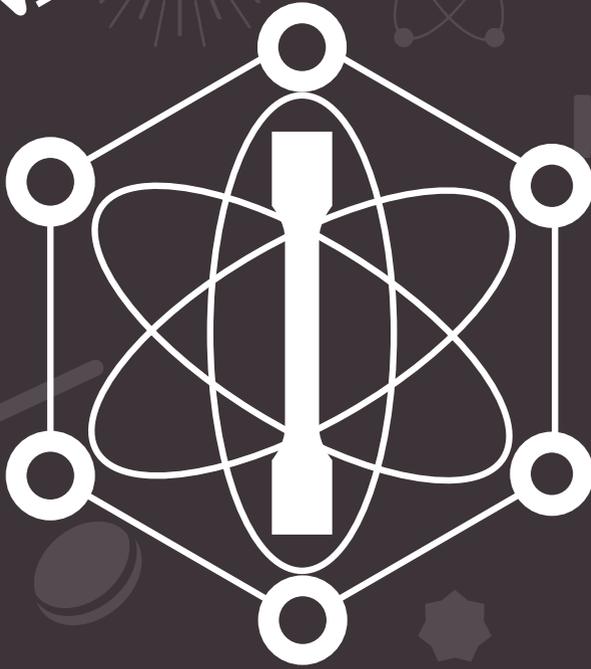
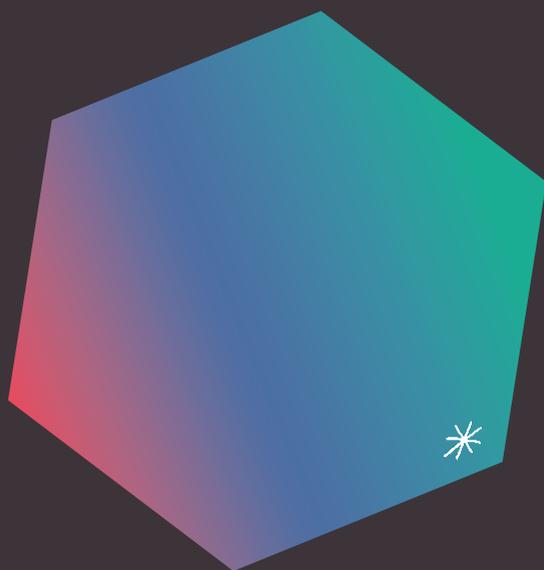


Métamorphoser  
les

# MATÉRIAUX



LSPM



LE LABO

p.5

LE PROCÉDÉ

p.9

PPANAM

p.13

Quand on entre au LSPM pour la première fois, on est d'abord un peu déboussolé. Ce laboratoire de recherche abrite des machines insolites, des matériaux innovants... On y voit des phénomènes surprenants, on entend des mots inconnus, puis on cherche à comprendre et on commence à se poser des questions : comment les chercheurs et les chercheuses du LSPM fabriquent ces nouveaux matériaux ? Comment métamorphoser les matières premières ?

Sans apporter toutes les réponses, ce livret permet d'aborder de façon simple le procédé de transformation des matériaux, et propose un tour d'horizon du laboratoire. Il est à la fois un guide, un aide-mémoire et un dictionnaire. On espère qu'il vous sera utile et qu'il vous donnera envie d'en savoir plus !

MECAMETA

p.19

MINOS

p.25

LEXIQUE

p.31

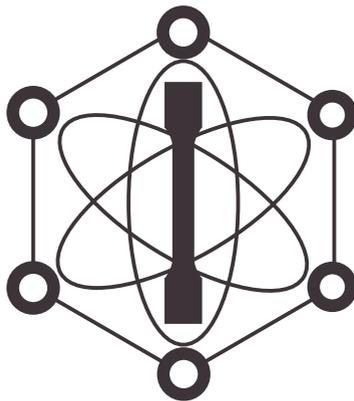


*Laboratoire des sciences des procédés et des matériaux*

---

# LE LABO

---



**Le LSPM est une unité du CNRS  
hébergée sur le campus de l'Université  
Sorbonne Paris Nord. Que se passe-  
t-il à l'intérieur de celui-ci ?**

# Comment ça marche ?

Près de **140 personnes** travaillent dans ce **laboratoire** de recherche de **sciences expérimentales**. On y approfondit des sujets multiples liés par un même thème : le **procédé physico-chimique de fabrication** des **matériaux** et leur caractérisation.

Il s'agit pour les **chercheurs** et les **chercheuses** de comprendre comment **fabriquer certains matériaux** qui présentent un intérêt puis de les tester pour connaître au mieux leurs propriétés. Les procédés et matériaux sont étudiés à très petite échelle, **microscopique** ou même atomique. Ce domaine de recherche est à la croisée de la physique et de la chimie.

Par la publication de leurs résultats scientifiques, les chercheurs et les chercheuses enrichissent la communauté scientifique et le savoir global. Mais leurs découvertes intéressent aussi des acteurs du privé qui les mettent en pratique dans l'industrie. Le LSPM a donc aussi une part d'**ingénierie**. Presque la moitié des chercheurs travaillent en lien avec des entreprises diverses.

**Il est organisé en 3 axes de travail qui sont en relation les uns avec les autres : PPANAM, MINOS et MECAMETA.**

Tous les travaux des 3 axes sont liés à des degrés plus ou moins forts et souvent les projets convoquent des connaissances qui élargissent leur champ de recherche.



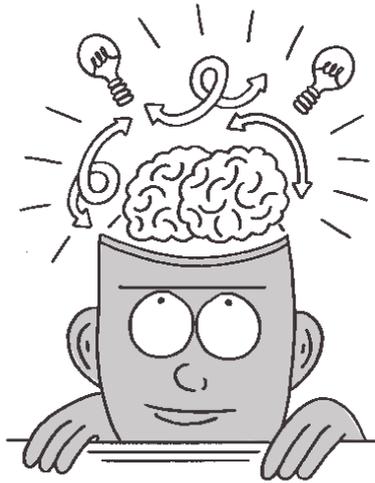
L'Université Sorbonne Paris Nord héberge le LSPM. ©LSPM

(p.31)  
**Lexique**





©LSPM



## POUR MIEUX COMPRENDRE

*Le LSPM évolue en continu, au rythme des découvertes et des interrogations suscitées par l'activité de recherche. Ce laboratoire est un peu comme un cerveau où tout est interconnecté : certaines zones sont dédiées à des sujets et des actions précises, mais les liens se font et se défont en fonction des enjeux et questions qui émergent.*

## **« Qu'est ce qui est le plus beau et le plus étonnant selon vous dans votre métier ? »**

*« Le plus étonnant, c'est que je ne me suis pas lassé de mon travail. Le système de recherche permet une certaine liberté d'évolution. On peut naviguer entre les différentes formes de travail : plus administratif, plus recherche, plus pédagogique. »*

*« Le plus beau, ou plus génial c'est que les idées peuvent venir à tout moment, et pas qu'au laboratoire : la meilleure idée on l'a quand on ne la cherche pas. »*

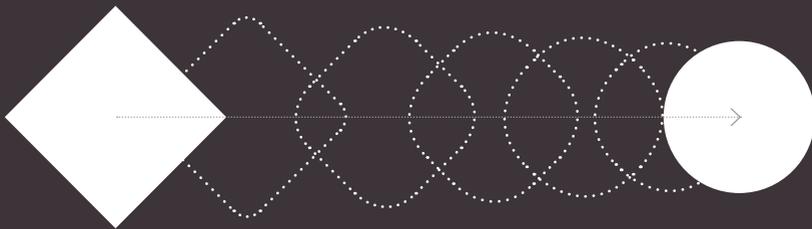


*méthodes, techniques utilisées pour la réalisation  
d'une tâche, ou la fabrication d'un matériau ou d'un produit fini*

---

# LE PROCÉDÉ

---



**Le procédé de fabrication est le socle  
commun à tous les projets de recherche  
du LSPM. Mais c'est quoi un procédé ?**

# Comment ça marche ?

Les techniques et les produits diffèrent selon les projets, mais le principe est toujours le même :

On a besoin tout d'abord d'un ou plusieurs **éléments** purs ou **précurseurs**. Pour pouvoir être correctement exploitées, ces matières premières sont achetées sous des formes qui varient : **poudre, gaz, solution...** Le précurseur peut être exploité sous différentes **phases**, c'est à dire qu'en fonction de sa température il sera solide, liquide ou gazeux.

Le procédé est en fait le **processus de transformation du précurseur vers sa forme finale**. Ce **protocole** peut impliquer plusieurs **phénomènes** physiques et chimiques ainsi que différentes techniques.

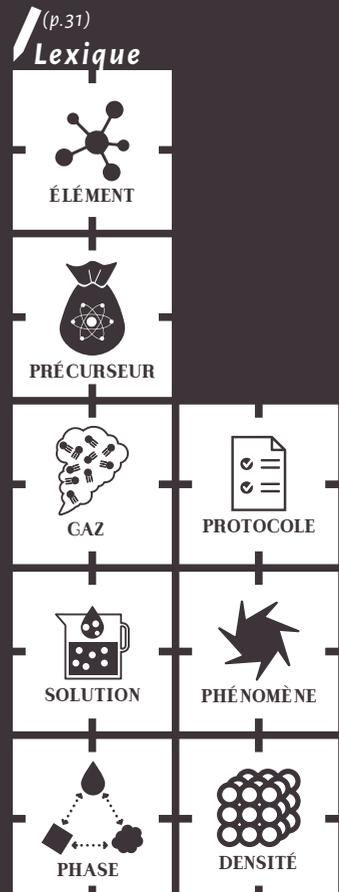


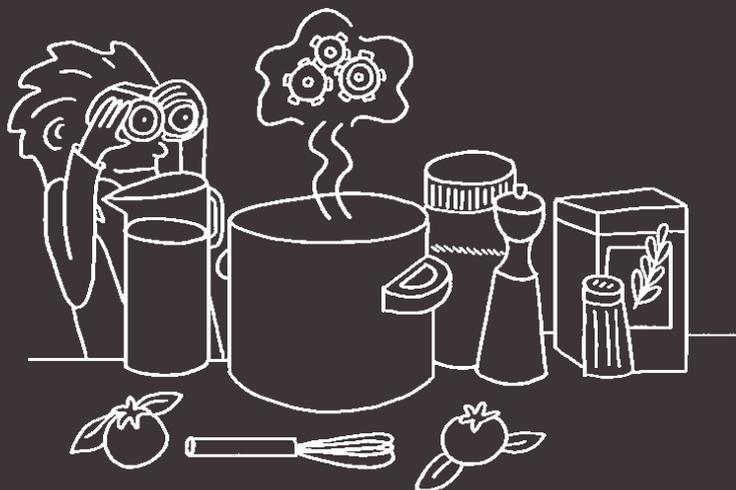
Une fois le procédé opéré, les chercheurs et les chercheuses obtiennent de nouveaux matériaux à partir des précurseurs. Ces nouveaux matériaux issus des procédés ont des propriétés particulières : solidité, **densité**, finesse, forme, structure... qui pourront faire l'objet de nombreux usages.

Parmi les procédés développés au LSPM on peut citer :

- la croissance de couches minces par dépôt d'atomes
- les procédés hautes pressions et hautes températures pour former des structures cristallines
- les procédés chimiques pour créer des nanoparticules.

Chacun des 3 axes de recherche du LSPM utilise l'une des 3 méthodes de façon préférentielle.

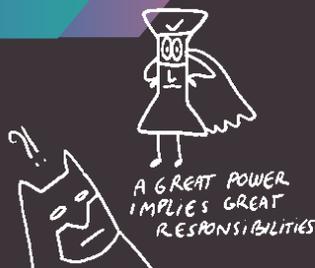




## POUR MIEUX COMPRENDRE

*On peut voir le procédé physico-chimique comme de la cuisine. La pâtissière va élaborer une recette en choisissant ses ingrédients, ses ustensiles, la manière de les mélanger ou de les faire cuire. De même, les chercheurs et chercheuses du LSPM mettent au point des protocoles à partir de précurseurs qui seront soumis à des phénomènes physiques et chimiques, des conditions de température et de pression soigneusement choisies. Le tout en utilisant des instruments adéquats.*

*Le nouveau matériau ainsi produit possédera de nouvelles propriétés qui répondent aux défis de demain.*



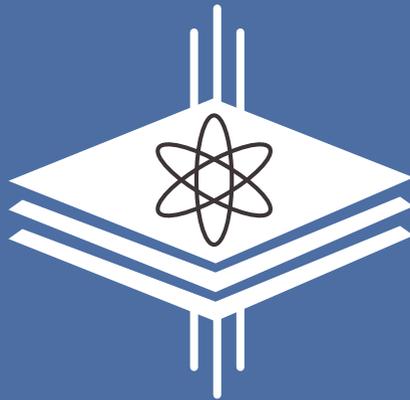


*Procédés plasma, nanostructures et films minces*

---

PPANAM

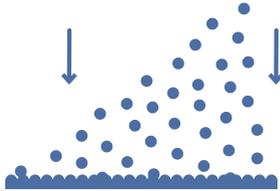
---



**L'Axe de recherche PPANAM utilise la croissance de couches minces par dépôt d'atomes pour fabriquer de nouveaux matériaux. Quel est le principe de cette famille de procédés?**

## Comment ça marche ?

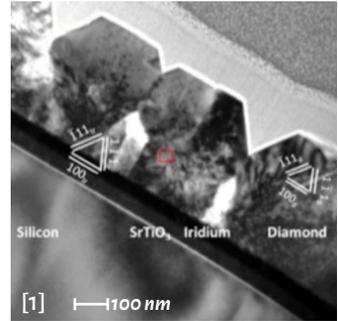
Sur un **substrat** choisi, on cherche à ce que des **atomes** viennent s'agencer pour former un nouveau matériau [1]. Le fait de travailler directement à l'échelle atomique permet de créer des couches de matériaux très minces [2]. Il existe plusieurs techniques pour faire se déposer les atomes sur le substrat. On peut les vaporiser, les pulvériser... Tout cela va influencer la façon dont ils s'organisent et modifier les propriétés du matériau ainsi obtenu. Au contact des atomes, le substrat influence également la croissance du matériau : ce phénomène est également étudié dans PAPANAM.



Au sein de l'Axe PAPANAM, on utilise l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, la PECVD ou dépôt chimique en phase vapeur assisté par **plasma** (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*). La **pulvérisation cathodique** consiste à pulvériser une **cible**, qui en se désagrégeant permet de faire tomber les atomes vers le substrat.

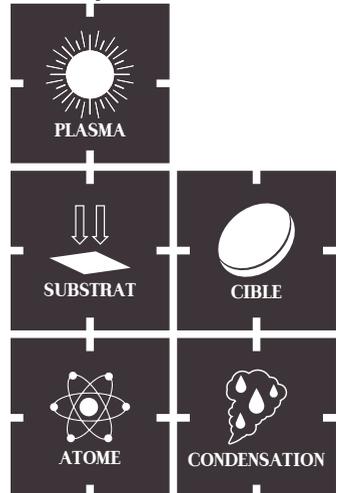
L'**évaporation** consiste à chauffer le précurseur. L'élément ainsi vaporisé se dépose ensuite par **condensation** sur le substrat à recouvrir.

La **PECVD** dépose les couches minces sur un substrat à partir d'un état gazeux (vapeur). Des réactions chimiques se déroulent au cours du processus après la formation d'un plasma à partir des gaz du réacteur. Le plasma est généralement obtenu à partir de ce gaz par une décharge électrique.



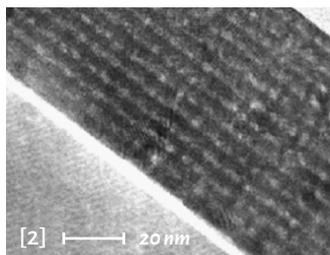
[1] Couche mince de diamant vue en coupe transverse au microscope électronique. ©LSPM

### (p.31) Lexique



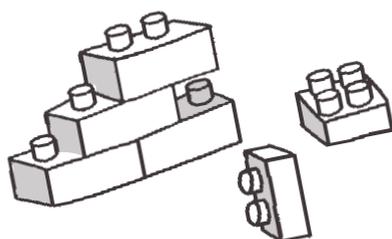
## À quoi cela peut servir ?

Les matériaux créés trouvent une application concrète pour leurs propriétés électroniques [3], chez Thales par exemple, leurs propriétés optiques dans les industries du verre chez Saint Gobain ou Essilor et leurs propriétés électromagnétiques chez Samsung par exemple, pour le stockage de donnée des mémoires dans les portables.



[2] Plusieurs couches minces vues en coupe transverse au microscope électronique. ©LSPM

[3] Échantillon de couche mince pour l'électronique flexible. On voit en orange le substrat utilisé, ici du kapton®, et en noir les couches minces qui ont été déposées. ©LSPM



### POUR MIEUX COMPRENDRE

*Les différentes techniques utilisées ont un même but : maîtriser les caractéristiques de la couche mince, un peu comme on construit un mur fin avec des briques de Lego® en les choisissant soigneusement ainsi que leurs positions pour que le mur soit bien solide.*

Zoom sur ...



## La pulvérisation cathodique

La pulvérisation est un procédé de dépôt de couches minces permettant d'obtenir des films métalliques d'alliages, mais également de **semi-conducteurs** (nitrides, oxydes).

Cette technique consiste à bombarder un (des) matériau(x) cible(s) par de l'argon, un **gaz neutre**. **1**

Dans l'enceinte de la pulvérisation cathodique, seul l'argon est présent. On applique alors une tension entre la cible et le substrat : l'argon perd des électrons, on dit qu'il se ionise. Cependant, le plasma reste neutre puisque les **ions**  $\text{Ar}^+$  et les électrons y sont présents simultanément. Une étrange lumière apparaît dans l'enceinte, c'est l'argon qui devient plasma. **2**

Sous l'effet du champ électrique, les ions  $\text{Ar}^+$  du plasma sont attirés par le matériau cible et commencent à le bombarder. Les atomes sont ainsi arrachés de la cible et forment une sorte de nuage. **3**

C'est ainsi que les atomes du nuage atteignent le substrat et s'y déposent. En contrôlant les paramètres (tension, pression, flux d'argon, etc.) il est possible de déposer des couches très minces dont les plus épaisses font à peine quelques centaines de nanomètres. **4**

(p.31)

Lexique

Ar

GAZ  
NEUTRE

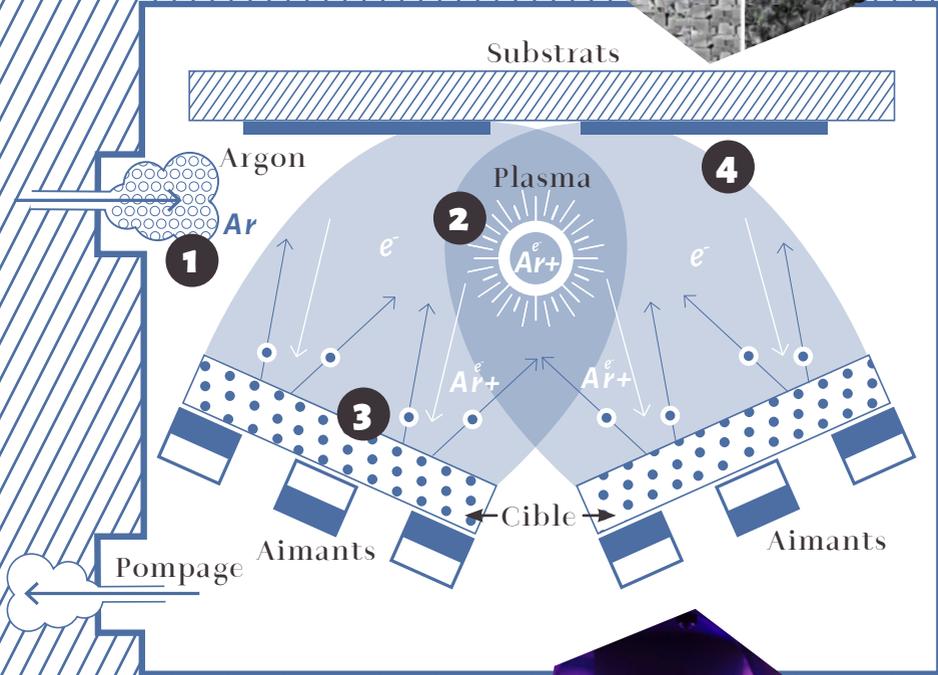
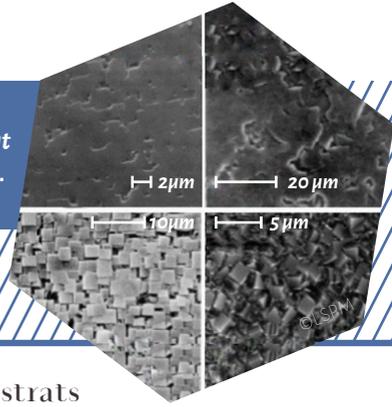


SEMI-  
CONDUCTEUR



ION

Sur cette image on peut voir comment le substrat choisi influence la structure même du matériau déposé (résultat de nucléation de diamants sur différents types de substrats).



On voit bien la lumière du plasma au-dessus de chacune des deux cibles sur la photo de l'enceinte du bâti de pulvérisation cathodique.

## « Qu'est ce qui est le plus beau et le plus étonnant selon vous dans votre métier ? »

*« Jouer aux alchimistes. Il y a longtemps ils voulaient transformer le plomb en or, ce qu'ils n'ont jamais réussi à faire. Nous on transforme un simple gaz en diamant ! »*

*« On ne se lasse jamais ! »*

*« Le plaisir d'apprendre en permanence des choses, un peu comme si j'étais un éternel étudiant. Ça donne l'impression de rester jeune (et humble devant la Nature). »*

*« Ce qui est étonnant, c'est que les chercheurs et les chercheuses internationales travaillent sur la synthèse de diamant depuis près de 40 ans. Habituellement si au bout de 10-15 ans un matériau produit en laboratoire n'a pas été industrialisé on l'abandonne : le diamant fait exception ».*

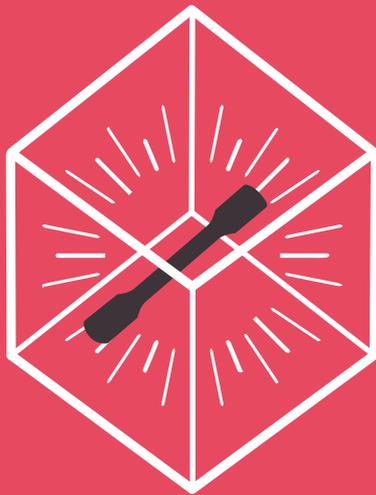


*Mécanique et métallurgie des matériaux*

---

# MECAMETA

---



**L'AXE MECAMETA se concentre,  
lui, sur les procédés hautes  
pressions et températures.**

# Comment ça marche ?

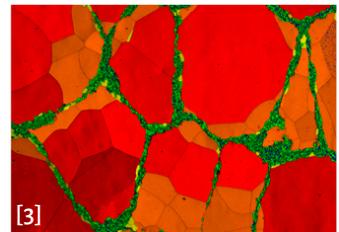
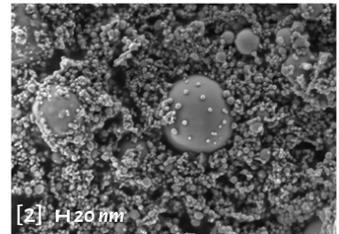
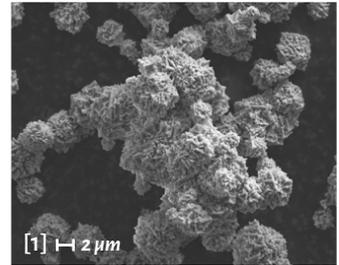
Il s'agit de soumettre les éléments de base à de fortes **pressions** et **températures** pour obtenir des matériaux aux structures cristallines et aux microstructures désirées. On peut ainsi jouer sur les **propriétés** de ces matériaux comme leur dureté, leur élasticité ou même leur densité.

Au sein de l'Axe MECAMETA, les chercheurs et les chercheuses travaillent principalement sur des métaux. Les précurseurs peuvent être purs mais le plus souvent ce sont des **alliages**. La sélection des précurseurs est une étape importante du processus de recherche : il faut sélectionner la bonne structure cristalline mais également la forme du précurseur. Généralement ce sont des poudres dont la taille et la forme des grains sont des paramètres fondamentaux[1,2].

Il s'agit ensuite de soumettre les précurseurs à différentes opérations : par exemple les **impacter** ou les **fragmenter** avec un broyeur ou encore effectuer un **frittage** de ces matériaux. Ces phénomènes permettent d'intervenir à des échelles différentes : à l'échelle des microstructures et à l'échelle de la structure cristalline.



En faisant varier les paramètres principaux que sont la pression et la température lors de ces étapes, on obtient des matériaux aux **propriétés mécaniques** différentes [3]. Pour identifier les caractéristiques de ces matériaux on les teste sous forme d'**éprouvettes**.



[1] Poudre micrométrique de nickel avec une apparence proche de celle d'un chou romanesco. La taille moyenne des particules est de 5  $\mu\text{m}$ . ©LSPM

[2] Nanopoudre de nickel. La taille des petites particules est de l'ordre de 100 nm avec quelques particules plus grosses d'environ 1 à 2  $\mu\text{m}$ . ©LSPM

[3] Microstructure d'un alliage de titane : la poudre d'alliage a été mise dans un broyeur, puis les particules impactées ont ensuite été frittées. La pression et la température ont permis de lier les particules entre elles. Les petits grains (en vert) ont été produits suite aux impacts. Les grains plus gros en orange et rouge correspondent au centre des particules de poudre qui n'ont pas été affectées par les impacts. ©LSPM

 PRESSION	 ALLIAGE
 STRUCTURE CRISTALLINE	 IMPACT
 FRAGMENTATION	 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES
 FRITTAGE	 ÉPROUVETTE

## À quoi cela peut servir ?

Les matériaux produits trouvent une application concrète pour leurs propriétés mécaniques dans des procédés industriels à grande échelle : recherche de matériaux plus solides et plus légers, résistance aux impacts, dans l'aéronautique ou même dans le domaine médical, où les chercheurs et les chercheuses travaillent par exemple sur un nouvel alliage de titane pour les prothèses de hanche notamment.



### POUR MIEUX COMPRENDRE

Les chercheurs et les chercheuses de l'axe MECAMETA sont héritiers de savoirs développés dès l'âge de fer. On savait de façon empirique que les alliages de métaux permettait de créer des matériaux plus solides (l'acier trempé d'une lame par exemple), mais chacun avait ses secrets de fabrication. Aujourd'hui on applique une méthode scientifique qui permet de comprendre comment les phénomènes à l'échelle microscopique influent sur les propriétés macroscopiques.

Zoom sur ...



## Le broyeur

Le broyeur est une étape qui permet d'opérer de premières modifications sur les poudres sélectionnées.

Dans le broyeur, **1** le précurseur en poudre est placé dans un récipient où des billes en acier très dures viennent impacter la surface de chacune des particules contenues dans la poudre.

Les billes peuvent aller jusqu'à fragmenter les grains des poudres, c'est à dire les briser et donc former de nouveaux grains plus petits.

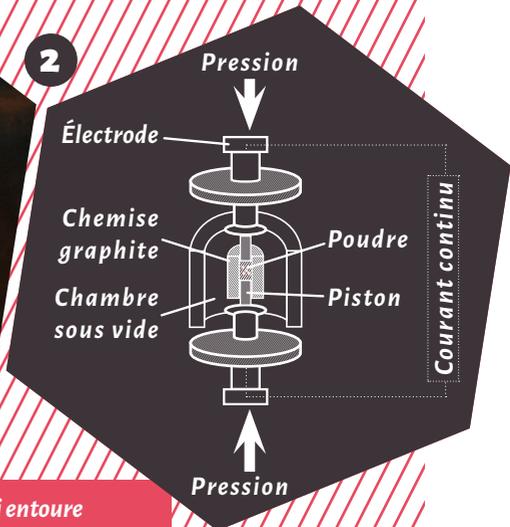
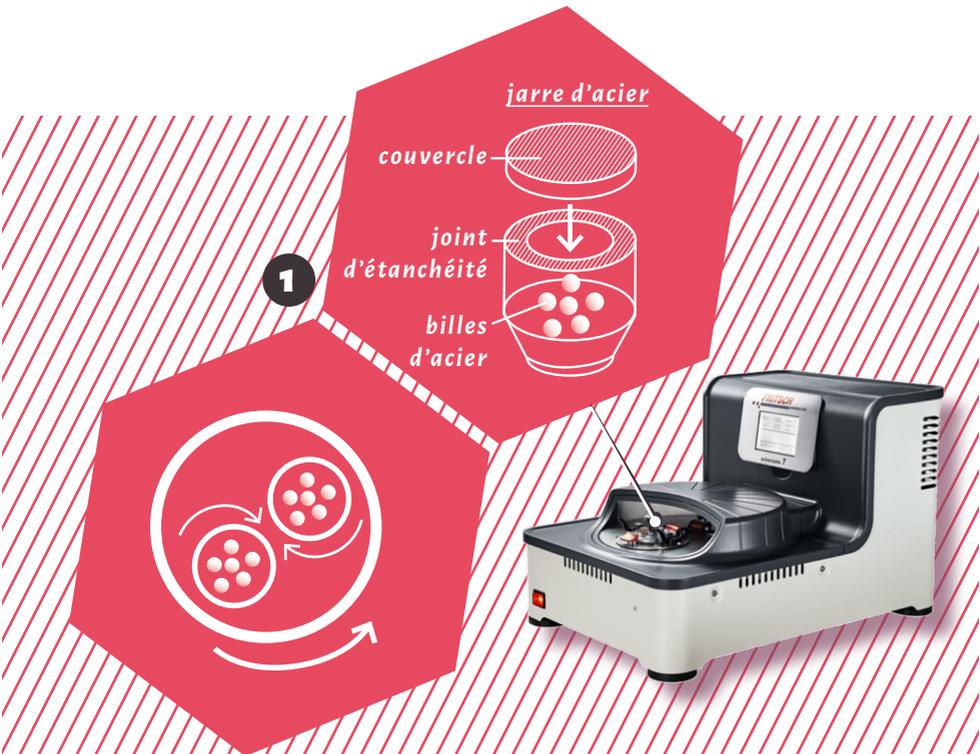
---

## Le frittage

Le **SPS** ou **Spark Plasma Sintering** est un four utilisé pour **fritter des poudres** (c'est-à-dire souder les grains entre eux). **2**

On utilise un moule en graphite (carbone) dans lequel est mise la poudre. On applique la pression via des pistons et on chauffe par passage d'un courant au travers du moule.

Pour limiter les pertes thermiques, on entoure le moule avec un tissu en carbone appelé feutrine que l'on tient avec un fil tressé de carbone.



Sur cette photographie on distingue bien la feutrine qui entoure le moule en carbone. Le moule est blanc car il est à haute température.

crédits photographiques ©LSPM

## « Qu'est ce qui est le plus beau et le plus étonnant selon vous dans votre métier ? »

*« J'aime transmettre mes connaissances et c'est une vraie satisfaction d'aider les jeunes à trouver leur voie. C'est particulièrement vrai avec les formations en alternance. »*

*« J'adore lorsqu'une idée qu'on a parfois eue autour d'un verre ou d'un café, dessinée sur un coin de table, finit, parfois des années plus tard, par se concrétiser en un matériau réel aux propriétés optimisées. »*

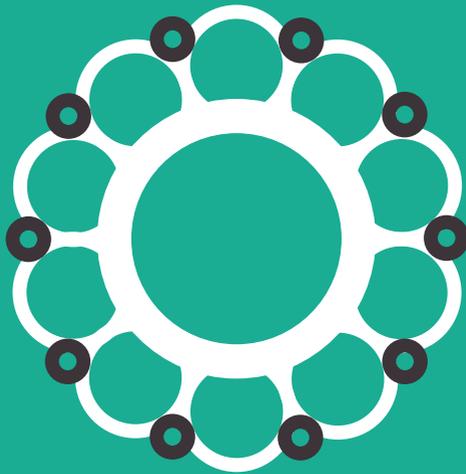


*Matériaux Inorganiques et Nanostructures*

---

# MINOS

---



**L'axe Minos utilise principalement des procédés chimiques pour créer des matériaux qui ont des nanostructures spécifiques.**

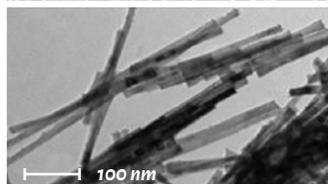
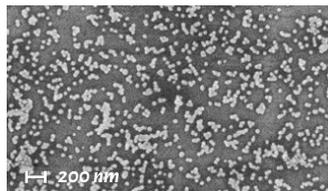
## Comment ça marche ?

Les chercheurs et les chercheuses de l'Axe MINOS s'intéressent aux procédés chimiques de fabrication de nanoparticules. Une **nanoparticule** est un objet tridimensionnel dont la taille ne dépasse pas une ou deux centaines de nanomètres, c'est à dire que les nanoparticules sont 1 000 fois plus petites que le diamètre d'un cheveu ! Elles sont non seulement invisibles à l'œil nu mais au microscope optique aussi... [1].

Pour fabriquer les nanoparticules, les chercheurs et chercheuses utilisent des **réactions chimiques** qui poussent les atomes à se réunir et à créer des assemblages dont la taille est **nanométrique**, à mi-chemin entre l'échelle **macroscopique** et l'échelle atomique. L'avantage de bien connaître ces phénomènes chimiques, c'est de pouvoir les reproduire simultanément et dans de grandes quantités.



Après avoir fabriqué ces nanoparticules, on cherche également à les ordonner entre elles pour produire un matériau macroscopique : en utilisant des **aimants** par exemple [2], ou des procédés couches minces comme au sein de l'axe PPANAM.



[1] Nanoparticules d'or déposées sur silicium observées au microscope électronique à balayage ©LSPM

[2] Nanoparticules en forme de «nano-aiguilles». Elles s'orientent sous l'effet d'un aimant ©LSPM

(p.31)  
**Lexique**

	 MACROSCOPIQUE	 PROPRIÉTÉS MULTI-FONCTIONNELLES
 NANO-PARTICULE	 NANOMÉTRIQUE	 PROPRIÉTÉS OPTIQUES
 RÉACTION CHIMIQUE	 AIMANT	 PIÉZOÉLECTRIQUE

## À quoi cela peut servir ?



[3]Panneau photovoltaïque ©Dllu - Own work / Wikipedia Creative Commons BY-SA 4.0

Ces procédés fabriquent des matériaux aux propriétés souvent hybrides et **multi-fonctionnelles**, utiles à la transition écologique : par exemple des matériaux à la fois transparents (propriétés **optiques**) et résistants aux rayonnements ionisants, des matériaux photovoltaïques ainsi que des matériaux à la fois magnétiques et **piézoélectriques** pour intégrer des composants moins énergivores et à haute densité de stockage des données visant les applications en micro-informatique ou dans la téléphonie mobile. Parmi les matériaux fabriqués il y a également des composants électroniques innovants susceptibles d'intégrer des dispositifs dans le domaine des véhicules décarbonés ou encore des matériaux pour le stockage de l'hydrogène.



### POUR MIEUX COMPRENDRE

*On peut comparer les protocoles suivis au sein de l'axe MINOS au travail du potier. On provoque les réactions chimiques qui permettront de donner la forme et les propriétés voulues au matériau d'origine, comme le potier façonne la terre, la cuit pour la vitrifier... On chasse même les bulles d'air du matériau comme le fait artisanalement un céramiste !*

Zoom sur ...



## Les procédés de fabrication de nanostructures polyol et SPS sous champ magnétique

On utilise les éléments précurseurs sous forme de sels métalliques, que l'on disperse dans un liquide (ou solvant). Les atomes métalliques (cations ou **ions** positifs) des sels se retrouvent ainsi dispersés dans le solvant que l'on nomme milieu réactionnel. Le solvant utilisé dans les procédés polyol est une sorte d'huile visqueuse qui a la particularité de pouvoir chauffer jusqu'à plus de 200°C sans s'évaporer ou se dégrader. **1**

Après avoir été dissous, les différents précurseurs sont chauffés dans un **réacteur**. Sous l'effet de la chaleur les atomes s'agencent pour former des **nanoparticules**. **2**

Le champ magnétique conditionne les atomes à s'agréger sous la forme de minuscules aiguilles magnétiques plus fines qu'un cheveu. Comme l'aiguille d'une boussole, elles présentent un pôle nord et un pôle sud. **3**

On peut alors former un composé plus grand (de la taille d'une pièce) en assemblant les nanoparticules. L'objectif ici est de faire en sorte que ce matériau final ait une bonne tenue mécanique mais aussi que les aiguilles magnétiques qui le composent gardent leur taille initiale et la même disposition. Pour cela on utilise un four, nommé Spark Plasma Sintering qui permet une cuisson (ou **frittage**) rapide. Ce four est aussi équipé d'un aimant qui permet d'aligner les aiguilles magnétiques pendant l'étape de mise en forme. **4**

Dans certains cas, il est nécessaire de faire un second traitement thermique sur le matériau obtenu pour le renforcer car il peut y avoir des bulles d'air (pores) qui ont été enfermées dans celui-ci lors du frittage. Pour cela on procède à une étape de **postdensification**. Le matériau est placé dans un four qui permet non seulement de chauffer mais également d'appliquer une forte pression venant de tous les côtés : c'est la Compaction Isostatique à Chaud. (CIS) **5**

(p.31)

### Lexique



RÉACTEUR

100 nm



NANO-PARTICULE

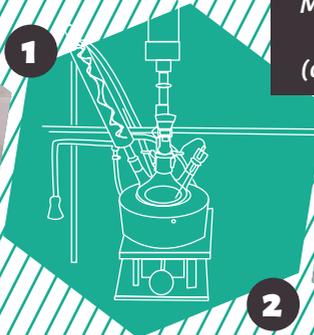


FRITTAGE



POST-DENSIFICATION

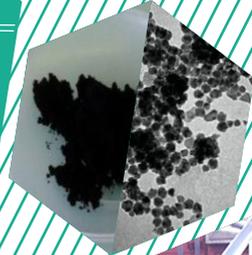
Montage du procédé polyol classique (chauffage à reflux)



1



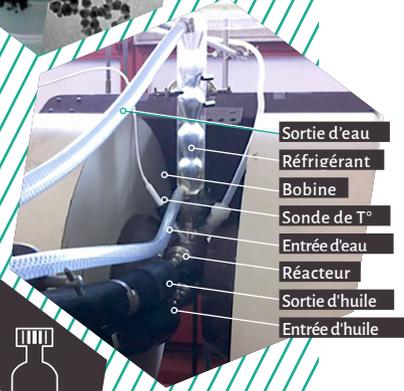
Sels de départ



2

Au LSPM le procédé polyol se fait sous l'effet d'un champ magnétique : le milieu réactionnel est placé au centre d'un aimant

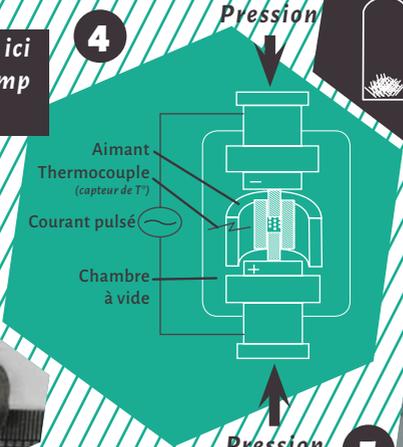
3



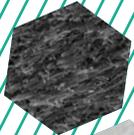
- Sortie d'eau
- Réfrigérant
- Bobine
- Sonde de T°
- Entrée d'eau
- Réacteur
- Sortie d'huile
- Entrée d'huile

Le montage SPS ici assisté d'un champ magnétique

4



Les nanoparticules prennent la forme de petites aiguilles qui s'orientent selon le champ magnétique



la pastille du matériau obtenue à la fin du procédé

la pastille transparente obtenue après compaction

5



crédits photographiques ©LSPM

## « Qu'est ce qui est le plus beau et le plus étonnant selon vous dans votre métier ? »

« Il suffit d'une petite variation dans l'un des paramètres intervenants dans les différentes étapes du procédé pour obtenir une matière aux propriétés totalement inattendues. »

« Pour ma part c'est l'ingéniosité de l'être humain qui m'étonne toujours. »

« Ce qui est le plus beau c'est d'en apprendre tous les jours, de découvrir des nouveautés, de mettre au point des machines nouvelles qui fonctionnent effectivement et de pouvoir produire des matériaux. »

« Que les procédés mettant en oeuvre les hautes pressions fluides, qui avaient commencé à passer dans l'industrie (e.g. ASEA en Suède dans les années 60), ont connu un déclin marqué en Europe tandis qu'ils connaissent maintenant un fort développement en Asie. »

« C'est un travail 'ingrat' au sens que l'acquisition des données expérimentales est lourde mais exaltant au sens qu'il peut s'appliquer à des thématiques de recherche sans cesse renouvelées. Les hautes pressions permettent de lever de nombreux verrous technologiques quant à l'élaboration de matériaux nouveaux. »





 **aimant** : Toute substance qui possède ou a acquis la propriété d'attirer le fer. Au laboratoire, c'est un dispositif (aimant permanent ou électroaimant) destiné à produire un champ magnétique extérieur dans certains procédés.

---

 **alliage** : Produit métallurgique résultant de l'incorporation à un métal d'un ou de plusieurs éléments (métalliques ou non), effectuée dans le but de modifier certaines de ses propriétés ou même de lui conférer des propriétés nouvelles.

---

 **atome** : Constituant élémentaire de la matière.

---

 **chercheur.se** : Personnel qui se consacre à la recherche à temps plein (personnel CNRS) ou à mi-temps (enseignant.es-chercheur.ses).

---

 **cible** : Expression désignant un précurseur solide destiné à être pulvérisé au cours d'un procédé.

---

 **condensation** : Passage d'une vapeur à l'état solide ou liquide.

---

 **densité** : La densité ou densité d'un corps ou densité relative d'un corps est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps pris comme référence.

---

 **élément** : Entité chimique fondamentale commune aux diverses variétés d'un même corps simple ainsi qu'aux combinaisons de ce corps simple avec d'autres corps.

---

 **éprouvette** : Échantillon prélevé dans un lot, dans des conditions déterminées, et destiné à être soumis à des essais prévus dans les cahiers des charges concernant des fournitures de matériaux.



**frittage** : Opération effectuée en métallurgie des poudres, pour réaliser par chauffage une agglomération des produits traités, afin de leur donner une cohésion et une rigidité suffisantes sans avoir recours à une fusion complète.

---



**gaz** : Corps qui se trouve à l'état gazeux à la température et à la pression ordinaires.

---



**gaz neutre** : Un gaz dont la composition est sans conséquence préjudiciable lorsqu'il est utilisé dans le contexte voulu.

---



**ingénierie** : Étude d'un projet industriel sous tous ses aspects (techniques, économiques, financiers, monétaires et sociaux) et qui nécessite un travail de synthèse coordonnant les travaux de plusieurs équipes de spécialistes.

---



**ion** : Particule chargée électriquement et formée d'un atome ou d'un groupe d'atomes ayant gagné ou perdu un ou plusieurs électrons.

---



**laboratoire** : Ensemble des chercheurs et des personnels de soutien à la recherche (ingénieurs, techniciens, administratifs) effectuant dans un lieu déterminé un programme de recherche.

---



**macroscopique** : Qui se voit à l'œil nu.

---



**microscopique** : Qui ne peut être vu qu'à l'aide d'un microscope.

---



**molécule** : Particule formée d'atomes et qui représente, pour un corps pur qui en est constitué, la plus petite quantité de matière pouvant exister à l'état libre.

---



**nanométrique** : Qui concerne des objets ayant des dimensions de l'ordre du nanomètre, l'unité de mesure de longueur équivalant à un milliardième de mètre.



**nanoparticule** : Particule dont les dimensions varient de 1 à 100 nm environ.

---



**phase** : État de la matière. On en distingue principalement 3 : Les phases solide, liquide et gazeuse. D'autres phases instables de la matière sont aussi considérées en physique.

---



**phénomène** : Fait naturel constaté, susceptible d'étude scientifique, et pouvant devenir un sujet d'expérience : la radioactivité par exemple

---



**piézoélectrique** : Qui concerne les phénomènes électriques produits par des corps qui se déforment.

---



**plasma** : Fluide composé de molécules gazeuses électriquement neutres, d'ions positifs et d'électrons négatifs.

---



**précurseur** : Composé qui en précède un autre dans une suite de réactions chimiques. Le mot est utilisé pour décrire la matière première dans les procédés de fabrication.

---



**pression** : Rapport d'une force sur une surface.

---



**propriétés mécaniques** : Elles concernent la déformation d'un matériau soumis à une force, comme la résistance, la dureté, la rigidité ou encore la ténacité (capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie).

---



**propriétés optiques** : Caractéristiques observables d'un matériau lorsqu'il est traversé par la lumière.

---



**propriétés multifonctionnelles** : Propriétés d'un matériau qui peuvent remplir différentes fonctions, accomplir plusieurs tâches.



**protocole** : Ensemble des règles, questions, etc., définissant une opération complexe : Protocole d'une expérience, d'un test.

---



**réaction chimique** : Processus au cours duquel on observe la transformation de certaines espèces chimiques (molécules, atomes, ions) en d'autres. C'est un processus qui présente la particularité de conserver intégralement la matière. Mis en présence les uns des autres, les éléments qui constituent les réactifs réagissent et se retrouvent tous dans ce qui constitue les produits de la réaction.

---



**réacteur** : Récipient dans lequel est réalisée une réaction chimique.

---



**sciences expérimentales** : Sciences qui utilisent une même méthode qui consiste à tester la validité d'une hypothèse en reproduisant un phénomène (souvent en laboratoire) et en faisant varier un paramètre. Le paramètre que l'on fait varier est impliqué dans l'hypothèse. Le résultat de l'expérience valide ou non l'hypothèse. La démarche expérimentale est appliquée dans les recherches en biologie, physique, chimie, psychologie, ou encore l'archéologie.

---



**sel** : Corps pur, de structure ionique, résultant de l'action d'un acide ou d'un oxyde basique sur une base ou un oxyde basique, ou encore de l'action d'un acide ou d'une base sur un métal.

---



**semi-conducteur** : Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

---



**solution** : En chimie, une solution est un mélange homogène résultant de la dissolution d'un ou plusieurs solutés dans un solvant.



**solvant** : Substance (le plus souvent liquide) qui a le pouvoir de dissoudre d'autres substances.

---



**substrat** : Ce qui sert d'infrastructure à quelque chose, ce sur quoi s'exerce une action.

---



**structure cristalline** : La structure cristalline (ou structure d'un cristal) donne l'arrangement des atomes dans un cristal. Ces atomes se répètent périodiquement dans l'espace, comme un motif, et forment ainsi la structure cristalline.

---



**viscosité** : Propriété physique d'un fluide, impliquant une relation entre les contraintes et les vitesses de déformation.



*Ce projet a été conduit par Nathalie Lidgi-Guigui,  
maîtresse de conférences au LSPM en collaboration  
avec Laura Bertrand et Camille Lindeperg.*

*Nous tenons à remercier messieurs D. Vrel et D. Faurie directeur  
et directeur adjoint du LSPM ainsi que les membre de la cellule  
communication du LSPM, R. Issaoui, C. Lazzaroni et F. Cazes  
pour leur aide et leur accueil tout au long du projet.*

*Nous remercions également l'ensemble des membres du LSPM et en  
particulier celles et ceux qui ont répondu à nos nombreuses questions  
F. Bénédic, F. Challali, P. Langlois, G. Lombardi, S. Mercone, M. Nikravech,  
F. Schænstein, D. Tingaud, M. Traoré, F. Zighem.*





