



Collection de Minéraux  
SORBONNE UNIVERSITÉ

# CRÉER LE CRISTAL

Voyage entre art et science



# **CRÉER LE CRISTAL**

**Voyage entre art et science**

# Présentation

## Catalogue

Cet ouvrage est publié à l'occasion de l'exposition temporaire *Créer le cristal, voyage entre art et science*, imaginée à la suite du travail d'inventaire et de reconditionnement des cristaux de synthèse de la Collection de minéraux.

**Auteur.e.s** : I. Callebaut (IMPMP) ; M. Dezi (Institut Curie et IMPMP) ; P. Loiseau (IRCP) ; C. Paletta (BSU) ; G. Rousse (Sorbonne Université - Collège de France) et M. Verdaguer (IPCM)

**Contributeurs.trices** : D. Gratias

**Artistes** : Ada ; Léa Barbazanges ; Vincent Gontier ; Robin Guittat

**Mise en page** :  
C. Paletta (BSU)

**Coproduction** :  
Pôle Collections Scientifiques et Patrimoine de la Bibliothèque de Sorbonne Université (BSU)

**Image de couverture** :  
« *Polymorphisme. Diversité des formes cristallines obtenues lors de la cristallisation d'une molécule organique* »  
(Plateforme de diffraction des rayons X, IPCM). ©Photographie Charles Ragusa

## Exposition

**Commissaires** : C. Paletta et M. Verdaguer

**Commissaires scientifiques** : I. Callebaut (IMPMP) ; M. Dezi (Institut Curie et IMPMP) ; P. Loiseau (IRCP) ; G. Rousse (Sorbonne Université - Collège de France)

**Artistes** : Ada ; Léa Barbazanges ; Vincent Gontier ; Robin Guittat

**Photographies** : Y. Missenard ; C. Ragusa ; Laboratoire PHysico-Chimie des Electrolytes et Nanosystèmes Interfaciaux (PHENIX) ; CNRS Images

**Prêts** : Institut Pasteur ; L'École Normale Supérieure-PSL – Département de Chimie ; Lise-Marie Chamoreau (IPCM) ; J.-P. Mornon (IMPMP) ; J.-C. Boulliard (IMPMP) ; L. Lisnard (IPCM) ; M. et Mme Verdaguer ; association A.M.I.S. ; Entreprise Cristal Laser

**Inventaire et sélection des échantillons** :  
Y. Missenard

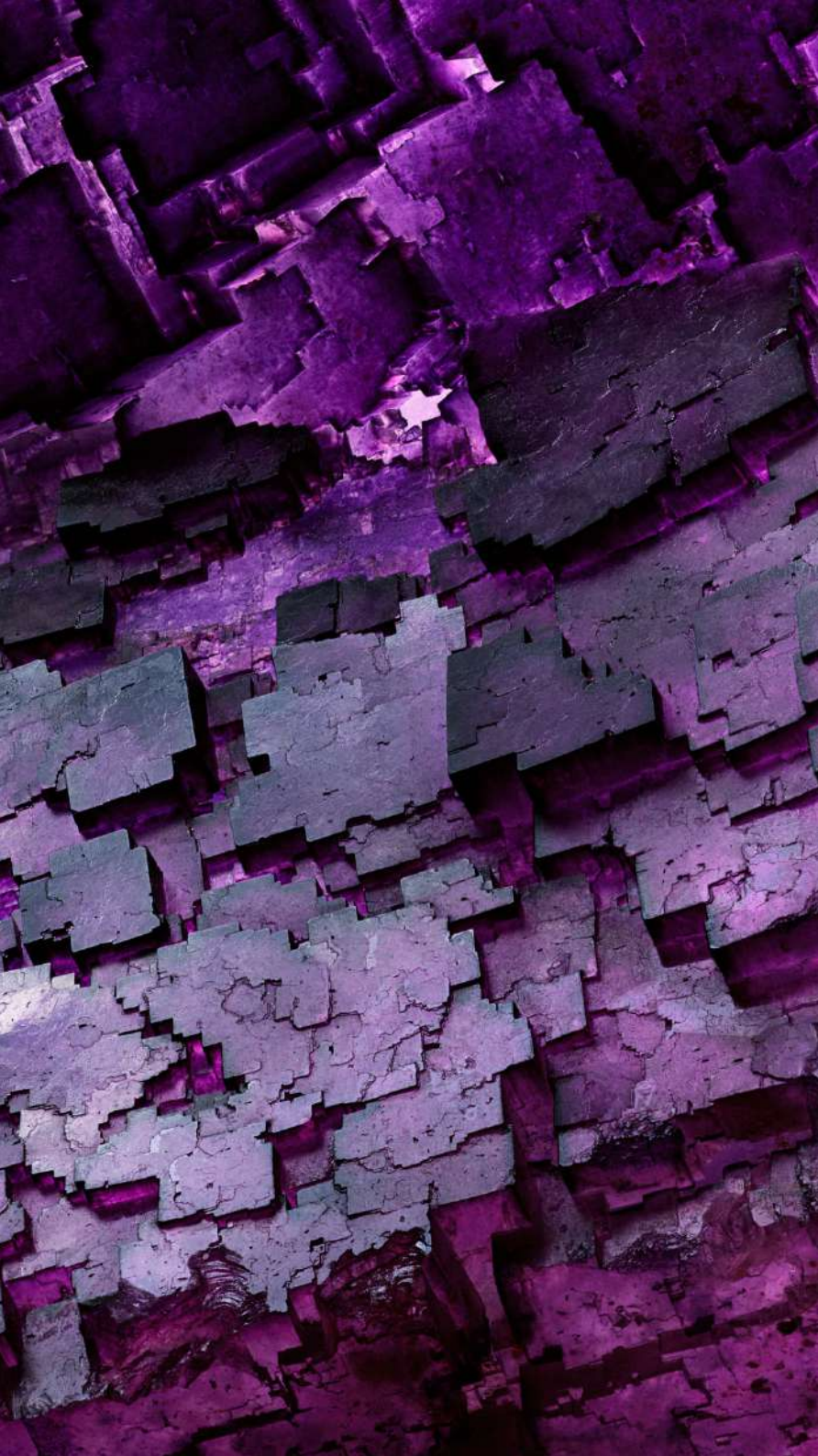
**Communication / graphisme** :  
T. Jacquemier ; N. Thimon

**Médiation** : M. Dezi ; E.-B. Diane ; L. Fort ;  
P. Giura

**Administratif** : F. Gallaire

# Table des matières

<b>Créer le cristal</b>	p.5
<b>Cristal et cristallogenèse</b>	p.6
La cristallisation	p.7
Les premiers cristaux de synthèse	p.9
<b>Entre hasard et nécessité</b>	p.12
Les techniques	p.12
Les autres états du cristal	p.18
<b>Du parfait et de l'imparfait</b>	p.22
L'exemple du laser	p.22
Le cristal pour l'optique non linéaire	p.24
L'énergie et l'inspiration de la nature	p.25
<b>Entre inorganique et organique</b>	p.29
Pasteur et la dissymétrie moléculaire	p.29
Le vivant est chiral	p.33
Cristalliser le vivant	p.36
Le cristal pour comprendre et soigner	p.39
<b>L'art et la synthèse</b>	p.42
Ada	p.42
Vincent Gontier	p.45
Lea Barbazanges	p.48
<b>Conclusion</b>	p.50
<b>Bibliographie</b>	p.51



*Robin Guittat (photographe)  
« Fluorite », 2025  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université  
Photographie*

# Créer le cristal

Le cristal a depuis longtemps fasciné l'humanité. Pour sa perfection, sa beauté, ses caractéristiques physiques ou chimiques, ou bien pour les vertus que l'on en espérait. D'abord trouvé dans la nature sous forme de minéral, d'origine inorganique ou organique, le cristal a fait l'objet de longues recherches. Il connaît aujourd'hui de multiples efforts de synthèse destinés à reproduire les chefs d'œuvre naturels, à créer de nouveaux matériaux et à obtenir des propriétés inédites, répondant aux besoins croissants de la société en matière d'innovations technologiques et de défis environnementaux.

La création du cristal synthétique couvre un domaine immense. Nous vous proposons ici de découvrir quelques facettes de cet univers créatif en constante évolution. Elles sont le reflet d'une brève rencontre entre les sciences et les arts, présentés au terme de l'inventaire de la très riche collection de cristaux de synthèse de la Collection de Minéraux de Sorbonne Université.

L'exposition « Créer le cristal, voyage entre art et science » s'efforce de tisser un dialogue entre les travaux passés et actuels, sur la synthèse cristalline, de physiciens, chimistes et biologistes, et les créations d'artistes contemporains inspirés par la matière, la lumière et le mouvement.

*Vite, vite, ami, partons pour les féériques régions du cristal.  
J'y cours, suis-moi si tu m'aimes.  
George Sand, Laura ou voyage dans le cristal, 2007*

# Cristal et cristallogenèse

« Cristal » est d'abord un mot, riche d'un grand nombre d'interprétations. Le linguiste trouve son origine dans le latin *crystallus* (eau gelée, glace) et le grec ancien *κρύσταλλος* (*krustallos*, glace ou cristal de roche : le quartz). Le minéralogiste l'a d'abord décrit en termes de plans et d'angles entre plans. Le cristallographe y voit un objet parfait, constitué d'un motif qui se répète périodiquement dans un réseau infini, dont le mathématicien s'empare avec la théorie des groupes. Le physicien étudie sa géométrie, ses symétries, ses propriétés (mécaniques, optiques, électriques, magnétiques, quantiques, ...). Le chimiste s'intéresse à sa composition, à sa structure ou au motif à reproduire et à combiner dans le solide. Le biologiste s'efforce de l'obtenir à partir de la matière vivante pour en comprendre le fonctionnement. Le gemmologue y voit une pierre précieuse, à tailler et à facetter. L'industriel le produit massivement pour des applications technologiques.

Tous y voient un objet permettant l'approfondissement de la connaissance de la matière, grâce à des caractérisations structurales et spectroscopiques de plus en plus éclairantes sur la nature profonde du cristal, jusqu'à ses défauts. L'artiste peut y trouver une source d'inspiration pour des créations originales qui



parlent à l'esprit, aux sens et à la raison.

Le mot « cristal », enfin, sait être trompeur. Sur nos tables de fête, ce que l'on nomme « cristal » peut être magnifique. Pourtant il ne s'agit que d'un verre, dont la structure atomique est désordonnée (amorphe). Quant au charlatan, il abuse de la crédulité de ses victimes, pour monnayer des remèdes qui n'en sont pas.

### La cristallisation

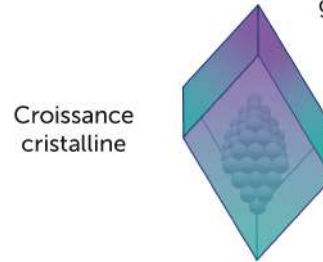
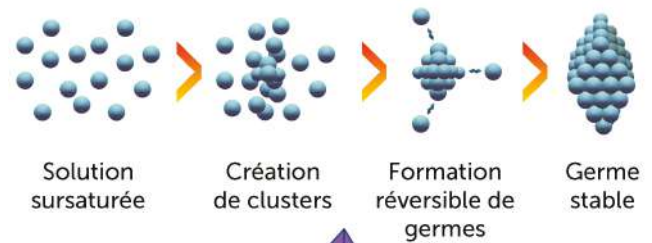
La cristallisation d'une substance correspond au réarrangement d'atomes, d'ions ou de molécules, d'un état désordonné (gazeux, liquide, solide vitreux ou amorphe) à un état solide ordonné sur de grandes distances. Elle requiert de la matière - parmi les 90 éléments stables naturels - du temps, de l'énergie et un environnement adéquat.



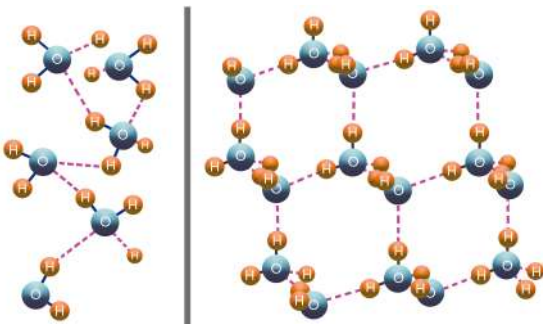
Tableau périodique des éléments  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université

Elle commence par la nucléation (germination) d'un petit amas de matière : le germe, autour duquel s'agrège, se construit et croît le cristal. Elle est nourrie par le milieu, liquide ou gazeux, et peut être spontanée ou induite par un cristal étranger. C'est une transition vers un état stable en énergie.

La science de la cristallisation repose à la fois sur la thermodynamique, capable de dire quel cristal est possible et sur la cinétique qui prévoit de quelle manière et à quelle vitesse le cristal va croître selon des directions ou des orientations privilégiées. De là naissent les merveilleuses formes des cristaux naturels ou de synthèse. Le temps, c'est à dire une vitesse de croissance lente, conditionne la qualité du cristal.



*Processus de cristallisation à partir d'une solution*



*Arrangement moléculaire de l'eau liquide / de l'eau solide (glace)*

### La création de cristaux de glace

Bel exemple d'apparition d'un cristal à partir d'un liquide, en passant simplement sous la température de fusion (0°Celsius). La glace se compose de molécules d'eau (H<sub>2</sub>O), où l'atome d'oxygène est fortement lié à deux atomes d'hydrogène, O-H (liaisons covalentes). L'oxygène d'une molécule établit également des liaisons plus faibles avec les atomes d'hydrogène de deux autres molécules (liaisons hydrogène, O···H) formant ainsi le réseau cristallin tridimensionnel de la glace.



## Les premiers cristaux de synthèse

Avant d'envisager de les fabriquer, il a fallu observer et décrire les cristaux existants, et comprendre leurs processus de formation. Au terme d'un long cheminement expérimental et théorique, l'étude des cristaux change au cours du XVIII<sup>e</sup> siècle grâce au développement des sciences telles que la cristallographie, la physique et la chimie.

### *Les pionniers du cristal*



*Jean-Baptiste Romé de Lisle (1736-1790) décrit le cristal selon ses plans et la constance de ses angles. Il observe les troncutures : premiers « défauts ».*



*Torbern Bergman (1735-1784) montre le rapport constant entre forme géométrique et nature de la substance de grands cristaux.*

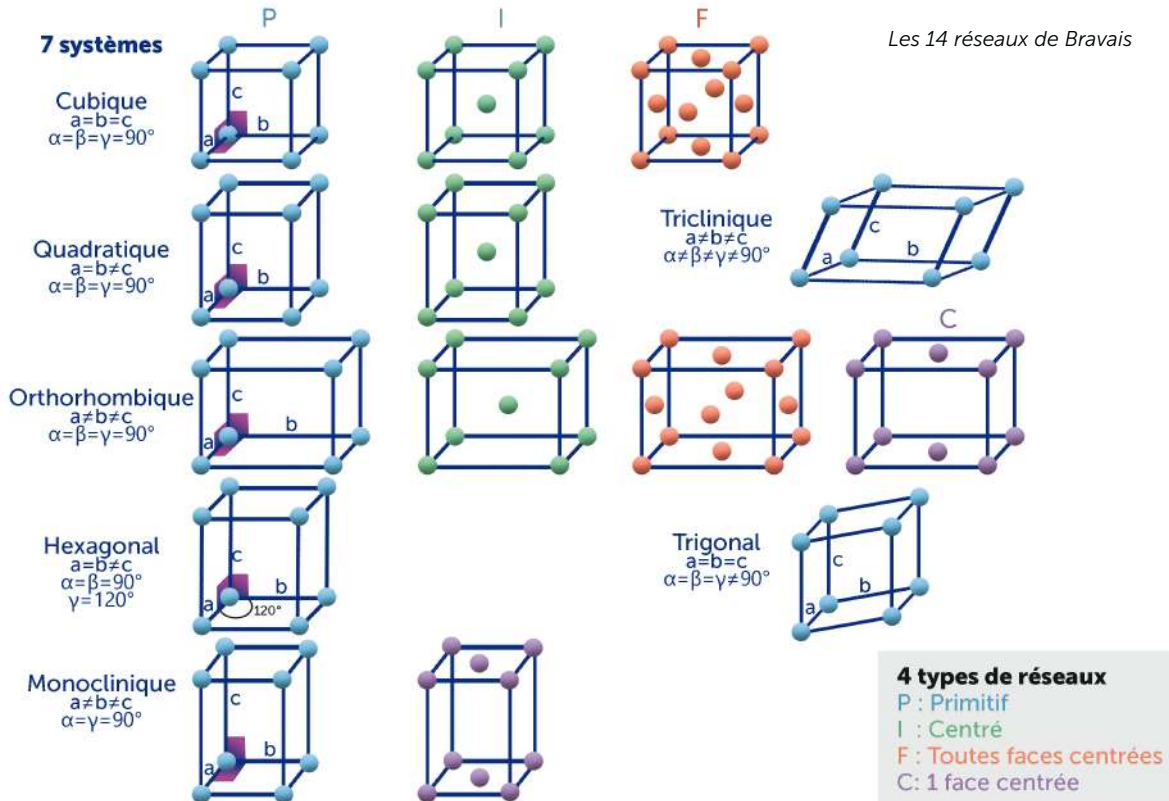


*René-Just Haüy (1743-1822) propose que les cristaux résultent de l'agrégation de solides géométriques élémentaires identiques : « les molécules intégrantes ».*

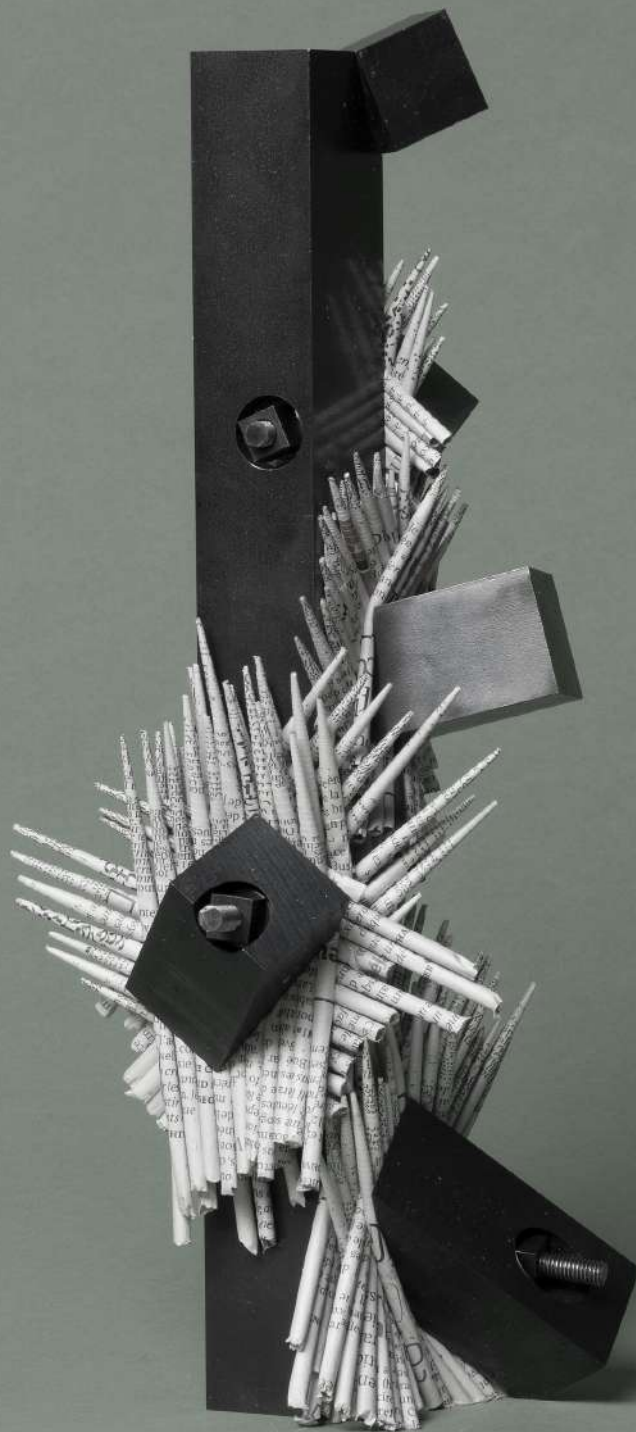


*Gabriel Delafosse (1795-1878) met en évidence la relation entre la composition atomique et la forme cristalline.*

L'approche minéralogique est rapidement complétée par des notions de symétries étudiées par de nombreux physiciens et mathématiciens. Johann Friedrich Christian Hessel (1796-1872) et Auguste Bravais (1811-1863), par exemple, introduisent dans les systèmes cristallins tridimensionnels : les sept systèmes cristallins, les 32 groupes ponctuels de symétrie (où seuls les axes de rotation d'ordre 2, 3, 4 et 6 sont possibles) et les 14 réseaux de Bravais. Stepanovich Fedorov (1853-1919) et Arthur Schoenflies (1853-1928), avec leurs 230 groupes spatiaux possibles, parachèvent l'édifice de la cristallographie moderne.



Vincent Gontier  
« Cristal », 2025  
Assemblage de papier journal  
roulé et acier  
32,4 x 11,5 x 14 cm



# Entre hasard et nécessité

La nécessité, pour le créateur de cristaux synthétiques, est de trouver les meilleures conditions pour obtenir le cristal souhaité, en composition, en taille, en propriétés. Le hasard se manifeste dans les essais successifs, par des résultats divers, parfois éloignés du but visé.

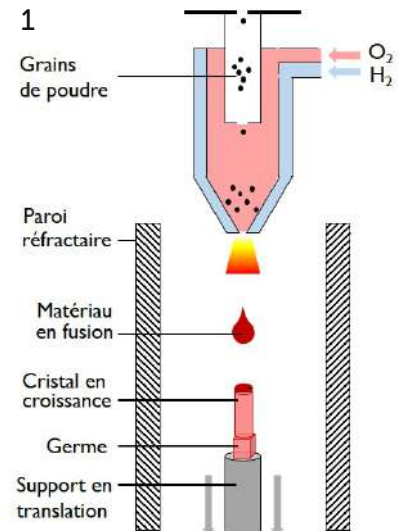
Les conditions de synthèse, la nature des réactifs, la température, la pression, le solvant, sont autant de paramètres, sources de succès ou d'échecs. C'est de leur contrôle et des leçons tirées du hasard que naissent des cristaux de haute qualité, des procédés fiables et des résultats reproductibles.

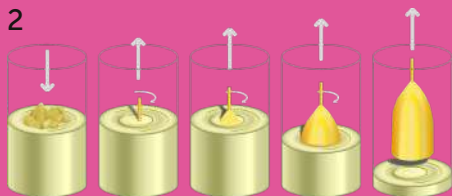
## Les techniques

On utilise principalement le refroidissement lent d'un composé en fusion (1,2,3) ; la croissance à partir d'une solution sursaturée (4, 5) et le dépôt en phase vapeur (6).

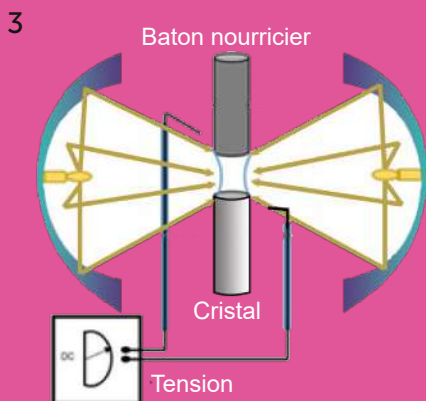
*Le procédé Verneuil est inchangée depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. C'est une technique de fusion à la flamme d'un chalumeau avec laquelle rubis ou saphirs cristallisent sur un germe (1).*

*La méthode Czochralski est très utilisée aujourd'hui pour produire de grands monocristaux. Elle utilise un four hautes températures et un creuset réfractaire très pur (silice, iridium), qui n'interagit pas avec le bain nourricier. On plonge un germe à la surface du bain fondu du composé choisi. Le cristal se développe*

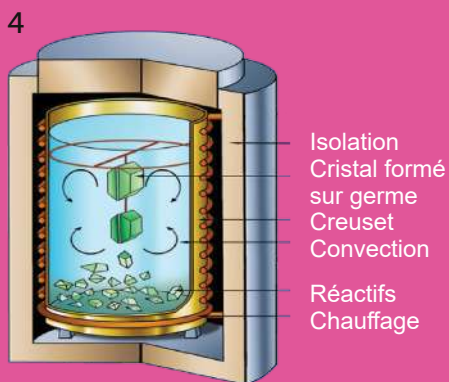




autour du germe, légèrement plus froid, puis est extrait par tirage vers le haut. La vitesse de croissance est contrôlée pour éviter les défauts. Elle est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres par heure. Les creusets sont très coûteux et leur dimension conditionne le diamètre des cristaux formés (2).



La méthode du four à image procède par fusion. Le rayonnement (lampe, laser, soleil) est focalisé par des miroirs sur le matériau qui chauffe et fond. Le cristal se forme par refroidissement lent hors de la zone fondue, alimenté par un bâton nourricier (3).

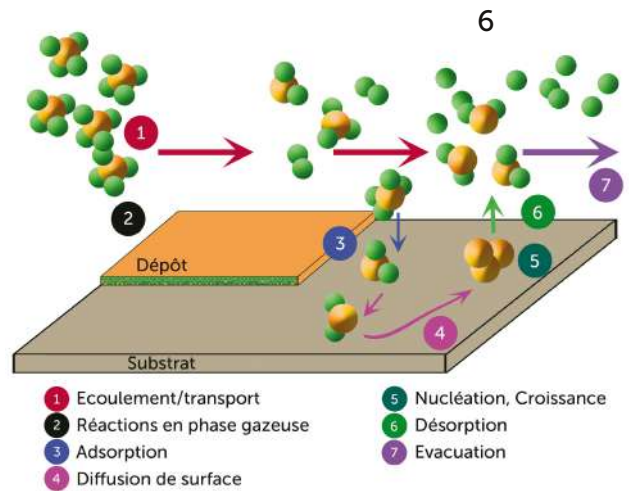


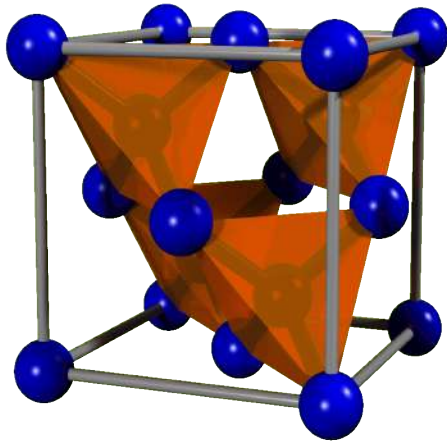
La méthode hydro- ou solvo-thermale nécessite un autoclave en acier, fermé hermétiquement et constitué d'un récipient en téflon, dans lequel sont placés les réactifs. L'ensemble est mis dans une étuve programmable en temps et en température. Les réactifs dissous sont placés dans la partie basse de l'autoclave (corps mère). Le milieu réactionnel subit de très fortes contraintes en température et en pression. La cristallisation s'opère sur le germe placé en partie haute à partir de la solution sursaturée. La méthode est particulièrement employée pour la production de cristaux de quartz et couramment utilisée dans la préparation de nanoparticules ou de matériaux poreux (4).

La méthode en solution sursaturée est utilisée en chimie moléculaire, supramoléculaire ou en biologie. Le cristal désiré se forme, plus ou moins lentement, par précipitation dans une solution sursaturée obtenue en faisant varier les conditions (température, concentration, solvant). Il peut aller de quelques microns à plusieurs centimètres (5).



La méthode par dépôt chimique en phase vapeur permet de réaliser des matériaux de haute performance pour des dispositifs électroniques. A l'échelle atomique ou moléculaire, les réactifs gazeux se déposent sur un substrat, formant une couche mince de quelques nanomètres. Le matériau souhaité cristallise à partir des sites de croissance selon la pression, la température et la concentration des réactifs (6).



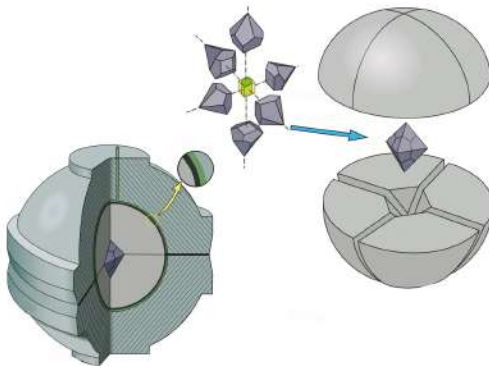


Structure atomique du diamant

### Le diamant

Son nom vient du grec *ἀδάμας* / *adámas* (indomptable), qui traduit ses propriétés stupéfiantes. Lavoisier (1743-1794) a montré que le diamant est combustible, grâce au miroir ardent de l'Académie Royale des Sciences. C'est Guyton de Morveau (1737-1813) qui a établi que le diamant est du carbone pur.

Le carbone y est lié à quatre voisins. Il est tétraédrique et forme un réseau cubique à faces centrées. La température de fusion est  $T_{\text{fusion}} = 3547^{\circ}\text{C}$ , à l'abri de l'air. Son fort pouvoir réflecteur (indice de réfraction : 2,42) lui donne un éclat unique. Il est le plus dur des cristaux connus. C'est un isolant électrique dont les propriétés mécaniques, optiques, thermiques et électroniques inégalées sont très utilisées en milieu industriel.



Presse HPHT

Le diamant se forme à partir du graphite à hautes températures et pressions. Les premières synthèses ont abouties en 1954 avec le physico-chimiste américain, T. Hall (1919-2008), après de longs efforts scientifiques et industriels. Aujourd'hui les méthodes Haute Pression Haute Température (HPHT) et Dépôt en Phase Vapeur (CVD) permettent d'obtenir des diamants de très haute qualité.

Pour le CDV, la réaction se produit dans un réacteur où un flux gazeux de dihydrogène et

de méthane lèche des substrats de diamant. Une excitation microondes crée localement un plasma et déclenche les réactions de dépôt du diamant sur les germes. Les impuretés d'azote les colorent en orange, celles de bore en bleu. Ces centres colorés sont à éviter si l'on souhaite une pierre précieuse incolore. Au contraire, des dopants volontairement introduits permettent d'obtenir des défauts localisés. De l'ammoniaque en très faible quantité dans le flux gazeux génère des paires azote-lacune (ou centres NV) au sein du diamant, qui sont des objets quantiques originaux très étudiés. Leurs propriétés magnétiques en font de bons candidats pour des « bits quantiques » (qubits), possibles éléments d'un futur ordinateur quantique.



*Diamants de synthèse  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*



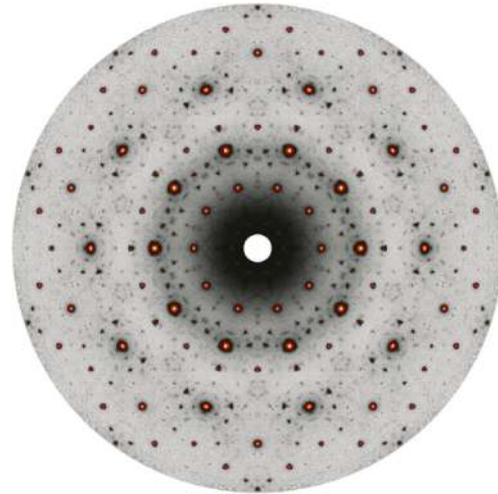
### Les autres états du cristal

Les cristaux existent sous diverses formes : du monocristal de grande taille à la poudre micro cristalline et de la couche mince à la particule nanométrique. Leur structure atomique (disposition des atomes qui les composent) est périodique et parfaitement organisée. Chaque cristal possède donc un système cristallin propre, régie par des règles de symétrie strictes de type 2, 3, 4 ou 6. Cependant, de nouvelles techniques de caractérisation ont mené à des découvertes étonnantes.

### Les quasi-cristaux

Le premier cliché de diffraction d'ordre 5 est produit en 1982, par Dan Shechtman (1941-) et ses collègues, à partir de solides dont la structure ordonnée n'est pas périodique : les quasi-cristaux.

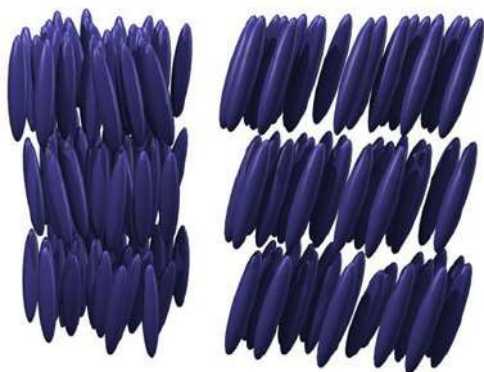
C'est en refroidissant un alliage d'aluminium et de manganèse ultra-rapidement (un million de degré par minute) que Shechtman obtient de petits rubans contenant des grains de quasi-cristal de quelques micromètres dispersés dans une matrice d'aluminium. Les clichés de diffraction révèlent la présence de pics disposés selon une géométrie pentagonale. La découverte de cette organisation - en symétrie 5 - considérée jusqu'alors comme impossible, est une notable révolution en cristallographie. Elle a profondément modifié la compréhens-



*Cliché de diffraction de l'icosaédrite  
Quasicristal (i-AlCuFe) naturel de la météorite  
de Khatyrka, M. de Boissieu*



*Pavage dodécagonal  
Logiciel Tiling - Denis Gratias*



*Constitués de molécules organiques de forme allongée, les cristaux liquides s'organisent dans l'espace grâce à des interactions faibles (liaison hydrogène ou de van der Waals) sensibles à la température et aux champs électrique ou magnétique.*

sion de la structure cristalline et de l'ordre dans les solides (Prix Nobel 2011).

### **Les cristaux liquides**

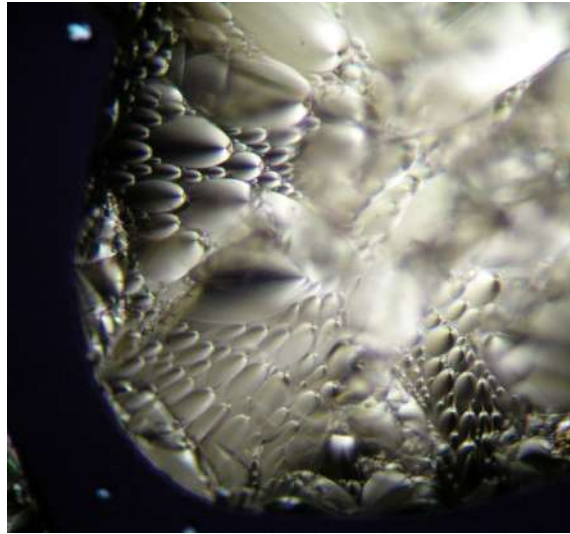
Découverts par le botaniste autrichien Friedrich Reinitzer (1857-1927), les cristaux liquides (dit mésomorphes) présentent un état de la matière étonnant : entre solide cristallin et liquide.

En 1888, Reinitzer observe qu'un dérivé du cholestérol (benzoate de cholestéryle) extrait de la racine de la carotte présente deux points de fusion : les cristaux fondent en un liquide laiteux à 145,5°C, qui devient clair à 178,5°C. Le phénomène, réversible et nouveau, contredit les connaissances de l'époque sur les cristaux qui perdent « normalement » solidité et couleur à une seule et même température.

Georges Friedel (1865-1933), chimiste et physicien, étudie également ce phénomène. Il regrette l'appellation ambiguë de « cristal liquide » et classe cet état original de la matière, comme des

phases intermédiaires (mésophases), entre le liquide et la matière organisée. Les cristaux liquides sont des fluides anisotropes facilement orientés par des champs externes, électriques ou magnétiques ou par des surfaces. Cette propriété est utilisée dans des dispositifs d'affichage.

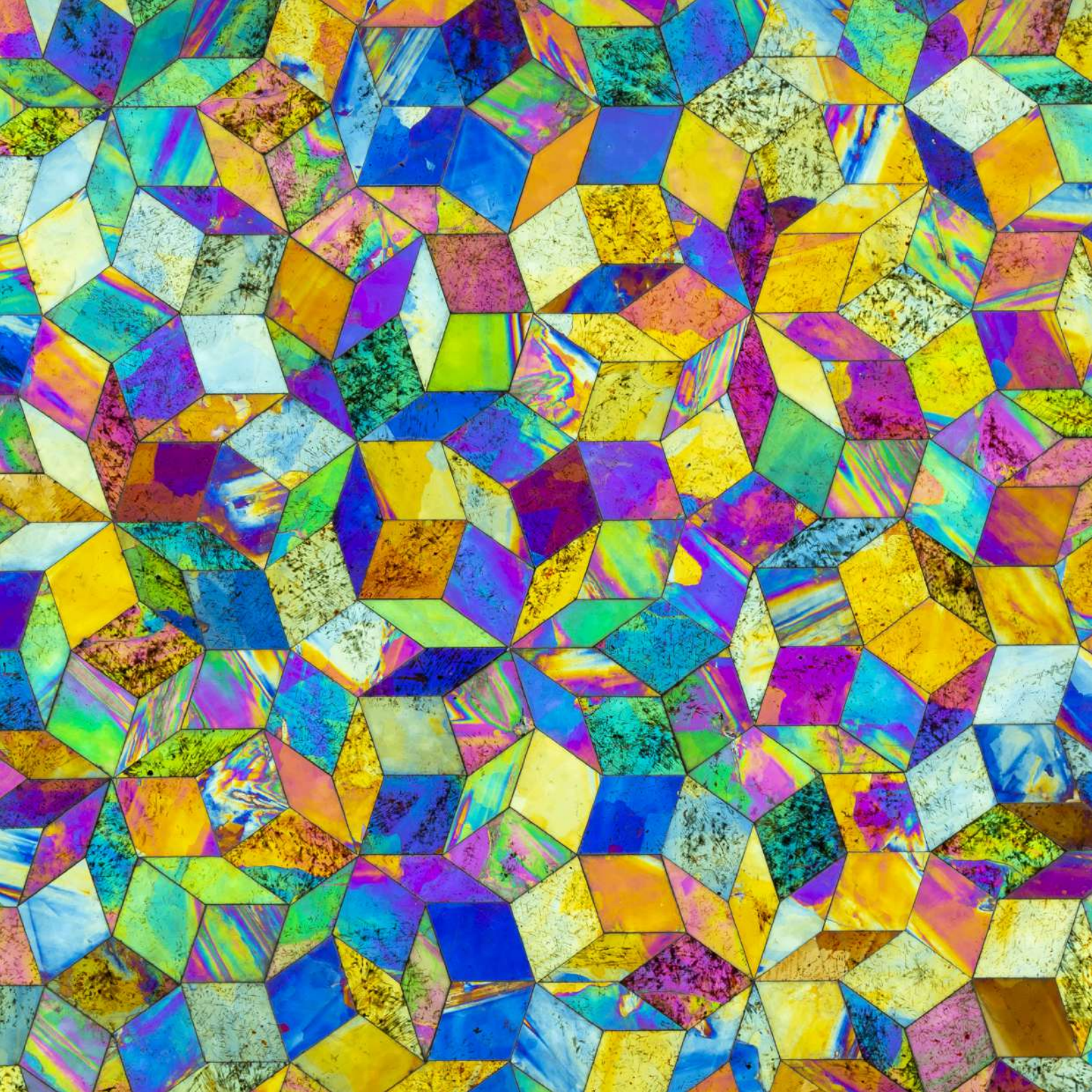
Dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, de grands efforts de recherche sont menés, par exemple par les équipes de Pierre Gilles de Gennes (1932-2007), Prix Nobel en 1991 pour ses travaux sur les cristaux liquides et les polymères. Ces études ouvrent d'immenses perspectives d'applications, notamment dans le domaine des matériaux biomimétiques et de la médecine régénérative.



*Cristaux liquides  
Texture d'une phase smectique A*

*(Ci-contre) Léa Barbazanges  
« MicaPenrose », 2019  
Mica rétroéclairé, verre, alliage d'aluminium  
62 x 62 cm  
Réalisé en collaboration avec Sylvain Ravy (CNRS,  
Université Paris-Saclay) avec le soutien de la Diagonale  
Paris-Saclay, la Région Grand Est et l'expertise de Denis  
Gratias (CNRS, IRCP).*

*Les formes géométriques qui structurent l'œuvre  
proviennent du pavage de symétrie 5 dessiné par le  
mathématicien Roger Penrose. Ce pavage permet de  
modéliser la structure de certains alliages d'aluminium  
quasi-cristallins.*



# Du parfait et de l'imparfait

Le cristal parfait est recherché pour sa pureté, son éclat, son homogénéité ou ses propriétés physico-chimiques. La symétrie, l'environnement de ses atomes, la structure électronique doivent être parfaitement définis. Pourtant, le cristal parfait n'existe pas.

Celui produit par la nature recèle de nombreuses imperfections. La synthèse permet de les limiter au maximum ou au moins de les maîtriser. De nombreuses applications requièrent en effet la présence de défauts au sein du cristal, sous forme de dopants. Ces derniers ne peuvent occuper que quelques sites bien définis et permettent de donner au matériau une propriété précise.

## L'exemple du laser

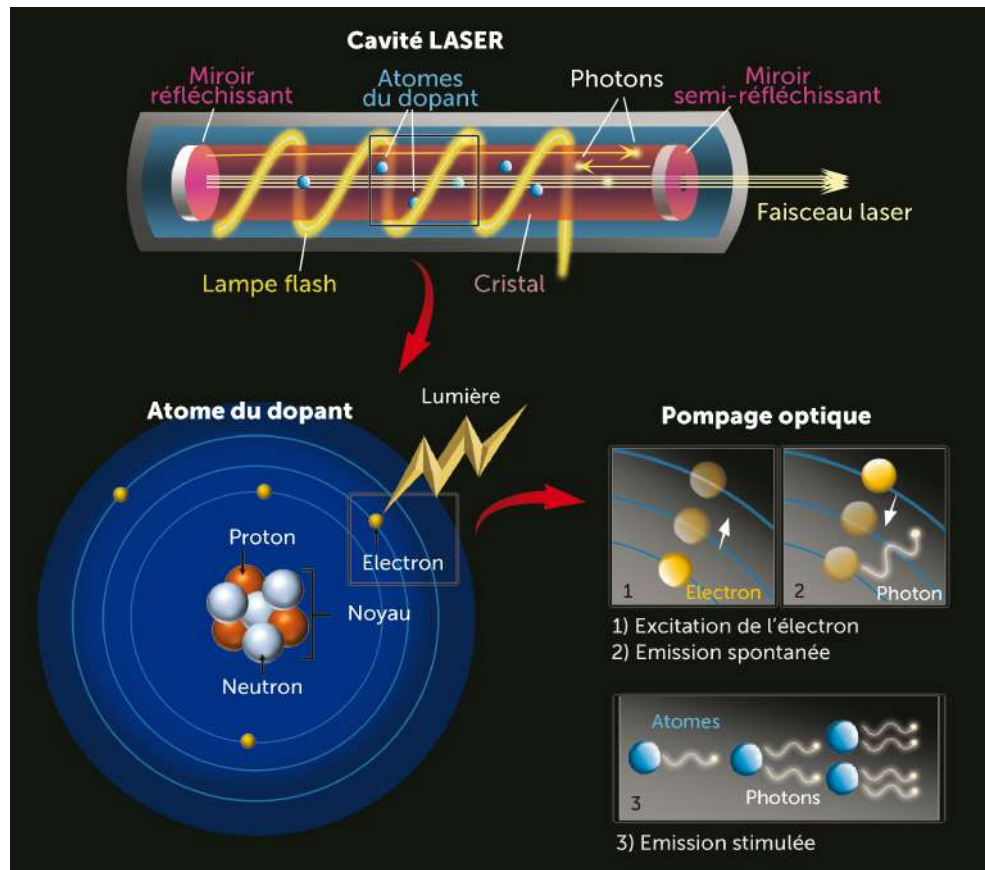
Le rubis (corindon dopé au chrome  $\text{Cr}^{3+}$ ) permet en 1960, à Théodore Maiman (1927-2007) de découvrir le laser. Un laser (amplification de la lumière par émission stimulée de radiation) est un dispositif qui produit un faisceau de lumière cohérente, où les photons ont tous la même longueur d'onde et se déplacent en phase dans la même direction.

Dans un cristal, cette émission peut typiquement provenir d'une impureté luminescente (dopant) qui aura été préalablement excitée par une autre source de lumière (pompage optique). En piégeant partiellement l'émission du dopant entre 2 miroirs (cavité laser), un clonage de ces photons survient lorsqu'ils repassent dans le cristal (émission stimulée). Il en résulte une « réaction en chaîne » et une



amplification de l'intensité lumineuse. Une partie de la lumière piégée dans la cavité laser sort du dispositif en utilisant un miroir avec quelques pourcents de transmission : c'est le faisceau laser.

Rapidement, le laser rubis laisse place à d'autres matrices et à d'autres dopants plus performants, en particulier le grenat d'yttrium et d'aluminium (YAG,  $Y_3Al_5O_{12}$ ), dopé aux lanthanides (terres rares), comme le néodyme (Nd-YAG), l'ytterbium ou l'erbium.



### Le YAG (Grenat d'Aluminium et d'Yttrium)

Synthétisés à haute température (1980°C), les YAG sont dopés avec le néodyme (Nd-YAG, émission dans l'infrarouge à 1064nm), l'ytterbium (Yb-YAG, émission dans l'infrarouge à 1030 nm), ou l'erbium (Er-YAG, émission dans l'infrarouge à 2940nm).

Plus la qualité du cristal est grande, plus les sites émetteurs sont identiques et plus la lumière laser est monochromatique. Au contraire, une cavité laser en verre (amorphe), produira une lumière polychromatique, utile pour les lasers de fortes énergies (laser MegaJoule).



*Cristal de YAG  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université*

Les applications des lasers sont aujourd'hui innombrables et omniprésentes : stockage et lecture optique de l'information (CD, DVD), dermatologie, ophtalmologie, biologie, découpe et usinage, télémétrie, projection à longue distance, télécommunication optique, fusion nucléaire, ...

### Le cristal pour l'optique non linéaire

L'intérêt de la lumière laser est encore accru par la possibilité de la modifier. En effet, lorsqu'une lumière très intense traverse un milieu transparent, la réponse du matériau peut être non linéaire par rapport au champ électrique de l'onde électromagnétique. Le phénomène se manifeste de nombreuses façons : modification de la fréquence ou de la phase de la lumière ; interaction de deux ondes au sein du matériau ; ...

La génération d'une fréquence double (*second harmonic generation, SHG*) a été mise en évidence grâce à l'intensité de la lumière laser, un an

après son apparition. C'est l'une des applications les plus répandues. Par exemple, la lumière du laser Nd-YAG (1064nm, énergie, 1,16 électron-volt - eV) est transformée en lumière visible verte (532nm, énergie, 2,33 eV) par un doubleur de fréquence et en lumière ultra-violette (355nm, énergie, 3,49 eV) par un tripleur de fréquence. Elle nécessite des cristaux de très grande pureté, très transparents, de grande stabilité thermique, faciles à tailler et à mettre en forme pour insertion dans des montages optiques complexes. Ces cristaux sont rares. Le triborate de lithium ( $\text{LiBO}_3$ , LBO), le phosphate de potassium et de titanyle ( $\text{KTiOPO}_4$ , KTP) ou l'arséniat voisin ( $\text{KTiOAsO}_4$ , KTA) sont les plus courants. Leur synthèse par méthode hydrothermale contraste avec la méthode Czochralski utilisée pour le YAG.

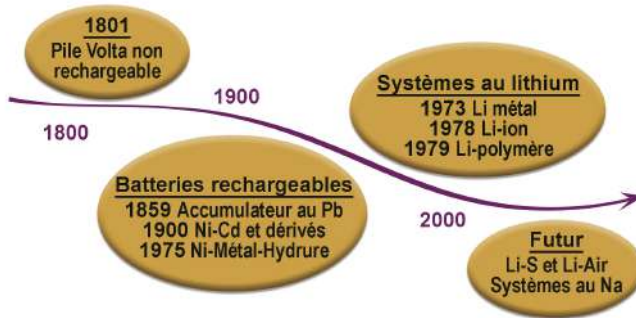
Ces matériaux de haute performance, utilisés par exemple pour les missions spatiales Curiosity (2012) et Perseverance (2021), doivent être particulièrement fiables et durables. Les cristaux doubleurs de fréquence sont utilisés, par exemple, pour le laser MégaJoule destiné à créer de très hautes températures et pressions en vue de la fusion thermonucléaire.

### **L'énergie et l'inspiration de la nature**

La recherche d'une énergie quasi illimitée, comme celle générée par notre étoile, est née à la fin de la Seconde Guerre mondiale. Comme toutes innovations humaines, elle s'inspire et s'appuie sur les ressources naturelles qui nous entourent. La recherche s'accompagne donc aujourd'hui d'une réflexion nécessaire sur la disponibilité et la gestion responsable de ces ressources.

L'essor des énergies renouvelables et de la mobilité électrique appelle des solutions de stockage performantes. Pour relever ce défi, le chimiste

du solide conçoit de nouveaux matériaux, souvent inspirés des minéraux, afin de répondre aux exigences en matière de performances et de respect de l'environnement.



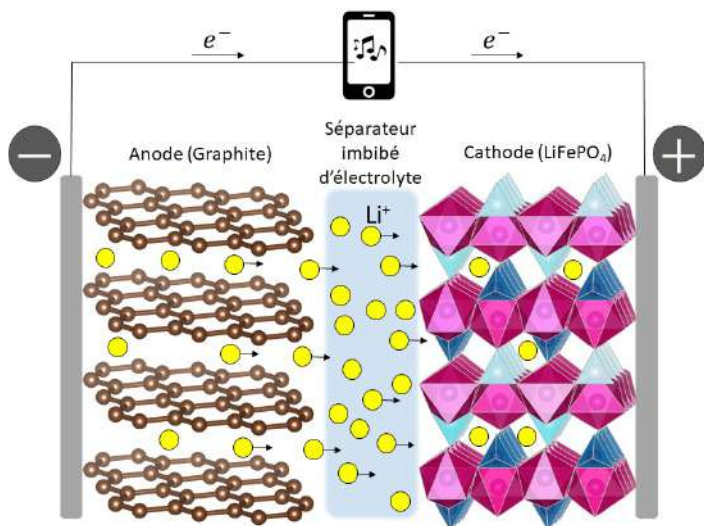
Frise chronologique de l'invention des différents systèmes de batteries, d'après Marine Cognet et Michaël Carboni, 2017.

Les premiers dispositifs permettant de stocker l'énergie électrique sous forme chimique ont été créés en 1801. Il s'agit de piles ou de systèmes primaires non rechargeables, tels que la pile Volta. Ces systèmes se sont considérablement diversifiés par la suite dans le but d'améliorer la densité d'énergie stockée (quantité d'énergie) et leur durée de vie (cyclabilité), c'est-à-dire le nombre moyen de cycle charge/décharge qu'ils peuvent effectuer.

Plus de cinquante ans après leur invention et leur commercialisation, il devient de plus en plus évident que les batteries au lithium ont transformé notre quotidien et qu'elles sont appelées à révolutionner l'avenir. Elles se caractérisent par leur densité d'énergie, dictée par le choix des matériaux d'électrode.

### Les batteries Lithium-ion (Li-ion)

Le fonctionnement des batteries Lithium-ion (Li-ion), par exemple, repose sur une réaction électrochimique et sur le déplacement des ions  $\text{Li}^+$  entre deux électrodes, situées de part et d'autre d'un séparateur perméable aux ions et imbibé d'électrolyte.



Batterie Li-ion en fonctionnement (décharge)

*Spodumène, Afghanistan,  
Coll. de Minéraux,  
Sorbonne Université*



La cathode (électrode positive) est généralement constituée d'oxydes lamellaires de cobalt, de nickel et de manganèse, dont la structure est dérivée de celle des halites (sel gemme). D'autres composés peuvent être employés, comme le phosphate de fer et de lithium ( $\text{LiFePO}_4$ ), inspiré du minéral triphylite à structure olivine.

L'anode (électrode négative) est souvent composée de graphite, capable d'intercaler les ions  $\text{Li}^+$  entre ses couches.

Lors de la décharge, les ions  $\text{Li}^+$  migrent de l'anode vers la cathode, pendant que les électrons circulent dans le circuit externe, libérant l'énergie stockée. Le processus s'inverse lors de la charge.

Le lithium est extrait de salins ou de minéraux comme le spodumène et la lépidolite. Les scientifiques explorent des alternatives au lithium, notamment le sodium (Na, présent dans le sel de table), pour développer des batteries sodium-ion, bien que leur densité d'énergie soit inférieure.





ADA  
« Modulo 2 », 2025  
Brique, alun de potassium  
16 x 16,8 x 6,5 cm

# Entre inorganique et organique

La synthèse cristalline constitue un domaine de recherche particulièrement vaste. Elle intègre les composés inorganiques et, à l'instar des minéraux naturels, des composés organiques. En chimie organique notamment, l'observation des cristaux a mis en évidence des phénomènes structuraux tels que la chiralité. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de Louis Pasteur, dont les recherches ont marqué un tournant majeur dans l'histoire de la chimie du minéral et dans la compréhension du vivant.



Charles Lebayle  
« Portrait de Louis Pasteur à l'Ecole  
Normale Supérieure (ENS) », c. 1844  
Dessin  
Coll. Musée Pasteur

## Pasteur et la dissymétrie moléculaire

Louis Pasteur (1822-1895) est bien connu pour ses découvertes pionnières sur les fermentations, les micro-organismes, la pasteurisation et les vaccins. On retient moins souvent son travail de thèse en cristallographie, chimie, physique et son étude sur les tartrates.

Elève de l'Ecole Normale Supérieure (ENS) puis agrégé-préparateur, Pasteur est plongé dans l'effervescence scientifique du début du XIX<sup>e</sup> siècle et dans une dynamique de recherche, aux côtés de maîtres comme Gabriel Delafosse, disciple de René-Just Haüy, et de son collègue chimiste, Augustin Laurent (1807-1854), partisan

de la théorie atomique et pionnier de la chimie organique.

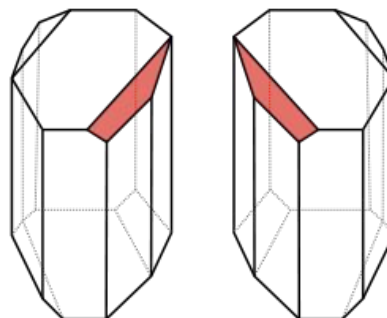
Pasteur cherche à comprendre pourquoi le tartrate fait tourner la lumière polarisée à droite contrairement au paratartrate, inactif. Les deux sont d'origine naturelle (le vin).

Le phénomène a déjà été étudié par des chimistes comme E. Mitscherlich (1774-1863) ou par des physiciens comme J.B. Biot (1774-1866), directeur de thèse de Pasteur, inventeur d'un polarimètre qui permet de mesurer la rotation de la lumière polarisée de solutions. Pasteur réalise la synthèse cristalline des deux composés, examine les cristaux du paratartrate au microscope et observe des anomalies de symétrie (hémiédries) analogues à celles du quartz. Il sépare les cristaux manuellement, les dissout et montre que les solutions font dévier la lumière polarisée à droite pour les uns et à gauche pour les autres. C'est lui le premier qui relie les hémiédries des cristaux de tartrates à leurs propriétés rotatoires et à la composition chimique.

Ce dédoublement des espèces main droite-main gauche est rare et exceptionnel. Mais la « dissymétrie moléculaire » est née.



Hermann Vogel (1856-1918)  
« Biot au microscope vérifiant les travaux de  
Pasteur »  
Coll. Musée Pasteur



Formes droite et gauche de l'acide tartrique



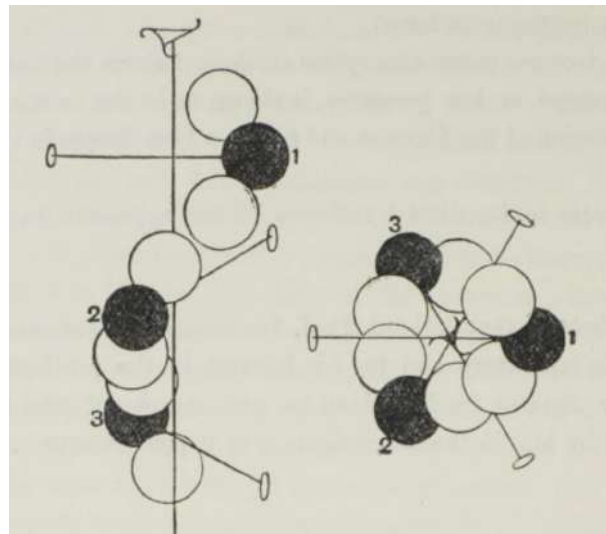
Quartz de synthèse  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université

Structure cristalline du quartz  
d'après W. Bragg et R. E. Gibbs, 1925

### Hémiédrie du quartz

L'étude du quartz cristallin a jalonné les étapes importantes de la science du cristal, de Steno et Romé à Bragg. Le quartz existe sous diverses formes : il est  $\alpha$ , à la température ambiante (système cristallin trigonal),  $\beta$  au-dessus de  $573^{\circ}\text{C}$  (système cristallin hexagonal, plus symétrique).

Le quartz est formé de chaînes d'entités  $\text{SiO}_4$  tétraédriques qui peuvent s'enrouler en hélices dans le sens horaire ou anti-horaire : les cristaux présentent des hémiédries main droite-main gauche. Le quartz est donc polymorphe et chiral. Cette propriété lui permet d'entrer dans le monde des groupes d'espace grâce aux notations  $P3_121$  (quartz gauche) ou  $P3_221$  (quartz droit) ( $P$  pour primitif, 3 pour axe d'ordre 3).





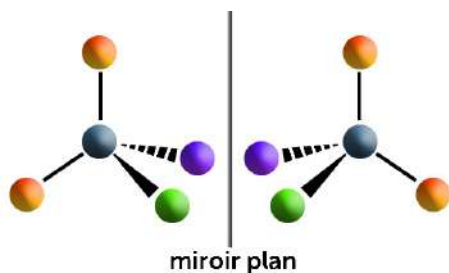
Vincent Gontier  
« Chiral 1 & 2 », 2025  
Papier journal découpé et inox

## Le vivant est chiral

Pasteur découvre que de nombreuses espèces d'origine naturelle sont dissymétriques. Il s'en sert pour dédoubler les tartrates (droite et gauche) en les combinant avec d'autres substances comme la cinchonine. En augmentant la température, il obtient l'effet inverse du dédoublément : la racémisation (retour au mélange des deux formes). Cela vaudra au



Echantillons de tartrates d'ammonium  
Laboratoire de Chimie organique, 1848-58  
Coll. Minéraux, Sorbonne Université



Carbone asymétrique

paratartrique le nom de *racémique*. Dans ses travaux ultérieurs, notamment sur les fermentations, Pasteur met en évidence que seules certaines espèces naturelles vivantes, douées de pouvoir rotatoire, permettent ces réactions. L'idée avance : le vivant est chiral.

C'est bien plus tard, en 1874, qu'Achille Le Bel (1847-1930) et Jacobus H. Van't Hoff (1852-1911) - premier Prix Nobel de Chimie en 1901 - révèlent simultanément, mais avec des approches très différentes, l'origine stéréochimique du phénomène, c'est à dire lié à l'arrangement spatial des atomes : un carbone asymétrique. Lord Kelvin (1824-1907) propose d'appeler ce phénomène chiralité (du grec *chiros*, main).

La chiralité, découverte par Pasteur, est bien omniprésente dans le vivant.

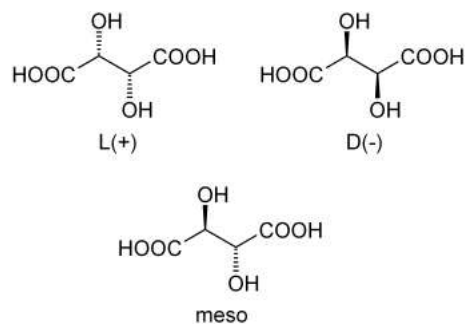
Louis Pasteur était familier et friand de polémiques scientifiques. Il a été porté aux

nues et il a souvent été décrié. Ses détracteurs affirment qu'il aurait eu beaucoup de chance à l'occasion de son travail minutieux sur les tartrates. Il a lui-même répondu que « dans les champs de l'observation, le hasard ne favorise que les esprits préparés ».

Pasteur, agrégé-préparateur, était donc bien préparé. Il a choisi le bon sujet : pourquoi des composés très semblables chimiquement ont des propriétés si différentes ? et le bon système : les tartrates cristallisent facilement à la température ambiante.

Avec l'acide tartrique, il s'est heurté à forte partie dans un contexte scientifique où atomes et molécules font l'objet de vives discussions. Nous savons aujourd'hui que l'acide tartrique a pour formule  $\text{COOH-CHOH-CHOH-COOH}$  et que deux de ses atomes de carbone peuvent être asymétriques.

Les judicieuses synthèses cristallines de Pasteur des sels de l'acide tartrique, constituent un premier pas décisif vers la chiralité du vivant.

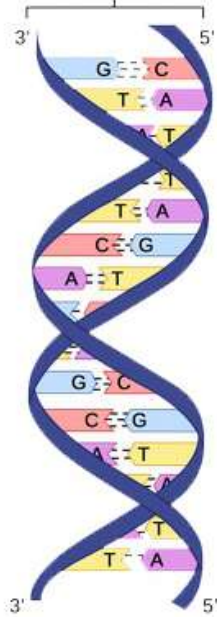


*Formes gauche, droite et méso de l'acide tartrique*



*Le sel de Seignette, découvert et exploité par le pharmacien Elie Seignette (1632–1698) et sa famille à la Rochelle, est un tartrate double de sodium et de potassium. Il est aujourd'hui utilisé comme additif alimentaire (antioxydant E447). Coll. ENS-PSL*

### ADN à double hélice



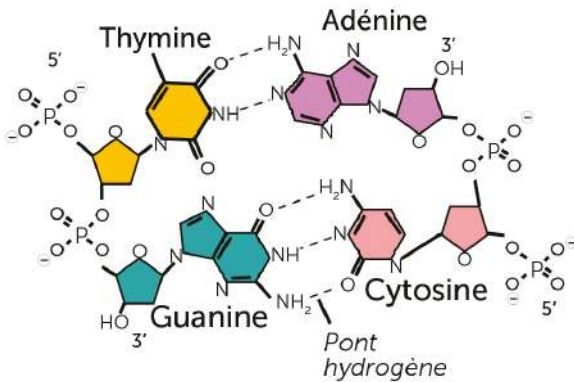
### L'exemple de l'ADN (acide désoxyribonucléique)

Les macromolécules biologiques que sont les acides nucléiques (ADN et ARN) et les protéines sont des polymères linéaires résultant de l'assemblage - par des liaisons covalentes - d'un grand nombre de motifs de base chiraux, appelés respectivement nucléotides et acides aminés.

Si l'ADN contient toute l'information génétique essentielle au fonctionnement et à la reproduction du vivant, l'ARN en est le support intermédiaire pour synthétiser les protéines qui assurent une multitude de fonctions au sein des organismes. Les fonctions de ces macromolécules sont cependant intimement liées à l'organisation dans l'espace (structure tridimensionnelle ou 3D) du polymère stabilisé par un ensemble de liaisons très majoritairement non covalentes.

Structure de l'ADN

### Nucléotides



Vincent Gontier

« ADN », 2025

Papier journal découpé et acier

7,5 x 33,4 x 7,2 cm



## Cristalliser le vivant

Obtenir des cristaux de macromolécules nécessite de les produire en grande quantité, de les purifier puis d'induire leur cristallisation dans des plaques spécialement conçues. Les conditions sont empiriques et les paramètres optimaux sont validés généralement en suivant la formation de cristaux avec un simple microscope.

Avant les années 80, la production de protéines était souvent laborieuse, nécessitant leur purification à partir de tissus ou d'organes. Ainsi, les premières protéines à avoir été cristallisées, la myoglobine et l'insuline ont été respectivement extraites de muscles de cachalot et de pancréas de chien ou de bœuf.

Aujourd'hui, la technologie de production de protéines recombinantes obtenues par transformation génétique de cellules ou d'organismes (par exemple la bactérie *Escherichia coli*) permet beaucoup plus aisément de faire exprimer une protéine d'intérêt en grosses quantités (on parle d'expression hétérologue).

### 1934

John D. Bernal & Dorothy Crowfoot Hodgkin  
Nobel de chimie (1964)  
Observent que les cristaux de protéine (pepsine) produisent des **motifs caractéristiques par diffraction des rayons X**, renseignant sur la position des atomes et donc sur la structure de l'objet étudié.

### 1938

Florence Bell & William Astbury  
Réalisent les **premières images de diffraction d'un ADN** de thymus de veau.

### 1952

Raymond Gosling & Rosalind Franklin  
Conceptualisent la **structure hélicoïdale de l'ADN**.

### 1953

James D. Watson & Francis Crick  
Prix Nobel de médecine (1962)  
Découvrent la **structure de la double hélice d'ADN**, expliquant comment l'information génétique est enregistrée au sein d'une molécule et transmise d'une molécule à l'autre.

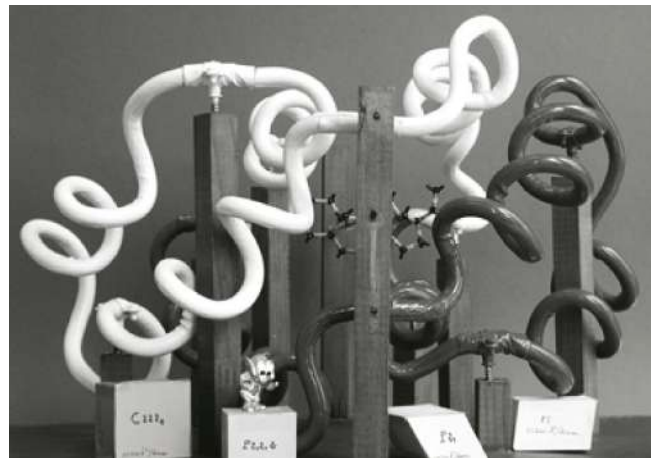
### 1958-1959

Max F. Perutz & John Kendrew  
Prix Nobel de chimie (1962)  
Décrivent la **structure cristallographique** de l'hémoglobine et de la myoglobine, deux protéines spécialisées dans le transport de l'oxygène

A l'époque de la résolution des premières structures de protéines, les premiers modèles étaient construits à la main sur des tiges d'acier ou en utilisant des câbles (exemple de l'utéroglobine, protéine dont la structure a été résolue au laboratoire de Minéralogie Cristallographie de Paris en 1977). Dès les années 80, des logiciels ont été développés, permettant de visualiser ces structures à partir des coordonnées de leurs atomes sur écrans graphiques.

Les structures de protéines (ou parties de protéines) étudiées par cristallographie sont des objets compacts, organisés autour de cœurs hydrophobes. Aujourd'hui, ce sont plus de 175 000 structures de protéines qui ont été résolues par cristallographie (source RCSB *Protein Data Bank*), dont un peu plus de 88 000 structures uniques (séquences en acides aminés à au moins 95% identiques). Ces structures se groupent en un nombre restreint de familles au sein desquelles les protéines sont liées par des relations évolutives (ancêtre commun).

*Modèle filaire du dimère de la protéine utéroglobine de lapin (PDB 1UTG), 1979. Les différentes formes cristallines observées (P21, P21212, C2221) ont permis de résoudre la structure tridimensionnelle (3D) de cette protéine. Le fil représente la chaîne polypeptidique (enchaînement linéaire des acides aminés constituant la protéine), formant des structures régulières (hélices) connectées entre elles par des régions de boucles.*



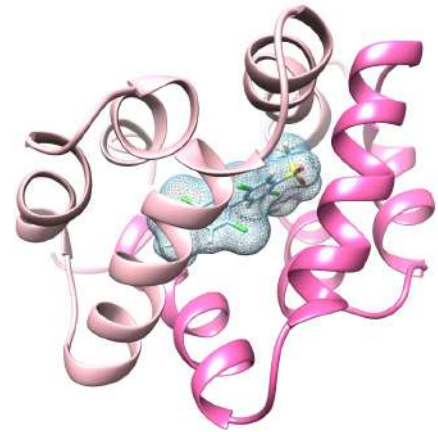
### Mieux connaître l'utéroglobine

L'utéroglobine est une protéine de la famille des sécrétoglobines, que l'on retrouve dans différents épithéliums, en particulier dans les voies respiratoires et dans les sécrétions de l'endomètre utérin et de la prostate. Son rôle principal est de lier et de séquestrer des molécules hydrophobes : médiateurs de l'inflammation (prostaglandines, phospholipase A2, ...) ; hormones stéroïdes (progestérone, ...) ; métabolites polluants (polychlorobiphényles-PCB), etc.

Elle constitue un biomarqueur intéressant pour le suivi de pathologies pulmonaires (asthme, bronchopneumonie chronique obstructive (BPCO), mucoviscidose, ...) et présente un intérêt thérapeutique notamment en raison de ses propriétés anti-inflammatoires.

Sa structure réunit deux unités identiques qui s'assemblent en un dimère, dans lequel un ligand peut occuper une cavité hydrophobe interne. Les mécanismes régissant l'accès à cette cavité ont fait l'objet de multiples investigations.

La structure du dimère « utéroglobine » est adoptée par d'autres protéines de la famille des sécrétoglobines, comme le Fel d 1 (principal allergène produit dans la salive et les glandes sébacées du chat). La structure du monomère est également retrouvée dans diverses enzymes (hydrolases). Cette structure s'est donc adaptée au cours de l'évolution pour conduire des fonctions diverses vis-à-vis d'une large variété de ligands hydrophobes.



*Structure 3D du dimère d'utéroglobine avec une molécule de PBC (PDB 1UTR, représentation en rubans, logiciel Chimera)*

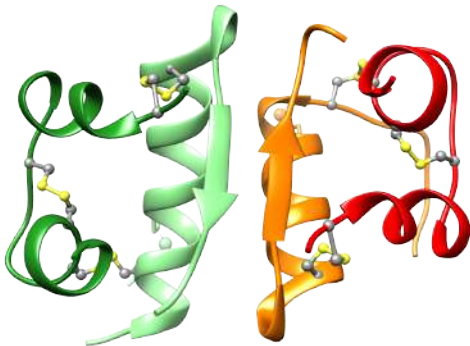
D'autres méthodes expérimentales ont été développées pour l'étude de la structure des macromolécules biologiques à l'échelle atomique, telles la résonance magnétique nucléaire (RMN), permettant d'accéder à des informations propres aux régions désordonnées (*i.e.* n'adoptant pas de

structures stables à l'état isolé) (prix Nobel de chimie 2002 - Kurt Wüthrich), et la cryo-microscopie électronique (cryo-ME), permettant de résoudre la structure de gros complexes macromoléculaires (prix Nobel de chimie 2017 – Jacques Dubochet, Joachim Frank et Richard Henderson).

### **Le cristal pour comprendre et soigner**

L'étude de ces structures et de leurs mouvements permet d'accéder aux bases moléculaires des mécanismes cellulaires. Elle aide à comprendre les causes de maladies et à développer des stratégies thérapeutiques. Ces données expérimentales ont aussi été utilisées à large échelle par des méthodes d'apprentissage, conduisant aujourd'hui à prédire les structures 3D de protéines avec une précision jusqu'ici inégalée et d'accéder à ces informations à l'échelle de protéomes entiers (ensembles de protéines propres aux différentes espèces du vivant).

John Jumper et Denis Hassabis ont d'ailleurs reçu le prix Nobel de chimie 2024 pour le développement d'AlphaFold.



*Modèle 3D de l'insuline*

### **L'exemple de l'insuline**

Dans le monde, plus de 500 millions de personnes sont atteintes de diabète, une maladie connue depuis l'Antiquité. Au fil du temps, de nombreux scientifiques ont permis d'identifier le pancréas comme organe responsable de la libération du sucre et de son stockage sous forme de glycogène dans les cellules connues sous le nom d'îlots de Langerhans.

En 1909, le physiologiste belge Jean De Meyer propose le nom « insuline » pour désigner la sécrétion pancréatique impliquée dans la régulation





du taux de sucre dans le sang.

Le protocole d'extraction - un travail qui coûta malheureusement la vie à des centaines de chiens utilisés pour la recherche - est mis au point par Frederick Banting et John Macleod (Prix Nobel 1923 de physiologie et médecine). La sécrétion pancréatique de bœuf permet alors de sauver des milliers de patients diabétiques.

La collaboration avec des chimistes (George Walden et John Abel) permet d'isoler pour la première fois l'insuline, de comprendre qu'elle est une protéine et d'en obtenir un cristal, dont la structure est résolue par Dorothy Crowfoot Hodgkin (Nobel de Chimie, 1964).

Pendant de nombreuses années, le traitement du diabète a reposé sur l'utilisation d'insuline purifiée à partir de pancréas de bœuf ou de porc, jusqu'à l'avènement des techniques de l'ADN recombinant – mieux connues aujourd'hui pour la production d'organismes génétiquement modifiés (OGM). Depuis 1978, l'insuline est notamment produite sous forme de protéine recombinante à partir d'organismes tels qu'Escherichia coli.

L'histoire de ces découvertes est celle d'une formidable aventure scientifique et humaine. Elle illustre comment la recherche scientifique repose sur la collaboration entre chercheurs et chercheuses de disciplines très diverses et peut transformer une découverte fondamentale en un traitement qui sauve des millions de vies.

*Cliché de diffraction des rayons X de myoglobine, structure résolue par J. Kendrew à la fin des années 50.*



# L'art et la synthèse

## Ada

Dans la pratique d'Ada, on ne rencontre pas seulement des vestiges architecturaux, mais une réinscription de la mémoire à travers la logique du fragment. Les briques, mortiers, bandes de fer et éclats d'ornement qu'elle prélève ne fonctionnent ni comme des ruines romantiques ni comme des reliques nostalgiques : ils appartiennent à la structure latente du lieu, à un langage spatial interrompu que l'artiste réactive par le rituel de la transformation.

Cristalliser ces fragments ne revient ni à les conserver dans un sens muséologique ni à restaurer leur intégrité, mais à opérer une double articulation—séparation et subtile reconstitution. Soustraits à toute fonction, soumis à un processus géologique artificiel, ils deviennent les supports d'une perturbation épistémologique qui rend visible la tension entre nature et artifice, entropie et préservation, présence et absence.



Ada  
« Modulo 6 », 2025  
Brique, alun de potassium  
15 x 15,2 x 12,2 cm



L'enjeu n'est ainsi pas seulement le fragment comme objet, mais le fragment comme lieu de pensée. À l'instar des « coupes architecturales » de Gordon Matta-Clark, les interventions d'Ada excavent un sens à partir des vides, des absences, de ce qui a été effacé structurellement ou socialement. Mais là où Matta-Clark dissèque le corps du bâtiment pour en exposer le squelette, Ada s'oriente vers l'intime. Ses fragments se déploient dans une zone de liminalité : un espace seuil où passé et présent se frôlent, où la matière oscille entre disparition et persistance. Son protocole—étudier le bâtiment, en écouter le murmure, en deviner les cheminements—détourne la rationalité de la démolition pour instaurer un temps autre, dans lequel les débris, désarrimés de tout état stable, sont sur le point de devenir un nouveau corps. Dans cet acte liminal, l'artiste se fait à la fois archiviste et oracle : elle préserve en transformant, interprète en transmutant.

Ada  
« Fossil 3 », 2025  
Pierre calcaire, alun de potassium  
34 x 45 x 34 cm

Parler de ruines aujourd'hui, comme le fait Ada, revient alors à résister à l'effacement de l'espace vécu par la logique aseptisée du renouvellement urbain. Son travail insiste sur les strates psychiques et temporelles incrustées dans la matière et, par les transformations cristallines qu'elle met en œuvre, affirme une poésie instable du devenir. Ces fragments ne sont pas simplement sauvés : ils sont transsubstantiés, tirés de la mort vers une ontologie nouvelle et incertaine. C'est au cœur de cette tension — entre fragment et forme, ruine et renaissance — que se déploie la portée critique de son œuvre, non comme restauration du passé, mais comme confrontation directe avec sa mémoire minérale.



*Entrée de la Collection de minéraux, avec parurement en sodalite, donnant sur le 34 de la rue Jussieu, Paris, 1992*



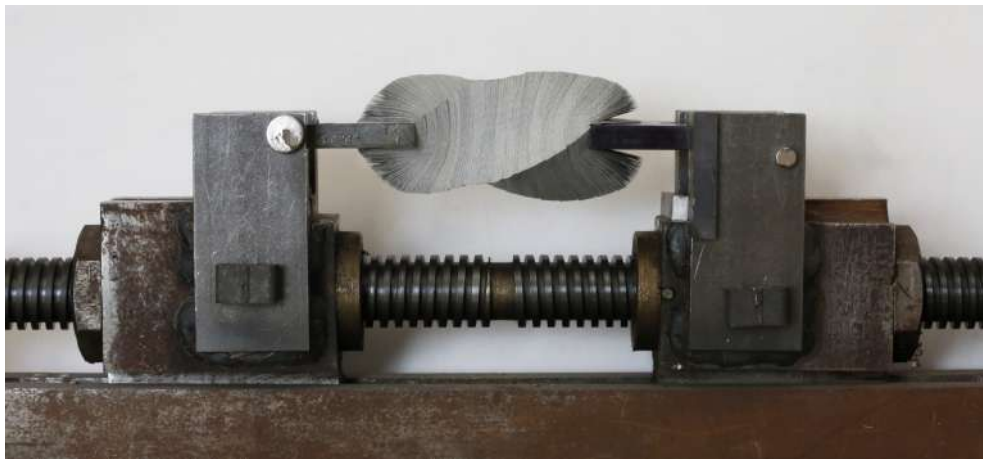
*ADA  
Détail de « Sodalite 1 », 2026  
Sodalite, alun de potassium*

## Vincent Gontier

« C'est ce quotidien sauvage, que Vincent Gontier tente de bloquer entre des mâchoires d'acier. Il enserre et serre de plus en plus fort les milliers de pages couvertes de signes dans des étaux obscurs, jusqu'à les contraindre à demeurer en piles régulières, parfois déformées par la pression, quitte à ne plus laisser apparaître que des bribes troublantes de ce qui était écrit, ou d'étranges calligrammes : fines traces d'encre, sur les milliers de plis accumulés, et qui en se superposant racontent une autre histoire. »

Pierre Péju - « Jeux de sociétés », Voiron (38), 2006

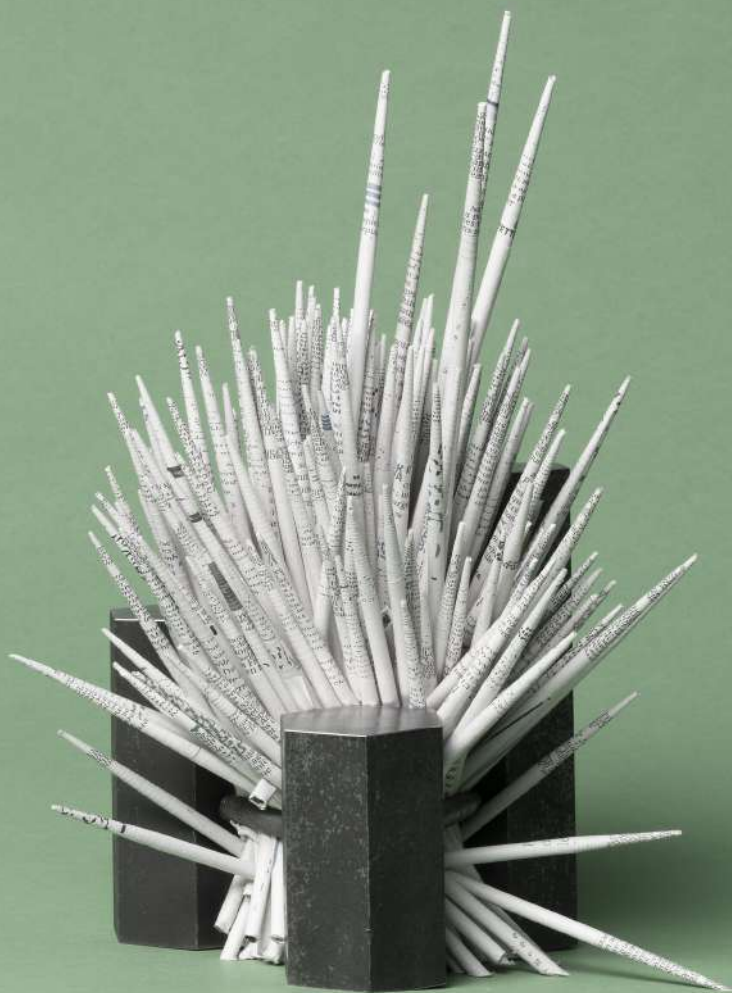
Mes remerciements à Martine Rey,  
artiste laqueuse.



*Croquis-sculpture en cours d'assemblage*



Vincent Gontier  
« Croquis-sculptures », 2013-2025  
Assemblage de papier journal découpé et acier



Vincent Gontier  
« Manhattan », 2025  
Papier journal roulé et acier  
29 x 20,5 x 20 cm

## Léa Barbazanges

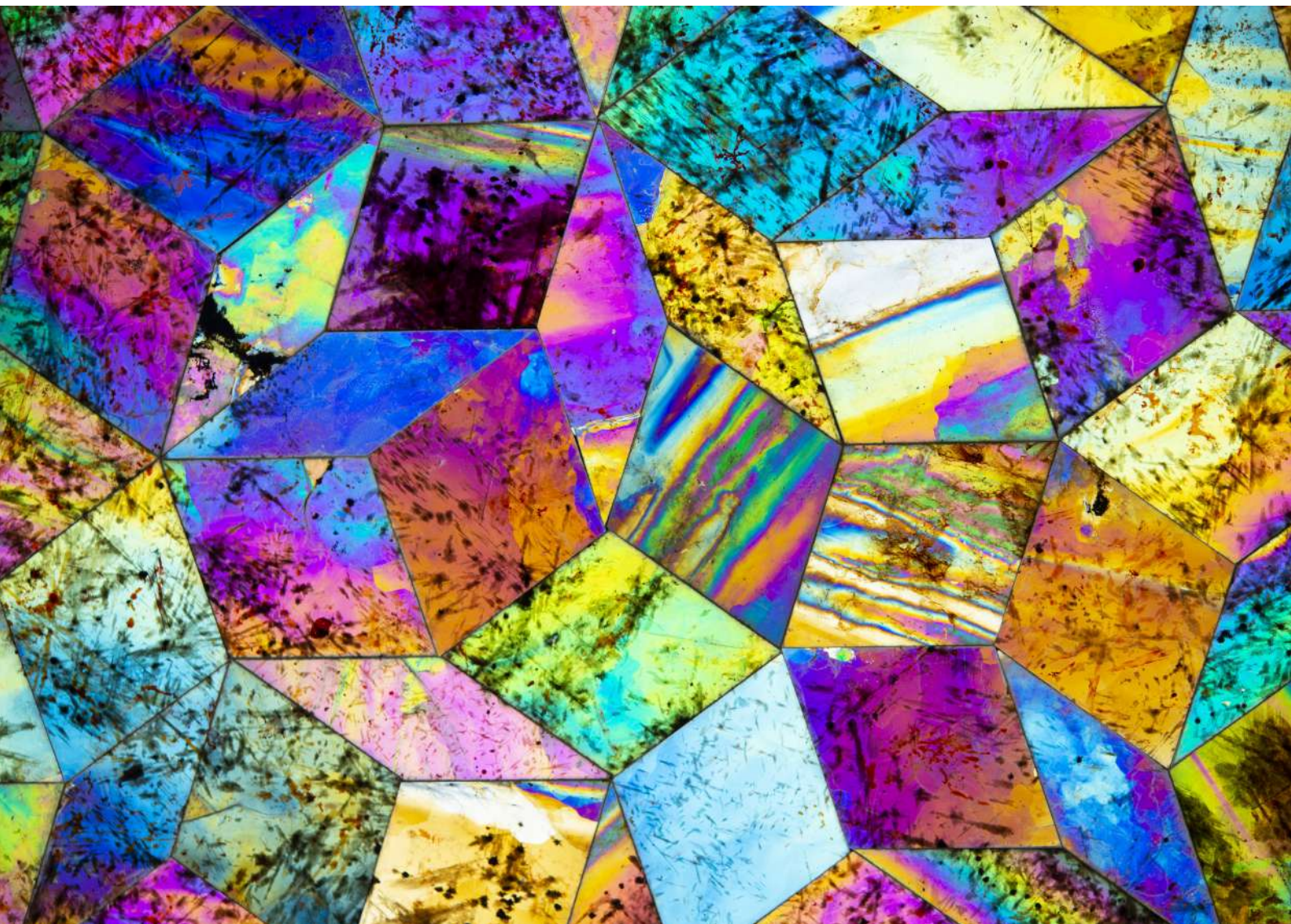
« Le travail de Léa Barbazanges renoue avec les instincts les plus archaïques de l'art, avec la fascination des premiers hommes pour les curios, ces objets naturels (fossiles, minéraux, coquilles, ...) recueillis pour leurs formes insolites ou leur brillance et mis à l'abri dans des grottes. Curieuse, au sens fort de celle qui est à la fois fascinée et qui veut prendre soin, elle retravaille leur matérialité pour produire des sculptures (...), qui redoublent la plasticité de la nature. Ses réalisations s'inspirent à la fois de processus physiques (accumulation, cristallisation...) et artistiques (dessin, collage, taille...) pour nourrir un imaginaire biomorphe, qui imprime ses propres formes au vivant. Il en va alors de son étonnement moteur comme de l'effet esthétique que ses œuvres produisent : la rencontre contemplative avec le "fantastique naturel", pour reprendre l'expression de Roger Caillois, agit comme un puissant stimulant de l'imagination par lequel éprouver, et peut-être réinventer, le rapport de l'homme à la vie. »

L'œuvre *MicaPenrose* est réalisée en mica, un minéral brillant et transparent, tel celui qui scintille dans le sable ou les galets. Le travail sur la matière et la lumière fait apparaître les couleurs, en utilisant la propriété biréfringente du mica. Comme sur les bulles de savon, les couleurs changent en fonction du déplacement du spectateur, et c'est seulement en vision latérale que l'aspect naturel du minéral apparaît.

Florian Gaité

*(Ci-contre) Léa Barbazanges  
« MicaPenrose » (détail), 2019  
Mica rétroéclairé, verre, alliage d'aluminium  
62 x 62 cm*

*Projet développé avec Sylvain Ravy, chercheur  
au CNRS et directeur de recherche au  
laboratoire de physique des solides de  
l'université Paris-Saclay, avec le soutien de la  
Diagonale Paris-Saclay, la Région Grand Est et  
l'expertise de Denis Gratias, chercheur au  
CNRS, codécouvreur des quasi-cristaux et  
membre de l'Académie des sciences.*



# Conclusion

---

Au terme d'une brève rencontre entre les créativités de l'artiste et du scientifique, notre conclusion ne peut être qu'une forme de cristallisation aux multiples facettes, un mot aussi polymorphe que le mot « cristal ». L'exposition *Créer le cristal, voyage entre art et science* nous a conduit de la nature à la technologie, de la terre au laboratoire, de l'inerte au vivant.

Dans ce voyage, nous avons rencontré de multiples talents, des esprits passionnés et passionnants, et nous nous sommes plongés dans une recherche pluridisciplinaire en constante évolution. A la croisée des arts et des sciences, de la connaissance et de l'imagination, mêlant rigueur et beauté, cette parenthèse trop brève pourrait ne jamais se refermer.

*Aux mines de sel de Salzbourg, on jette dans les profondeurs abandonnées de la mine un rameau d'arbre effeuillé par l'hiver ; deux ou trois mois après, on le retire couvert de cristallisations brillantes ... infinité de diamants mobiles et éblouissants ; on ne peut plus reconnaître le rameau primitif. Ce que j'appelle cristallisation, c'est l'opération de l'esprit, qui tire de tout ce qui se présente la découverte que l'objet aimé a de nouvelles perfections.*

Stendhal, *De l'amour*, 1822 (Extrait)

# Bibliographie

Balibar, F., *La science du cristal*, Hachette, Paris, 1992

Benz K.-W., Neumann W., *Introduction to Crystal Growth and Characterization*, Wiley-VCG, Weinheim, 2014

Bensaude-Vincent B., Loewe S., *Carbone, Ses vies, ses œuvres*, Seuil, Paris, 2018

Boulliard J.C., *Et l'homme créa la pierre : les synthèses de cristaux*, Collection des minéraux, A.M.I.S., Paris, 1996

Callebaut I., Poupon A., Bally R., Demaret JP., Housset D., Delettré J., Hossenlopp P., Mornon JP. *The uteroglobin fold*. Ann N Y Acad Sci., 2000

Cognet M., Carboni M., *Stockage de l'énergie : évolution des batteries*, Culturesciences.chimie.ens.fr, 2017

Jacques J., *La molécule et son double*, Hachette, Paris, 1992

Padhi A.K., Nanjundaswami K.S., Goodenough J.B., *Phospho-Olivines as Positive Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries*. J. Electrochem. Soc., 1997

Morange M., *Pasteur*, NRF-Gallimard, Paris, 2022

Rostène W., De Meyts P. *Insulin: A 100-Year-Old Discovery With a Fascinating History*. Endocrine reviews, 2010

## Cédits photographiques

© Robin Guittat Studio	p.4, 17
© Licence CC-BY-NC-ND	p.6, 19, 20
© Pierre Kitmacher, Sorbonne Université	p.7, 11, 32, 35, 46, 47
© Yanis Missenard	p.16, 22-23, 24, 31
© Dan Shechtman	p.18
© Emilie Vialet	p.21, 47
© Alain Jeanne-Michaud, A.Mi.S.	p.16, 26, 27
© Patrick Imbert, Collège de France	p.27
© Institut Pasteur/Musée Pasteur	p.29
© Isabelle Callebaut	p.37, 38, 39
© Duane W. Sears, 2021	p.41
© Ada	p.43
© Nelly Bariand	p.44
© Vincent Gontier	p.45





BIBLIOTHÈQUE  
UNIVERSITAIRE



Collection de Minéraux  
SORBONNE UNIVERSITÉ