

Voyage dans l'espace réciproque : les atomes et la cristallographie

Pascale Launois

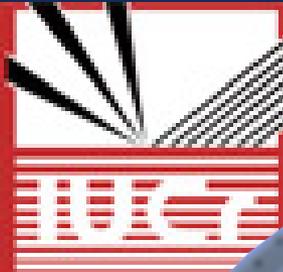
pascale.launois@u-psud.fr



Jeudis de la recherche, le 06/03/2014

2014

International year of
crystallography



AICr 2014

<http://www.youtube.com/watch?v=V7OgMSCdb2M>



2014

Année Internationale
de la Cristallographie

www.aicr2014.fr



@PascaleLaunois
2

De l'atome...

au cristal, au matériau, à l'objet biologique

▶ Au fil du temps

▶ Via la diffraction et l'espace réciproque

- **De l'atome au cristal**

Quelques ordres de grandeur

- **Le cristal**

Qu'est-ce que c'est ?

De l'antiquité au début du 20^{ème} siècle...

« Les cristaux, fenêtres sur l'invisible »
par Alain Pénicaud, éd. Ellipses

- **La diffraction des rayons X et l'espace réciproque**

Les avancées majeures de 1912 et 1913

Qu'est-ce que la diffraction ? Et l'espace réciproque ?

- **La cristallographie aux 20^{ème} et 21^{ème} siècles**

Quelques grandes découvertes

En particulier :

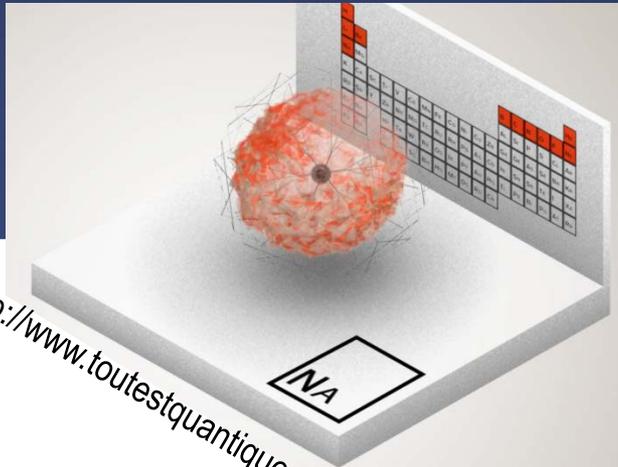
- Rosalind Franklin & le cliché de diffraction qui a révélé la structure de l'ADN, la molécule de la vie
- les quasicristaux, une nouvelle forme d'ordre

- **La cristallographie dans notre vie quotidienne...**

1. De l'atome au cristal

ou comment
des milliards de milliards de milliards
d'atomes s'organisent !

De l'atome au cristal



<http://www.toutestquantique.fr>



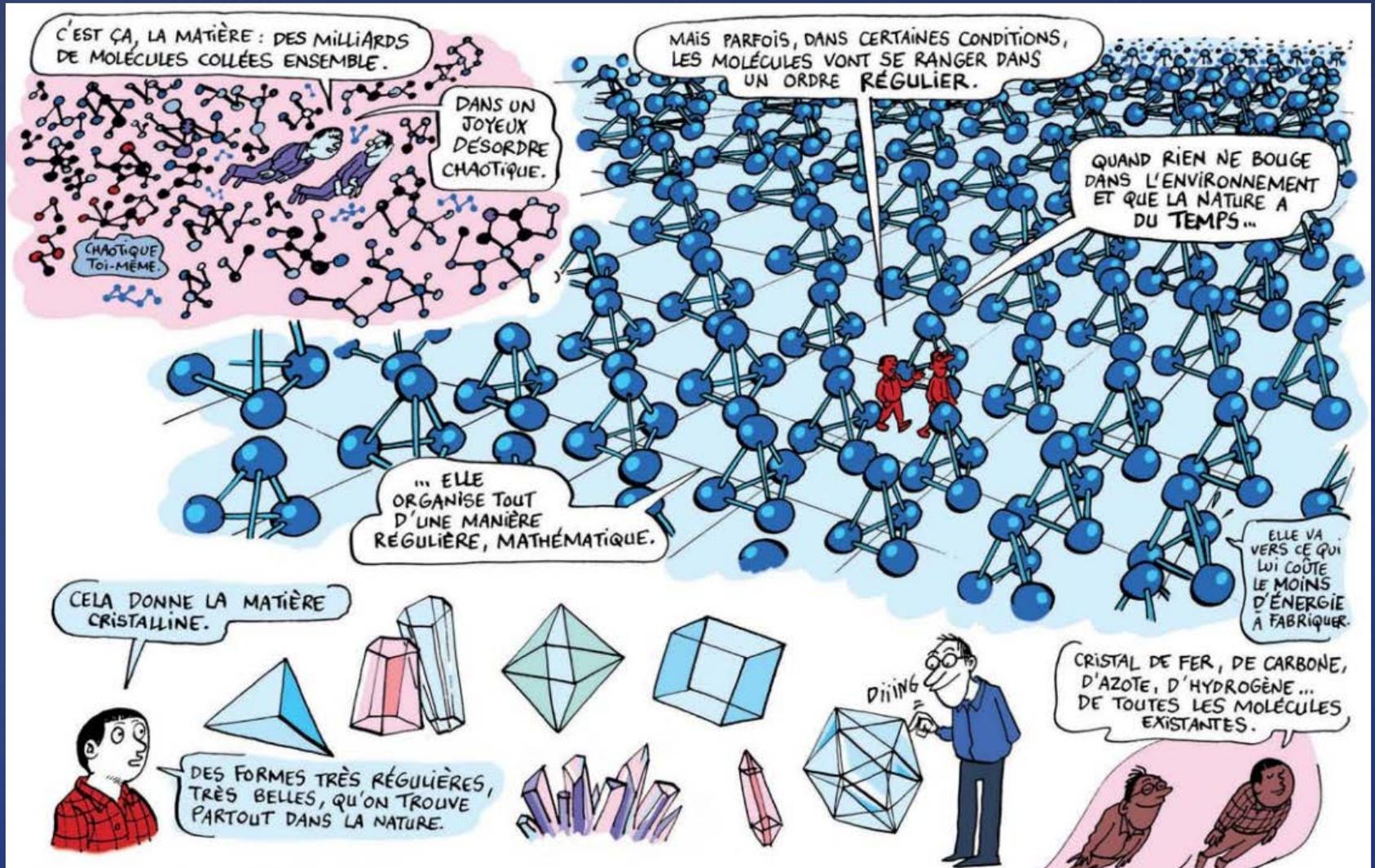
Atome : 0.1 nm, 1 nm = 1 milliardième de mètre

De l'atome au cristal

<http://www.universcience.tv/video-laiton-5019.html>



De l'atome au cristal



J.-Y. Duhoo (journal spirou) & CNRS

<http://www.cnrs.fr/cristallo/spip.php?article4#bd>

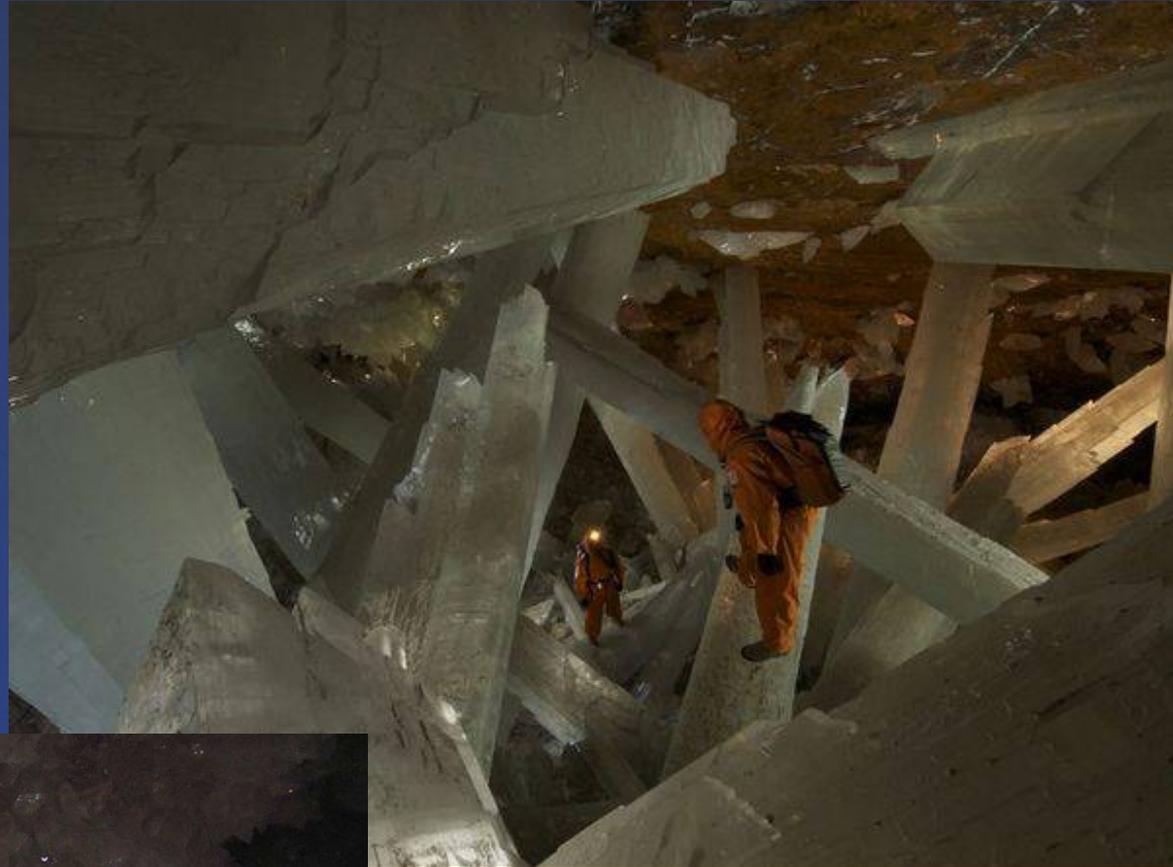
2. Le cristal

Qu'est-ce que c'est ?

De l'antiquité au début
du 20^{ème} siècle...

LE CRISTAL

Les cristaux géants
de la grotte de Naïca, au Mexique



Découverte en 1999

LE CRISTAL



Quartz hyalin hérisson ou « cristal de roche » - Isère © Muséum d'Histoire Naturelle de Grenoble

Krystallos désigne la glace en grec

Strabon (64 av JC- ca 24, géographe grec) nomme « krystallos » (glace) le **quartz**, minéral transparent.

Le nom de quartz a été donné à la gangue accompagnant les filons métalliques, par les mineurs saxons, à la fin du moyen-âge.

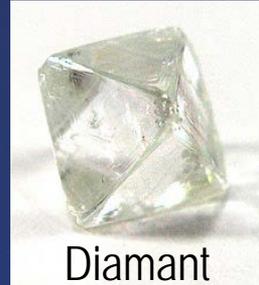
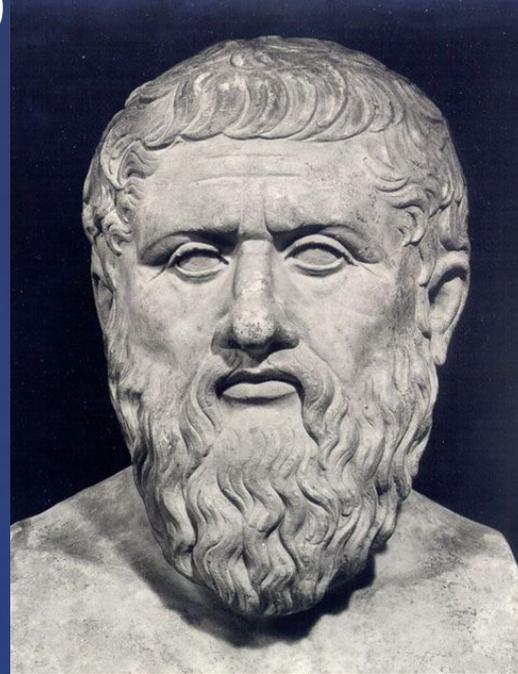
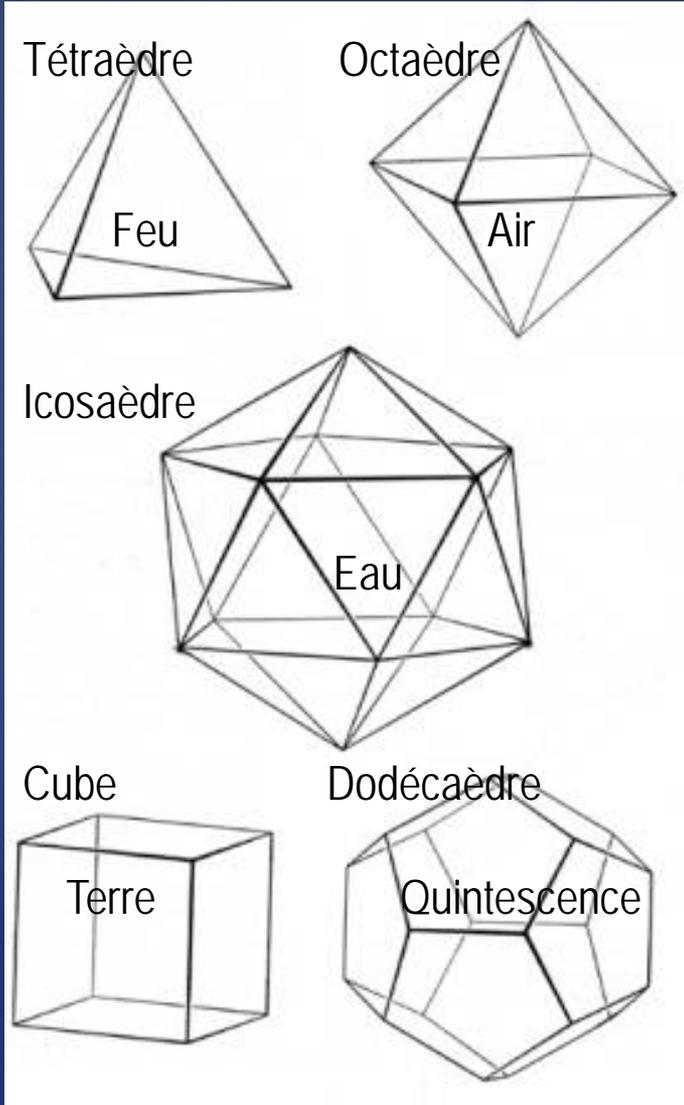
Cristallographie : terme introduit en 1723, par le savant Maurice-Antoine Capeller (1685-1769).

Au cours du 18^{ème} siècle le terme de **cristal** remplace celui de pierre angulaire.

LE CRISTAL et l'antiquité

Les 5 solides platoniciens

Platon (philosophe grec, 428-348 av. J.-C.)



Les solides platoniciens
auraient été imaginés
grâce aux cristaux
des mines du Laurion
près d'Athènes...

LE CRISTAL... objet symbolique

Le diamant (d'après exposition « Voyage dans le cristal »
<http://www.aicr2014.fr/index.php/formation-et-ressources/les-expositions>)

Son nom vient du grec « adamas » :
indomptable.
Pierre extrêmement dure,
difficile à tailler.

Pierre symbole d'invincibilité



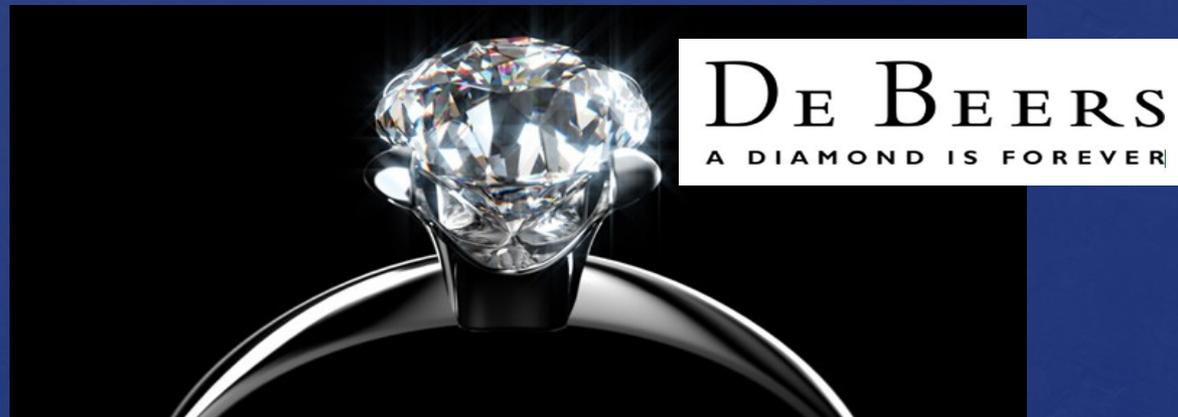
Les diamants de Charles le Téméraire



Le Cullinan



Pierre symbole d'amour éternel



LE CRISTAL... médicament au moyen-âge

Dans « De lapidibus », l'évêque Marbode de Rennes (1035-1123) expose « la vertu » propre à chaque pierre et son supposé usage médical.

MARBODAEI

GALLI CAENOMANENSIS DE

gemmarum lapidumq; pretiosorum formis, naturis, atq; uiribus eruditū cū primis opusculū, sane q̄utile, cum ad rei medicæ, tū scripturæ sacræ cognitionē. nūc primū nō mō cētū ferme uersib. locupletatū pariter & accuratius emēdātū, sed & scholijs q̄q; illustratū p̄ Alardū AEmstelredamū

¶ Cuius studio additę sunt & præcipuæ gemmæ lapidūq; pretiosorū explicatiōes, ex uentūstis. q̄busq; autorib; coactæ. Cū scholijs Piotorij Villingen.

Εν μαργαρίτου τιμιον. Ἀποδοῦν ἅπαντα λαμβαν. En margaritū nobile, Eme si cupis ditescere. Rationale. Exodi. 28. & 39. Leui. 8.



l'agate trompe la soif et est bonne pour la vue

le jaspe est souverain contre la fièvre

le saphir rajeunit le corps, met à l'abri de l'erreur, rassure les âmes craintives et apaise les colères du ciel

l'émeraude est utile aux devins et rend la raison aux insensés

le béryl est utilisé contre les troubles du foie et pour éviter les rots

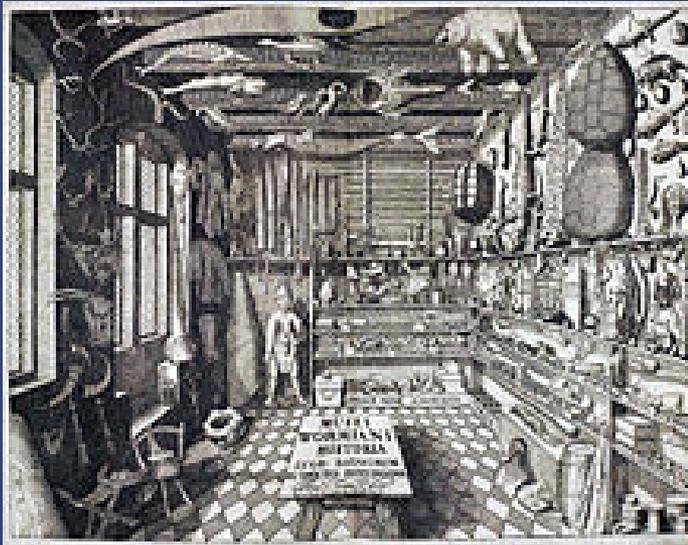
l'améthyste évite l'ébriété

l'hématite est un bon remède pour la diarrhée

le corail fait fuir les monstres

LE CRISTAL... à la renaissance

- A partir de la fin 16^{ème} siècle : découvertes de grands gisements miniers, développement de l'industrie minière
- « Cabinets de curiosités » : collections d'objets insolites : antiquités, objets d'histoire naturelle (animaux empaillés, insectes mais aussi **minéraux et cristaux taillés**), œuvres d'art.



→ « Base de données » pour comprendre la forme des cristaux !

LE CRISTAL : sa forme

Deux écoles de pensées aux 16^{ème} et 17^{ème} siècles :

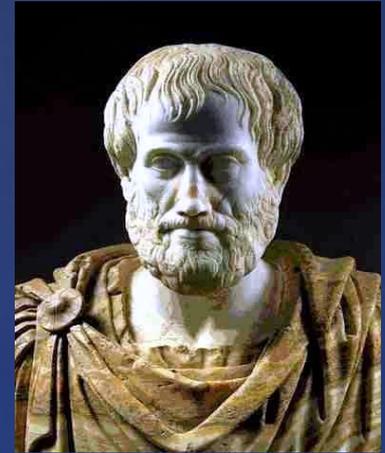
- L'école aristotélicienne :

La forme du cristal (cause matérielle) est définie par une **cause extérieure** (cause efficiente)

Aristote : philosophe Grec (384-322 avant J.-C.)

4 causes : cause matérielle, cause efficiente, cause formelle et cause finale

- Nouvelle école : **cause interne** au cristal



LE CRISTAL : mesure des angles



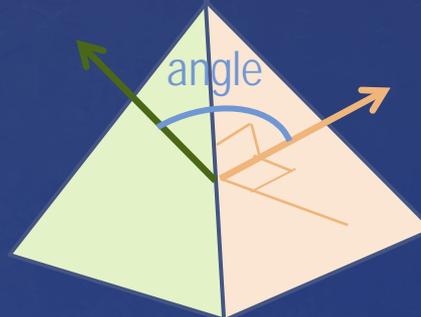
Goniomètre de Carangeot (1780)



Romé de l'Isle



Jean-Baptiste Romé de l'Isle
(1736-1790)

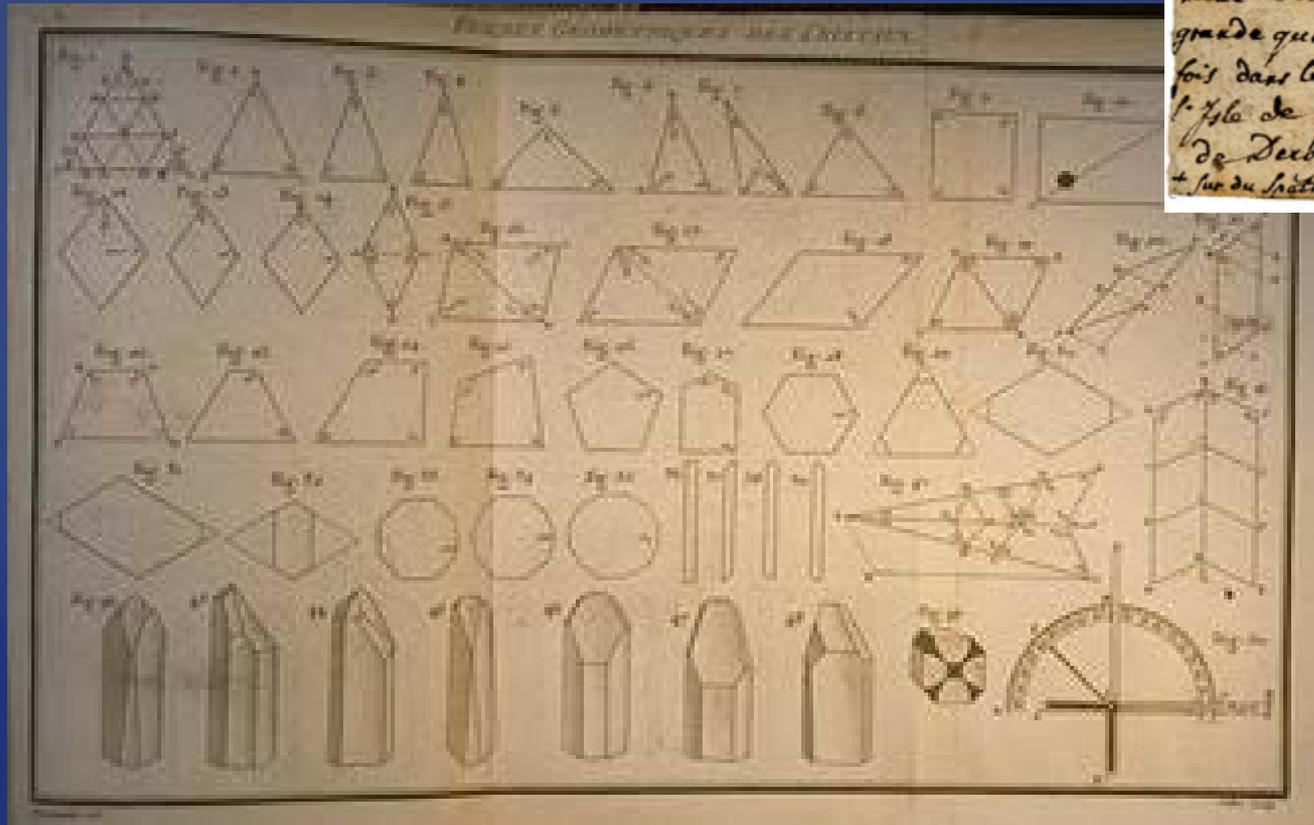


Loi de constance des angles (1783)

« il est une chose qui ne varie point, et qui reste constamment la même dans chaque espèce ; c'est l'*angle d'incidence* ou l'*inclinaison respective des faces entre elles* »

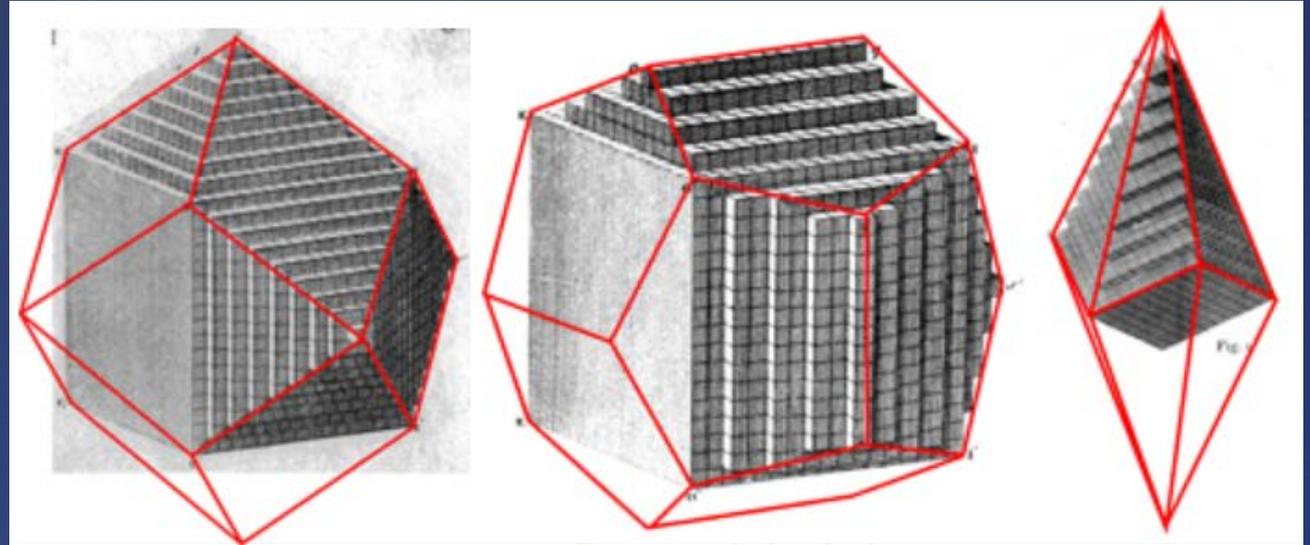
LE CRISTAL : mesure des angles

Galène cubique à cristaux très distingués et angles entiers. Chaque cube en enferme un autre, plus petit & plus saillant, dont les côtés sont directement opposés aux angles du cube extérieur. Les accidens curieux, servant mettre sur la voye de découvrir le mécanisme de la cristallisation. Cette espèce nouvellement découverte & dont il n'y a pas eu une grande quantité est décrite pour la première fois dans le Catalogue de No. de Rome de l'Isle de la vente de Forster. 1780. n.º 927. De Derbyshire. *Smith's* fo. 3v. 1779.
sur du spath calcaire et les pans de



LE CRISTAL : formé de « molécules intégrantes »

René-Just Haüy
(1743-1822)

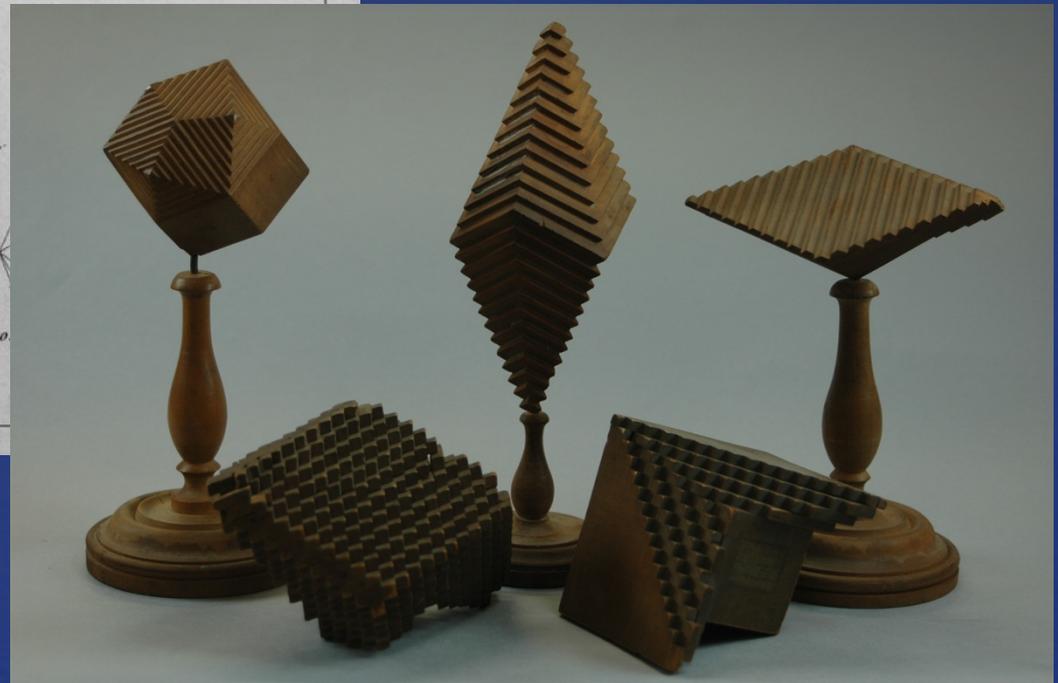
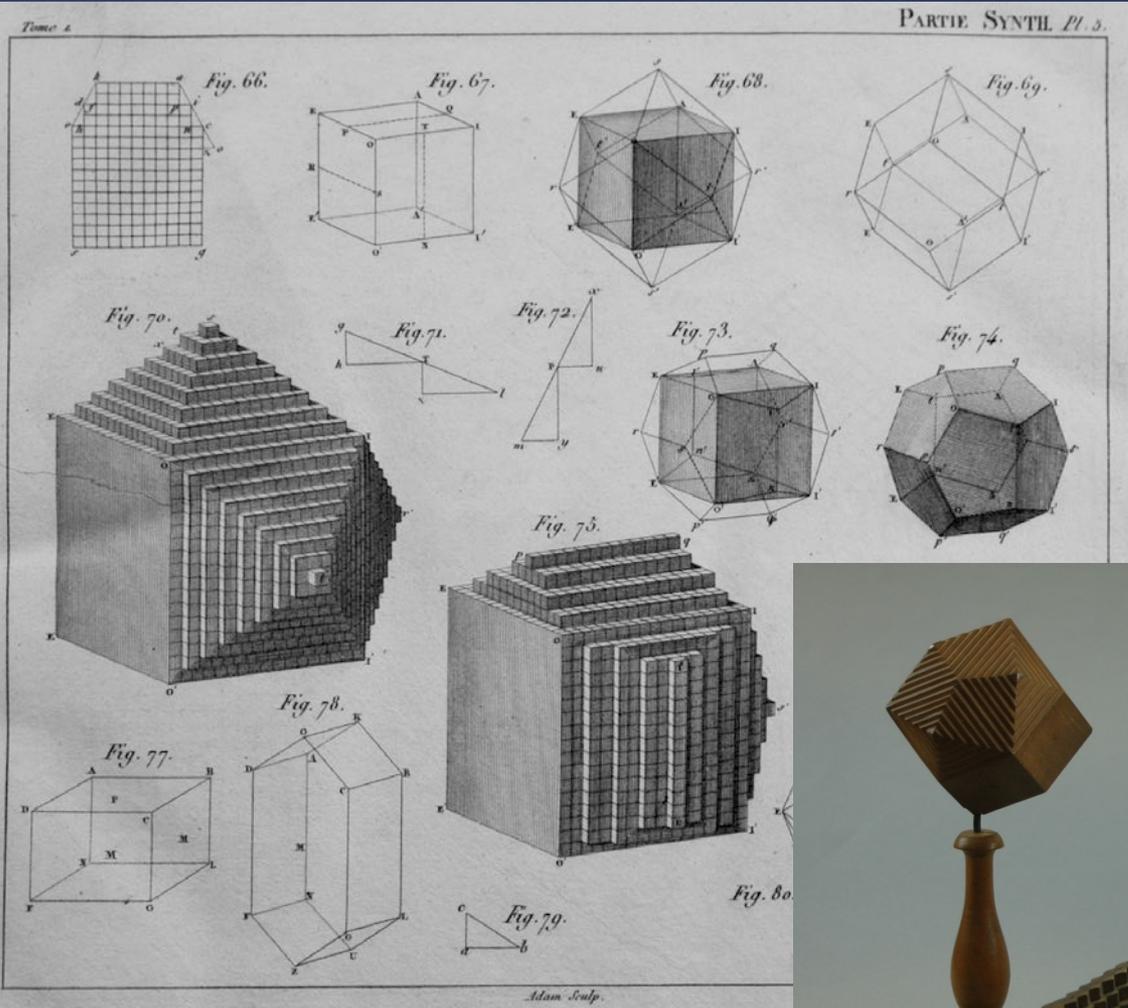


La cristallographie : « une Science qui ait des principes fixes, d'où l'on puisse tirer des conséquences propres à répandre du jour sur une matière jusqu'ici enveloppée de tant d'obscurités »

Haüy définit en 1781 « l'espèce minéralogique comme une collection de corps dont les molécules intégrantes sont semblables par leurs formes et composés des mêmes principes unis entre eux dans le même rapport ».

Il *aurait* fait cette découverte en cassant accidentellement l'un des spécimens en calcite de la collection du naturaliste Jacques DeFrance.

LE CRISTAL : formé de « molécules intégrantes » »

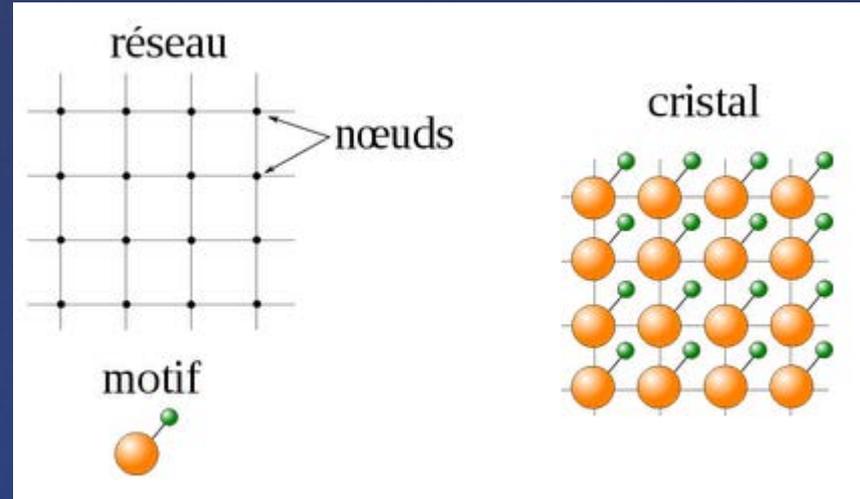


LE CRISTAL : un réseau et son motif

Auguste Bravais (1811-1863)



Cristal : constitué par la répétition, par translation (périodicité), dans trois directions de base, d'un motif élémentaire.



14 réseaux de Bravais à trois dimensions.

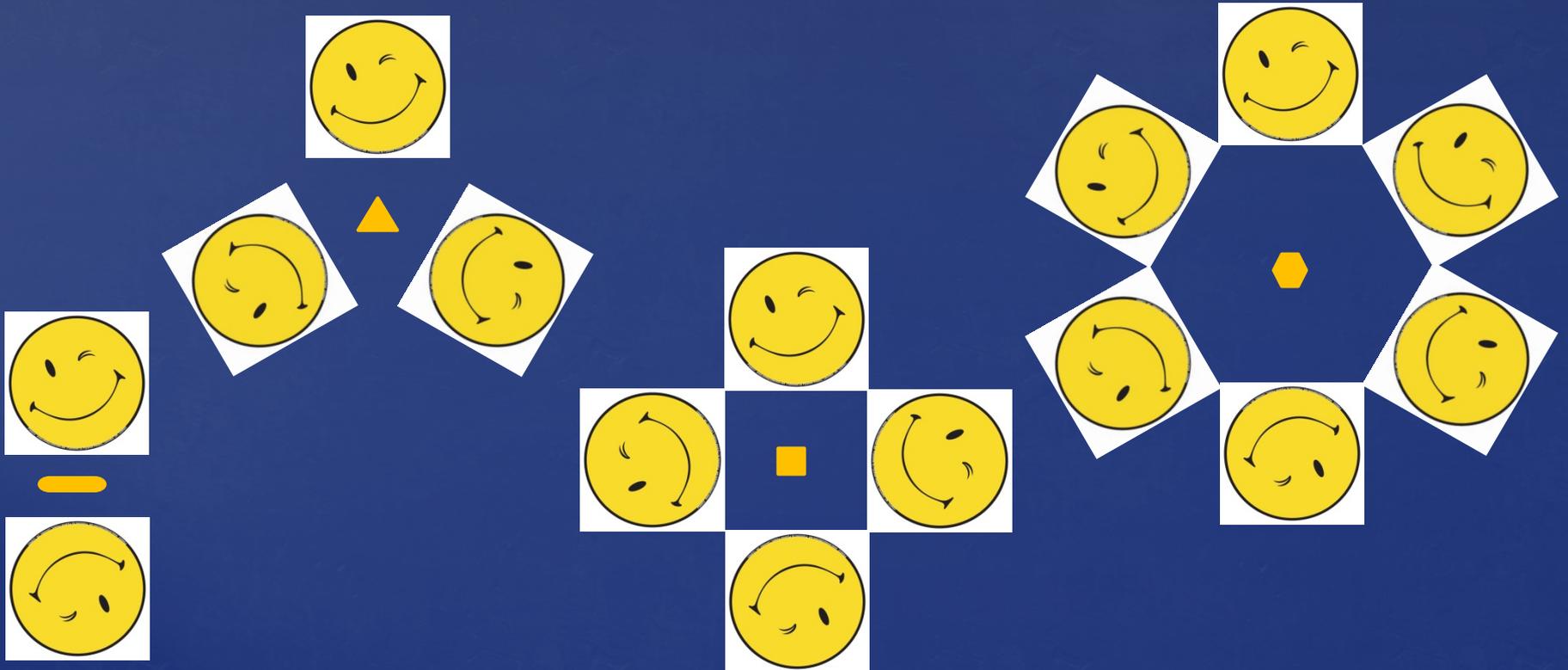


M. C. Escher (1898-1972)

LE CRISTAL : notion de symétrie

Seconde moitié du 19^{ème} siècle : mathématiciens tels que Camille Jordan (français) , Leonard Sohncke (allemand), Arthur Schoenflies (allemand) et Evgraf Stepanovitch Fedorov (russe)
→ description de la structure cristalline (maille+motif) basée sur ses **SYMETRIES**

Symétries compatibles avec la périodicité : rotations d'ordre 2 (rotation de 180°), d'ordre 3 (rotation de 120°), d'ordre 4 (rotation de 90°) et d'ordre 6 (rotation de 60°)



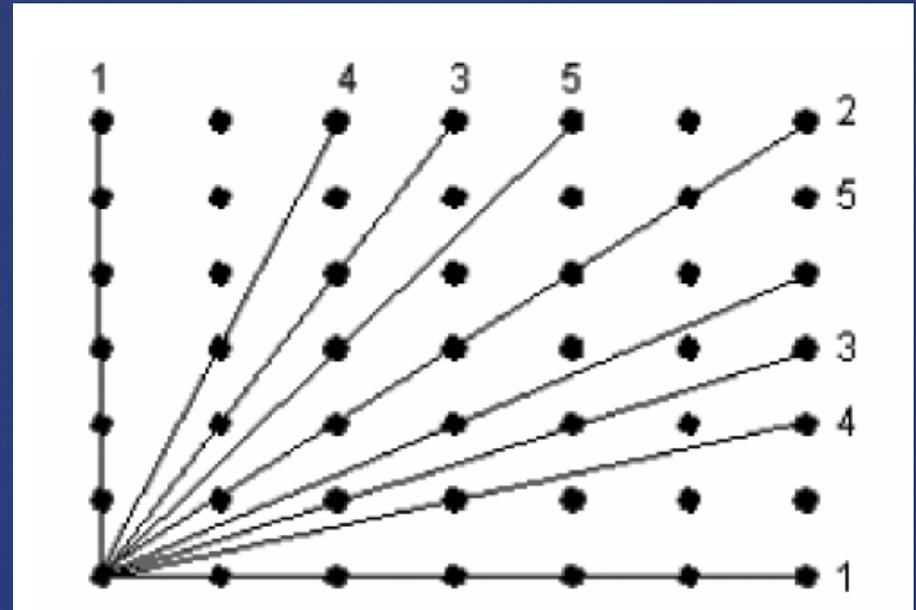
LE CRISTAL : un réseau

*Georges FRIEDEL (1865-1933), cristallographe de renom
Fils de Charles Friedel (minéralogiste et chimiste)
et grand-père de Jacques Friedel,*

l'un des trois fondateurs du Laboratoire de Physique des Solides (LPS) d'Orsay



Loi de Bravais-Friedel

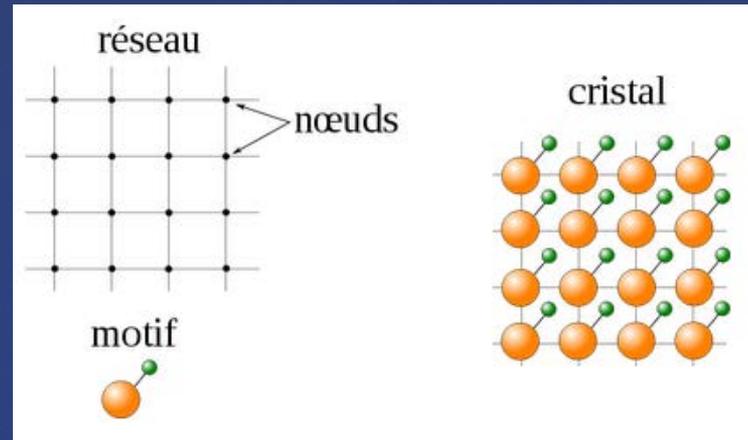


Une face se développe plus préférentiellement dans un cristal si elle croise un nombre important de points du réseau.

LE CRISTAL

18^{ème} et 19^{ème} siècle, début du 20^{ème} siècle :

A partir d'observations géométriques, on décrit les cristaux en terme d'un réseau + son motif :
description « microscopique » à partir d'observations macroscopiques !



Pas de « preuve »
de cette déduction...

Scientifiques français surtout (+ allemands et russes pour les mathématiciens)

Début 20^{ème} siècle : une avancée spectaculaire : la diffraction des rayons X !

Scientifiques allemands et anglais.

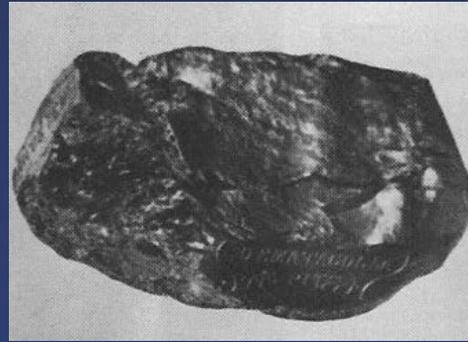
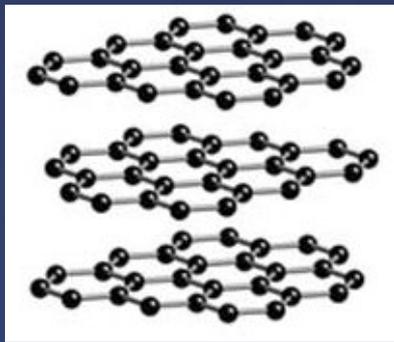
Ensuite : science « internationale ».

Table de Mendeleiev

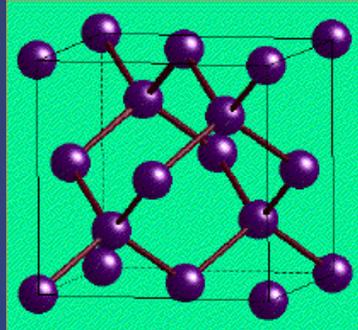
I																XVIII																								
1	H																										2	He												
2	3	4																	5	6	7	8	9	10																
3	11	12	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	13	14	15	16	17	18																						
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																						
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																						
6	55	56	⚗	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																						
7	87	88	⚗	104	105	106	107	108	109	110	111	112		114		116		118																						
																57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71										
																89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103										
																<ul style="list-style-type: none"> élément solide élément liquide élément gazeux élément artificiel 																								

0.2% en masse de l'environnement terrestre
 Chimie organique, bio-chimie, vie sur terre

- Graphite



- Diamant



3. La diffraction des rayons X

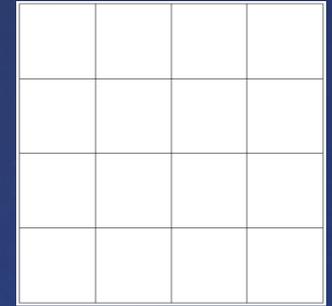
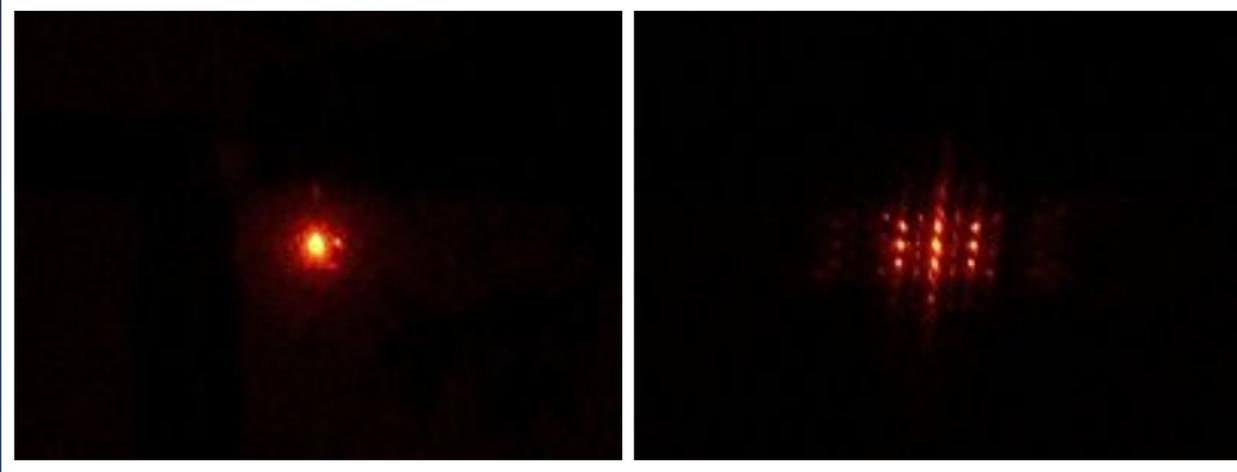
Les avancées majeures de 1912 et 1913 !

Qu'est-ce que la diffraction ? Et l'espace
réciproque ??

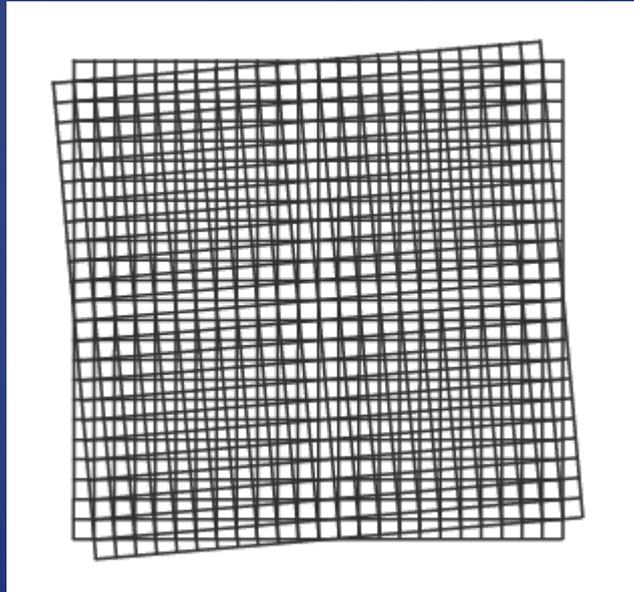
LA DIFFRACTION : qu'est-ce que c'est ?

Lampadaire au loin

Avec un rideau devant la fenêtre !



Démo !



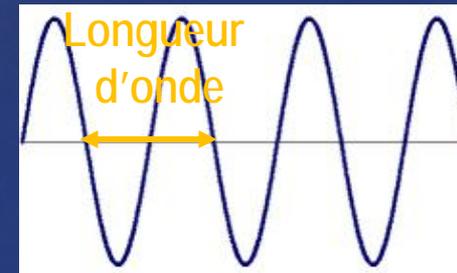
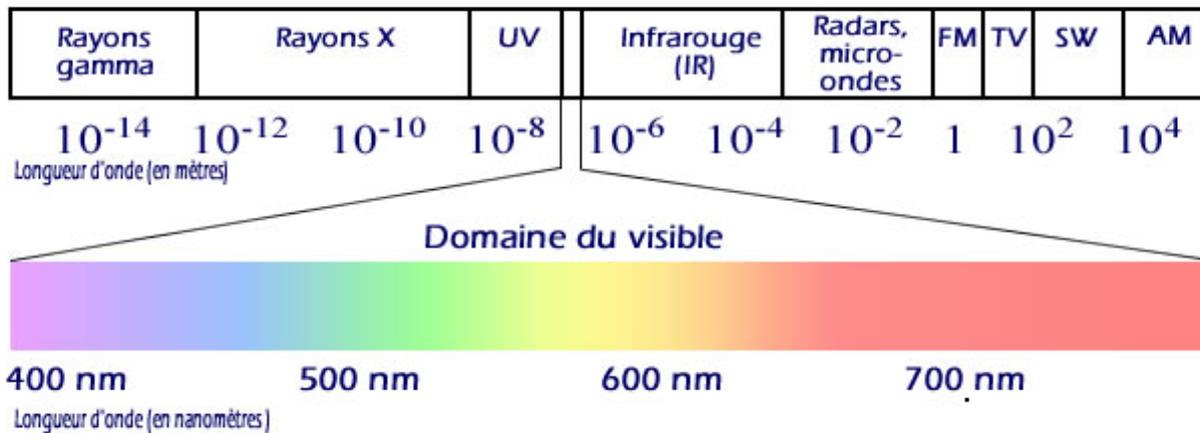
+ pointeur laser

La diffraction : c'est joli et amusant !

Les rayons X : qu'est-ce que c'est ?

Découverte en 1895 par Röntgen, physicien allemand, d'un rayonnement inconnu :
les « rayons X »

Des ondes électromagnétiques... comme la lumière visible



nm = milliardième de mètre

~0.1-1 nm : distances entre atomes et longueurs d'onde des rayons X

La diffraction des rayons X permet de sonder la structure de la matière

LA DIFFRACTION DES RAYONS X : la découverte

Munich en 1912

«Fifty years of X-ray crystallography », P. Ewald,
publié par The International Union of Crystallography

- Institut de Minéralogie et de Cristallographie —→ Cristaux et connaissance des cristaux
- Institut de Physique Expérimentale dirigé par W. C. Röntgen (a rejoint Munich en 1900)
—→ Rayons X
- Institut de Physique Théorique dirigé par A. Sommerfeld (a rejoint Munich en 1909).
—→ Propagation des ondes électromagnétiques.
+ Sommerfeld a tenu à y créer un petit laboratoire expérimental.

Le café Lutz



LA DIFFRACTION DES RAYONS X : la découverte

Thèse de Paul Ewald, sous la direction d'Arnold Sommerfeld : « déterminer les propriétés optiques d'un arrangement anisotropes de résonnateurs isotropes » (1910)

Suivant la suggestion de P. Roth,
Ewald réalise ces calculs en utilisant comme modèle cristallin l'anhydride.

Paul Peter Ewald (1888-1985)



Début 1912, Ewald qui a obtenu des résultats surprenants demande conseil à Max von Laue

→ Idée de Laue (fausse ! Réfutée par Sommerfeld !) :
les rayons X (de fluorescence) émis par les atomes d'un cristal irradié pourraient interférer
et on pourrait mesurer ces interférences.

LA DIFFRACTION DES RAYONS X : la découverte

Les protagonistes de la découverte de la diffraction des rayons X par les cristaux

M. Laue, théoricien (1879-1960)
Rejoint Munich en 1909,
assistant de Sommerfeld.



Prix Nobel de Physique en 1914
« pour sa découverte de la
diffraction des rayons X par les
cristaux »

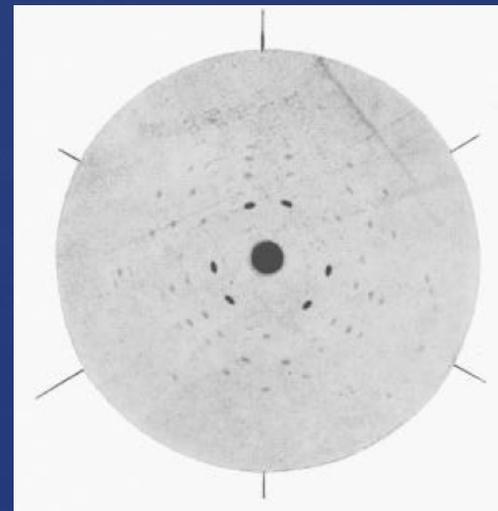
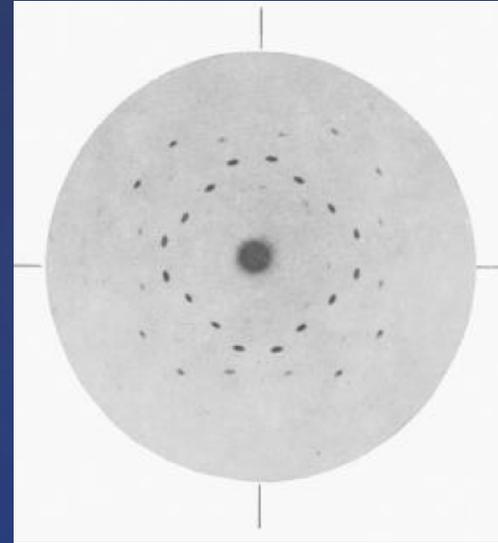
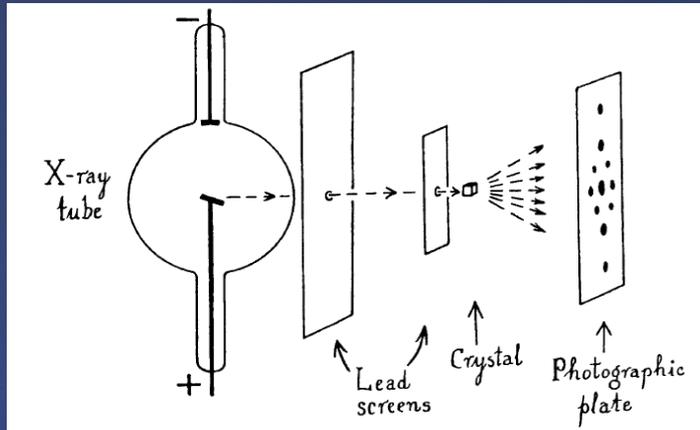
W. Friedrich, expérimentateur (1883-1968)
Etudiant en thèse dans le laboratoire de Röntgen
jusque 1911, assistant de Sommerfeld en 1912.



Paul Karl Moritz Knipping, expérimentateur (1883-1935)
Etudiant en thèse dans le laboratoire de Röntgen en 1912.

LA DIFFRACTION DES RAYONS X : la découverte

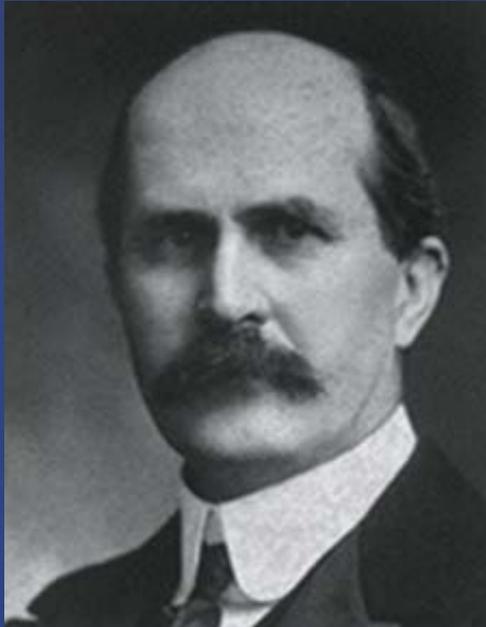
L'expérience (avril-juin 1912)



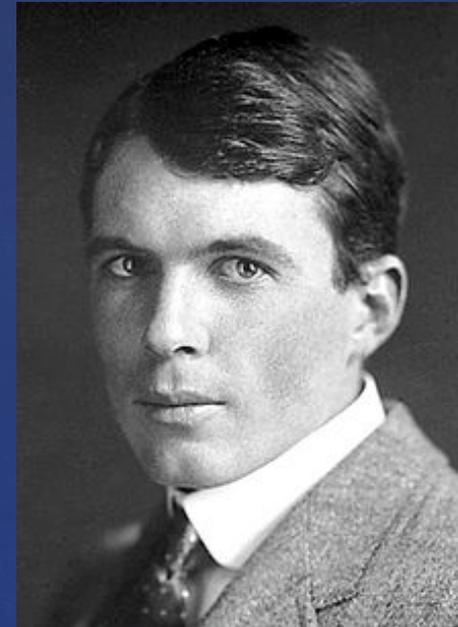
Cristal de zinc blende (ZnS)

LA DIFFRACTION DES RAYONS X : les Bragg

Les Bragg, père et fils
En Angleterre



William Henry Bragg (1862-1942)

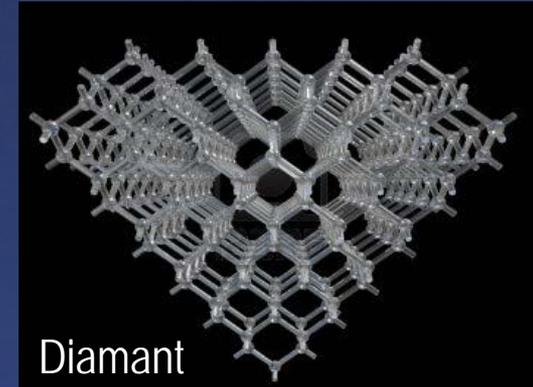


William Laurence Bragg (1890-1971)

Reçoivent le prix Nobel de Physique
« pour leurs travaux d'analyse des structures cristallines à l'aide des rayons X »
en 1915

LA DIFFRACTION DES RAYONS X : loi de W.L. Bragg

Octobre 1912, article de W.H. Bragg : les rayons X sont des particules qui passent dans des canaux définis par les atomes du cristal.



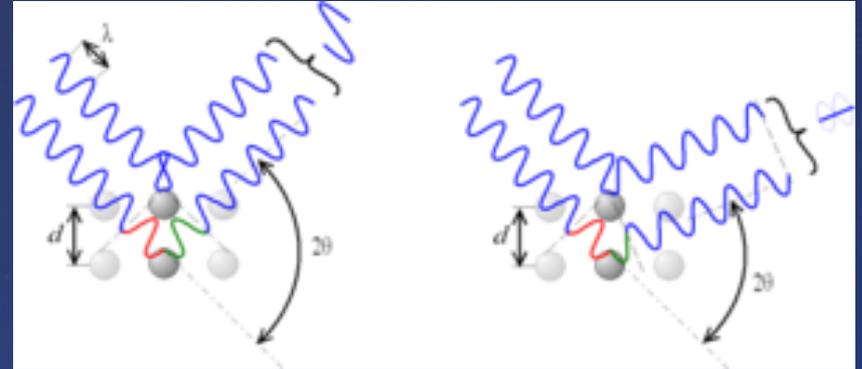
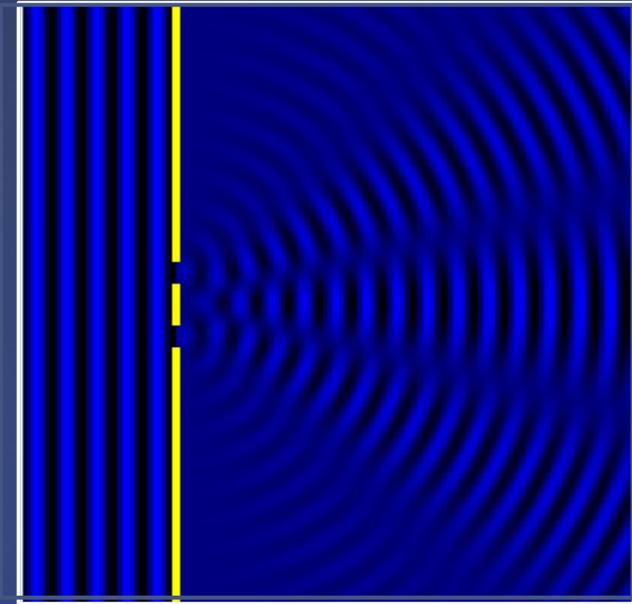
Novembre 1912, W.L. Bragg publie, à 22 ans, un article fondateur "The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal" qui ré-interprète correctement les données de Friedrich et Knipping ... sans mentionner les rayons X pour ne pas s'opposer à son père !

The corresponding wave-length is $2d \cos \theta$ where d is the perpendicular distance between successive planes. Now θ is the angle of incidence, therefore $\cos \theta = n$ above. It is easier to find the intercepts which successive planes cut off on the z axis, than their perpendicular distance apart. Calling these intercepts l , then

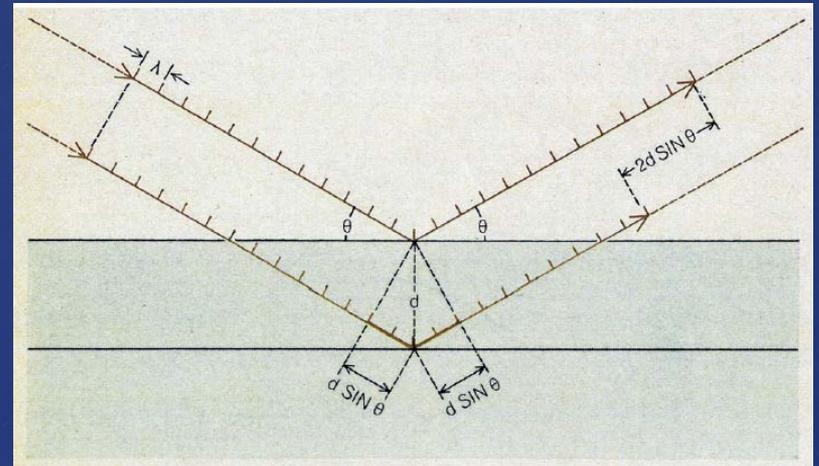
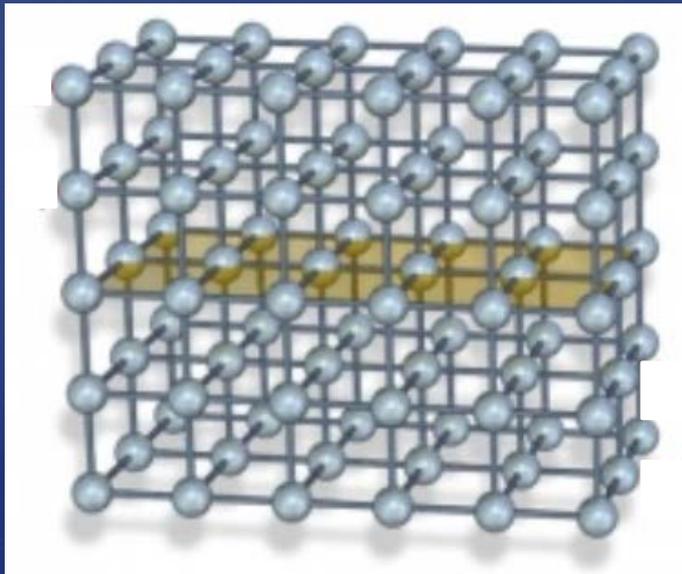
$$\lambda = 2d \cos \theta = 2 \cdot l \cos \theta \cdot \cos \theta = 2ln^2.$$

$$\text{Loi de Bragg : } 2 d \sin(\theta) = n\lambda$$

LA DIFFRACTION DES RAYONS X : la loi de Bragg

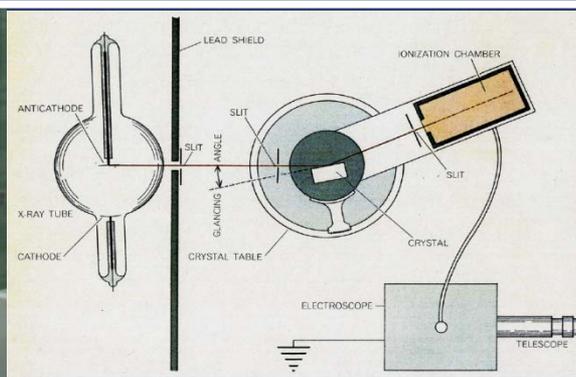
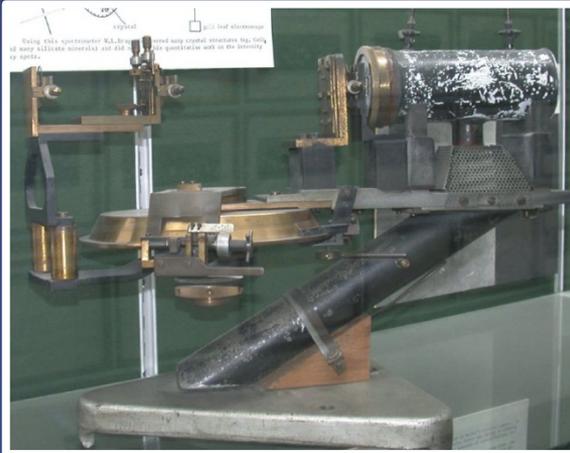


Loi de Bragg : $2 d \sin(\theta) = n\lambda$

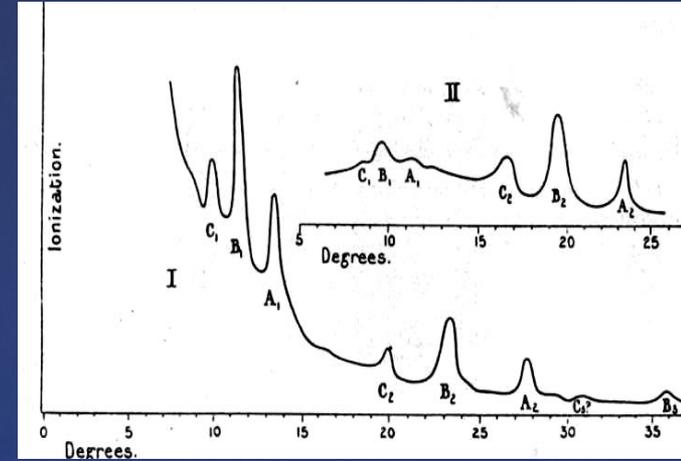


LA DIFFRACTION X : structure atomique des cristaux

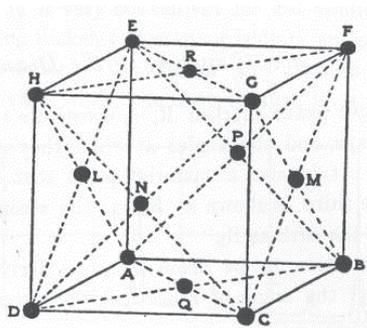
W.H. Bragg et W.L. Bragg, 1913



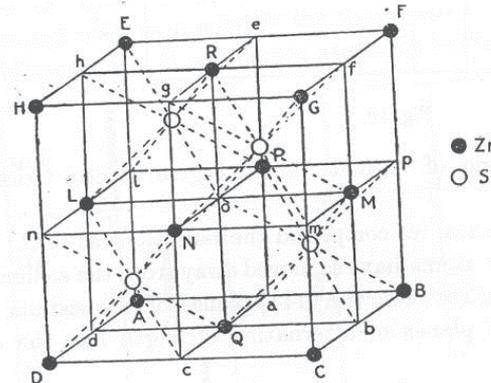
De "X-ray crystallography", W. L. Bragg
Sci. Am. 1968



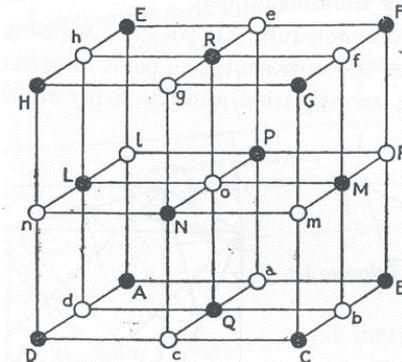
Diamant (C)



Zinc blende (ZnS)



Chlorure de sodium (NaCl)



La diffraction X permet d'accéder à la structure des cristaux (distances $< 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

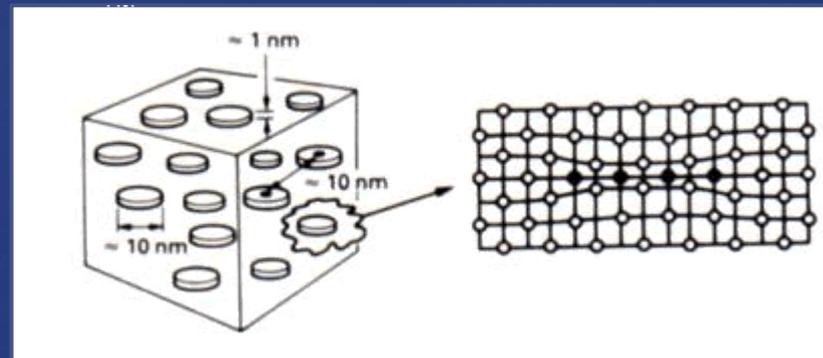
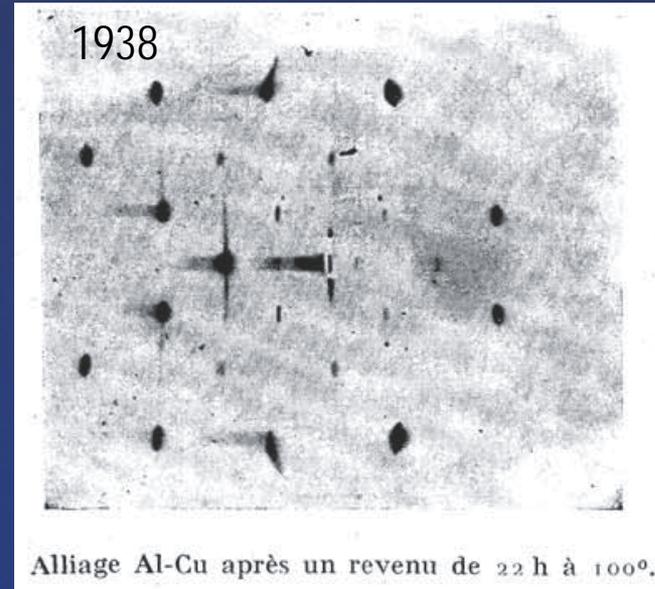
L'ECART A L'ORDRE : diffusion diffuse

Diffusion diffuse

Les zones de Guinier-Preston dans les alliages

André Guinier

L'un des trois fondateurs du LPS
Fondateur du groupe ODMC
(1911-2000)



Durcissement structural : duralumin, etc

L'ECART A L'ORDRE : diffusion diffuse

Les cristaux sont comme les humains

LE MONDE SCIENCE ET TECHNO | 07.02.2013

"Ce sont leurs défauts qui les rendent intéressants." Par cette boutade, le physicien anglais Frederick Charles Frank (1911-1998) énonçait l'importance du rôle des imperfections d'un matériau sur ses propriétés.

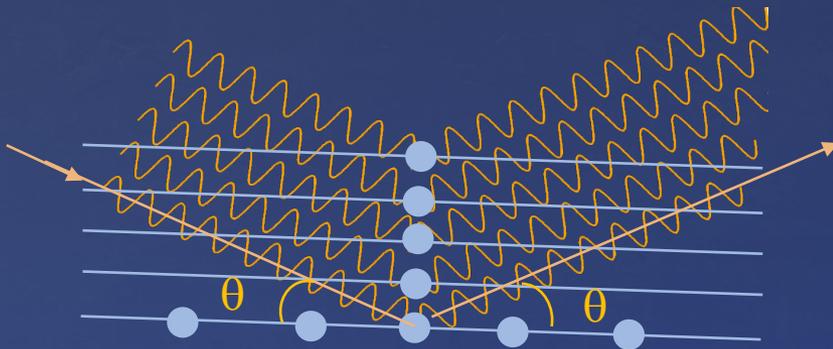


Couleur rouge du rubis :
présence d'ions chrome dans le cristal d'oxyde d'aluminium

Larousse, **CRISTALLOGRAPHIE** : science de la matière cristallisée, des lois qui président à sa formation, de sa structure, de ses propriétés géométriques, physiques et chimiques.

Plus largement : **relation structure (y compris désordonnée, avec défauts) - propriétés**

LA DIFFRACTION X : Transformée de Fourier



A partir d'une représentation de V. Favre-Nicolin

*Joseph Fourier, savant français
1768-1830*



La somme de ces sinusoides :
une transformée de Fourier

$$A(\vec{Q}) \propto \int \rho(\vec{R}) \exp(-i \cdot \vec{Q} \cdot \vec{R}) d\vec{R}$$

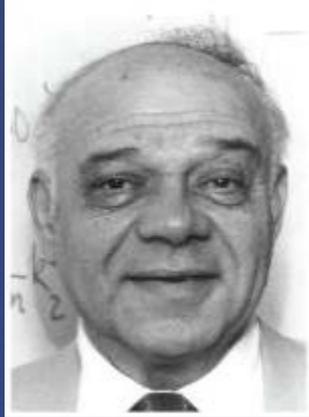
Un détecteur mesure une énergie :
le « module carré » de la transformée de Fourier
et ... **on perd l'information sur la phase**

$$I(\vec{Q}) \propto |A(\vec{Q})|^2$$

LA DIFFRACTION X : on a perdu la phase !

*Jerome Karle
(né en 1918)*

Physico-chimiste américain



A_K, φ_K

*Herbert Aaron Hauptman
(1917-2011)*

Mathématicien américain



A_H, φ_H

Prix Nobel de Chimie en 1985
pour « leurs réalisations
remarquables dans la mise
au point de méthodes
directes de détermination des
structures cristallines ».

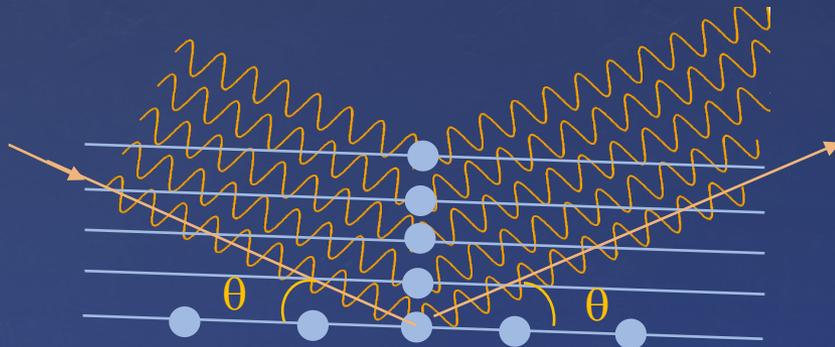
A_K, φ_H



A_H, φ_K



LA DIFFRACTION X : Transformée de Fourier



A partir d'une représentation de V. Favre-Nicolin

La somme de ces sinusoides :
une transformée de Fourier

$$A(\vec{Q}) \propto \int \rho(\vec{R}) e^{-i\vec{Q}\vec{R}} d\vec{R}$$

$$I(\vec{Q}) \propto |A(\vec{Q})|^2$$

$$\begin{array}{l} \text{Loi de Bragg : } 2d \sin(\theta) = n\lambda \\ \longrightarrow \quad Q = 4\pi \sin(\theta) / \lambda \end{array}$$

$$Q = 2\pi / d$$

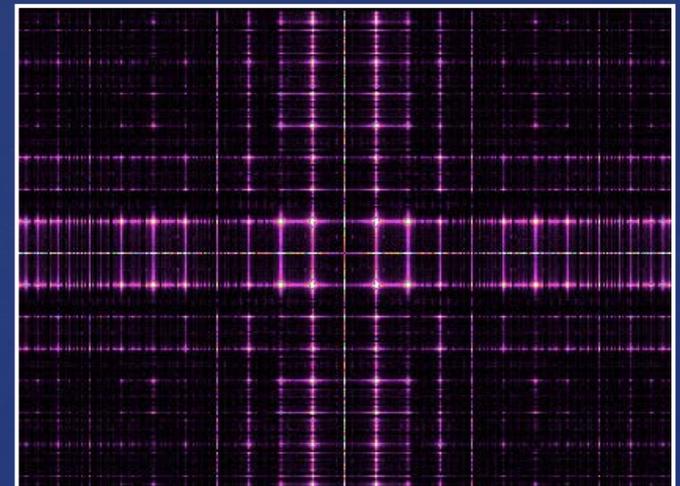
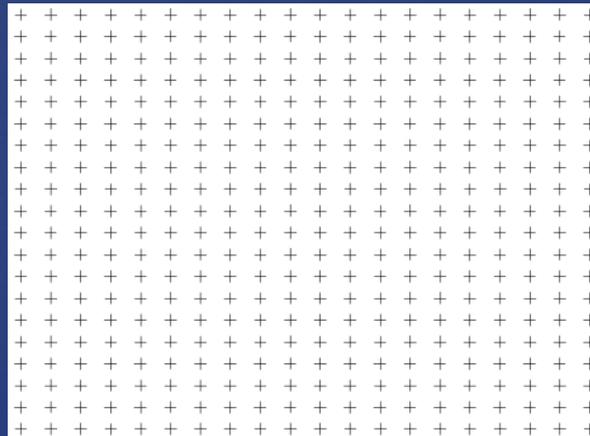
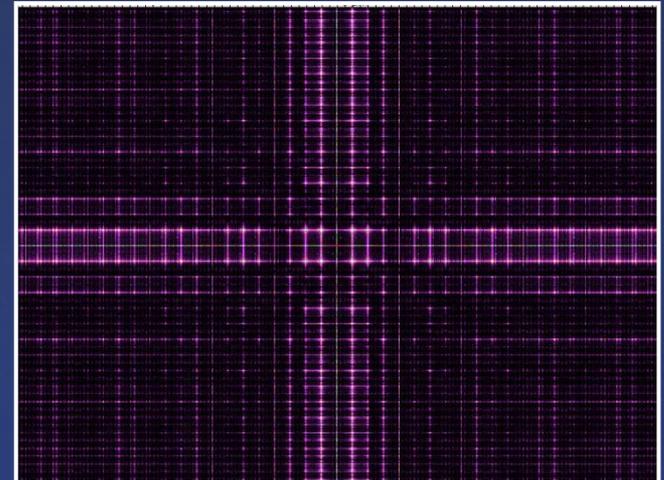
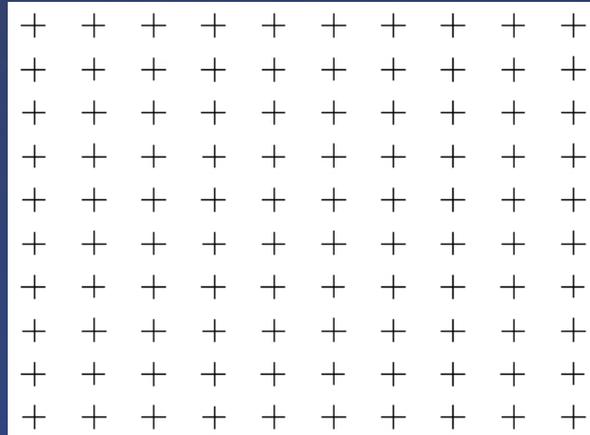
Q est l'inverse d'une distance :
avec la diffraction, on travaille dans...

L'ESPACE RECIPROQUE !

LA DIFFRACTION : espace réciproque

Ce qui est loin devient proche !

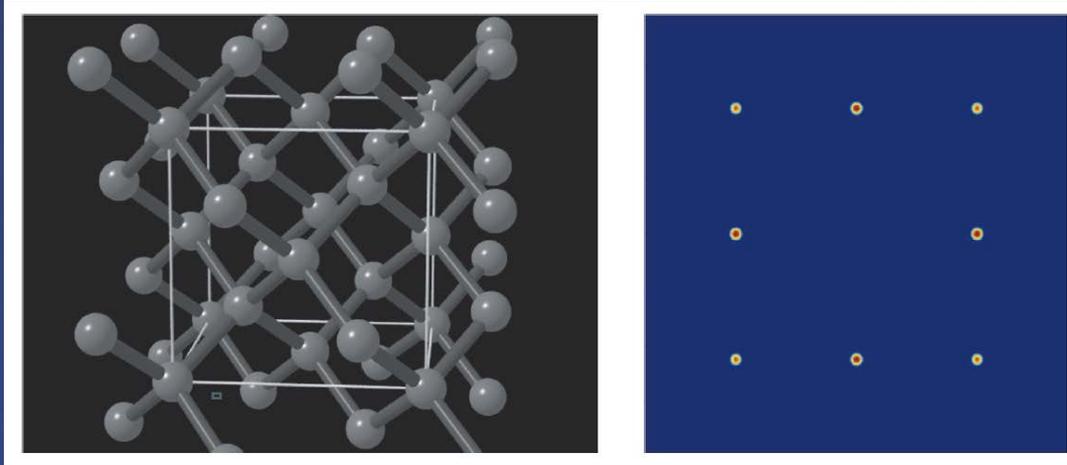
Gwyddion



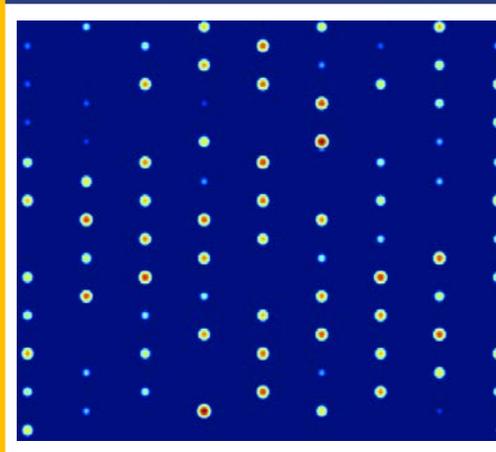
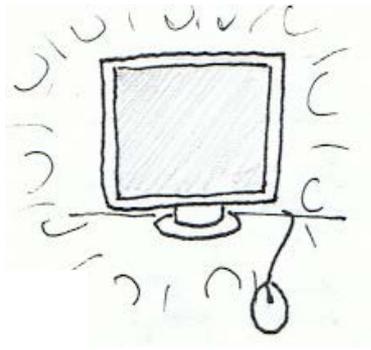
Ordre : points dans l'espace réciproque
Désordre : intensité plus « étalée »

LA DIFFRACTION : espace réciproque

Les symétries sont préservées...



Diamant



Mais la molécule et le cristal peuvent être peu symétriques...

Voyage dans le
Cristal

Alice et Joseph au pays du cristal

ou le Monde d'Alice et le Monde de Joseph

Joseph, comment peut-on voir
la **structure** des cristaux ?

En étudiant leur **diffraction**
avec des rayons X ?



Joseph Fourier

Alice et Joseph
au pays du cristal

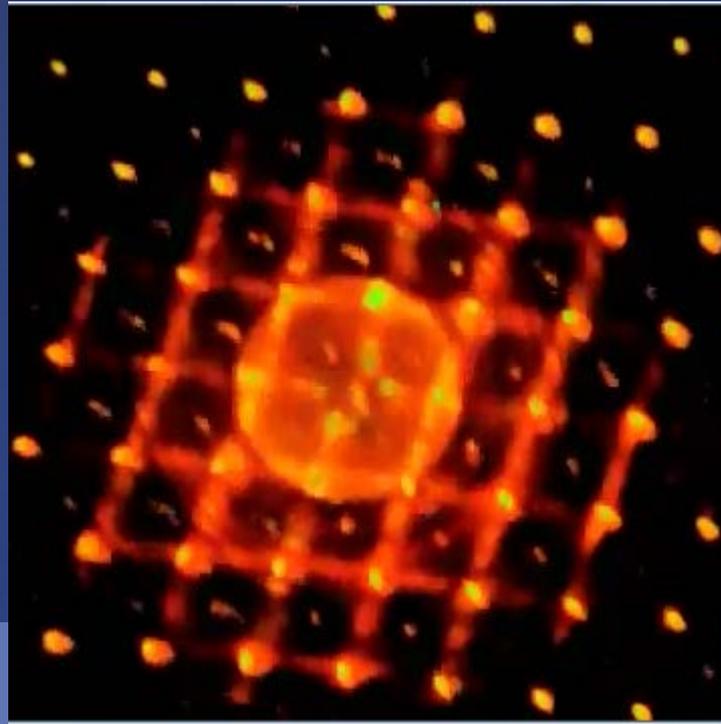


Dailymotion

Animation proposée par V. Favre-Nicolin UJF
& CEA-Grenoble & J-L. Hodeau, Institut Neel-CNRS

LA DIFFRACTION : espace réciproque

Sur youtube !



FLUVORE_xray_diffraction_diffuse_scattering_in_3d_3f2da.avi

4. La cristallographie

aux 20^{ème} et 21^{ème} siècles

Quelques grandes découvertes

LA CRISTALLOGRAPHIE aux 20^{ème} et 21^{ème} siècles

<http://www.iucr.org/people/nobel-prize>

- 1901 Physique W. C. Röntgen - *Découverte des rayons X*
- 1914 Physique M. Von Laue - *Diffraction des rayons X par les cristaux*
- 1915 Physique W. H. Bragg and W. L. Bragg - *Utilisation des rayons X pour déterminer une structure cristalline*
- 1917 Physique C. G. Barkla – *Découverte de la radiation de Röntgen caractéristique des éléments*
- 1929 Physique L.-V. de Broglie – *La nature ondulatoire de l'électron*
- 1936 Chimie P. J. W. Debye – *Pour ses contributions à la connaissance de la structure moléculaire via ses études sur les moments dipolaires et la diffraction des rayons X et des électrons dans les gaz*
- 1937 Physique C. J. Davisson and G. Thompson - *Diffraction des électrons par les cristaux*
- 1946 Chimie J. B. Sumner - *Pour sa découverte de la cristallisation des enzymes*
- 1954 Chimie L. C. Pauling - *Pour sa recherche sur la nature de la liaison chimique et son application pour élucider la structure de substances complexes*
- 1962 Chimie J. C. Kendrew and M. Perutz – *Pour leurs études de la structure de protéines globulaires*
- 1962 Physiologie ou Médecine F. Crick, J. Watson and M. Wilkins - *Structure hélicoïdale de l'ADN*
- 1964 Chimie D. Hodgkin - *Structure de diverses substances biochimiques incluant la vitamine B12*
- 1972 Chimie C. B. Anfinsen – *Repliement des chaînes de protéines*
- 1976 Chimie W. N. Lipscomb - *Structure des boranes*

LA CRISTALLOGRAPHIE : aux 20^{ème} et 21^{ème} siècles

1982 Chimie

A. Klug – *Développement de la cristallographie par microscopie électronique et découverte de la structure de complexes de protéines-acide nucléique biologiquement importants*

1985 Chimie

H. Hauptman and J. Karle - *Développement des méthodes directes pour la détermination des structures cristallines*

1988 Chimie

J. Deisenhofer, R. Huber and H. Michel – *Pour la détermination de la structure à trois dimensions d'un centre de réaction de photosynthèse*

1991 Physique

P.-G. de Gennes – *Les méthodes pour découvrir l'ordre dans des systèmes simples peuvent être appliquées aux polymères et aux cristaux liquides*

1992 Physique

G. Charpak – *Découverte d'un détecteur multifils proportionnel*

1994 Physique

C. Shull and N. Brockhouse – *Diffraction des neutrons*

1996 Chimie

R.Curl, H. Kroto and R. Smalley – *Découverte des fullerènes, nouvelle forme du carbone*

1997 Chimie

P. D. Boyer, J. E. Walker and J. C. Skou – *Elucidation du mécanisme enzymatique qui sous-tend la synthèse de l'ATP et découverte d'une enzyme pour le transport ionique*

2003 Chimie

R. MacKinnon – *Canaux à potassium*

2006 Chimie

R. D. Kornberg – *Etudes de la base moléculaire de la transcription eucariotique*

2009 Chimie

V. Ramakrishnan, T. A. Steitz and A. E. Yonath – *Etudes de la structure et de la fonction du ribosome*

2010 Physique

A. Geim and K. Novoselov – *Pour leurs expériences innovantes sur le graphène bi-dimensionnel*

LA CRISTALLOGRAPHIE aux 20^{ème} et 21^{ème} siècles

2011 Chimie

D. Shechtman – *Pour la découverte des quasicristaux*

2012 Chimie

R. J. Lefkowitz and B. K. Kobilka – *Pour leurs études sur les récepteurs couplés à la protéines G*

2013 Chimie

M. Karplus, M. Levitt and A. Warshel - *Développement de modèles multi-échelles de systèmes chimiques complexes*

Qui était Rosalind FRANKLIN ?



*« Rosalind Franklin, the dark lady of DNA »
par Brenda Maddox, chez HarperCollins*

Enfance et études : « trop intelligente » ?

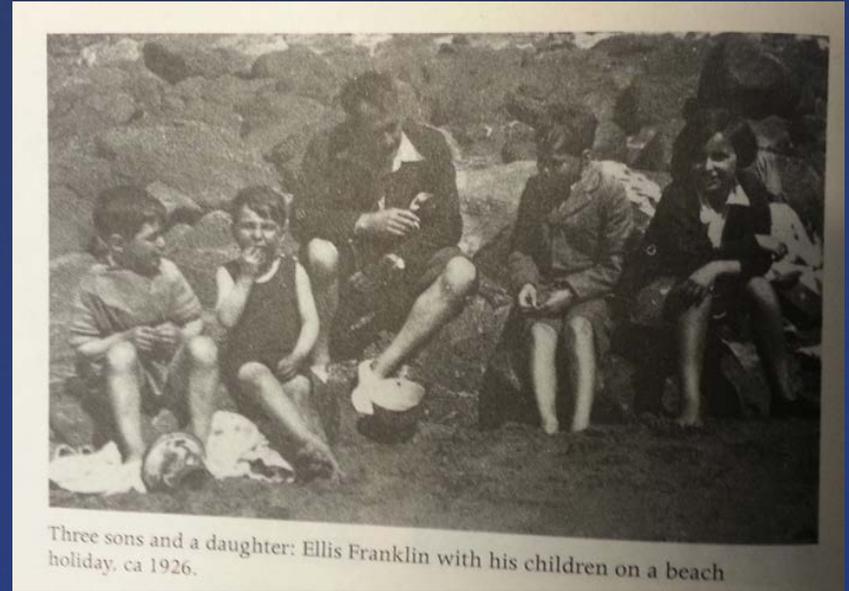
- Née à Londres le 25 juillet 1920, dans une famille anglaise juive et aisée.
- Ecole de filles « St Paul's Girl School » de très bon niveau .

R. Franklin décide à 12 ans de faire une carrière scientifique malgré l'opposition de son père.

Dans sa famille, femmes → bénévoles auprès d'œuvres de bienfaisance.

- 1938 : Newnham College, établissement d'enseignement supérieur pour les femmes à l'université de Cambridge.
Diplômée en 1941.

Sa tante écrit de Rosalind Franklin à 6 ans :
« Rosalind is alarmingly clever - she spends all her time doing arithmetic for pleasure, & invariably gets her sums right .»



De la biographie écrite par Brenda Maddox

Une chercheuse remarquable

- 1945 : obtient son **doctorat**. A étudié chimie-physique et structures des **carbones** & participé à l'effort de guerre.
- 1947-1950 : Laboratoire central des services chimiques de l'État en France → **diffraction des rayons X**.
- 1951-1953 : King's College, Londres. Travaux novateurs sur l'**ADN**.
- Mi-1953 → 1958. Birbeck College. Travaux pionniers en **cristallographie des virus**.
1957 : choisie pour créer un laboratoire à Cambridge, la « mecque » de la biologie moléculaire.



Réputation scientifique internationale sur les trois sujets qu'elle a étudiée :
les carbones, l'ADN, les virus (virus de la mosaïque du tabac).

« As a scientist Miss Franklin was distinguished by extreme clarity and perfection in everything she undertook...she proved to be an admirable director of a research team and inspire those who worked with her to reach the same high standard »

J.D. Bernal, obituary for Franklin, revue Nature, 1958

Une femme passionnée

Passion pour les voyages, la randonnée,
les bons repas et la politique.

Des liens d'amitié très forts, ses amis la trouvaient
brillante, fascinante et spirituelle.

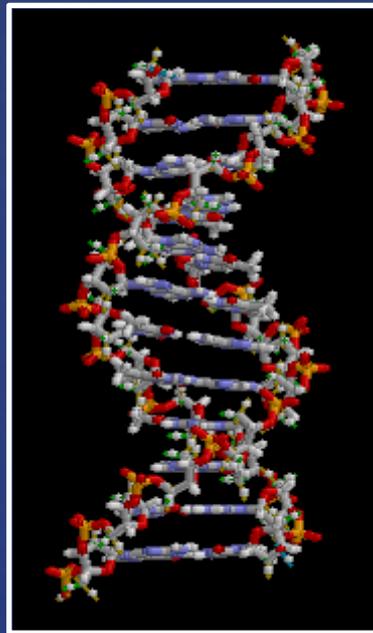
Atteinte d'un cancer en 1956, elle meurt en 1958,
à 37 ans.



*« The measure of her success lies in the strength of her friendships,
the devotion of her colleagues,...
and a legacy of discovery that would do credit to a scientific career twice its length »*

Brenda Maddox, dans son livre « Rosalind Franklin, the dark lady of DNA »

La structure de l'ADN dévoilée



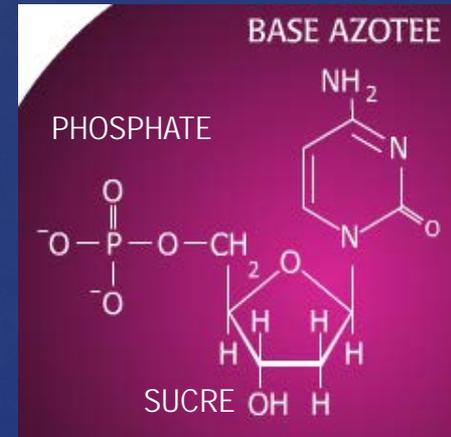
LA STRUCTURE DE L'ADN

Les pièces du puzzle

avant la découverte de la structure de l'ADN en 1953



- L'acide désoxyribonucléique (ADN), présent dans toutes les cellules vivantes, est formé de **phosphates**, de **sucres désoxyribose** et de **4 bases azotées** : **cytosine (C)**, **adénine (A)**, **thymine (T)** et **guanine (G)**.



<http://www.medecine.unige.ch/enseignement/dnaftb/15/concept/index.html>

Friedrich Miescher (1871) & Phebus Levene (début XXème siècle)

- ADN : **support de l'hérédité** (1944, Oswald Avery)
- Bases peuvent être perpendiculaires aux sucres (Furberg, 1950 & 1952)
- **A=T** et **G=C** (Chargaff, 1952)

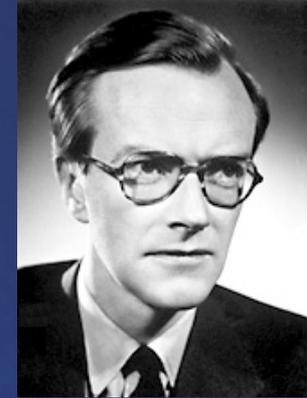
Les protagonistes de la course à la découverte...

Rosalind Elsie Franklin
(1920-1958)



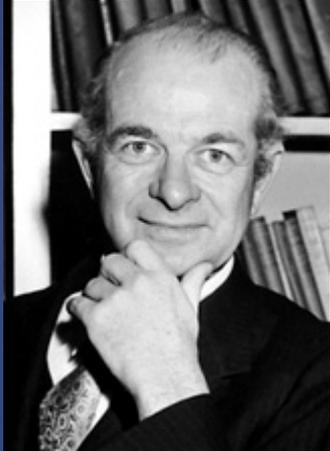
King's College, Londres

Maurice Hugh Frederick Wilkins
(1916-2004)



King's College, Londres

Linus Carl Pauling
(1901-1994)



USA

A manqué de peu la
résolution de la structure
de l'ADN.
Prix Nobel de Chimie
en 1954.
Prix Nobel de la paix en
1962.

James Dewey Watson
Né en 1928



Cavendish Laboratory, Cambridge

Début des années 1950



Francis Harry Compton Crick
(1916-2004)



Cavendish Laboratory, Cambridge

Arrivée de Rosalind Franklin à King's College

R. Franklin souhaite appliquer la diffraction des rayons X aux matériaux biologiques
→ poste au King's College à Londres à partir du 1^{er} janvier 1951.

Lettre de J.T. Randall, directeur de King's College, à Rosalind Franklin, le 4 décembre 1950

After very careful consideration and discussion with the senior people concerned, it now seems that it would be a good deal more important for you to investigate the structure of certain biological fibres in which we are interested, both by low and high angle diffraction, rather than to continue with the original project of work on solutions as the major one.

these will not necessarily be confined to X-ray optics. It will probably involve microscopy in general. This means that as far as the experimental X-ray effort is concerned there will be at the moment only yourself and Gosling, together with the temporary assistance of a graduate from Syracuse, Mrs. Heller. Gosling, working in conjunction with Wilkins, has already found that fibres of deoxyribose nucleic acid derived from material provided by Professor Signer of Bern gives remarkably good fibre diagrams. The fibres are strongly negatively



Contexte pour R. Franklin à King's College

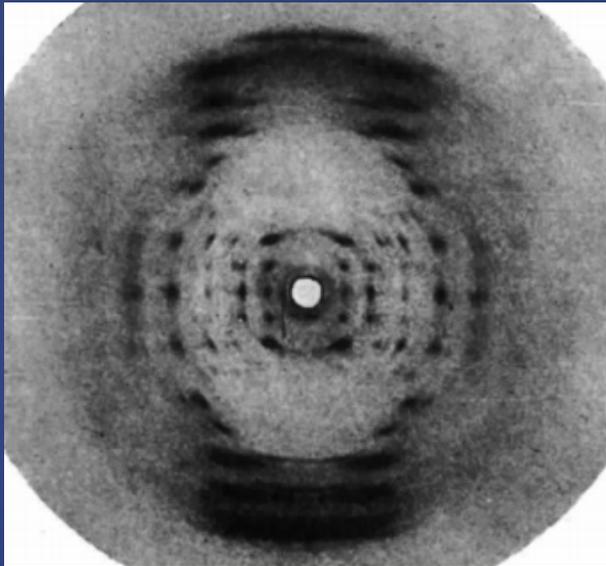
- Situation de conflit avec Maurice Wilkins.
- Institution très masculine. Les femmes chercheurs n'étaient pas admises au restaurant « club » du Collège. R. Franklin est jugée « trop française » dans son habillement, ses centres d'intérêts intellectuels et son tempérament. Son caractère « entier » quand il s'agit de défendre une idée est mal perçu par ses collègues.

Travaux de Rosalind Franklin au King's College

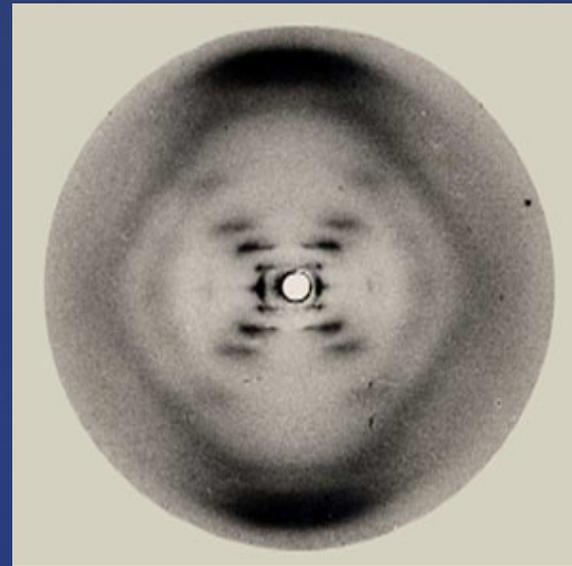
1951-1953 : Rosalind Franklin étudie l'ADN par diffraction des rayons X avec un étudiant en thèse, Raymond Gosling.

- Mise en évidence, pour la première fois, de l'existence de deux formes d'ADN.

Clichés de diffraction X par des fibres d'ADN (Acta Crystallographica, 1953)



Forme A



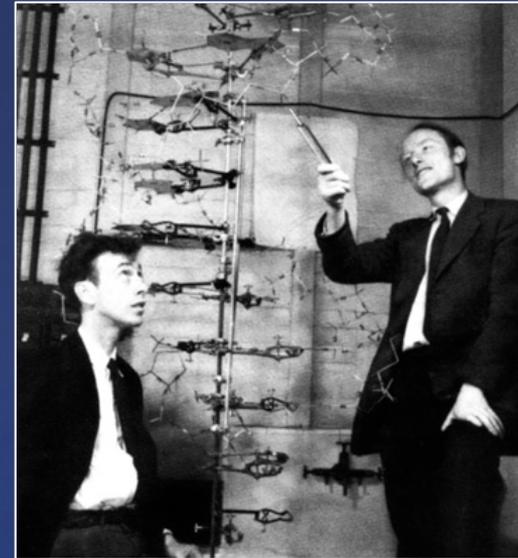
Forme B

- Cahier de laboratoire : en mars 1953, R. Franklin étudie la structure de la forme B et penche pour une structure en double-hélice.

Crick et Watson au Cavendish Laboratory

Au Cavendish Laboratory à Cambridge, Francis Crick et James Watson, cherchent aussi à comprendre la structure de l'ADN, de manière plus théorique.

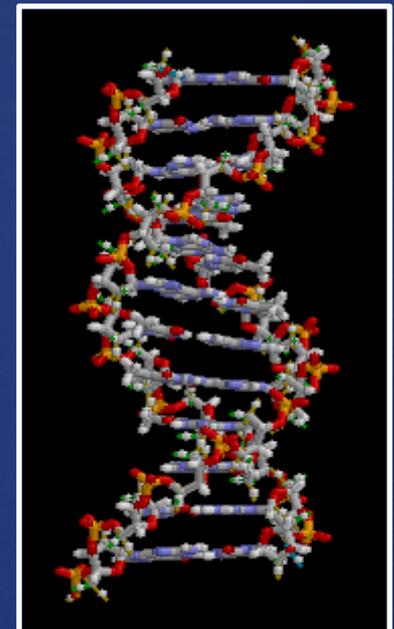
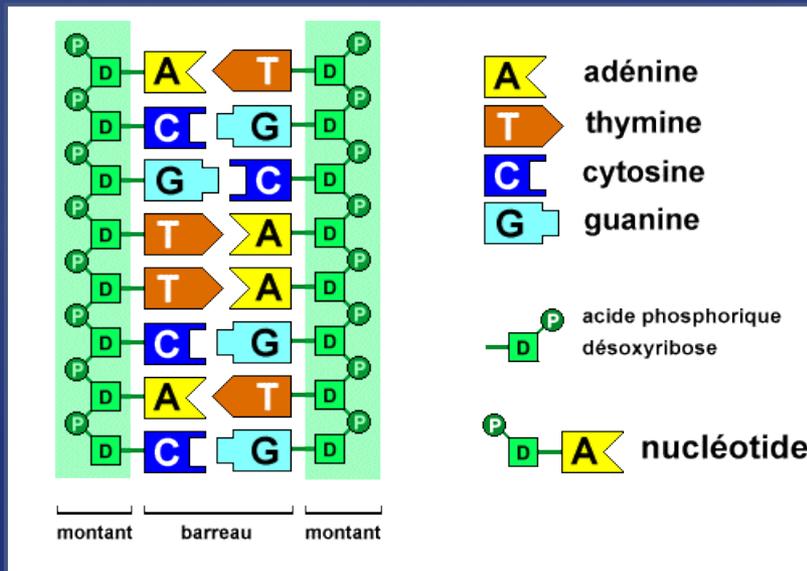
Ils publient la structure en double hélice de l'ADN dans la revue Nature en avril 1953.



MOLECULAR STRUCTURE OF NUCLEIC ACIDS

A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid

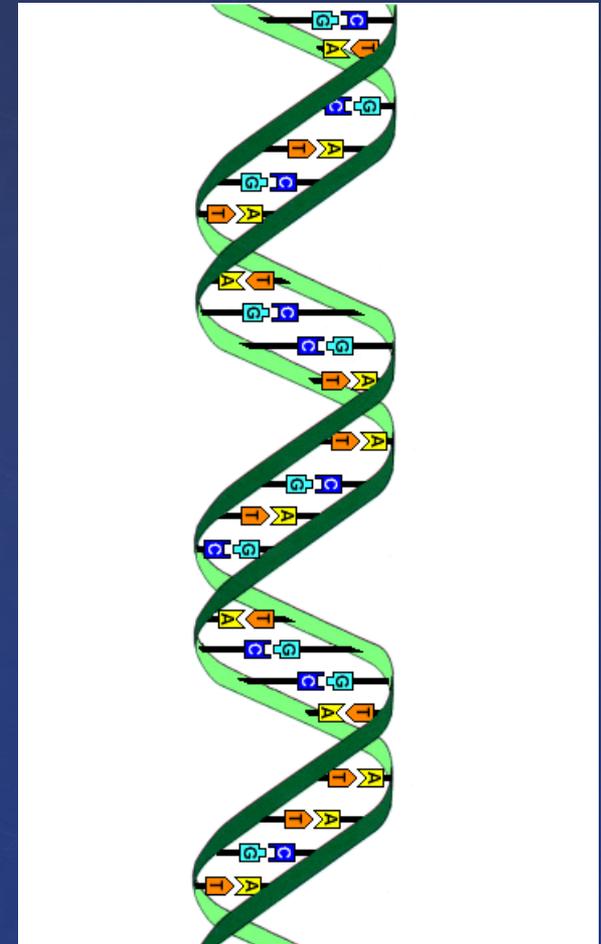
WE wish to suggest a structure for the salt of deoxyribose nucleic acid (D.N.A.). This structure has novel features which are of considerable biological interest.



Une solution élégante & la vision des implications en génétique

It has not escaped our notice that the specific pairing we have postulated immediately suggests a possible copying mechanism for the genetic material.

http://espace-svt.ac-rennes.fr/cartelec/cartelec_lyc/premiere_s/vegetal/adn/replic1.htm



« *Toute loi physique doit être empreinte de beauté mathématique* »

« *Une théorie mathématiquement belle a plus de chances d'être correcte qu'une théorie inélégante* »

Paul Dirac

L'un des pères de la mécanique quantique

La reconnaissance des travaux en sciences

L'éthique interne de la recherche : ne pas communiquer sans leur accord les résultats non encore publiés de collègues & reconnaître à leur juste valeur les contributions de collègues.

Un bel exemple, dans le cas des théories des symétries des cristaux (groupes de Schoenflies-Federov). De Schoenflies à Fedorov : « *Il m'est particulièrement agréable de ne pas demeurer isolé avec ma théorie... Avec plaisir, je vous en cède la priorité* » (M. Sénéchal dans Historical Atlas of Crystallography)

Découverte de la structure de l'ADN : l'éthique malmenée !

- Max Petrucci, qui recevra le prix de chimie en 1962, membre d'un comité d'experts chargé par le Conseil de la Recherche Médicale d'examiner les travaux de King's College, a transmis à Crick une copie du rapport interne de 1952 de R. Franklin
- En février 1953, M. Wilkins aurait aussi montré le cliché de l'ADN-B de Franklin, à son insu, à Watson.

atomic distances. We have also been stimulated by a knowledge of the general nature of the unpublished experimental results and ideas of Dr. M. H. F. Wilkins, Dr. R. E. Franklin and their co-workers at

Le prix Nobel en 1962



Francis Harry
Compton Crick



James Dewey
Watson

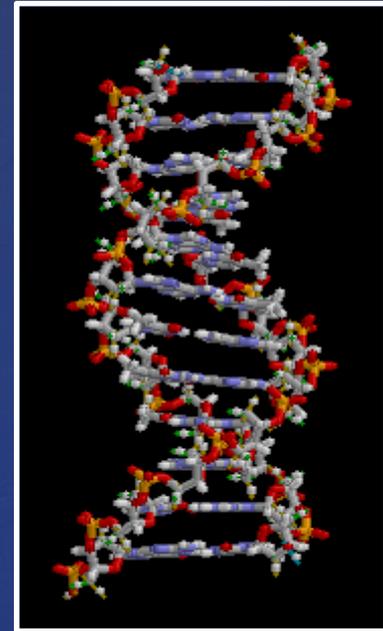
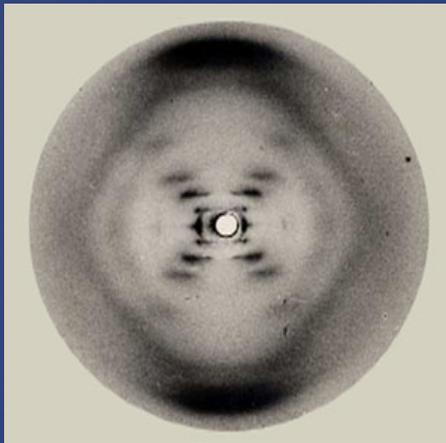


Maurice Hugh
Frederick Wilkins

The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1962 was awarded jointly to Francis Harry Compton Crick, James Dewey Watson and Maurice Hugh Frederick Wilkins *"for their discoveries concerning the molecular structure of nucleic acids and its significance for information transfer in living material"*.

Rosalind Franklin aurait-elle reçue ce prix Nobel si elle avait encore été en vie ?

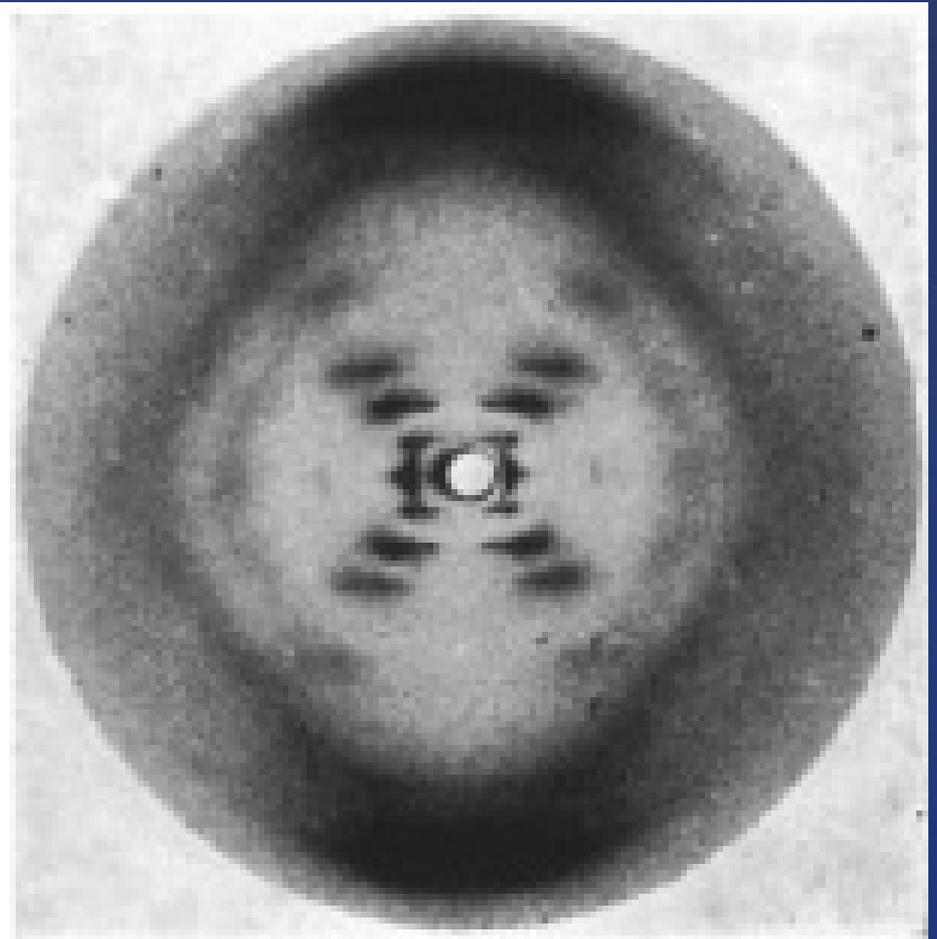
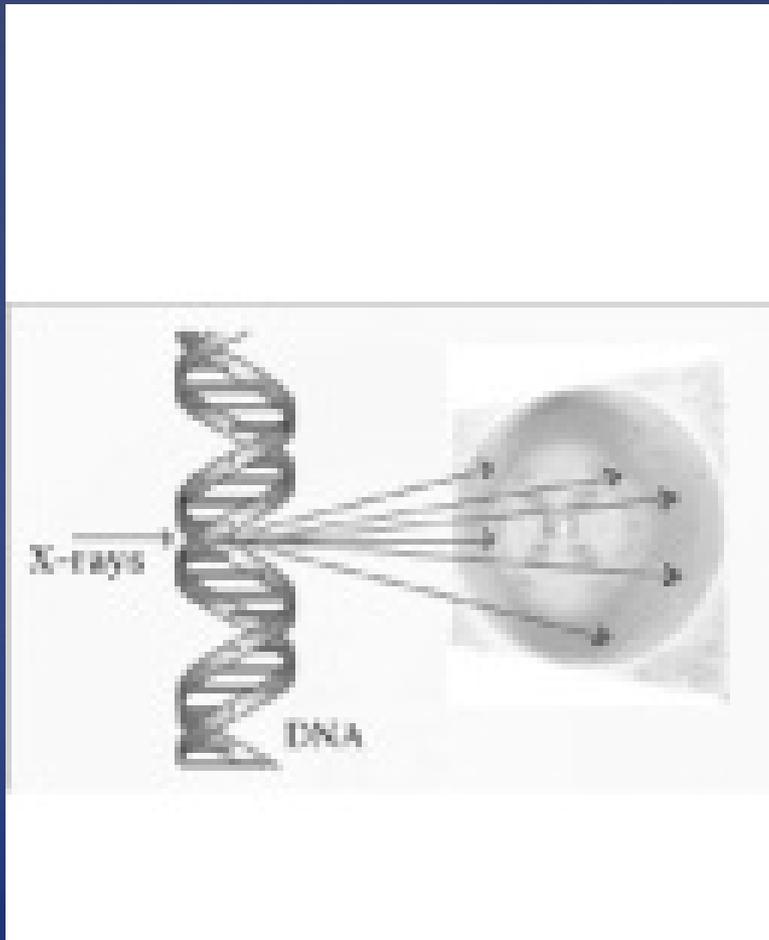
Du cliché de diffraction des rayons X à la structure ?

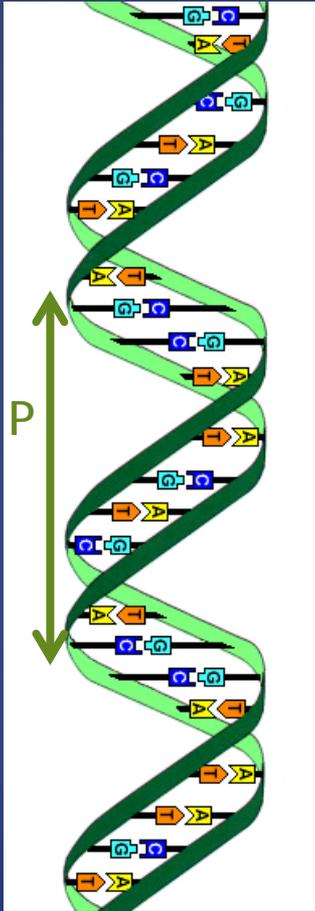


« Une fascination pour la double hélice,
simulations optiques de la diffraction des rayons X par l'ADN », par Amand Lucas

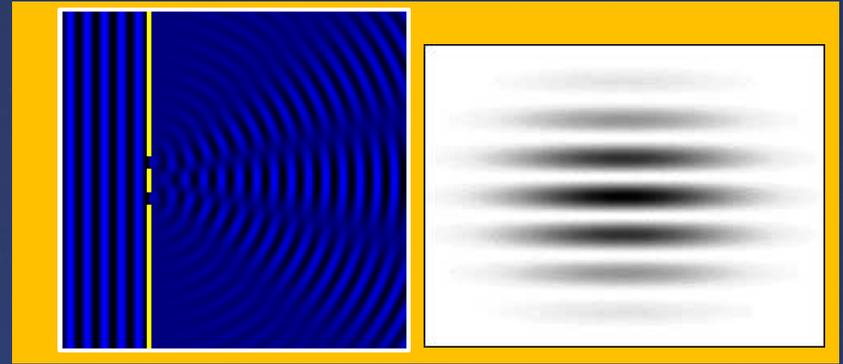
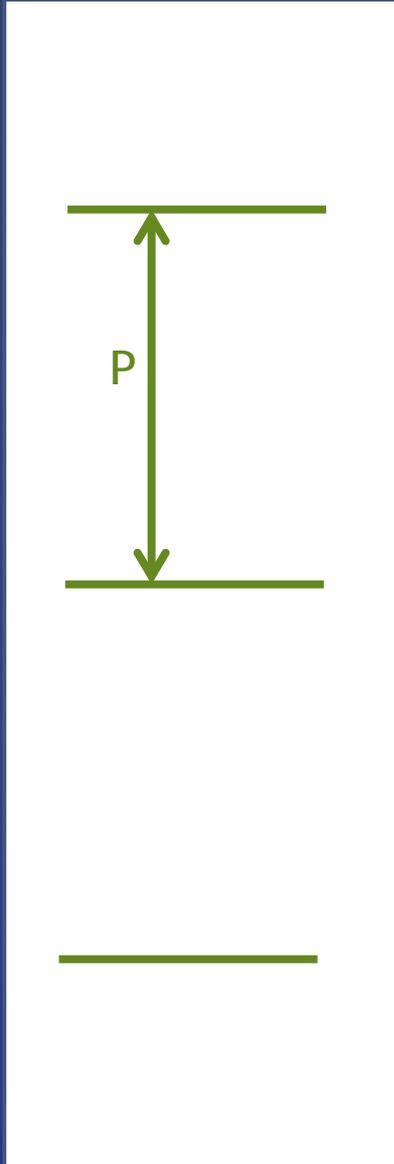
http://www.aicr2014.fr/images/documents/Fascination_ADN.pdf

La diffraction des rayons X par une fibre d'ADN-B

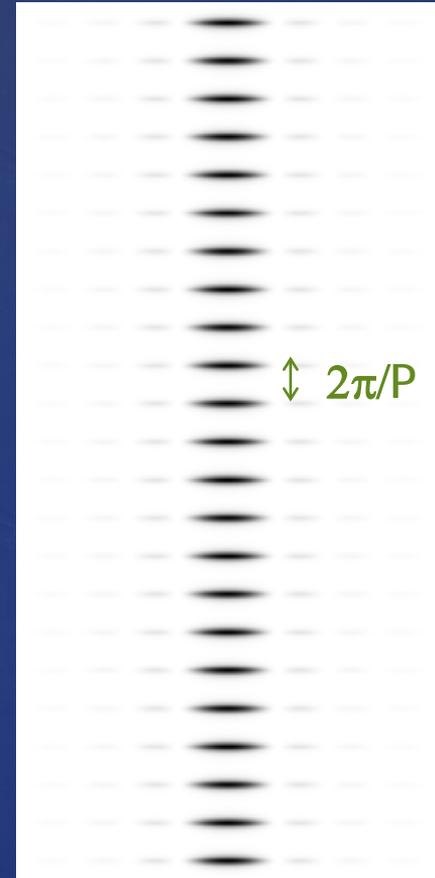


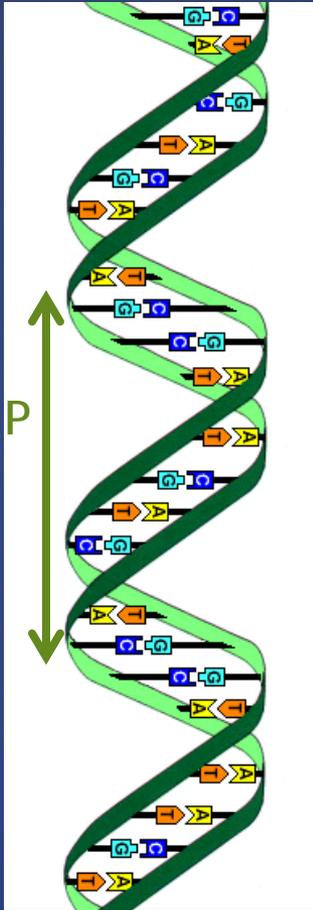


$P=3.4\text{nm}$
 $R\approx 2\text{nm}$

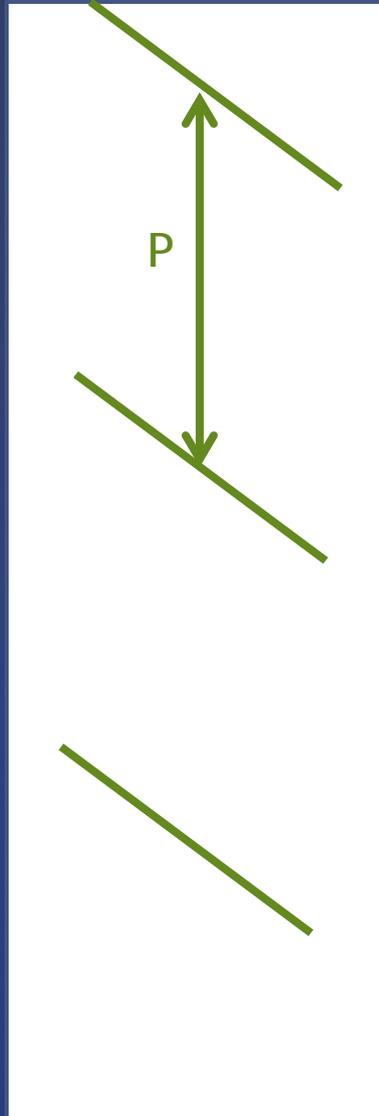


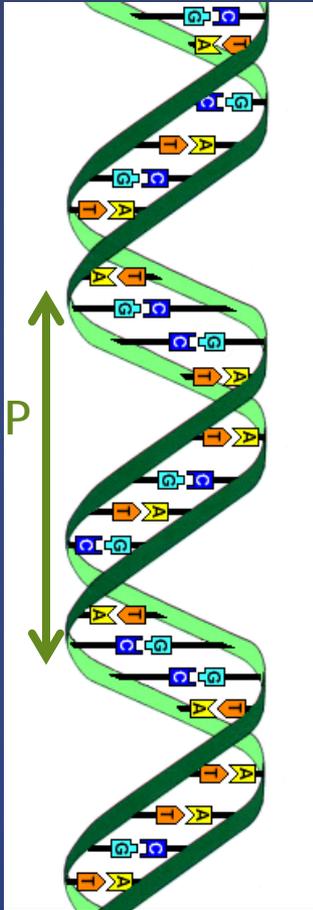
Calcul
analytique



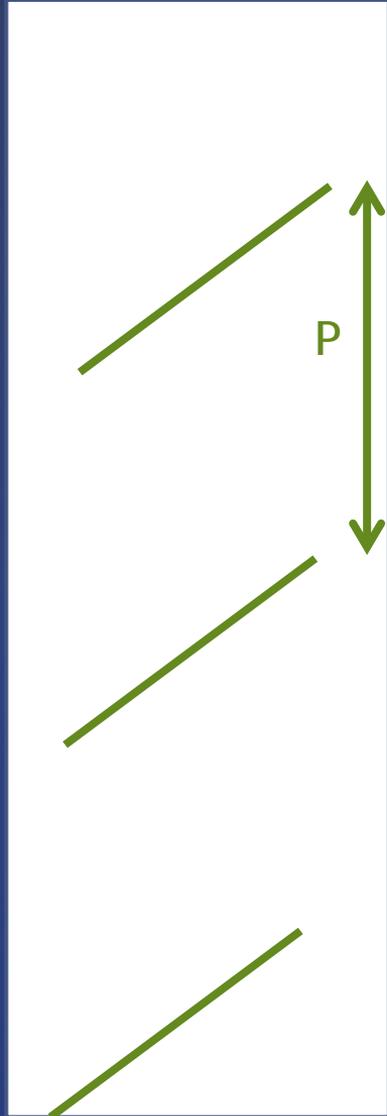


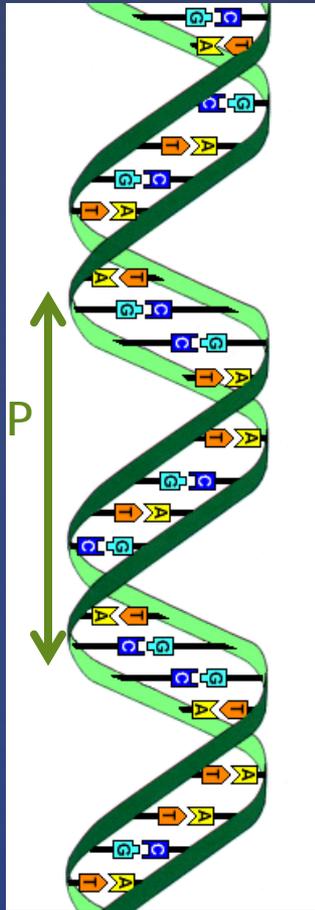
$P=3.4\text{nm}$
 $R\approx 2\text{nm}$



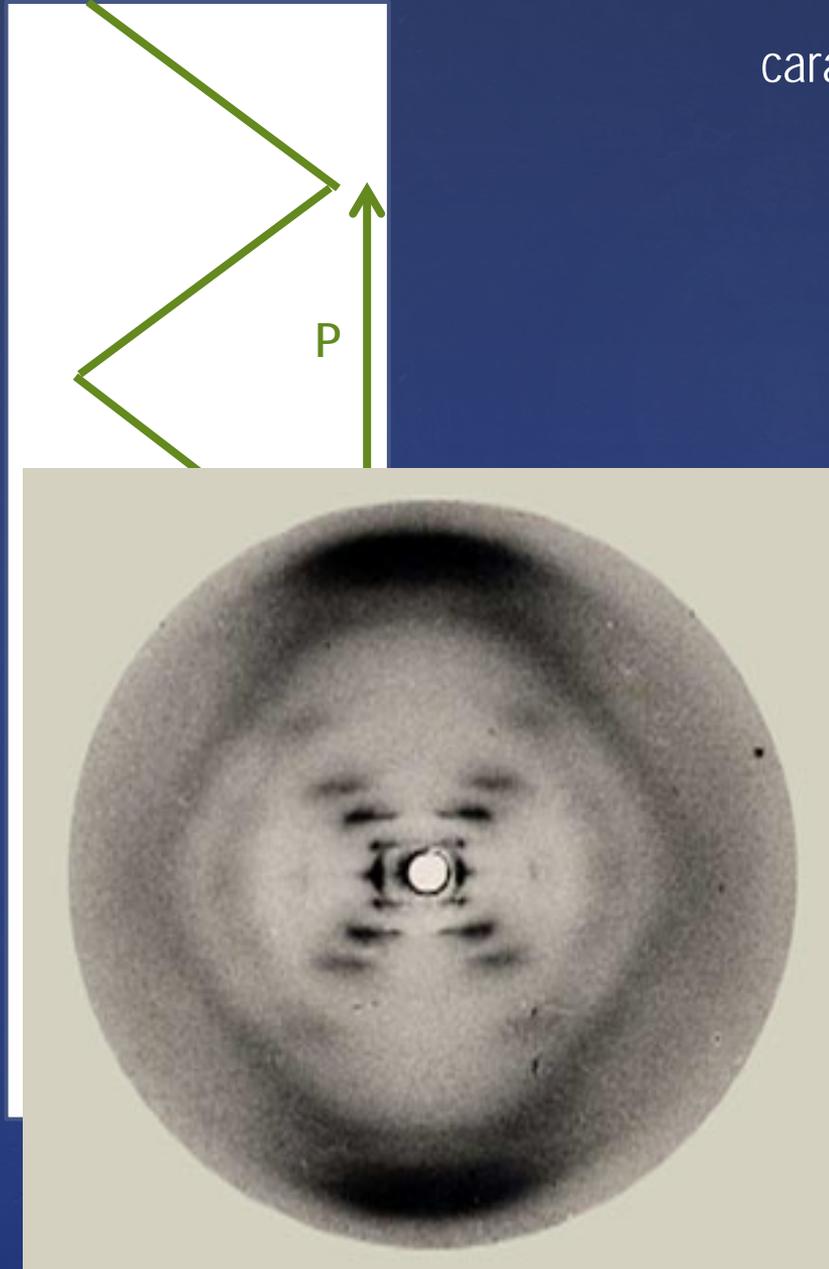


$P=3.4\text{nm}$
 $R\approx 2\text{nm}$





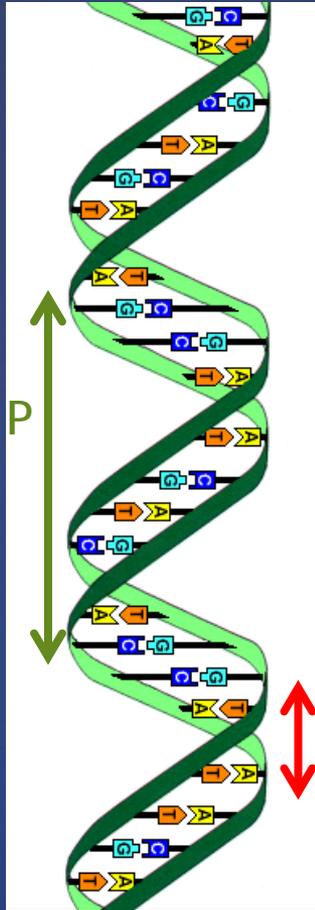
$P=3.4\text{nm}$
 $R\approx 2\text{nm}$



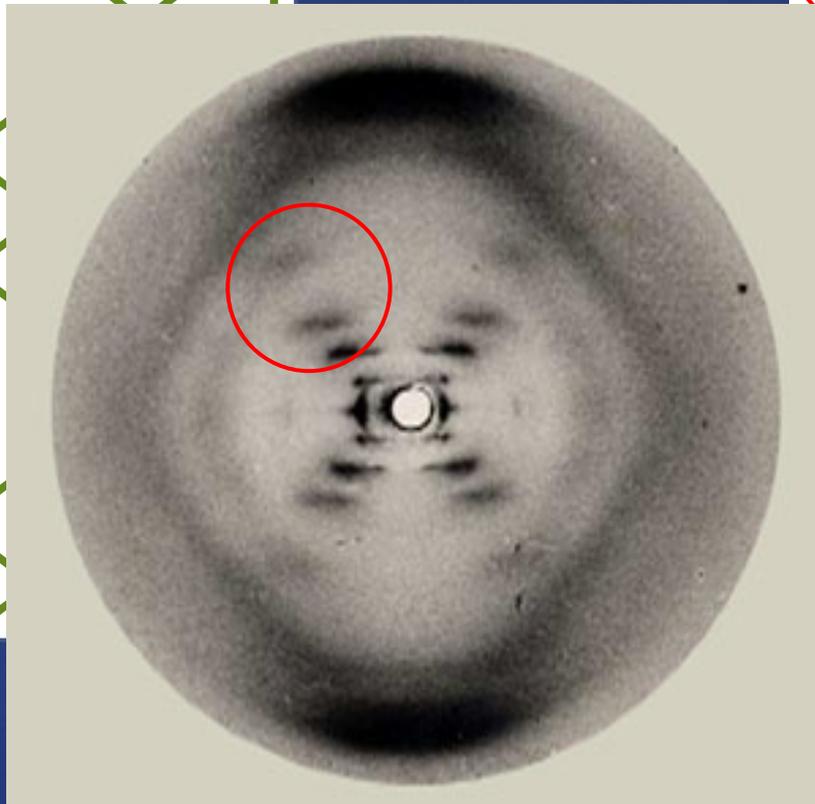
Croix de Saint-André
caractéristique de la diffraction
par une hélice

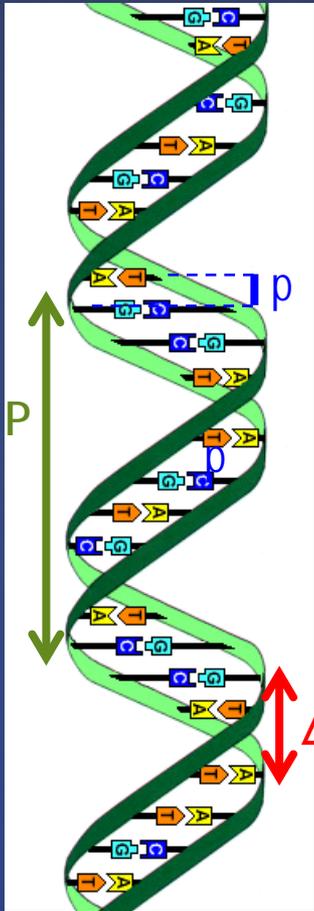
$\updownarrow 2\pi/P$

Positions relatives
des 2 hélices
 $\Delta = 3P/8$

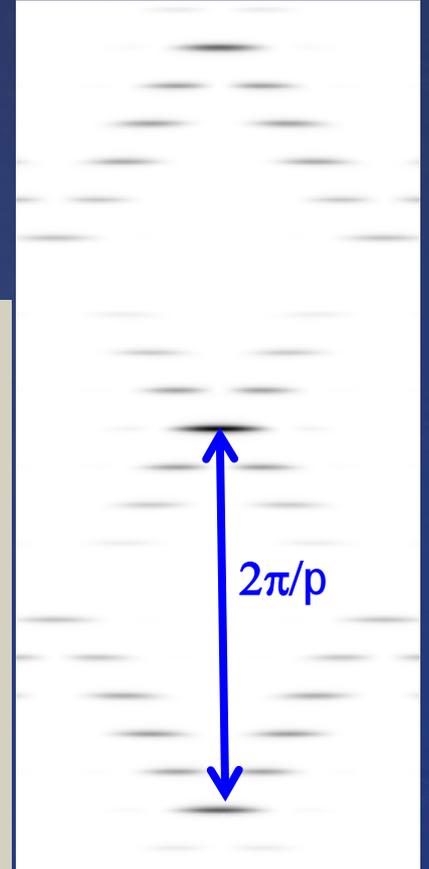
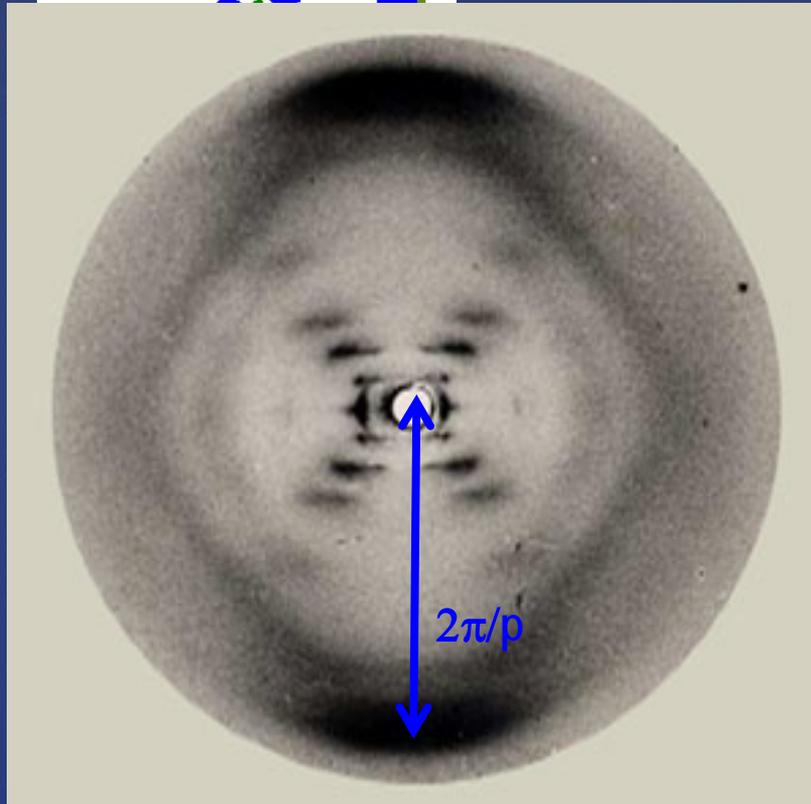
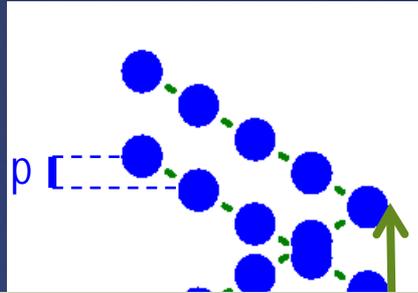


$P = 3.4 \text{ nm}$
 $R \approx 2 \text{ nm}$

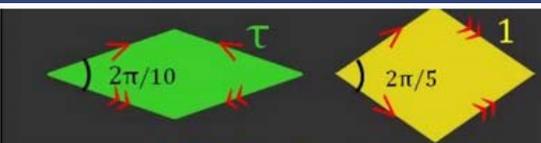




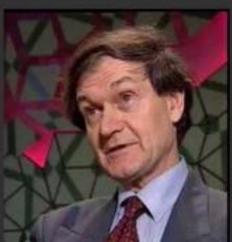
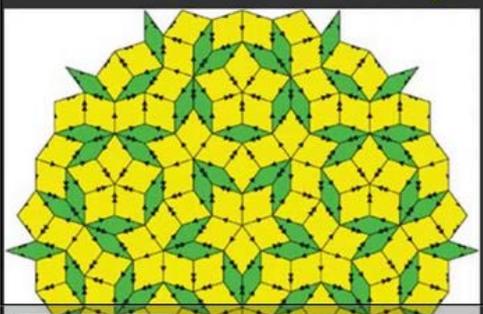
$P=3.4\text{nm}$
 $R\approx 2\text{nm}$
 $p=0.34\text{nm}$



LES QUASICRISTAUX



2 briques élémentaires caractérisées par 1 et τ



Conférence Bertrand Toudic Le Penrose
est obtenu par une coupe
d'un superespace périodique

Pascalé Launois
27:03

Dailymotion

<http://www.aicr2014.fr/index.php/formation-et-ressources/documents-disponibles>

LES QUASICRISTAUX

VOLUME 53, NUMBER 20

PHYSICAL REVIEW LETTERS

12 NOVEMBER 1984

Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry

D. Shechtman and I. Blech

Department of Materials Engineering, Israel Institute of Technology–Technion, 3200 Haifa, Israel

and

D. Gratias

Centre d'Etudes de Chimie Métallurgique, Centre National de la Recherche Scientifique, F-94400 Vitry, France

and

J. W. Cahn

Center for Materials Science, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland 20760

(Received 9 October 1984)



John Cahn, Ilan Blech, Daniel Shechtman, Denis Gratias
en 1995

Daniel Shechtman
Né en 1941



Prix Nobel de Chimie en 2011
pour la découverte des quasicristaux

LES QUASICRISTAUX

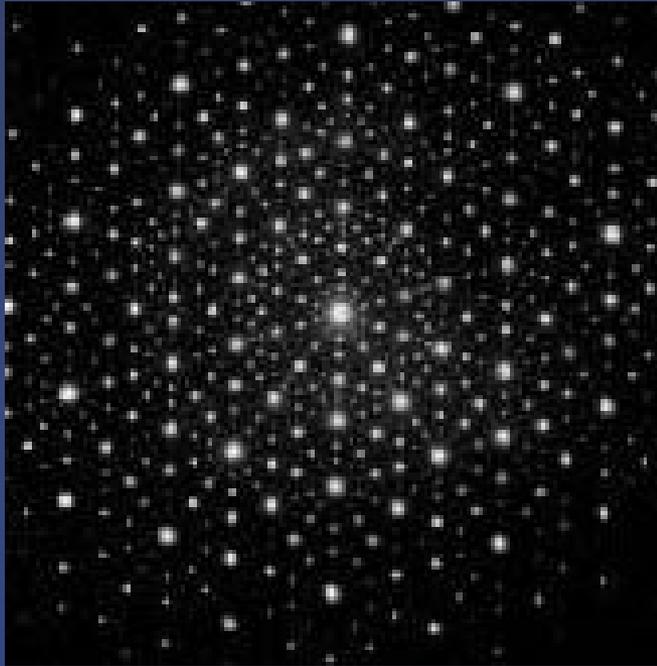
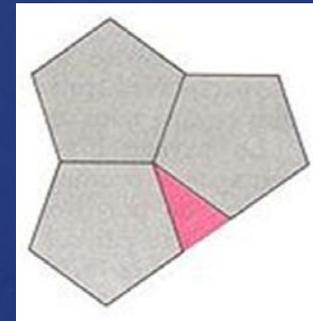
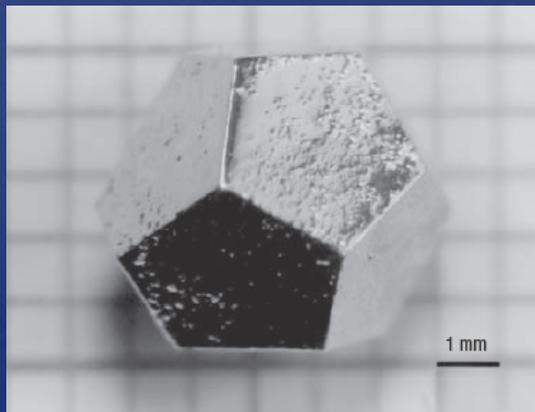
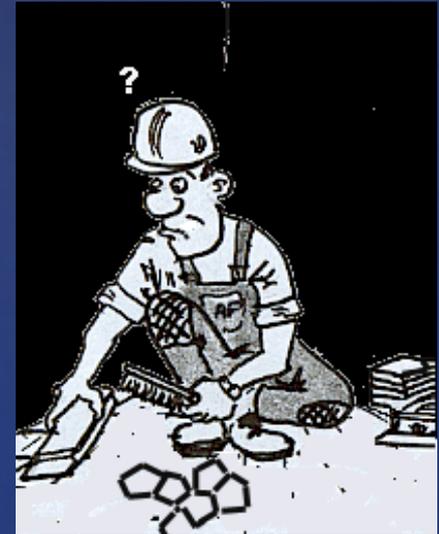


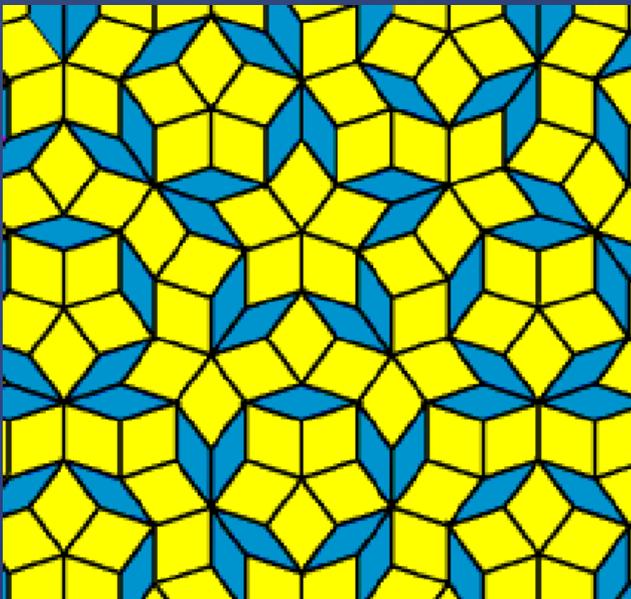
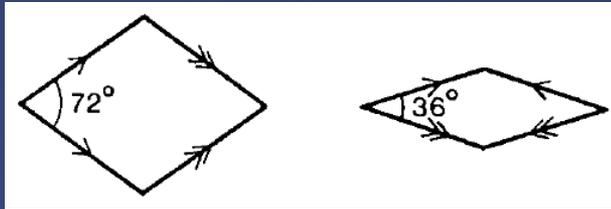
Diagramme de diffraction électronique

Ordre à longue distance
(points dans l'espace réciproque)
et symétrie interdite en cristallographie !

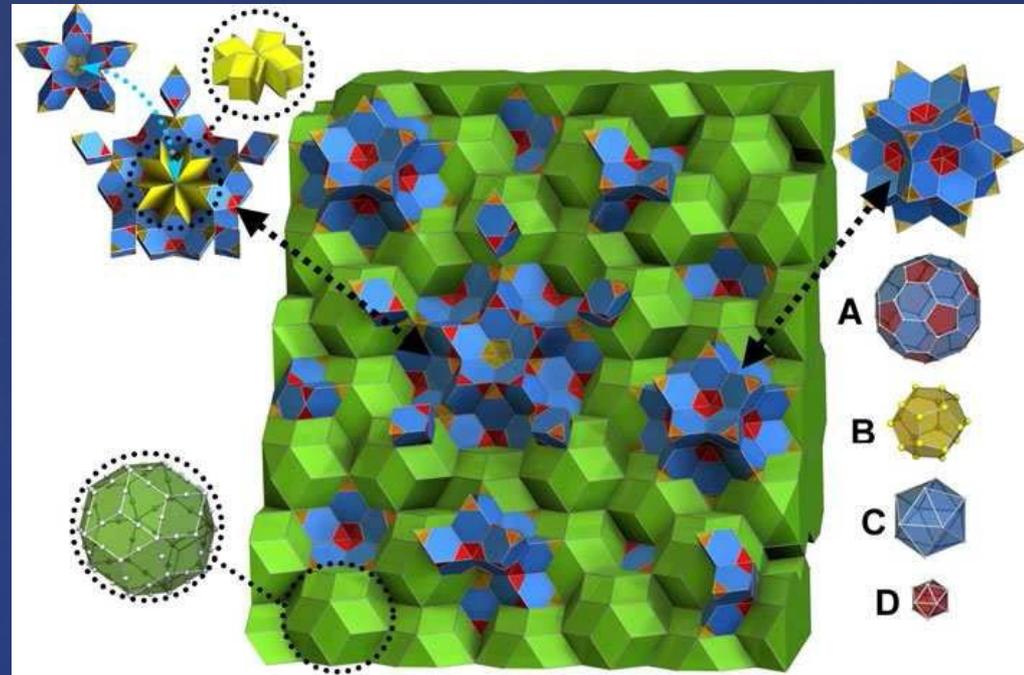


LES QUASICRISTAUX

Utiliser au moins deux mailles et des règles ad-hoc...



Pavage de Penrose



M. De Boissieu, 2012

Ordre à longue distance sans répétition par translation !

5. La cristallographie

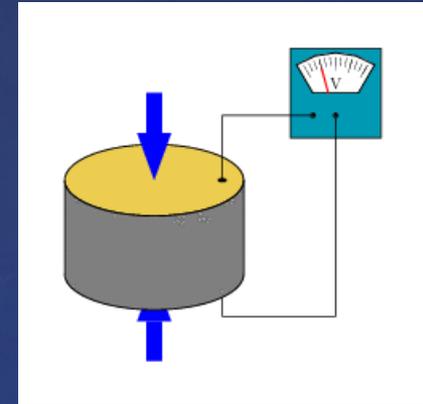
dans notre vie quotidienne...

LA CRISTALLOGRAPHIE DANS NOTRE VIE QUOTIDIENNE

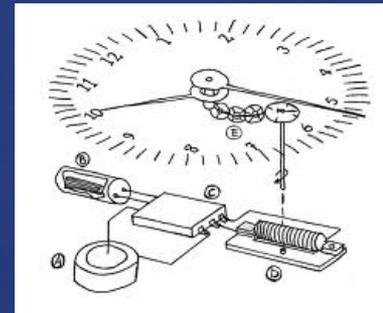
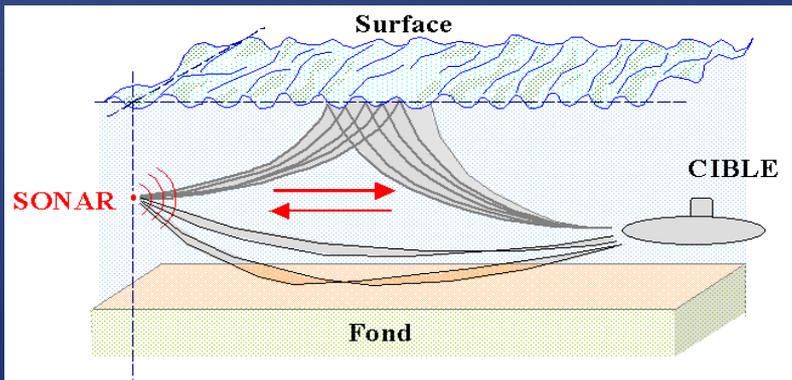
Quelques exemples... Et d'abord, le quartz :



Piézo-électricité
Pierre et Jacques Curie, 1880



Du sonar (SOund Navigation And Ranging, Paul Langevin, 1^{ère} guerre mondiale)

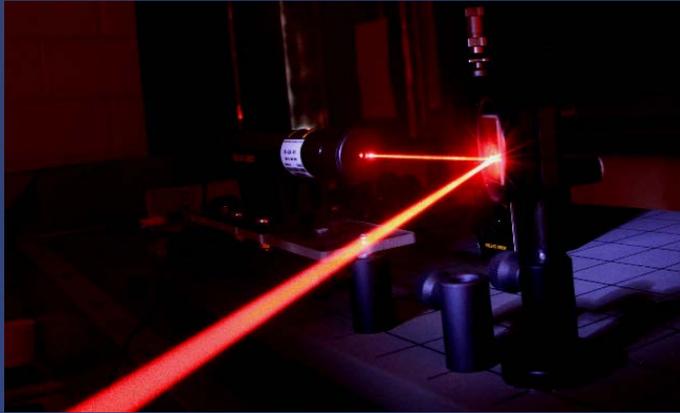


... aux montres à quartz



LA CRISTALLOGRAPHIE DANS NOTRE VIE QUOTIDIENNE

Des cristaux pour les lasers ...



Laser à rubis



aux cristaux liquides

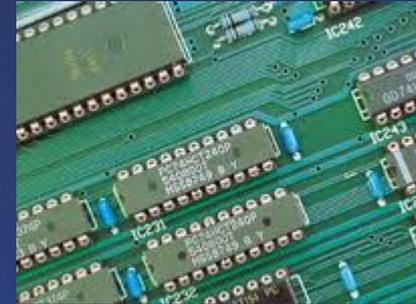
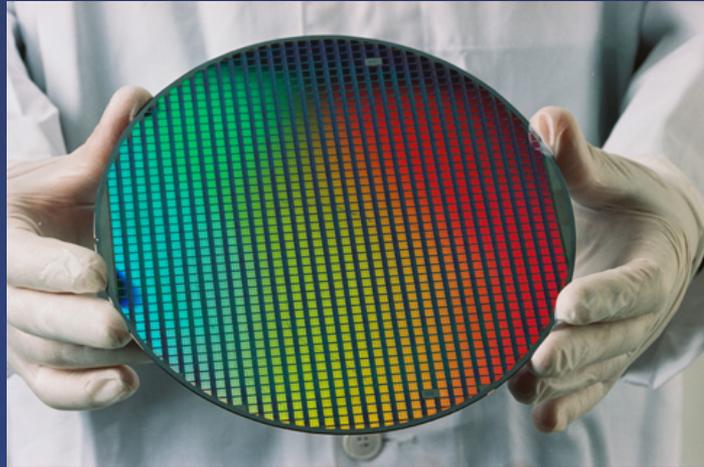


Ecran LCD :
Liquid Crystal Device

LA CRISTALLOGRAPHIE DANS NOTRE VIE QUOTIDIENNE

Micro-électronique.

Silicium



LA CRISTALLOGRAPHIE DANS NOTRE VIE QUOTIDIENNE

Transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Cellules photovoltaïques à base de silicium.



LA CRISTALLOGRAPHIE DANS NOTRE VIE QUOTIDIENNE

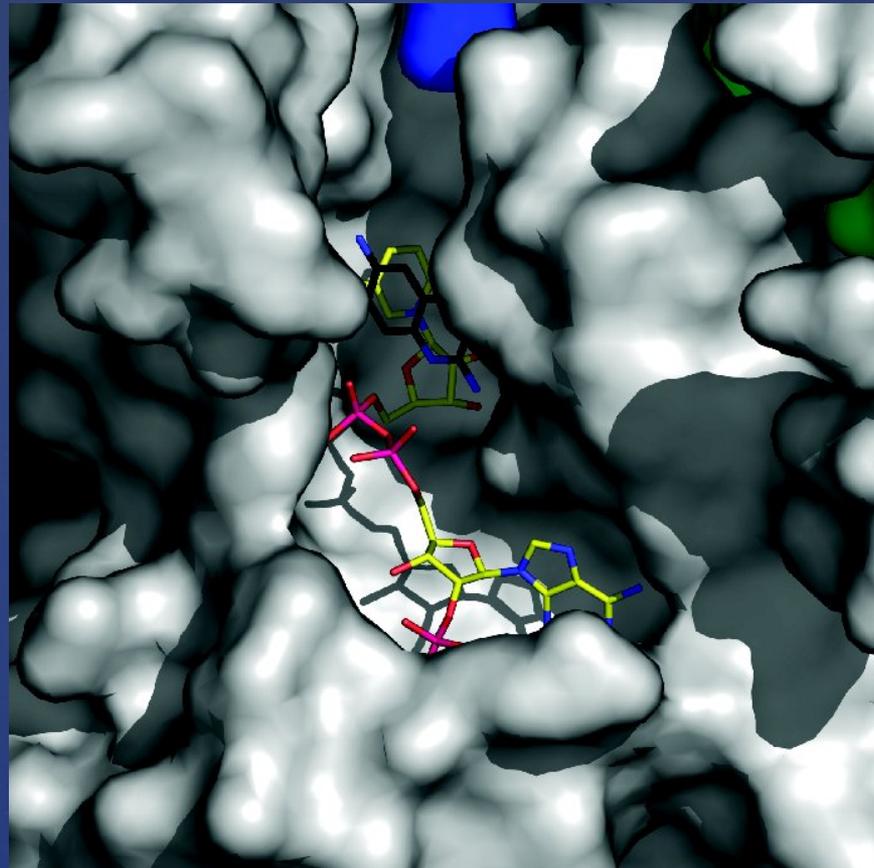
Métallurgie : automobile, aéronautique, nucléaire

Les propriétés mécaniques des métaux et alliages sont souvent déterminées par leurs défauts.



LA CRISTALLOGRAPHIE DANS NOTRE VIE QUOTIDIENNE

Etudier la structure des molécules actives et "voir" les sites cibles mis en jeu lors de leurs actions
→ réaliser de **nouveaux médicaments**.



La cristallographie et la diffraction dans les défis sociétaux :

- Santé (médicaments, vaccins)
- Energie (matériaux isolants, panneaux solaires, batteries)
 - Eau (nano-éponges, nano-filtres)

<http://www.youtube.com/watch?v=V7OgMSCdb2M>

5. Conclusion

► Diffraction et cristallographie :

- De grandes découvertes
- Des clés pour essayer de résoudre certains défis sociétaux
- Un domaine de recherche toujours en développement :
nouvelles sources, nouveaux objets d'études, nouvelles méthodes...
- Une science pluridisciplinaire : physique, chimie, biologie,
médecine, science de la terre, etc

► Les propriétés de la matière : ordre et désordre

► L'espace réciproque :

où ce qui est loin devient proche, un « monde à l'envers »



Laboratoire de Physique des Solides • UMR 8502 Université Paris sud bât 510 • 91405 Orsay cedex



Organisation et dynamique de la matière condensée

L'équipe **Organisation et dynamique de la matière condensée**, co-dirigée par [Patrick Davidson](#) et [Pascale Launois](#), couvre un domaine d'activité étendu et ses membres se répartissent donc sur les trois grandes thématiques du Laboratoire : [fermions corrélés](#), [nanosciences](#) et [matière molle](#).



Les sujets étudiés actuellement par l'équipe sont les [nanotubes et le confinement](#), l'[interface physique - biologie](#), les [cristaux électroniques](#), l'[auto-assemblage de matériaux nano-structurés](#), les [cristaux liquides et les polymères](#), les [colloïdes minéraux et les matériaux hybrides](#).

L'équipe partage une profonde unité de concepts, méthodes et techniques expérimentales. Nos techniques principales d'investigation sont la diffusion et la spectroscopie de rayons X. Notre démarche s'appuie sur des [développements instrumentaux](#) constants. Des techniques complémentaires sont également utilisées comme la diffusion et la spectroscopie de neutrons, la RMN, les microscopies optique et électronique ou la spectroscopie de photoémission à l'échelle femtoseconde.

Accueil

Membres

Thématiques

Dispositifs
expérimentaux

Cellule Instrumentation
& Méthodes

Faits marquants

HDR et Theses

Publications

Emplois et stages

Rechercher

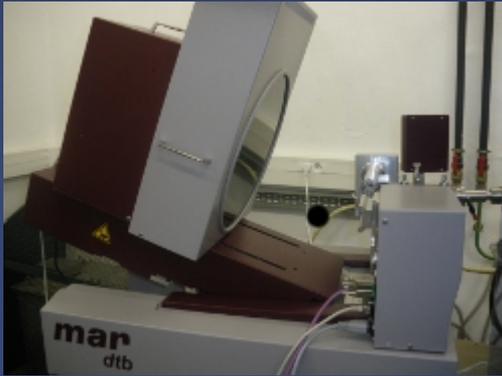
Sur ce site



Sur le Web du CNRS

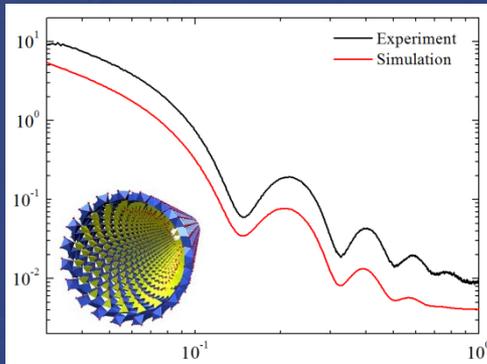


Trois expériences...



Diffraction aux grands angles : cristal de « sel de cuisine »

Pascale Launois



Diffraction aux petits angles : nanotubes d'imogolite

Mohamed Salah Amara



Banc de contrôle de tapis de nanotubes de carbone

Denis Petermann