

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 et désordre dans la matière solide

Bertrand DEVOUARD

Aix-Marseille université – CNRS

CEREGE



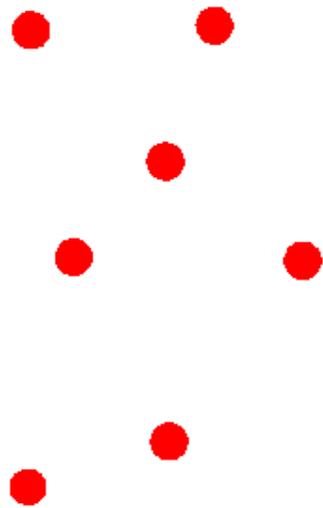
Etats de la matière

Gaz

Liquide

Solide

Etats de la matière

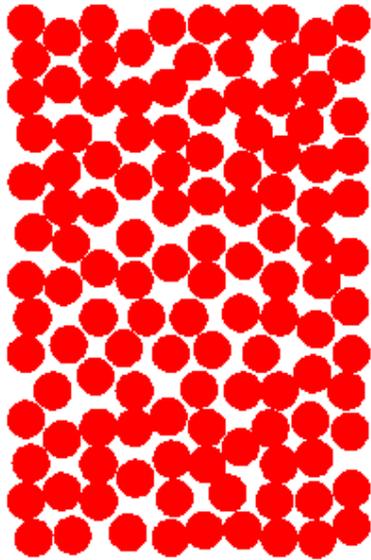


Gaz (et plasma)

Liquide

Solide

Etats de la matière

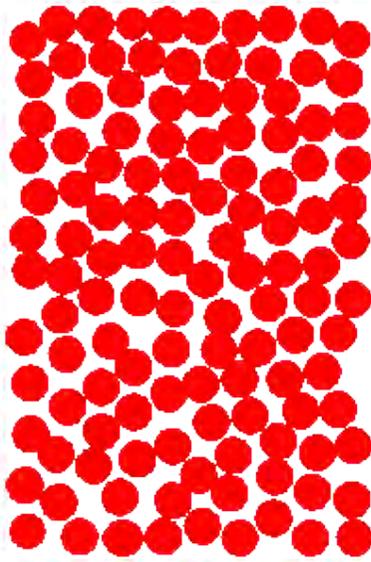


Gaz (et plasma)

Liquide

Solide

Etats de la matière

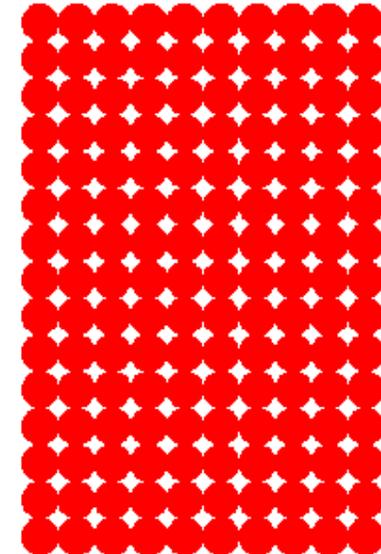


Verres
(amorphes)

Gaz (et plasma)

Liquide

Solide



Cristaux

Etats de la matière



Gaz (et plasma)

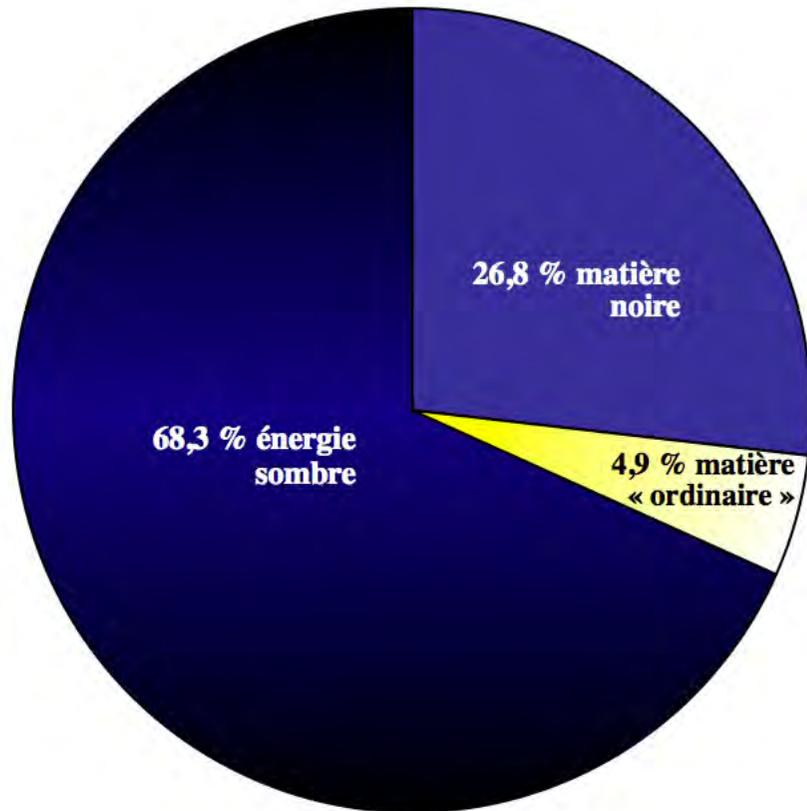
Liquide

Solide

et tout le reste...



Etats de la matière dans l'Univers



Données : ESA, Planck Collaboration (2013)

Milieu interstellaire :

99% gaz / plasma

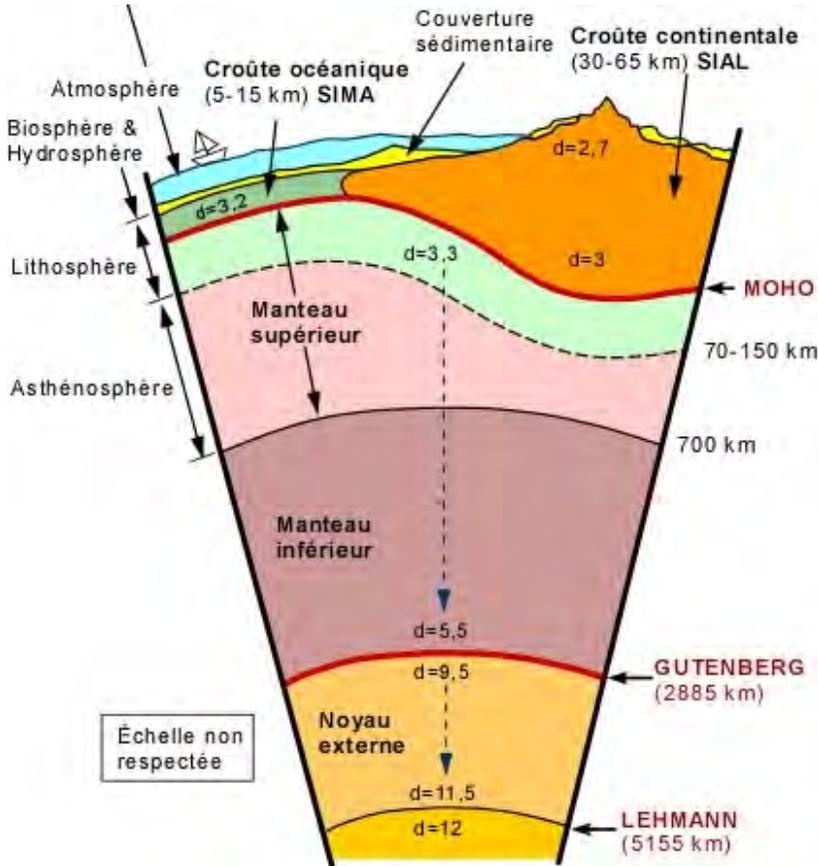
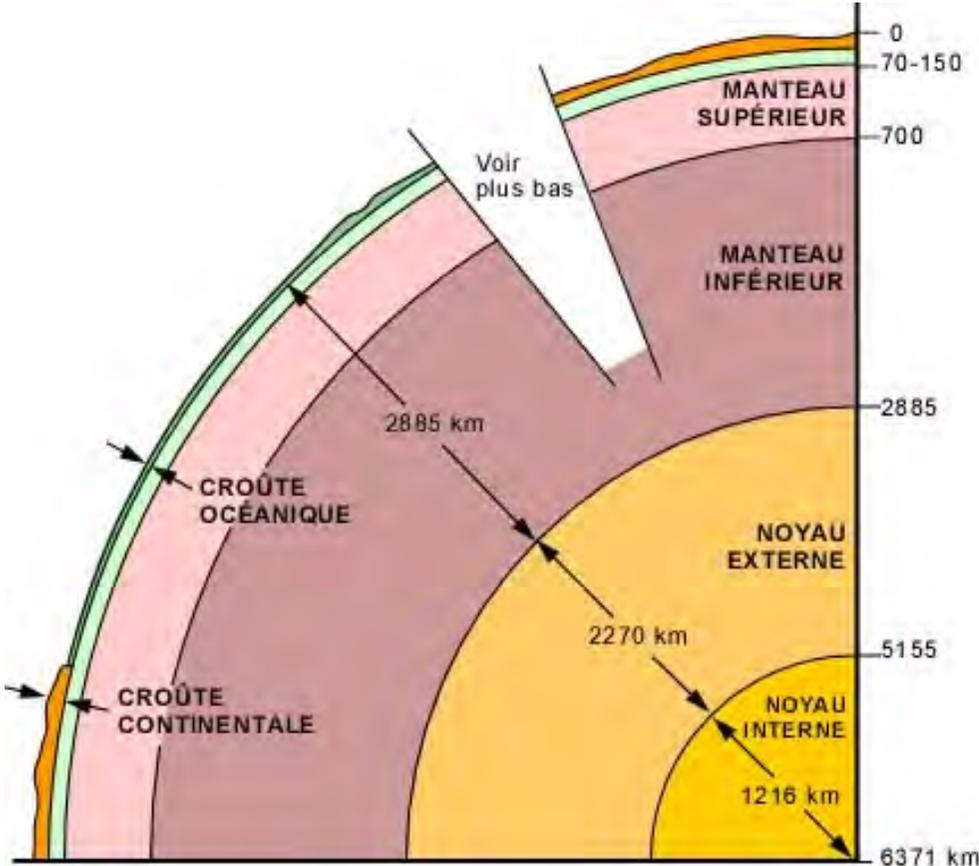
1% poussières solides

Système solaire :

99,9% soleil (plasma)

< 0.1 % solides (dont planètes)

Structure de la Terre



Source : Université de Laval

La matière sur Terre

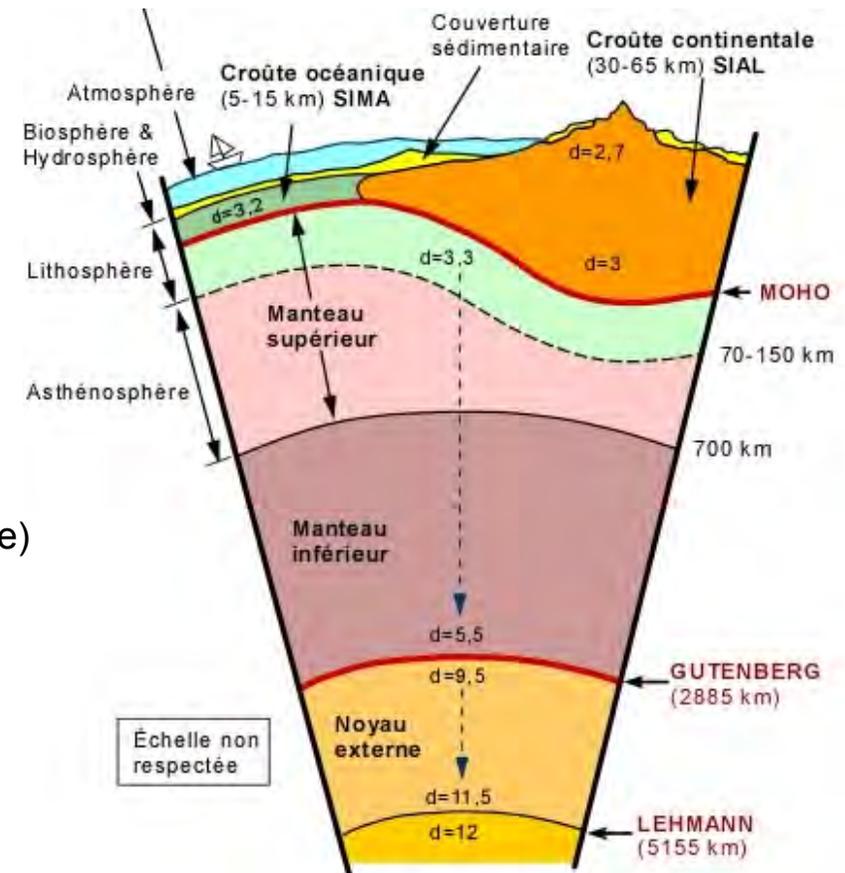
Terre :

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 ?

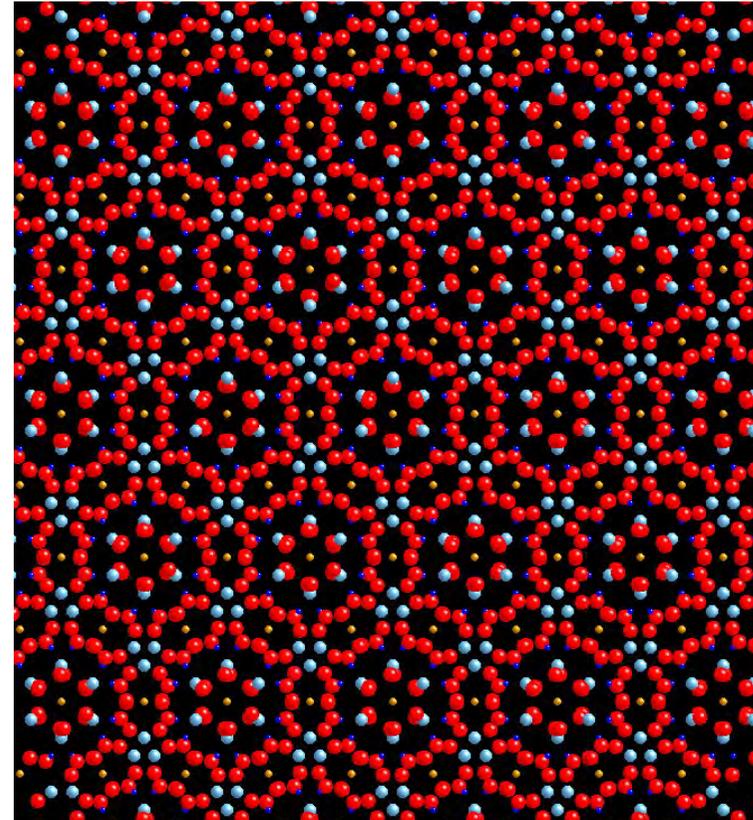
Ordre ET désordre dans les cristaux

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?

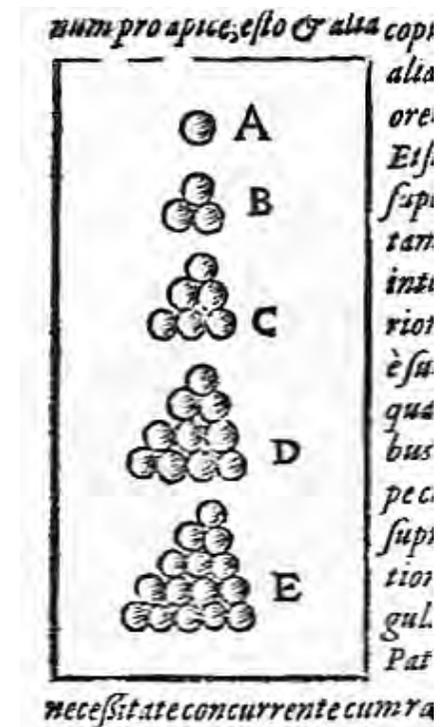
(*De nive sexangula*, 1611)

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

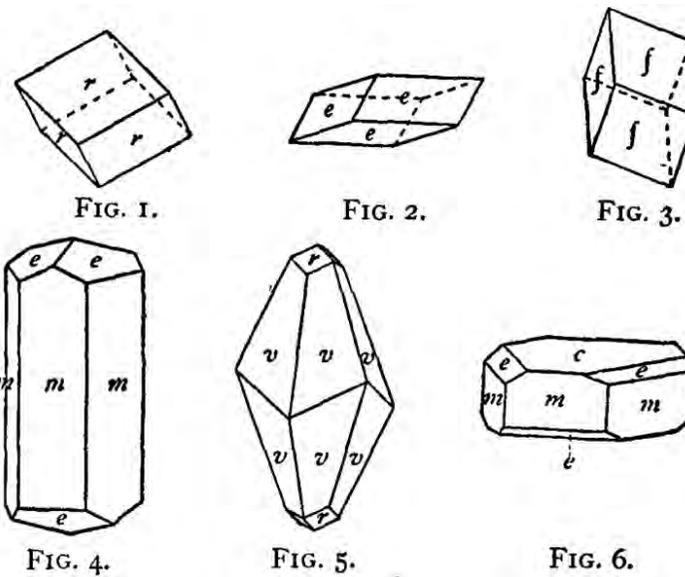


Structure de la matière

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)

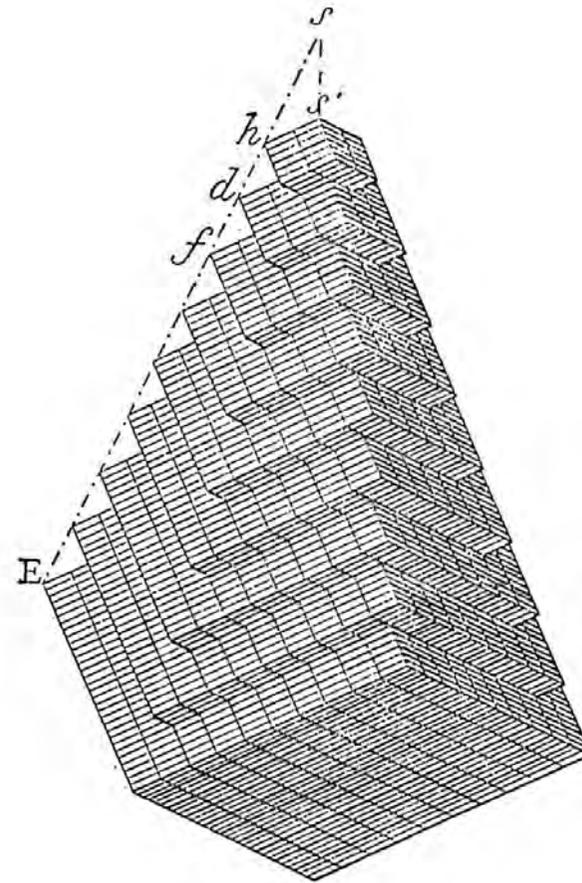


Structure de la matière

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



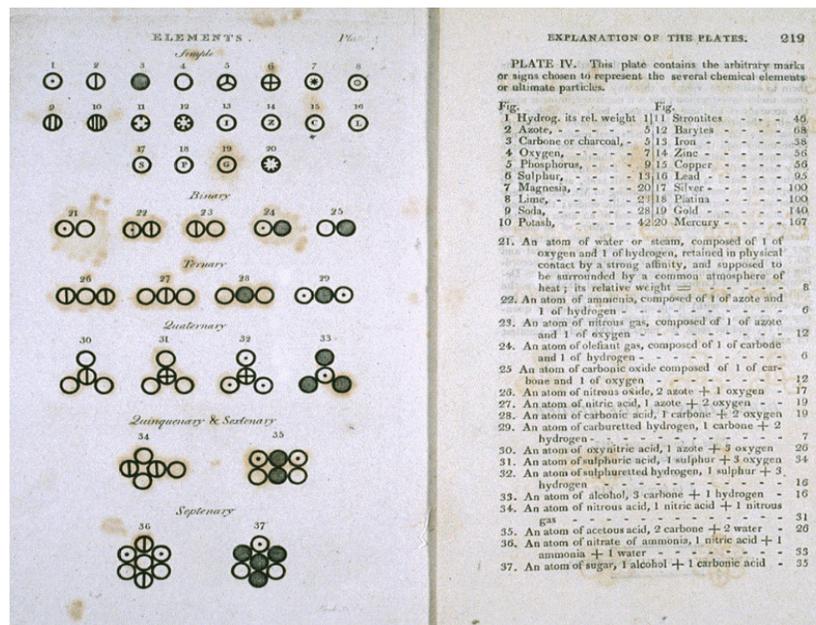
Antoine Lavoisier
(1743-1794)

Différents éléments (atomes) immuables et indestructibles

peuvent se combiner en proportions simples pour former des composés



John Dalton
(1766-1844)



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

Groupe → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
 Période IA IIA IIIA IVA VA VIA VIIA VIIIA
 1 Hydrogène 1 H 2 He
 2 Lithium 3 Li 4 Bé Bore 5 B Carbone 6 C Azote 7 N Oxygène 8 O Fluor 9 F Néon 10 Ne
 3 Sodium 11 Na Magnésium 12 Mg Aluminium 13 Al Silicium 14 Si Phosphore 15 P Soufre 16 S Chlore 17 Cl Argon 18 Ar
 4 Potassium 19 K Calcium 20 Ca Scandium 21 Sc Titane 22 Ti Vanadium 23 V Chrome 24 Cr Manganèse 25 Mn Fer 26 Fe Cobalt 27 Co Nickel 28 Ni Cuivre 29 Cu Zinc 30 Zn Gallium 31 Ga Germanium 32 Ge Arsenic 33 As Sélénium 34 Se Brome 35 Br Krypton 36 Kr
 5 Rubidium 37 Rb Strontium 38 Sr Yttrium 39 Y Zirconium 40 Zr Niobium 41 Nb Molybdène 42 Mo Technétium 43 Tc Ruthénium 44 Ru Rhodium 45 Rh Palladium 46 Pd Argent 47 Ag Cadmium 48 Cd Indium 49 In Étain 50 Sn Antimoine 51 Sb Tellure 52 Te Iode 53 I Xénon 54 Xe
 6 Césium 55 Cs Baryum 56 Ba Lanthanides 57-71 Hafnium 72 Hf Tantalum 73 Ta Tungstène 74 W Rénium 75 Re Osmium 76 Os Iridium 77 Ir Platine 78 Pt Or 79 Au Mercure 80 Hg Thallium 81 Tl Plomb 82 Pb Bismuth 83 Bi Polonium 84 Po Astatine 85 At Radon 86 Rn
 7 Francium 87 Fr Radium 88 Ra Actinides 89-103 Actinides 104 Rf 105 Db 106 Sg 107 Bh 108 Hs 109 Mt 110 Ds 111 Rg 112 Cn 113 Nh 114 Fl 115 Uup 116 Lv 117 Uu 118 Uuo 119 Uu 120 Uu 121 Uu 122 Uu 123 Uu 124 Uu 125 Uu 126 Uu 127 Uu 128 Uu 129 Uu 130 Uu 131 Uu 132 Uu 133 Uu 134 Uu 135 Uu 136 Uu 137 Uu 138 Uu 139 Uu 140 Uu 141 Uu 142 Uu 143 Uu 144 Uu 145 Uu 146 Uu 147 Uu 148 Uu 149 Uu 150 Uu 151 Uu 152 Uu 153 Uu 154 Uu 155 Uu 156 Uu 157 Uu 158 Uu 159 Uu 160 Uu 161 Uu 162 Uu 163 Uu 164 Uu 165 Uu 166 Uu 167 Uu 168 Uu 169 Uu 170 Uu 171 Uu 172 Uu 173 Uu 174 Uu 175 Uu 176 Uu 177 Uu 178 Uu 179 Uu 180 Uu 181 Uu 182 Uu 183 Uu 184 Uu 185 Uu 186 Uu 187 Uu 188 Uu 189 Uu 190 Uu 191 Uu 192 Uu 193 Uu 194 Uu 195 Uu 196 Uu 197 Uu 198 Uu 199 Uu 200 Uu 201 Uu 202 Uu 203 Uu 204 Uu 205 Uu 206 Uu 207 Uu 208 Uu 209 Uu 210 Uu 211 Uu 212 Uu 213 Uu 214 Uu 215 Uu 216 Uu 217 Uu 218 Uu 219 Uu 220 Uu 221 Uu 222 Uu 223 Uu 224 Uu 225 Uu 226 Uu 227 Uu 228 Uu 229 Uu 230 Uu 231 Uu 232 Uu 233 Uu 234 Uu 235 Uu 236 Uu 237 Uu 238 Uu 239 Uu 240 Uu 241 Uu 242 Uu 243 Uu 244 Uu 245 Uu 246 Uu 247 Uu 248 Uu 249 Uu 250 Uu 251 Uu 252 Uu 253 Uu 254 Uu 255 Uu 256 Uu 257 Uu 258 Uu 259 Uu 260 Uu 261 Uu 262 Uu 263 Uu 264 Uu 265 Uu 266 Uu 267 Uu 268 Uu 269 Uu 270 Uu 271 Uu 272 Uu 273 Uu 274 Uu 275 Uu 276 Uu 277 Uu 278 Uu 279 Uu 280 Uu 281 Uu 282 Uu 283 Uu 284 Uu 285 Uu 286 Uu 287 Uu 288 Uu 289 Uu 290 Uu 291 Uu 292 Uu 293 Uu 294 Uu 295 Uu 296 Uu 297 Uu 298 Uu 299 Uu 300 Uu 301 Uu 302 Uu 303 Uu 304 Uu 305 Uu 306 Uu 307 Uu 308 Uu 309 Uu 310 Uu 311 Uu 312 Uu 313 Uu 314 Uu 315 Uu 316 Uu 317 Uu 318 Uu 319 Uu 320 Uu 321 Uu 322 Uu 323 Uu 324 Uu 325 Uu 326 Uu 327 Uu 328 Uu 329 Uu 330 Uu 331 Uu 332 Uu 333 Uu 334 Uu 335 Uu 336 Uu 337 Uu 338 Uu 339 Uu 340 Uu 341 Uu 342 Uu 343 Uu 344 Uu 345 Uu 346 Uu 347 Uu 348 Uu 349 Uu 350 Uu 351 Uu 352 Uu 353 Uu 354 Uu 355 Uu 356 Uu 357 Uu 358 Uu 359 Uu 360 Uu 361 Uu 362 Uu 363 Uu 364 Uu 365 Uu 366 Uu 367 Uu 368 Uu 369 Uu 370 Uu 371 Uu 372 Uu 373 Uu 374 Uu 375 Uu 376 Uu 377 Uu 378 Uu 379 Uu 380 Uu 381 Uu 382 Uu 383 Uu 384 Uu 385 Uu 386 Uu 387 Uu 388 Uu 389 Uu 390 Uu 391 Uu 392 Uu 393 Uu 394 Uu 395 Uu 396 Uu 397 Uu 398 Uu 399 Uu 400 Uu 401 Uu 402 Uu 403 Uu 404 Uu 405 Uu 406 Uu 407 Uu 408 Uu 409 Uu 410 Uu 411 Uu 412 Uu 413 Uu 414 Uu 415 Uu 416 Uu 417 Uu 418 Uu 419 Uu 420 Uu 421 Uu 422 Uu 423 Uu 424 Uu 425 Uu 426 Uu 427 Uu 428 Uu 429 Uu 430 Uu 431 Uu 432 Uu 433 Uu 434 Uu 435 Uu 436 Uu 437 Uu 438 Uu 439 Uu 440 Uu 441 Uu 442 Uu 443 Uu 444 Uu 445 Uu 446 Uu 447 Uu 448 Uu 449 Uu 450 Uu 451 Uu 452 Uu 453 Uu 454 Uu 455 Uu 456 Uu 457 Uu 458 Uu 459 Uu 460 Uu 461 Uu 462 Uu 463 Uu 464 Uu 465 Uu 466 Uu 467 Uu 468 Uu 469 Uu 470 Uu 471 Uu 472 Uu 473 Uu 474 Uu 475 Uu 476 Uu 477 Uu 478 Uu 479 Uu 480 Uu 481 Uu 482 Uu 483 Uu 484 Uu 485 Uu 486 Uu 487 Uu 488 Uu 489 Uu 490 Uu 491 Uu 492 Uu 493 Uu 494 Uu 495 Uu 496 Uu 497 Uu 498 Uu 499 Uu 500 Uu 501 Uu 502 Uu 503 Uu 504 Uu 505 Uu 506 Uu 507 Uu 508 Uu 509 Uu 510 Uu 511 Uu 512 Uu 513 Uu 514 Uu 515 Uu 516 Uu 517 Uu 518 Uu 519 Uu 520 Uu 521 Uu 522 Uu 523 Uu 524 Uu 525 Uu 526 Uu 527 Uu 528 Uu 529 Uu 530 Uu 531 Uu 532 Uu 533 Uu 534 Uu 535 Uu 536 Uu 537 Uu 538 Uu 539 Uu 540 Uu 541 Uu 542 Uu 543 Uu 544 Uu 545 Uu 546 Uu 547 Uu 548 Uu 549 Uu 550 Uu 551 Uu 552 Uu 553 Uu 554 Uu 555 Uu 556 Uu 557 Uu 558 Uu 559 Uu 560 Uu 561 Uu 562 Uu 563 Uu 564 Uu 565 Uu 566 Uu 567 Uu 568 Uu 569 Uu 570 Uu 571 Uu 572 Uu 573 Uu 574 Uu 575 Uu 576 Uu 577 Uu 578 Uu 579 Uu 580 Uu 581 Uu 582 Uu 583 Uu 584 Uu 585 Uu 586 Uu 587 Uu 588 Uu 589 Uu 590 Uu 591 Uu 592 Uu 593 Uu 594 Uu 595 Uu 596 Uu 597 Uu 598 Uu 599 Uu 600 Uu 601 Uu 602 Uu 603 Uu 604 Uu 605 Uu 606 Uu 607 Uu 608 Uu 609 Uu 610 Uu 611 Uu 612 Uu 613 Uu 614 Uu 615 Uu 616 Uu 617 Uu 618 Uu 619 Uu 620 Uu 621 Uu 622 Uu 623 Uu 624 Uu 625 Uu 626 Uu 627 Uu 628 Uu 629 Uu 630 Uu 631 Uu 632 Uu 633 Uu 634 Uu 635 Uu 636 Uu 637 Uu 638 Uu 639 Uu 640 Uu 641 Uu 642 Uu 643 Uu 644 Uu 645 Uu 646 Uu 647 Uu 648 Uu 649 Uu 650 Uu 651 Uu 652 Uu 653 Uu 654 Uu 655 Uu 656 Uu 657 Uu 658 Uu 659 Uu 660 Uu 661 Uu 662 Uu 663 Uu 664 Uu 665 Uu 666 Uu 667 Uu 668 Uu 669 Uu 670 Uu 671 Uu 672 Uu 673 Uu 674 Uu 675 Uu 676 Uu 677 Uu 678 Uu 679 Uu 680 Uu 681 Uu 682 Uu 683 Uu 684 Uu 685 Uu 686 Uu 687 Uu 688 Uu 689 Uu 690 Uu 691 Uu 692 Uu 693 Uu 694 Uu 695 Uu 696 Uu 697 Uu 698 Uu 699 Uu 700 Uu 701 Uu 702 Uu 703 Uu 704 Uu 705 Uu 706 Uu 707 Uu 708 Uu 709 Uu 710 Uu 711 Uu 712 Uu 713 Uu 714 Uu 715 Uu 716 Uu 717 Uu 718 Uu 719 Uu 720 Uu 721 Uu 722 Uu 723 Uu 724 Uu 725 Uu 726 Uu 727 Uu 728 Uu 729 Uu 730 Uu 731 Uu 732 Uu 733 Uu 734 Uu 735 Uu 736 Uu 737 Uu 738 Uu 739 Uu 740 Uu 741 Uu 742 Uu 743 Uu 744 Uu 745 Uu 746 Uu 747 Uu 748 Uu 749 Uu 750 Uu 751 Uu 752 Uu 753 Uu 754 Uu 755 Uu 756 Uu 757 Uu 758 Uu 759 Uu 760 Uu 761 Uu 762 Uu 763 Uu 764 Uu 765 Uu 766 Uu 767 Uu 768 Uu 769 Uu 770 Uu 771 Uu 772 Uu 773 Uu 774 Uu 775 Uu 776 Uu 777 Uu 778 Uu 779 Uu 780 Uu 781 Uu 782 Uu 783 Uu 784 Uu 785 Uu 786 Uu 787 Uu 788 Uu 789 Uu 790 Uu 791 Uu 792 Uu 793 Uu 794 Uu 795 Uu 796 Uu 797 Uu 798 Uu 799 Uu 800 Uu 801 Uu 802 Uu 803 Uu 804 Uu 805 Uu 806 Uu 807 Uu 808 Uu 809 Uu 810 Uu 811 Uu 812 Uu 813 Uu 814 Uu 815 Uu 816 Uu 817 Uu 818 Uu 819 Uu 820 Uu 821 Uu 822 Uu 823 Uu 824 Uu 825 Uu 826 Uu 827 Uu 828 Uu 829 Uu 830 Uu 831 Uu 832 Uu 833 Uu 834 Uu 835 Uu 836 Uu 837 Uu 838 Uu 839 Uu 840 Uu 841 Uu 842 Uu 843 Uu 844 Uu 845 Uu 846 Uu 847 Uu 848 Uu 849 Uu 850 Uu 851 Uu 852 Uu 853 Uu 854 Uu 855 Uu 856 Uu 857 Uu 858 Uu 859 Uu 860 Uu 861 Uu 862 Uu 863 Uu 864 Uu 865 Uu 866 Uu 867 Uu 868 Uu 869 Uu 870 Uu 871 Uu 872 Uu 873 Uu 874 Uu 875 Uu 876 Uu 877 Uu 878 Uu 879 Uu 880 Uu 881 Uu 882 Uu 883 Uu 884 Uu 885 Uu 886 Uu 887 Uu 888 Uu 889 Uu 890 Uu 891 Uu 892 Uu 893 Uu 894 Uu 895 Uu 896 Uu 897 Uu 898 Uu 899 Uu 900 Uu 901 Uu 902 Uu 903 Uu 904 Uu 905 Uu 906 Uu 907 Uu 908 Uu 909 Uu 910 Uu 911 Uu 912 Uu 913 Uu 914 Uu 915 Uu 916 Uu 917 Uu 918 Uu 919 Uu 920 Uu 921 Uu 922 Uu 923 Uu 924 Uu 925 Uu 926 Uu 927 Uu 928 Uu 929 Uu 930 Uu 931 Uu 932 Uu 933 Uu 934 Uu 935 Uu 936 Uu 937 Uu 938 Uu 939 Uu 940 Uu 941 Uu 942 Uu 943 Uu 944 Uu 945 Uu 946 Uu 947 Uu 948 Uu 949 Uu 950 Uu 951 Uu 952 Uu 953 Uu 954 Uu 955 Uu 956 Uu 957 Uu 958 Uu 959 Uu 960 Uu 961 Uu 962 Uu 963 Uu 964 Uu 965 Uu 966 Uu 967 Uu 968 Uu 969 Uu 970 Uu 971 Uu 972 Uu 973 Uu 974 Uu 975 Uu 976 Uu 977 Uu 978 Uu 979 Uu 980 Uu 981 Uu 982 Uu 983 Uu 984 Uu 985 Uu 986 Uu 987 Uu 988 Uu 989 Uu 990 Uu 991 Uu 992 Uu 993 Uu 994 Uu 995 Uu 996 Uu 997 Uu 998 Uu 999 Uu 1000 Uu 1001 Uu 1002 Uu 1003 Uu 1004 Uu 1005 Uu 1006 Uu 1007 Uu 1008 Uu 1009 Uu 1010 Uu 1011 Uu 1012 Uu 1013 Uu 1014 Uu 1015 Uu 1016 Uu 1017 Uu 1018 Uu 1019 Uu 1020 Uu 1021 Uu 1022 Uu 1023 Uu 1024 Uu 1025 Uu 1026 Uu 1027 Uu 1028 Uu 1029 Uu 1030 Uu 1031 Uu 1032 Uu 1033 Uu 1034 Uu 1035 Uu 1036 Uu 1037 Uu 1038 Uu 1039 Uu 1040 Uu 1041 Uu 1042 Uu 1043 Uu 1044 Uu 1045 Uu 1046 Uu 1047 Uu 1048 Uu 1049 Uu 1050 Uu 1051 Uu 1052 Uu 1053 Uu 1054 Uu 1055 Uu 1056 Uu 1057 Uu 1058 Uu 1059 Uu 1060 Uu 1061 Uu 1062 Uu 1063 Uu 1064 Uu 1065 Uu 1066 Uu 1067 Uu 1068 Uu 1069 Uu 1070 Uu 1071 Uu 1072 Uu 1073 Uu 1074 Uu 1075 Uu 1076 Uu 1077 Uu 1078 Uu 1079 Uu 1080 Uu 1081 Uu 1082 Uu 1083 Uu 1084 Uu 1085 Uu 1086 Uu 1087 Uu 1088 Uu 1089 Uu 1090 Uu 1091 Uu 1092 Uu 1093 Uu 1094 Uu 1095 Uu 1096 Uu 1097 Uu 1098 Uu 1099 Uu 1100 Uu 1101 Uu 1102 Uu 1103 Uu 1104 Uu 1105 Uu 1106 Uu 1107 Uu 1108 Uu 1109 Uu 1110 Uu 1111 Uu 1112 Uu 1113 Uu 1114 Uu 1115 Uu 1116 Uu 1117 Uu 1118 Uu 1119 Uu 1120 Uu 1121 Uu 1122 Uu 1123 Uu 1124 Uu 1125 Uu 1126 Uu 1127 Uu 1128 Uu 1129 Uu 1130 Uu 1131 Uu 1132 Uu 1133 Uu 1134 Uu 1135 Uu 1136 Uu 1137 Uu 1138 Uu 1139 Uu 1140 Uu 1141 Uu 1142 Uu 1143 Uu 1144 Uu 1145 Uu 1146 Uu 1147 Uu 1148 Uu 1149 Uu 1150 Uu 1151 Uu 1152 Uu 1153 Uu 1154 Uu 1155 Uu 1156 Uu 1157 Uu 1158 Uu 1159 Uu 1160 Uu 1161 Uu 1162 Uu 1163 Uu 1164 Uu 1165 Uu 1166 Uu 1167 Uu 1168 Uu 1169 Uu 1170 Uu 1171 Uu 1172 Uu 1173 Uu 1174 Uu 1175 Uu 1176 Uu 1177 Uu 1178 Uu 1179 Uu 1180 Uu 1181 Uu 1182 Uu 1183 Uu 1184 Uu 1185 Uu 1186 Uu 1187 Uu 1188 Uu 1189 Uu 1190 Uu 1191 Uu 1192 Uu 1193 Uu 1194 Uu 1195 Uu 1196 Uu 1197 Uu 1198 Uu 1199 Uu 1200 Uu 1201 Uu 1202 Uu 1203 Uu 1204 Uu 1205 Uu 1206 Uu 1207 Uu 1208 Uu 1209 Uu 1210 Uu 1211 Uu 1212 Uu 1213 Uu 1214 Uu 1215 Uu 1216 Uu 1217 Uu 1218 Uu 1219 Uu 1220 Uu 1221 Uu 1222 Uu 1223 Uu 1224 Uu 1225 Uu 1226 Uu 1227 Uu 1228 Uu 1229 Uu 1230 Uu 1231 Uu 1232 Uu 1233 Uu 1234 Uu 1235 Uu 1236 Uu 1237 Uu 1238 Uu 1239 Uu 1240 Uu 1241 Uu 1242 Uu 1243 Uu 1244 Uu 1245 Uu 1246 Uu 1247 Uu 1248 Uu 1249 Uu 1250 Uu 1251 Uu 1252 Uu 1253 Uu 1254 Uu 1255 Uu 1256 Uu 1257 Uu 1258 Uu 1259 Uu 1260 Uu 1261 Uu 1262 Uu 1263 Uu 1264 Uu 1265 Uu 1266 Uu 1267 Uu 1268 Uu 1269 Uu 1270 Uu 1271 Uu 1272 Uu 1273 Uu 1274 Uu 1275 Uu 1276 Uu 1277 Uu 1278 Uu 1279 Uu 1280 Uu 1281 Uu 1282 Uu 1283 Uu 1284 Uu 1285 Uu 1286 Uu 1287 Uu 1288 Uu 1289 Uu 1290 Uu 1291 Uu 1292 Uu 1293 Uu 1294 Uu 1295 Uu 1296 Uu 1297 Uu 1298 Uu 1299 Uu 1300 Uu 1301 Uu 1302 Uu 1303 Uu 1304 Uu 1305 Uu 1306 Uu 1307 Uu 1308 Uu 1309 Uu 1310 Uu 1311 Uu 1312 Uu 1313 Uu 1314 Uu 1315 Uu 1316 Uu 1317 Uu 1318 Uu 1319 Uu 1320 Uu 1321 Uu 1322 Uu 1323 Uu 1324 Uu 1325 Uu 1326 Uu 1327 Uu 1328 Uu 1329 Uu 1330 Uu 1331 Uu 1332 Uu 1333 Uu 1334 Uu 1335 Uu 1336 Uu 1337 Uu 1338 Uu 1339 Uu 1340 Uu 1341 Uu 1342 Uu 1343 Uu 1344 Uu 1345 Uu 1346 Uu 1347 Uu 1348 Uu 1349 Uu 1350 Uu 1351 Uu 1352 Uu 1353 Uu 1354 Uu 1355 Uu 1356 Uu 1357 Uu 1358 Uu 1359 Uu 1360 Uu 1361 Uu 1362 Uu 1363 Uu 1364 Uu 1365 Uu 1366 Uu 1367 Uu 1368 Uu 1369 Uu 1370 Uu 1371 Uu 1372 Uu 1373 Uu 1374 Uu 1375 Uu 1376 Uu 1377 Uu 1378 Uu 1379 Uu 1380 Uu 1381 Uu 1382 Uu 1383 Uu 1384 Uu 1385 Uu 1386 Uu 1387 Uu 1388 Uu 1389 Uu 1390 Uu 1391 Uu 1392 Uu 1393 Uu 1394 Uu 1395 Uu 1396 Uu 1397 Uu 1398 Uu 1399 Uu 1400 Uu 1401 Uu 1402 Uu 1403 Uu 1404 Uu 1405 Uu 1406 Uu 1407 Uu 1408 Uu 1409 Uu 1410 Uu 1411 Uu 1412 Uu 1413 Uu 1414 Uu 1415 Uu 1416 Uu 1417 Uu 1418 Uu 1419 Uu 1420 Uu 1421 Uu 1422 Uu 1423 Uu 1424 Uu 1425 Uu 1426 Uu 1427 Uu 1428 Uu 1429 Uu 1430 Uu 1431 Uu 1432 Uu 1433 Uu 1434 Uu 1435 Uu 1436 Uu 1437 Uu 1438 Uu 1439 Uu 1440 Uu 1441 Uu 1442 Uu 1443 Uu 1444 Uu 1445 Uu 1446 Uu 1447 Uu 1448 Uu 1449 Uu 1450 Uu 1451 Uu 1452 Uu 1453 Uu 1454 Uu 1455 Uu 1456 Uu 1457 Uu 1458 Uu 1459 Uu 1460 Uu 1461 Uu 1462 Uu 1463 Uu 1464 Uu 1465 Uu 1466 Uu 1467 Uu 1468 Uu 1469 Uu 1470 Uu 1471 Uu 1472 Uu 1473 Uu 1474 Uu 1475 Uu 1476 Uu 1477 Uu 1478 Uu 1479 Uu 1480 Uu 1481 Uu 1482 Uu 1483 Uu 1484 Uu 1485 Uu 1486 Uu 1487 Uu 1488 Uu 1489 Uu 1490 Uu 1491 Uu 1492 Uu 1493 Uu 1494 Uu 1495 Uu 1496 Uu 1497 Uu 1498 Uu 1499 Uu 1500 Uu 1501 Uu 1502 Uu 1503 Uu 1504 Uu 1505 Uu 1506 Uu 1507 Uu 1508 Uu 1509 Uu 1510 Uu 1511 Uu 1512 Uu 1513 Uu 1514 Uu 1515 Uu 1516 Uu 1517 Uu 1518 Uu 1519 Uu 1520 Uu 1521 Uu 1522 Uu 1523 Uu 1524 Uu 1525 Uu 1526 Uu 1527 Uu 1528 Uu 1529 Uu 1530 Uu 1531 Uu 1532 Uu 1533 Uu 1534 Uu 1535 Uu 1536 Uu 1537 Uu 1538 Uu 1539 Uu 1540 Uu 1541 Uu 1542 Uu 1543 Uu 1544 Uu 1545 Uu 1546 Uu 1547 Uu 1548 Uu 1549 Uu 1550 Uu 1551 Uu 1552 Uu 1553 Uu 1554 Uu 1555 Uu 1556 Uu 1557 Uu 1558 Uu 1559 Uu 1560 Uu 1561 Uu 1562 Uu 1563 Uu 1564 Uu 1565 Uu 1566 Uu 1567 Uu 1568 Uu 1569 Uu 1570 Uu 1571 Uu 1572 Uu 1573 Uu 1574 Uu 1575 Uu 1576 Uu 1577 Uu 1578 Uu 1579 Uu 1580 Uu 1581 Uu 1582 Uu 1583 Uu 1584 Uu 1585 Uu 1586 Uu 1587 Uu 1588 Uu 1589 Uu 1590 Uu 1591 Uu 1592 Uu 1593 Uu 1594 Uu 1595 Uu 1596 Uu 1597 Uu 1598 Uu 1599 Uu 1600 Uu 1601 Uu 1602 Uu 1603 Uu 1604 Uu 1605 Uu 1606 Uu 1607 Uu 1608 Uu 1609 Uu 1610 Uu 1611 Uu 1612 Uu 1613 Uu 1614 Uu 1615 Uu 1616 Uu 1617 Uu 1618 Uu 1619 Uu 1620 Uu 1621 Uu 1622 Uu 1623 Uu 1624 Uu 1625 Uu 1626 Uu 1627 Uu 1628 Uu 1629 Uu 1630 Uu 1631 Uu 1632 Uu 1633 Uu 1634 Uu 1635 Uu 1636 Uu 1637 Uu 1638 Uu 1639 Uu 1640 Uu 1641 Uu 1642 Uu 1643 Uu 1644 Uu 1645 Uu 1646 Uu 1647 Uu 1648 Uu 1649 Uu 1650 Uu 1651 Uu 1652 Uu 1653 Uu 1654 Uu 1655 Uu 1656 Uu 1657 Uu 1658 Uu 1659 Uu 1660 Uu 1661 Uu 1662 Uu 1663 Uu 1664 Uu 1665 Uu 1666 Uu 1667 Uu 1668 Uu 1669 Uu 1670 Uu 1671 Uu 1672 Uu 1673 Uu 1674 Uu 1675 Uu 1676 Uu 1677 Uu 1678 Uu 1679 Uu 1680 Uu 1681 Uu 1682 Uu 1683 Uu 1684 Uu 1685 Uu 1686 Uu 1687 Uu 1688 Uu 1689 Uu 1690 Uu 1691 Uu 1692 Uu 1693 Uu 1694 Uu 1695 Uu 1696 Uu 1697 Uu 1698 Uu 1699 Uu 1700 Uu 1701 Uu 1702 Uu 1703 Uu 1704 Uu 1705 Uu 1706 Uu 1707 Uu 1708 Uu 1709 Uu 1710 Uu 1711 Uu 1712 Uu 1713 Uu 1714 Uu 1715 Uu 1716 Uu 1717 Uu 1718 Uu 1719 Uu 1720 Uu 1721 Uu 1722 Uu 1723 Uu 1724 Uu 1725 Uu 1726 Uu 1727 Uu 1728 Uu 1729 Uu 1730 Uu 1731 Uu 1732 Uu 1733 Uu 1734 Uu 1735 Uu 1736 Uu 1737 Uu 1738 Uu 1739 Uu 1740 Uu 1741 Uu 1742 Uu 1743 Uu 1744 Uu 1745 Uu 1746 Uu 1747 Uu 1748 Uu 1749 Uu 1750 Uu 1751 Uu 1752 Uu 1753 Uu 1754 Uu 1755 Uu 1756 Uu 1757 Uu 1758 Uu 1759 Uu 1760 Uu 1761 Uu 1762 Uu 1763 Uu 1764 Uu 1765 Uu 1766 Uu 1767 Uu 1768 Uu 1769 Uu 1770 Uu 1771 Uu 1772 Uu 1773 Uu 1774 Uu 1775 Uu 1776 Uu 1777 Uu 1778 Uu 1779 Uu 1780 Uu 1781 Uu 1782 Uu 1783 Uu 1784 Uu 1785 Uu 1786 Uu 1787 Uu 1788 Uu 1789 Uu 1790 Uu 1791 Uu 1792 Uu 1793 Uu 1794 Uu 1795 Uu 1796 Uu 1797 Uu 1798 Uu 1799 Uu 1800 Uu 1801 Uu 1802 Uu 1803 Uu 1804 Uu 1805 Uu 1806 Uu 1807 Uu 1808 Uu 1809 Uu 1810 Uu 1811 Uu 1812 Uu 1813 Uu 1814 Uu 1815 Uu 1816 Uu 1817 Uu 1818 Uu 1819 Uu 1820 Uu 1821 Uu 1822 Uu 1823 Uu 1824 Uu 1825 Uu 1826 Uu 1827 Uu 1828 Uu 1829 Uu 1830 Uu 1831 Uu 1832 Uu 1833 Uu 1834 Uu 1835 Uu 1836 Uu 1837 Uu 1838 Uu 1839 Uu 1840 Uu 1841 Uu 1842 Uu 1843 Uu 1844 Uu 1845 Uu 1846 Uu 1847 Uu 1848 Uu 1849 Uu 1850 Uu 1851 Uu 1852 Uu 1853 Uu 1854 Uu 1855 Uu 1856 Uu 1857 Uu 1858 Uu 1859 Uu 1860 Uu 1861 Uu 1862 Uu 1863 Uu 1864 Uu 1865 Uu 1866 Uu 1867 Uu 1868 Uu 1869 Uu 1870 Uu 1871 Uu 1872 Uu 1873 Uu 1874 Uu 1875 Uu 1876 Uu 1877 Uu 1878 Uu 1879 Uu

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

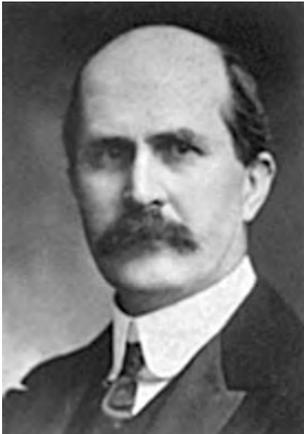
Prix Nobel de physique 1915



William Lawrence Bragg (1890-1971)

Structure de la matière

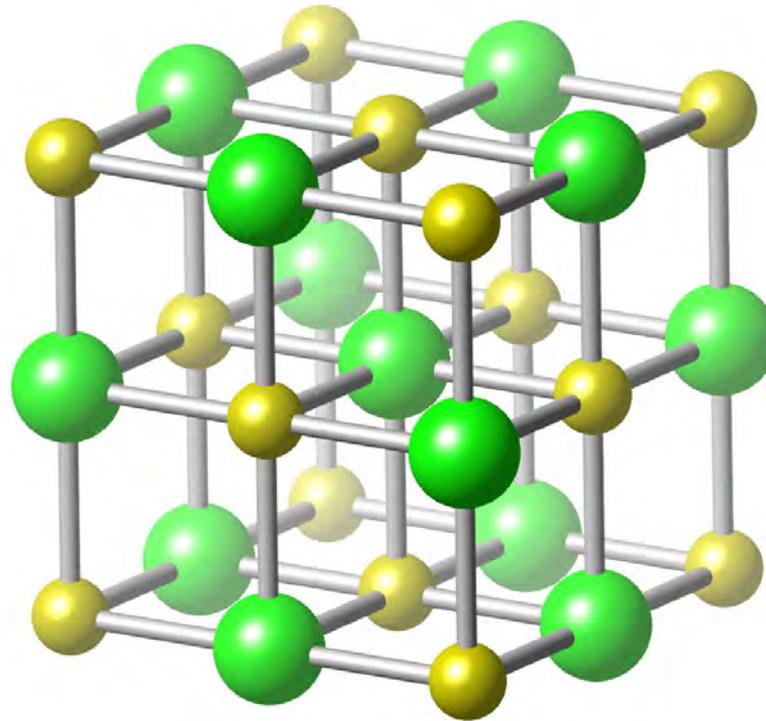
2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories



William Henry Bragg (1862-1942)



William Lawrence Bragg (1890-1971)



Structure de NaCl

Structure de la matière

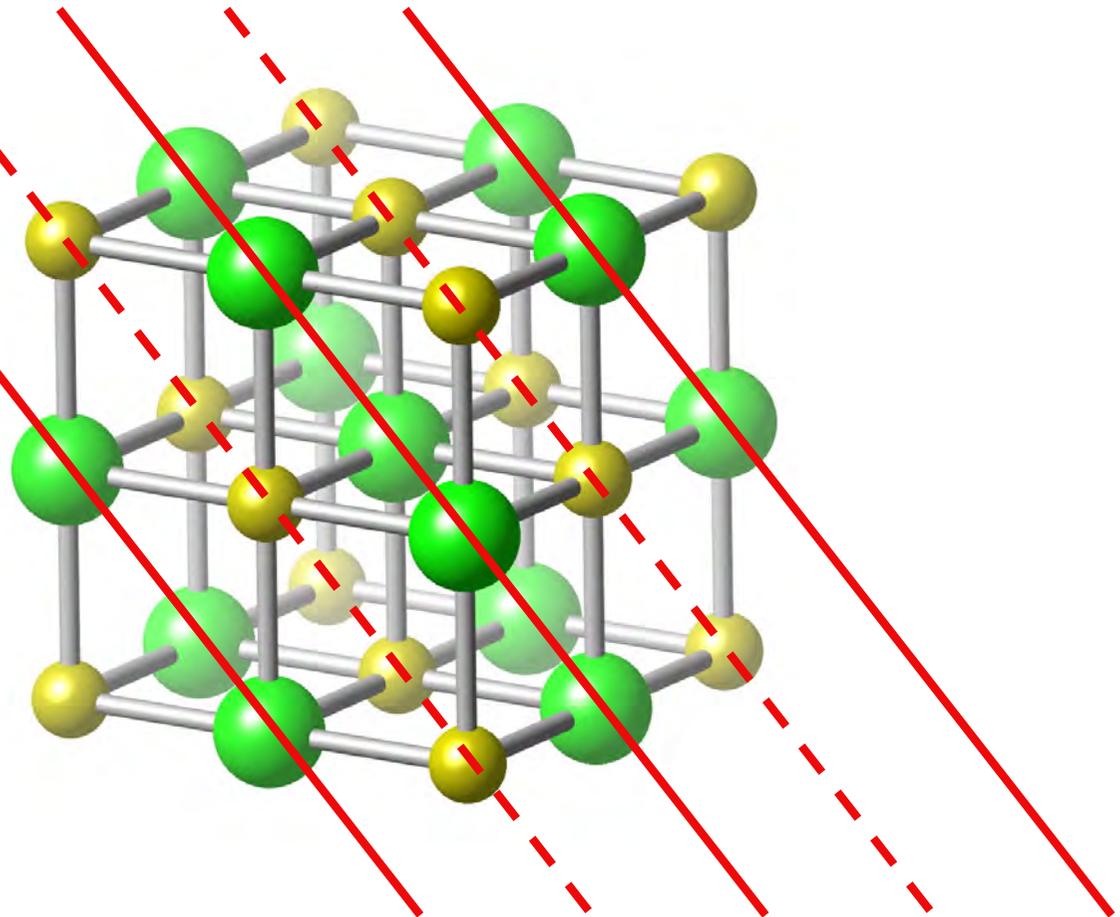
2500 ans d'histoire, d'observation, d'expériences et de théories

Cristaux

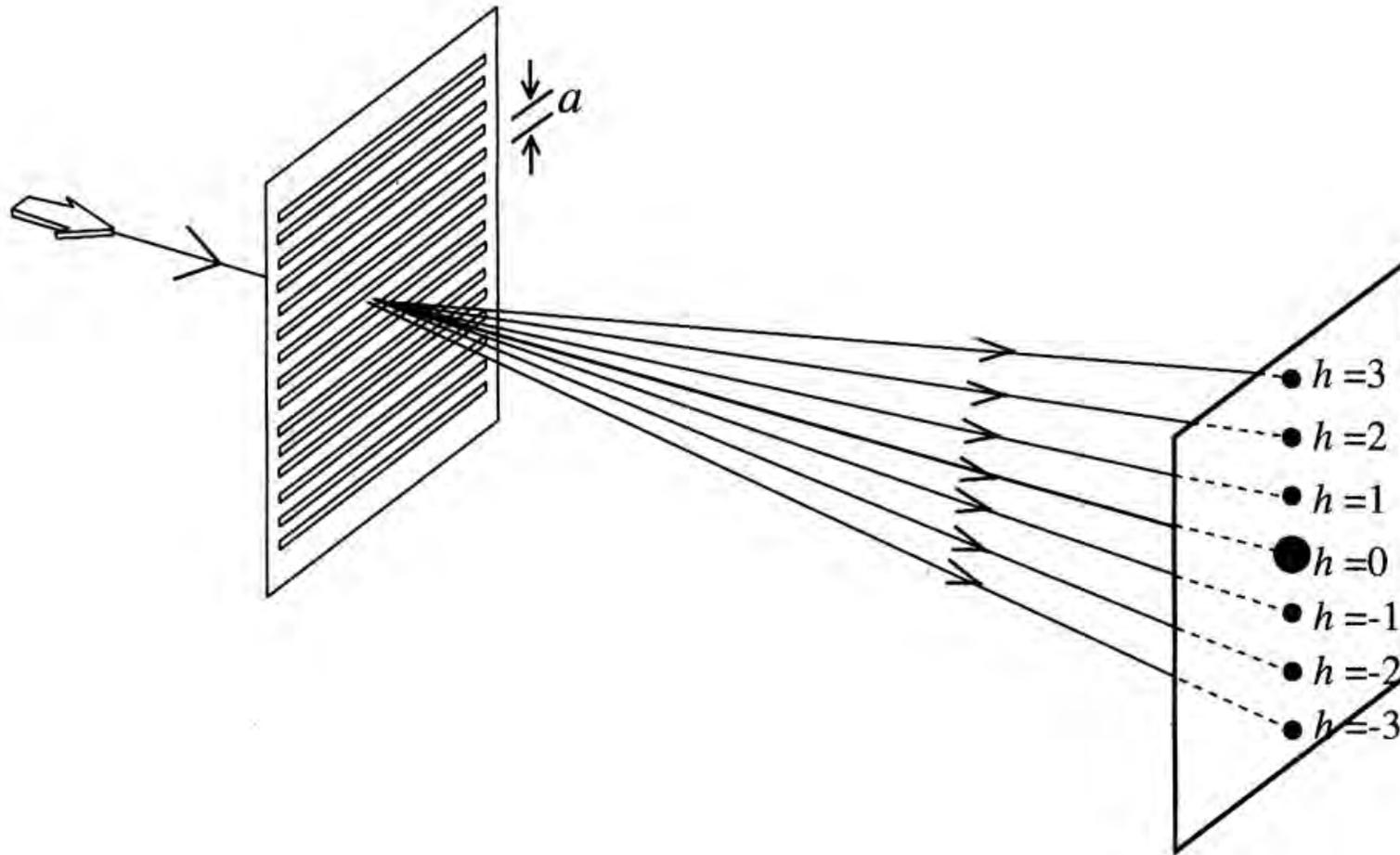
=

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

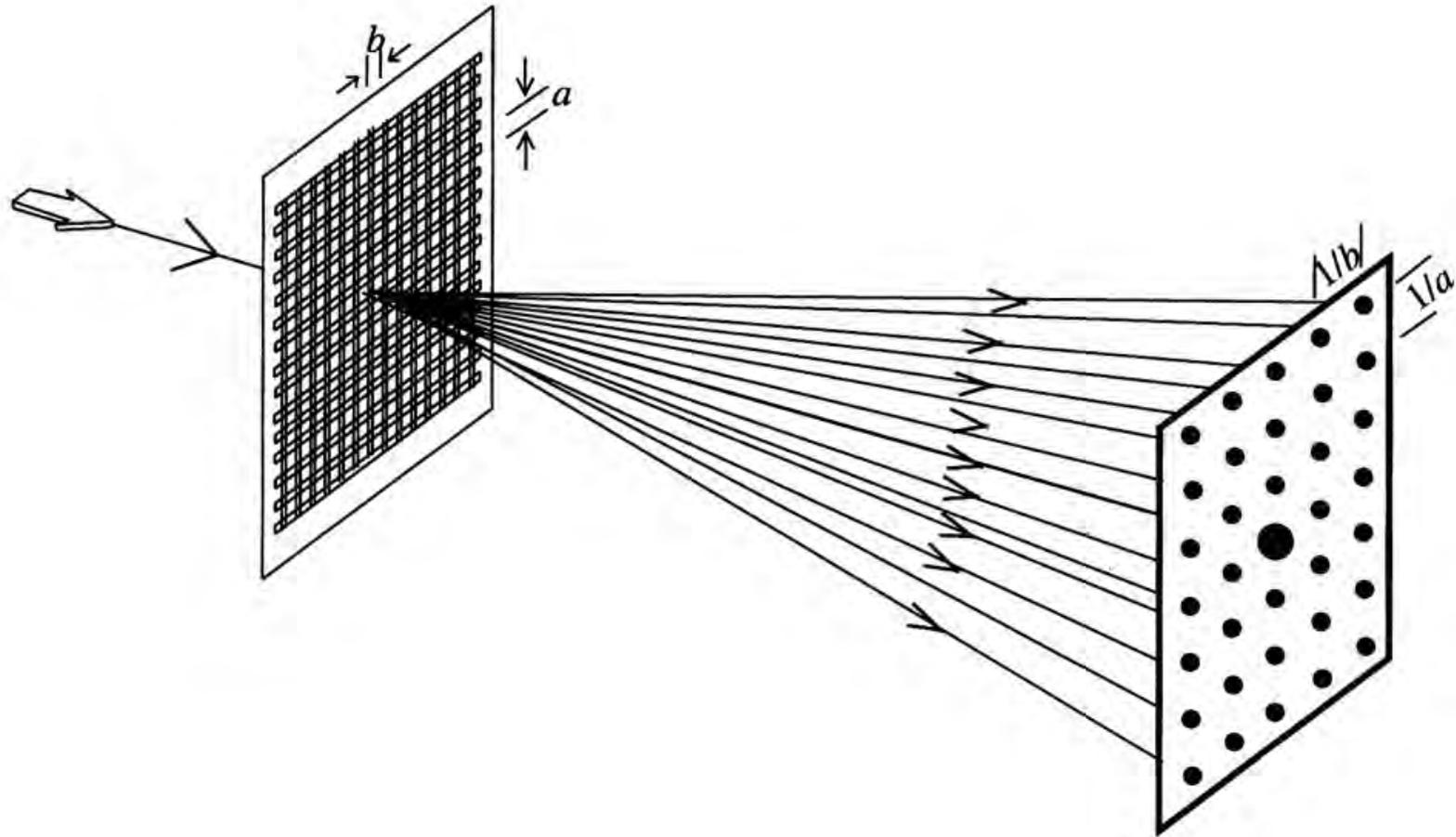
Etudiés par **diffraction** des RX
(ou des électrons, neutrons...)



Diffraction par un réseau (1D)



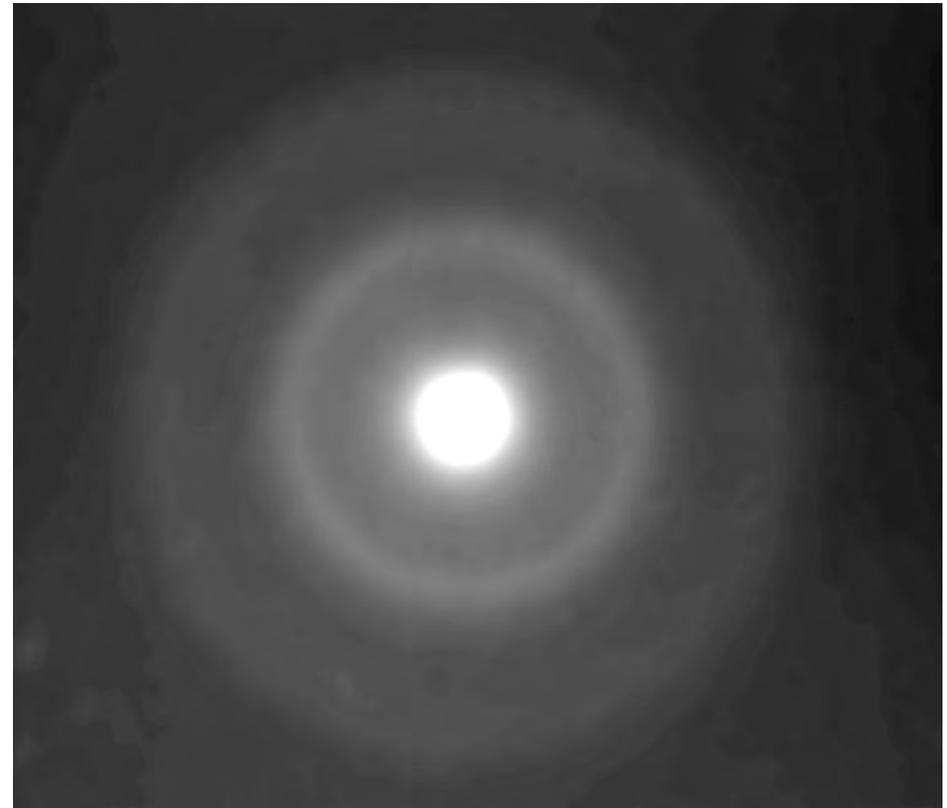
Diffraction par un réseau (2D)



Diffraction (diffusion) par un amorphe

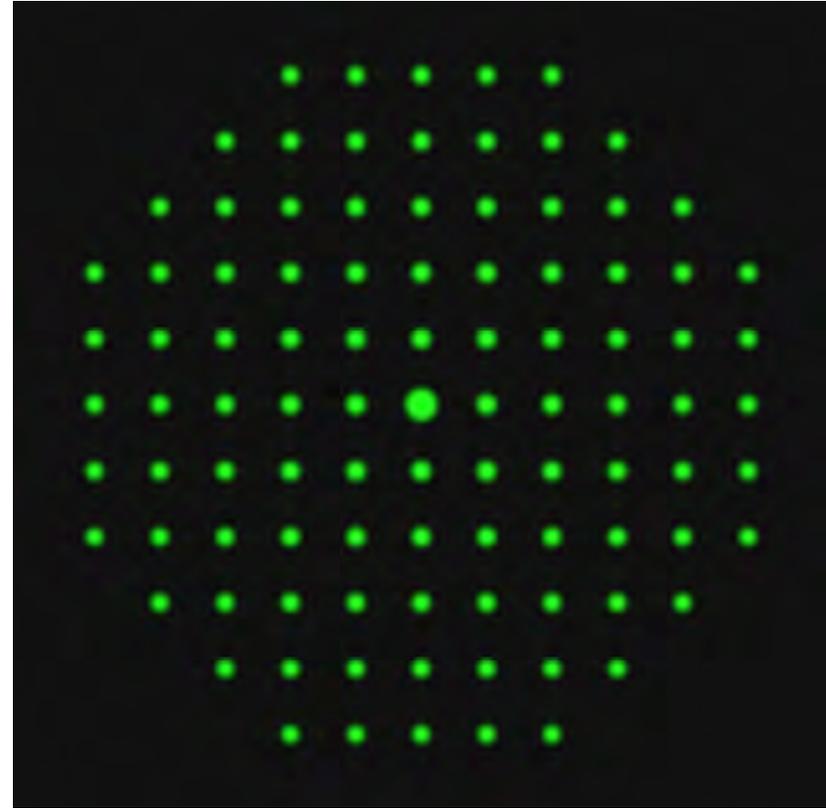
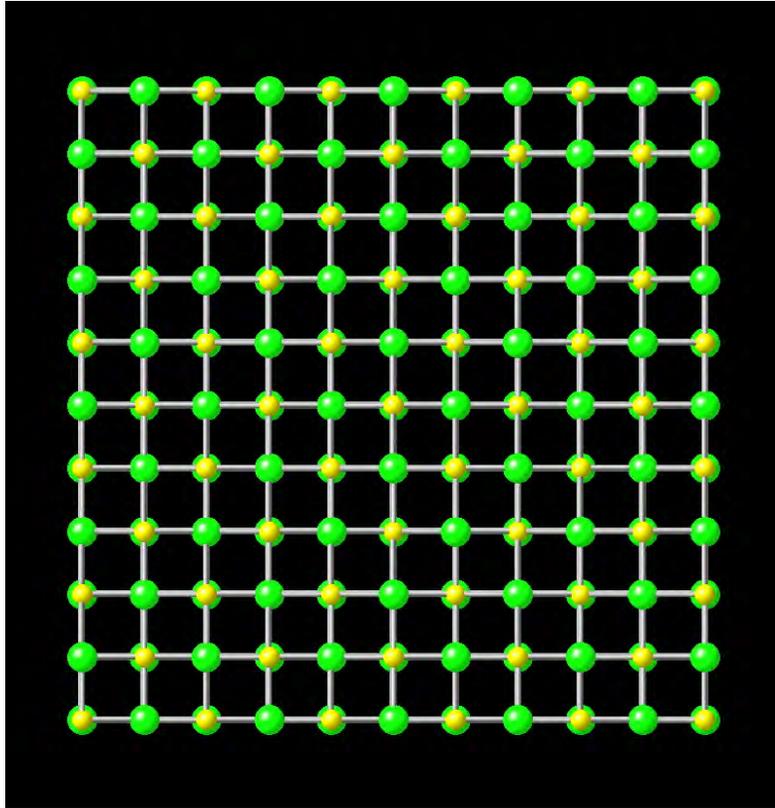


Diffusion de la lumière de la Lune par temps couvert



Anneaux de diffusion des électrons par un solide amorphe

Diffraction par un cristal (3D)



Cristal
Espace réel (R)

← TF →

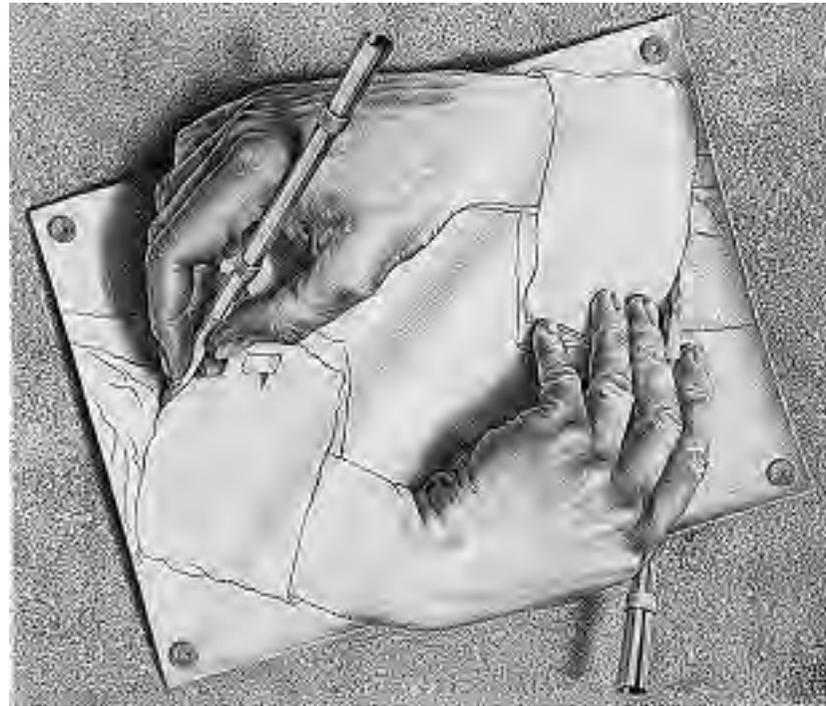
Cliché de diffraction
Espace réciproque (R^*)

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)

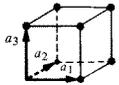
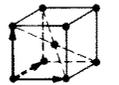
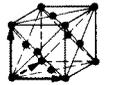
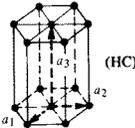
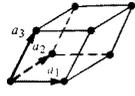
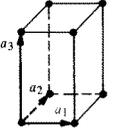
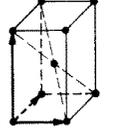
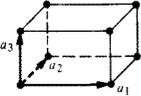
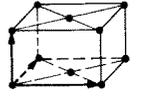
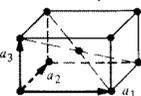
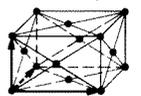
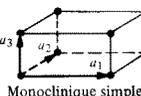
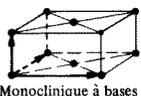
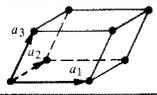
7 systèmes cristallins

> 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 $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha \neq \alpha_2 \neq \alpha_3$			

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 ?

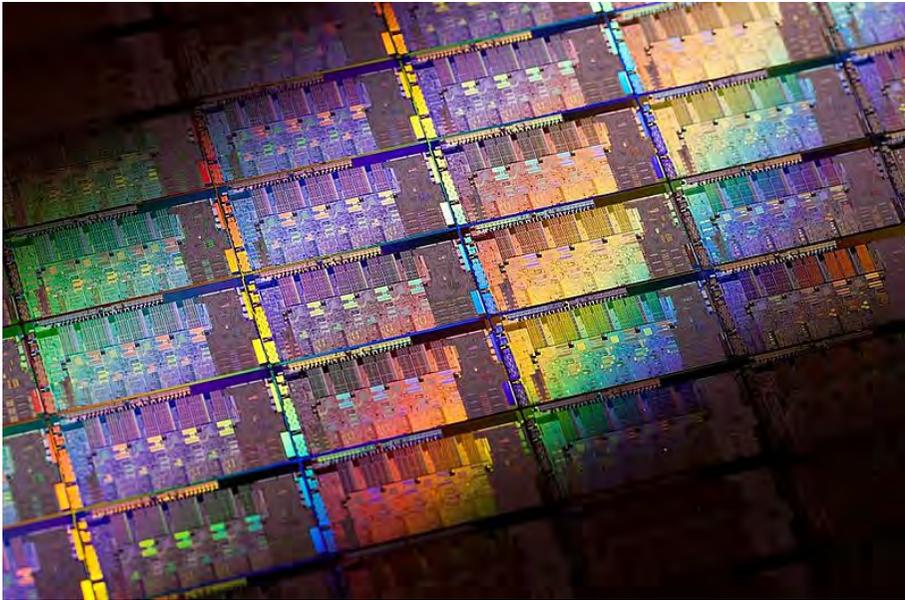


Guernica - 1937 © Pablo Picasso

Structure de la matière

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

A quoi ça sert ?

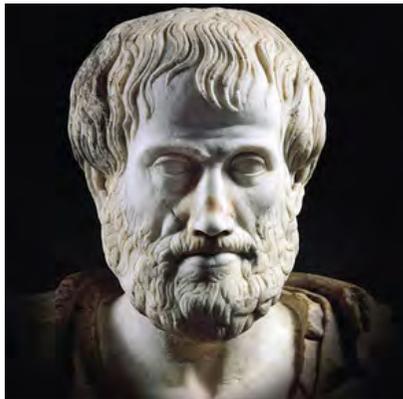


Electronique, matériaux, sciences de la santé; télécommunications, informatique, transports, énergie, médicaments...

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

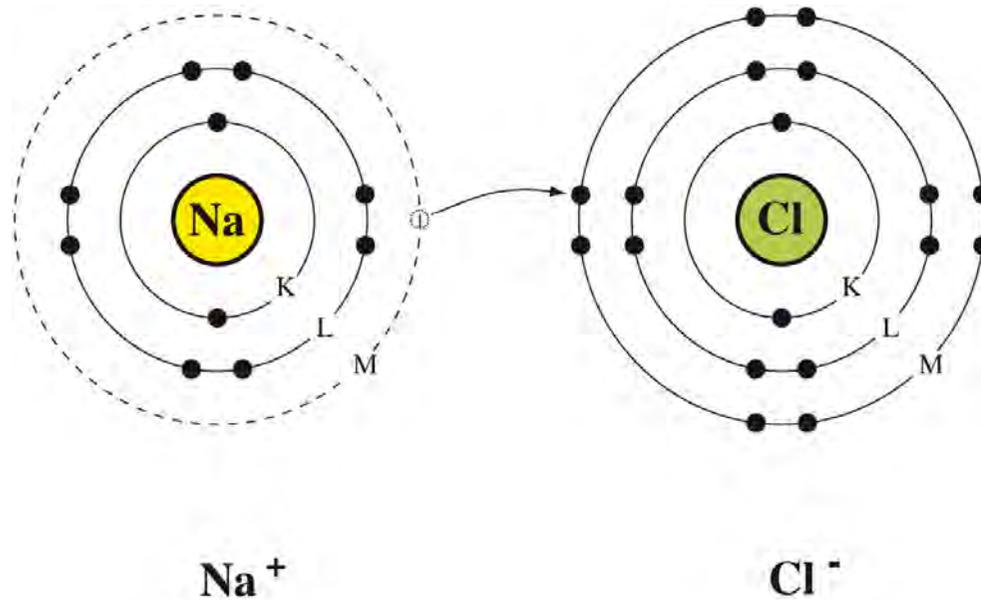
Ionique

Covalente

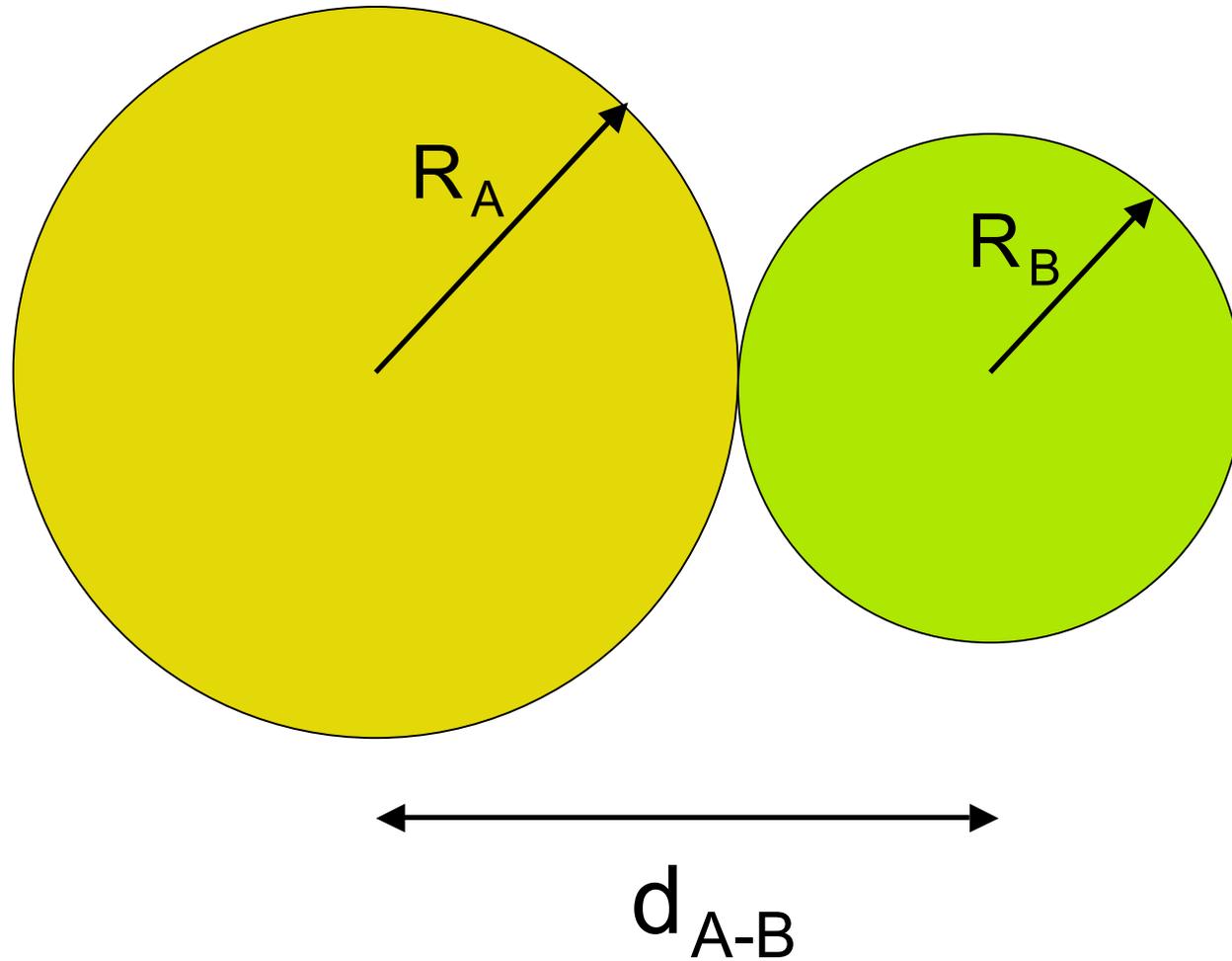
Métallique

"Hydrogène"

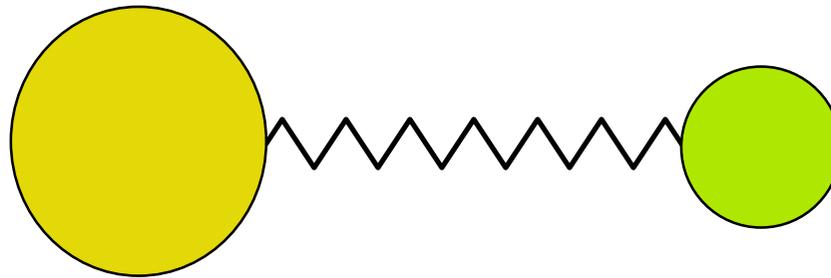
van der Waals



Pourquoi tant d'ordre ?

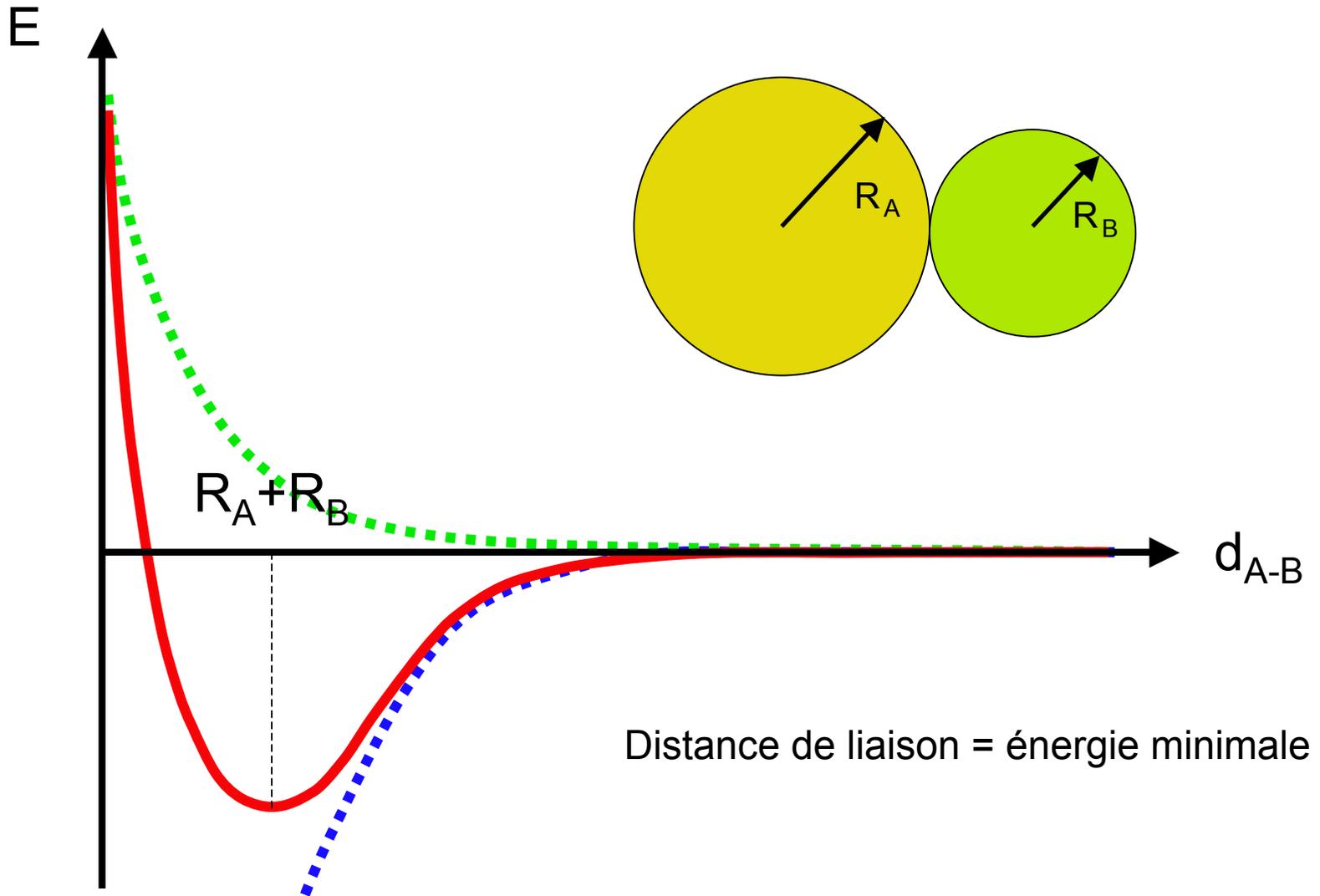


Pourquoi tant d'ordre ?



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 ?

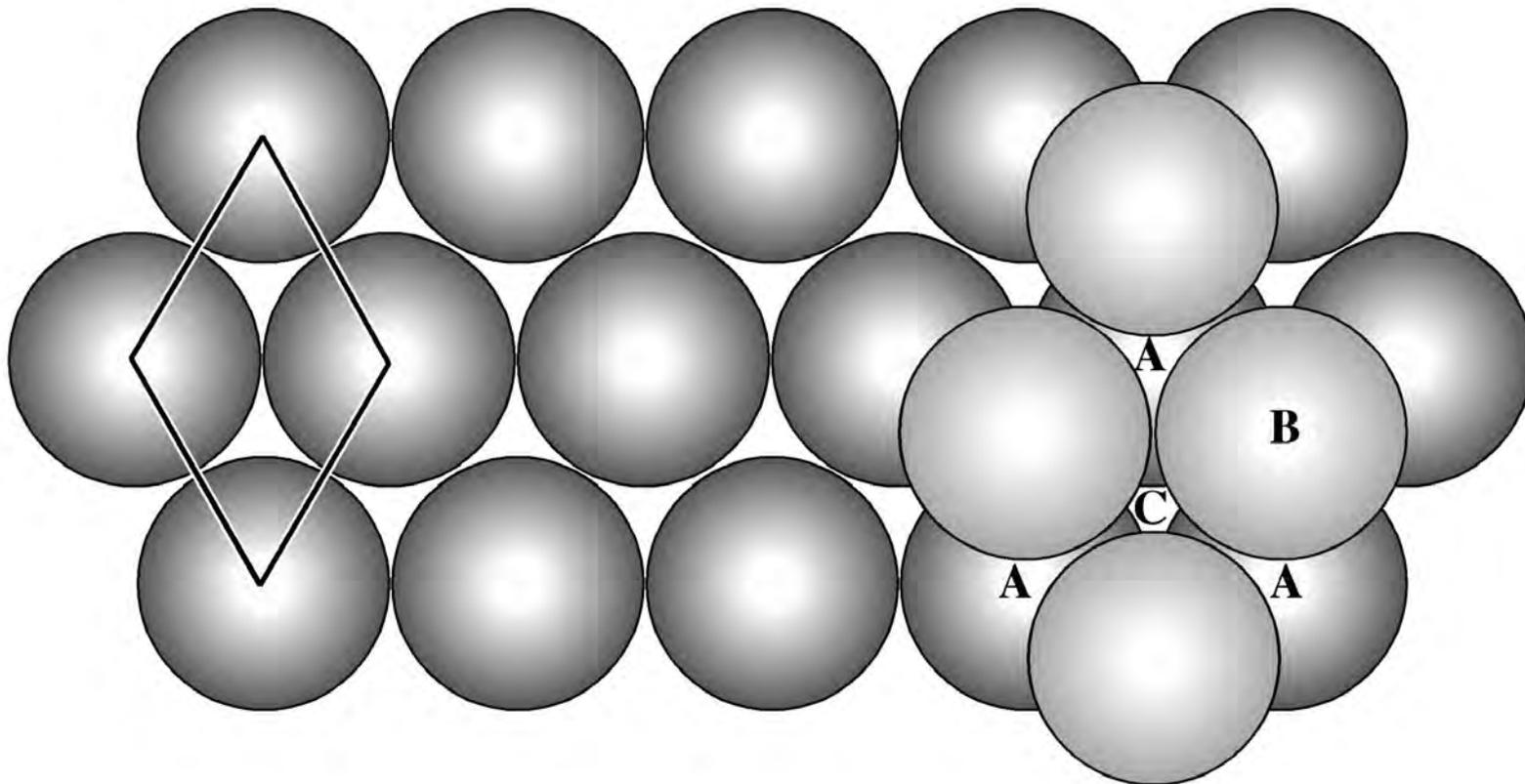
Empilements compacts d'atomes identiques



C'est la conjecture de Kepler !

Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes identiques



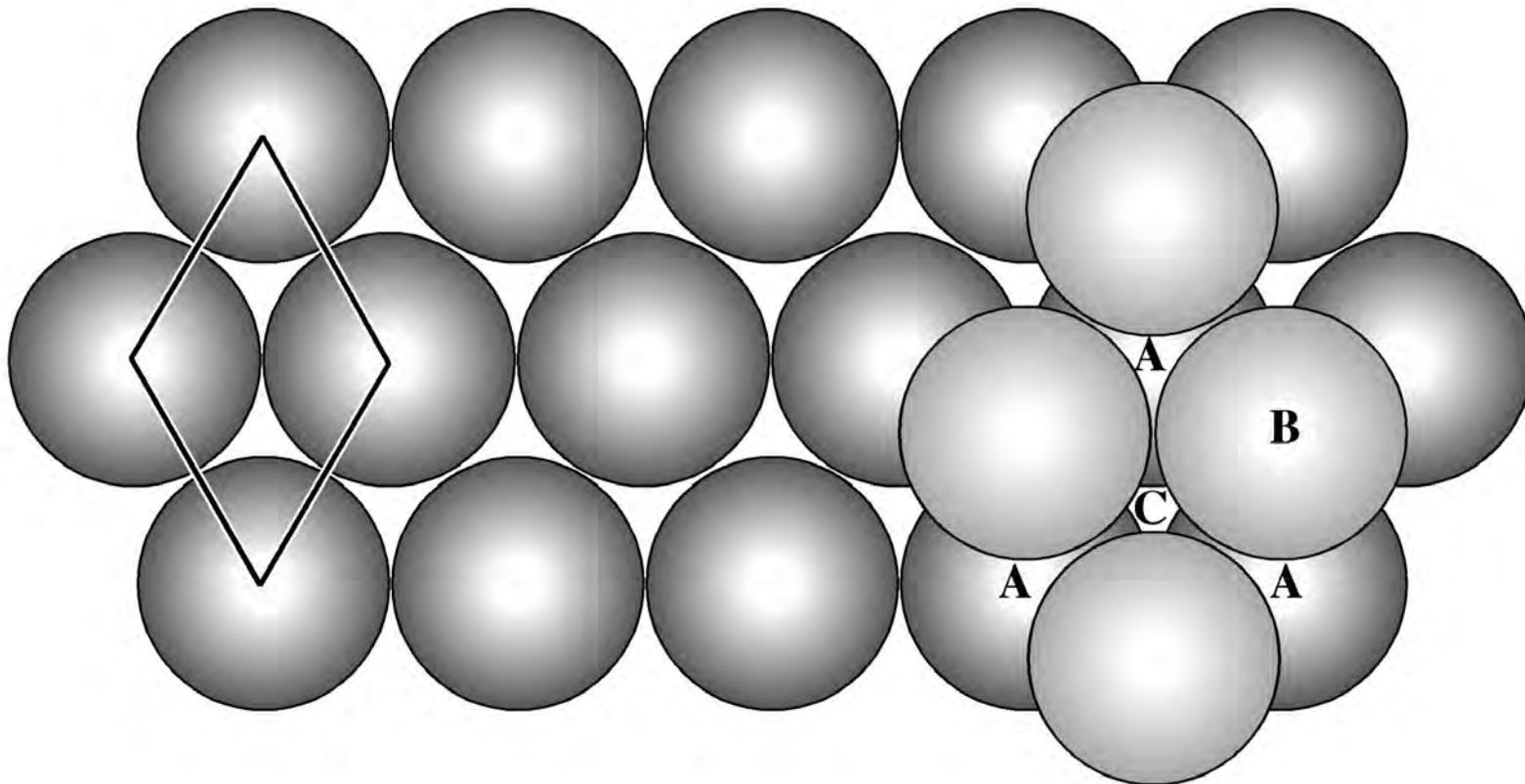
Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes identiques



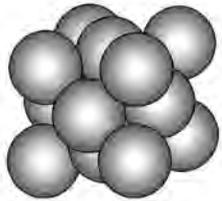
Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes identiques

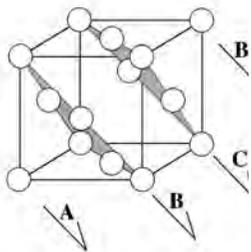


Pourquoi tant d'ordre ?

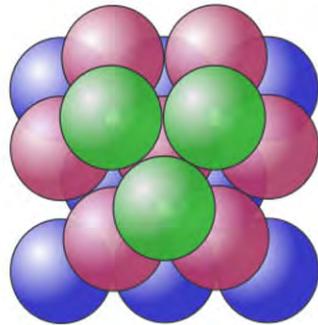
Empilements compacts d'atomes identiques



ccp (cfc)

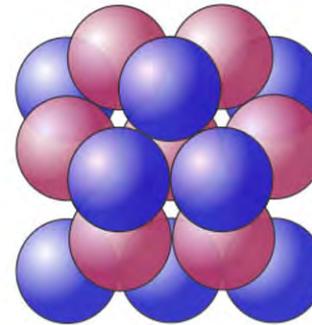


cubique

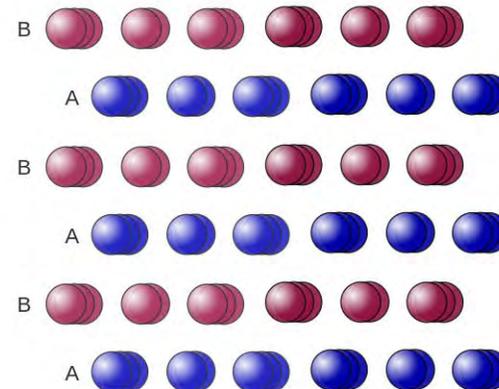
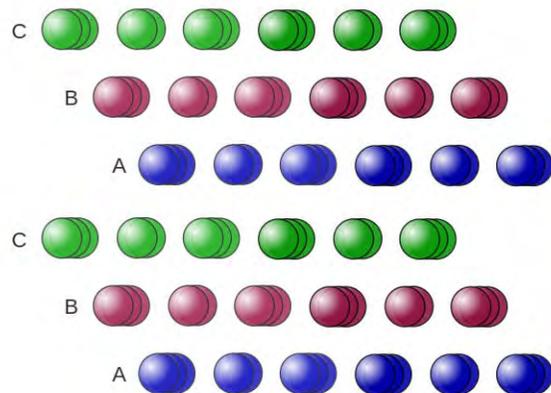


Cubique à faces centrées ABC

hexagonal

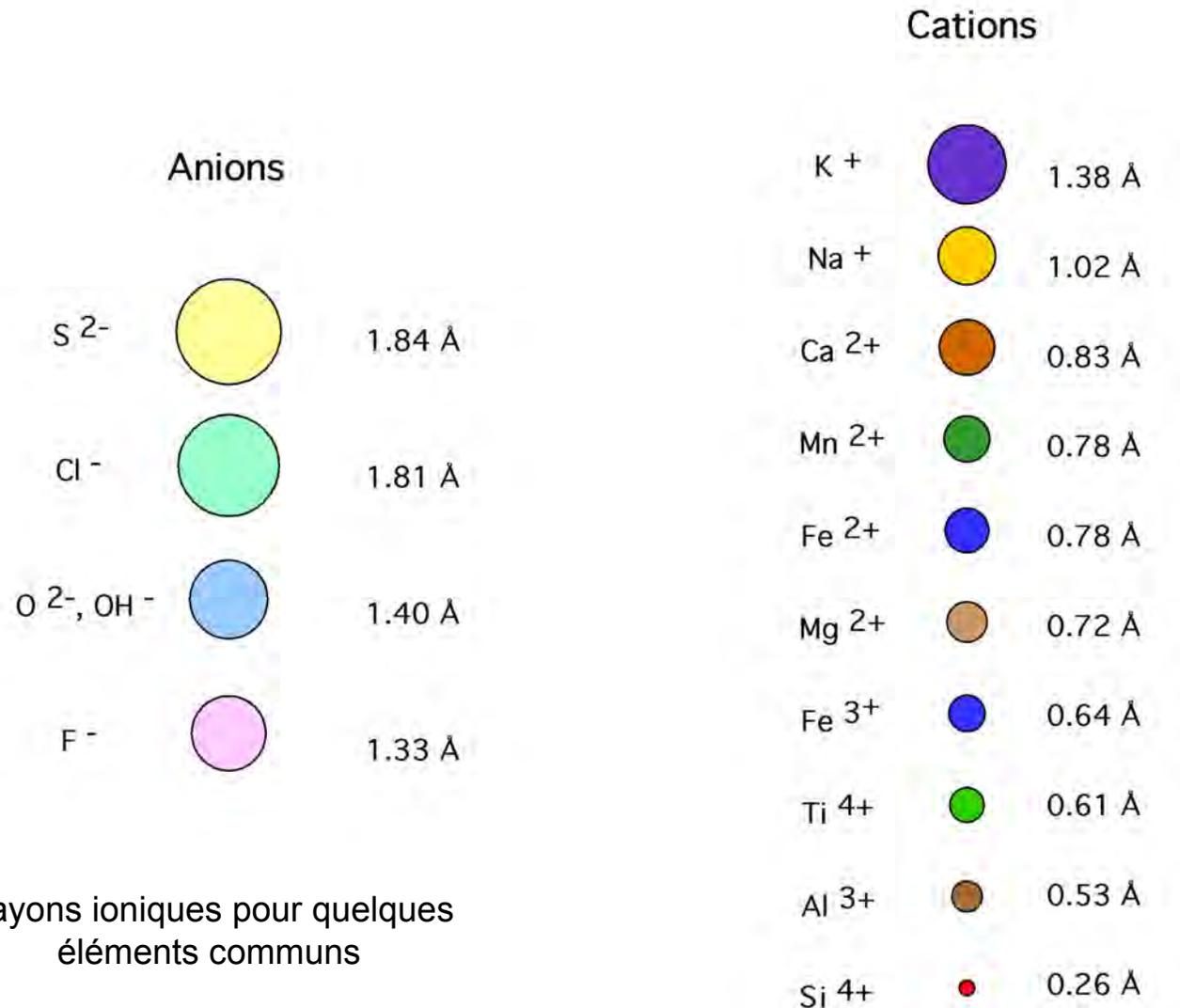


Hexagonal compact ABA



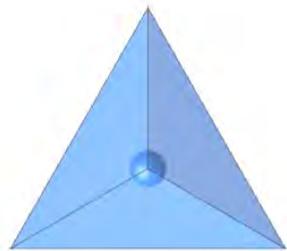
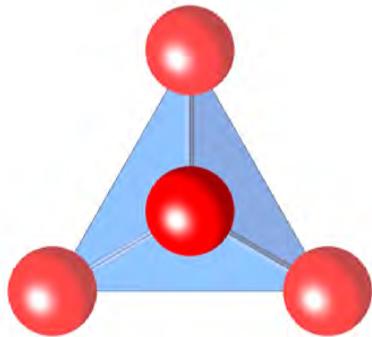
Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes de tailles différentes



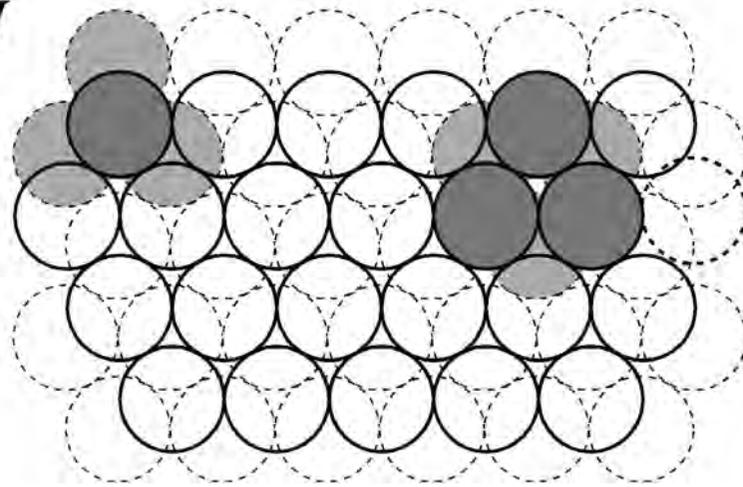
Pourquoi tant d'ordre ?

Empilements compacts d'atomes

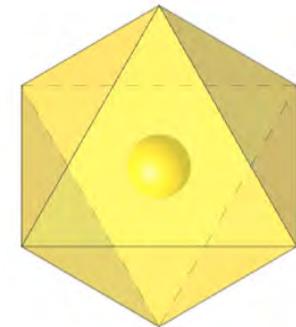
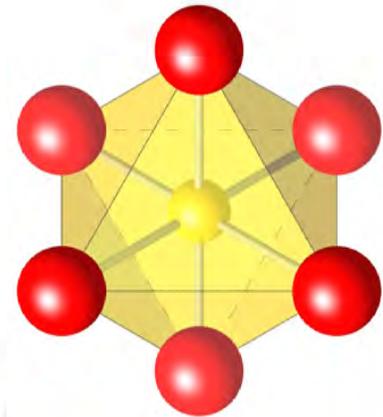


tétraèdre

IV



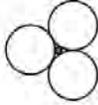
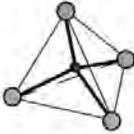
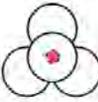
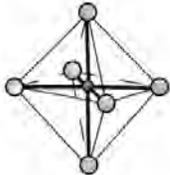
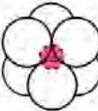
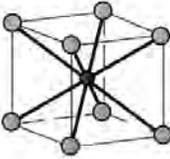
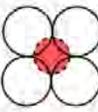
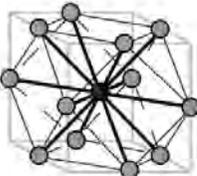
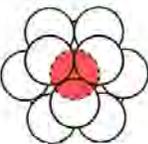
VI



octaèdre

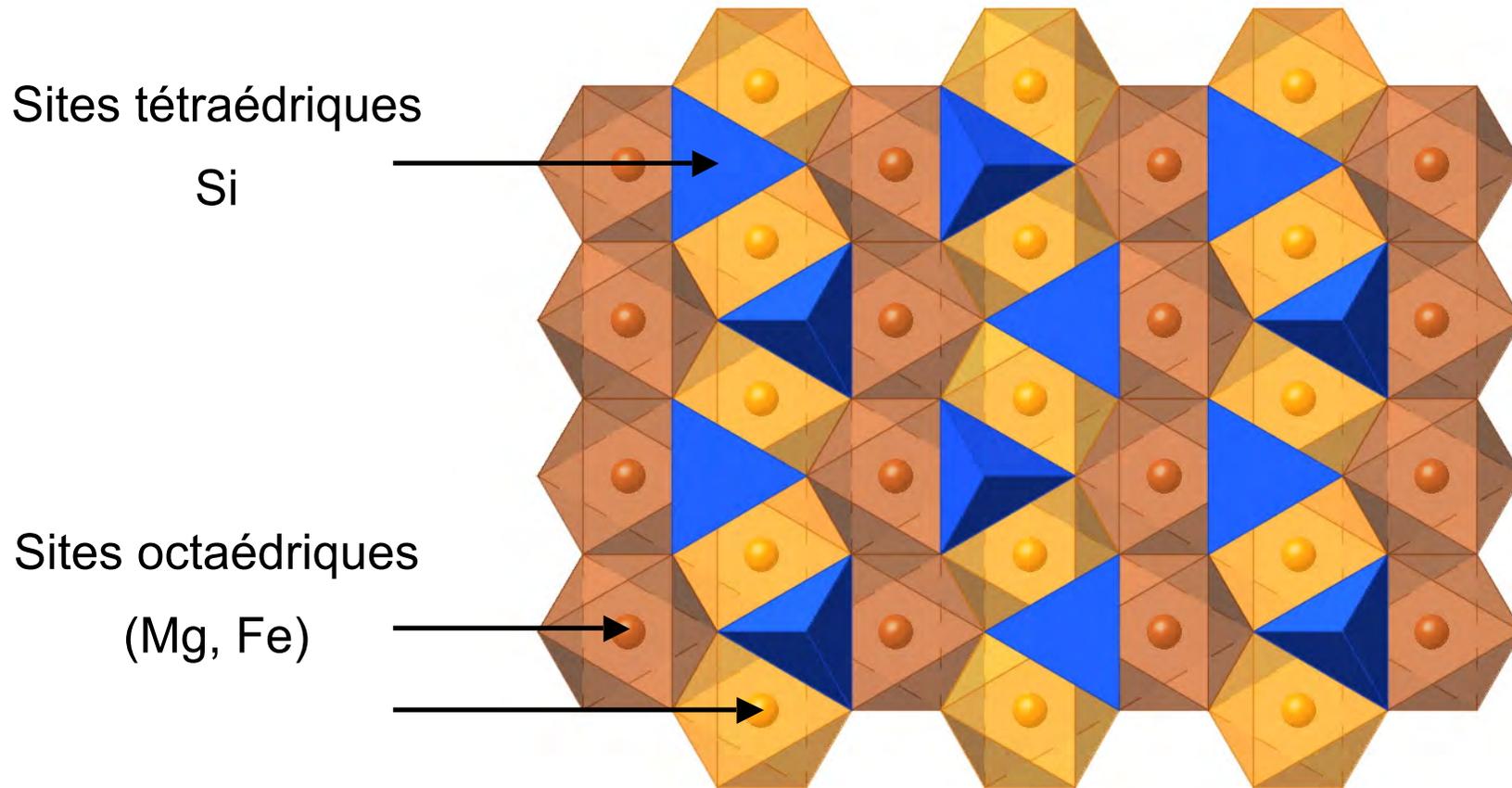
Pourquoi tant d'ordre ?

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 ?

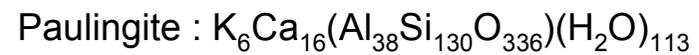
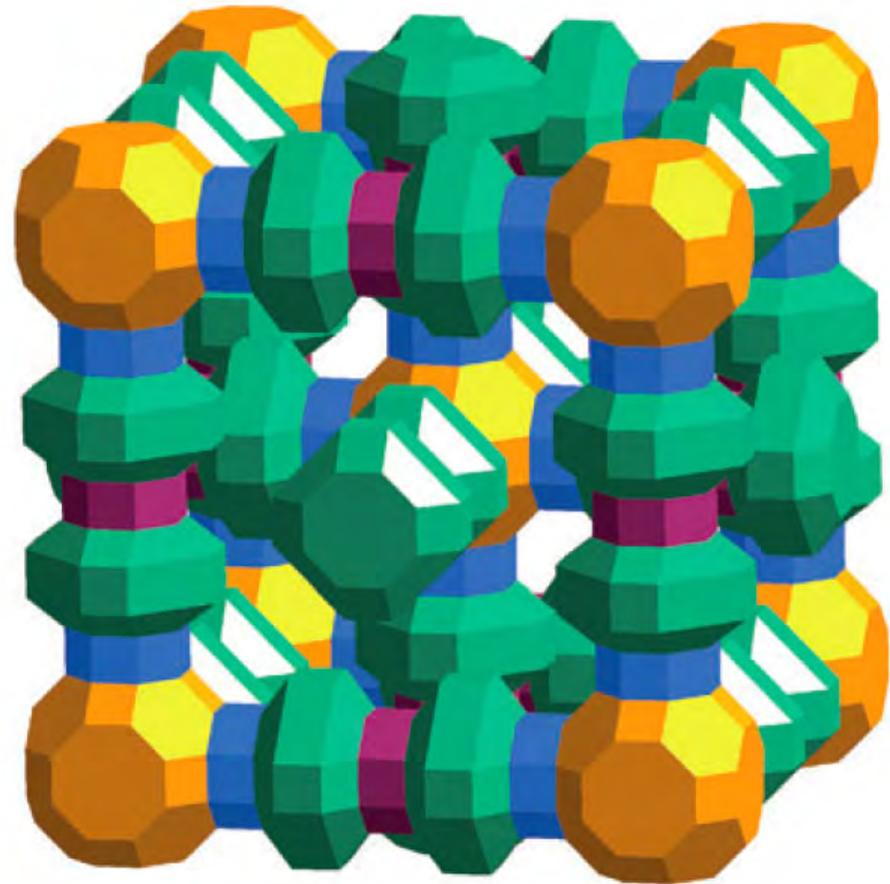
Empilements compacts d'atomes

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?

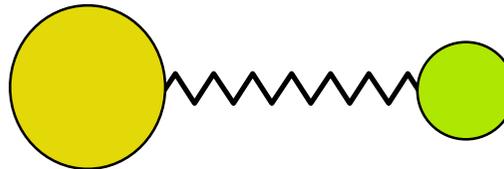
Peut-on quantifier la quantité d'ordre?

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

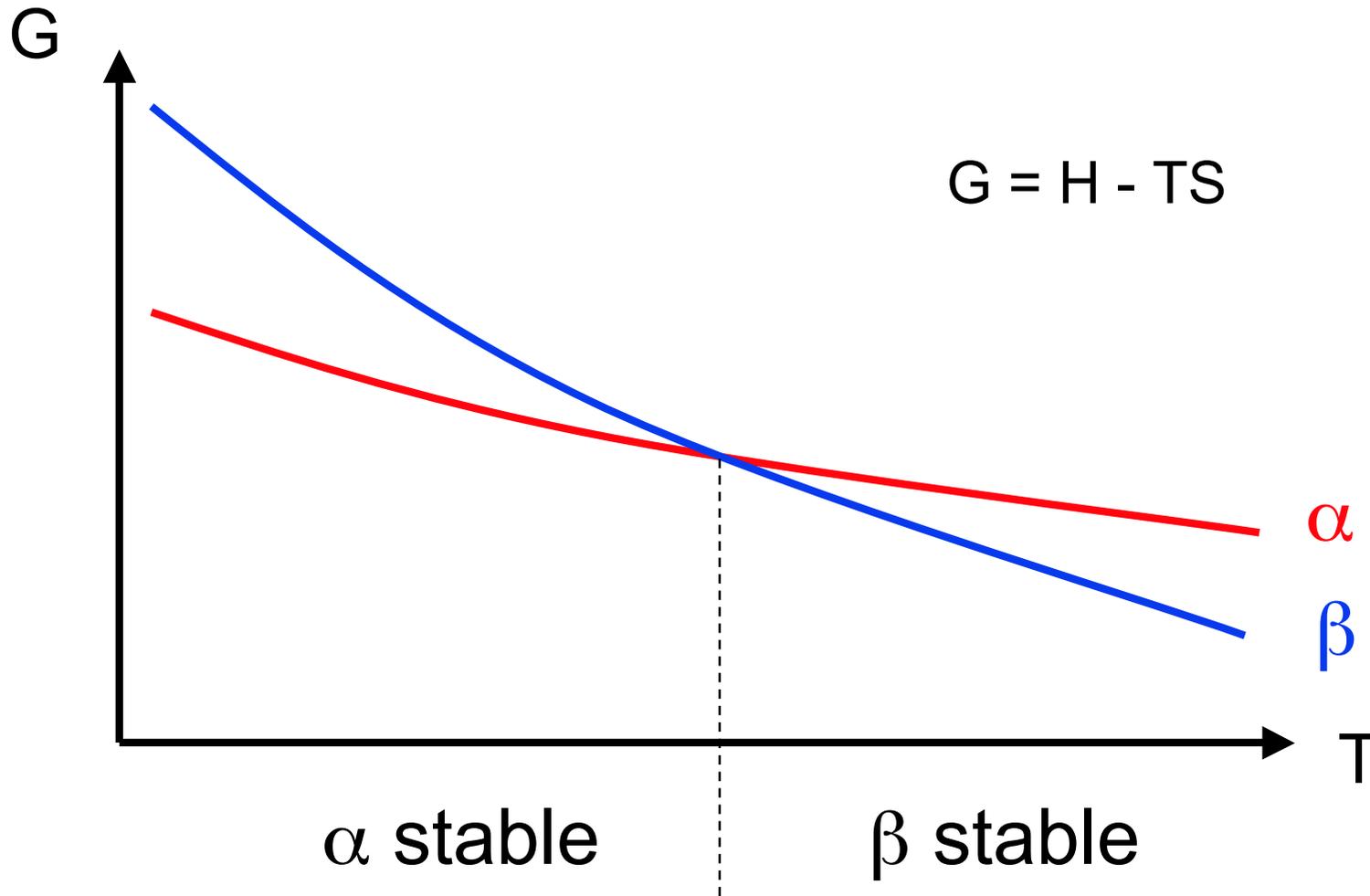
= énergie libre de Gibbs

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

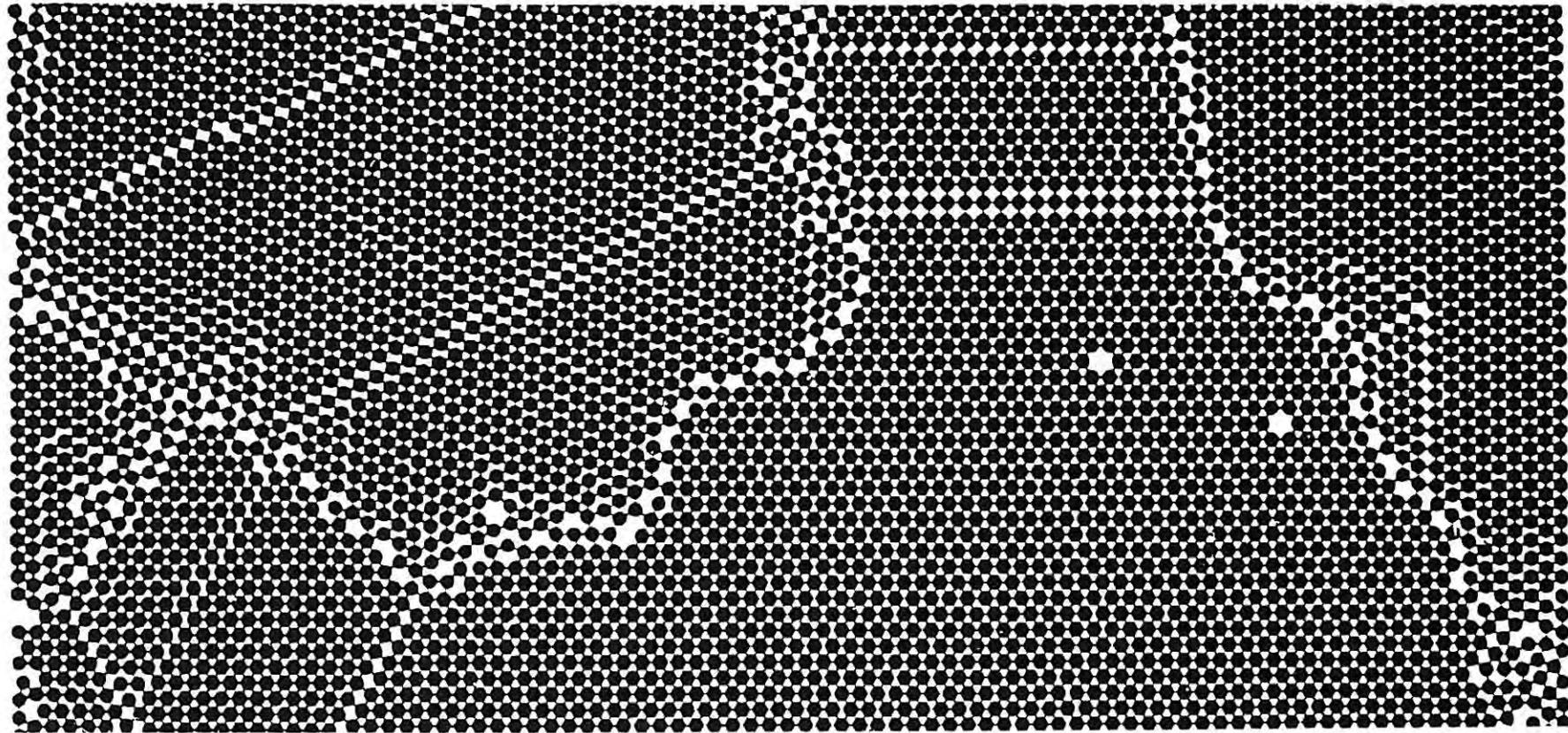
Pourquoi tant d'ordre ?

Ordre ET désordre dans les cristaux

D'autres ordres possibles ?

Du désordre dans l'ordre

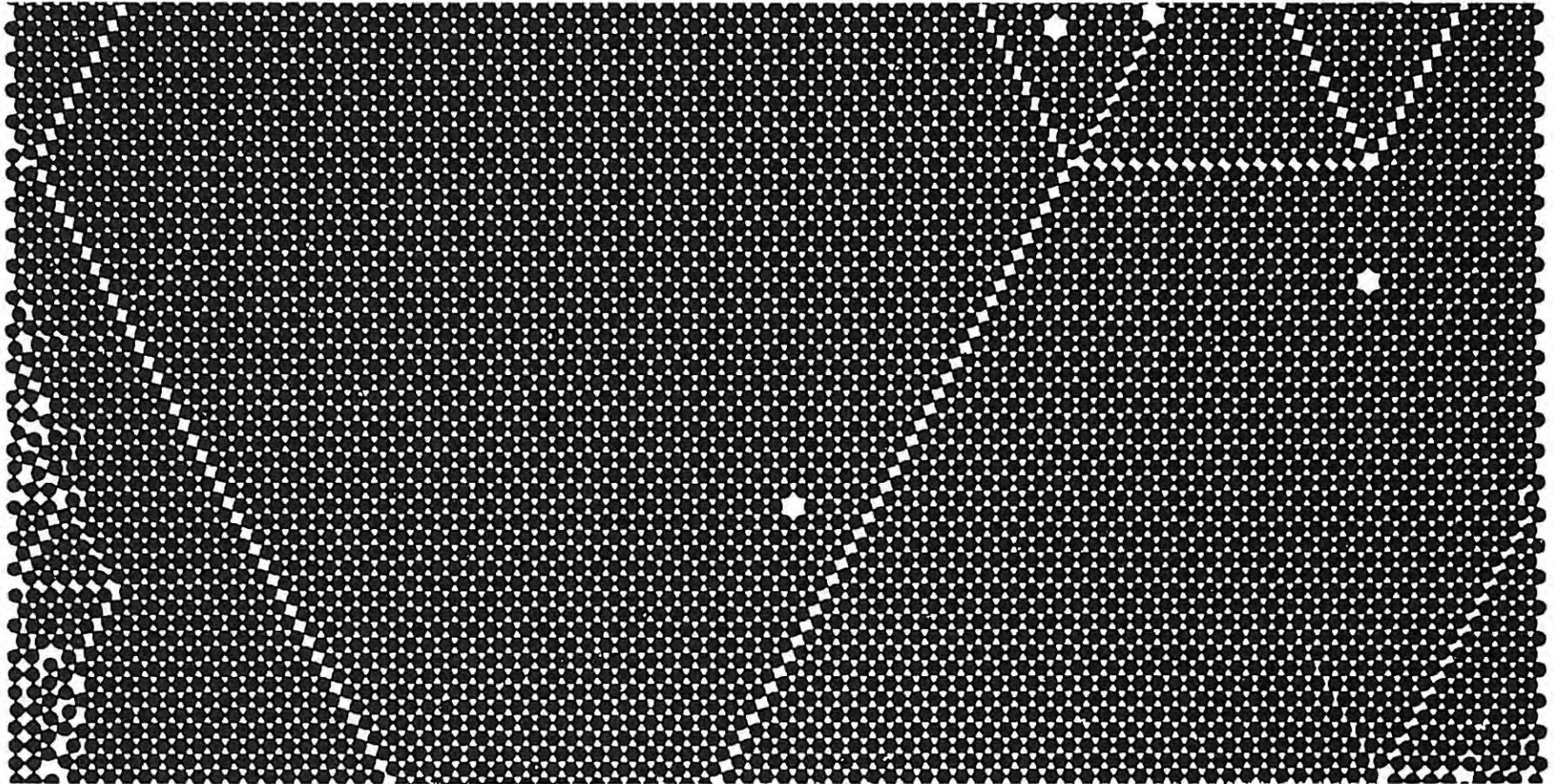
Le cristal parfait n'existe pas!



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

Du désordre dans l'ordre

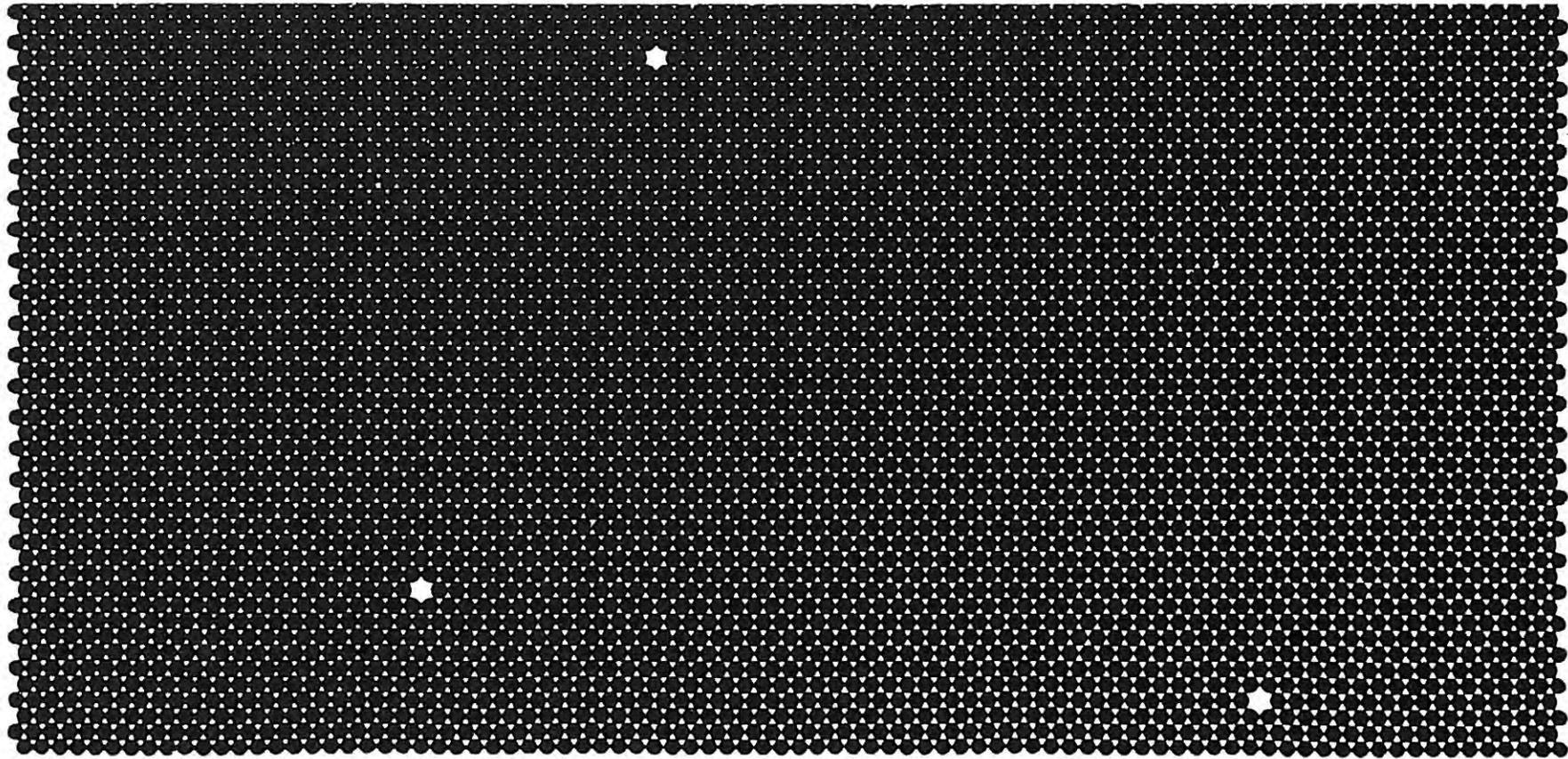
Le cristal parfait n'existe pas!



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

Du désordre dans l'ordre

Le cristal parfait n'existe pas!



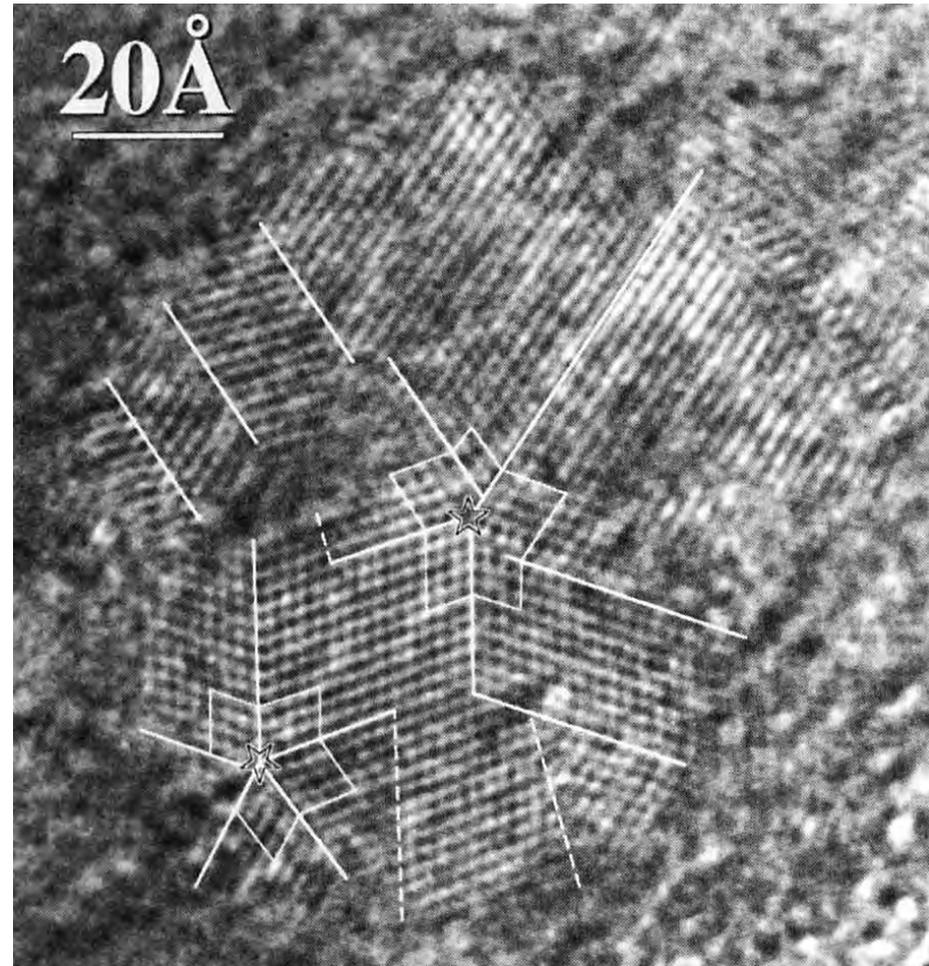
Billes calibrées entre deux plaques de plexiglass. Klein & Hurlbut, 1993

Du désordre dans l'ordre

Le cristal parfait n'existe pas!

Nano-cristaux : pas infinis

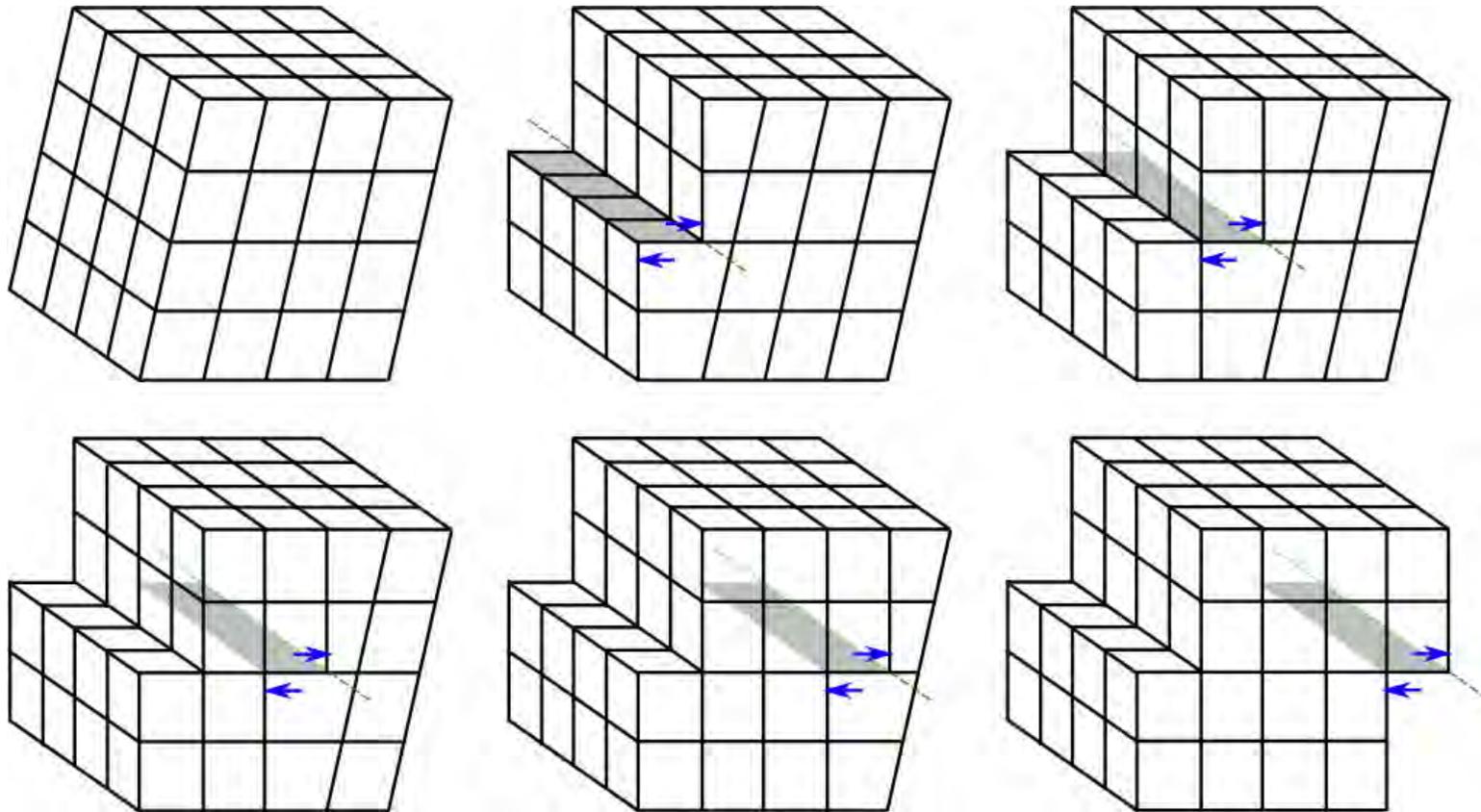
Nombreux défauts...



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

Du désordre dans l'ordre

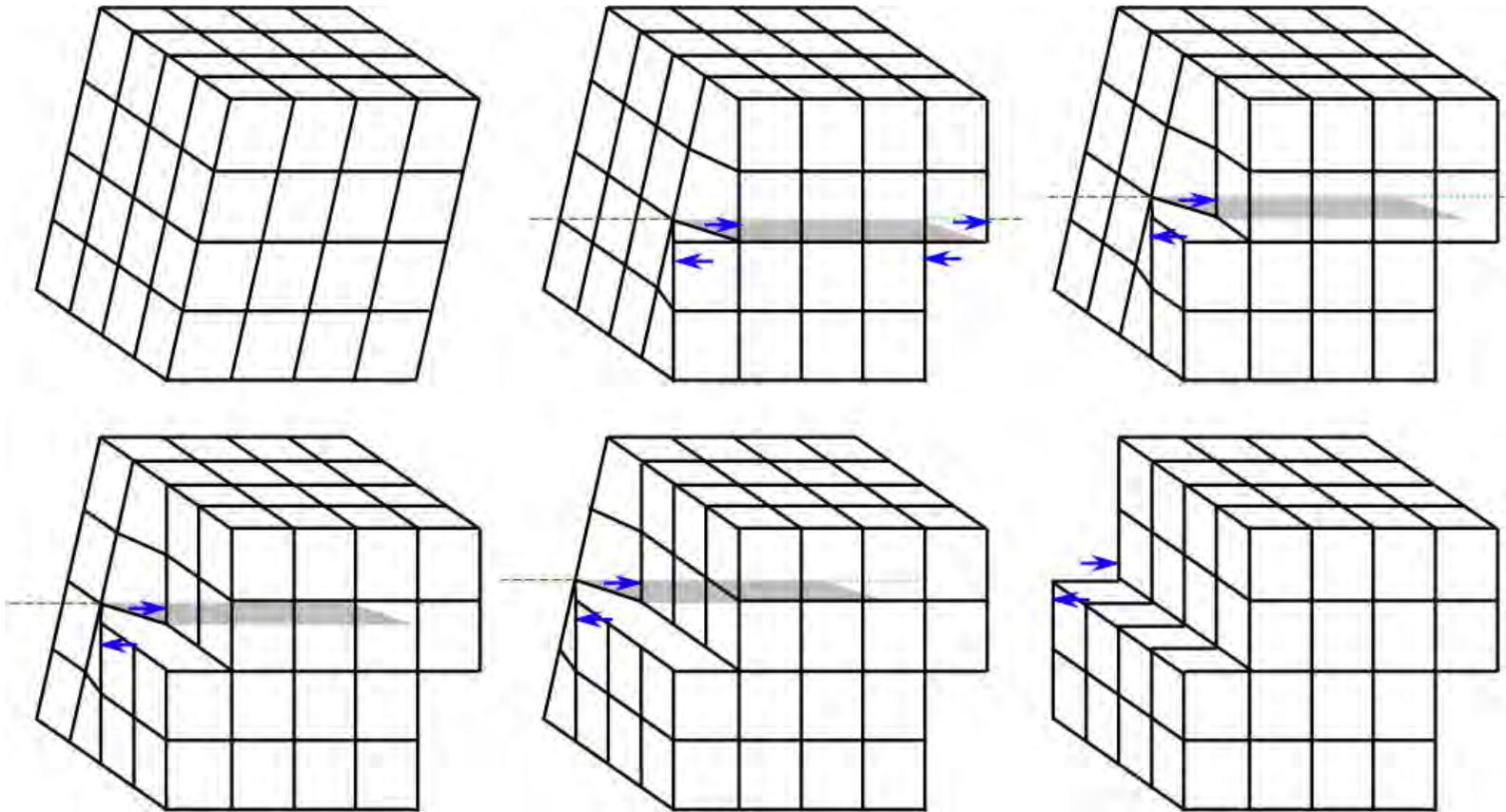
Le cristal parfait n'existe pas!



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

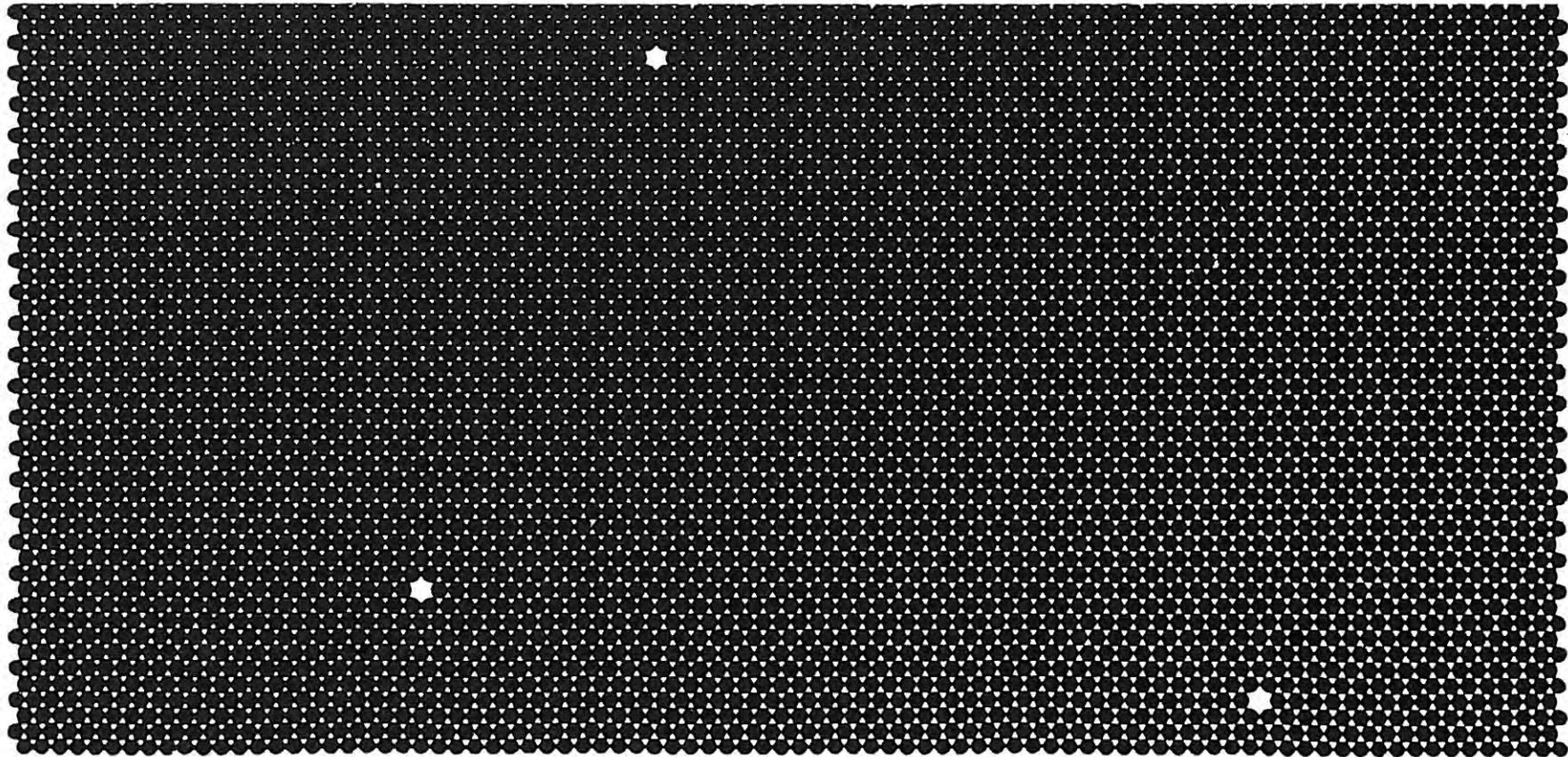
Pourquoi tant d'ordre ?

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



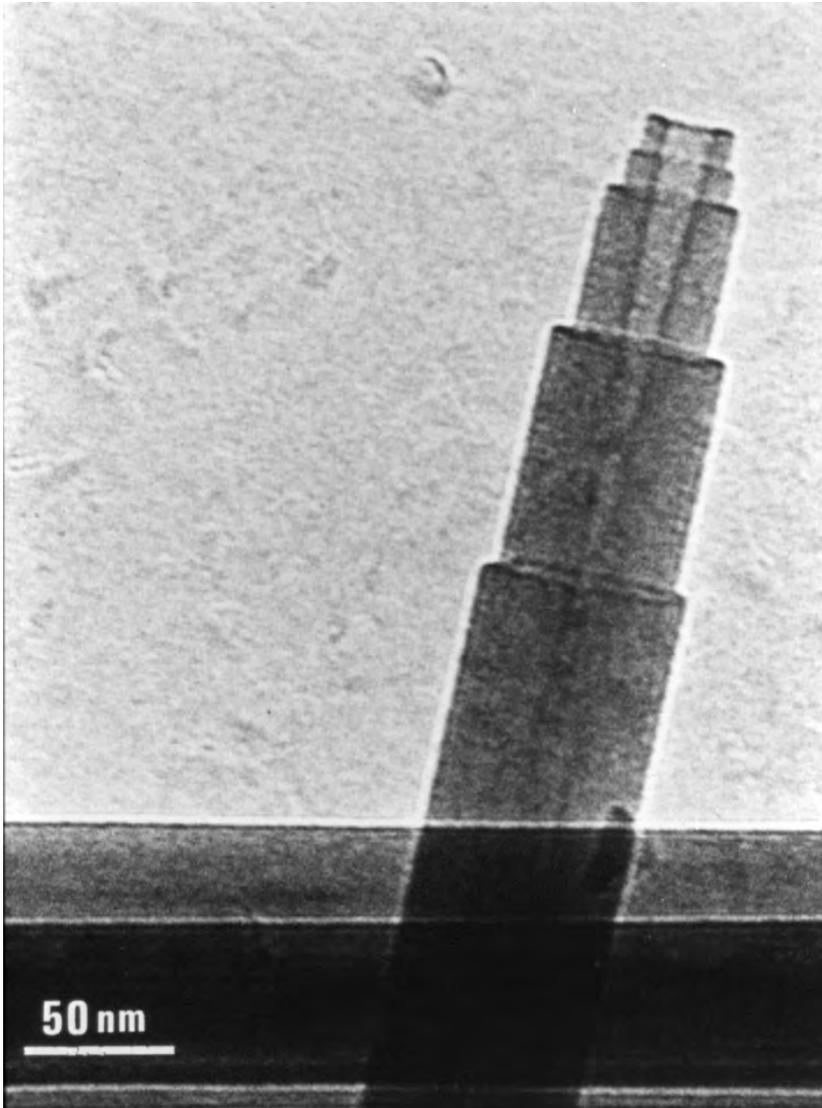
Défilé du jour de la victoire 2015. Source kremlin.ru (Presidential Press and Information Office)

D'autres ordres sont-ils possibles ?

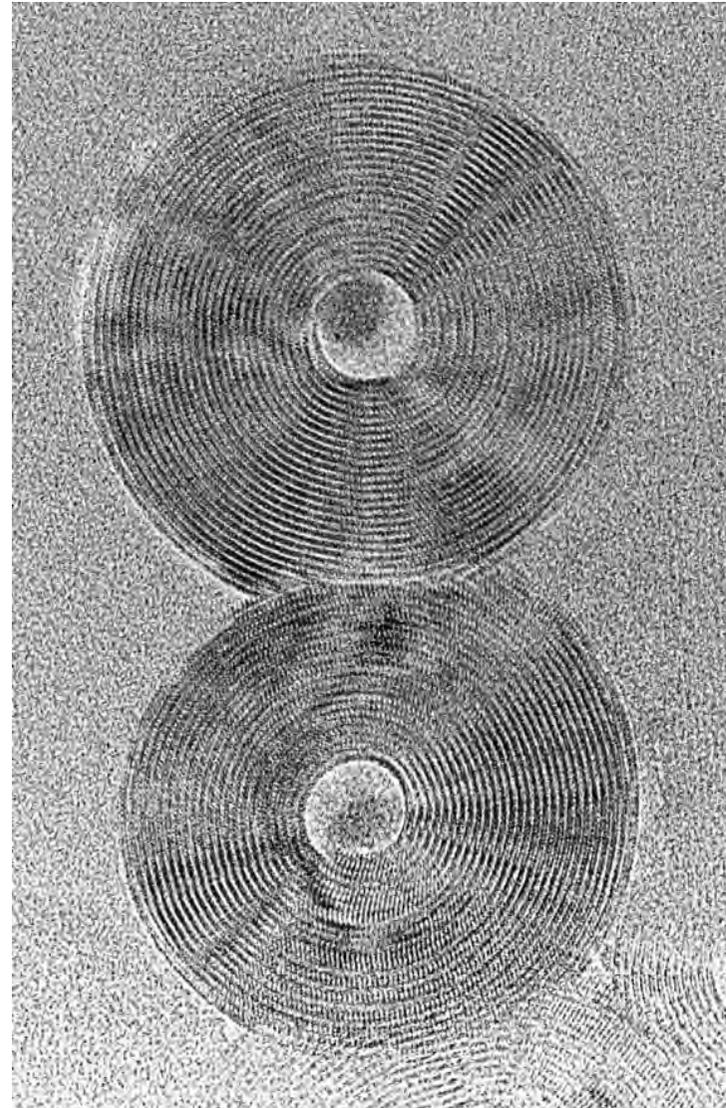
ordre non translationnel, non propageable à longue distance



D'autres ordres sont-ils possibles ?

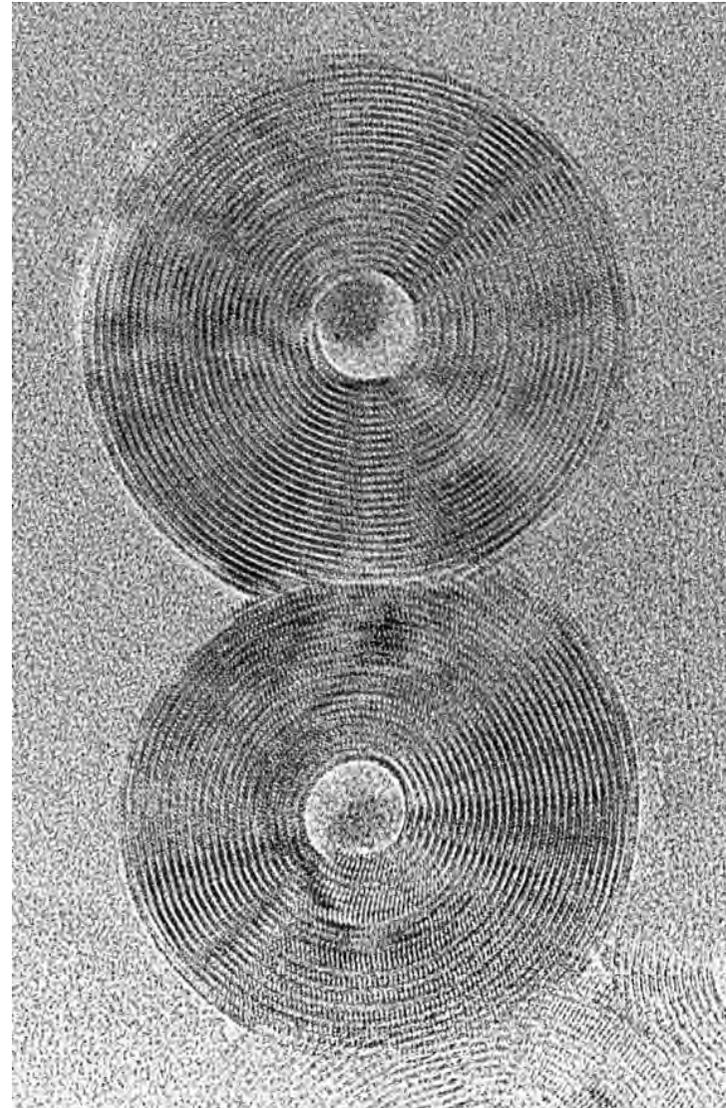
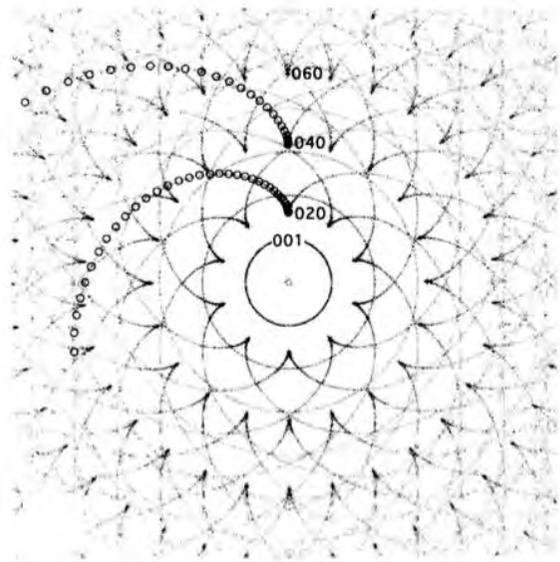
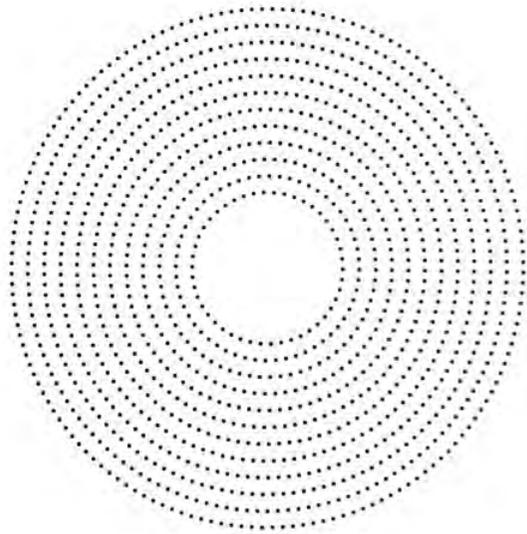


Fibre de chrysotile cylindrique

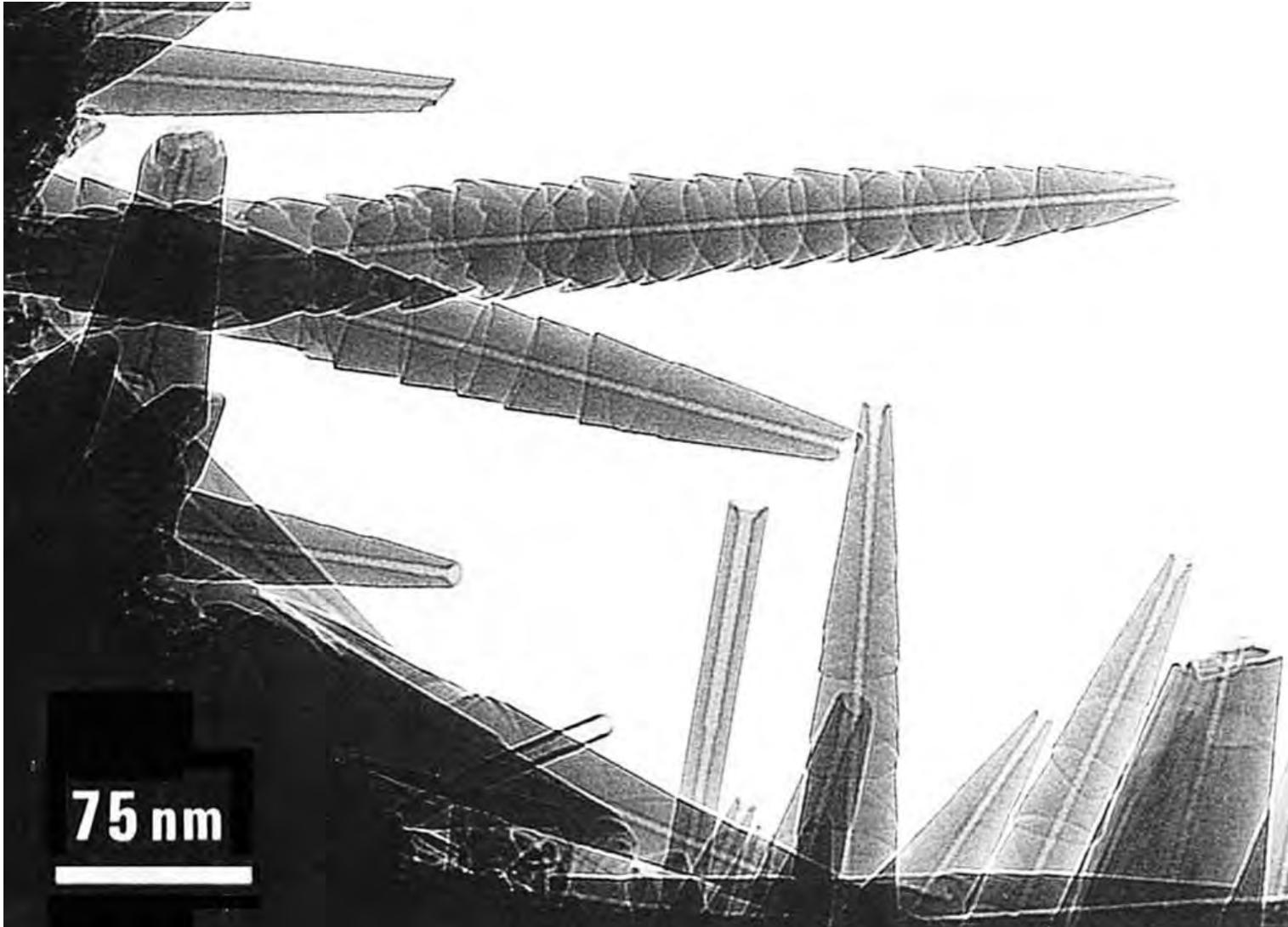


images MET B. Devouard

D'autres ordres sont-ils possibles ?



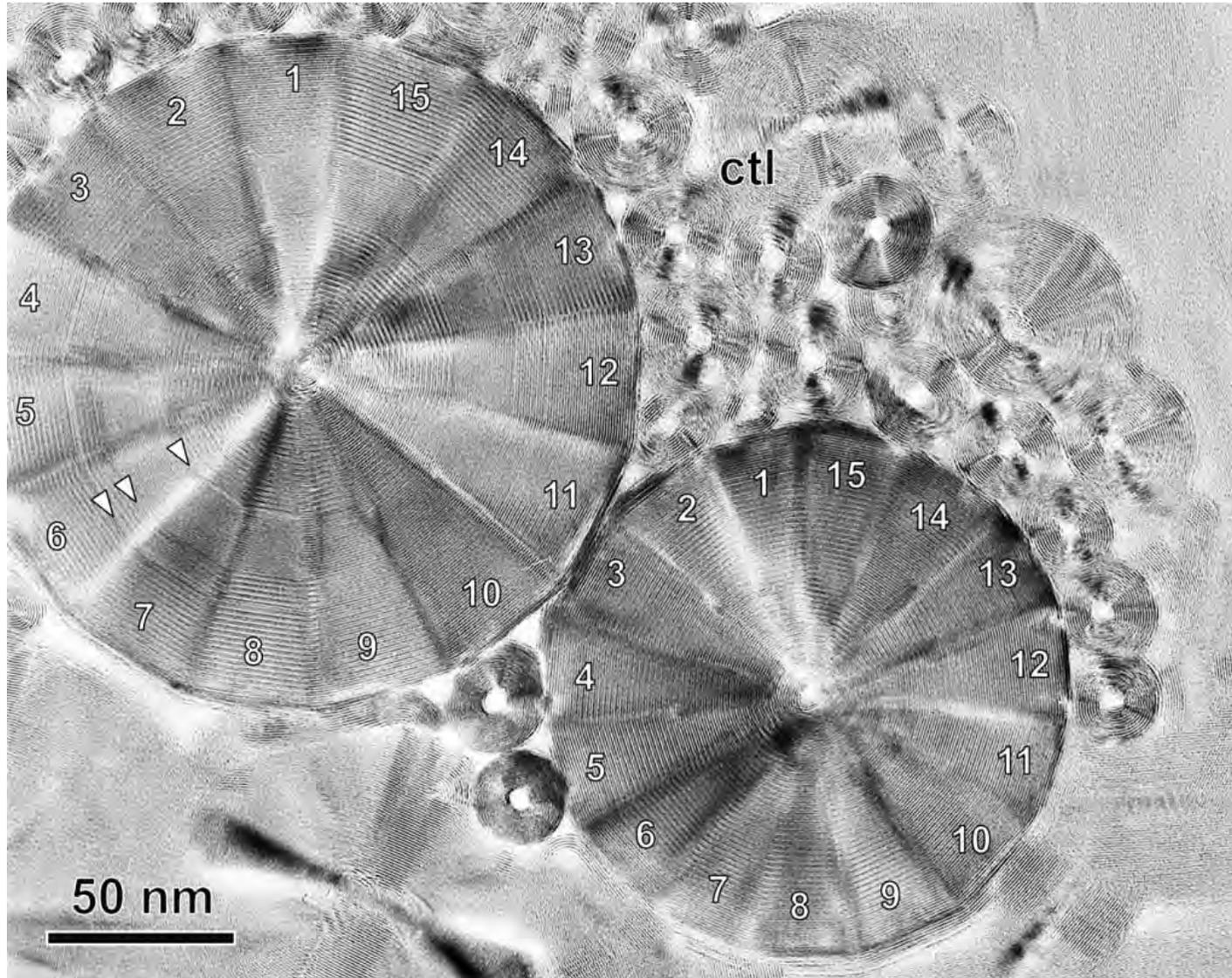
D'autres ordres sont-ils possibles ?



Chrysotile synthétique conique

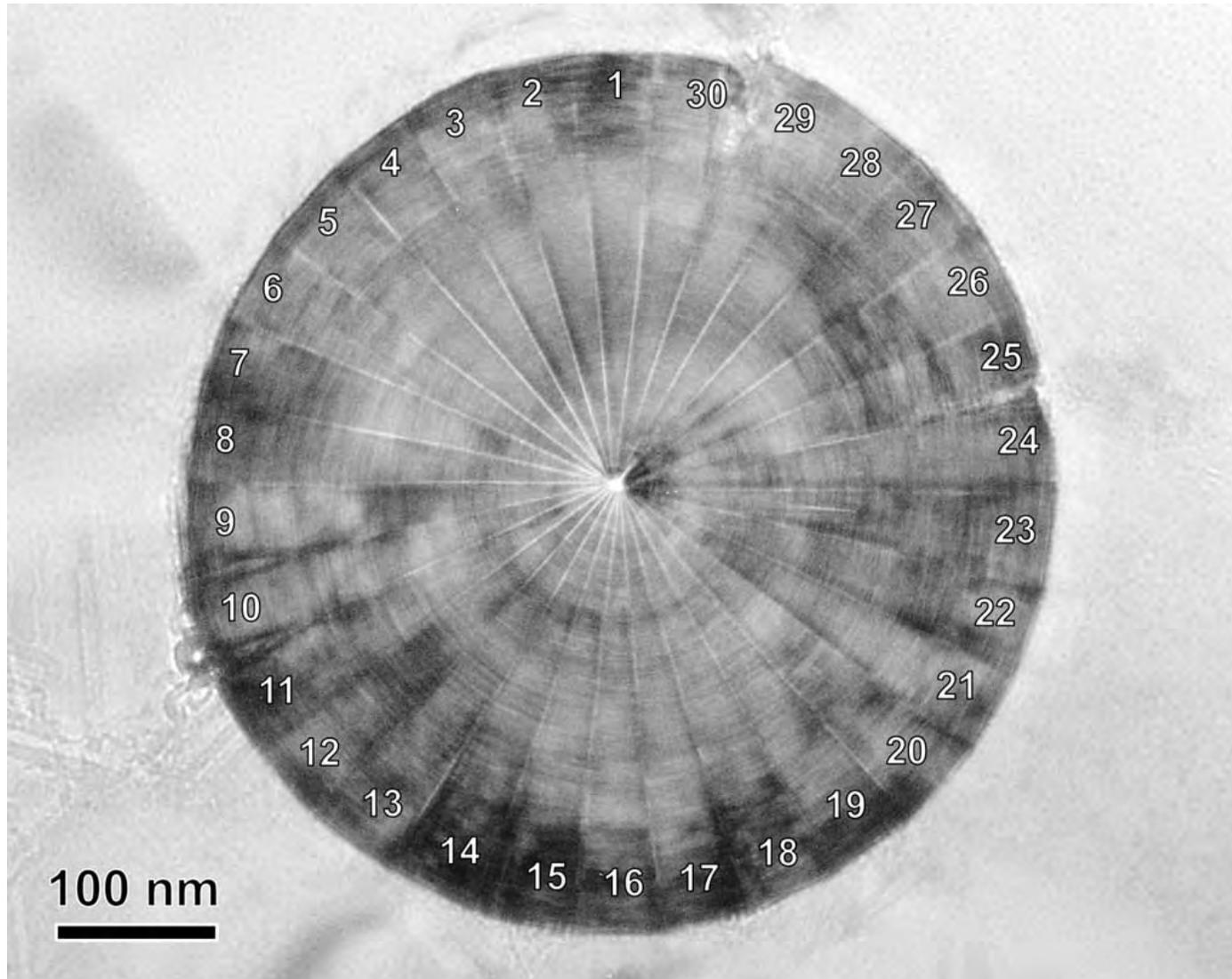
image MET B. Devouard

D'autres ordres sont-ils possibles ?



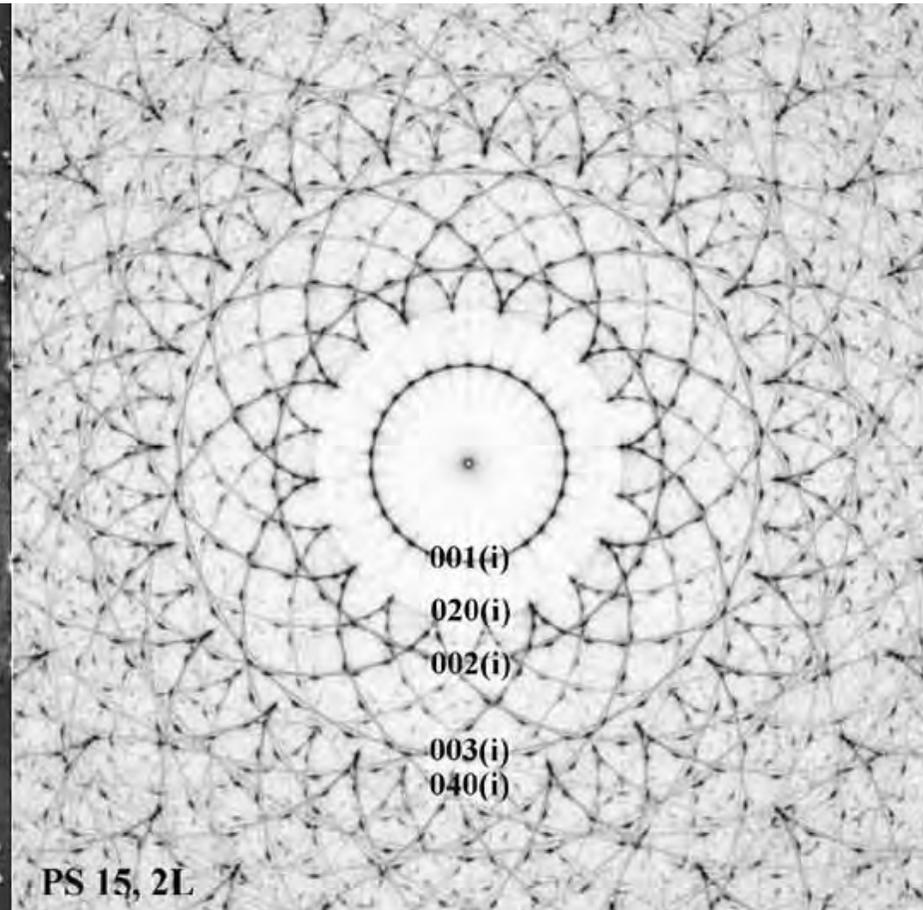
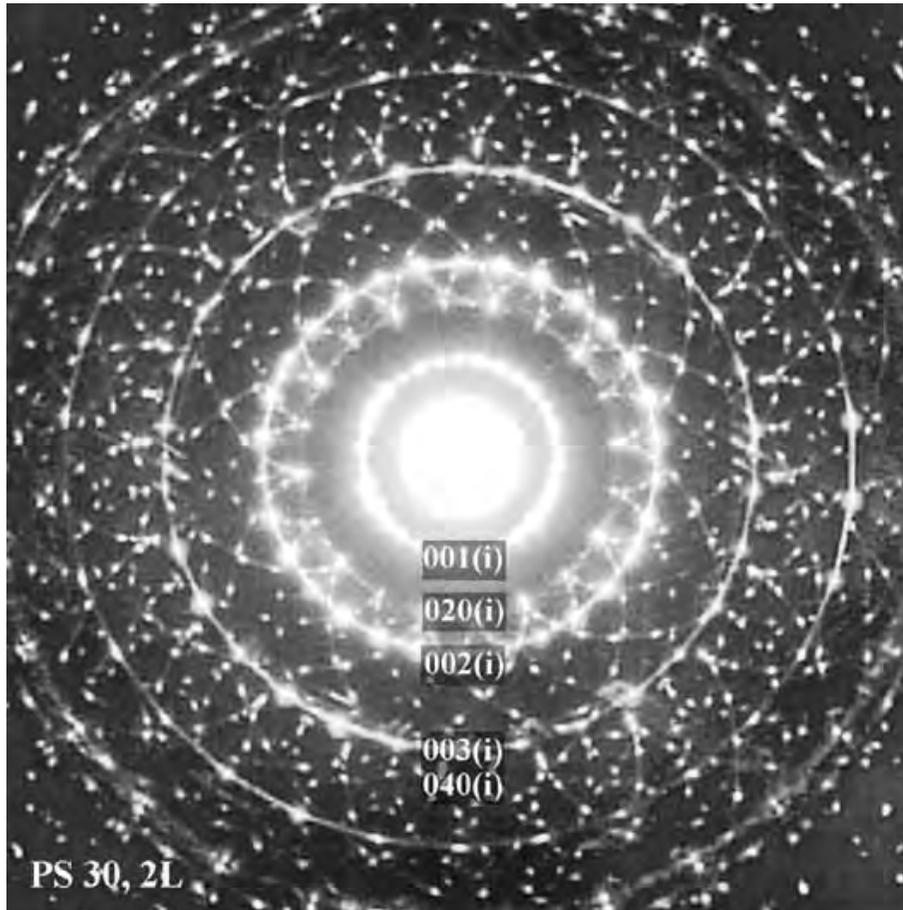
Serpentines polygonales - image MET A. Baronnet

D'autres ordres sont-ils possibles ?



Serpentines polygonales - image MET B. Devouard

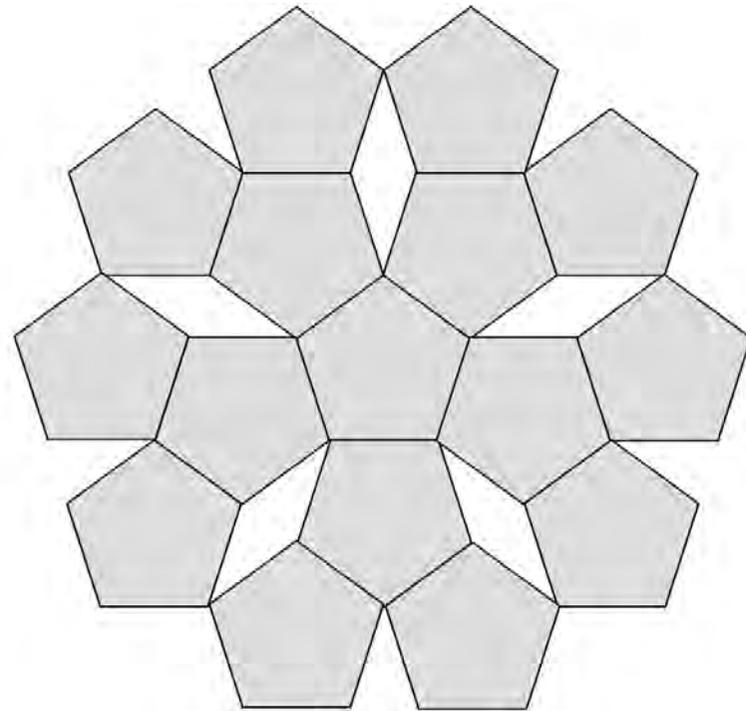
D'autres ordres sont-ils possibles ?



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

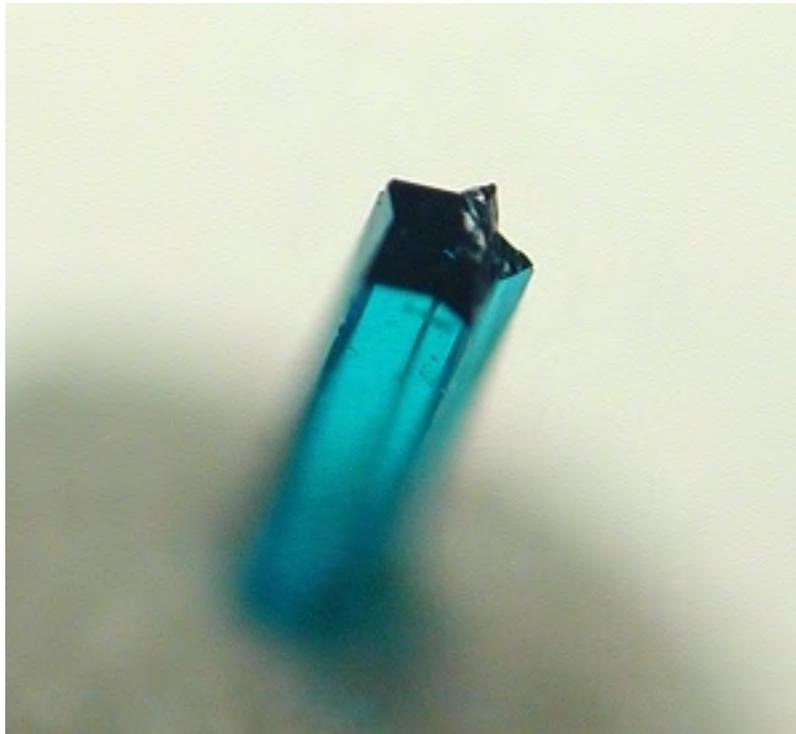
D'autres ordres sont-ils possibles ?

Symétries 5 (et 7)
interdites dans les
cristaux

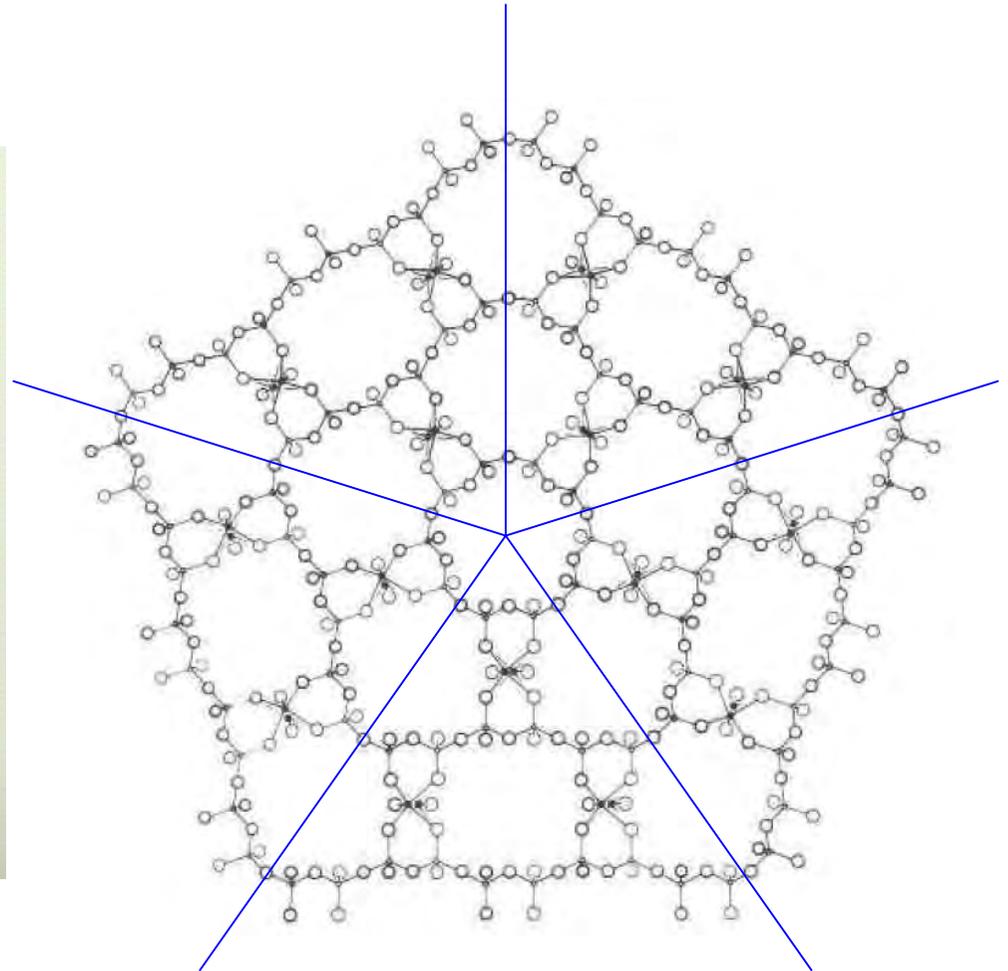


D'autres ordres sont-ils possibles ?

Symétrie 5 : il est interdit d'interdire

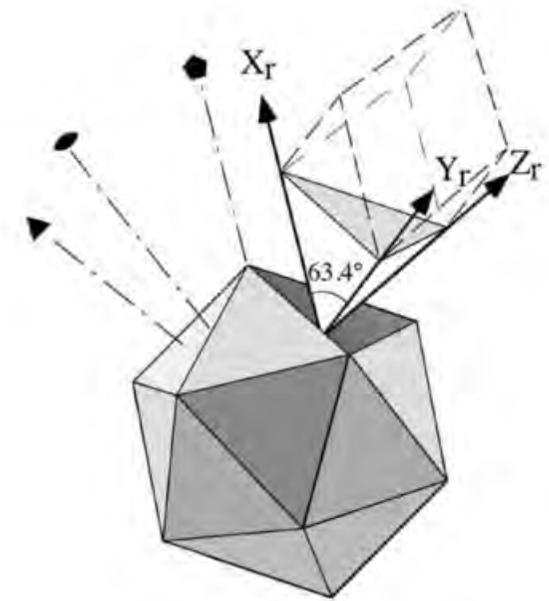
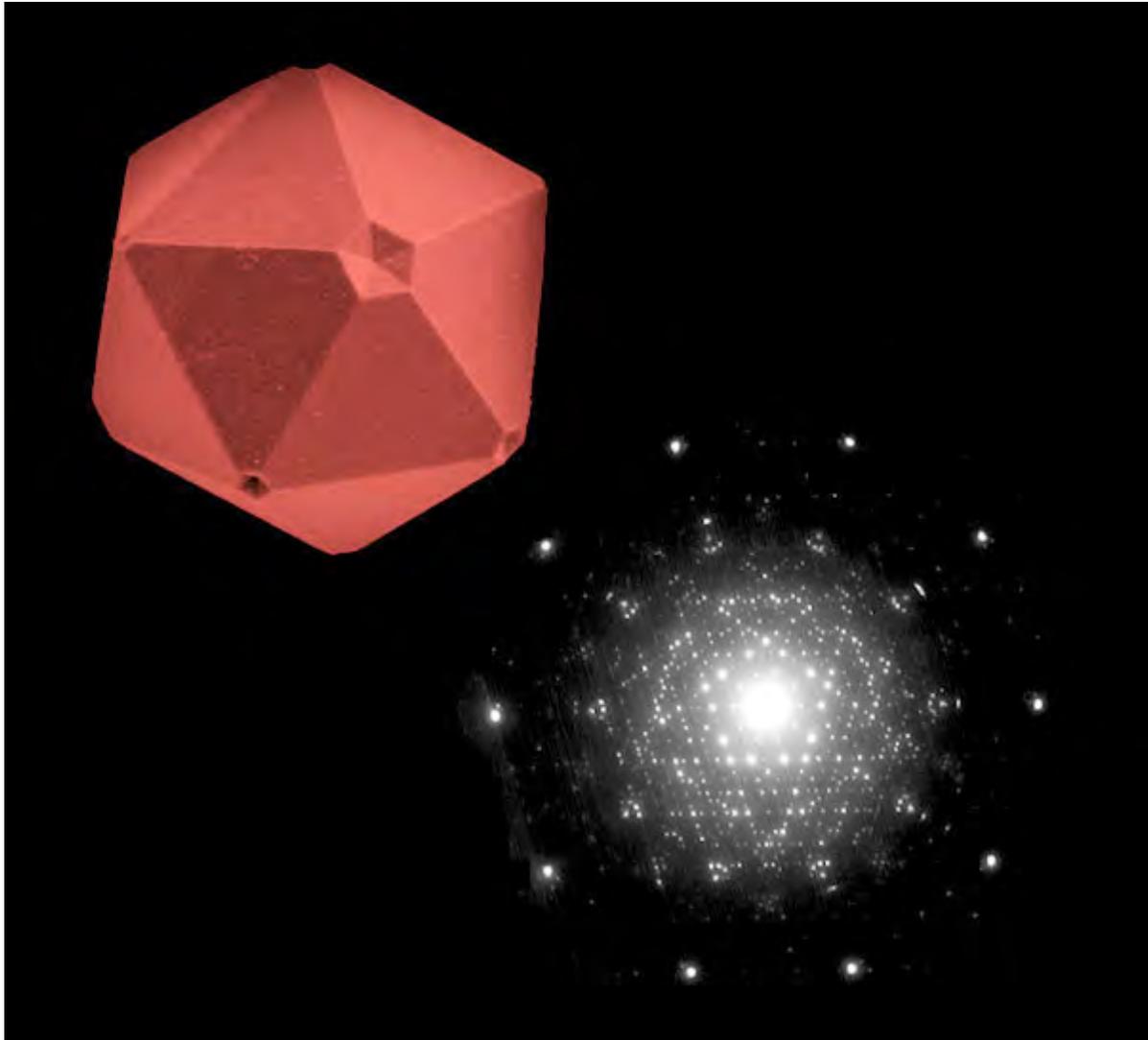


Pentagonite $\text{Ca}(\text{VO})\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$



Evans (1973)

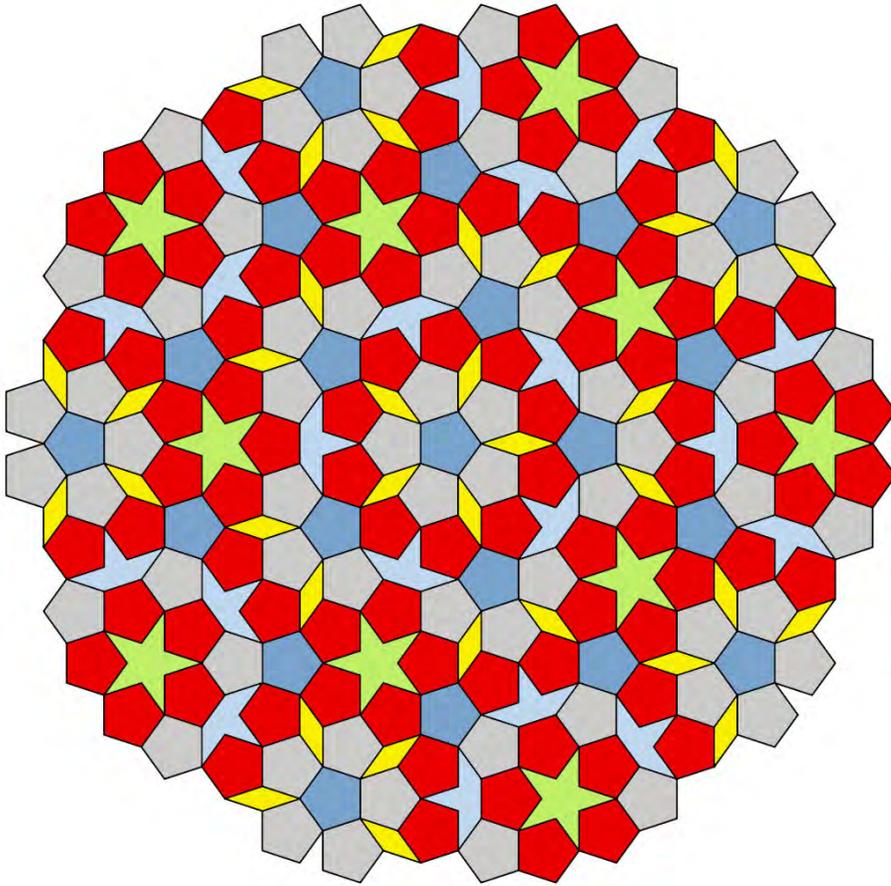
Symétrie 5 : il est interdit d'interdire



B_6O

Multimacle icosaédrique

Symétrie 5 : il est interdit d'interdire



Pavage de Penrose (1931-)

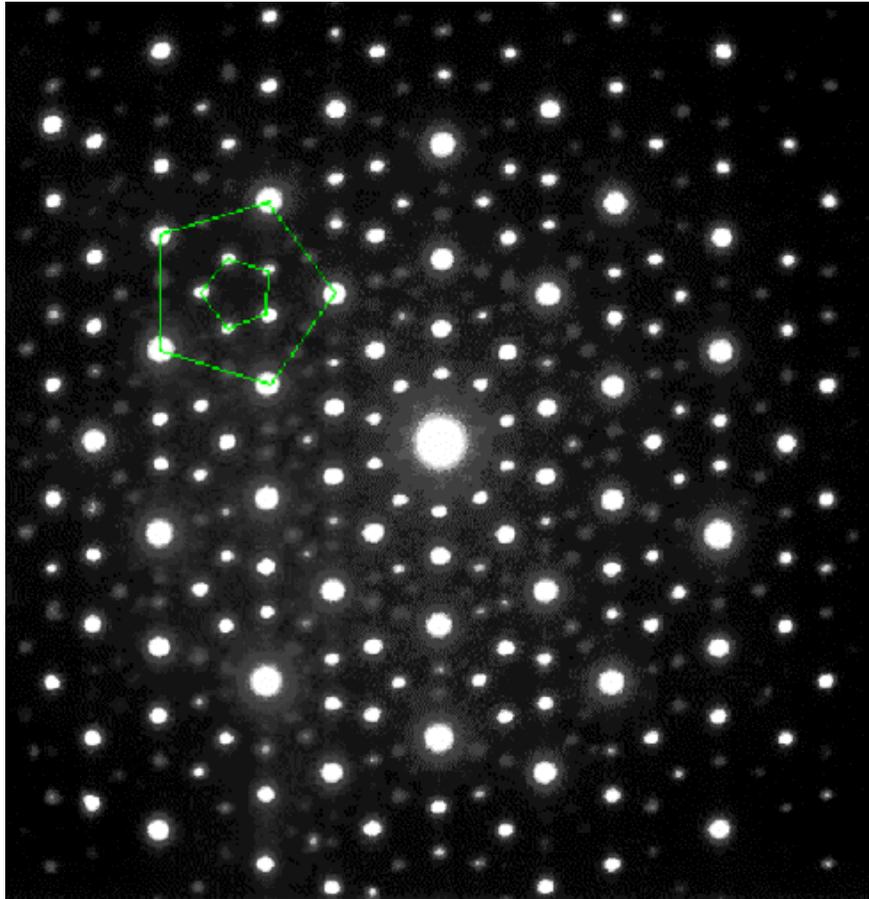


Mosaïque de la mosquée d'Ispahan, Iran (1453)

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

