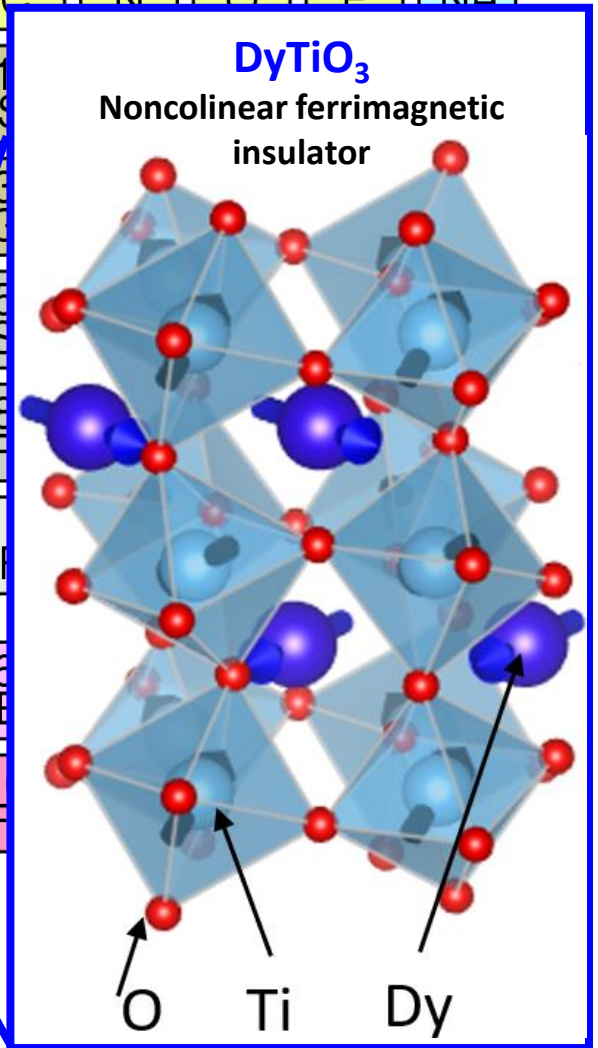
Electronic and magnetic structures of the rare-earth titanates



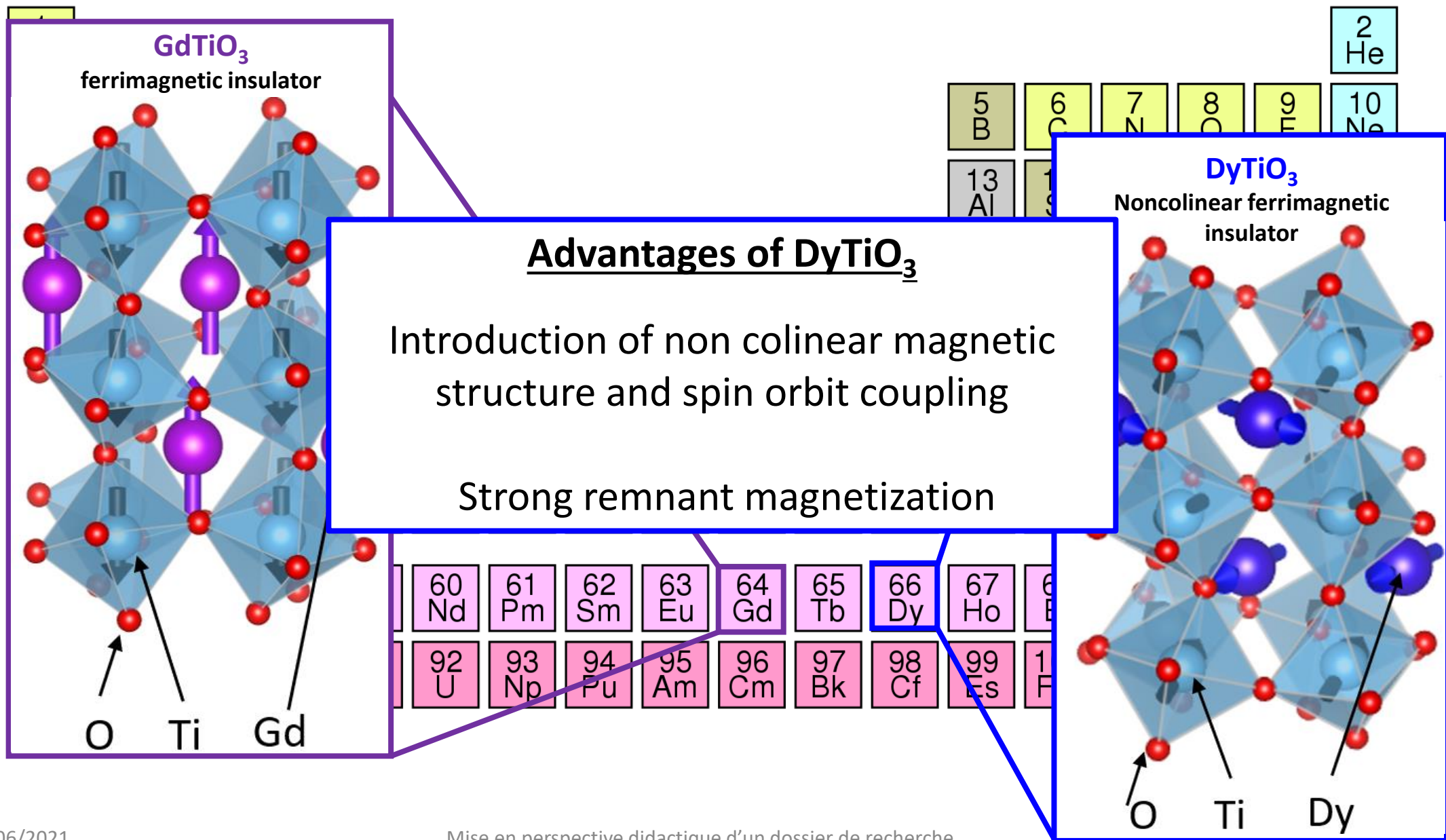
Electronic and magnetic structures of the rare-earth titanates



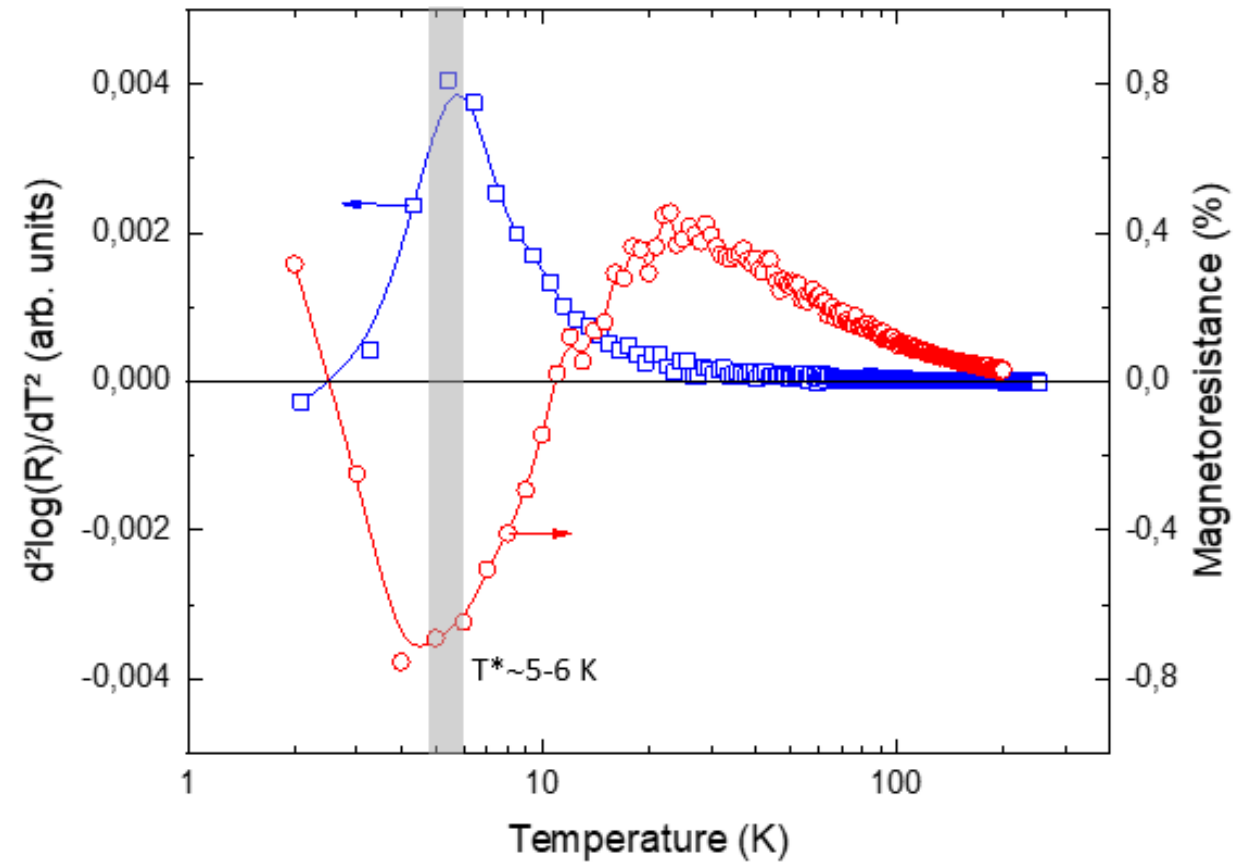
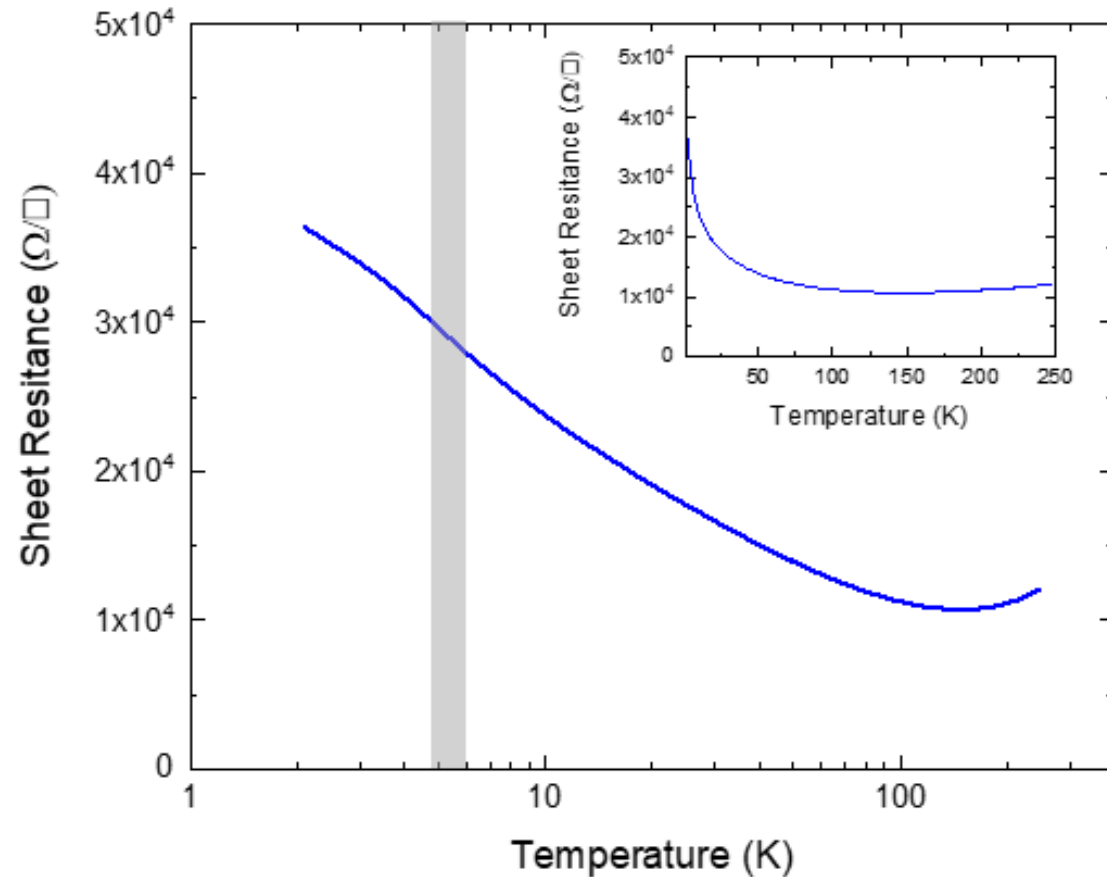
24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga
42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In
74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl
106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh
60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho
92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es



Electronic and magnetic structures of the rare-earth titanates

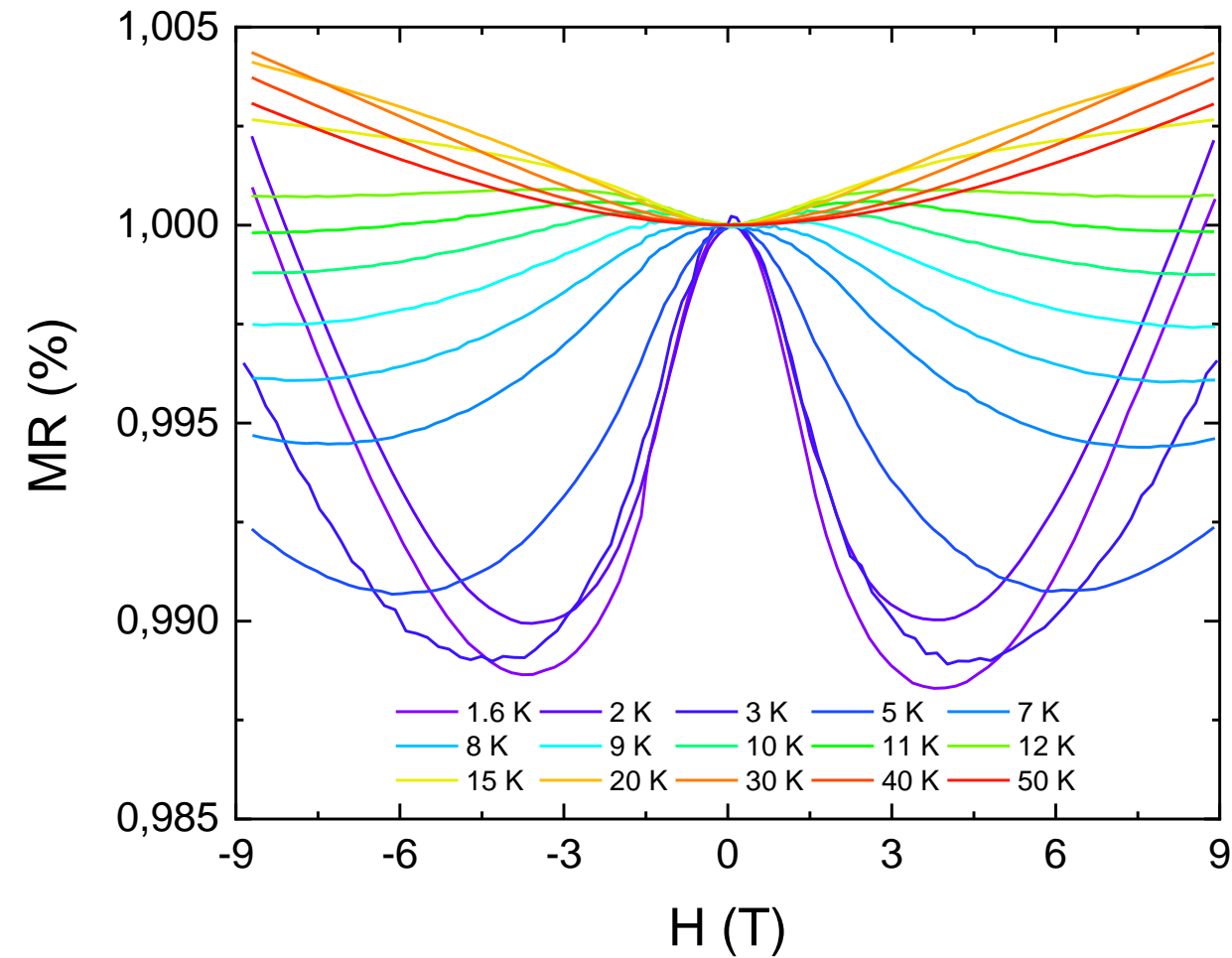


LSAT // STO (5 nm) / DTO (10 nm) / LAO (20 nm)

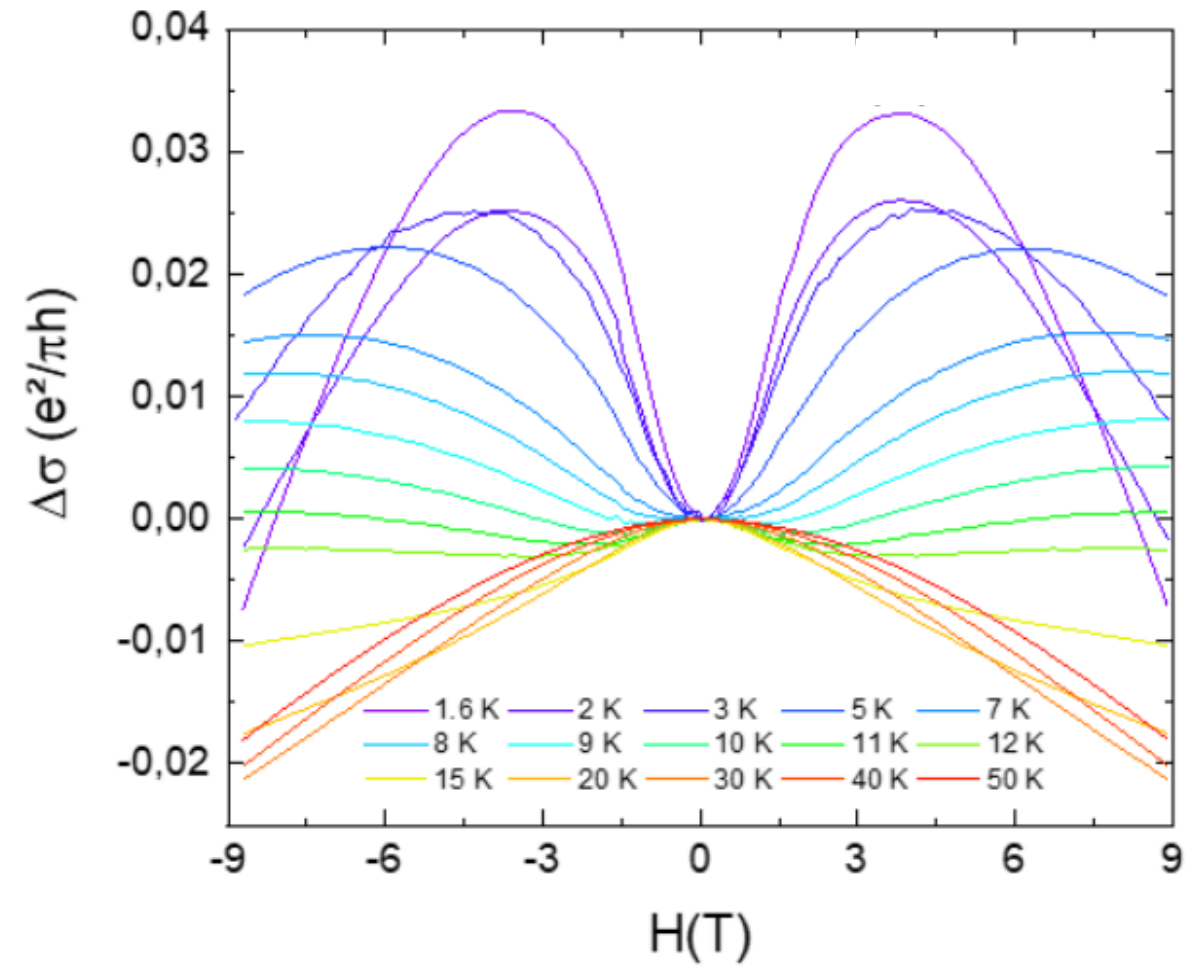
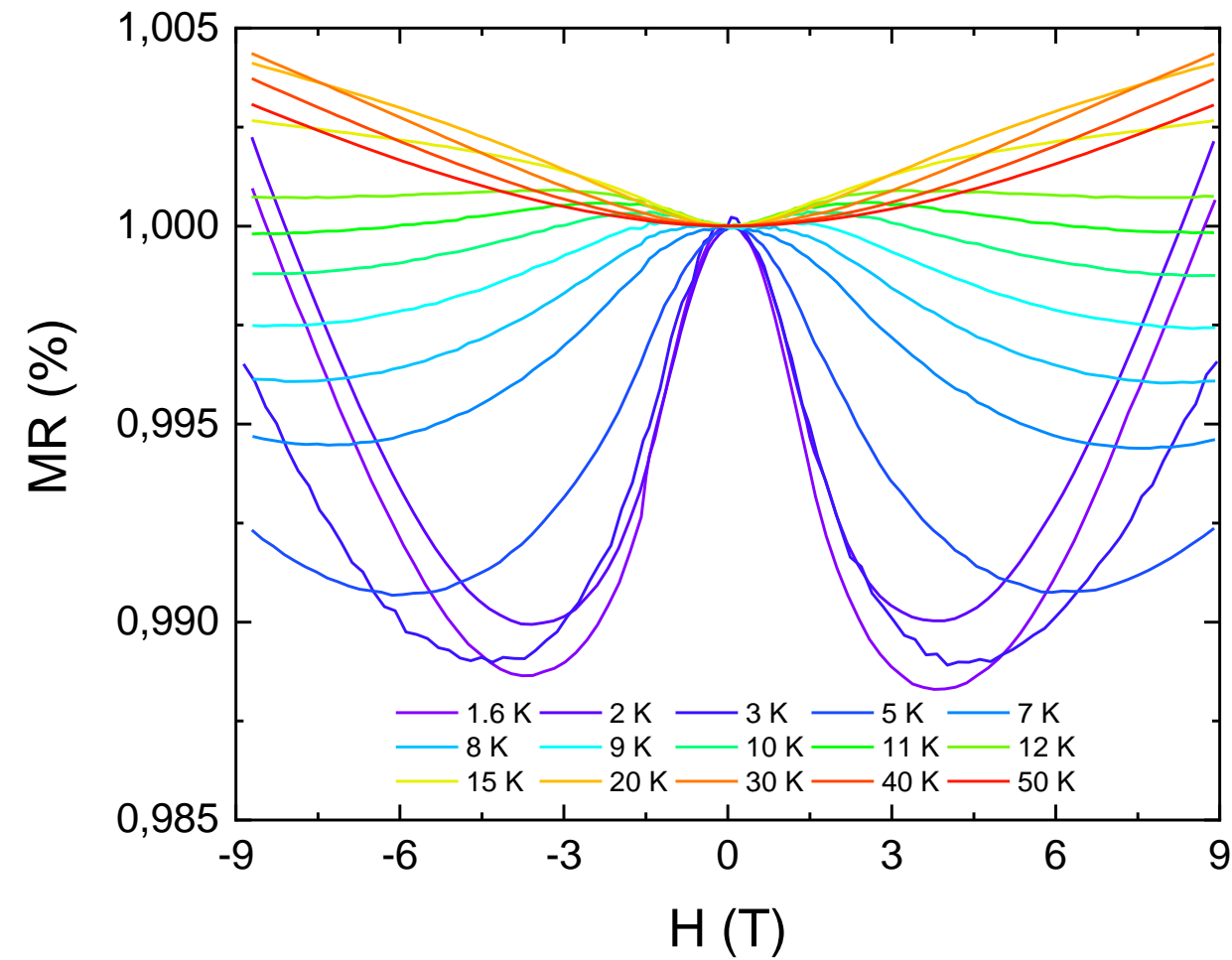


Comportement métallique jusqu'à 100 K et puis une dépendance apparemment log en T
Une inflexion peut être observée autour de 5 - 6 K ainsi que dans la magnétorésistance

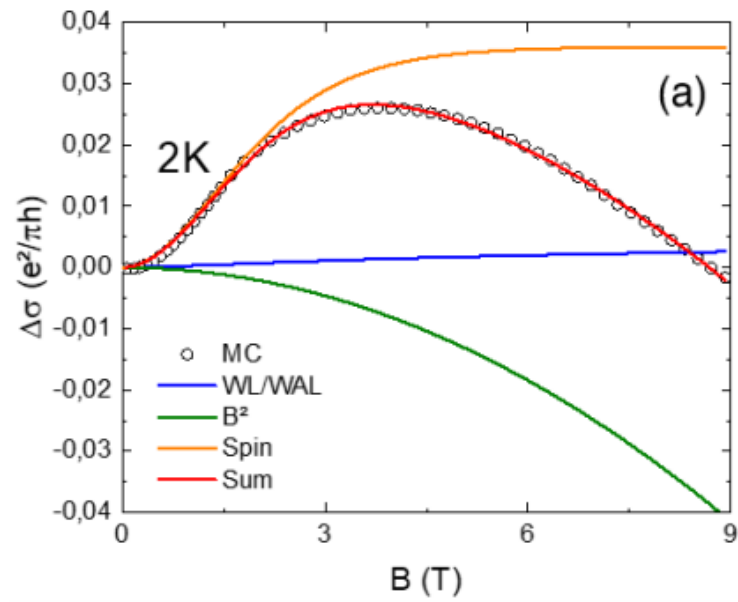
Magneto-transport à l'interface DTO / STO



Magneto-transport à l'interface DTO / STO

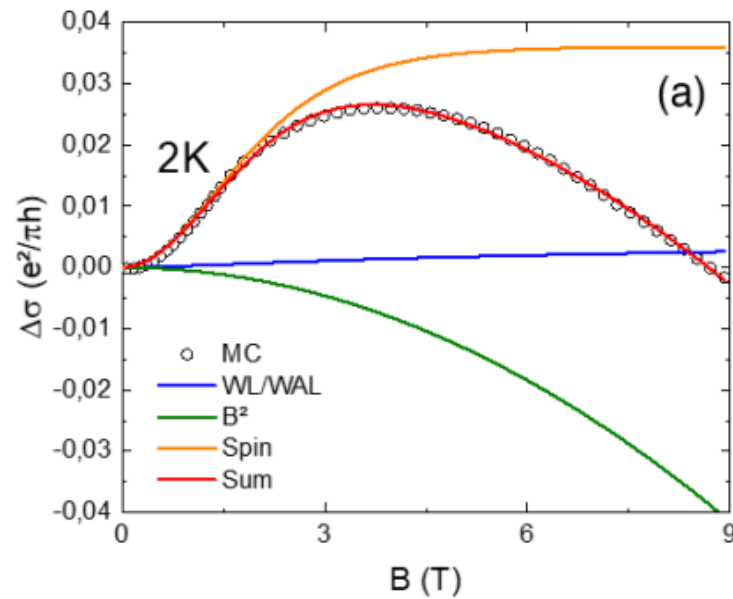


Conclusion

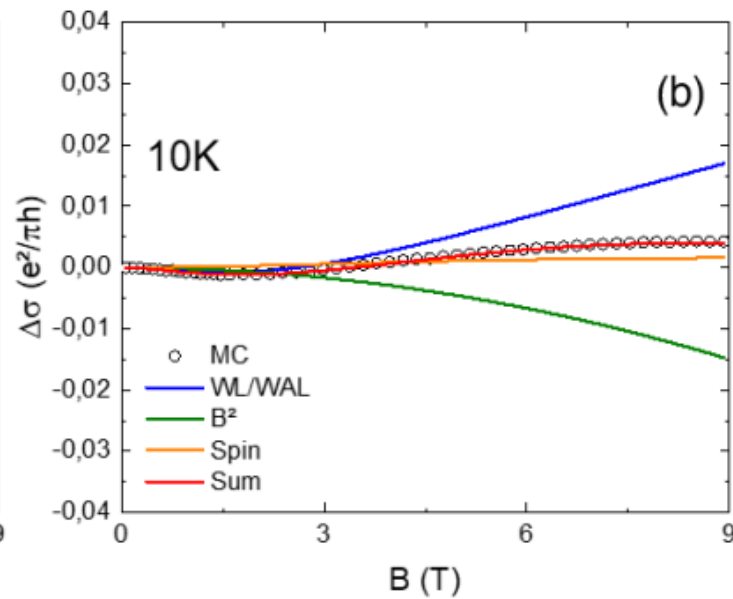


L'effet Kondo domine à basse température

Conclusion



L'effet Kondo domine à basse température



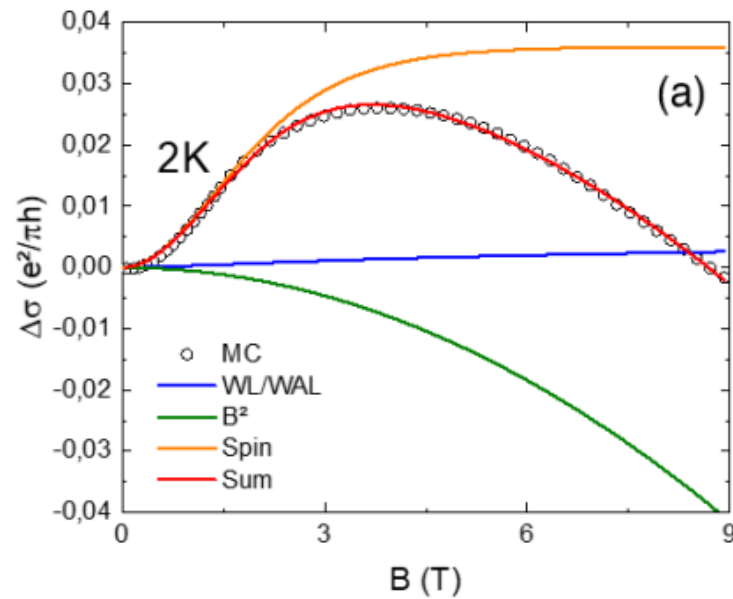
L'effet Kondo est Presque supprimé

Minimum de conductivité à $B \neq 0$ T

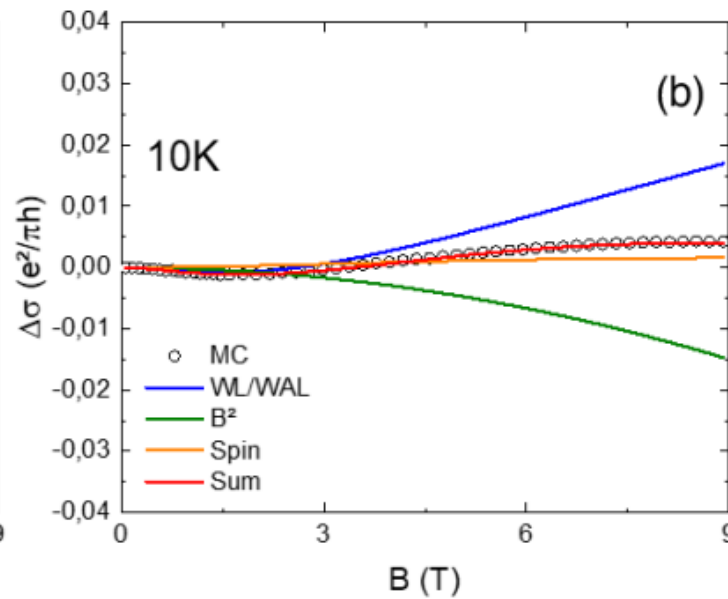
→ Il existe un melange de localisation faible et d'anti-localisation faible

→ Présence d'un couplage spin-orbite

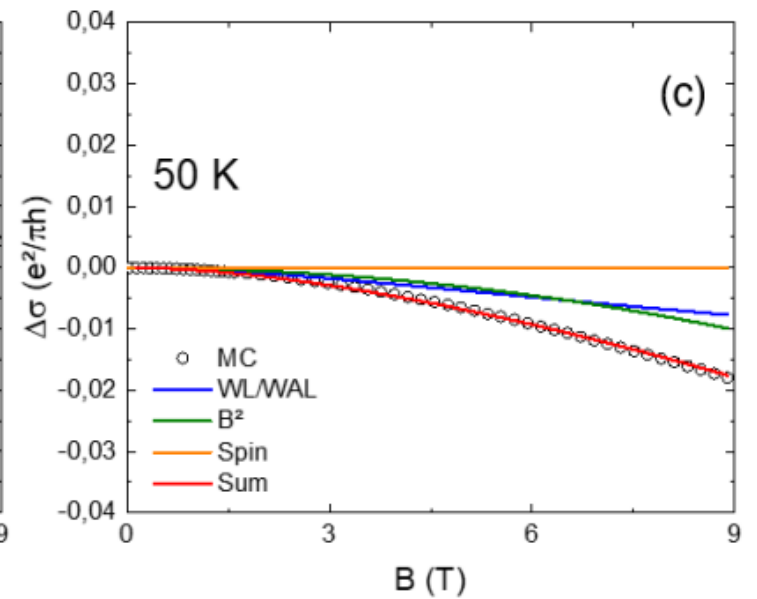
Conclusion



L'effet Kondo domine à basse température



L'effet Kondo est Presque supprimé



A haute température seule la magnetoconductance de Lorentz persiste

Minimum de conductivité à $B \neq 0$ T
→ Il existe un mélange de localisation faible et d'anti-localisation faible
→ Présence d'un couplage spin-orbite