

Profs au CAVIL



Profs au

GANIL



Les matériaux sous irradiation

Mamour SALL

sall@ganil.fr

Pourquoi s'intéresser aux matériaux sous irradiation ?

- Comprendre et modéliser le devenir des matériaux dans les réacteurs nucléaires + dans le stockage des déchets radioactifs
- Tester les composants/les matériaux soumis à des irradiations dans l'espace
- Industrie des semi-conducteurs
 - Dopage électronique

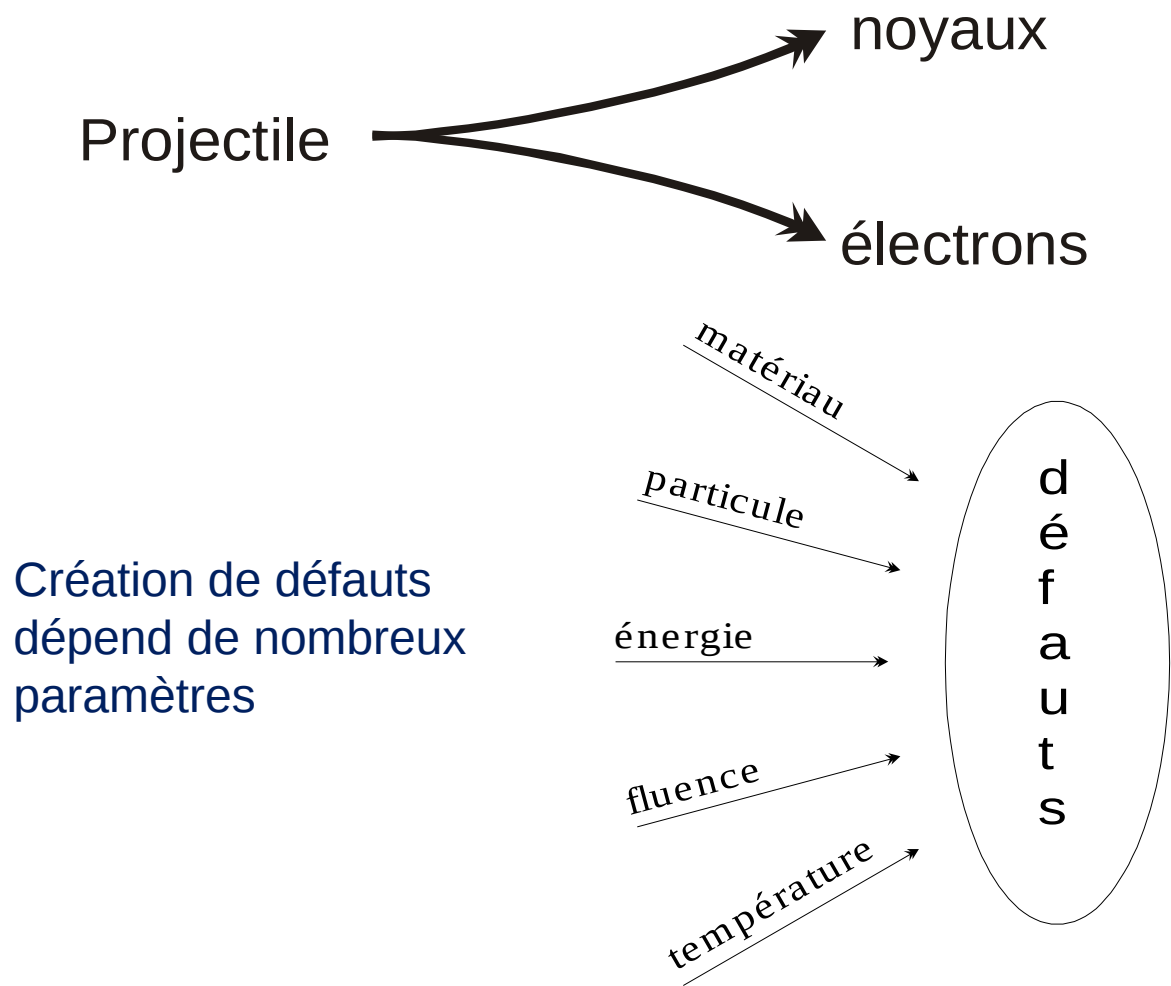
Traitement de surface

Durcissement, amélioration des propriétés tribologiques, limitation de la corrosion...

- Nanostructuration

...

Défauts créés par irradiation



Projectile	interaction avec les électrons	interaction avec les noyaux
X	oui	négligeable
γ	oui	négligeable indirect : <i>production d'électrons Compton de grande énergies.</i> réactions nucléaires
neutron	négligeable	oui
électron	oui	oui
ion	oui	oui

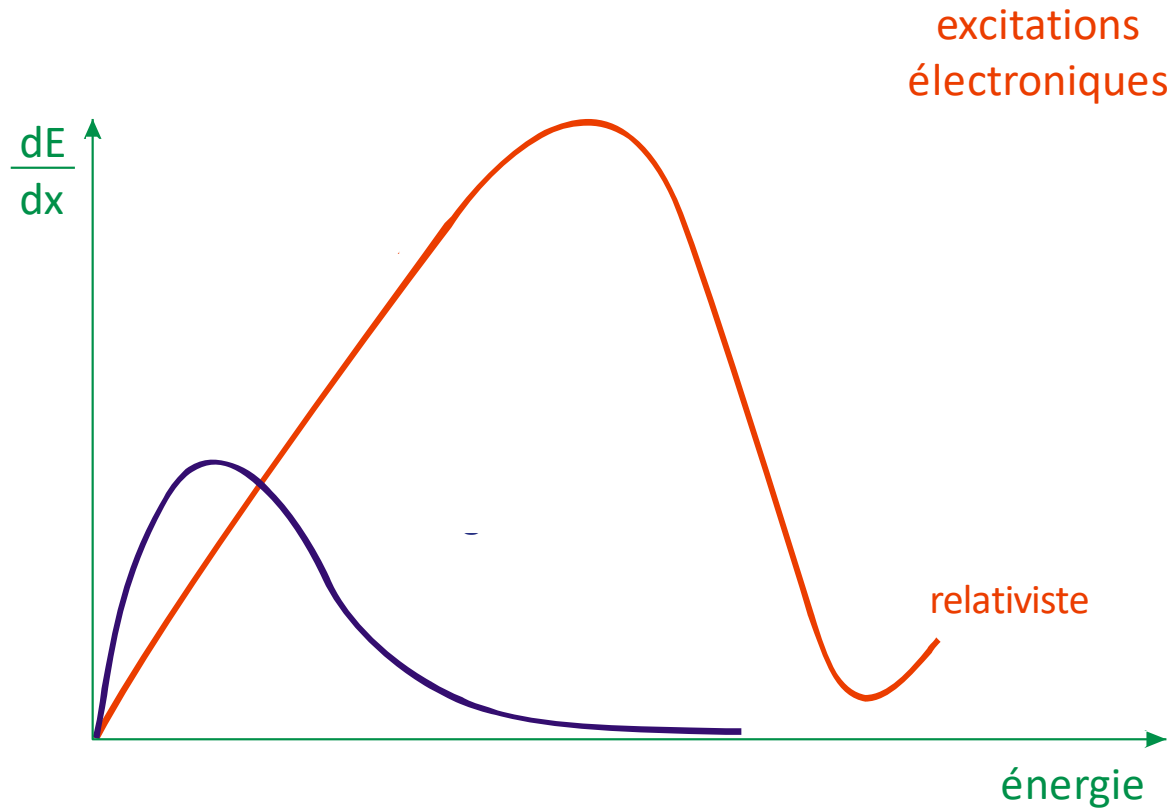
A retenir

A basse énergie:

les collisions avec les noyaux dominant

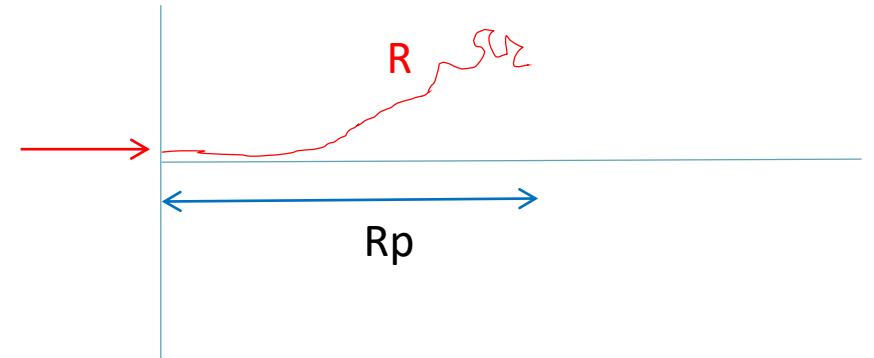
A haute énergie

les excitations électroniques dominant



Profs au

GANIL



Création de défauts par collisions nucléaires

Profs au

GANIL



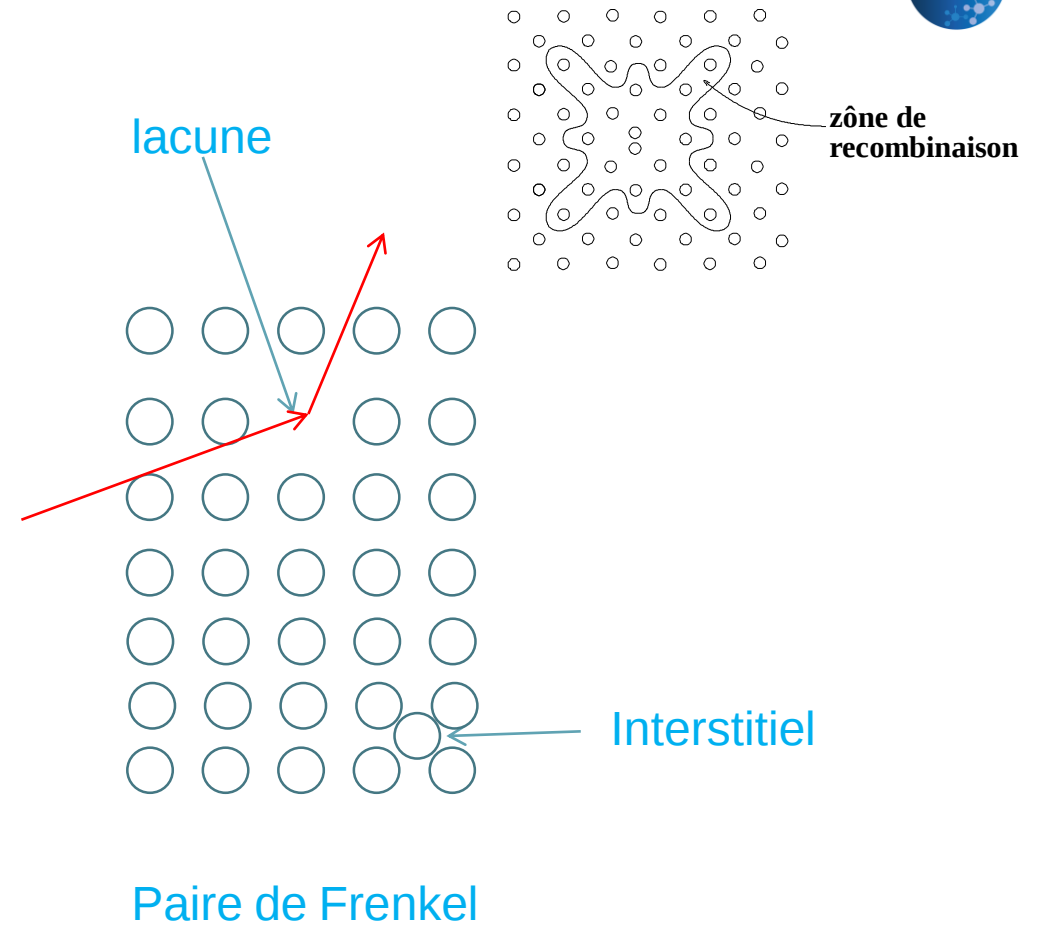
Collisions nucléaires : transfert direct d'énergie au noyau

$T_s = E_d$: sortir un atome de son site **et** le mettre hors du volume de recombinaison spontanée.

$T > T_{\text{seuil}}$ = déplacement

$T \gg T_{\text{seuil}}$ = cascade déplacement

T_{seuil} énergie seuil de déplacement



Création de défauts par collision élastique

Profs au

GANIL

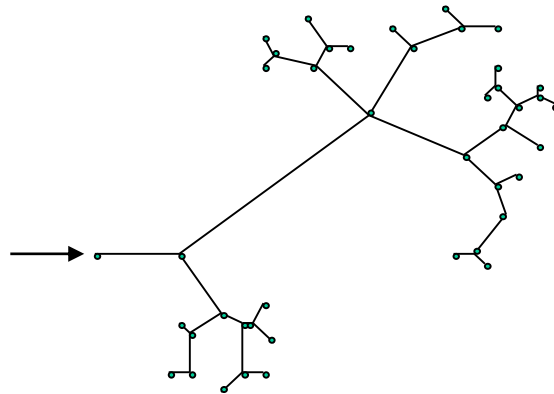


Formalisme Kinchin et Pease :

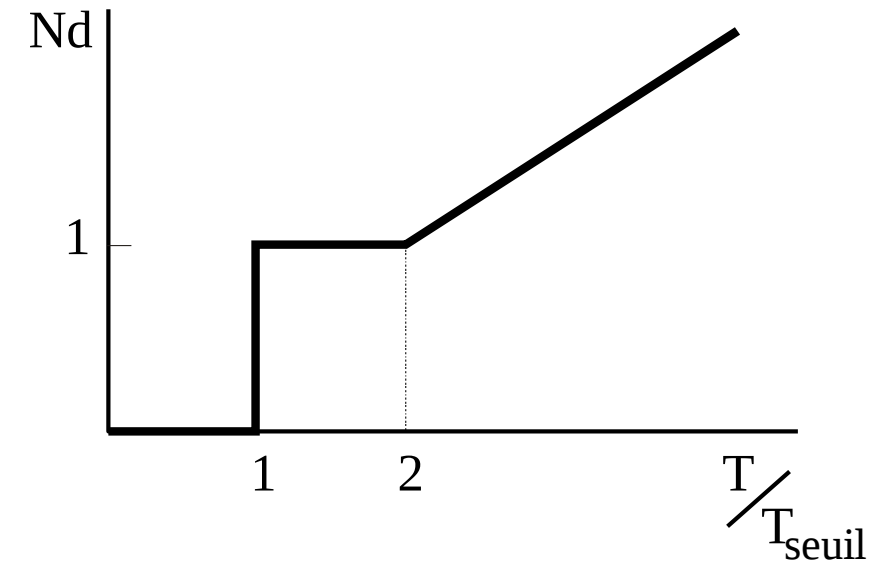
$$T < T_{seuil} : \quad \bar{n}_{(T)} = 0$$

$$T_{seuil} < T < 2T_{seuil} : \quad \bar{n}_{(T)} = 1$$

$$2T_{seuil} \leq T : \quad \bar{n}_{(T)} = \frac{T}{2T_{seuil}}$$



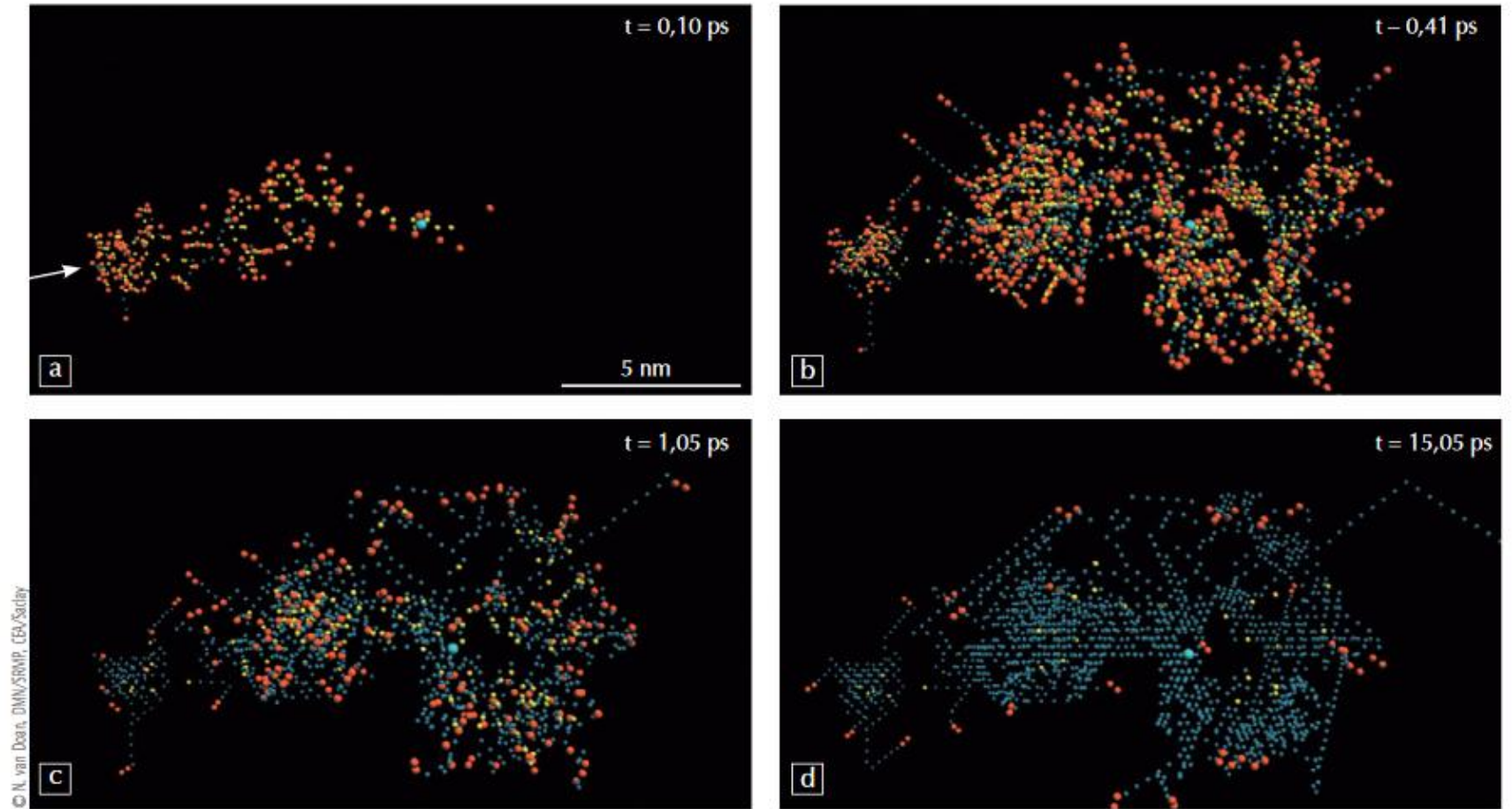
Cascade de déplacements



Création de défauts par collision élastique

Profs au **CANIL**

Déplacement $\neq$
défaut



cascade de déplacements atomiques dans un alliage fer-1%cuivre, en fonction du temps en picosecondes
Jaune= lacune, rouge= interstitiel, bleu= remplacement

A basse énergie:

les collisions élastiques avec les noyaux dominant

A haute énergie

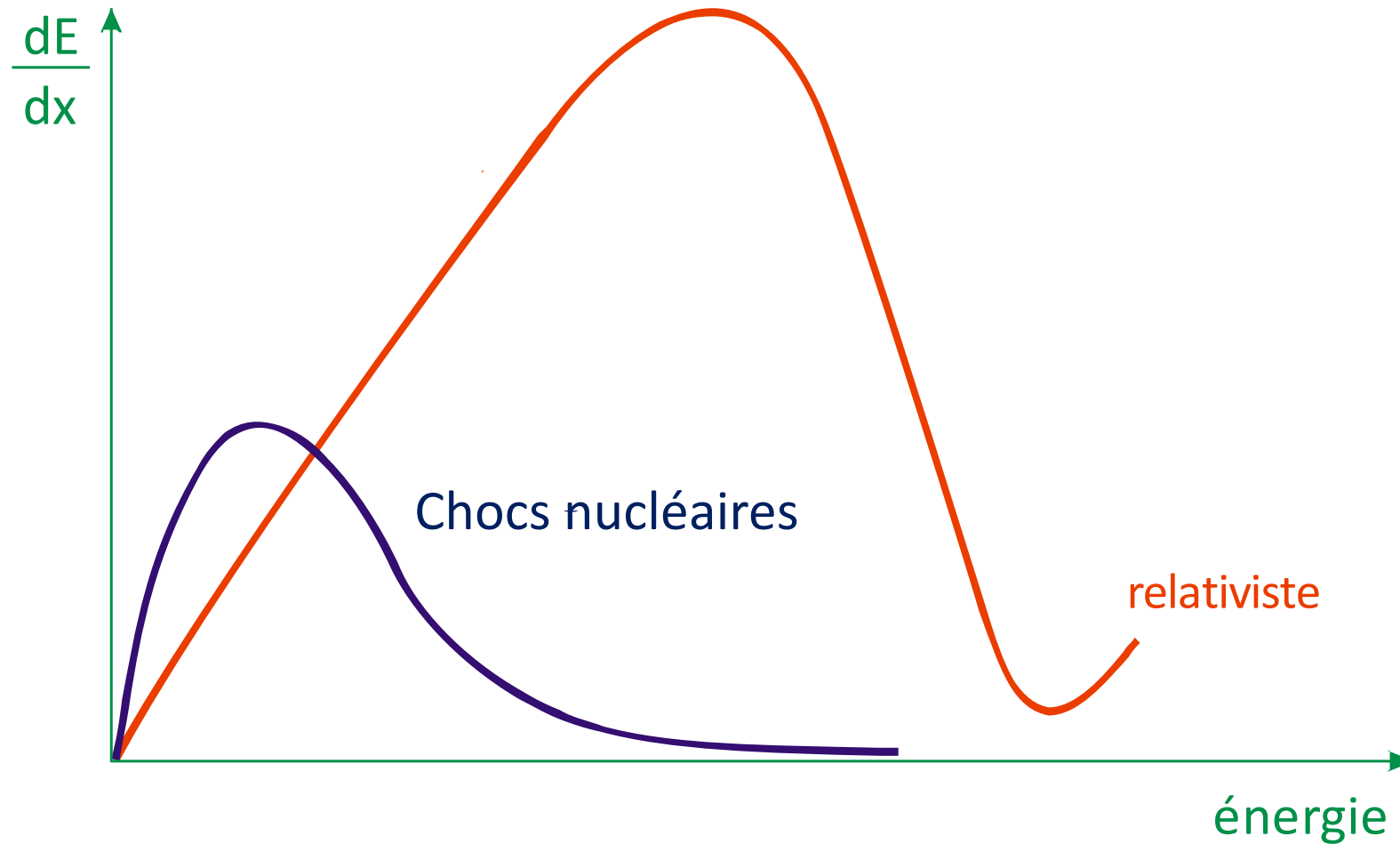
les excitations électroniques dominant

Profs au

GANIL



excitations
électroniques



Création de défauts par excitation électronique

Profs au

GANIL

Processus indirect, plus complexe que celui lié aux collisions élastiques

→ Impossible de calculer théoriquement, même approximativement le nombre d'atomes déplacés.



La concentration de défauts dépend directement de la quantité d'énergie absorbée par la matière sous forme d'excitation électronique

Matériaux radiolysables: **cf TP infrarouge**

- rupture de liaison, création/libération de radicaux
- Concentration défauts proportionnelle à l'énergie déposée

Matériaux non radiolysables → inorganiques: métaux, semiconducteurs, isolants

Création de défauts par irradiation: Excitation électronique

Profs au



Excitation électronique cas des faibles pouvoirs d'arrêt (énergie transmise par l'ion au matériau)

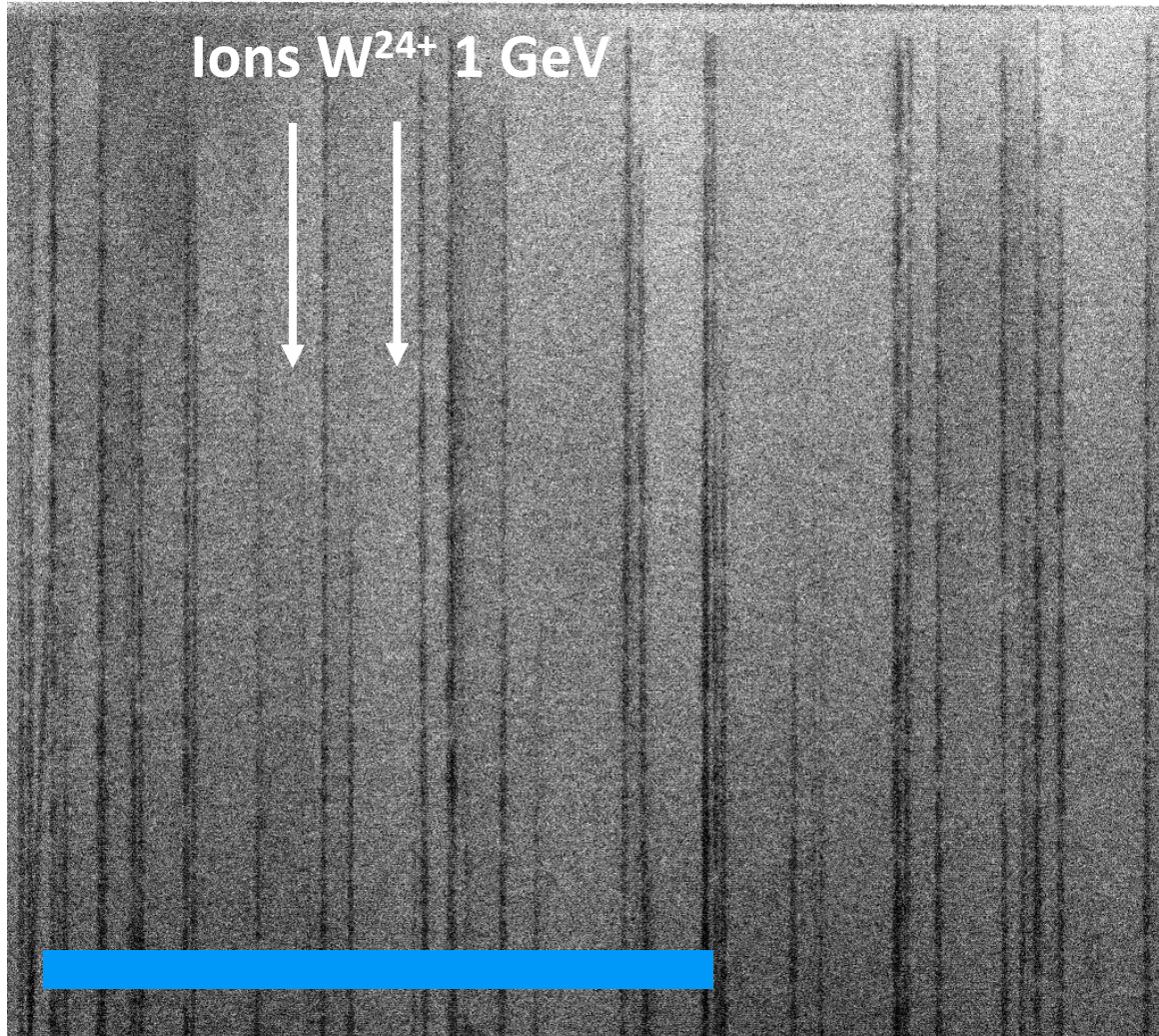
- Modification « momentanée » de la liaison chimique
- Conséquences dépendent des matériaux:
 - Métaux: liaison métallique=mer d'électron. Tout trou d'un niveau profond est immédiatement rempli par un électron=> pas de défauts – échauffement
 - Isolants: brisure de liaison, création de défauts ponctuels
 - Semi-conducteurs à faible bande interdite: pas de création de défauts

Excitation électronique cas des forts pouvoirs d'arrêt (spécificité GANIL)

- Effet collectif
- Formation de défaut caractéristique (trace d'ion)

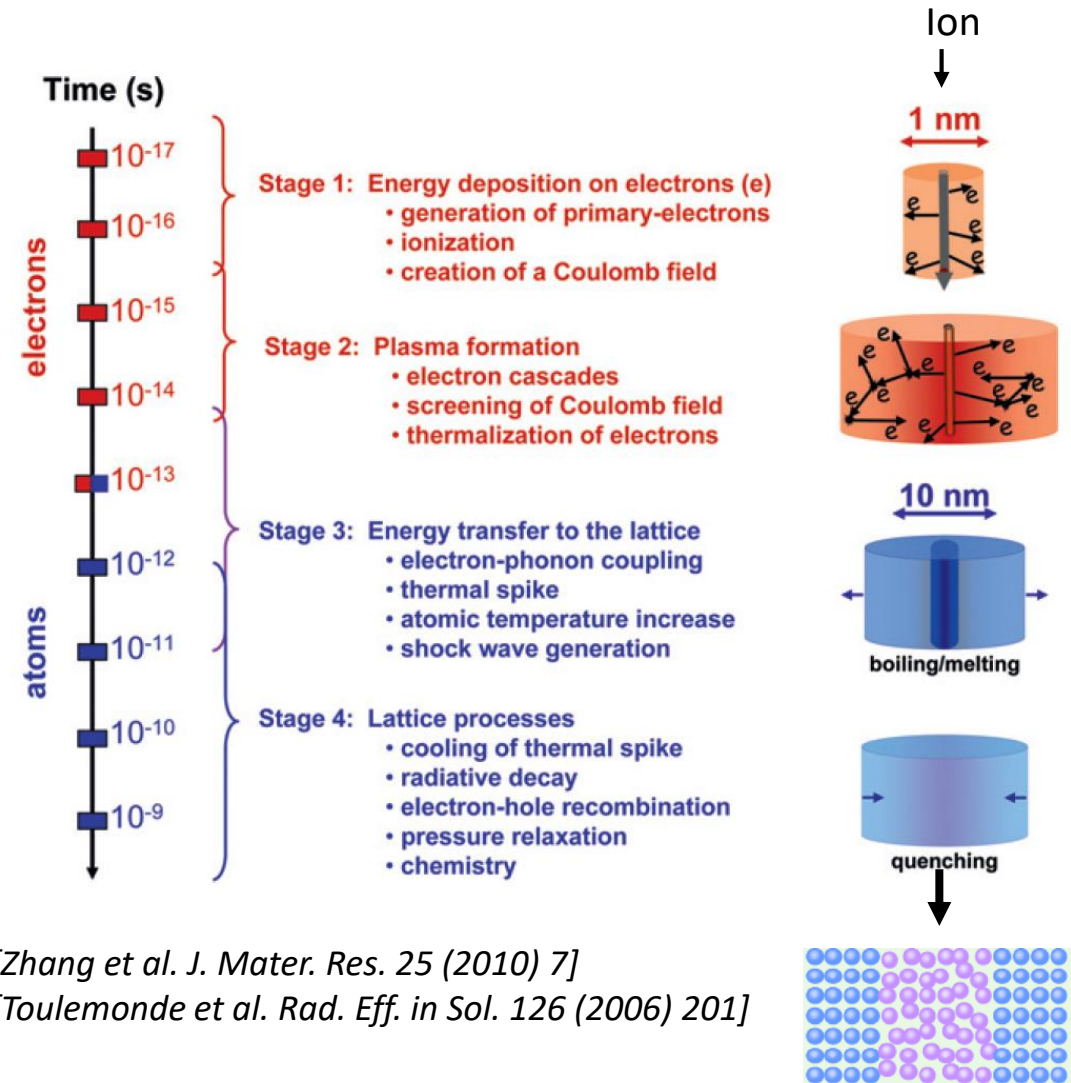
Spécificité des ions lourds rapides

Formation de traces d'ion



Profs au

GANIL



Quelques applications des ions lourds rapides

Profs au

GANIL



- Ion Track technology (ITT)

- *Utilisation des traces révélées*

- *Filtration*

- *Matrice*

- *Utilisation de la possibilité de faire un monotrou*

- *Application dans des composite graphene/polymère*

Matériau
organique

- *Modification de la rugosité de surface*

- *Ingénierie de défauts*

- *Mise en forme par faisceau d'ion / Nanostructuration*

- *Transition de phases*

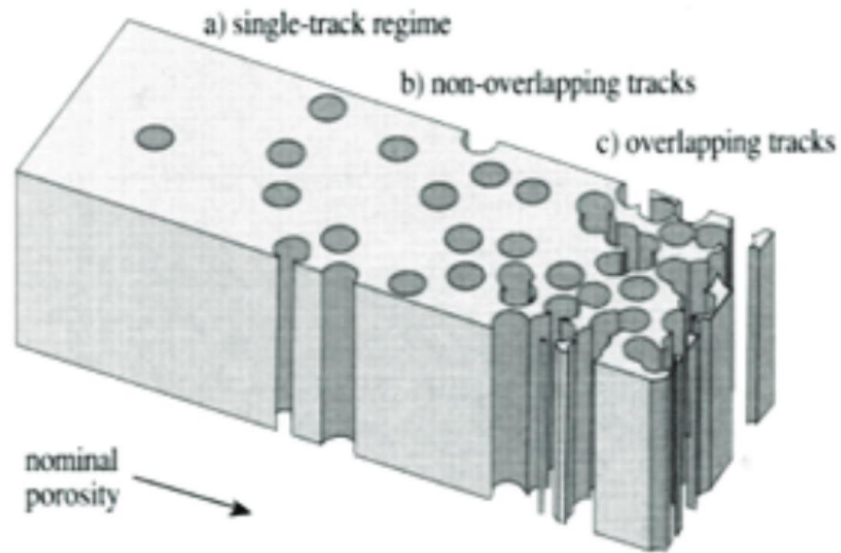
Matériau
inorganique

Spécificité des ions lourds rapides

Dose d'irradiation ajustable,
du mono-trou au recouvrement de traces

Profs au

GANIL



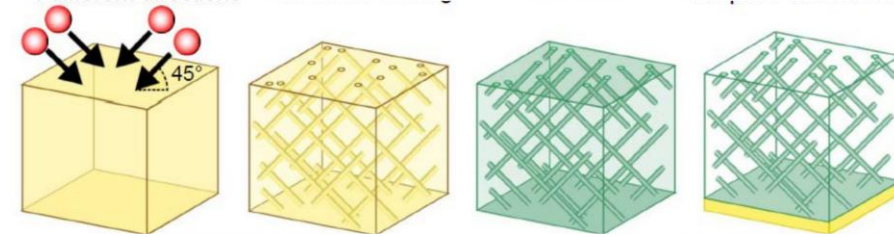
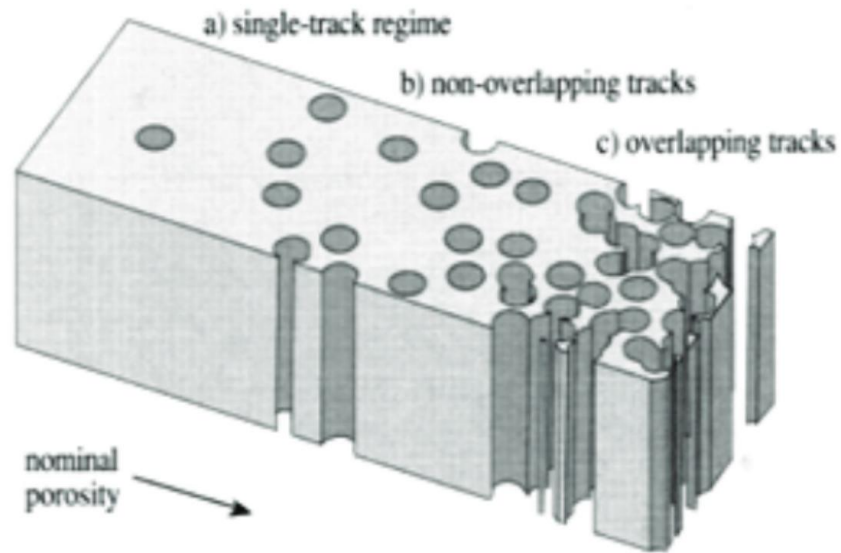
Spécificité des ions lourds rapides

Profs au

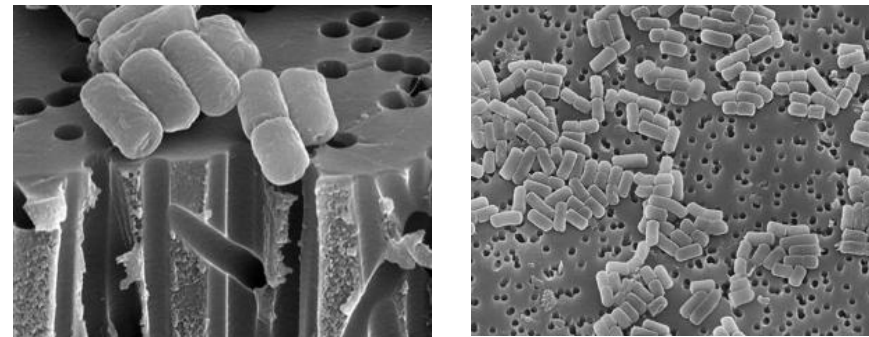
CANIL

Dose d'irradiation ajustable,
du mono-trou au recouvrement de traces

Angle d'incidence ajustable



Utilisation comme Filtre



Bactéries sur un filtre de 0,4 μm de diamètre



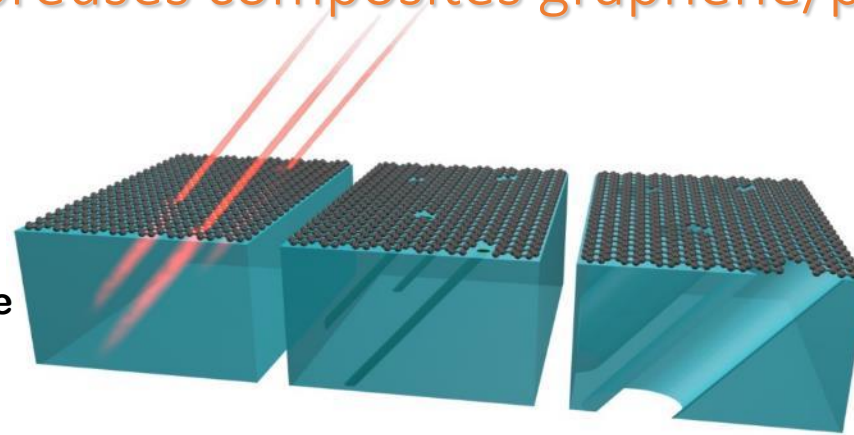
Autres exemples

Profs au **GANiL**



Fabrication de membranes nanoporeuses composites graphène/polymère

feuille de graphène
(une monocouche de graphite)
déposée sur une couche de polymère

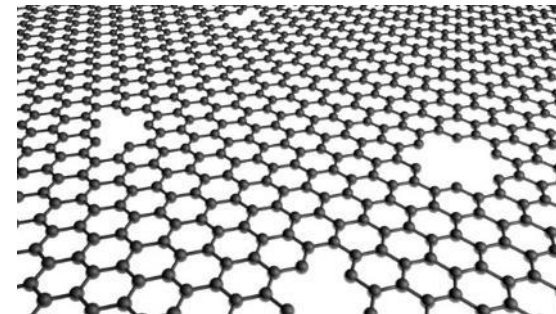
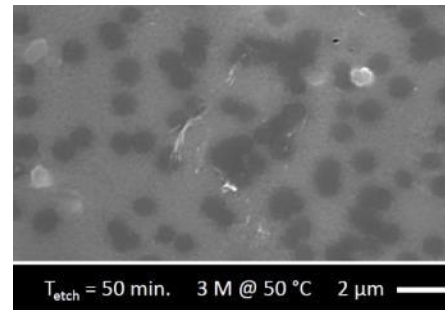


Application:
Dessalement de l'eau de mer

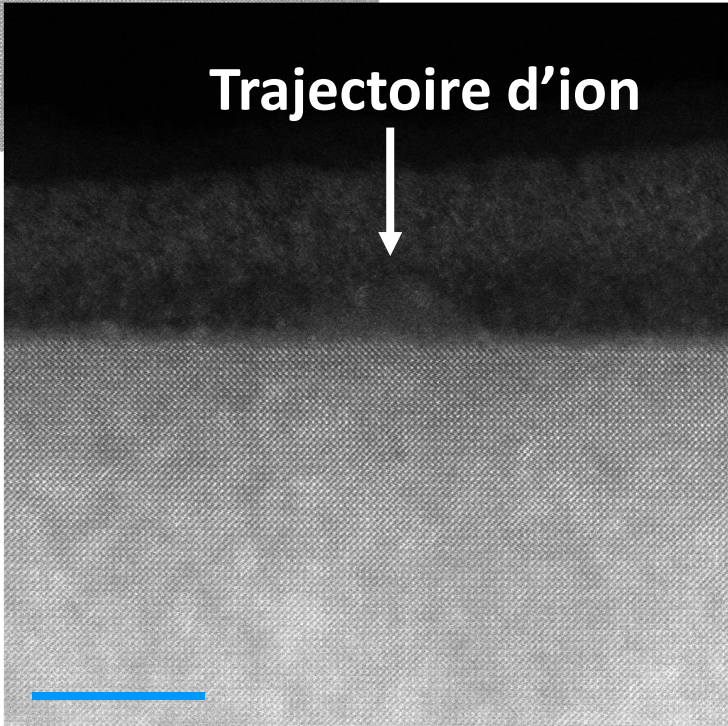
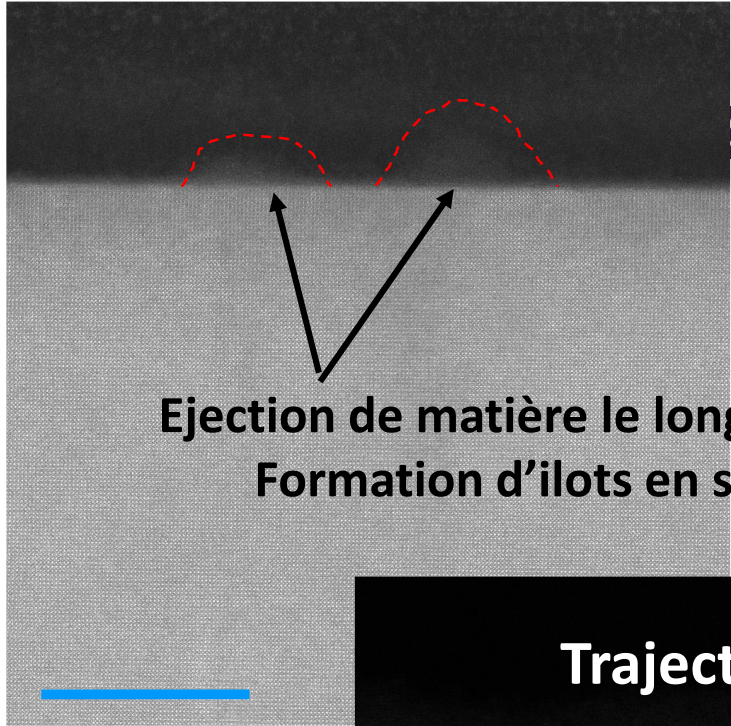
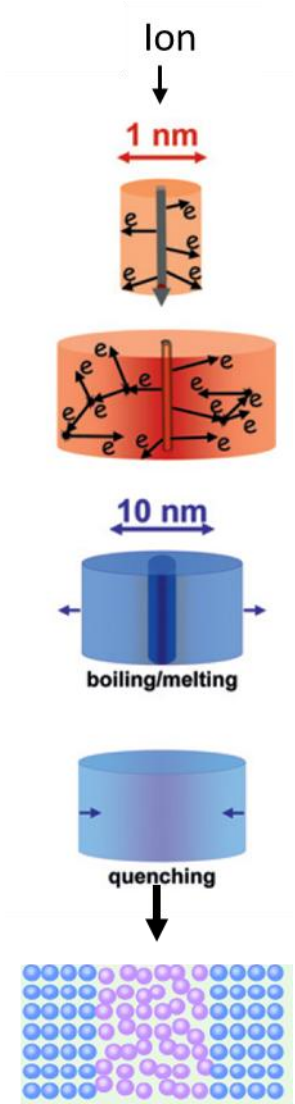
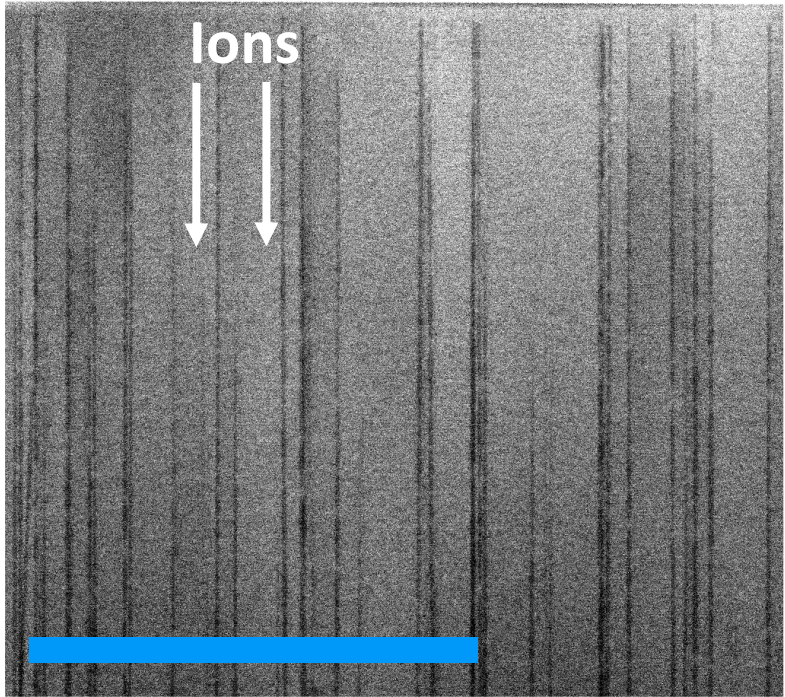
Collaboration:

Universities of
Helsinki and Aalto, Finland
Nottingham, UK
Duisburg-Essen, Germany
Wien, Austria
Science and Technology MISiS, Russian Federation

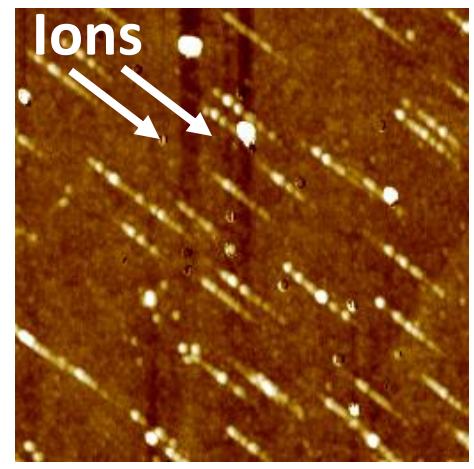
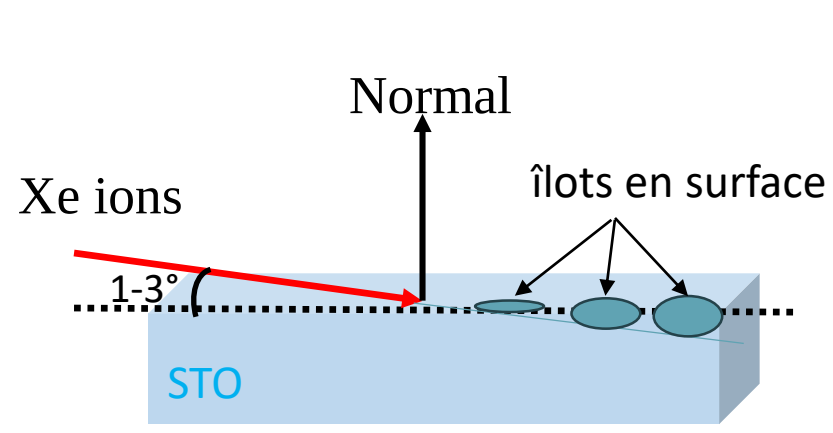
CIMAP, France
Ruder Boskovic Inst., Croatia
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Germany



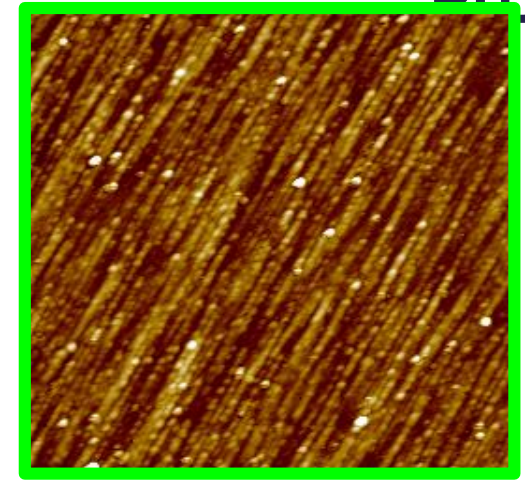
Nanostructuration de surface



Nanostructuration de surface



Faible dose $\rightarrow$ traces isolées



Grande densité de traces

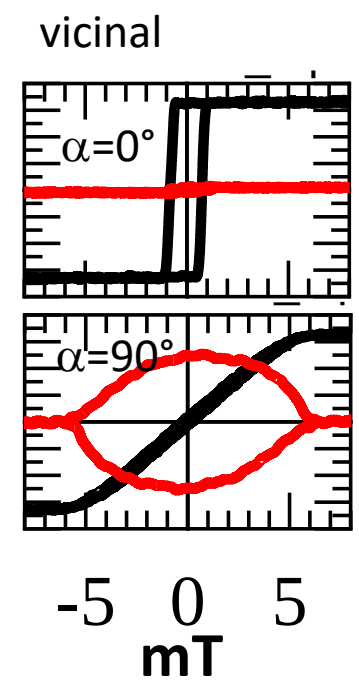
A 3D schematic of a vicinal substrate, represented as a yellow block with a series of parallel, rectangular ridges or steps on its top surface.

Substrat vicinal

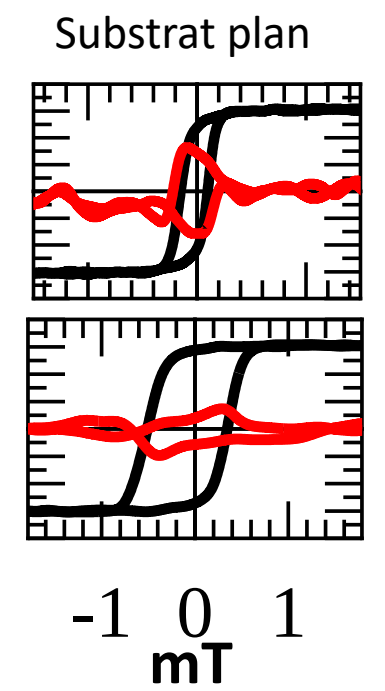
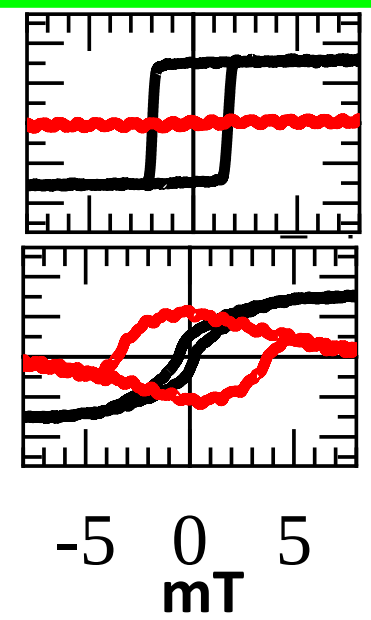
Découpe+attaque chimique
+ recuit thermique

Matériau magnétique déposé
sur substrat:

Obtention d'un axe facile d'aimantation



Nanostructuré par irradiation



Profs au GANiL

Merci pour votre attention



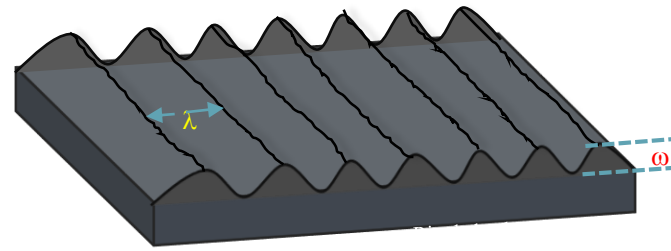
$$\text{Sensitivity: } S = \frac{\partial V_{meas}}{\partial \mu_0 H} = V_{bias} \frac{\Delta R}{R_0} \frac{1}{\mu_0 H_a}$$

$$H_a = 2K_u / (\mu_0 M_S)$$

$K_u \rightarrow$ Uniaxial magnetic anisotropy
 $M_S \rightarrow$ Saturation magnetization
 (constant for the specific material)

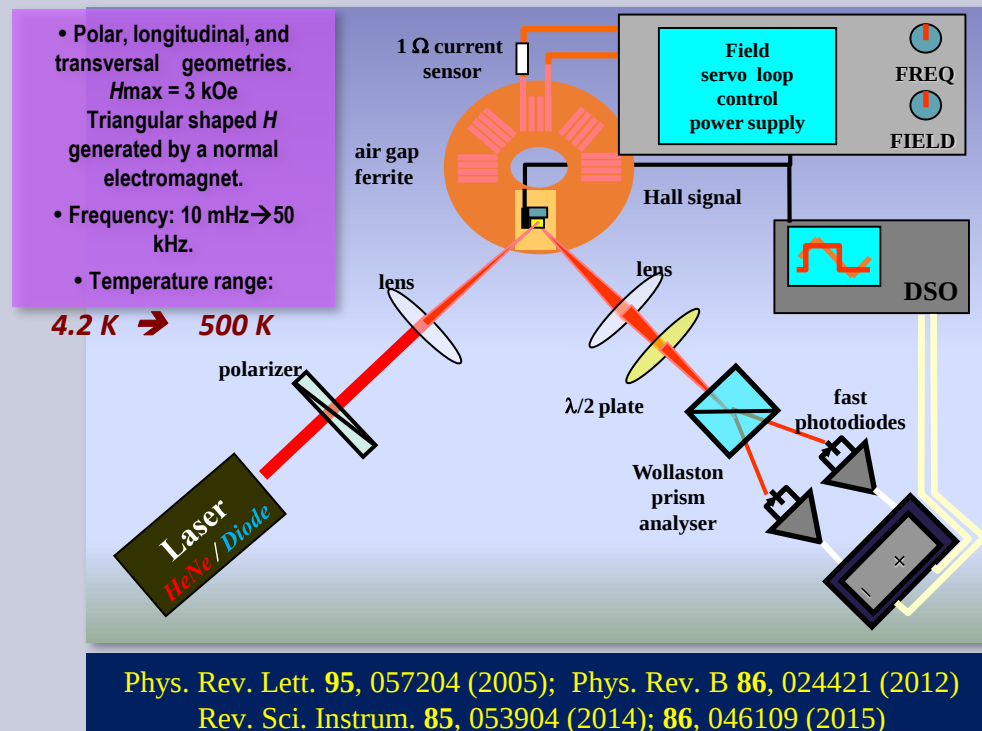
$$K_u = 2\pi M_S^2 \frac{\pi \omega_{rms}^2}{\lambda D}$$

Saturation magnetization M_S
 Ripple wavelength λ
 Film thickness D
 Ripple amplitude ω_{rms}

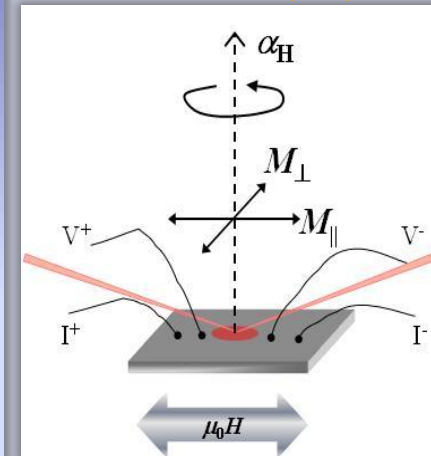


Vectorial Kerr Magnetometry+MR: **M₀OKE** set-up

- Simultaneous detection of the two in-plane orthogonal components of the reflected light : **$M_{\parallel}$ and $M_{\perp}$**
- Simultaneous detection of the **MR**
- **field dependent measurements** (field-value and field-direction)
- **angular-dependent study** (α_H) - in the whole angular range with angular resolution of 0.5°

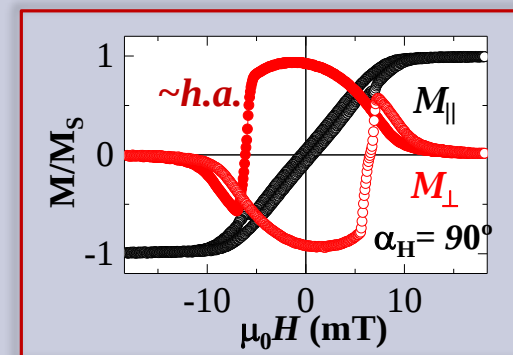
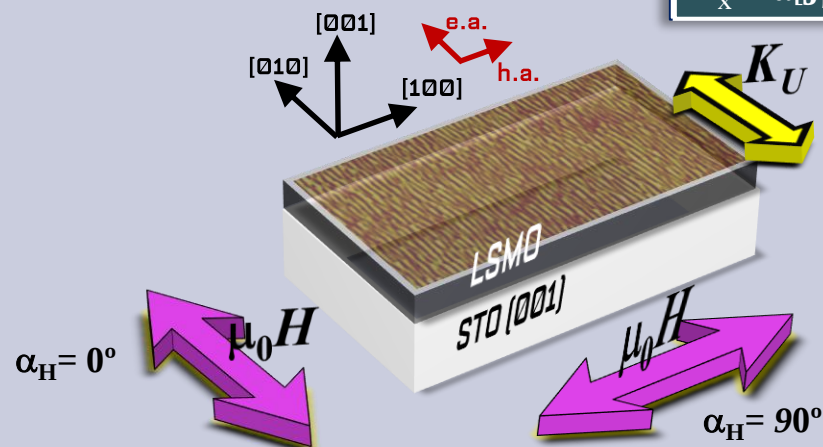
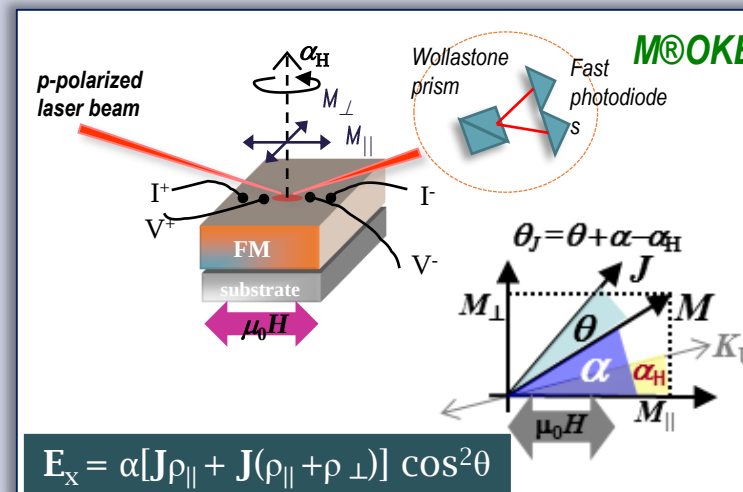
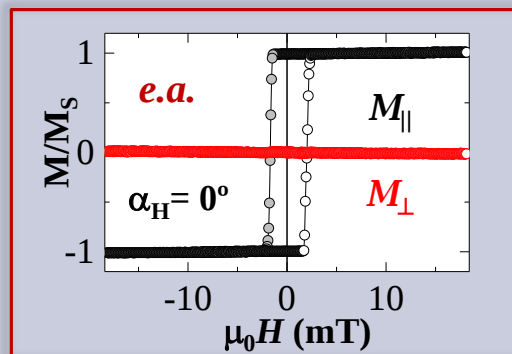


PP, et al. APL 104, 202407 (2014)
 PP et al. RSI 85, 053904 (2014)



$M_{\parallel}$: Kerr rotation
 $M_{\perp}$: reflectivity changes
MR - CIP / CPP

Magnetization Reversal vs. AMR in *uniaxial* LSMO



PP, et al. APL 104, 202407 (2014)
PP et al. Adv. Funct. Mater. 2017, 1700664

Diode Laser 405nm
I_e=45 mA

