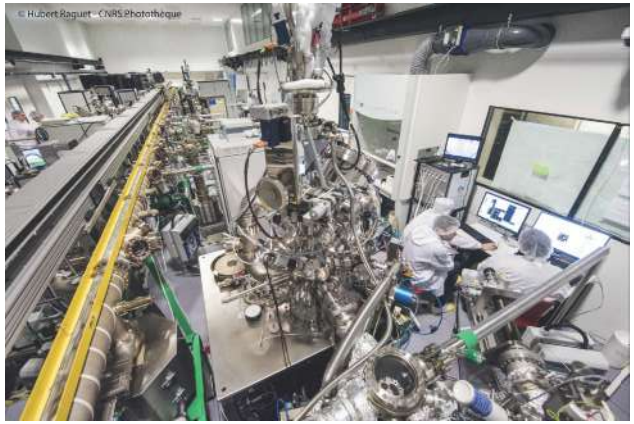
Palais DÉCOUVERTE

La fabrique du NANO MAGNÉTISME



© Hubert Raguet - CNRS Photothèque

INSTITUT JEAN LAMOUR

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

cnrs

LORRAINE Université d'Excellence

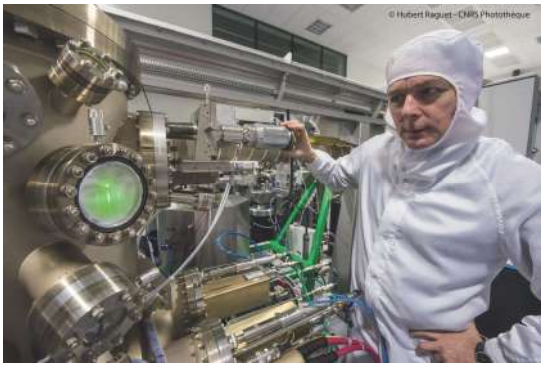
Grand Est ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE

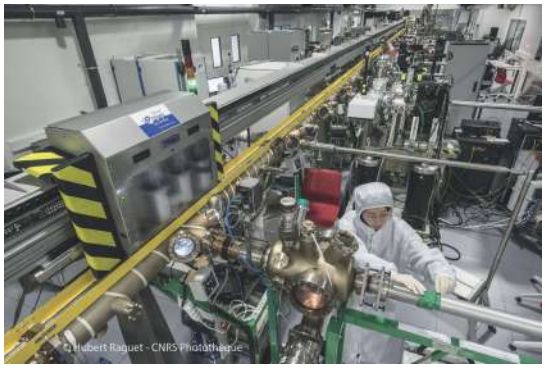
ANR

UN CHERCHEUR, UNE MANIP

La fabrique du NANOMAGNÉTISME

Le magnétisme de la matière s'observe à toutes les échelles, des particules élémentaires jusqu'aux étoiles. Depuis les années 90, de fines couches de matière magnétique (quelques nanomètres d'épaisseur) sont utilisées pour le stockage de l'information. Aujourd'hui, les chercheurs sont en quête de nouvelles nanostructures aux propriétés innovantes. À l'institut Jean Lamour de Nancy, des échantillons sont fabriqués au sein d'un équipement unique en Europe : la plateforme du tube DAUM.





Les chercheurs de l'institut Jean Lamour conçoivent et fabriquent des matériaux en couches minces qui servent à l'étude et à la modélisation du comportement de la matière à petite échelle, aussi bien dans le domaine du magnétisme qu'en optique (couches anti-reflets, filtres), en micro-électronique (composants à base de silicium, diodes électroluminescentes) ou en mécanique (passivation, couches dures ou revêtements).

© Hubert Raguet - CNRS Photothèque

INSTITUT JEAN LAMOUR

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

cnrs

LORRAINE Université d'Excellence

Grand Est ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE

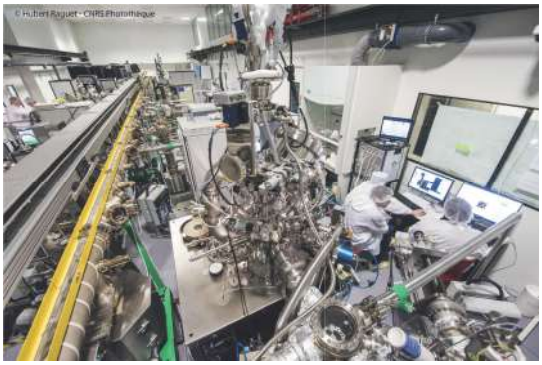
PROJET FINANCÉ PAR L'ANR · PROJECT FUNDED BY THE ANR · ANR

UN CHERCHEUR, UNE MANIP

La plateforme DAUM

La plateforme du tube DAUM (dispositif de Dépôt et d'Analyse sous Ultravide de nanoMatériaux) est dédiée à la recherche fondamentale et au transfert de technologie vers l'industrie. Les nanostructures composées de matériaux variés empilés en couches minces sont élaborées sous ultravide dans des enceintes reliées entre elles par un tube de 70 mètres de long.

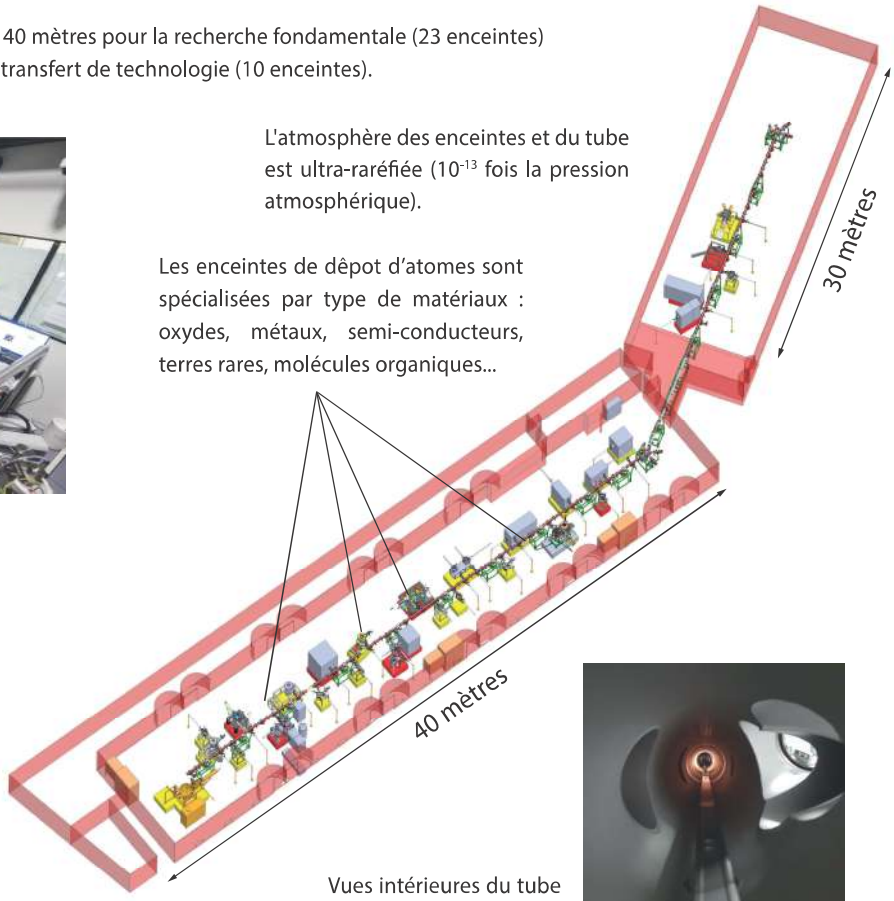
70 mètres de tube : 40 mètres pour la recherche fondamentale (23 enceintes) et 30 mètres pour le transfert de technologie (10 enceintes).



Vue extérieure du tube

L'atmosphère des enceintes et du tube est ultra-raréfiée (10^{-13} fois la pression atmosphérique).

Les enceintes de dêpot d'atomes sont spécialisées par type de matériaux : oxydes, métaux, semi-conducteurs, terres rares, molécules organiques...



Enceinte d'analyse structurale et chimique d'un dépôt préalablement réalisé dans une enceinte de croissance.

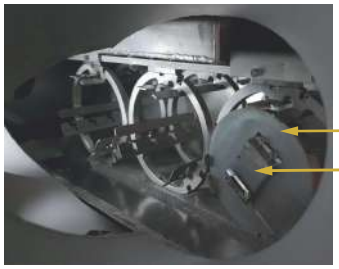
Vues intérieures du tube avec charriot et rail de guidage.

©Hélène Fischer/IJL

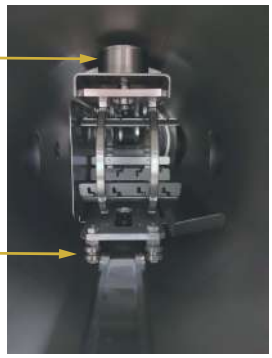
©Hélène Fischer/IJL

Enceinte de croissance

Huit charriots motorisés et automatisés transportent chacun 6 porte-échantillons sur toute la longueur du tube.



Charriot (24 cm de long)



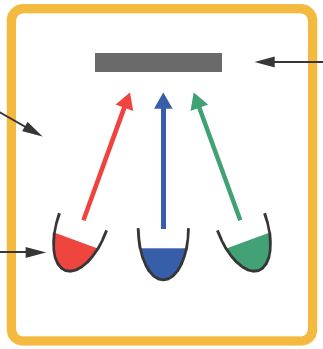
Couches minces ordonnées

Plusieurs techniques sont utilisées pour empiler des couches minces de matériaux différents. L'épitaxie par jets moléculaires permet de déposer des couches d'atomes parfaitement ordonnées sur un substrat lui-même monocristallin.

L'épitaxie par jets moléculaires

Ultra-vide
10^{-11} à 10^{-13} fois la pression atmosphérique pour éviter toute pollution.

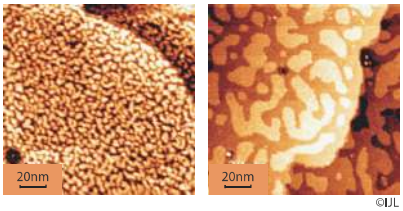
Sources d'atomes
Matériaux chauffés jusqu'à l'évaporation des atomes. Le contrôle des obturateurs (non représentés) situés devant les creusets permet d'alterner les matériaux.



Substrat monocristallin
l'arrangement des atomes est sans défaut dans tout le volume du substrat.

Un processus lent

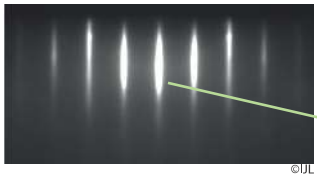
Les atomes arrivent sur le substrat, diffusent à sa surface et finissent par se rencontrer. Ils se condensent en paquets (îlots de nucléation) de plus en plus grands. Une température du substrat suffisamment élevée favorise la diffusion. Cela permet aux atomes, qui arrivent lentement sur la surface, de se positionner selon un arrangement contraint par le substrat (épitaxie).

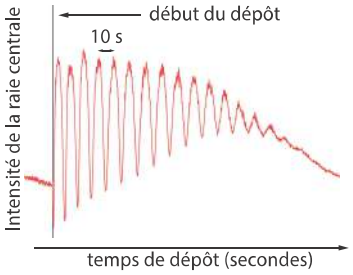


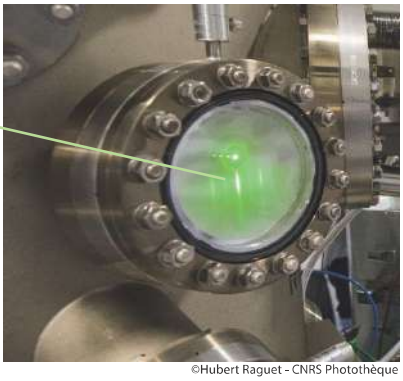
©IJL

Un processus contrôlé en temps réel

Un faisceau d'électrons sonde les couches d'atomes au cours de leur croissance. Les électrons renvoyés par la surface sont détectés sur un écran fluorescent. Les raies observées (figure de diffraction) prouvent que les plans d'atomes sont bien ordonnés. L'intensité lumineuse de la raie centrale est maximale à la fin de la croissance de chaque plan atomique, toutes les 10 secondes environ.


©IJL




©Hubert Raguet - CNRS Photothèque

Zoom sur 3 nano-couches

Ces 3 nanocouches (Fe/MgO/Fe) contenant chacune plusieurs plans d'atomes (points clairs) sont obtenues par épitaxie à jets moléculaires. Elles sont à la base des jonctions tunnel dont la résistance électrique varie fortement avec l'aimantation respective des deux couches de fer. Ce phénomène de magnétorésistance est exploité pour le stockage de données. Image obtenue avec un microscope électronique à transmission (situé à l'extérieur du tube DAUM).

©Hélène Fischer/IJL

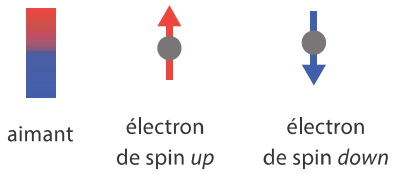
La spintronique

L'électron possède une propriété magnétique intrinsèque que l'on appelle spin et qui peut se représenter comme un minuscule aimant. Le rôle primordial joué par le spin lorsque les électrons traversent des nanocouches de matériaux est à la base de la spintronique, à la croisée du magnétisme et de l'électronique.

L'électron : une aiguille aimantée particulière

Le spin de l'électron est décrit uniquement par la mécanique quantique. Il est symbolisé par une flèche, semblable à une aiguille de boussole pouvant s'orienter dans le champ magnétique d'un aimant.

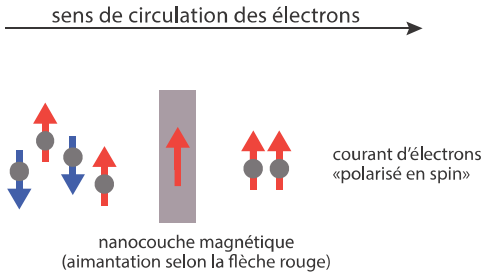
Deux orientations seulement sont possibles pour le spin de l'électron : spin *up* et spin *down*, respectivement parallèle et antiparallèle au champ magnétique appliqué (ici celui de l'aimant).



Manipuler les courants d'électrons et les aimantations

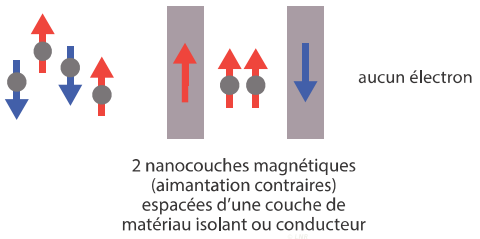
Filtrer

Deux orientations de spin sont possibles pour les électrons d'un courant électrique. Une nanocouche aimantée joue le rôle d'une «vanne de spin». Elle laisse passer les électrons dont le spin est orienté dans le même sens que son aimantation.



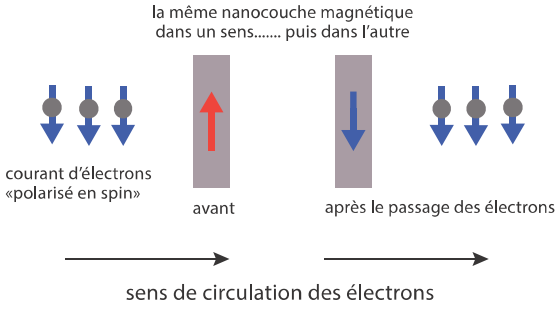
Varier le débit

Deux vannes de spin « inversées » constituent un dispositif très résistant au passage du courant. Sa résistance s'effondre si un champ magnétique externe retourne l'aimantation d'une des deux nanocouches. Ce phénomène de magnétorésistance s'observe lorsque la couche intermédiaire est métallique (magnétorésistance géante) ou isolante (magnétorésistance tunnel). Il est à la base de têtes de lecture de disque dur et de capteurs de champ magnétique très sensibles et très peu consommateurs d'énergie. La découverte de la magnétorésistance géante a valu le prix Nobel au physicien français Albert Fert en 2007.



Modifier l'aimantation

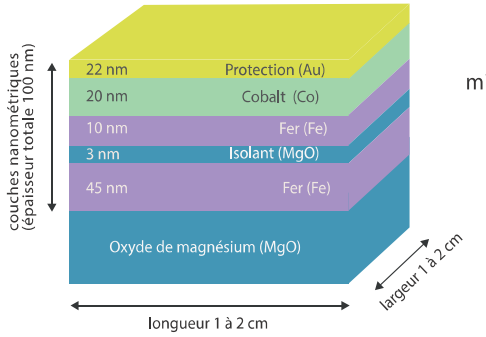
Les courants électriques polarisés en spin peuvent modifier l'aimantation des nanocouches magnétiques. Ils pourraient remplacer les champs magnétiques utilisés dans les mémoires magnétiques. Leur utilisation permettrait de réduire la consommation électrique des ordinateurs.



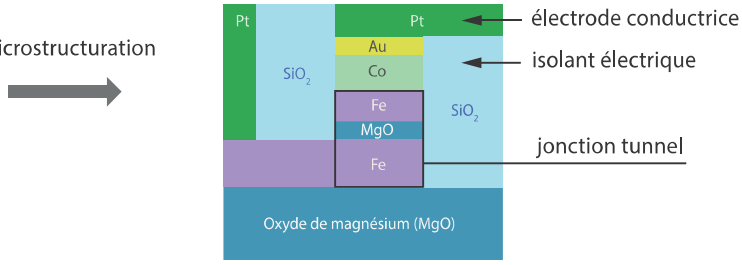
Connecter

Les nanostructures fabriquées sous ultravide dans la plateforme DAUM sont transportées dans des salles blanches où elles sont structurées à l'échelle microscopique avant d'être connectées à un circuit électrique. De nombreuses étapes de lithographie, de gravure et de dépôt d'isolant sont nécessaires avant d'obtenir une nanostructure fonctionnelle.

Microstructurer pour connecter



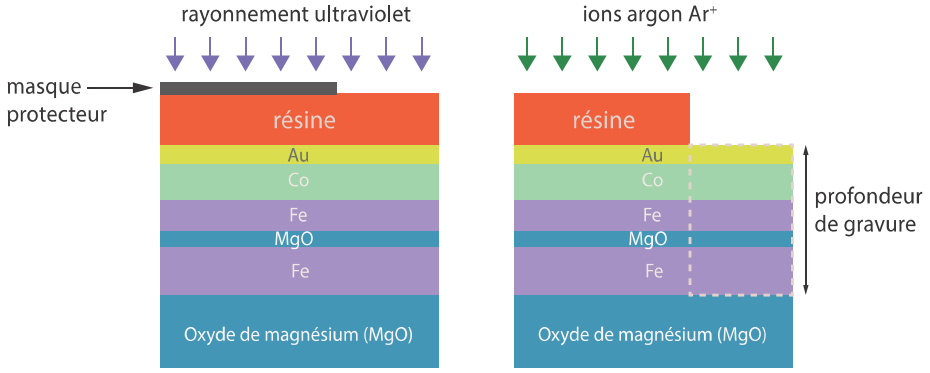
Exemple de nanostructure à jonction tunnel avant microstructuration.



Nano-structure à jonction tunnel microstructurée, les deux électrodes en platine ont des dimensions micrométriques. Elles seront connectées au circuit électrique de taille millimétrique qui permet d'injecter un courant dans la nanostructure afin d'en tester le fonctionnement.

Lithographie et gravure : deux procédés complémentaires

Le procédé de lithographie utilise des résines sensibles aux ultraviolets (UV). Les UV rendent la résine soluble dans un solvant «développeur». La résine non irradiée résiste au solvant. Elle protège la nanostructure du jet d'argon lors de la gravure. L'analyse spectrale des atomes éjectés par l'argon permet d'évaluer en temps réel la profondeur de la gravure.



lithographie de la résine à travers un masque

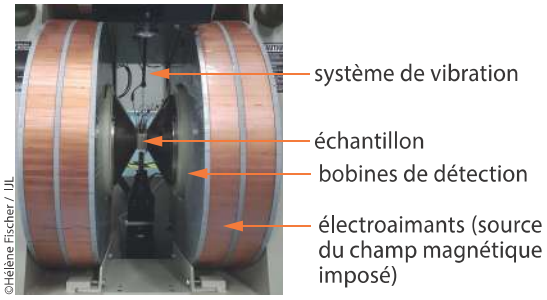
gravure ionique

L'air d'une salle blanche est filtré en permanence. Les personnels doivent porter des combinaisons. L'éclairage de la salle ne contient pas d'ultraviolet pour ne pas abîmer les résines.

Mesurer

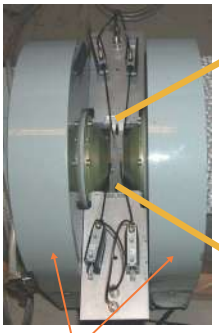
Des instruments très sensibles sont nécessaires pour caractériser les propriétés magnétiques des nanomatériaux. L'aimantation et la résistance électrique d'une nanostructure varient selon la température et le champ magnétique dans lequel elle est placée.

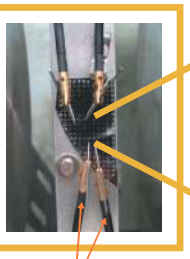
Mesurer l'aimantation : un échantillon magnétique génère un courant électrique lorsqu'il se déplace. Pour connaître l'aimantation d'une nanostructure placée dans le champ magnétique d'un électroaimant, il suffit donc de la faire vibrer et de mesurer simultanément l'intensité du courant électrique qu'elle génère dans des bobines de détection.

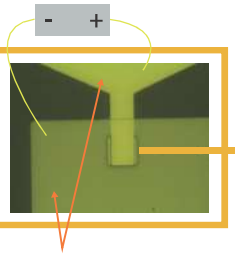


Magnétomètre à échantillon vibrant

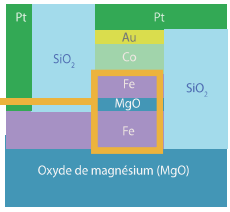
Mesurer la résistance électrique


sources du champ magnétique imposé


fils du circuit de mesure de la résistance électrique d'une nanostructure



électrodes de platine reliant le circuit électrique à la nanostructure (vue de dessus)



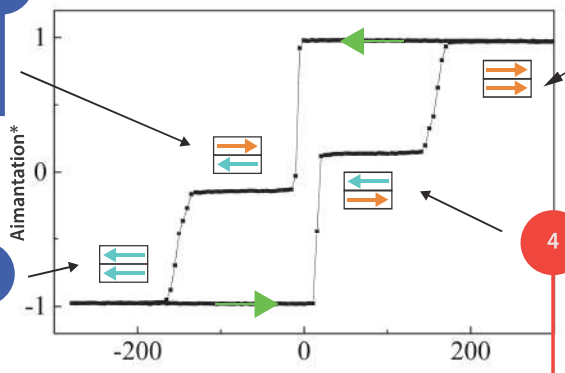
Nanostructure étudiée, à base d'une jonction tunnel (Fe/MgO/Fe) magnétorésistante

la couche de cobalt (Co) rend la couche de fer située en dessous moins sensible aux variations de champ magnétique (couche de fer «dure»)

Cycle d'aimantation caractéristique

L'aimantation de la nanostructure placée dans un champ magnétique variable suit un cycle d'hystérésis. Le cycle présente deux paliers caractéristiques de l'aimantation des nanocouches de fer. Elle dépend en particulier de leur épaisseur et la nature des couches adjacentes.

Cycle d'hystérésis à parcourir dans le sens de la flèche verte, depuis l'étape 1



1 — Champ imposé fort, positif : les aimantations des deux nanocouches de fer sont dans le même sens que le champ.

Résistance électrique faible

2 — Champ imposé faible, négatif : seule l'aimantation de la nanocouche de fer la plus sensible s'est retournée dans le même sens que le champ. Les deux aimantations sont en sens opposé.

Résistance électrique forte

3 — Champ imposé fort, négatif : l'aimantation de la nanocouche de fer «dure» s'est retournée dans le sens du champ. Les deux aimantations sont dans le même sens.

Résistance électrique faible

4 — Champ imposé faible, négatif : seule l'aimantation de la nanocouche de fer la plus sensible s'est retournée dans le même sens que le champ. Les deux aimantations sont en sens opposé.

Résistance électrique forte

* aimantation en unité arbitraire

L'INSTITUT JEAN LAMOUR

Créé en 2009, l'Institut Jean Lamour (IJL), unité mixte de recherche CNRS – Université de Lorraine, est un laboratoire de recherche fondamentale et appliquée en science et ingénierie des matériaux et des procédés. Il rassemble des scientifiques de différentes disciplines (matériaux, métallurgie, plasmas, surfaces, nanosciences et électronique) et il entretient des collaborations académiques avec une trentaine de pays ainsi que des collaborations industrielles avec plus de 100 partenaires.

L'ensemble des compétences présentes à l'IJL permet de traiter les matériaux "de l'atome à la tonne".

Penser les matériaux de demain

au service de :
la santé
la mobilité
l'énergie
l'industrie du futur
la préservation des ressources

6 axes de recherche transverses

Matériaux artificiels nanostructurés, Interfaces avancées pour l'énergie
Plasmas chauds et froids - fusion thermonucléaire
Théorie, modélisations et simulations
Métallurgie, Matériaux et vivant

4 départements

Physique de la matière et des matériaux
Chimie et physique des matériaux et des surfaces
Science et ingénierie des matériaux et métallurgie
Nanomatériaux électroniques et vivant

23 équipes

236 personnels de recherche
99 ingénieurs, techniciens et administratifs
174 doctorants et posts-doctorants

INSTITUT JEAN LAMOUR
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
cnrs
LORRAINE Université d'Excellence
Grand Est ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE
PROJET FINANCÉ PAR L'ANR – PROJECT FUNDED BY THE ANR
UN CHERCHEUR, UNE MANIP