

26^{ème}
FESTIVAL
D'ASTRONOMIE
DE FLEURANCE (GERS)
DU 6 AU 12 AOÛT 2016
VIII^{ème} Marathon des sciences
XXVI^{ème} Festival Adultes
XI^{ème} Festival Astro-jeunes



Festival
d'astronomie
de Fleurance
Ferme des étoiles

26^{ème} Festival d'Astronomie de Fleurance

De l'amorphe au cristal

ordre et désordre dans la matière solide

Bertrand DEVOUARD

Aix-Marseille université – CNRS

CEREGE



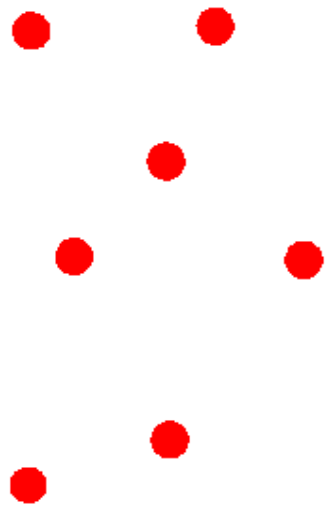
Etats de la matière

Gaz

Liquide

Solide

Etats de la matière

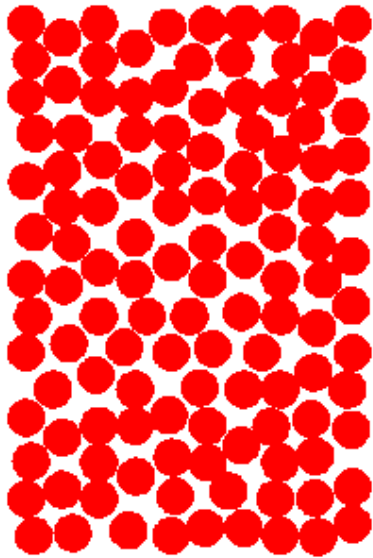


Gaz (et plasma)

Liquide

Solide

Etats de la matière

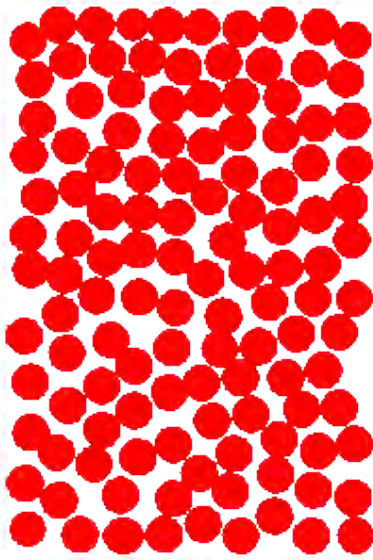


Gaz (et plasma)

Liquide

Solide

Etats de la matière

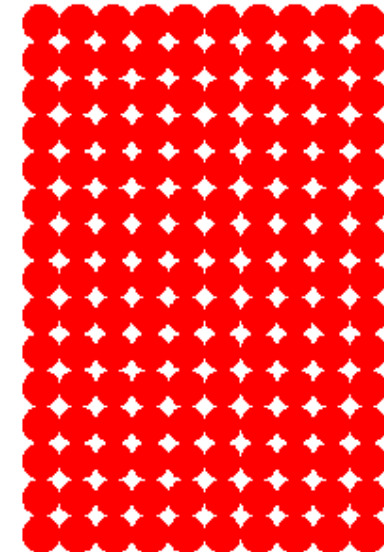


Verres
(amorphes)

Gaz (et plasma)

Liquide

Solide



Cristaux

Etats de la matière



Gaz (et plasma)

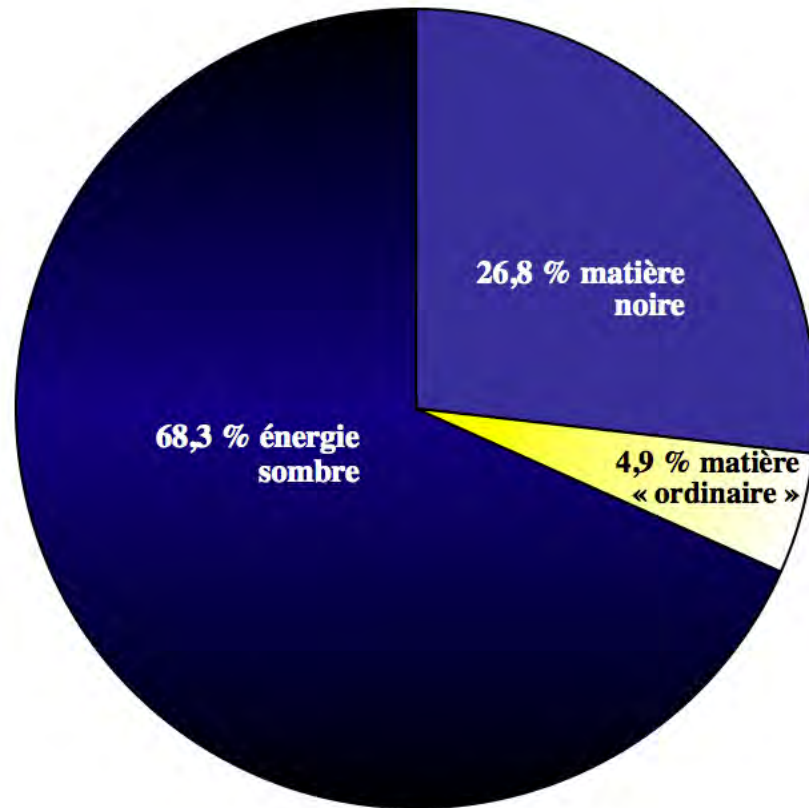
Liquide

Solide

et tout le reste...



Etats de la matière dans l'Univers



Données : ESA, Planck Collaboration (2013)

Milieu interstellaire :

99% gaz / plasma

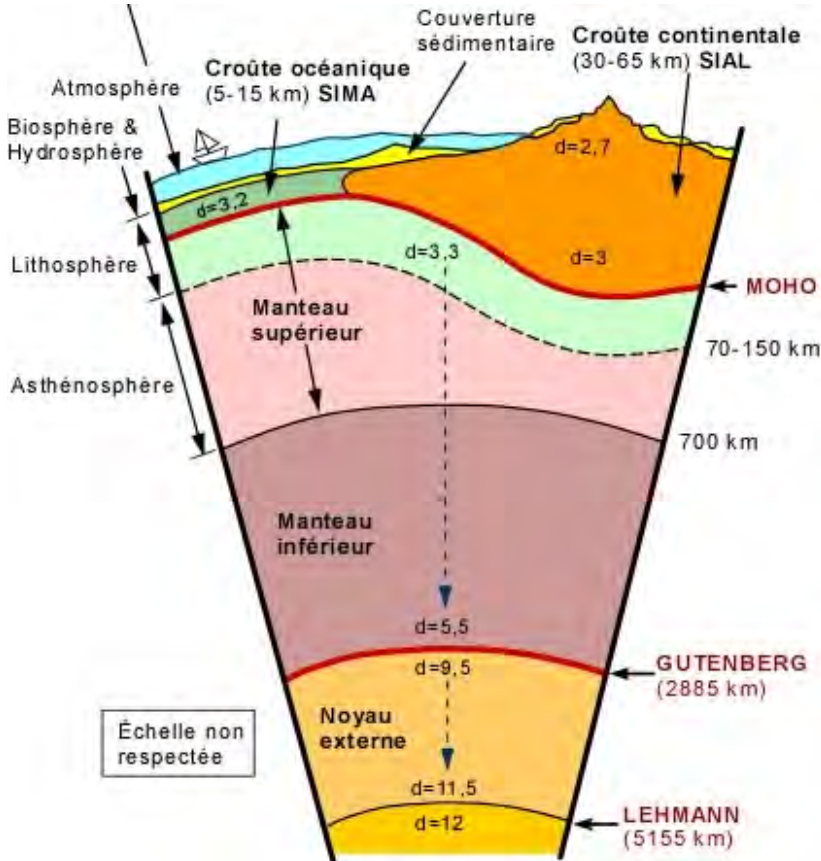
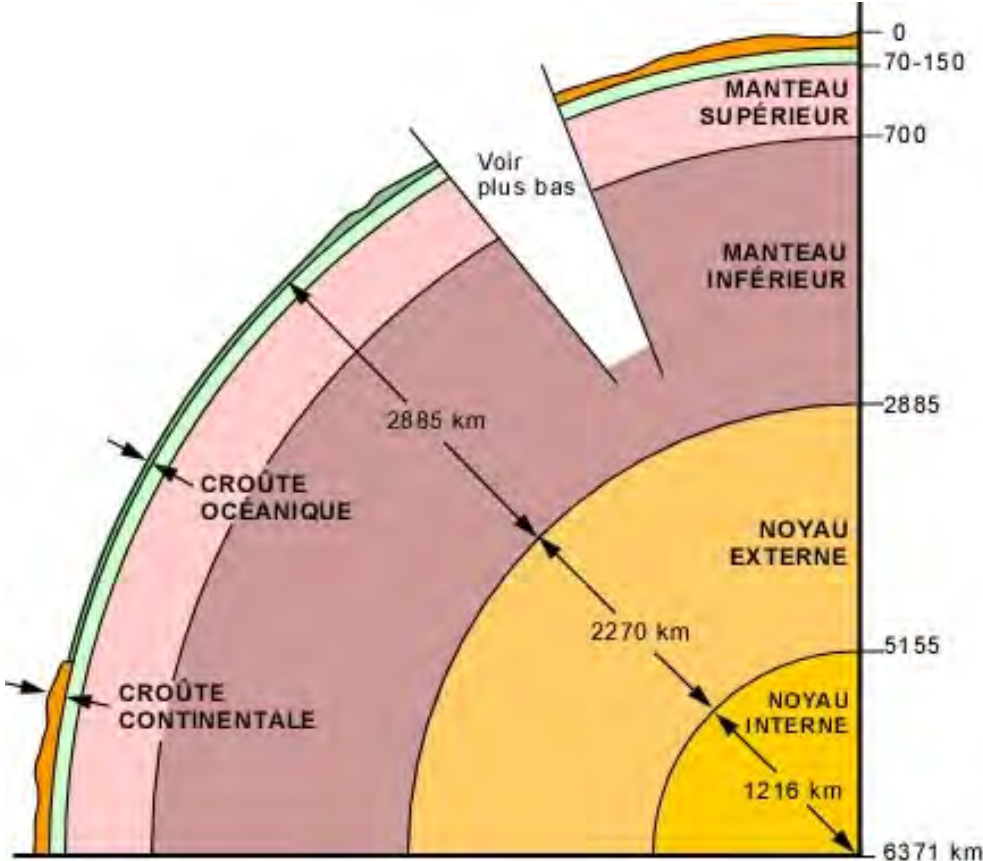
1% poussières solides

Système solaire :

99,9% soleil (plasma)

< 0.1 % solides (dont planètes)

Structure de la Terre



Source : Université de Laval

La matière sur Terre

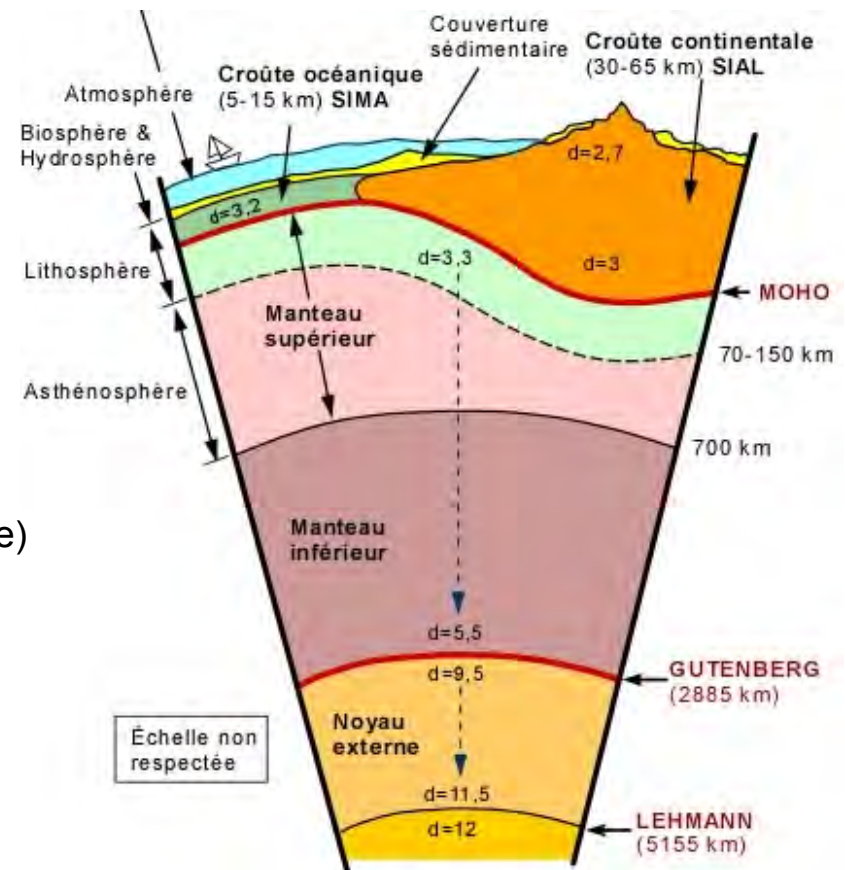
Terre :

70% solide (en masse)

30% liquide (noyau externe)

atmosphère + hydrosphère + biosphère < 1% (en masse)

100% des solides = cristaux



Source : Université de Laval

Structure de la matière solide

Ordre et symétries

Pourquoi tant d'ordre ?

Ordre ET désordre dans les cristaux

D'autres ordres possibles ?

Structure de la matière solide

Ordre et symétries

Pourquoi tant d'ordre ?

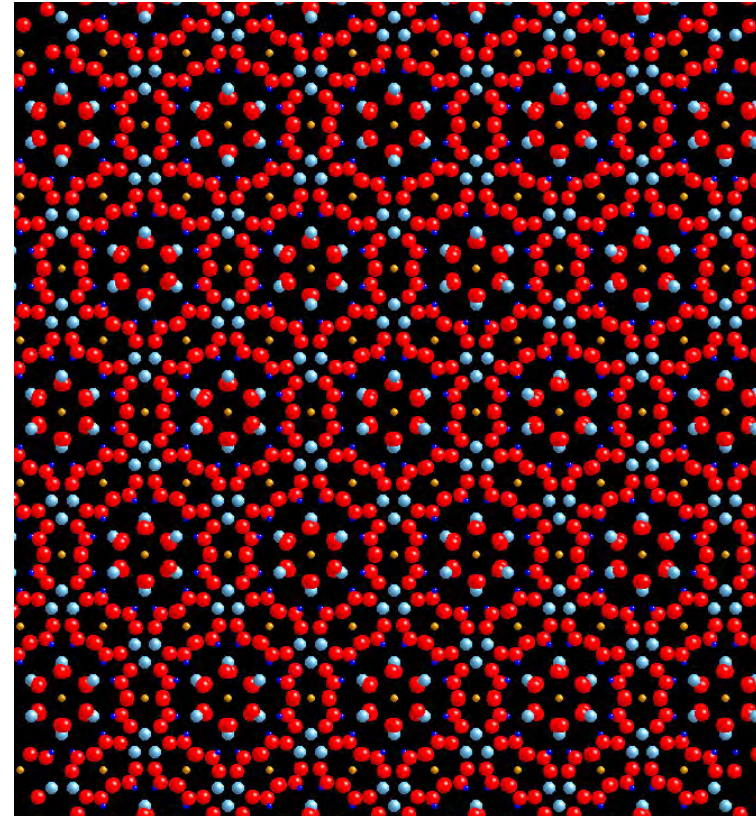
Ordre ET désordre dans les cristaux

D'autres ordres possibles ?

Ordre et symétrie



Cristaux de Pyrite (FeS₂), Navajun, Espagne.



arrangement atomique, grenat andradite
Ca₃ Fe₂ Si₃ O₁₂

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



Anaxagore
ca. 510-428 BC

Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau

Les cristaux sont constitués de petits éléments semblables à l'ensemble

Théorie atomiste : la matière est constituée d'atomes indivisibles et éternels, de différentes sortes et tailles

(Philosophies similaires en Inde)



Démocrite
460-370 BC

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



Johannes Kepler
1571-1630

Pourquoi les flocons de neige ont-ils toujours 6 coins?

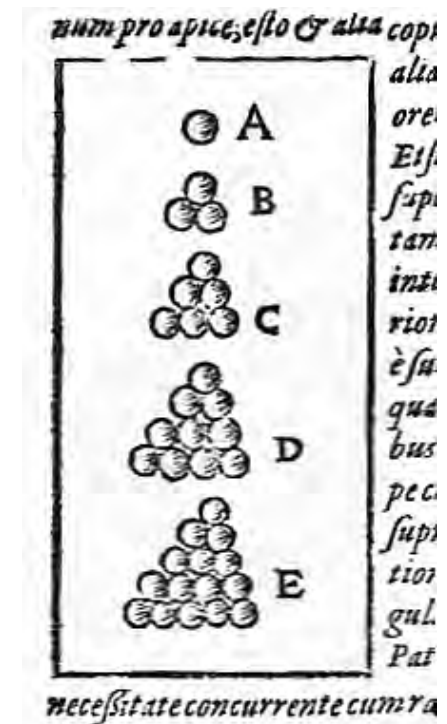
(*De nive sexangula*, 1611)

Empilement de microscopiques gouttes d'eau glacées?

Conjecture de Kepler :
l'empilement dense de sphères produit une symétrie cubique ou hexagonale



Flocon de neige – W. Bentley

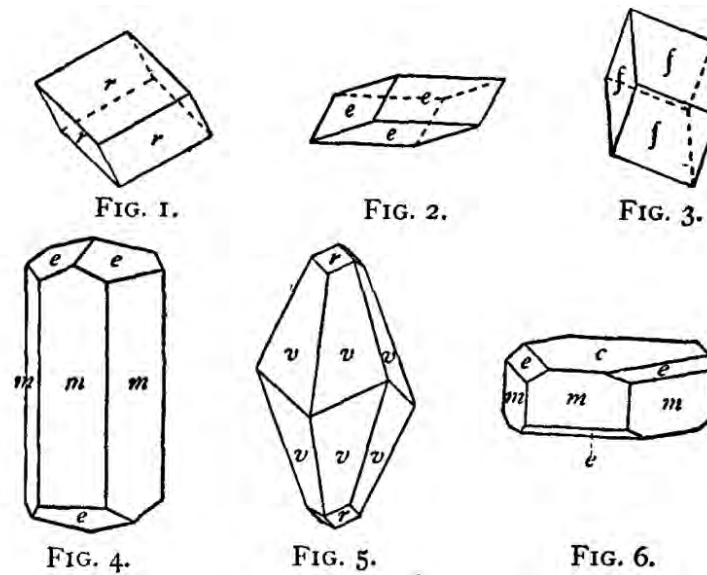


Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



René-Just Haüy (1743-1822)



Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



René-Just Haüy (1743-1822)

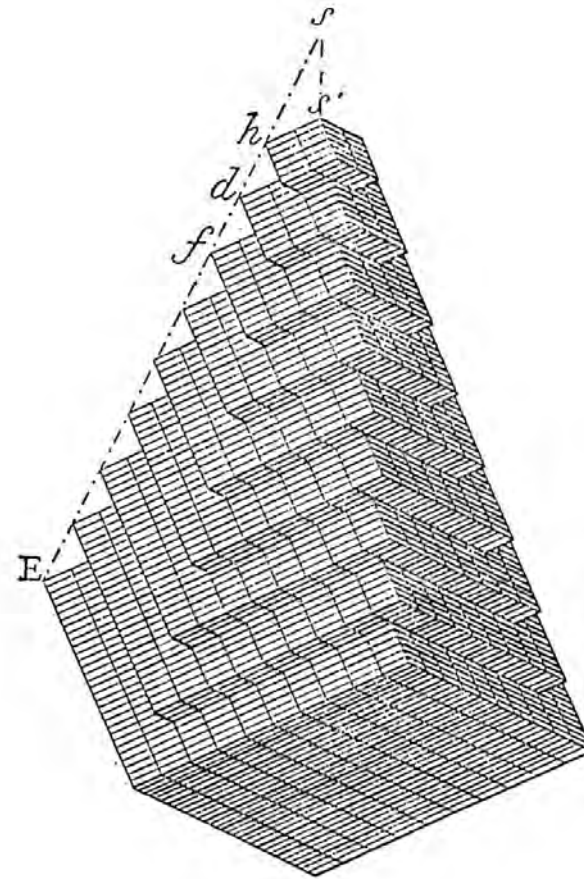


Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



René-Just Haüy (1743-1822)



Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



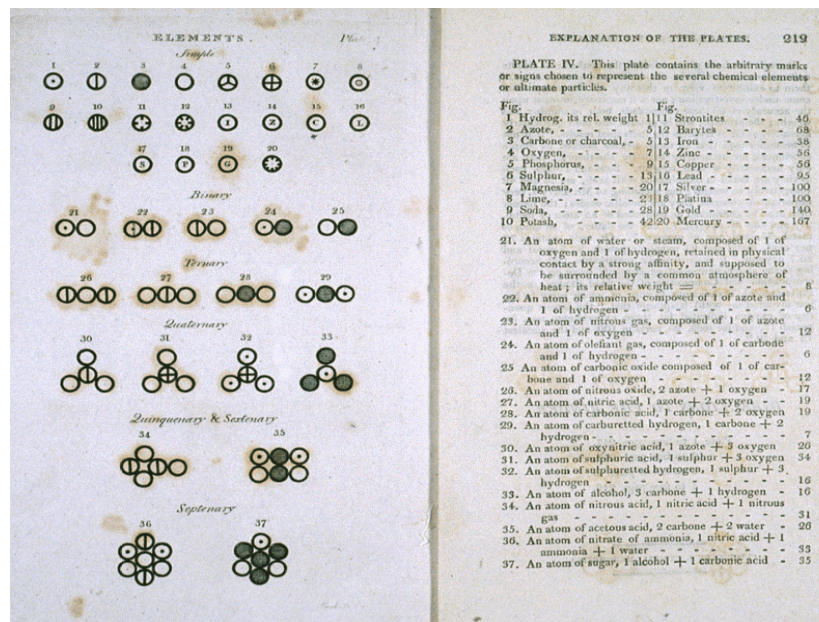
Antoine Lavoisier
(1743-1794)



John Dalton
(1766-1844)

Différents éléments (atomes) immuables et indestructibles

peuvent se combiner en proportions simples pour former des composés



Dalton (1808) - A New System of Chemical Philosophy

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



Dmitri Mendeleïev (1834-1908)

Reihen	Gruppe I. — R ⁰	Gruppe II. — R ⁰	Gruppe III. — R ⁰ ³	Gruppe IV. RH ⁴ R ⁰ ⁴	Gruppe V. RH ⁵ R ⁰ ⁵	Gruppe VI. RH ⁶ R ⁰ ⁶	Gruppe VII. RH R ⁰ ⁷	Gruppe VIII. — R ⁰ ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

Tableau périodique des éléments – Mendeleïev (1871)

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



Dmitri Mendeleïev (1834-1908)

Tableau périodique des éléments

Groupes	1	2											13	14	15	16	17	18	
Périodes	IA	IIA											IIIA	IVA	VVA	VIA	VIIA	VIIIA	
1	hydrogène 1 H 1,00794																	hélium 2 He 4,002602	
2	lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182											bor 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674	oxygène 8 O 15,9994	fluor 9 F 18,9984032	néon 10 Ne 20,1797	
3	sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050											aluminium 13 Al 26,9815385	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,065	chlore 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948	
4	potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,887	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195	nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80	
5	rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,9062	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthénium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 101,0703	paladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,8682	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29	
6	caesium 55 Cs 132,90545196	barium 56 Ba 137,327	lanthanides 57-71		hafnium 72 Hf 178,49	tantalum 73 Ta 180,94788	tungstène 74 W 183,84	rénium 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 192,222	platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [209,9824]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0176]
7	francium 87 Fr [223,0187]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89-103		thorium 90 Th [232,03806]	protactinium 91 Pa [231,03688]	uranium 92 U 238,02891	néptunium 93 Np [237,04817]	plutonium 94 Pu [244,06422]	américium 95 Am [243,06134]	curium 96 Cm [247,07439]	berkélium 97 Bk [247,07125]	californium 98 Cf [251,0796]	éinsteinium 99 Es [252,0839]	fermium 100 Fm [257,1037]	mendelevium 101 Md [258,10386]	nobélium 102 No [259,10111]	livermorium 103 Lv [260,10110]	tennessine 104 Ts [261,10110]
<p> métaux alcalins alcalino-terreux lanthanides actinides métaux de transition métaux pauvres métaux lourds non-métaux halogènes gaz nobles primordiaux désintégrés synthétiques </p>																			

Tableau périodique des éléments – version moderne

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



Max von Laue (1879-1960)

Mise en évidence de la diffraction des rayons X par les cristaux en 1912

Prix Nobel de physique 1914

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



William Henry Bragg (1862-1942)

Position des atomes dans des cristaux de NaCl
(puis ZnS, CaF₂, diamant...) par diffraction des
rayons X par les cristaux en 1913

Prix Nobel de physique 1915



William Lawrence Bragg (1890-1971)

Structure de la matière

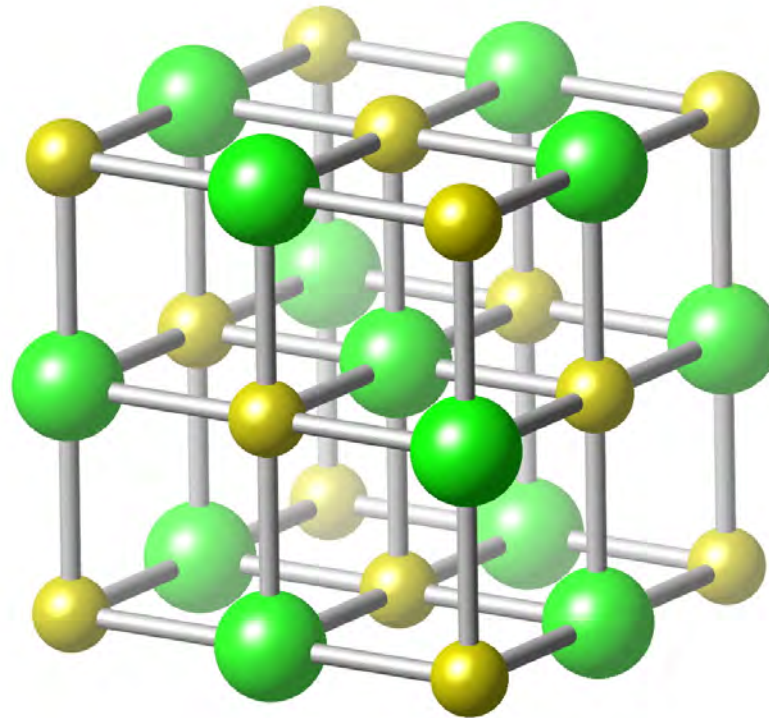
2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



William Henry Bragg (1862-1942)



William Lawrence Bragg (1890-1971)



Structure de NaCl

Structure de la matière

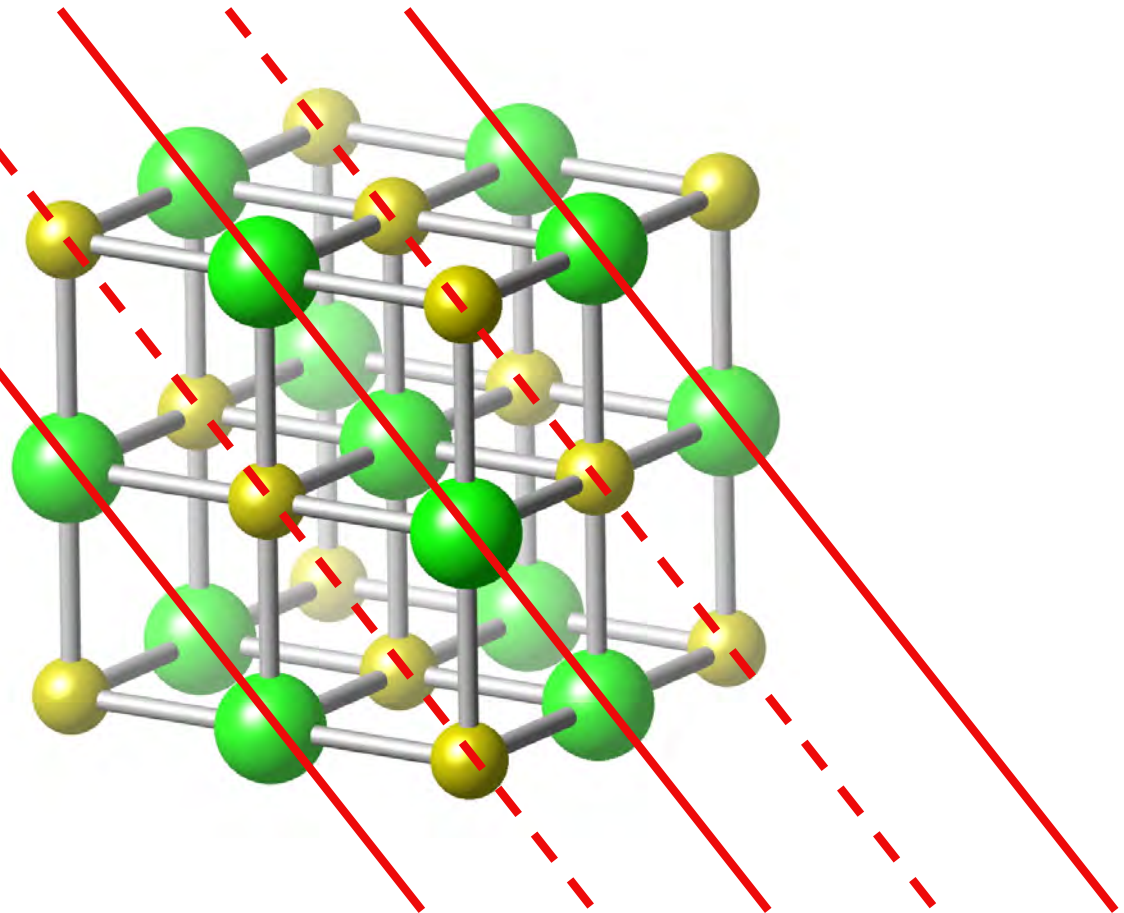
2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories

Cristaux

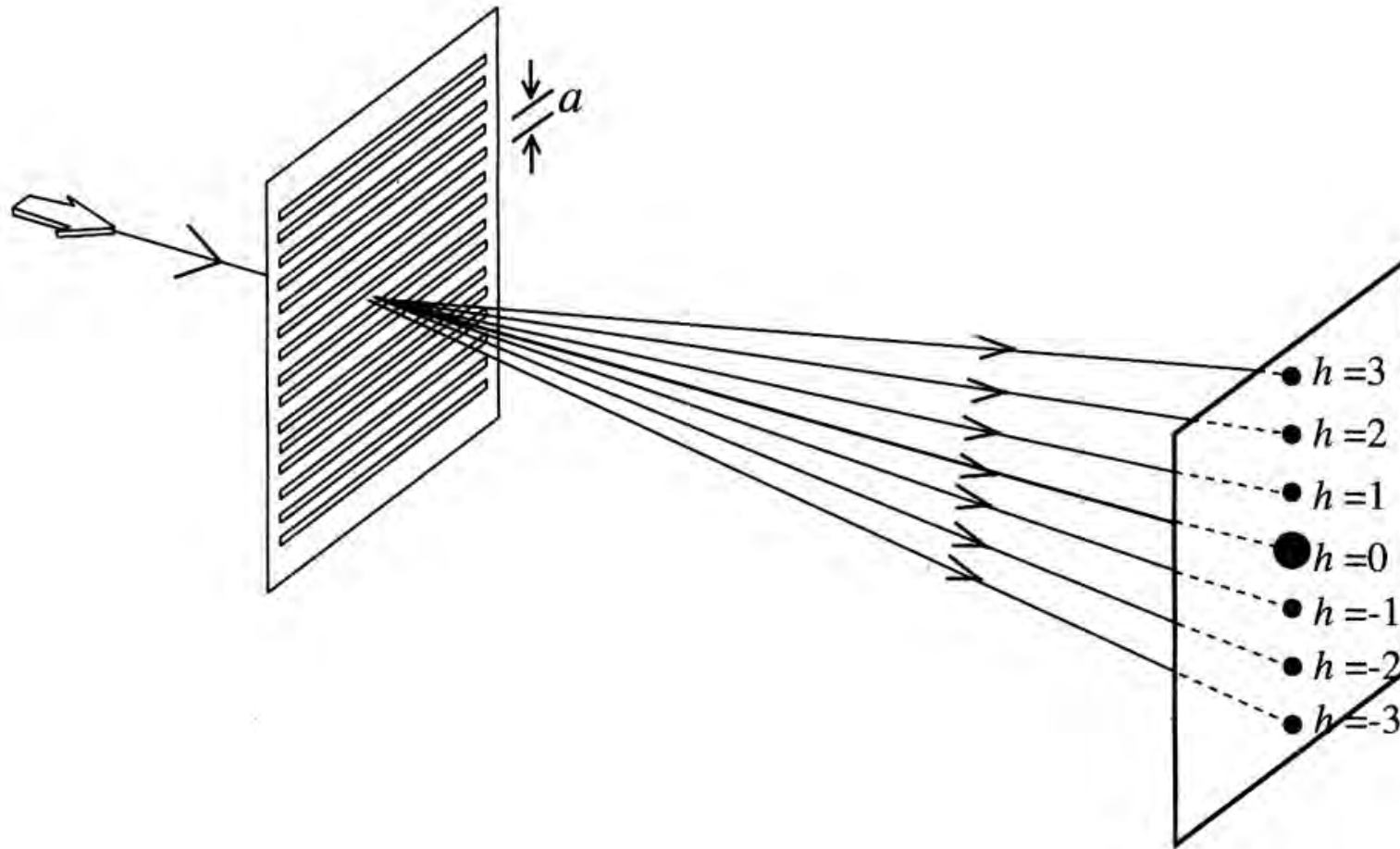
=

Arrangement périodique,
"infini", d'atomes (ou de
molécules) dans les 3
dimensions de l'espace

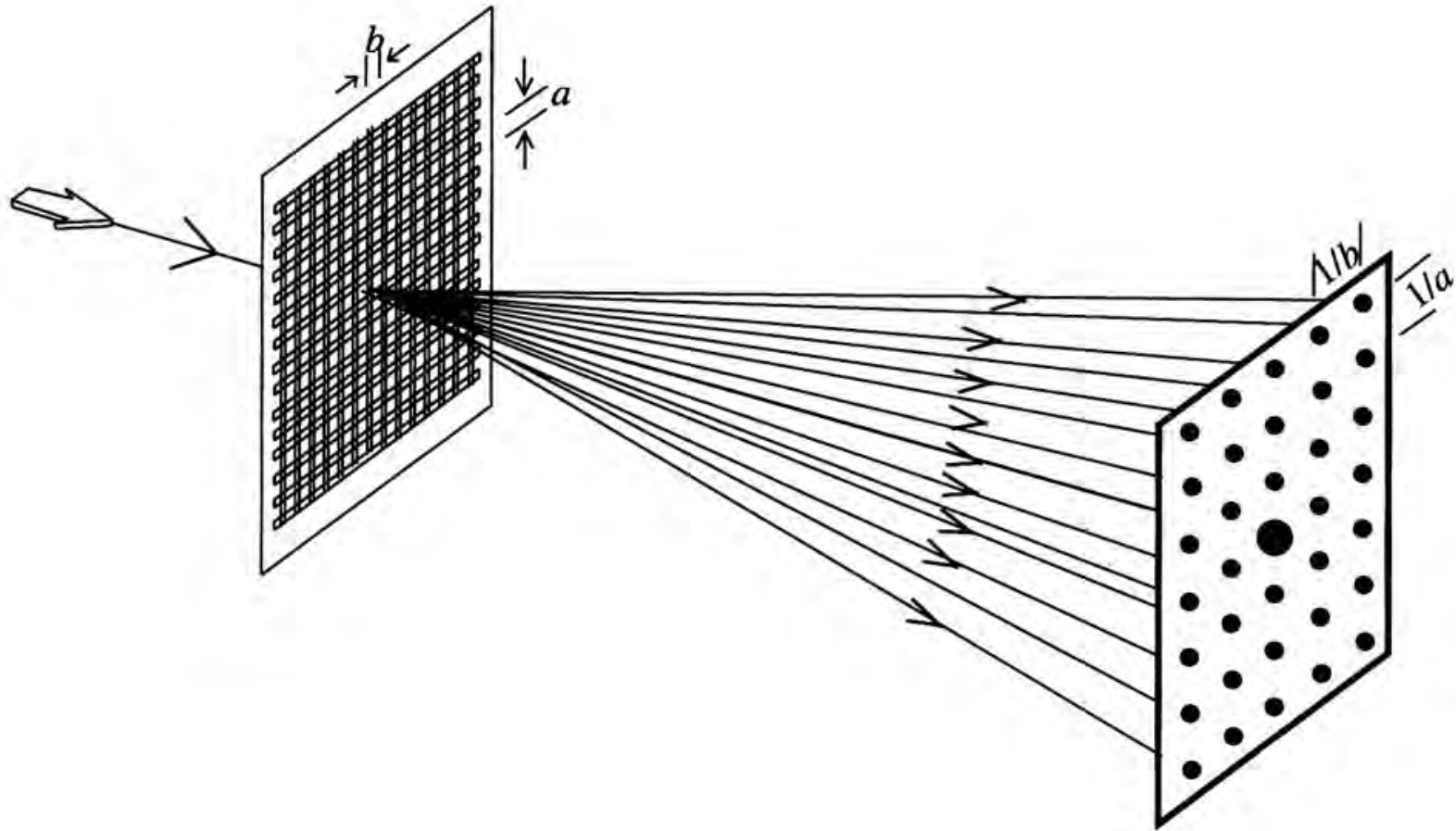
Etudiés par **diffraction** des RX
(ou des électrons, neutrons...)



Diffraction par un réseau (1D)



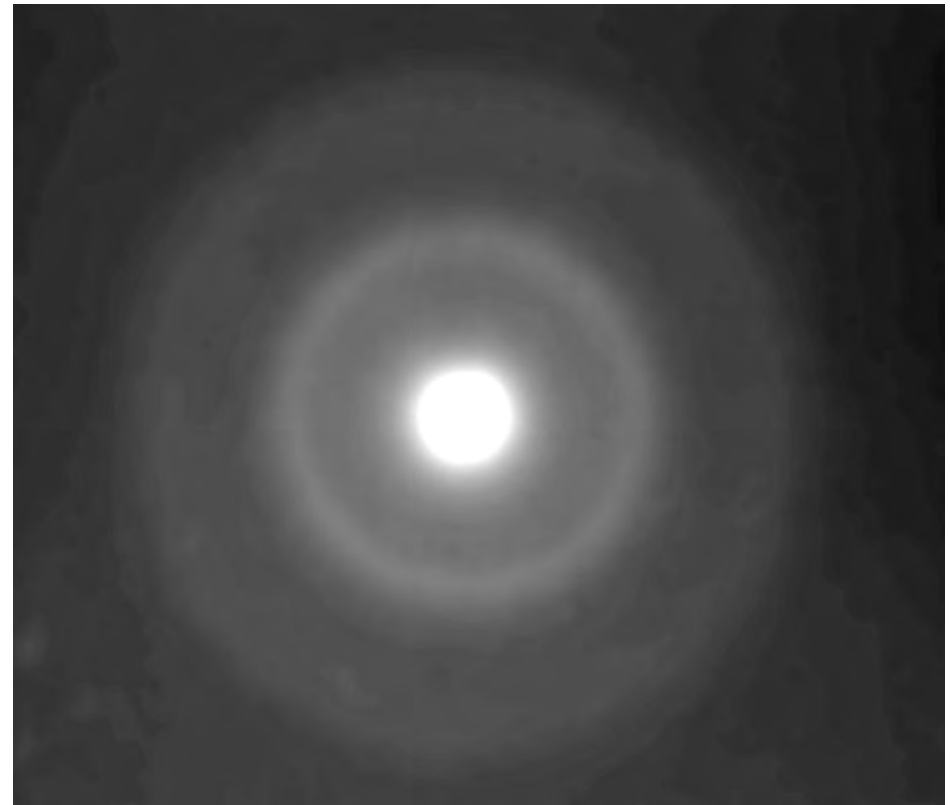
Diffraction par un réseau (2D)



Diffraction (diffusion) par un amorphe

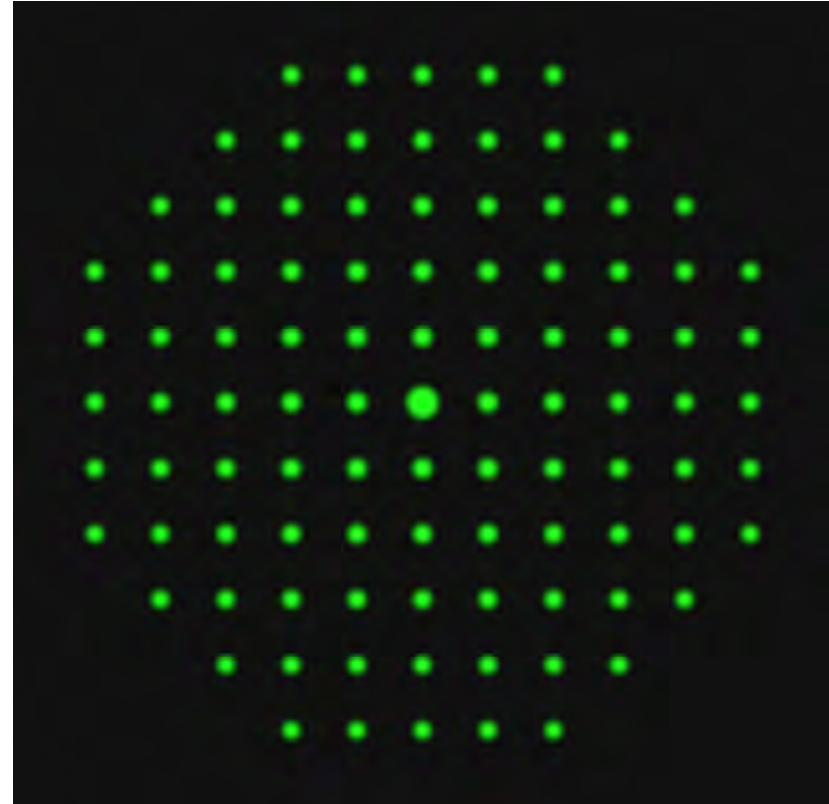
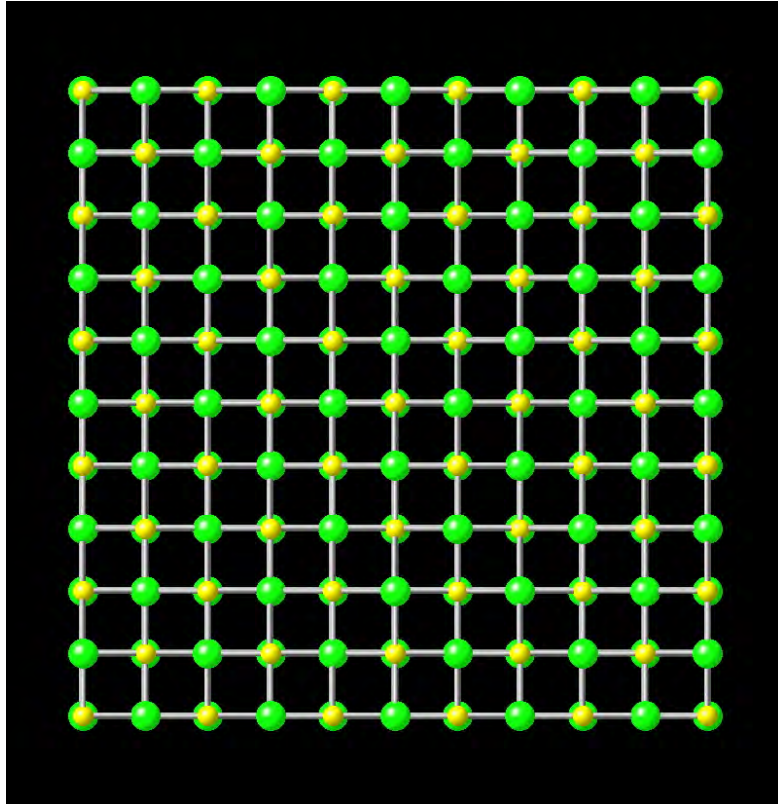


Diffusion de la lumière de la Lune par temps couvert



Anneaux de diffusion des électrons par un solide amorphe

Diffraction par un cristal (3D)



Cristal
Espace réel (R)

← TF →

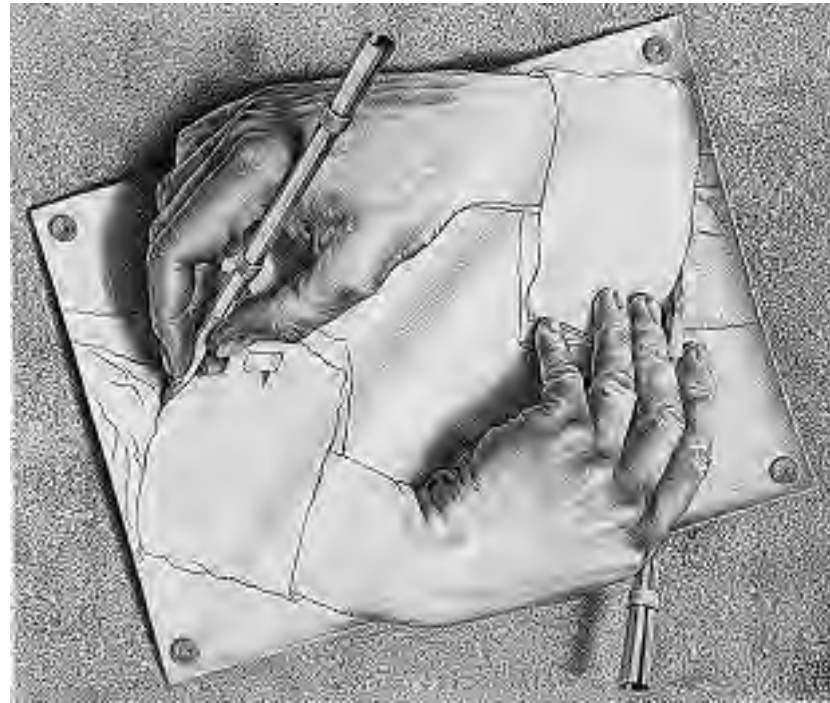
Cliché de diffraction
Espace réciproque (R^*)

Conservation de l'ordre et des symétries

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories

Un dialogue entre cristallographie, mathématiques et art...



M.C. Escher (1898-1972)

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories

Un dialogue entre cristallographie, mathématiques et art...



Mosaïque romaine - 1er siècle BC

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories

230 symétries 3D (groupes d'espace)

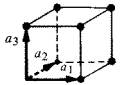
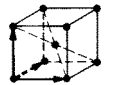
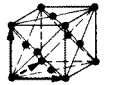
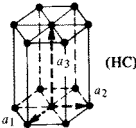
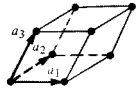
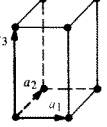
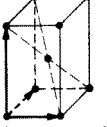
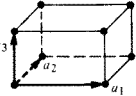
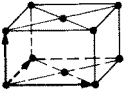
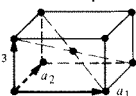
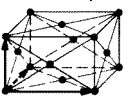
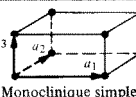
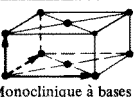
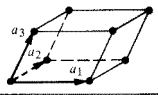
7 systèmes cristallins

> 4500 cristaux naturels (minéraux)

> 200 000 cristaux inorganiques synthétiques

> 800 000 cristaux organiques

> cristaux de protéines...

Systèmes cristallins	Réseaux de Bravais		
Cubique $a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$			
	Cubique simple (CS)	Cubique centré (CC)	Cubique à faces centrées (CFC)
Hexagonal $a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ $\alpha_3 = 120^\circ$			
	(HC)		
Rhomboédrique $a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \neq 90^\circ$			
Tétragonal ou quadratique $a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$			
	Tétragonal simple	Tétragonal centré	
Orthorhombique $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$			
	Orthorhombique simple	Orthorhombique à bases centrées	
			
	Orthorhombique centré	Orthorhombique à faces centrées	
Monoclinique $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ \neq \alpha_3$			
	Monoclinique simple	Monoclinique à bases centrées	
Triclinique $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3$			

14 réseaux de Bravais, regroupés par symétries (7 systèmes cristallins)

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories

A quoi ça sert ?

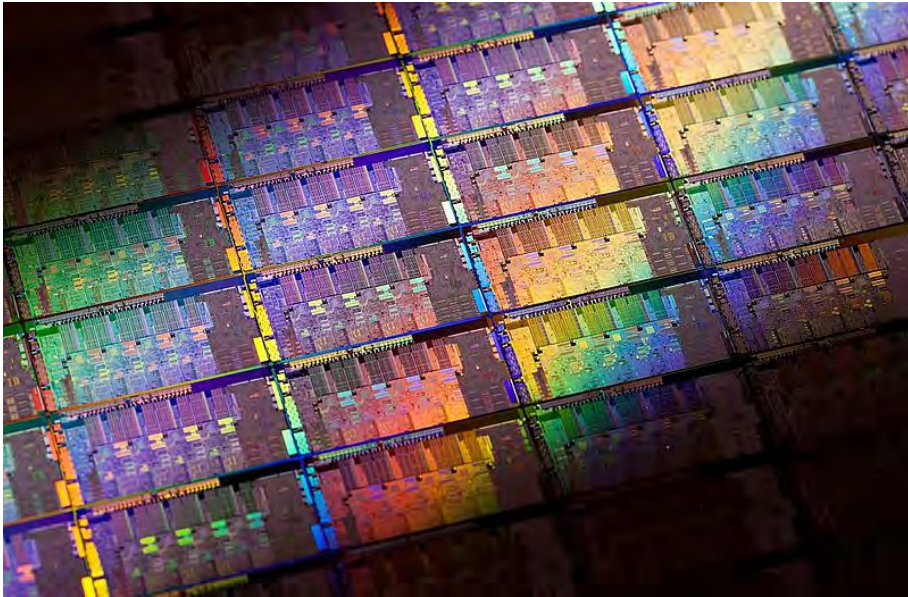


Guernica - 1937 © Pablo Picasso

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories

A quoi ça sert ?



Electronique, matériaux, sciences de la santé; télécommunications, informatique, transports, énergie, médicaments...

Structure de la matière

2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories

solides - cristaux - ordre - symétries - forme



Aristote (384-322 BC)

La matière désire la forme
comme la femelle désire le mâle

(Physique d'Aristote)

Structure de la matière solide

Ordre et symétries

Pourquoi tant d'ordre ?

Ordre ET désordre dans les cristaux

D'autres ordres possibles ?

Pourquoi tant d'ordre ?

Liaisons chimiques

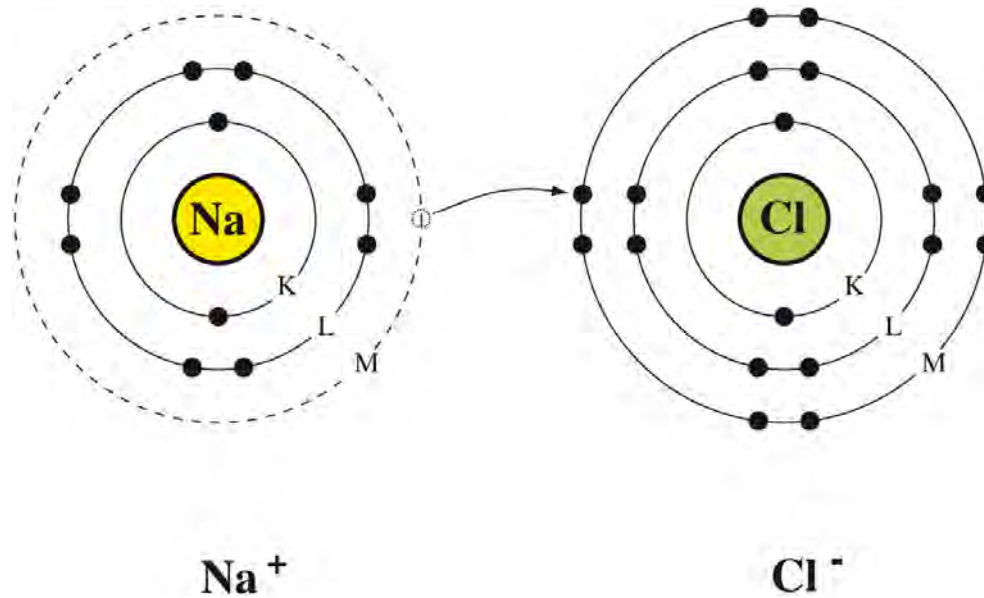
Ionique

Covalente

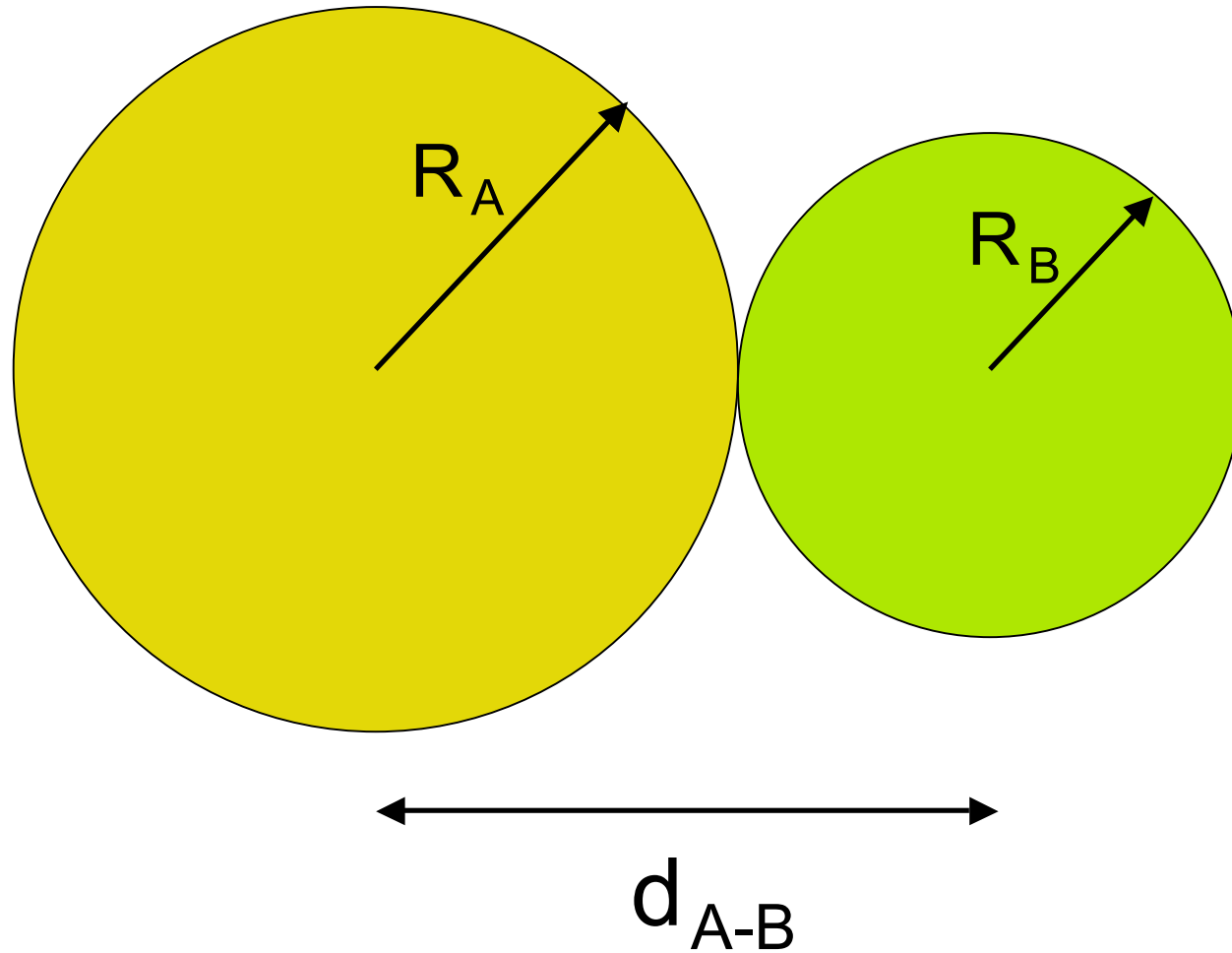
Métallique

"Hydrogène"

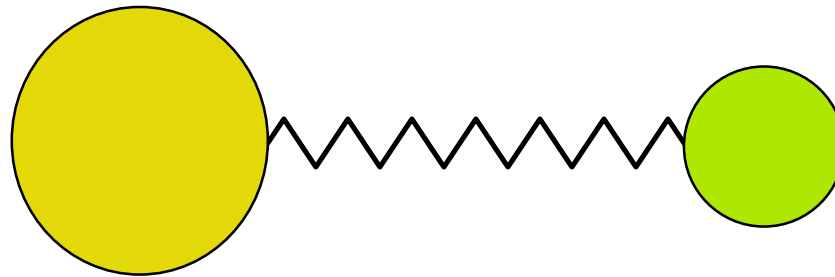
van der Waals



Pourquoi tant d'ordre ?

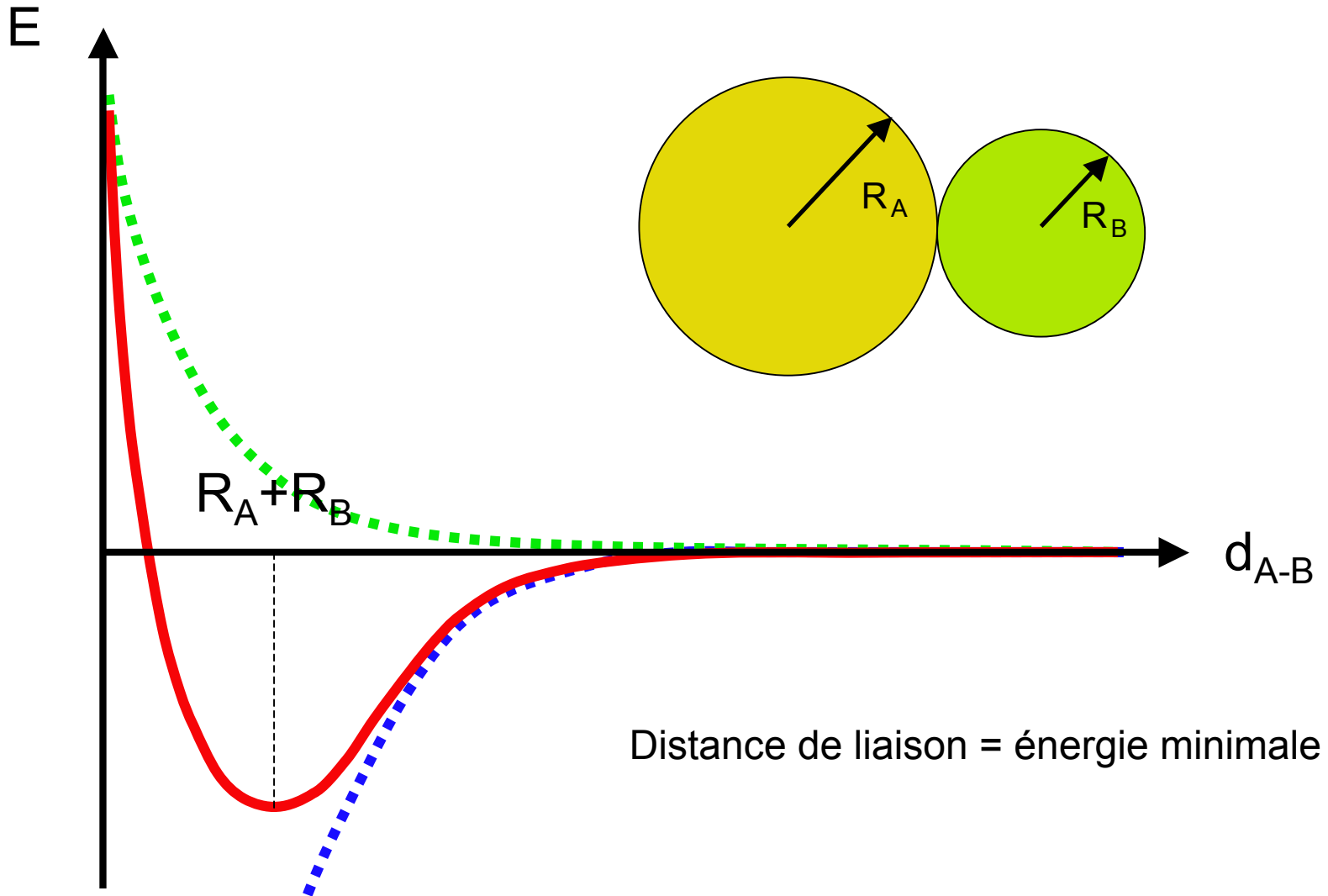


Pourquoi tant d'ordre ?



d_{A-B}

Pourquoi tant d'ordre ?



Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes

Principe : un système tend vers son minimum d'énergie

But : minimiser l'énergie globale du système

i.e., minimiser les distances entre tous les atomes

i.e., réaliser l'arrangement le plus compact possible

Pourquoi tant d'ordre ?

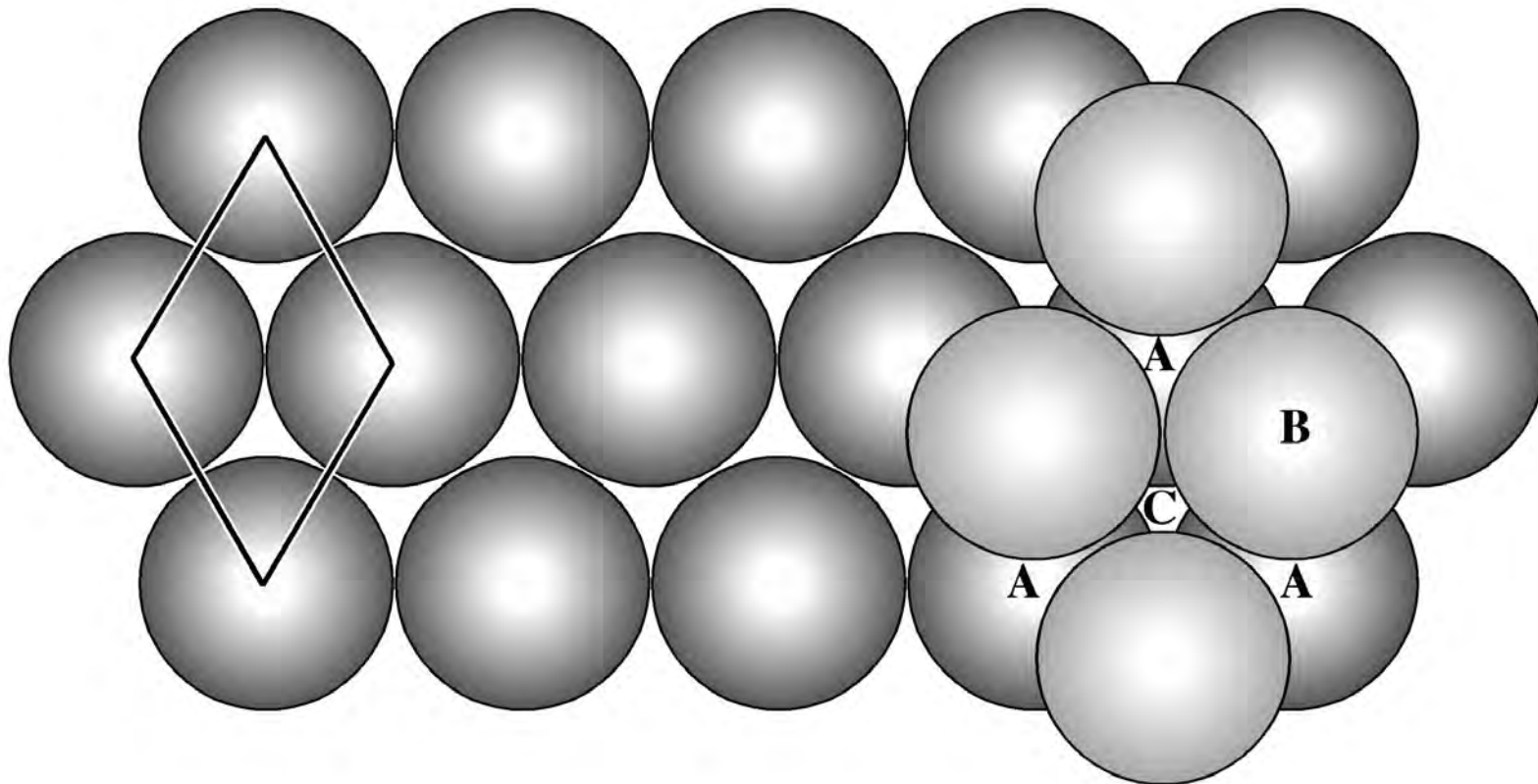
Empilements compacts d'atomes identiques



C'est la conjecture de Kepler !

Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes identiques



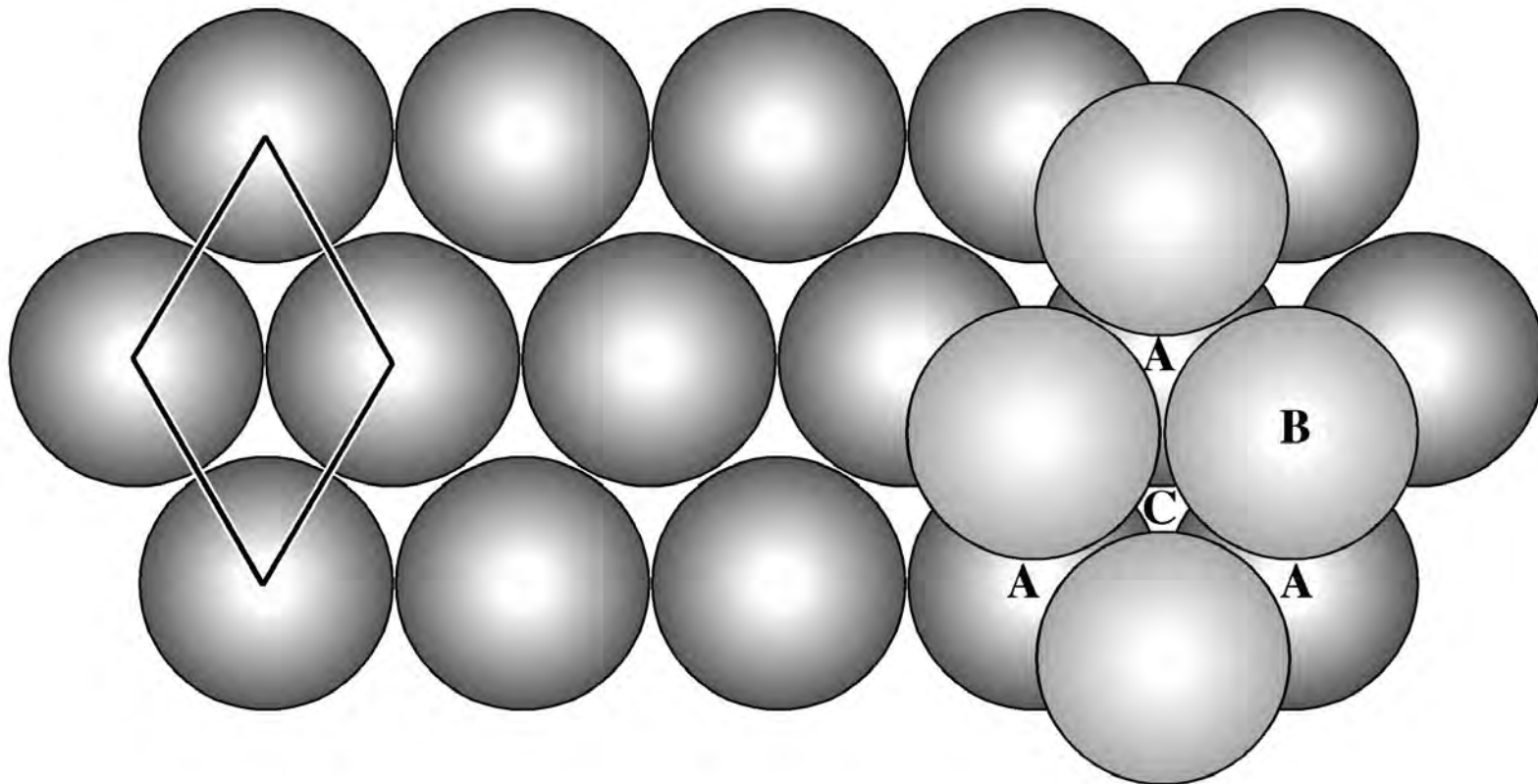
Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes identiques



Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes identiques

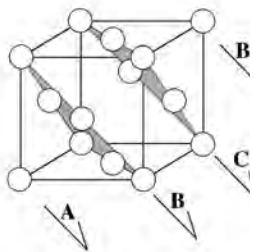


Pourquoi tant d'ordre ?

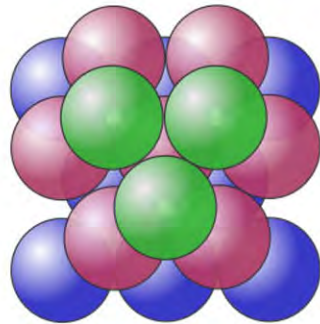
Empilements compacts d'atomes identiques



ccp (cfc)

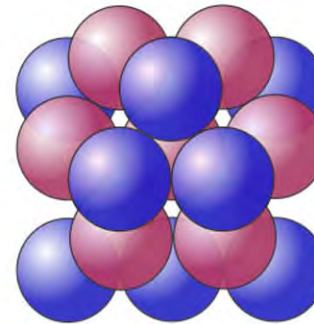


cubique

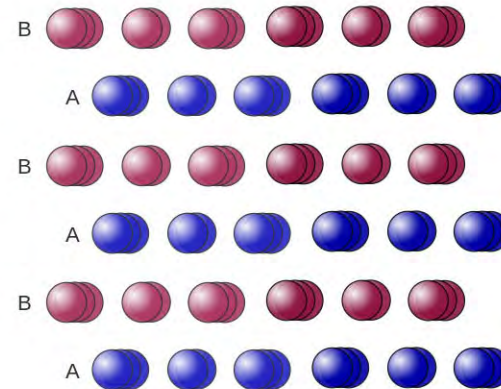
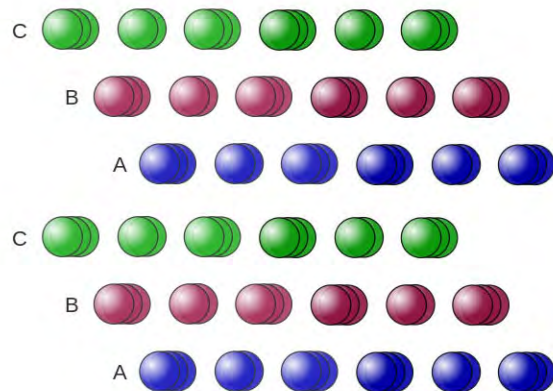


Cubique à faces centrées ABC

hexagonal

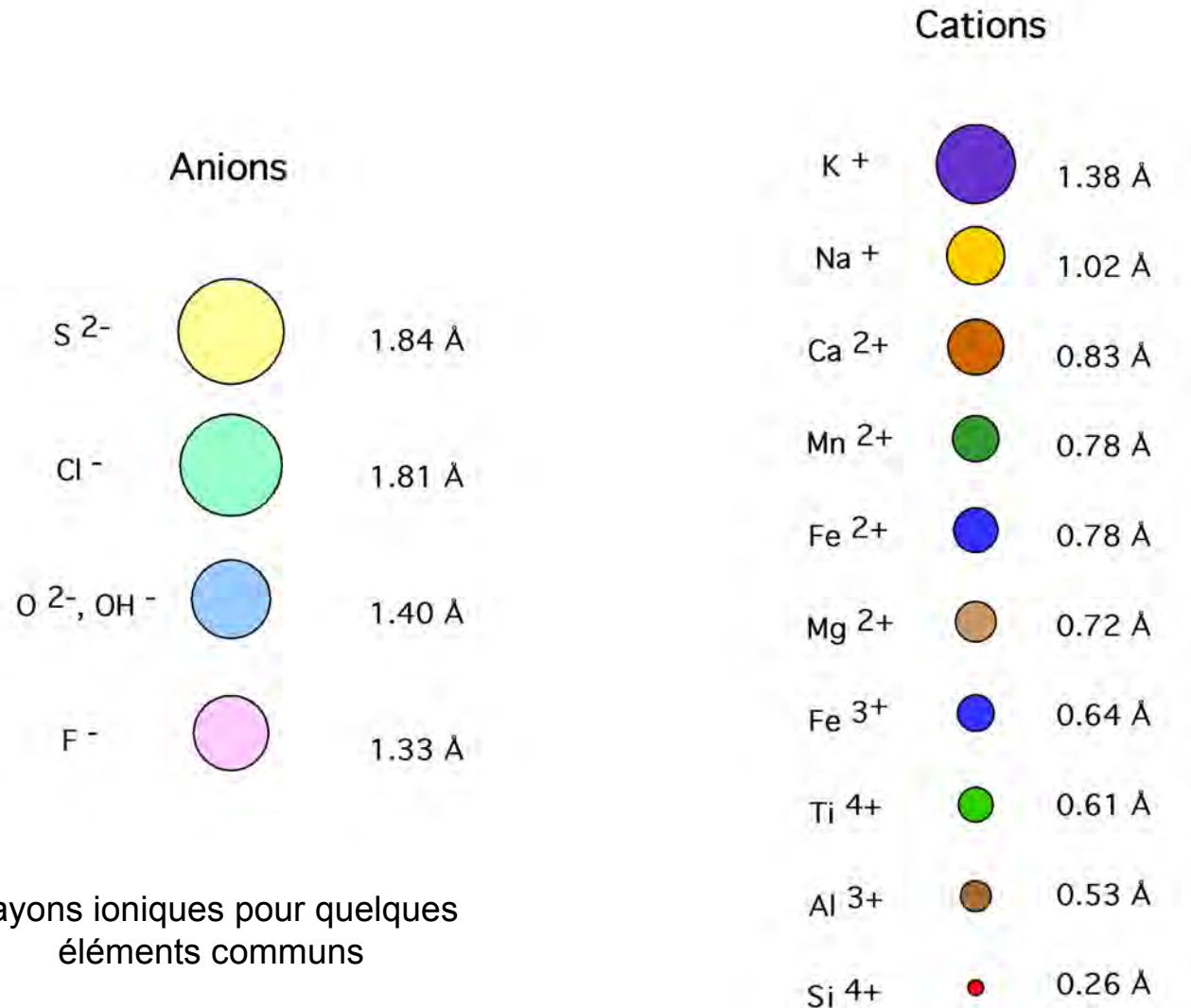


Hexagonal compact ABA



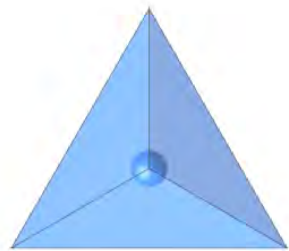
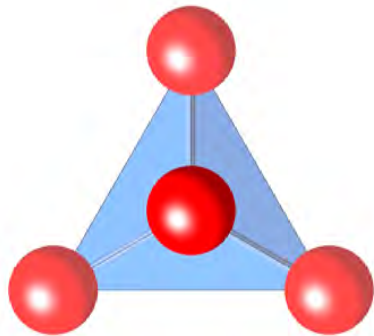
Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes de tailles différentes



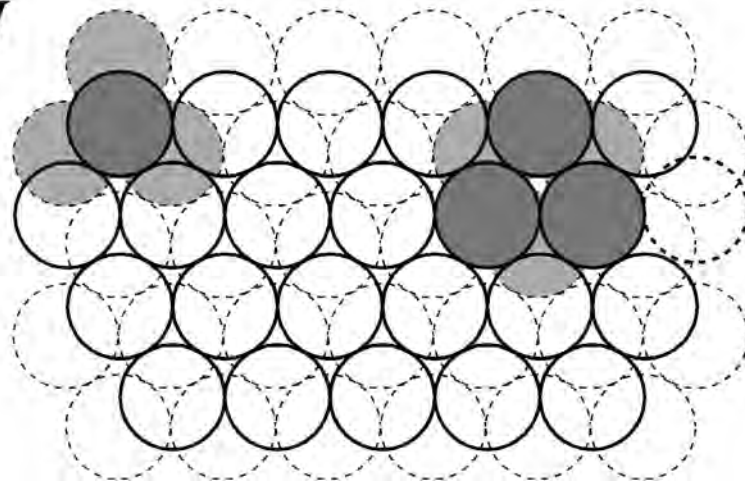
Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes

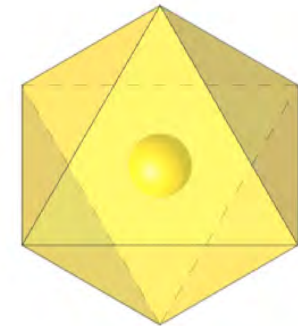
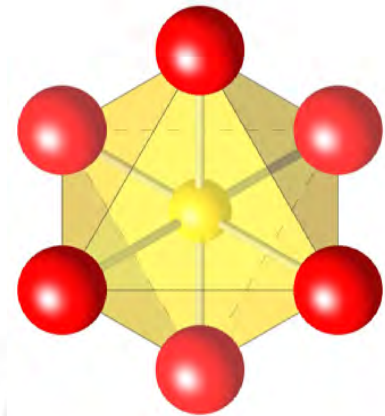


tétraèdre

IV





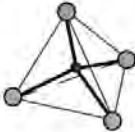

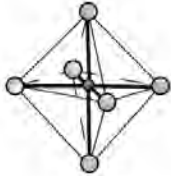

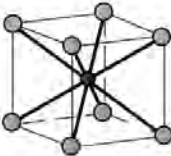
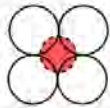
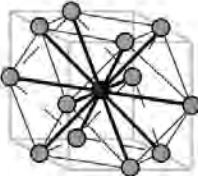
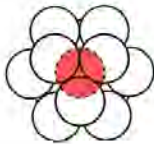
VI



octaèdre

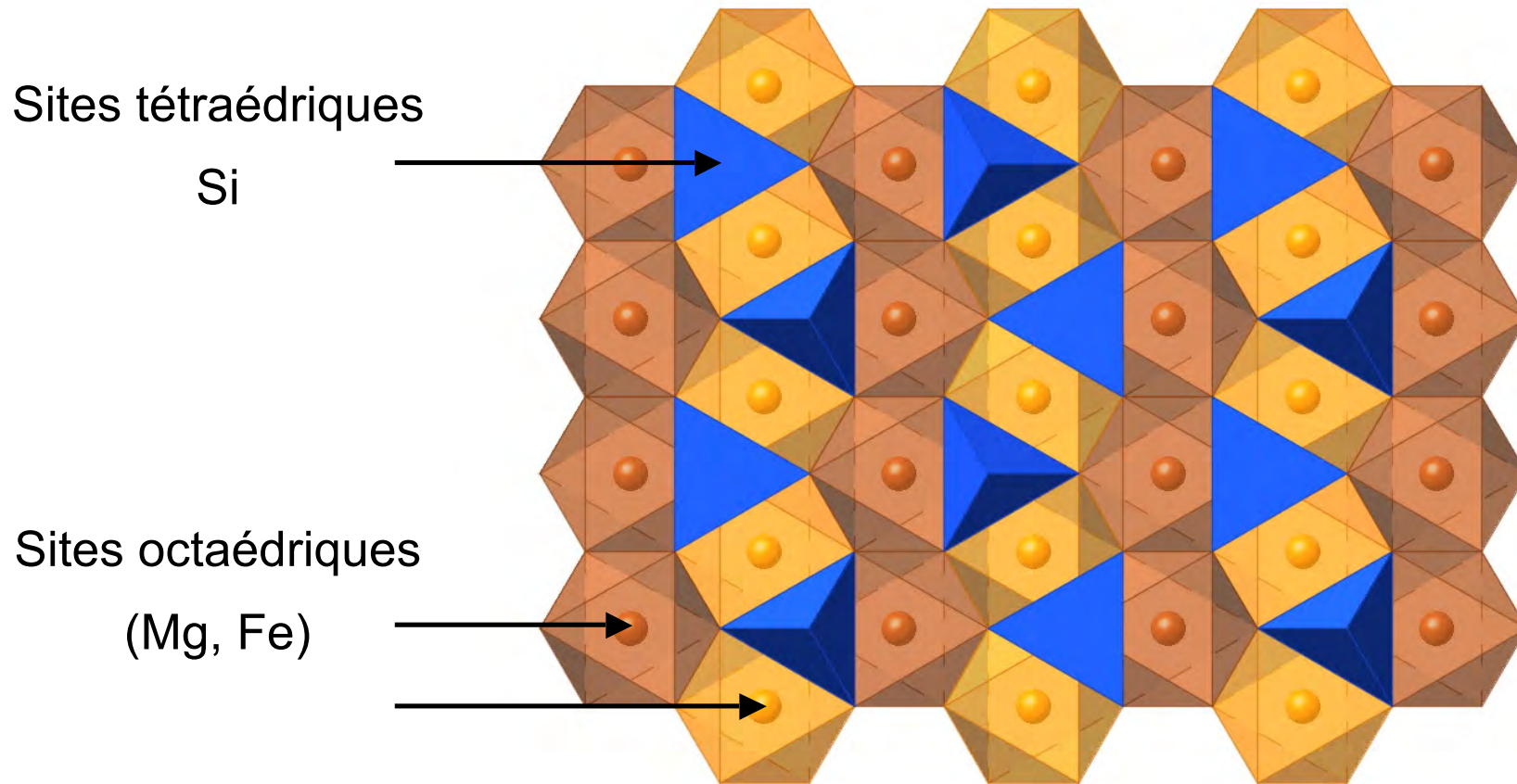
Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes

$R_c/R_a \approx 0.15$			3	triangle
$R_c/R_a \approx 0.23$			4	tétraèdre
$R_c/R_a \approx 0.4$			6	octaèdre
$R_c/R_a \approx 0.7$			8	cube (ou antiprisme carré)
$R_c/R_a \approx 1$			12	cubo-octaèdre

Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes



Structure idéale de l'olivine $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

Pourquoi tant d'ordre ?

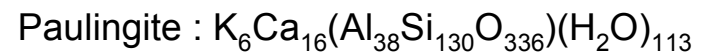
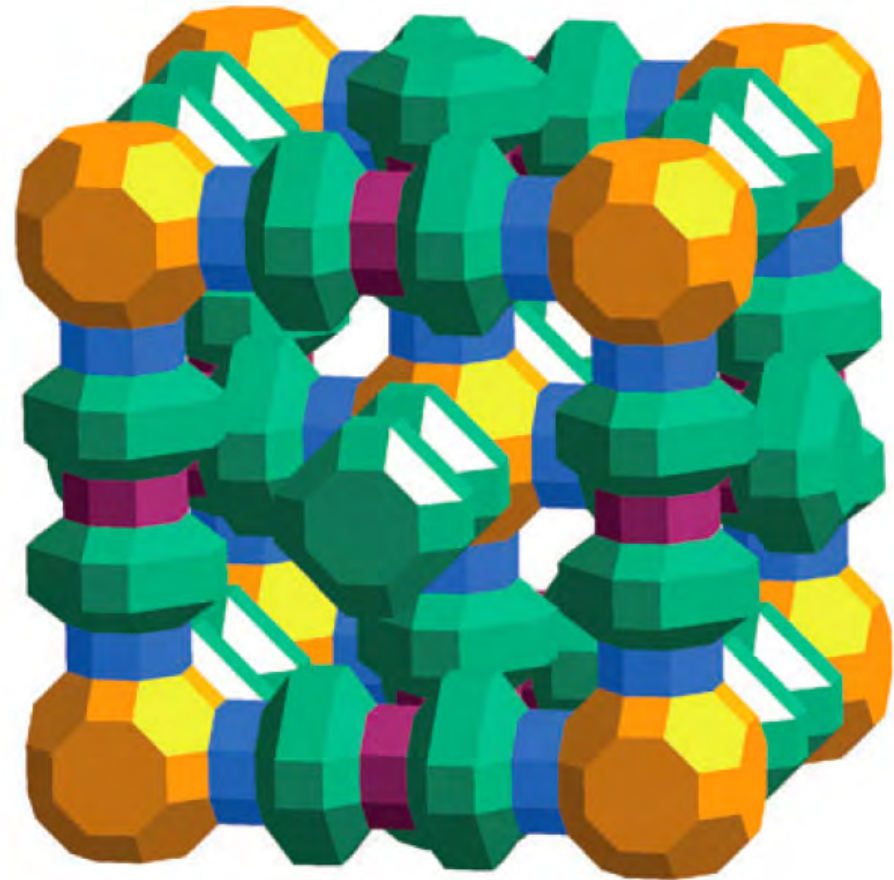
Empilements compacts d'atomes

Structures très complexes

Jusqu'à > 3000 atomes / maille

Ordre et complexité

Théorie de l'information...



Energie des cristaux

Peut-on calculer l'énergie dans un cristal?

Peut-on prévoir la stabilité de structures complexes?

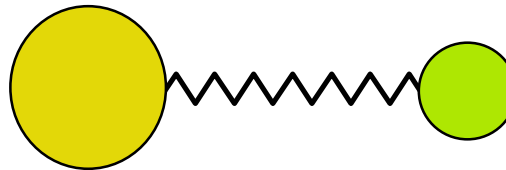
Peut-on quantifier la quantité d'ordre?

Energie des cristaux

Apports de la thermodynamique

U = énergie interne

énergie interne à 0 K : somme des énergies de liaison
+
énergie de vibration des atomes



Energie des cristaux

Apports de la thermodynamique

H = enthalpie

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \quad \text{avec P : pression et V : volume}$$

Mesure la quantité de chaleur mise en jeu
lors d'une transformation ou réaction

Energie des cristaux

Apports de la thermodynamique

S = entropie

Mesure le degré de désordre d'un système
au niveau microscopique

Energie des cristaux

Apports de la thermodynamique

$$G = H - TS \quad \text{avec } T : \text{température}$$

= enthalpie libre

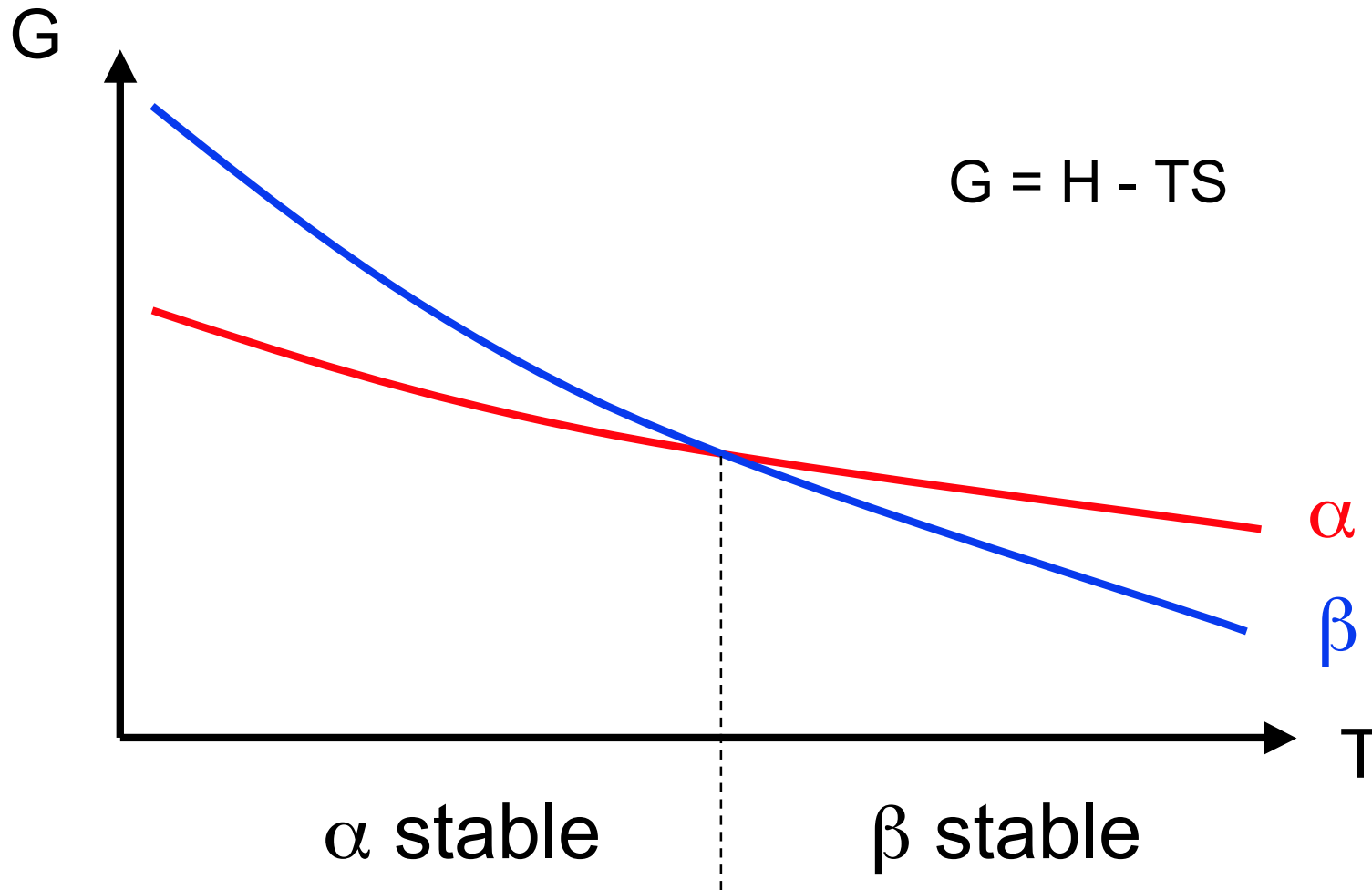
= énergie libre de Gibbs

Tout système tend à minimiser son énergie

Transformation/réaction possible ssi $\Delta G < 0$

Energie des cristaux

Apports de la thermodynamique



Structure de la matière solide

Ordre et symétries

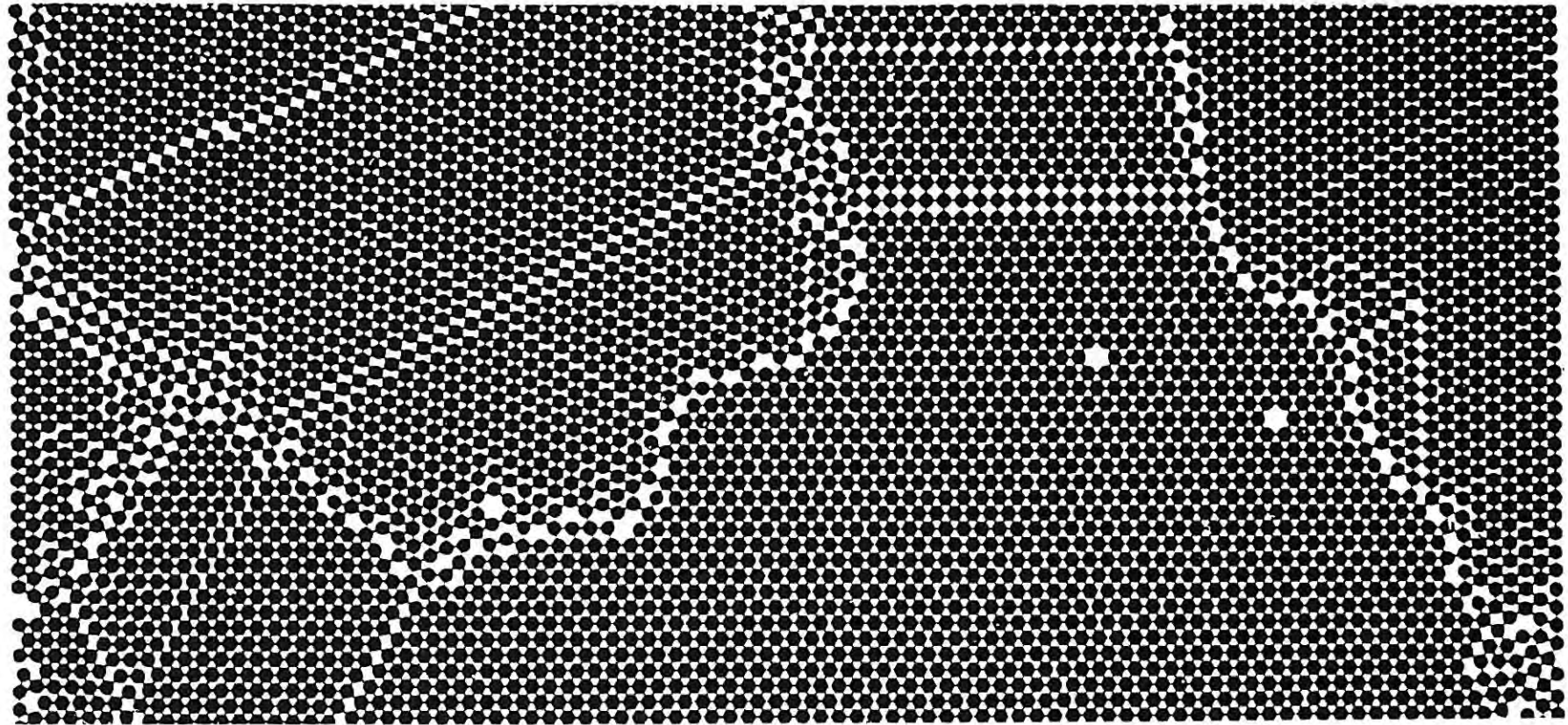
Pourquoi tant d'ordre ?

Ordre ET désordre dans les cristaux

D'autres ordres possibles ?

Du désordre dans l'ordre

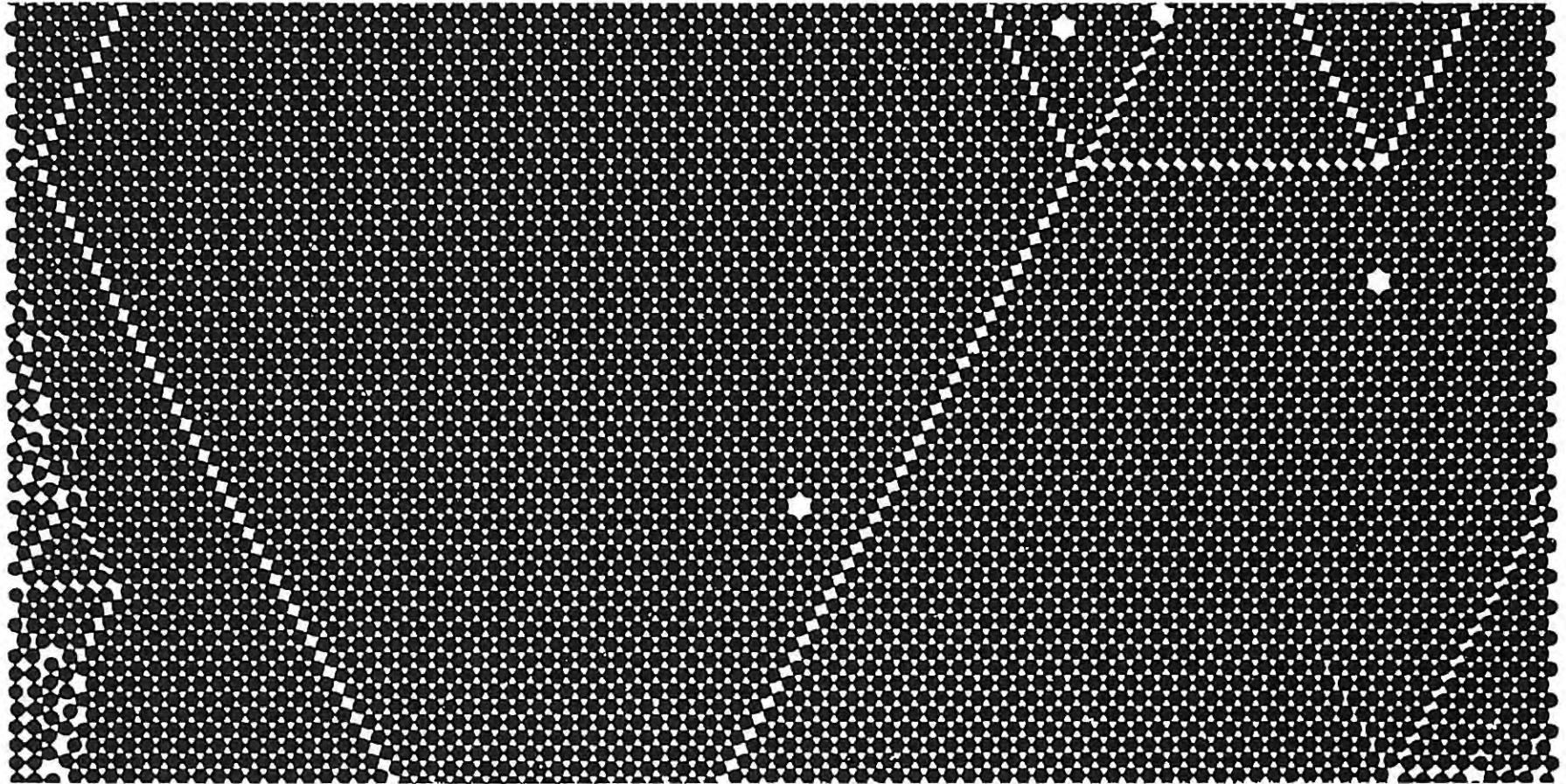
Le cristal parfait n'existe pas!



Billes calibrées entre deux plaques de plexiglass. Klein & Hurlbut, 1993

Du désordre dans l'ordre

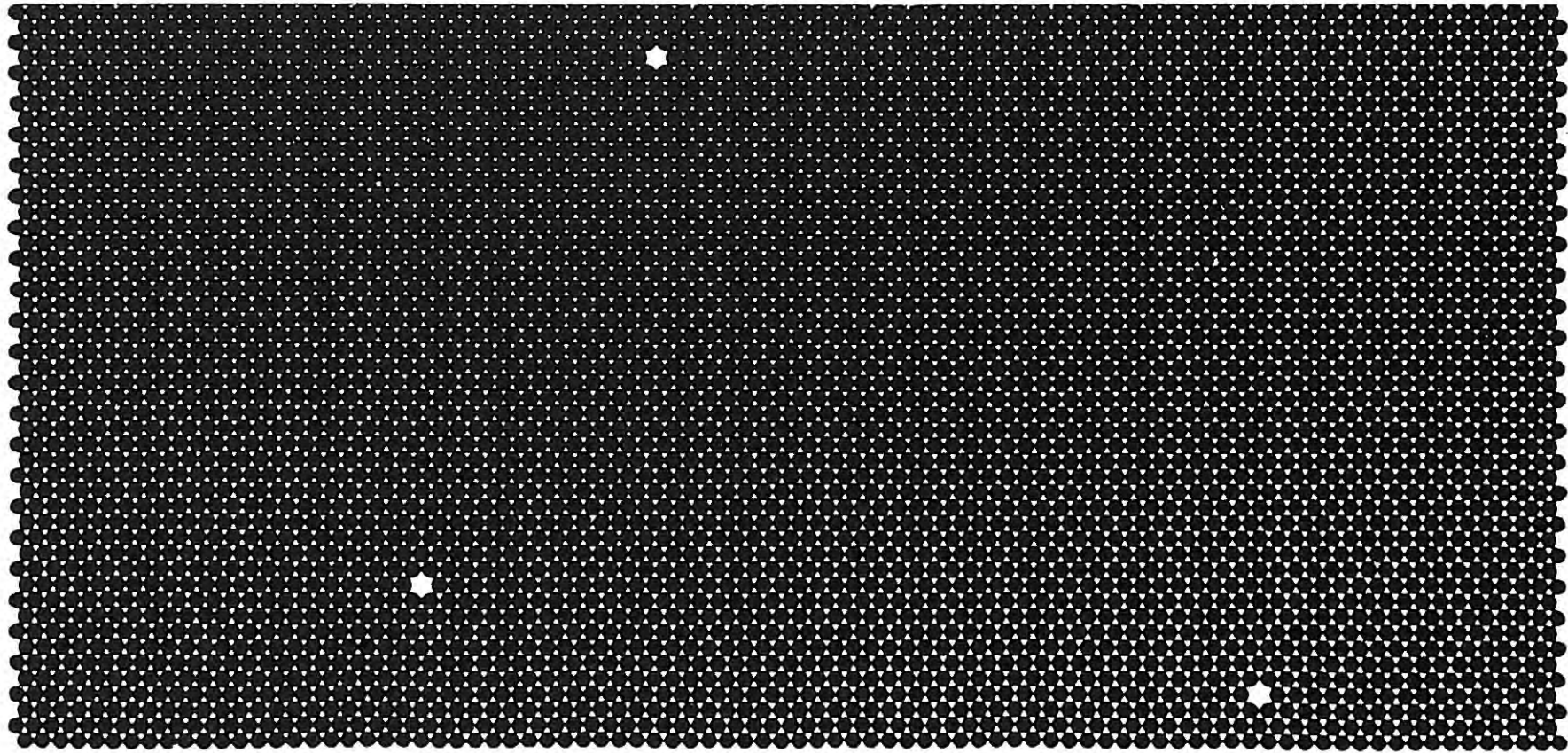
Le cristal parfait n'existe pas!



Billes calibrées entre deux plaques de plexiglass. Klein & Hurlbut, 1993

Du désordre dans l'ordre

Le cristal parfait n'existe pas!



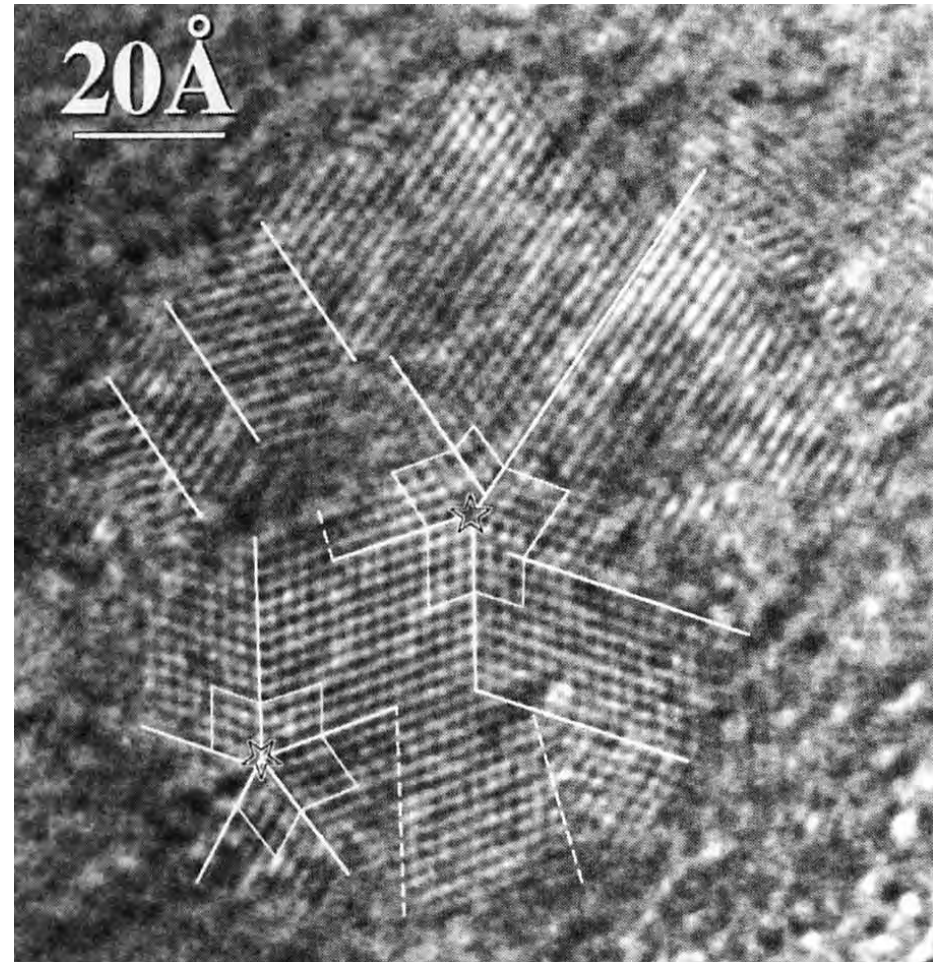
Billes calibrées entre deux plaques de plexiglass. Klein & Hurlbut, 1993

Du désordre dans l'ordre

Le cristal parfait n'existe pas!

Nano-cristaux : pas infinis

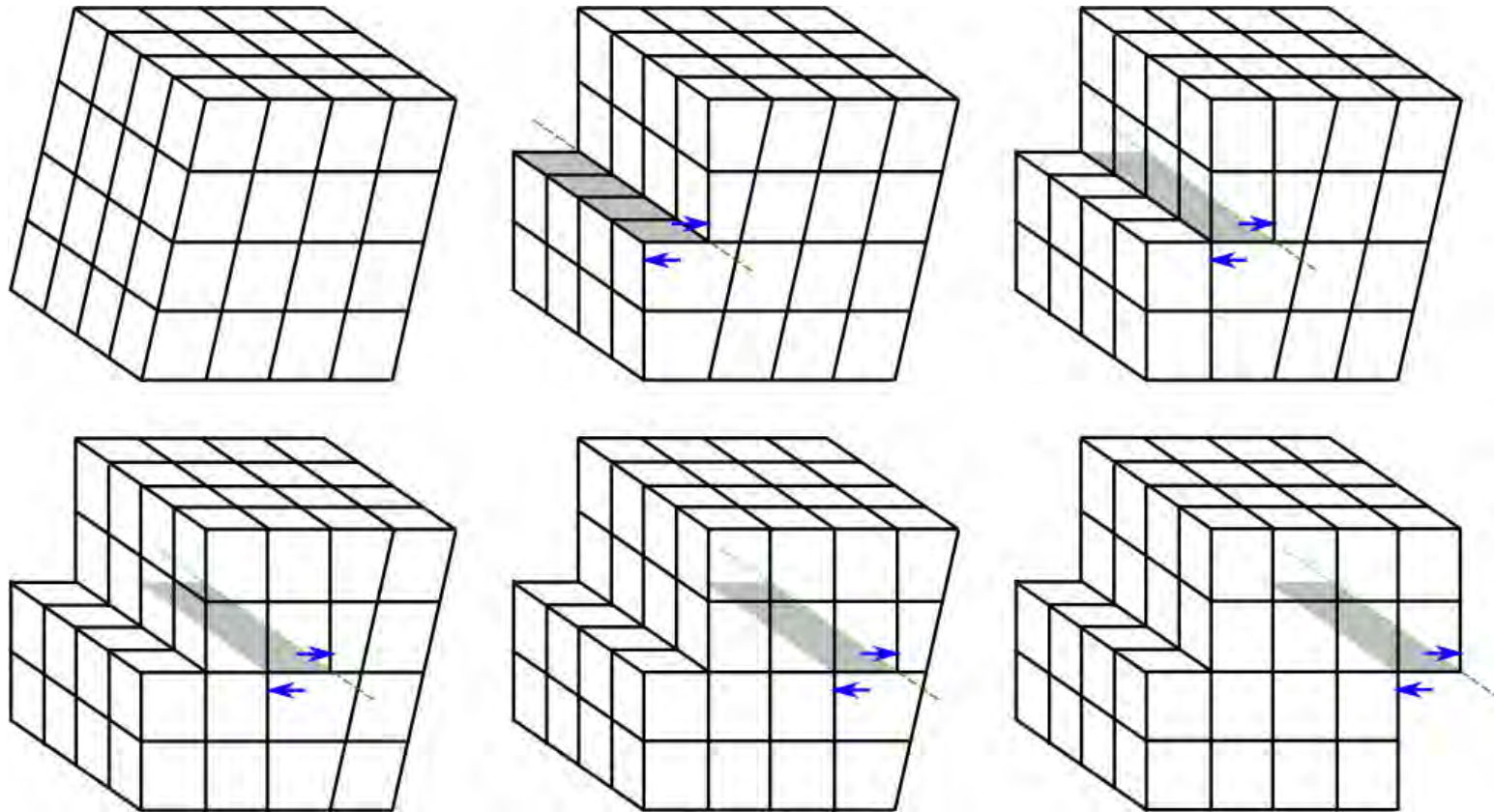
Nombreux défauts...



Nanodiamant présolaire dans une météorite. Microscopie électronique à Transmission © Tyrone Daulton

Du désordre dans l'ordre

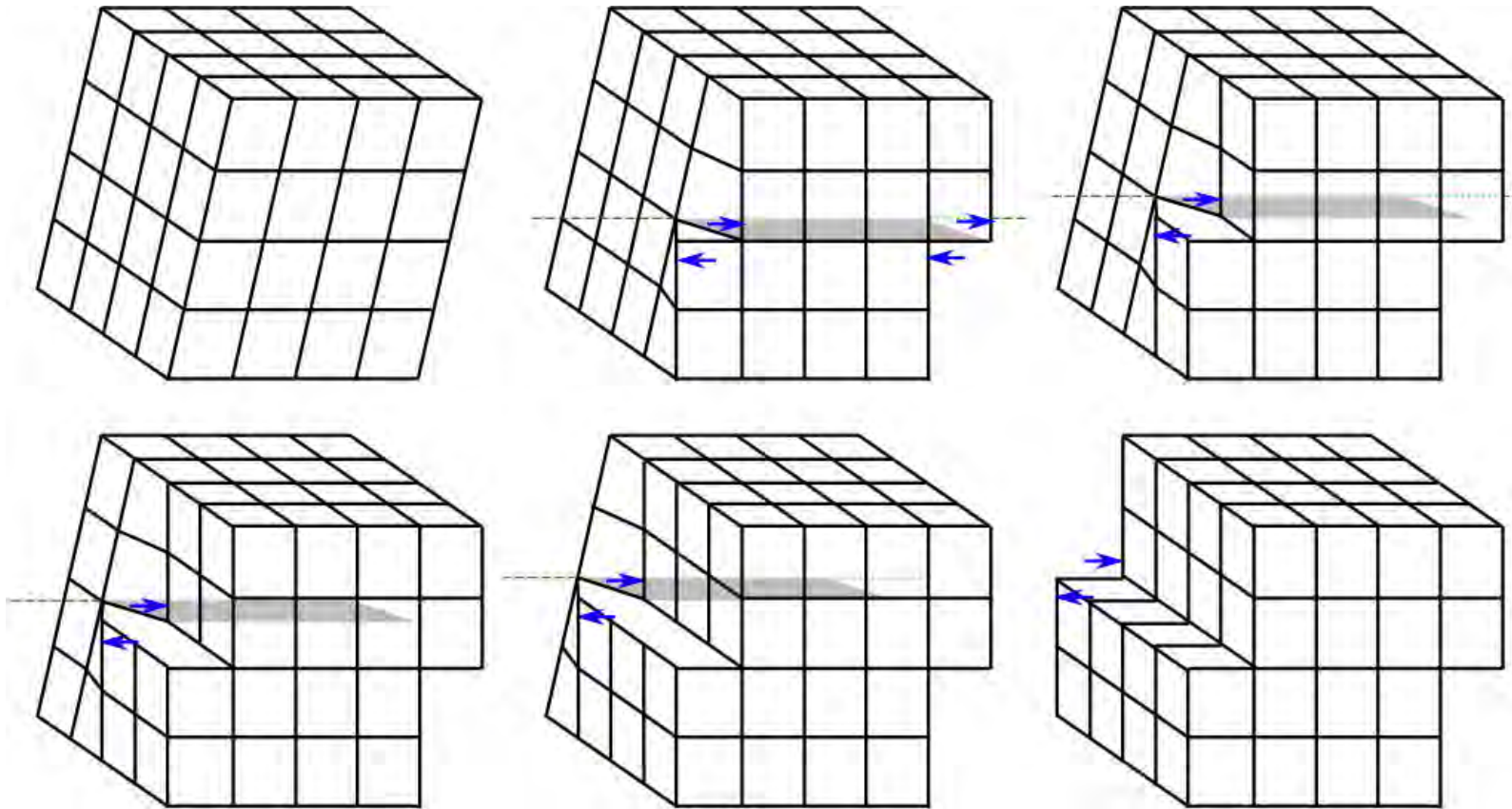
Le cristal parfait n'existe pas!



Déformation plastique par création et déplacement d'une dislocation coin

Du désordre dans l'ordre

Le cristal parfait n'existe pas!



Déformation plastique par création et déplacement d'une dislocation coin

Structure de la matière solide

Ordre et symétries

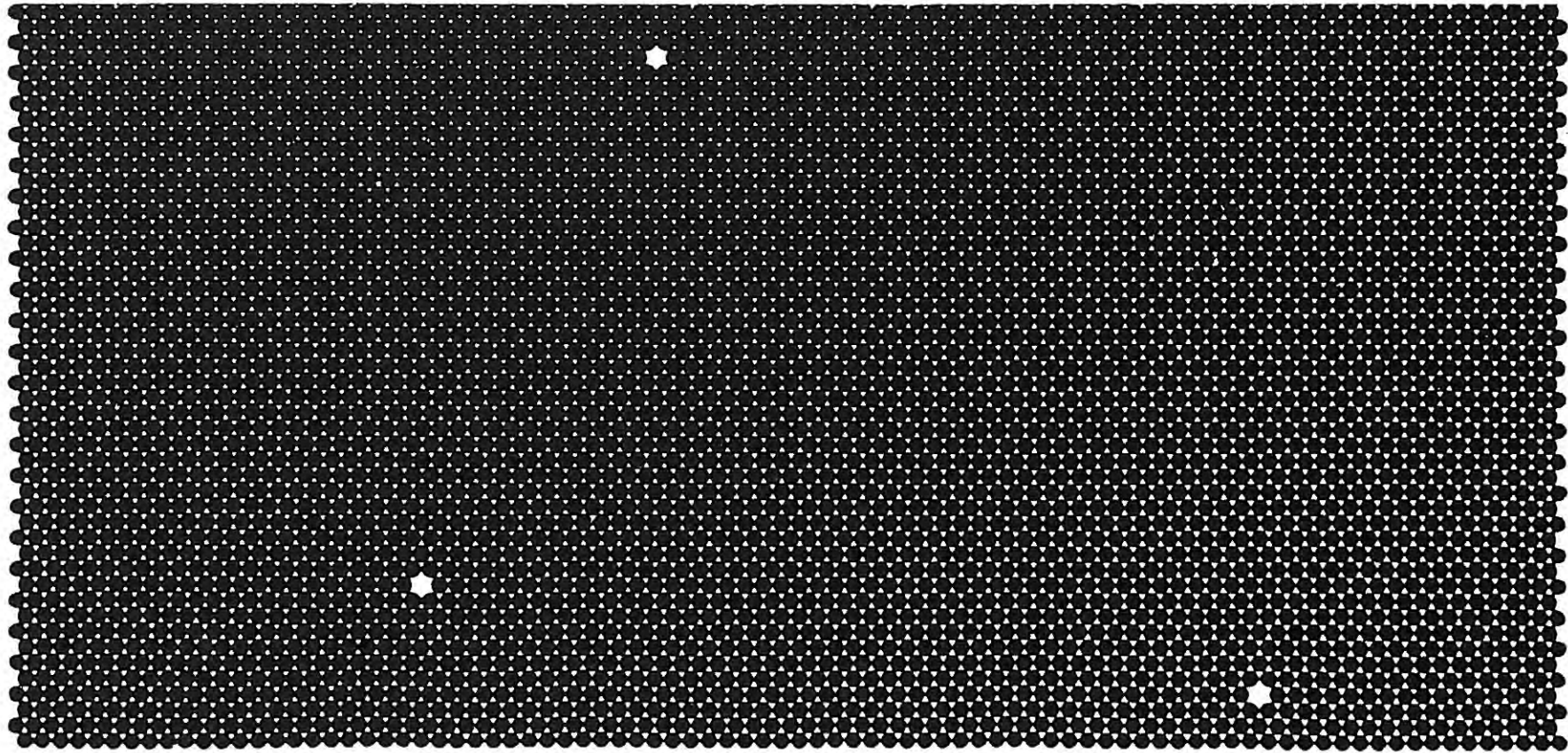
Pourquoi tant d'ordre ?

Ordre ET désordre dans les cristaux

D'autres ordres possibles ?

D'autres ordres sont-ils possibles ?

Cristal = ordre translationel, à l'infini, en 3D



D'autres ordres sont-ils possibles ?

Cristal = ordre translationnel, à l'infini, en 3D



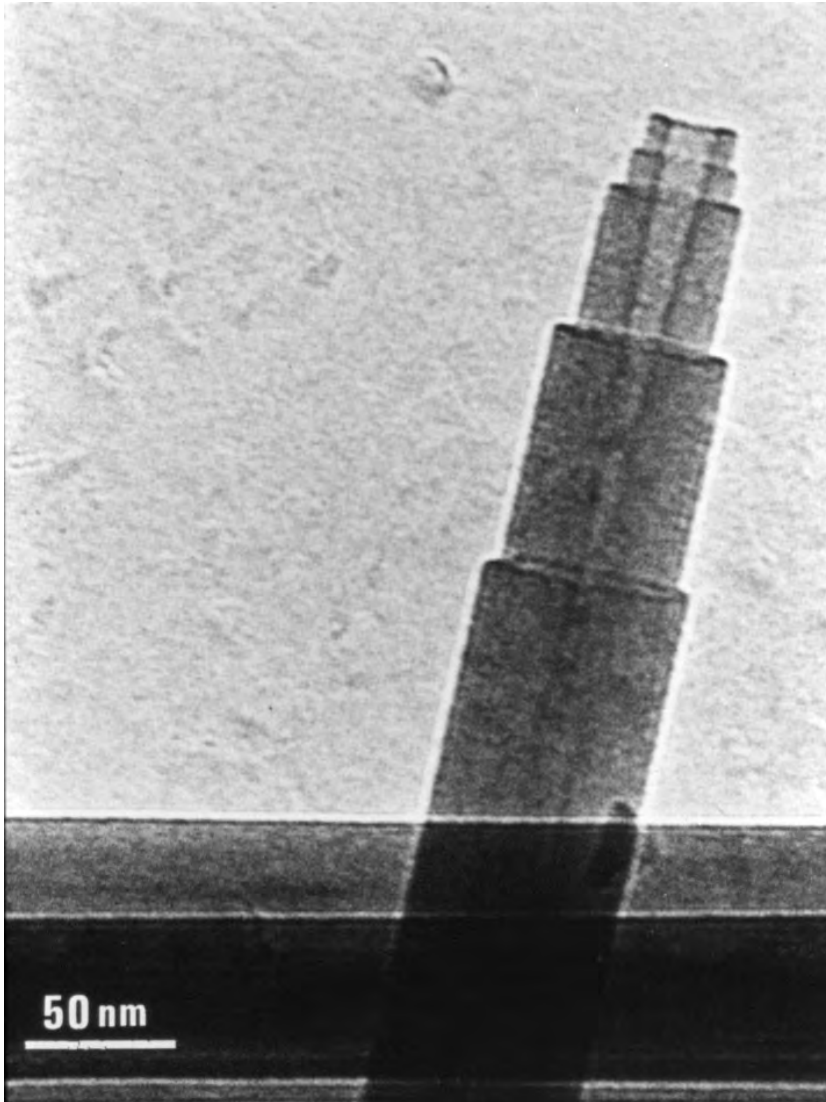
Défilé du jour de la victoire 2015. Source kremlin.ru (Presidential Press and Information Office)

D'autres ordres sont-ils possibles ?

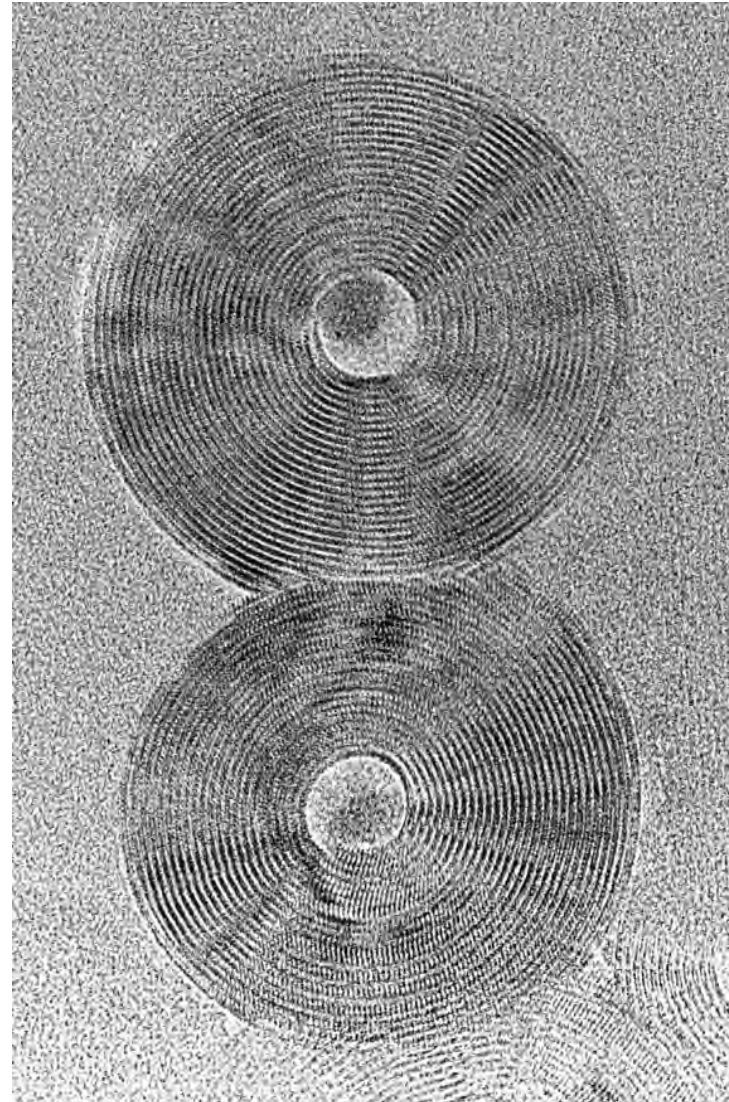
ordre non translationnel, non propageable à longue distance



D'autres ordres sont-ils possibles ?

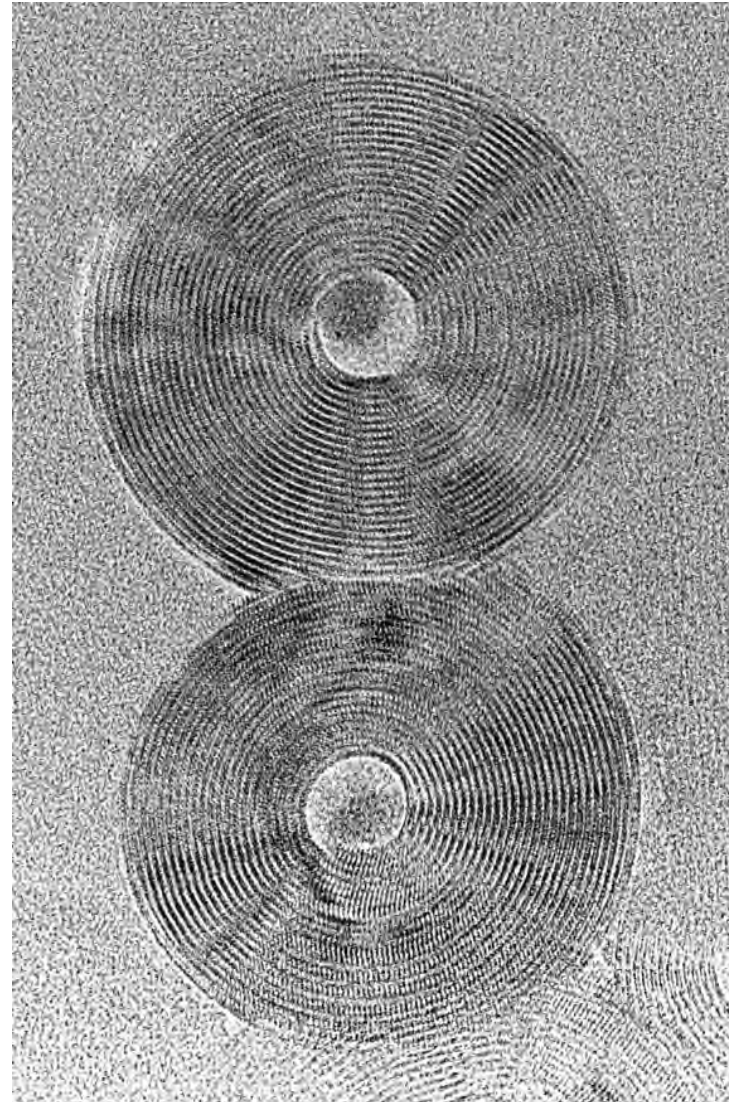
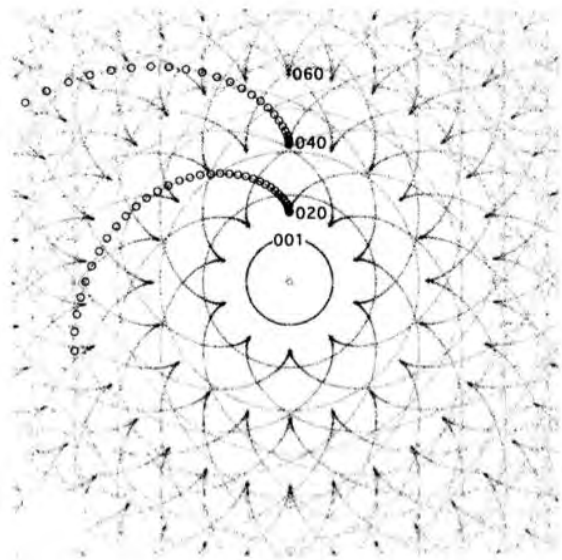
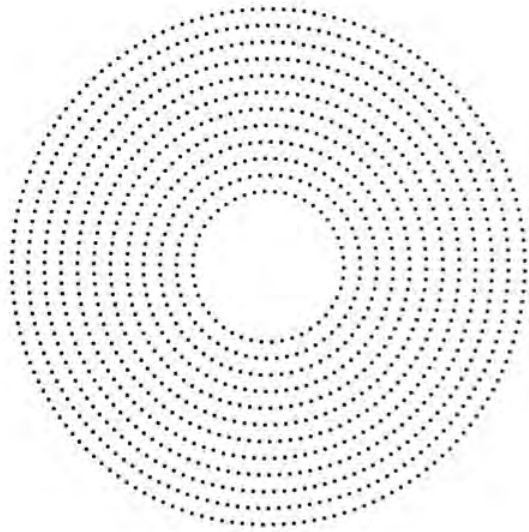


Fibre de chrysotile cylindrique

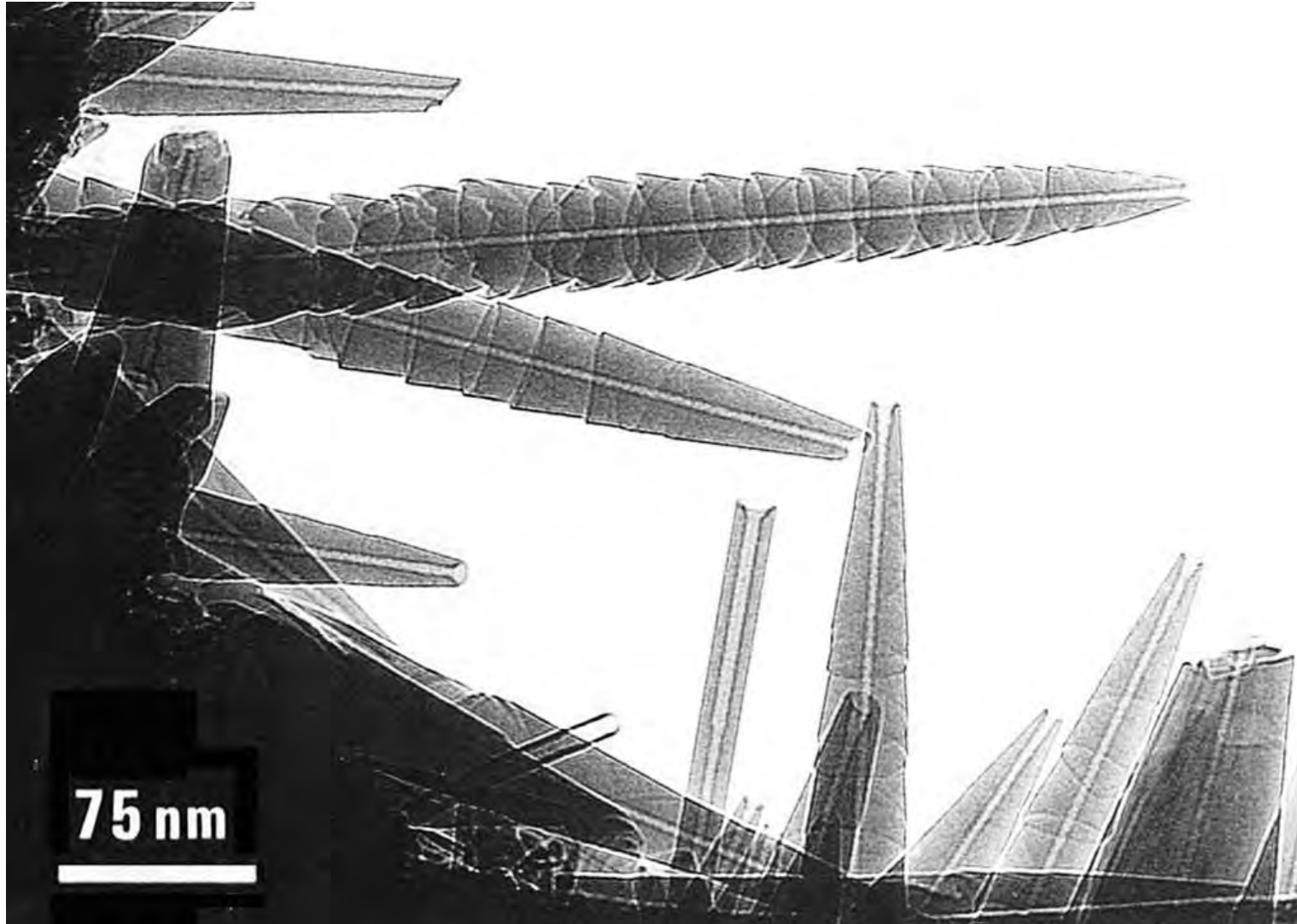


images MET B. Devouard

D'autres ordres sont-ils possibles ?



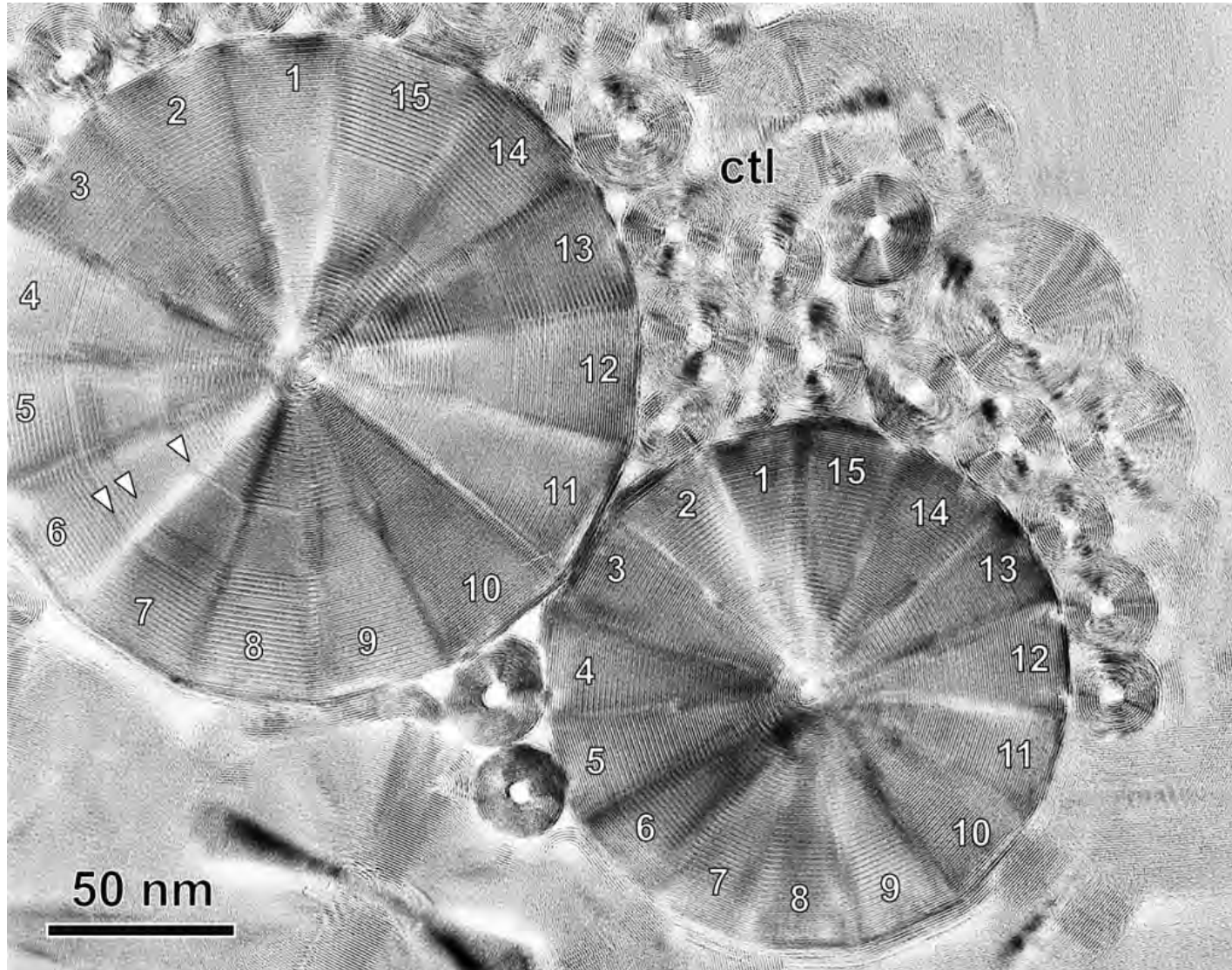
D'autres ordres sont-ils possibles ?



Chrysotile synthétique conique

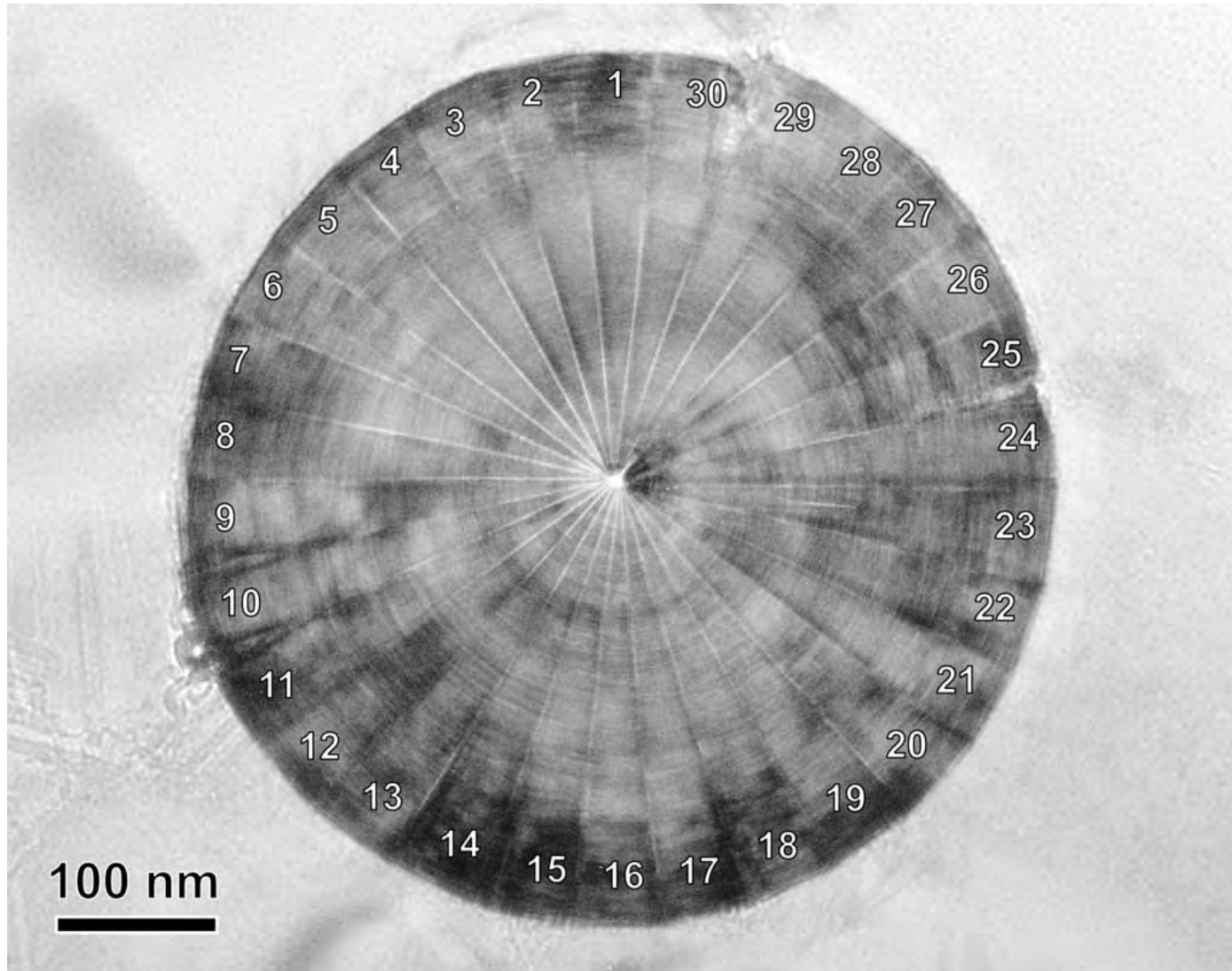
image MET B. Devouard

D'autres ordres sont-ils possibles ?



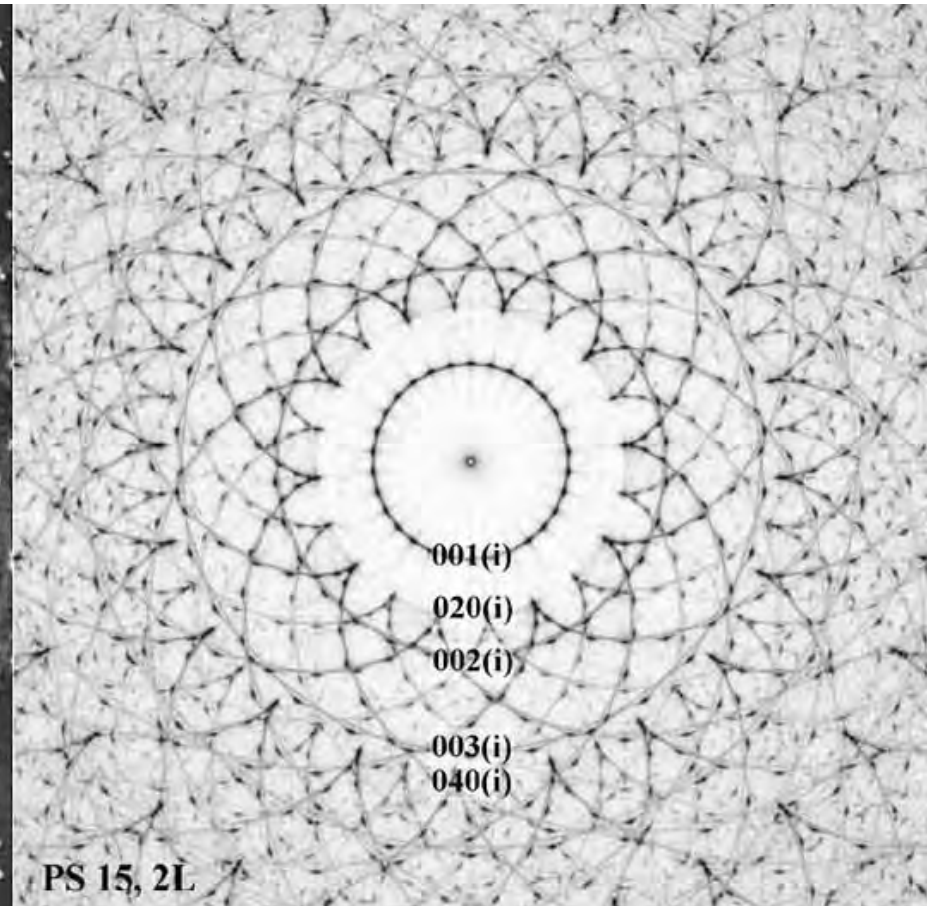
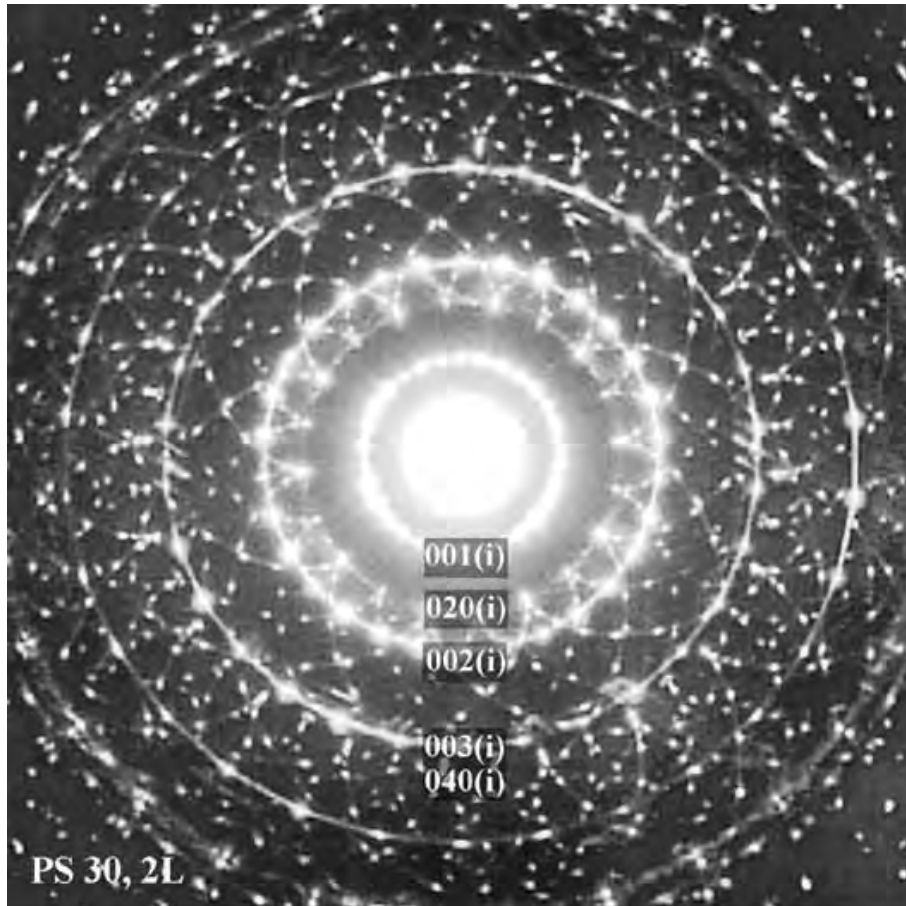
Serpentines polygonales - image MET A. Baronnet

D'autres ordres sont-ils possibles ?



Serpentines polygonales - image MET B. Devouard

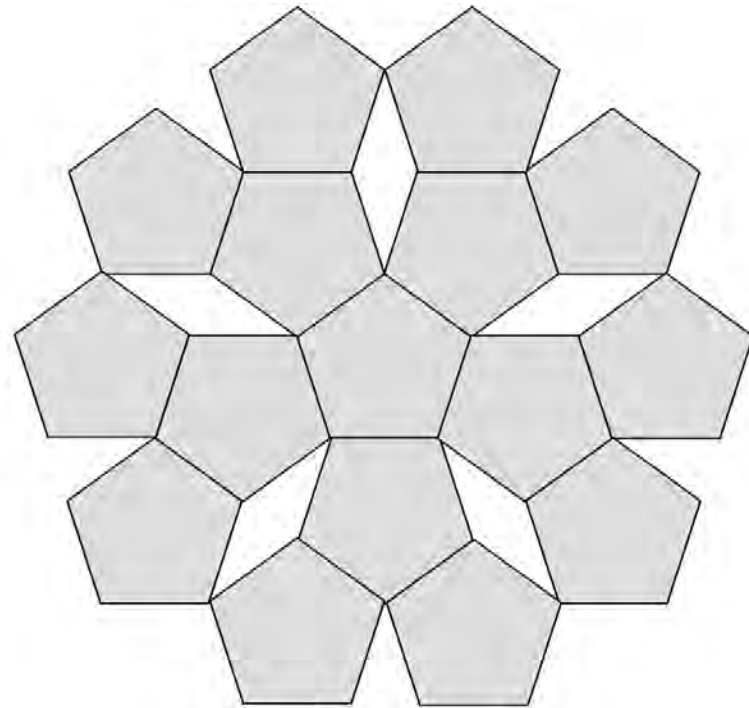
D'autres ordres sont-ils possibles ?



Cliché de diffraction électronique et simulation par TF de serpentine polygonale - B. Devouard

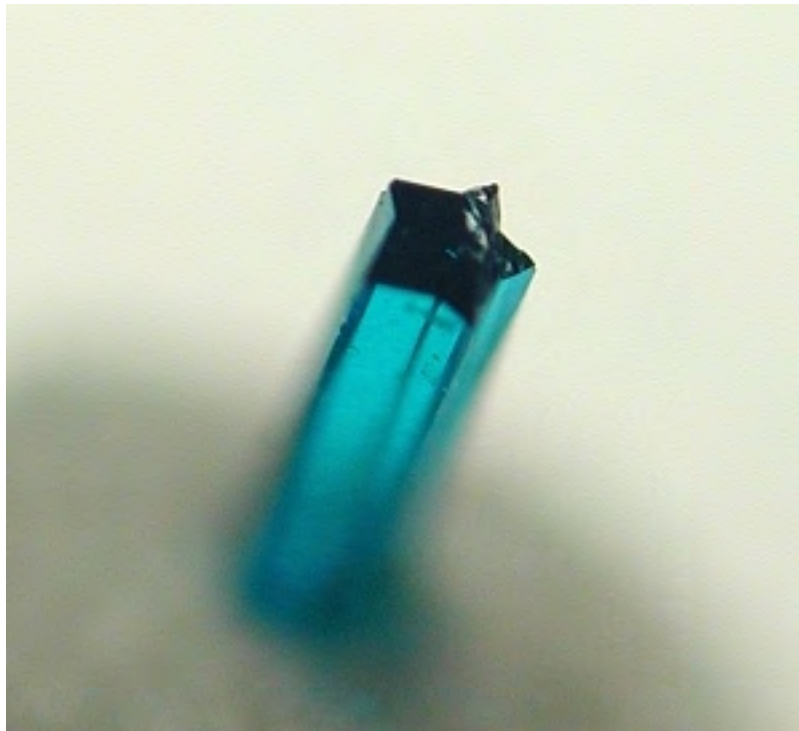
D'autres ordres sont-ils possibles ?

Symétries 5 (et 7)
interdites dans les
cristaux

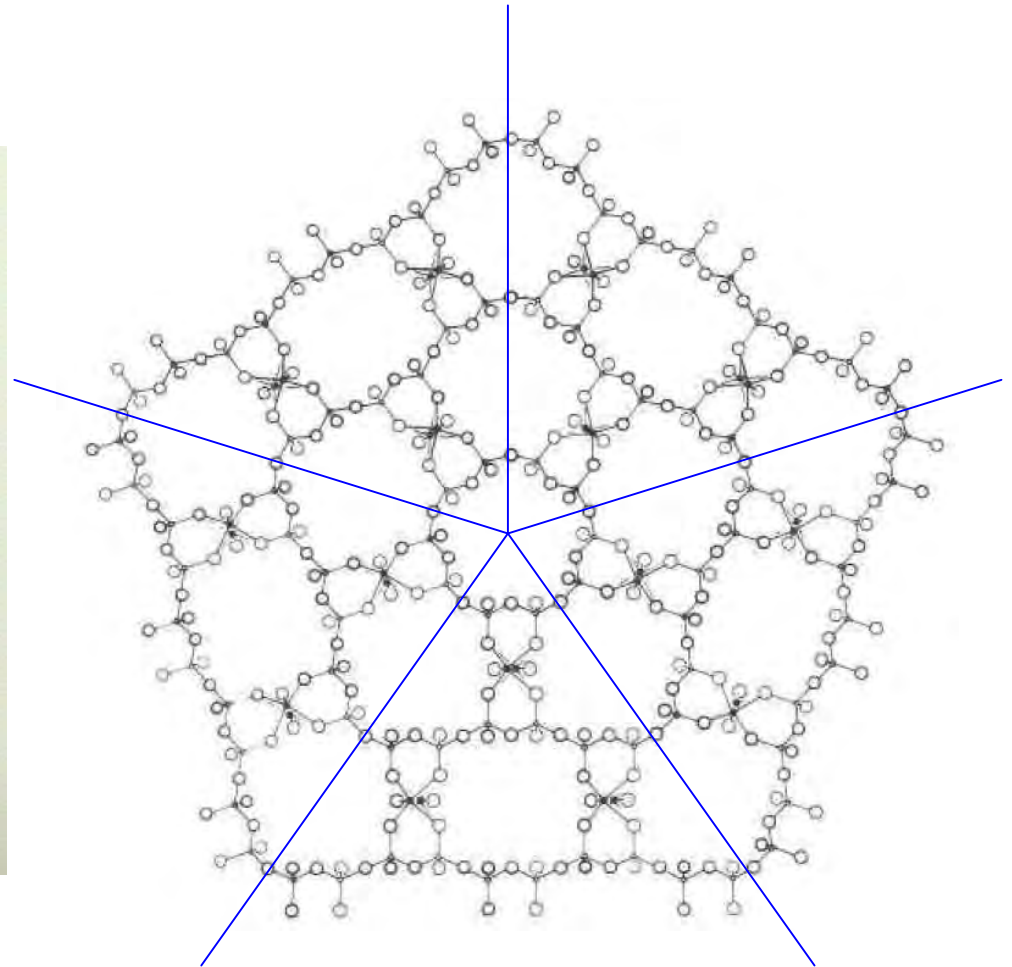


D'autres ordres sont-ils possibles ?

Symétrie 5 : il est interdit d'interdire

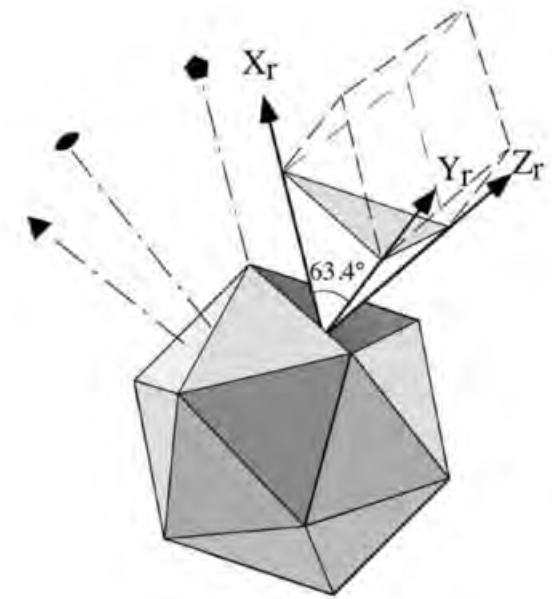
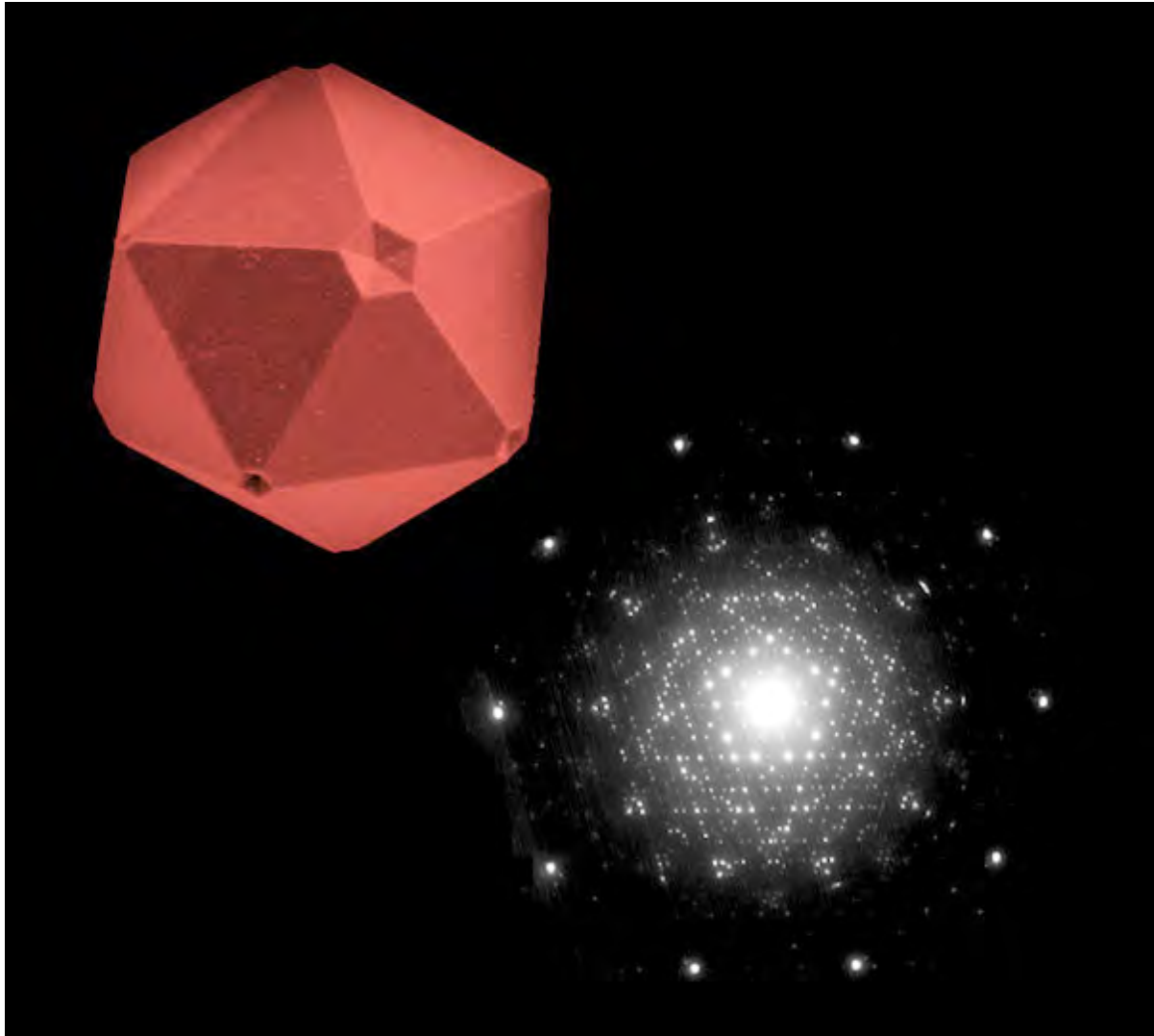


Pentagonite $\text{Ca}(\text{VO})\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$



Evans (1973)

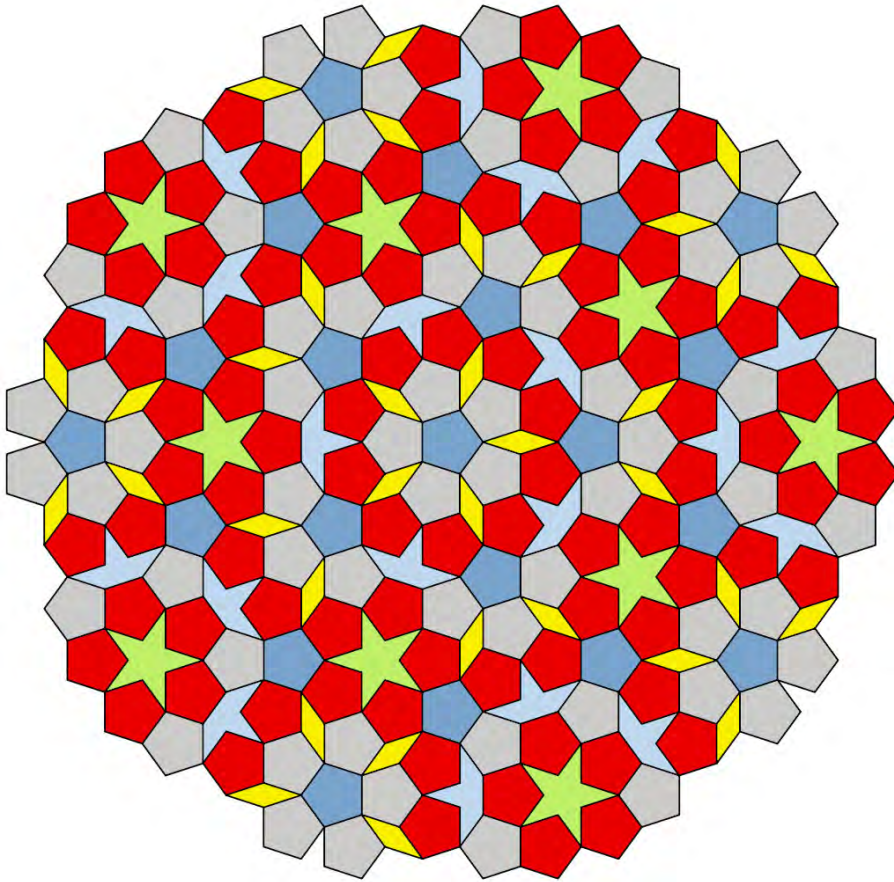
Symétrie 5 : il est interdit d'interdire



B_6O

Multimacle icosaédrique

Symétrie 5 : il est interdit d'interdire



Pavage de Penrose (1931-)

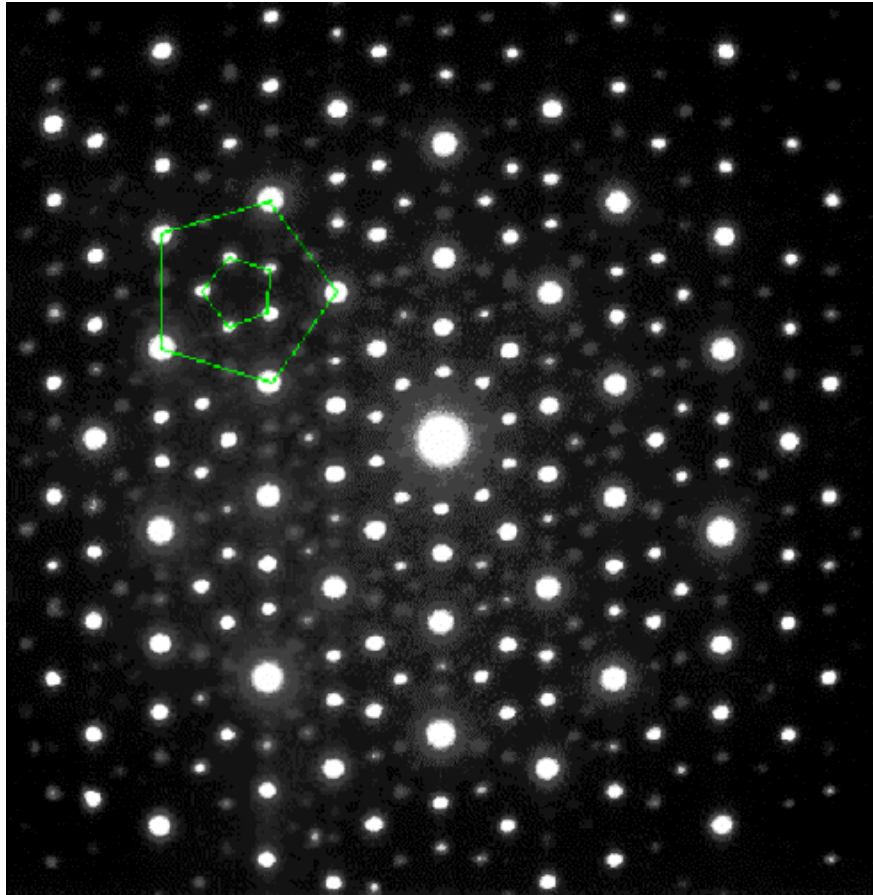


Mosaïque de la mosquée d'Ispahan, Iran (1453)

ordre non translationnel

Symétrie 5 : il est interdit d'interdire

Quasicristaux : ordre "cristallin" non translationnel



Cliché de diffraction électronique d'un quasicristal selon un axe de symétrie d'ordre 5

Dan Shechtman

Prix Nobel de chimie 2011



26^{EME}
**FESTIVAL
D'ASTRONOMIE
DE FLEURANCE (GERS)**
DU 6 AU 12 AOÛT 2016
VIII^{ème} Marathon des sciences
XXVI^{ème} Festival Adultes
XI^{ème} Festival Astro-jeunes



**Festival
d'astronomie
de Fleurance**
Ferme des étoiles

26^{ème} Festival d'Astronomie de Fleurance

De l'amorphe au cristal

Ordre, désordre...

ou plutôt des ordres

