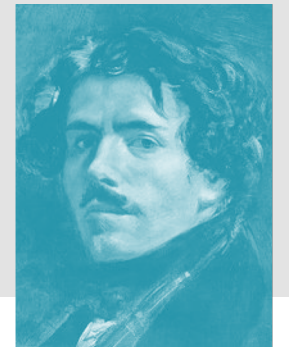
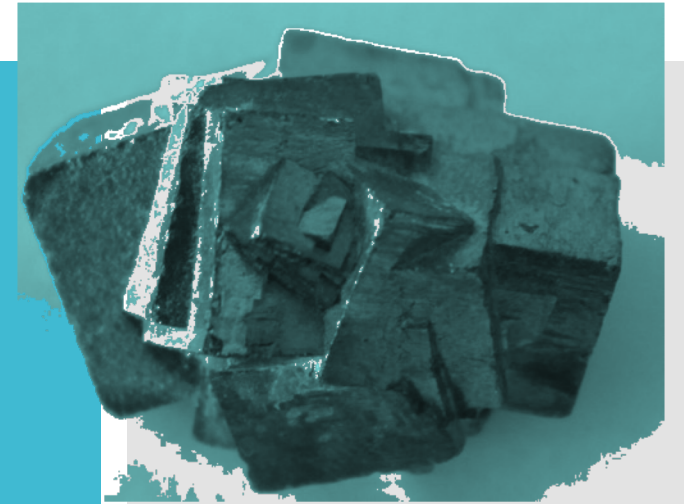


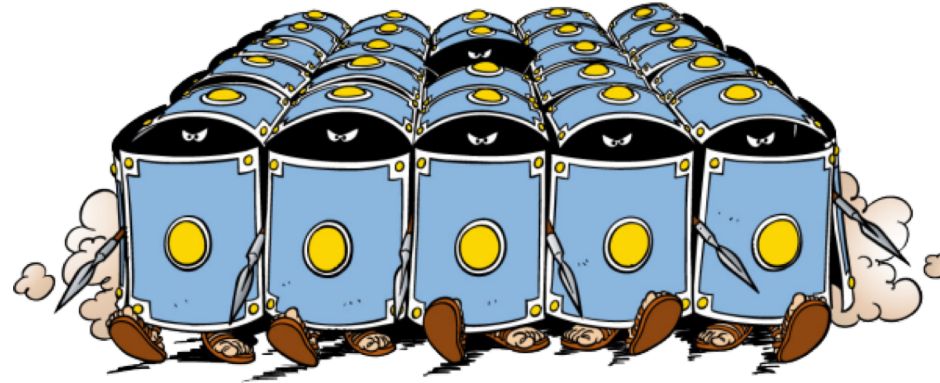
Chapitre 1.2- Des édifices ordonnés : les cristaux

Cours 2 + cours 3



Un cristal est un assemblage d'atomes (ou de molécules) dans un ordre

- Définition de cristal = Atomes, molécules arrangés dans un ordre



- Par opposition : tout assemblage non ordonné d'atomes, ou de molécules, n'est pas un cristal, exemples: liquide, gaz, verre



Verre ancien

Verre récent



Le cristal est la forme d'équilibre vers laquelle tend la matière

- Le cristal est plus stable que le désordre et occupe un volume plus petit (à BT et/ou HP). Le cristal est la forme d'équilibre vers laquelle tend la matière.

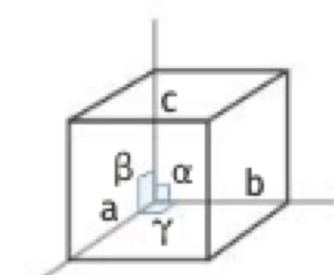


Analogie d'un solide cristallisé

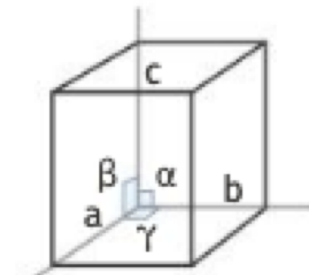
Analogie d'un solide non cristallisé (verre), d'un liquide, ...

- Ex : cristal de graphite : maille hexagonale
- Cristal de sel (NaCl) : maille cubique
- Cristal de gypse ($\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$): maille monoclinique

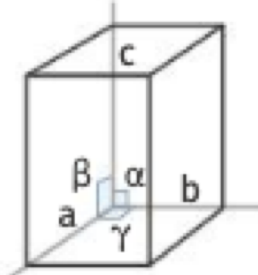
Les sept mailles cristallines



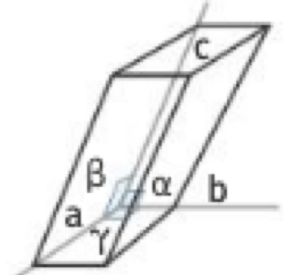
cubique
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



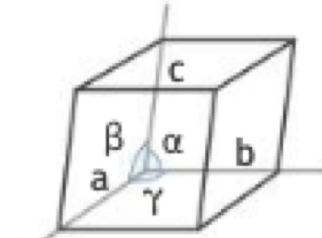
quadratique
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



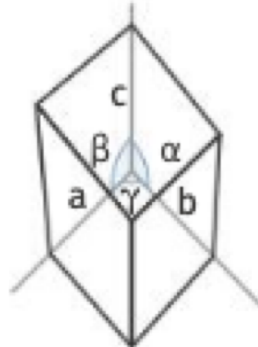
orthorhombique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



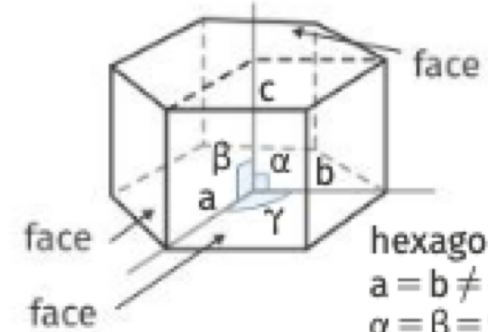
monoclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\beta = \gamma = 90^\circ \neq \alpha$



triclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$



rhomboédrique
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

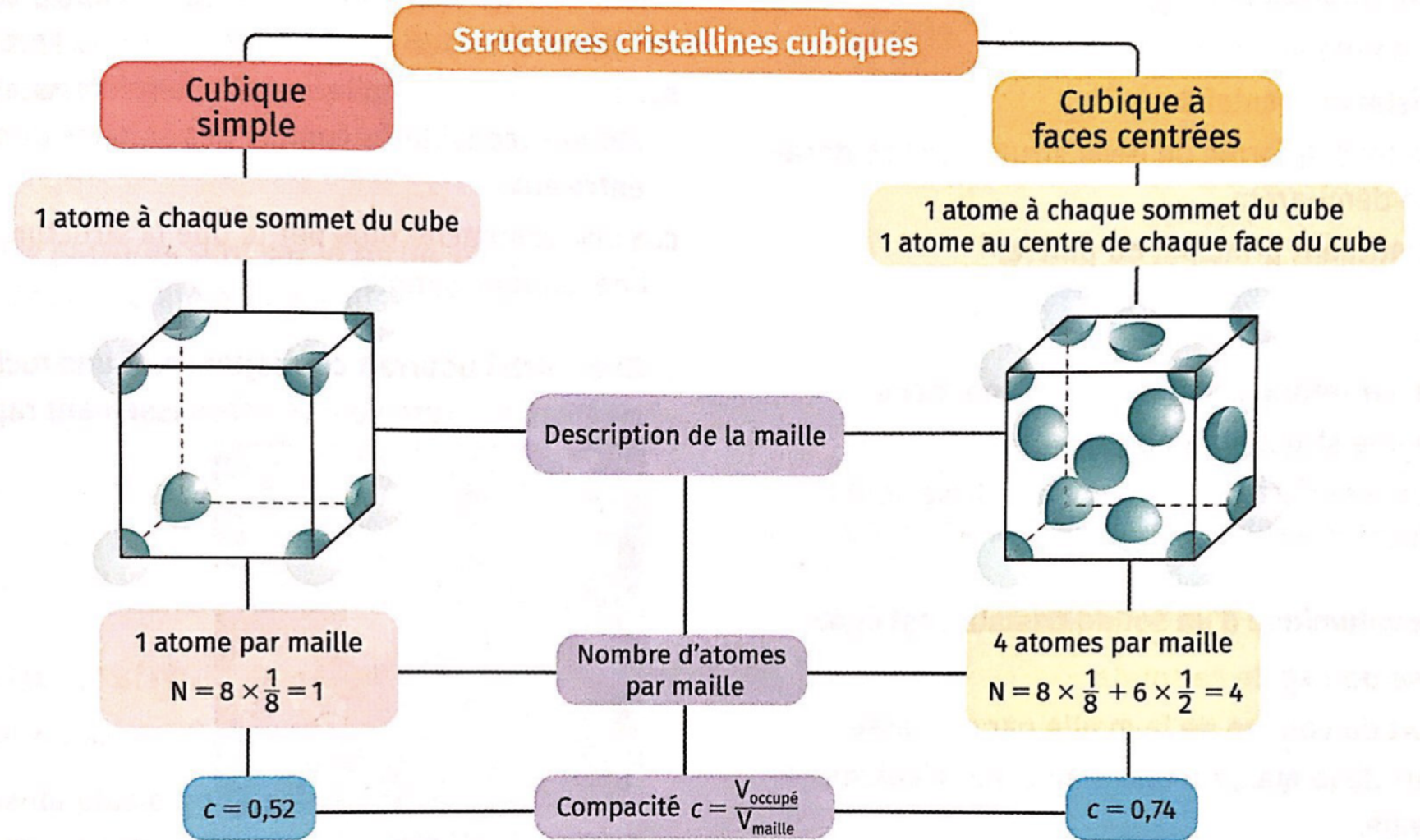


hexagonal
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = 90^\circ$
 $\gamma = 120^\circ$



La nature ayant « horreur du vide », ces systèmes correspondent à l'occupation complète par des atomes (ou molécules) dans les 3 directions de l'espace

Maille, atome, compacité



Compacité = Volume occupé par les entités / Volume de la maille

1 Compacité de la structure cubique simple (CS)

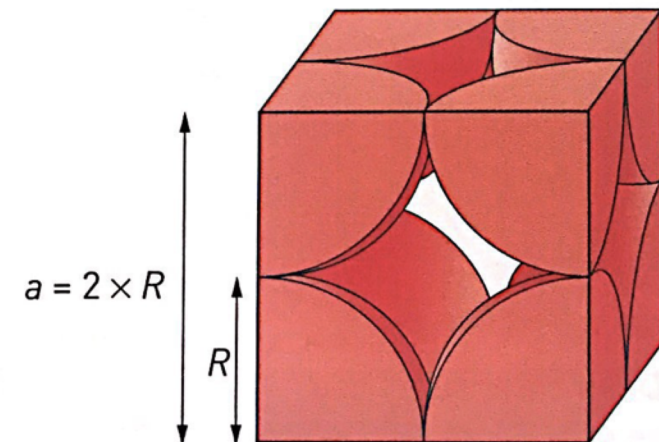
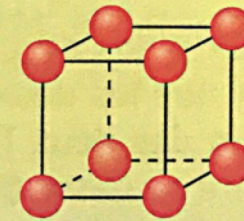
Dans le cas d'une structure cubique simple (CS) et d'entités sphériques de rayon R , la compacité s'exprime par :

$$c_{CS} = \frac{\text{nombre d'entités par maille} \times \overbrace{\frac{4}{3}\pi(R)^3}^{\text{volume d'une entité sphérique}}}{\underbrace{a^3}_{\text{volume de la maille cubique}}}$$

Si les entités sont tangentes le long d'une arête du cube, le paramètre de maille a est égal au double du rayon R des entités : $a = 2R$. On en déduit :

$$c_{CS} = \frac{1 \times \frac{4}{3}\pi(R)^3}{(2R)^3} = \frac{\pi}{6} \quad \text{soit} \quad c_{CS} \approx 0,52.$$

Dans le cas d'une structure cubique simple, il y a 8 entités, appartenant chacune à 8 mailles. On compte donc une entité par maille.



Compacité d'une structure cubique à faces centrées

Dans le cas d'une structure cubique à faces centrées (CFC) et d'entités sphériques de rayon R , la compacité s'exprime par :

$$c_{\text{CFC}} = \frac{\text{nombre d'entités par maille} \times \overbrace{4 \times \frac{4}{3} \pi (R)^3}^{\text{volume d'une entité sphérique}}}{\underbrace{a^3}_{\text{volume de la maille cubique}}}$$

Si les entités sont tangentes le long de la diagonale de chaque face, la longueur de celle-ci est égale à quatre fois le rayon d'une entité soit $4R$.

L'application du théorème de Pythagore dans le triangle rectangle ABC permet d'écrire :

$$(4R)^2 = a^2 + a^2 \text{ donc } 4R = a\sqrt{2}.$$

Le paramètre de maille a est donc :

$$a = \frac{4R}{\sqrt{2}}.$$

On en déduit :

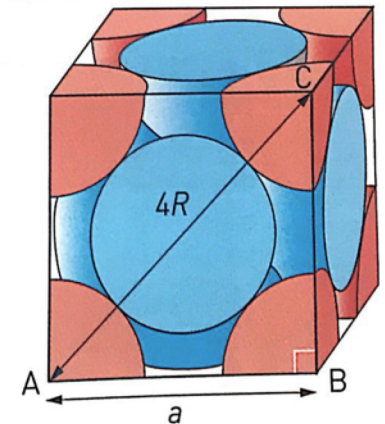
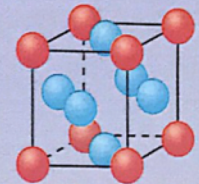
$$c_{\text{CFC}} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi (R)^3}{\left(\frac{4R}{\sqrt{2}}\right)^3} = \frac{\sqrt{2}\pi}{6} \text{ soit } c_{\text{CFC}} \approx 0,74.$$

Dans le cas d'une structure cubique à faces centrées, il y a :

- 8 entités, appartenant chacune à 8 mailles ;
- 6 entités appartenant chacune à 2 mailles.

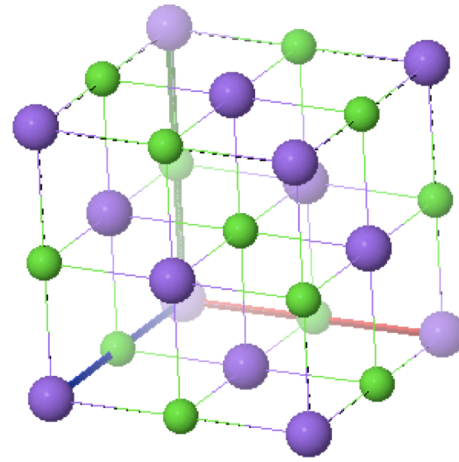
$$\frac{8}{8} + \frac{6}{2} = 4.$$

On compte donc 4 entités par maille.





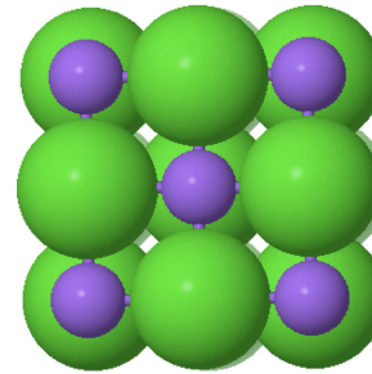
Cristal de sel (NaCl), maille cubique



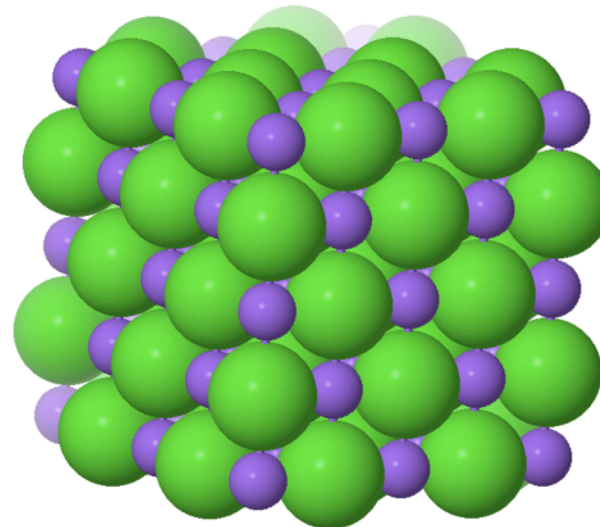
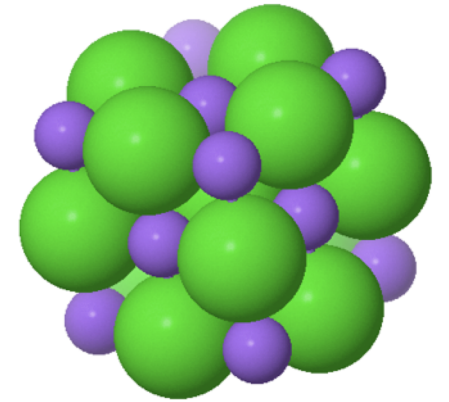
$a=5.640\text{\AA}$
 $b=5.640\text{\AA}$
 $c=5.640\text{\AA}$
 $\alpha=90.000^\circ$
 $\beta=90.000^\circ$
 $\gamma=90.000^\circ$

| Atome | I | F | A | S | Total Masse | % | |
|-----------------------|---|---|----|---|-------------|-------|----|
| Na⁺ | 0 | 6 | 0 | 8 | 4 | 91.96 | 39 |
| Cl⁻ | 1 | 0 | 12 | 0 | 4 | 141.8 | 61 |

Masse volumique calculée : 2.164 g/cm^3
 Compacité calculée : 63.9 % (volume)
 Pourcentage d'hydratation : 0 % (masse)



Maille simple



Maille double

La pyrite (FeS₂) : maille cubique

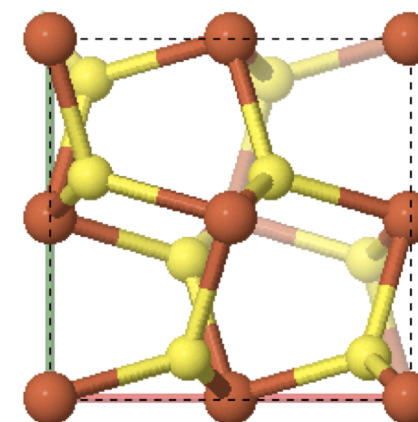
| Atome | I | F | A | S | Total Masse | % | |
|------------------|---|---|---|---|-------------|--------|----|
| Fe ²⁺ | 0 | 6 | 0 | 8 | 4 | 223.36 | 47 |
| S ⁻ | 8 | 0 | 0 | 0 | 8 | 256.56 | 53 |

Masse volumique calculée : 5.011 g/cm³
Compacité calculée : 135.53 % (volume)
Pourcentage d'hydratation : 0 % (masse)



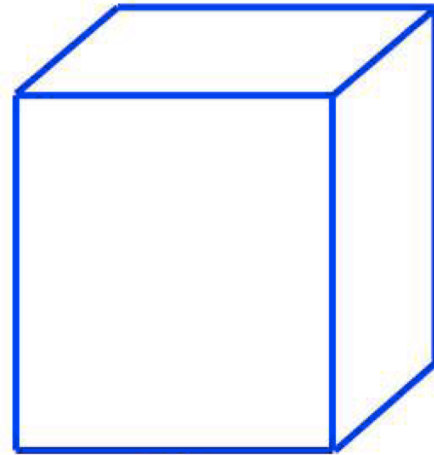
Pyrite en dodécaèdre

Pyrite en cube

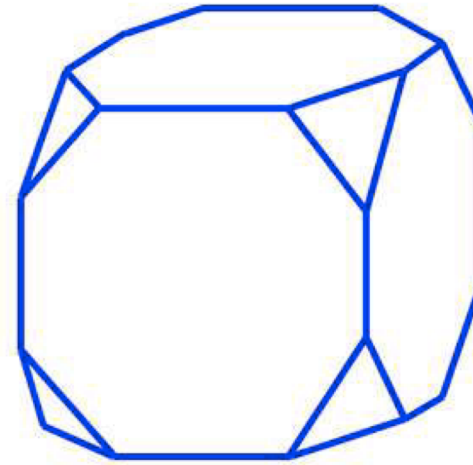


$a=5.418\text{\AA}$
 $b=5.418\text{\AA}$
 $c=5.418\text{\AA}$
 $\alpha=90.000^\circ$
 $\beta=90.000^\circ$
 $\gamma=90.000^\circ$

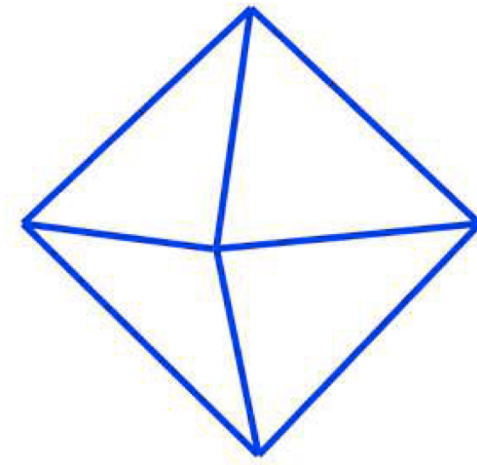
À partir d'une même maille (ici cubique), du nombreuses formes possibles



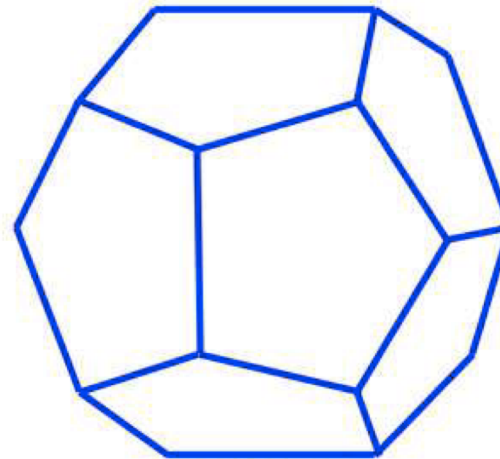
Cube



Cubo-octaèdre



Octaèdre

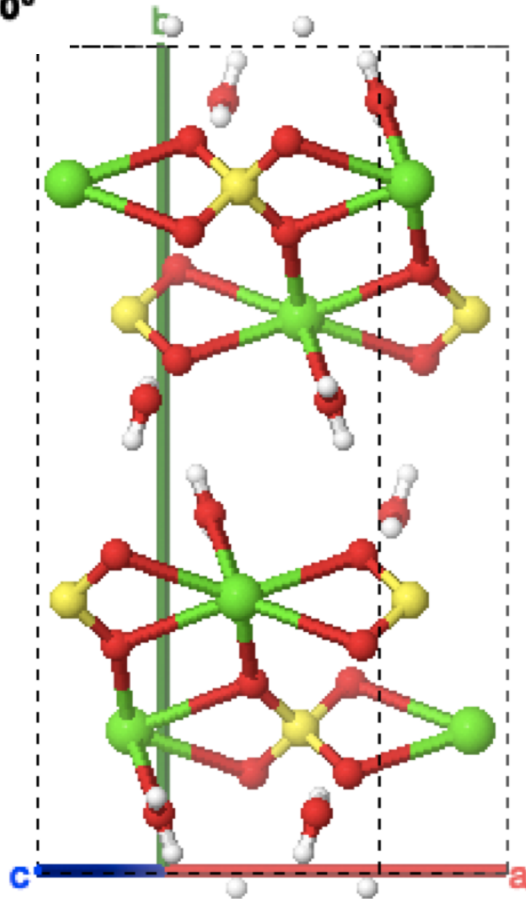


Dodécaèdre

Quatre des formes cristallines du système cubique les plus fréquentes pour la pyrite (FeS₂)

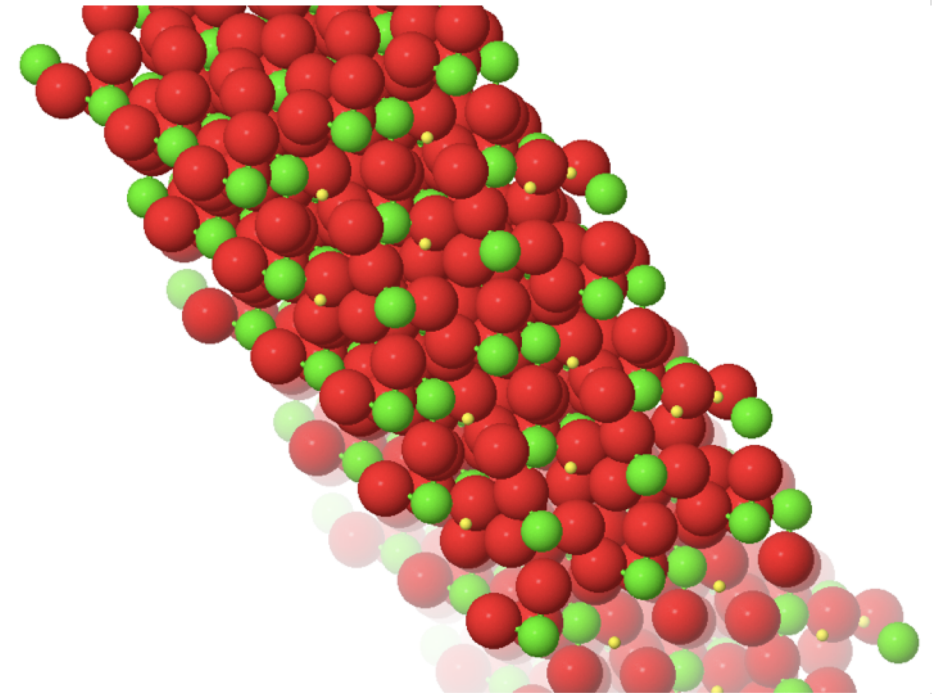


$a=6.277\text{\AA}$
 $b=15.181\text{\AA}$
 $c=5.672\text{\AA}$
 $\alpha=90.000^\circ$
 $\beta=114.110^\circ$
 $\gamma=90.000^\circ$



| Atome | I | F | A | S | Total Masse | % | |
|------------------------|----|---|---|---|-------------|--------|----|
| S⁶⁺ | 2 | 4 | 0 | 0 | 4 | 128.28 | 19 |
| O²⁻ | 24 | 0 | 0 | 0 | 24 | 384 | 56 |
| Ca²⁺ | 2 | 4 | 0 | 0 | 4 | 160.32 | 23 |
| H⁺ | 12 | 8 | 0 | 0 | 16 | 16.128 | 2 |

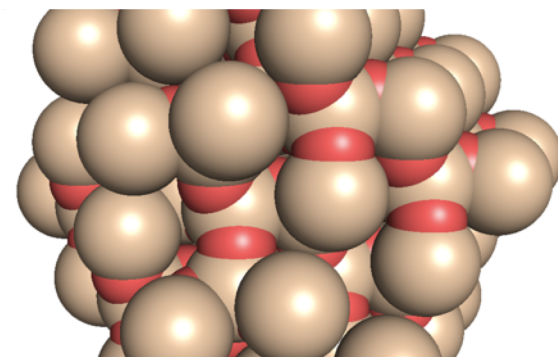
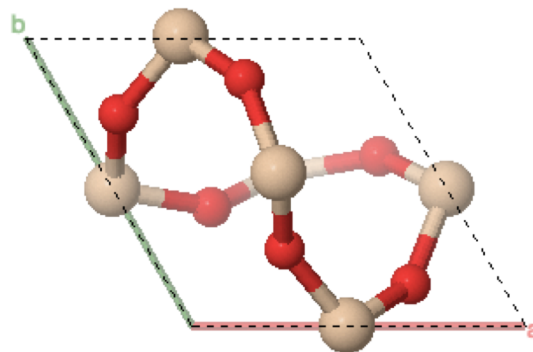
Masse volumique calculée : 2.318 g/cm^3
 Compacité calculée : 54.81 % (volume)
 Pourcentage d'hydratation : 39.51 % (masse)



Cristal de gypse
 ($\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$),
 maille
 monoclinique

AMÉTHYSTE: QUARTZ (SiO₂) AVEC IMPURETÉ, MAILLE HEXAGONALE

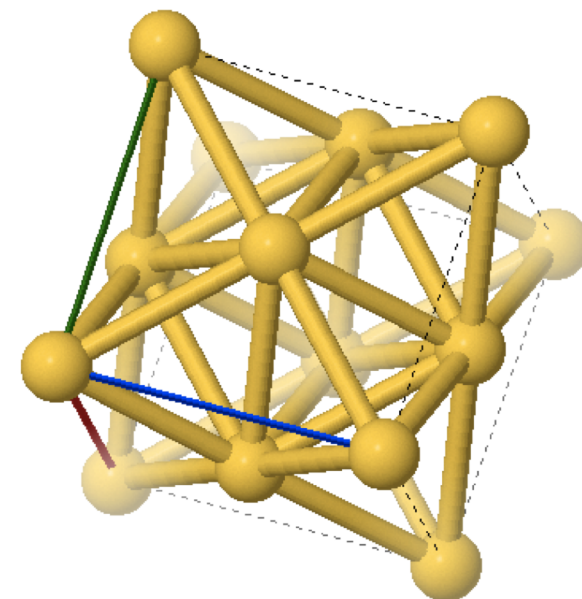
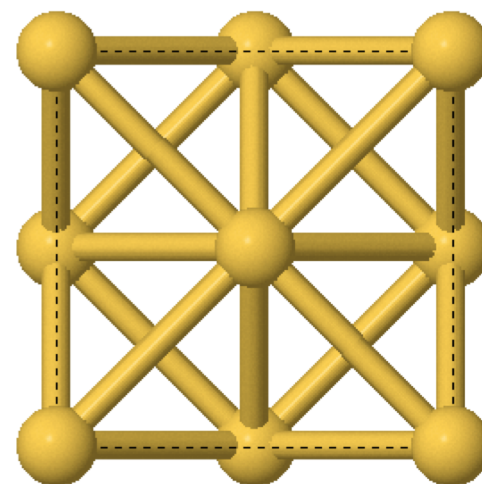
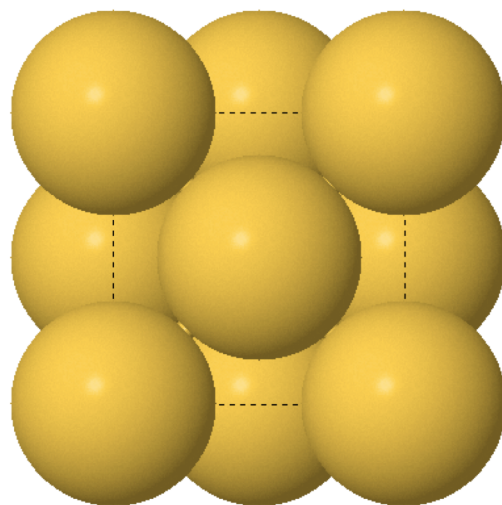
a=4.912Å
b=4.912Å
c=5.404Å
α=90.000°
β=90.000°
γ=120.000°





L'Or (Au): maille cubique à face centrée

$a=4.070\text{\AA}$
 $b=4.070\text{\AA}$
 $c=4.070\text{\AA}$
 $\alpha=90.000^\circ$
 $\beta=90.000^\circ$
 $\gamma=90.000^\circ$



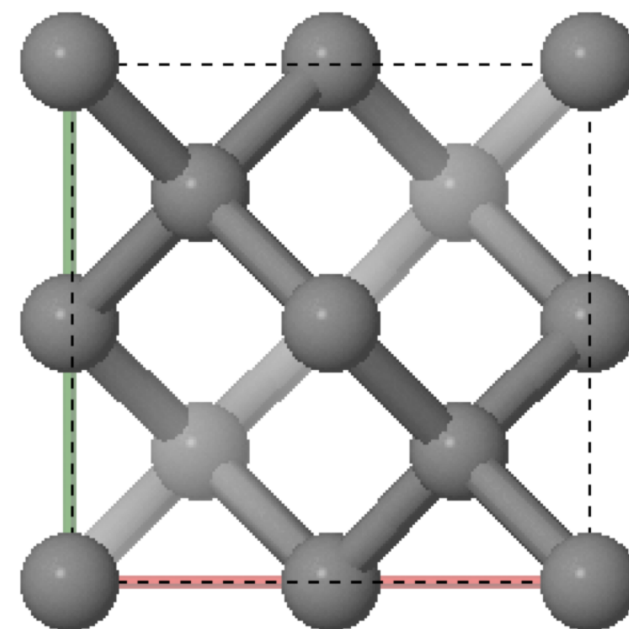
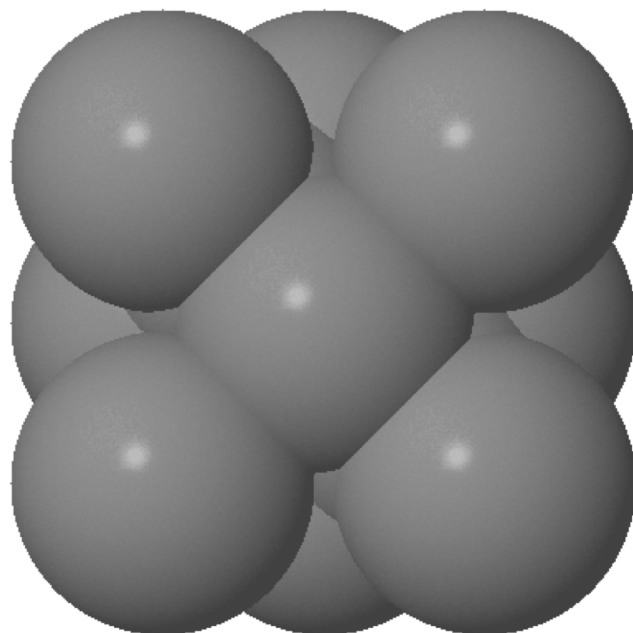
| Atome | I | F | A | S | Total | Masse | % |
|-----------|---|---|---|---|-------|--------|-----|
| Au | 0 | 6 | 0 | 8 | 4 | 787.88 | 100 |

Masse volumique calculée : 19.406 g/cm³
Compacité calculée : 74.21 % (volume)
Pourcentage d'hydratation : 0 % (masse)



Diamant, maille cubique

$a=3.567\text{\AA}$
 $b=3.567\text{\AA}$
 $c=3.567\text{\AA}$
 $\alpha=90.000^\circ$
 $\beta=90.000^\circ$
 $\gamma=90.000^\circ$



| Atome | I | F | A | S | Total | Masse | % |
|----------|---|---|---|---|-------|-------|-----|
| C | 4 | 6 | 0 | 8 | 8 | 96.08 | 100 |

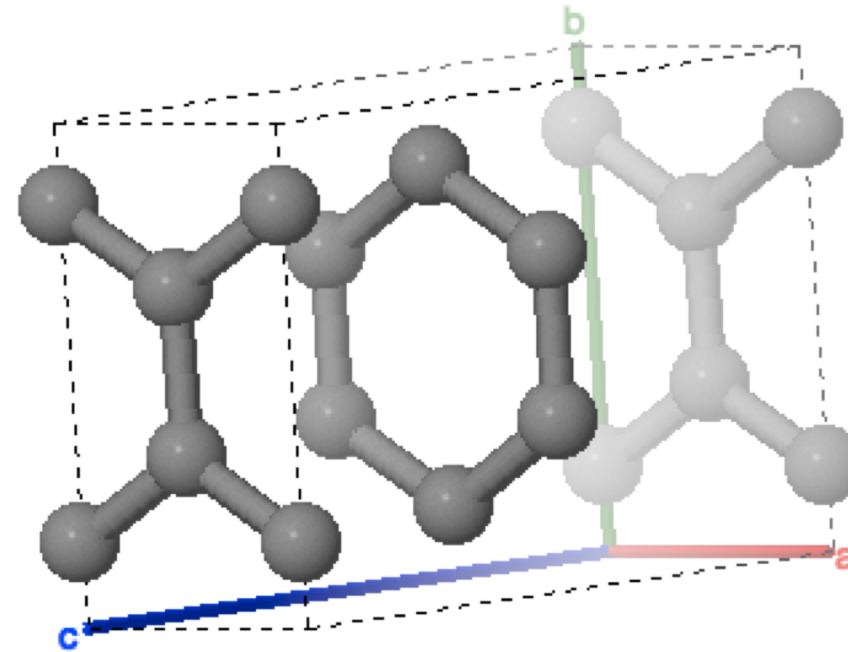
Masse volumique calculée : 3.516 g/cm^3
Compacité calculée : 23.22 % (volume)
Pourcentage d'hydratation : 0 % (masse)



<http://nouveaumonde.ca/graphite/>

Graphite, maille orthorhombique

$a=2.456\text{\AA}$
 $b=4.254\text{\AA}$
 $c=6.696\text{\AA}$
 $\alpha=90.000^\circ$
 $\beta=90.000^\circ$
 $\gamma=90.000^\circ$



| Atome | I | F | A | S | Total | Masse | % |
|----------|---|---|---|---|-------|-------|-----|
| C | 2 | 8 | 8 | 0 | 8 | 96.08 | 100 |

Masse volumique calculée : 2.281 g/cm^3
Compacité calculée : 15.06 % (volume)
Pourcentage d'hydratation : 0 % (masse)

Goethite:
 $\text{FeO}(\text{OH})$:
maille
orthorombique



Plusieurs façons de faire des cristaux :

- Faire « geler » un liquide (ou condenser un gaz)

Ex: refroidissement de la lave avec mise en place de cristal (Ex: olivine)

Ex : cristaux de neige à partir de gaz

La forme des cristaux est fonction de l' environnement

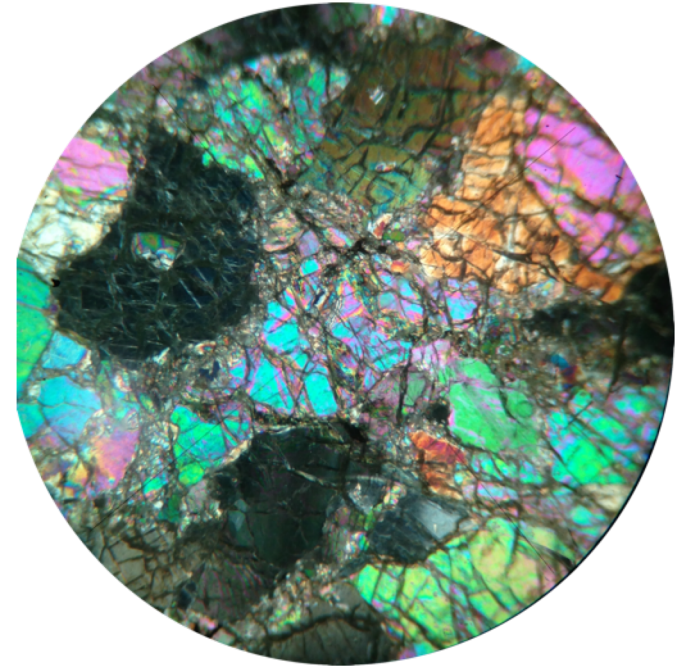
- Faire précipiter une solution en faisant varier les conditions
 - augmentation de la concentration => diminution de la solubilité
 - augmentation de T°C => évaporation => cristallisation
 - variation de la concentration en O₂

Ex : sucre candi : 3-4 kgs de sucre dans 2L d'eau chauffée => dissolution ; puis attendre cristallisation après refroidissement ; observation après plusieurs jours !

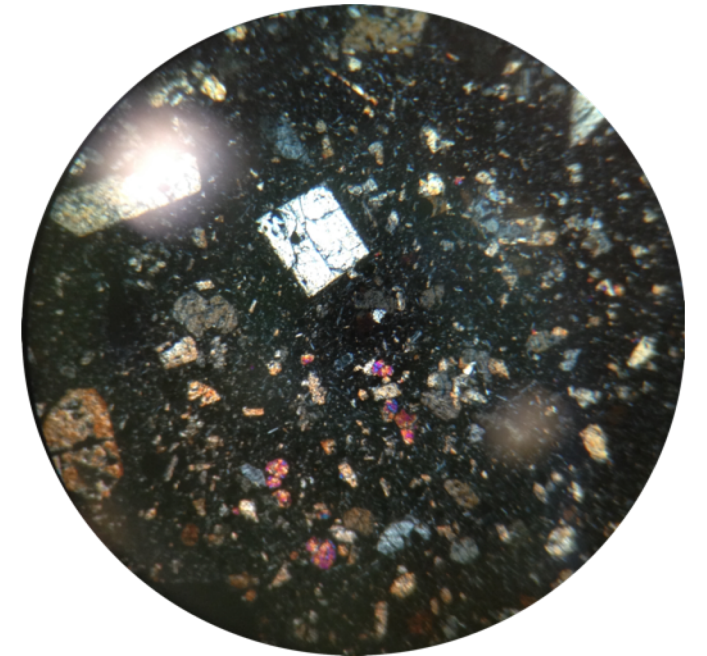
Ex : filon en géologie : remontée d'eau dans fissure => refroidissement de l'eau => cristallisation jusqu'à petit trou = géode ex géode d'améthyste (qz colorée par impuretés) !!! cristallisation dans eau

Solide cristallin vs solide amorphe

- Solide cristallin: constitué d'une répétition quasi parfaite de l'arrangement des atomes dans les 3 directions de l'espace



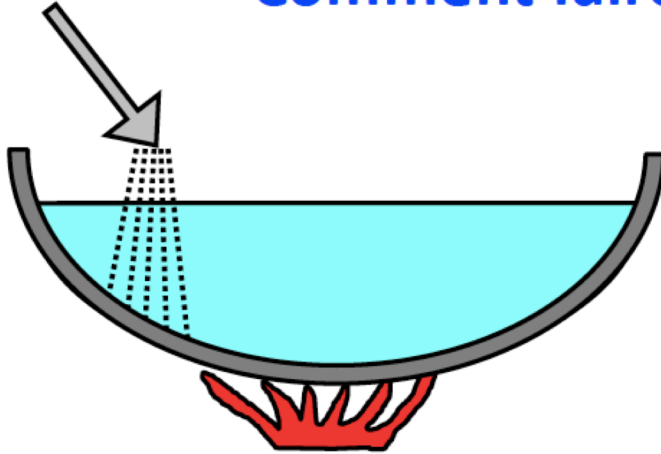
- Solide amorphe: état liquide figé pour lequel l'ordre à longue distance n'existe pas



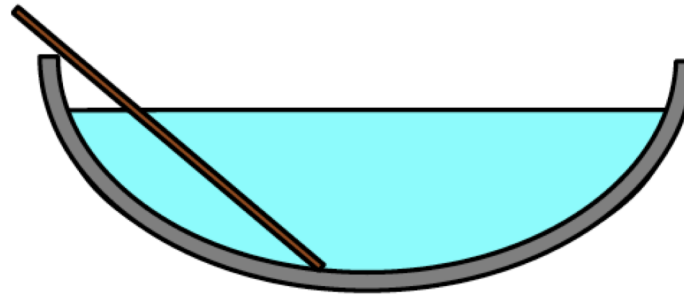
Exemple du sucre candi: cristallisation lente dans une eau saturée en sucre qui refroidit.

Sucre

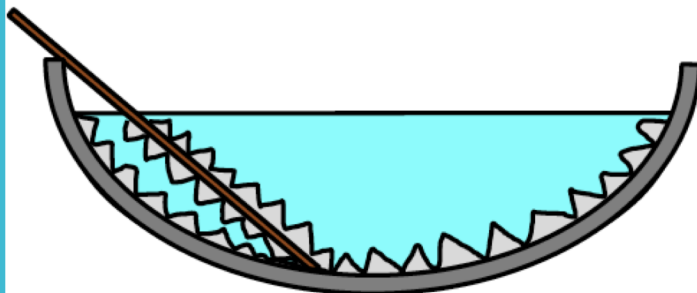
Comment faire du sucre candi ?



1 - On dissout le maximum possible de sucre dans de l'eau bouillante



2 - On plonge un bâton et on laisse refroidir longtemps



3 - Des cristaux de sucre candi se forment sur les parois et le bâton

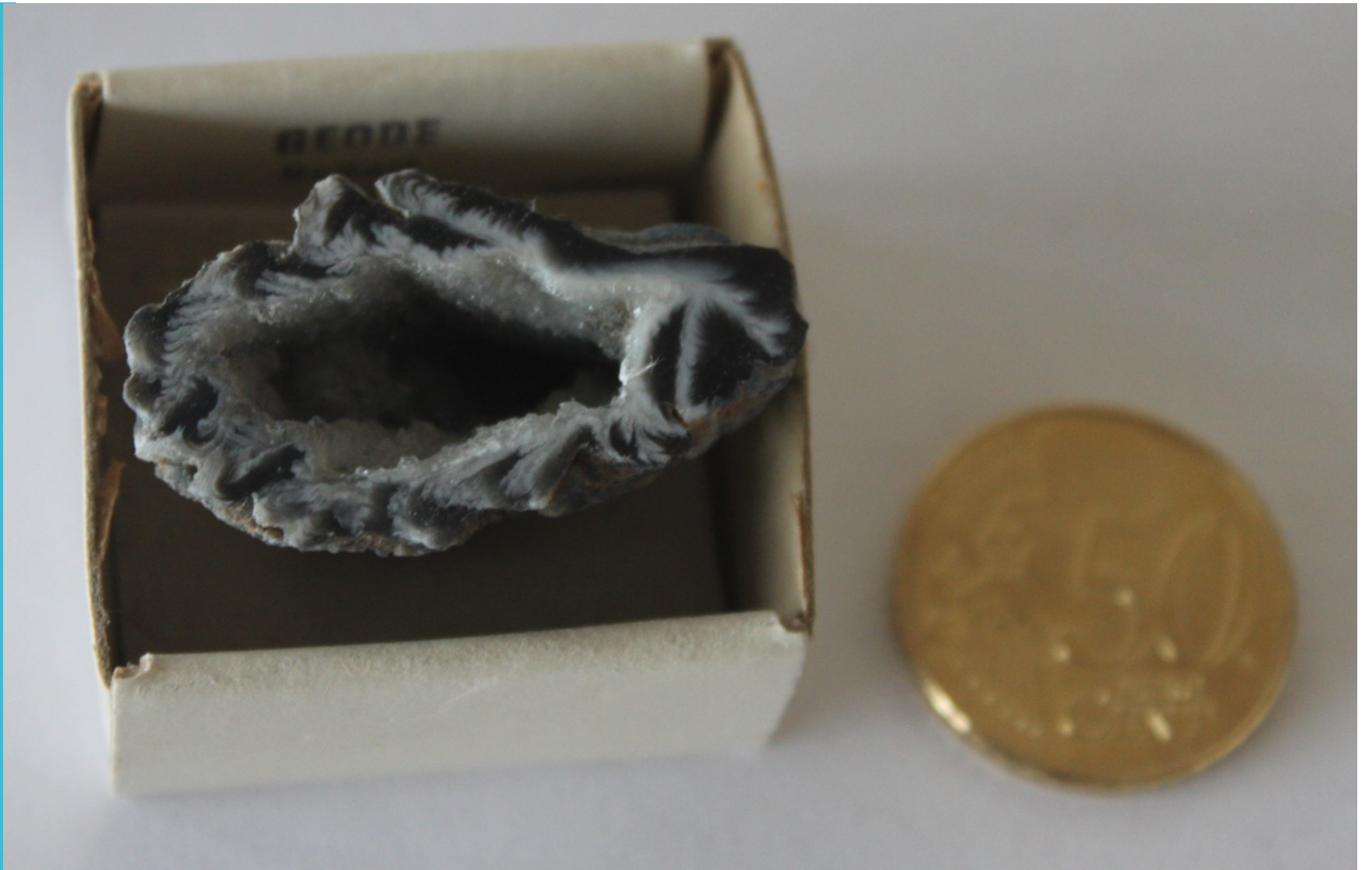
**Le sucre, beaucoup plus soluble dans l'eau chaude que dans l'eau froide, cristallise si on refroidit une solution d'eau bouillante saturée en sucre
→ cristaux de sucre candi**

Schémas Pierre Thomas

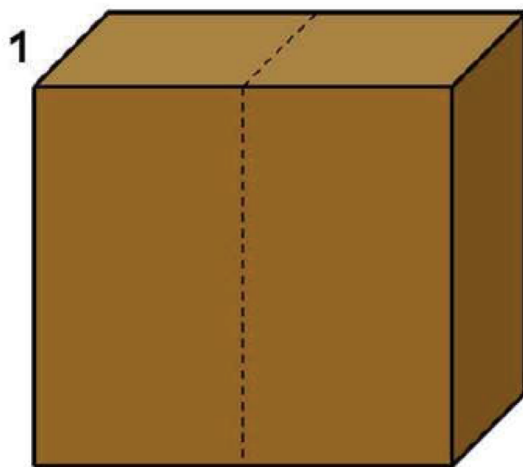


La Main A La Pâte

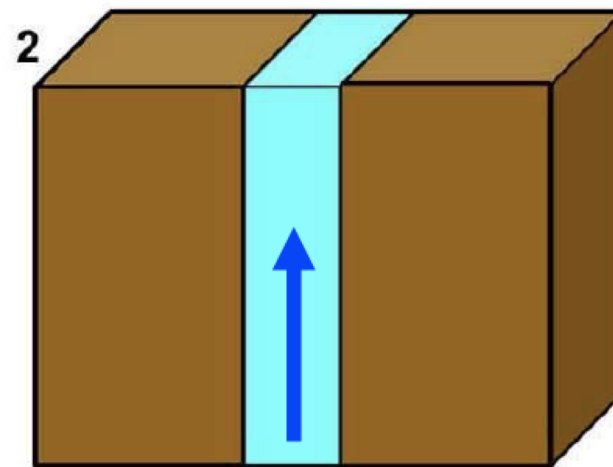
Géode =
roche dans
laquelle
cristallisation
liée à l'eau



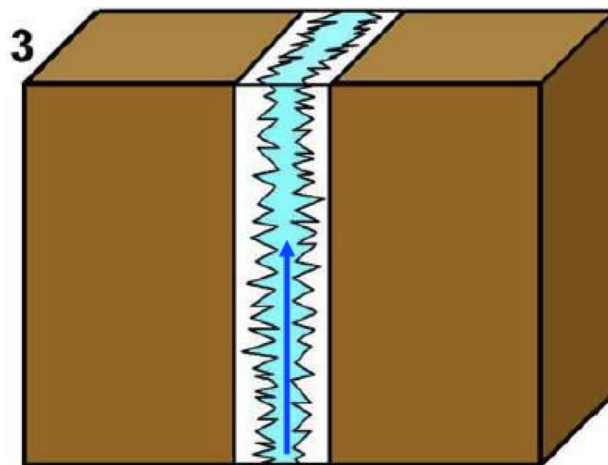
Origine des géodes: cristallisation dans une eau saturée



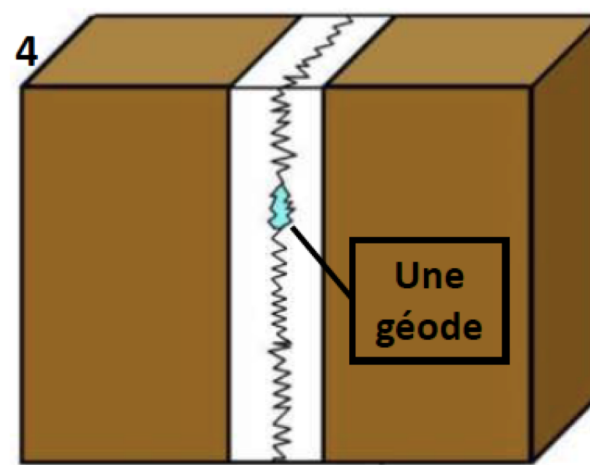
1
Roche avec fracture



2
Ouverture de la fissure et remontée d'eau
chaude profonde riche en composés dissous



3
Dépôt de ces composés sur les parois de la fissure si l'eau se refroidit en montant
et que la solubilité diminue → filon avec, éventuellement, des géodes.





- Ces triangles sont souvent creux, mais pas toujours. Ils forment une surface parfaitement horizontale, car cette calcite a cristallisé sous (ou à) la surface (horizontale) d'un micro-lac (un petit gour) à l'intérieur de la grotte, micro-lac maintenant asséché.
- Localisation par fichier kmz de la [grotte du Grand Roc](#).

Minéral vs cristal

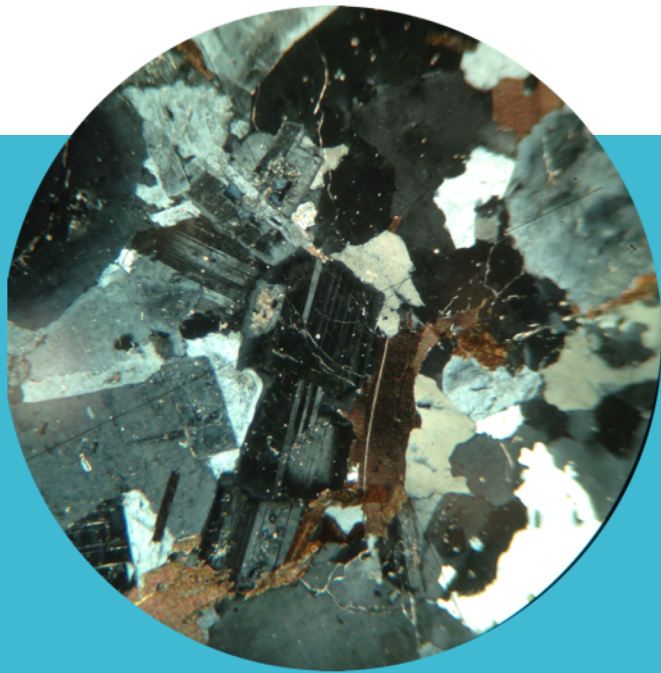
- Minéral = formule chimique (association d'atomes)

Ex: Quartz : SiO_2

Ex: Olivine

- Cristal = arrangement dans l'espace des atomes du minéral

Ex: maille rhomboédrique du quartz



Un granite est une roche entièrement cristallisée elle présente 3 minéraux majoritaires: quartz, mica, feldspath, et une infinité de cristaux



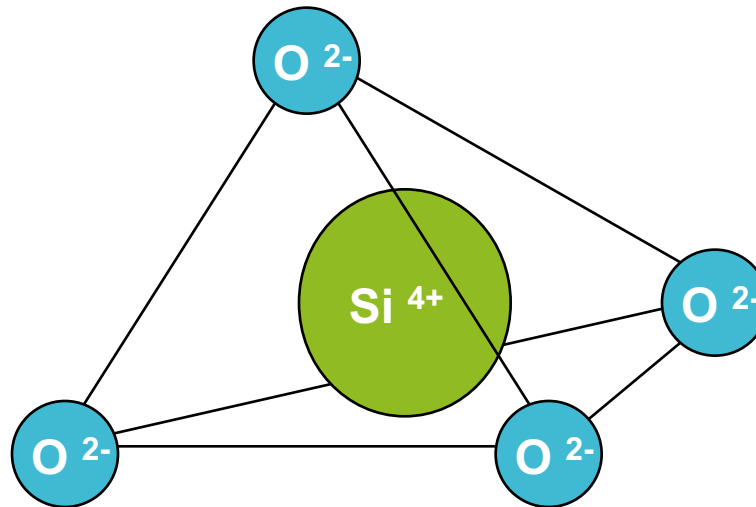
Cristal: solide dont les divers atomes sont arrangés de manière régulière selon une disposition fondamentale (la maille élémentaire) dont la répétition dans l'espace dessine le réseau cristallin. Du fait de cet arrangement, les propriétés physiques du cristal varient selon les orientations.

Minéral: espèce chimique naturelle, se présentant le plus souvent sous forme de solide cristallin.

Les **minéraux silicatés** sont, à la surface de la Terre et en son sein, les minéraux les plus abondants: à eux seuls ils représentent **99%** de la masse et du volume de **l'écorce terrestre** (le reste: minéraux carbonatés – CaCO_3 -, sels – KCl -)

Le tétraèdre de silice, édifice silicaté

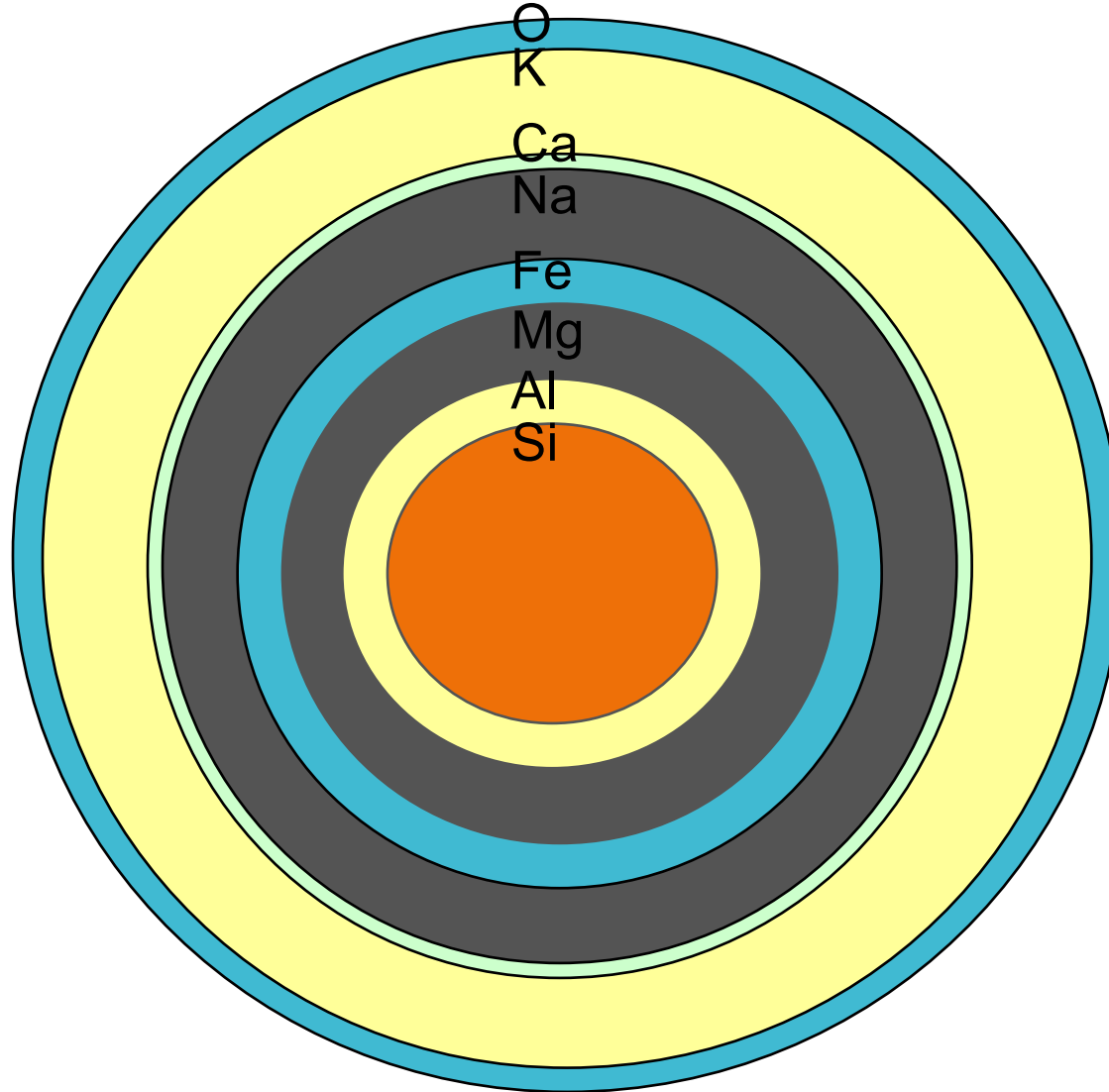
Les silicates sont des cristaux ioniques, c'est-à-dire que leurs liaisons inter atomiques sont des liaisons ioniques.



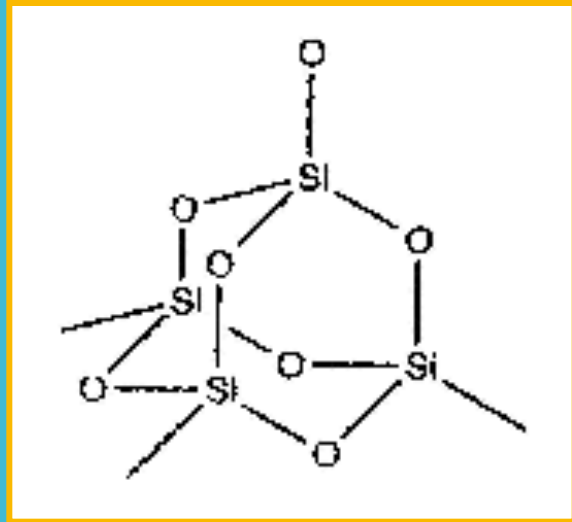
La neutralisation électrique des édifices silicatés est réalisée par des cations

Rayon ionique ($10^{-10}\text{m}=\text{Å}$)

Si 0,39
Al 0,57
Mg 0,65
Fe 0,76
Na 0,98
Ca 1,06
K 1,38
O 1.40

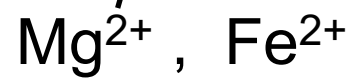
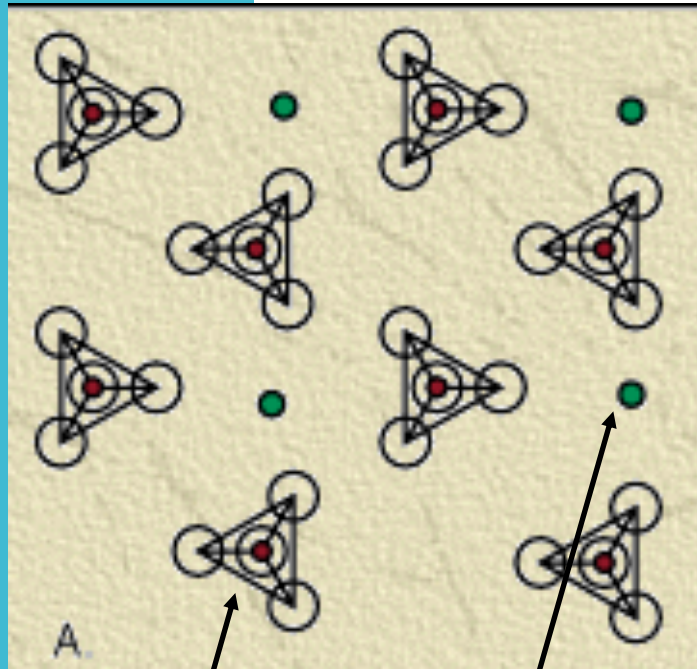


Le quartz :
 SiO_2



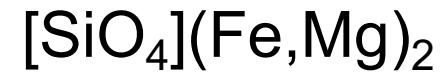
Chaque motif SiO_2 est lié à 4 voisins selon une structure très rigide

La structure de l'olivine est basée sur le tétraèdre isolé de silice



Formule de base: SiO_4^{4-}

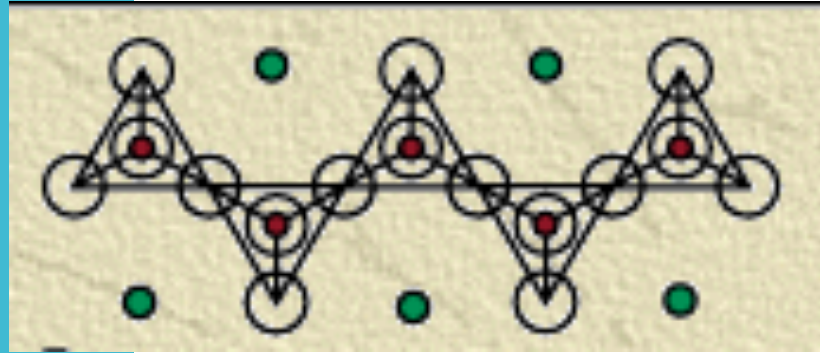
Neutralisation
électronique par Mg^{2+}
et/ou Fe^{2+}



Cristal d'olivine,
dans une
enclave de
péridotite



Les minéraux du pyroxène sont faits d'une chaîne simple de tétraèdres



Formule de base: $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$

Neutralisation électronique par Mg^{2+} et/ou Fe^{2+}

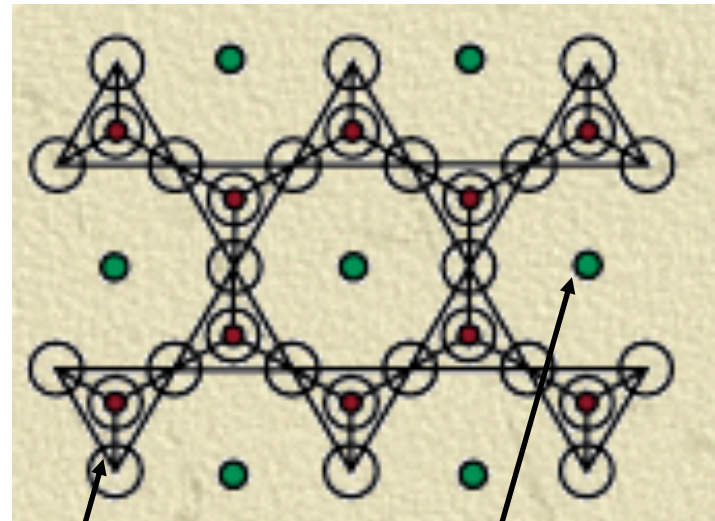
$[\text{Si}_2\text{O}_6](\text{Fe},\text{Mg})_2$



Phénocrystal de pyroxène

<http://www.davidkjoyceminerals.com>

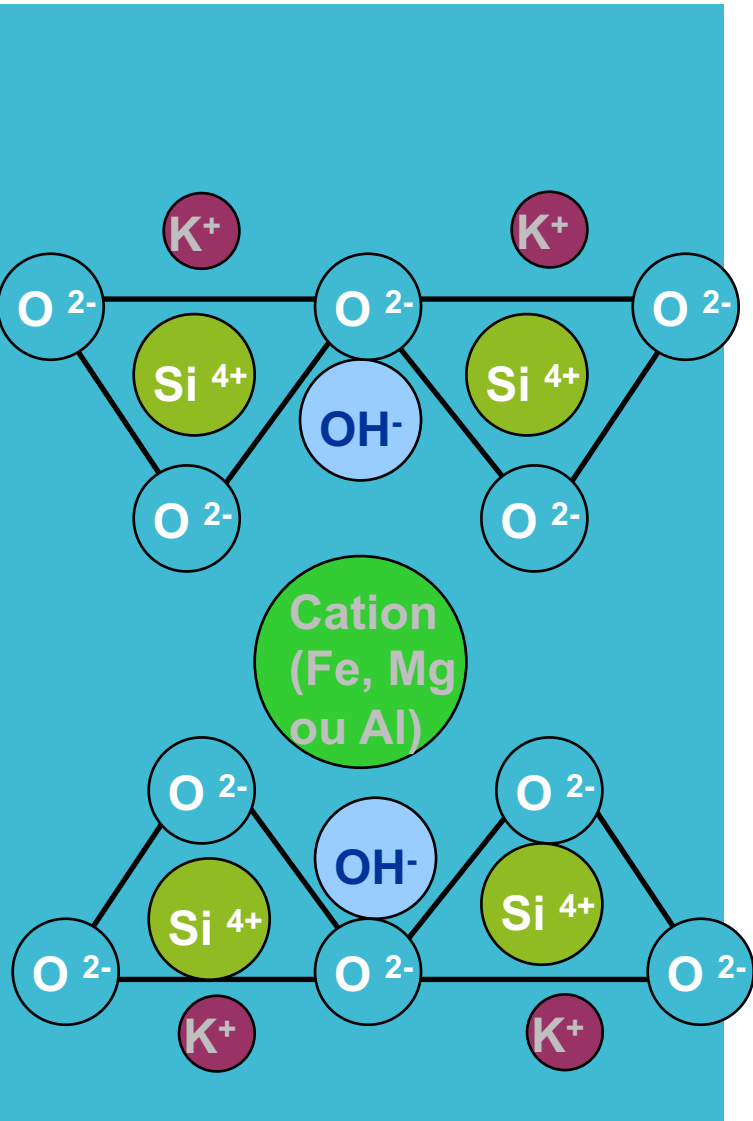
Les minéraux d'amphibole sont faits d'une double chaîne de tétraèdres



Formule de base:
 $[\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})]^{7-}$

Neutralisation
électronique par Na^+ ,
 Ca^{2+} , Mg^{2+}

Les micas, comme la biotite, sont des feuilles de tétraèdres



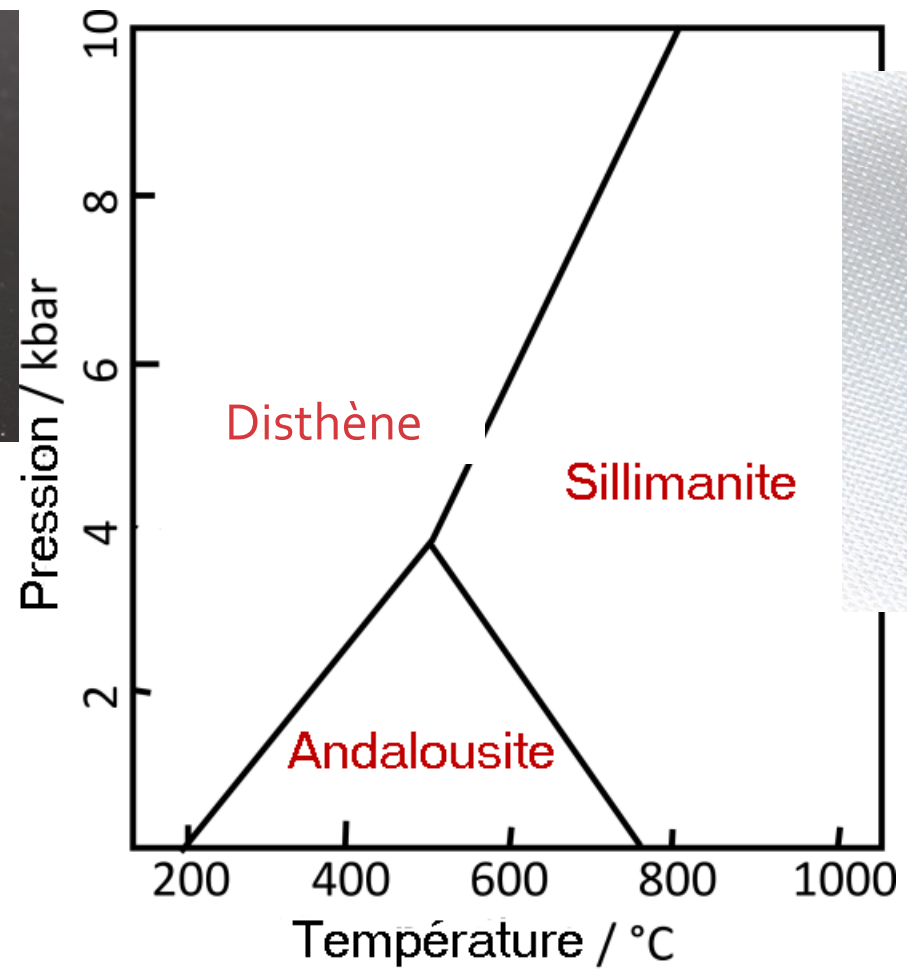
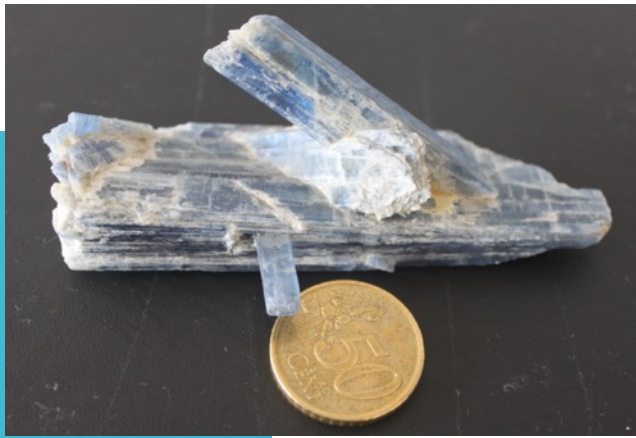
Formule de base: $[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]^{6-}$

Neutralisation électronique par (Fe, Mg)₃, ou Al₂



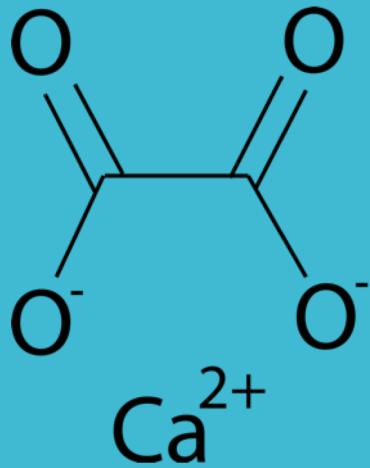
Phénocristaux de biotite

Une même formule minéralogique (Al_2SiO_5), des mailles cristallines différentes



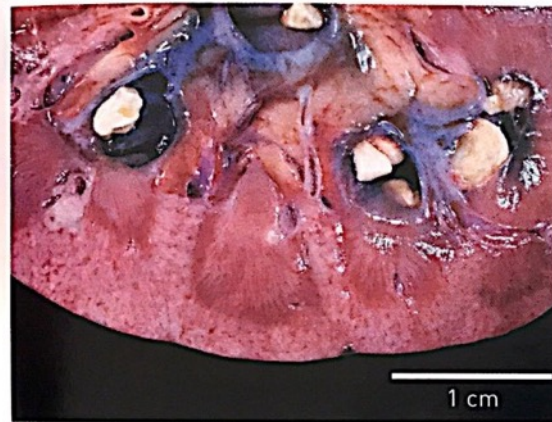
Selon les conditions de pression et de température, l'agencement des atomes peut subir une réorganisation particulière comme le cas de certains minéraux ayant subi un métamorphisme. Un même composé de formule chimique unique pourra cristalliser dans différents systèmes cristallins.

Les cristaux et le vivant: calculs rénaux et oxalate de calcium

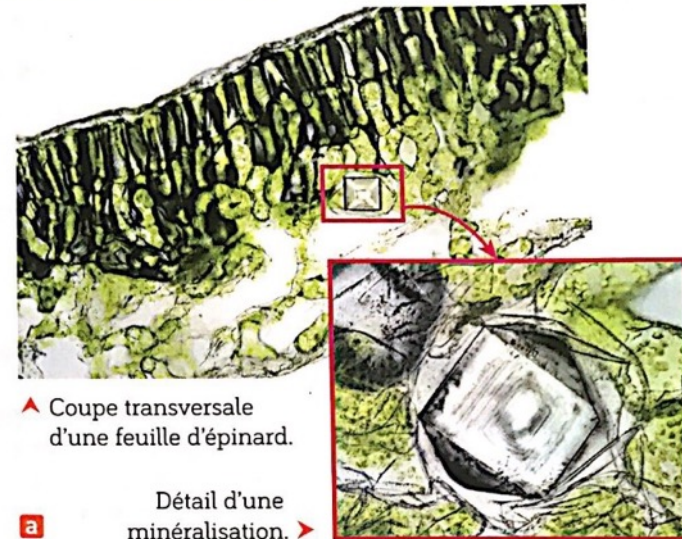


Un exemple de minéralisation biologique : l'oxalate de calcium

Plus de 75 % des plantes à fleurs présentent dans une partie de leurs cellules des minéralisations, le plus souvent formées d'oxalate de calcium (a). Dans certains cas, ces cristaux peuvent agir comme une protection vis-à-vis des herbivores : absorbés en grande quantité, ils sont toxiques, ou bien certains ont des formes d'aiguilles capables de perforer des tissus du tube digestif. Il peut aussi s'agir d'une forme de stockage du calcium présent dans l'environnement.



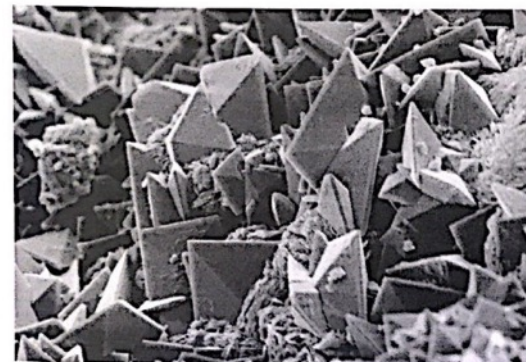
b Coupe transversale d'un rein présentant des calculs dans les cavités rénales.



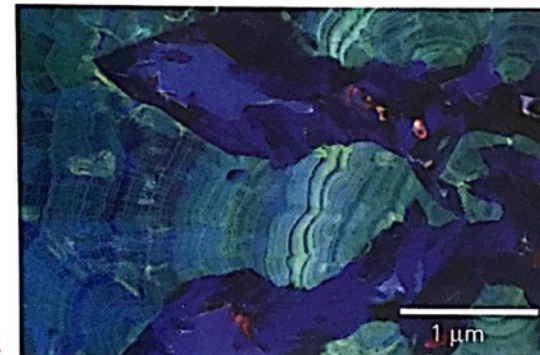
▲ Coupe transversale d'une feuille d'épinard.

a Détail d'une minéralisation. ▶

Chez les humains, de l'oxalate de calcium produit par le métabolisme peut également se retrouver dans le sang et être concentré au niveau des reins (b) où il forme des minéralisations appelées calculs rénaux (c et d ; *calculus* signifie « caillou » en latin). Cette affection touche près de 10 % de la population française et dépend en partie de l'alimentation (les aliments riches en calcium sont protecteurs, à la différence de ceux riches en oxalate tels que la rhubarbe, les épinards, etc.).



◀ c Surface d'un calcul rénal (MEB).

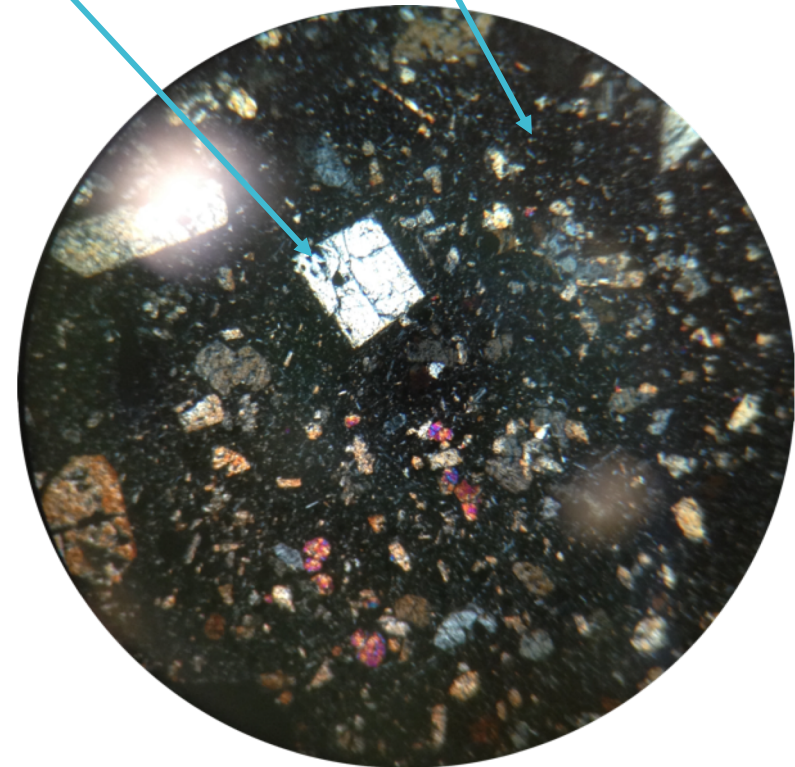


d Lame mince d'un calcul rénal. ▶

✍️ Traces
écrites
Chapitre 1.2-
Des édifices
ordonnés : les
cristaux

I. Des solides cristallins ou amorphes

On appelle solide, tout système qui possède une forme propre. On distingue les solides cristallins constitués d'une répétition quasi parfaite de l'arrangement des atomes dans les trois directions de l'espace et les solides amorphes correspondant à un état liquide figé et pour lesquels il n'y a d'ordre au-delà d'une échelle moléculaire.



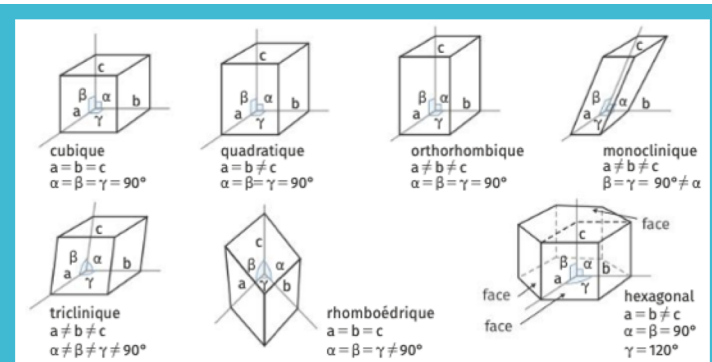
II. Les structures cristallines

Un composé de formule chimique donnée peut cristalliser sous différents types de structures qui ont des propriétés microscopiques et macroscopiques différentes.

Ainsi les minéraux se caractérisent par leur composition chimique et leur organisation cristalline, ou maille. Il existe Sept mailles cristallines différentes. La maille est l'**unité de répétition** par translation (a, b, c sur Minusc). En se répétant indéfiniment par translation dans les trois dimensions de l'espace, elle définit le réseau cristallin.

Une même formule minéralogique peut engendrer des cristaux de maille différentes, en fonction des conditions de $P, T^\circ C$ de cristallisation. De cette maille, découle des propriétés telles que la masse volumique $\rho = \text{masse de la maille} / \text{volume de la maille}$

Ex : disthène, andalousite et sillimanite ont la même formule minéralogique mais des mailles cristallines différentes





Le granite est une roche formée de 3 minéraux (quartz, mica, feldspath) et d'une multitude de cristaux jointifs

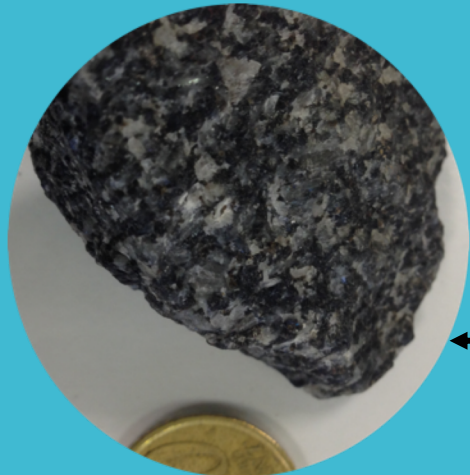
III. Les roches sont des assemblages de cristaux de un ou plusieurs minéraux

Un minéral est caractérisé par une formule chimique, le cristal est caractérisé par l'organisation des éléments chimiques dans l'espace en maille. Il existe 7 mailles différentes, mais de très nombreux minéraux. Ainsi, des minéraux différents peuvent avoir la même maille, et des minéraux de même formule avoir des mailles différentes (dans ce cas ils ont des noms distincts).

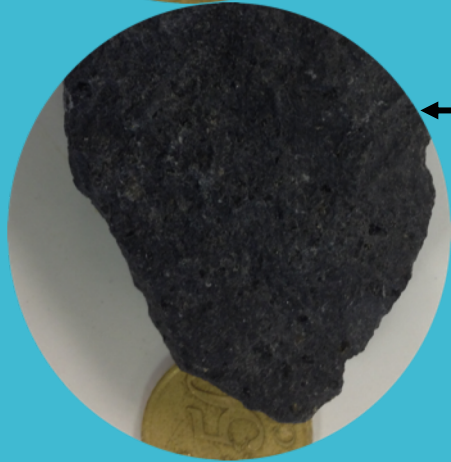
Une roche est formée de l'association de cristaux d'un même minéral ou de plusieurs minéraux.

IV. Roches magmatiques plutoniques vs volcaniques

La croûte terrestre est caractérisée entre autres, par la présence d'une famille de roches, issues de la cristallisation d'un magma (mélange de 3 phases S, L G à très haute température). Les roches nées de la cristallisation du magma, sont appelées roches magmatiques. Elles sont solides, et présentes des cristaux. En fonction de la température et de la vitesse de refroidissement, on distingue :



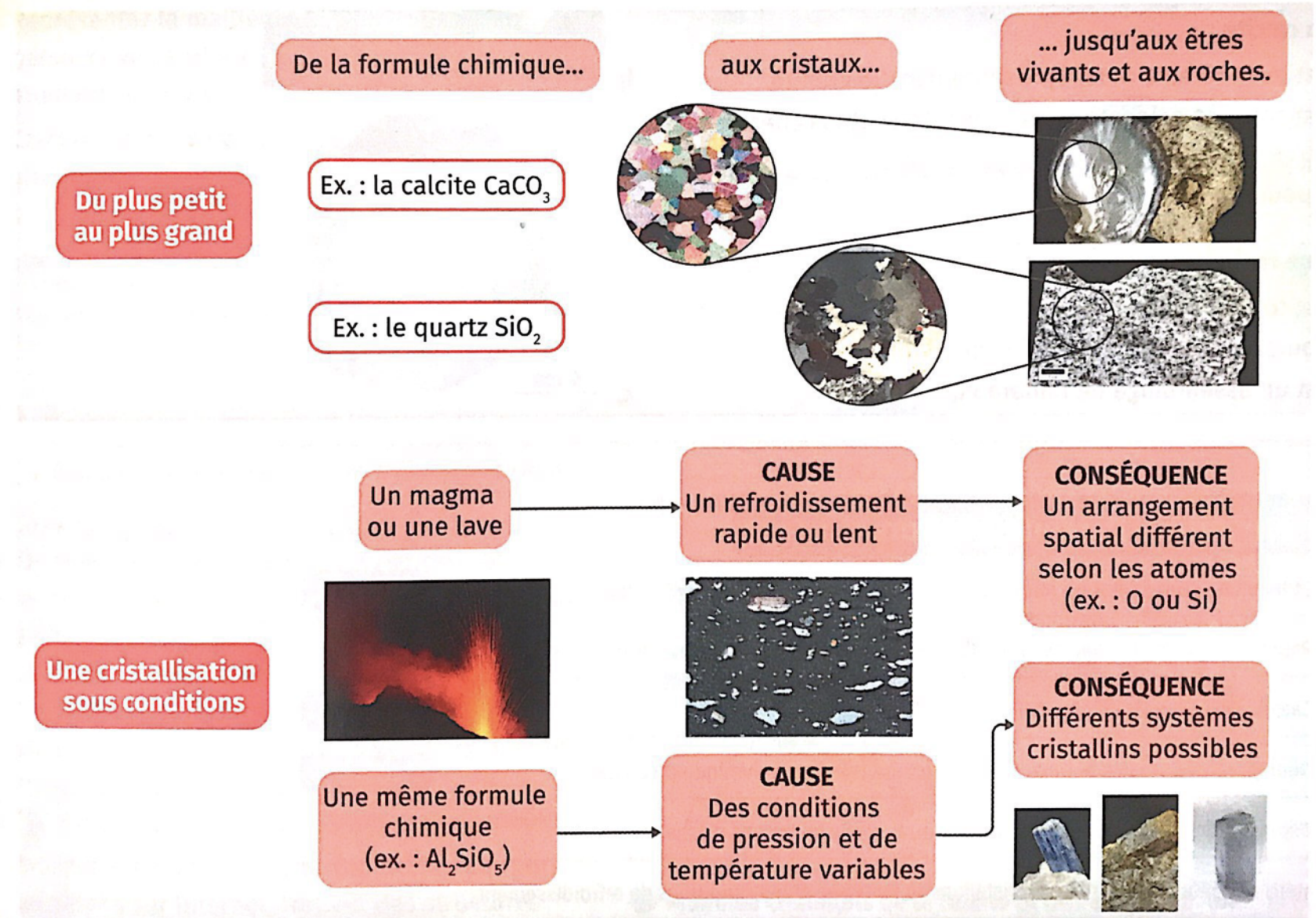
- les roches magmatiques plutoniques : refroidissement lent en profondeur (nombreux cristaux jointifs, de grande taille : ex granite, gabbro).



Les roches magmatiques volcaniques : refroidissement rapide en surface (peu de cristaux, de petites tailles, présence d'un verre + solide amorphe)

Dans le cas des solides amorphes, l'empilement d'entités se fait sans ordre géométrique. C'est le cas du verre. Certaines roches volcaniques contiennent du verre, issu de la solidification très rapide d'une lave.

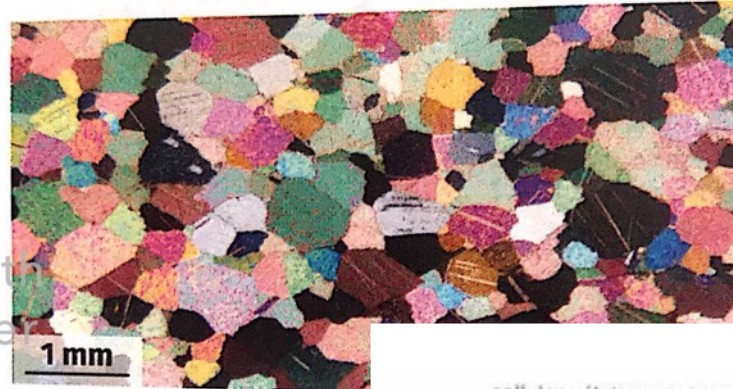
Schéma bilan: diversité des cristaux et conditions de cristallisation



V. Les structures cristallines dans les organismes biologiques

Des structures cristallines existent aussi dans les organismes biologiques (coquille, squelette, calcul rénal, etc.).

Doc. 2 Coquille de *Pinctada* (mollusque)



Observation à l'œil nu (à gauche) et au microscope polarisant (à droite).
Cal : calcite CaCO_3 .

D'après lelivrescolaire, 1^{ère} enseignement scientifique, ed 2019, p.32

