

Fiche professeur

THEME du programme : Comprendre | Sous-thème : Cohésion et transformations de la matière

Solide ionique

Type d'activité : une activité documentaire (15 minutes), une activité expérimentale (expériences au bureau ½ h), une activité qui allie recherche documentaire et exercice (1h30).

Conditions de mise en œuvre : L'activité documentaire 1 peut être réalisée en classe entière ou donnée comme travail de recherche préparatoire. L'activité 2 peut être réalisée en classe entière. Il sera préférable de travailler par groupe réduit pour réaliser l'activité 3 afin d'évaluer l'acquisition de compétences et d'estimer les points de blocage rencontrés par les élèves dans le déroulement de cette activité.

Pré-requis : - Interactions électrostatique et gravitationnelle
- Loi de Coulomb et loi de la gravitation universelle
- Structure des ions

NOTIONS ET CONTENUS	COMPETENCES ATTENDUES
Solide ionique.	Interpréter la cohésion des solides ioniques

Compétences transversales :

- S'approprier l'information.
- Réaliser un schéma. Observer et décrire les phénomènes. Suivre une consigne de calcul.
- Extraire des informations des données et les exploiter.
- Elaborer un modèle.
- Valider un modèle.
- Communiquer à l'écrit en utilisant un vocabulaire scientifique.
- Être autonome, respectueux des règles de vie de classe et de sécurité.

Mots clés de recherche : solide ionique, interaction électrostatique, loi de Coulomb

Provenance : Académie d'Orléans-Tours

Adresse du site académique : <http://physique.ac-orleans-tours.fr/php5/site/>

Cette séquence suit la séquence concernant les interactions électrostatiques et la loi de Coulomb.

- Activité 1 : La séquence débute par l'étude d'un texte historique permettant de revoir les notions de courant électrique, de sens du courant et de porteur de charges. Cette étude fait le lien avec ce qui a été vu lors de la séquence précédente (histoire de l'électricité statique).
- Activité 2 : Une série d'expériences simples est ensuite réalisée au bureau par le professeur. Elle permet d'établir que seules les solutions possédant des ions conduisent le courant. Vient alors le cas du sel à l'état solide : il ne conduit pas le courant alors que l'eau salée est une solution électrolytique. Une hypothèse est alors faite : les ions du sel ne sont pas mobiles. Pourquoi ? Quelle est la structure du cristal de sel ?
- La dernière activité constitue l'étude du sel en tant que solide ionique cristallin. L'objectif est d'interpréter la cohésion de ce cristal et de vérifier l'hypothèse précédente. Elle débute par un texte relatant la découverte de la structure cristalline du sel. Les élèves doivent extraire des informations du texte pour retrouver cette structure ; ils doivent ensuite déterminer les interactions qui s'exercent dans le cristal pour interpréter sa cohésion. Des fiches « coup de pouces sont prévues ». Ces aides sont fournies en fonction des points de blocage rencontrés par les élèves. Elles doivent permettre à chacun d'atteindre l'objectif.

Capacités et attitudes travaillées dans les activités

APP : S'APPROPRIER L'INFORMATION		ACT 1	ACT 2	ACT 3
	Se mobiliser en cohérence avec les consignes données (agir selon les consignes données ; extraire des informations utiles d'une observation, d'un texte ou d'une représentation conventionnelle (schéma, tableau, graphique,...)).	X	X	X
REA : REALISER (FAIRE)				
	Réaliser ou compléter un schéma.			X
	Observer et décrire les phénomènes.		X	
	Appliquer une consigne (calcul, application d'une loi ...)			X
ANA : ANALYSER				
	Extraire des informations des données et les exploiter.	X	X	X
	Elaborer et/ou choisir et utiliser un modèle adapté (mettre en lien les phénomènes observés, les concepts utilisés et le langage mathématique qui peut les décrire)	X	X	X
VAL : VALIDER, CRITIQUER				
	Confronter un modèle à des résultats expérimentaux : vérifier la cohérence des résultats obtenus avec ceux attendus			X
COM : COMMUNIQUER				
	Rendre compte de façon écrite (de manière synthétique et structurée, en utilisant un vocabulaire adapté et une langue correcte)		X	X
AUTO : ETRE AUTONOME, FAIRE PREUVE D'INITIATIVE, SAVOIR-ETRE				
	Travailler efficacement seul ou en équipe (en étant autonome, en respectant les règles de vie de classe et de sécurité)	X	X	X
	Soigner sa production			X

ACT. DOC : PETITE HISTOIRE DU COURANT ELECTRIQUE

Avec l'invention de la pile le 17 mars 1800 par **Alessandro Volta** (1745-1827), l'électricité entre dans une ère nouvelle. Cette pile produit un courant d'électricité de façon continue ! On passe à l'électricité *en mouvement*, alors que la science électrique ne connaissait jusque là que les interactions entre électricités au repos : les manifestations de *l'électricité statique* (en dehors des décharges). Des questions se posent alors : quelle est la nature de ce courant et quel est son sens dans un circuit extérieur ?

Rappelons que **Du Fay** (1698-1739) pensait qu'il existait deux types d'électricité et que **Benjamin Franklin** (1706-1790) pensait que les électrisations étaient dues à la circulation d'un « *fluide électrique unique* ». Pour les partisans de Du Fay, il existe donc deux courants dans le conducteur ; le courant de fluide positif qui circule du pôle + au pôle - et celui d'électricité négative du pôle - au pôle +. Par contre, pour les partisans de Franklin, un seul courant circule dans le circuit.

En 1820, le danois **Hans Christian Oersted** (1777-1851) découvre l'effet magnétique des courants et **André-Marie Ampère** (1775-1836) propose une convention : un choix arbitraire.

*« Nous admettons, conformément à la doctrine adoptée en France et par beaucoup de physiciens étrangers, l'existence de deux fluides électriques, susceptibles de se neutraliser l'un l'autre, et dont la combinaison, en proportion déterminées, constitue l'état naturel des corps. Cette théorie fournit une explication simple de tous les faits et, soumise à l'épreuve décisive du calcul, elle donne des résultats qui s'accordent avec l'expérience [...] Il suffit de désigner la direction du transport de l'un des principes électriques, pour indiquer, en même temps, le sens du transport de l'autre ; c'est pourquoi, en employant dorénavant l'expression de **courant électrique** pour désigner le sens dans lequel se meuvent les deux électricités, nous appliquerons cette expression à **l'électricité positive**, en sous-entendant que l'électricité négative se meut en sens contraire¹ »*

Lire et comprendre le texte

1. De quelle doctrine Ampère était-il le partisan, celle de Du Fay ou celle de Franklin ?

APP
☺ ☹

2. Quel est le sens conventionnel de circulation du courant électrique à l'extérieur du générateur choisi par Ampère ?

APP
☺ ☹

3. Quels sont les porteurs de charge qui se déplacent dans les métaux assurant la circulation du courant continu ?

APP
☺ ☹

4. En quelle année cette particule élémentaire fut-elle découverte ?

APP
☺ ☹

5. Quel est donc le sens « réel » du courant continu à l'extérieur du générateur ?

ANA
☺ ☹

¹ Ampère : «Action mutuelle des courants électriques et des aimants» in «Exposé des Nouvelles Découvertes sur l'Électricité et le Magnétisme, par MM. Ampère, Membre de l'Académie Royale des Sciences, Professeur à l'École Polytechnique et Babinet, Professeur au Collège royal de Saint-Louis. Paris 1822, page 4.

Correction

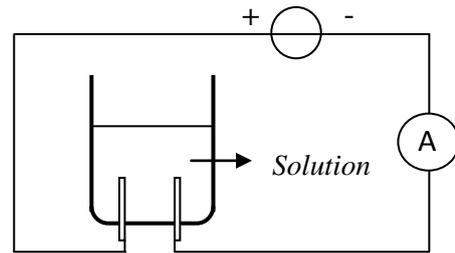
1. Ampère était le partisan de la doctrine de Du Fay puisqu'il évoque l'existence de deux fluides électriques.
2. Le sens conventionnel de circulation du courant électrique à l'extérieur du générateur choisi par Ampère est celui de l'électricité positive (du + du générateur au -).
3. Les électrons libres du métal sont les porteurs de charge qui se déplacent dans les métaux assurant la circulation du courant continu.
4. L'électron fut découvert en 1897 par J. J. Thomson.
5. Le sens « réel » du courant continu à l'extérieur du générateur est celui des électrons : du - du générateur au +.

ACTIVITE EXPERIMENTALE : CONDUCTEUR OU PAS ?

☆ Expérience 1 : La circulation du courant dans les solutions

On dispose d'un générateur, de fils, d'un ampèremètre et d'un électrolyseur qui contient successivement :

- de l'eau distillée ;
- de l'eau minérale ;
- de l'eau salée ;
- de l'eau sucrée.



Indice : une étiquette de bouteille d'eau minérale.

Questions :

1. Observer les expériences et faire une croix dans la case qui convient :

	Eau distillée	Eau minérale	Eau salée	Eau sucrée
Conduit le courant				
Ne conduit pas le courant				

REA
☺ ☹

2. Analyser l'étiquette de la bouteille d'eau minérale. Que contient l'eau minérale ?

.....

APP
☺ ☹

3. Conclure. Quels sont les porteurs de charge qui assurent la circulation du courant dans les solutions conductrices ?

.....

ANA
☺ ☹

4. Que peut-on en conclure pour l'eau sucrée ?

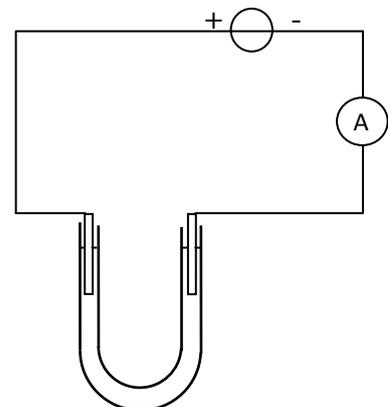
.....

ANA
☺ ☹

Dans les solutions, les porteurs de charges sont les ions. Seules les solutions possédant des ions conduisent le courant. On les appelle des solutions électrolytiques.

☆ Expérience 2 : Que font les ions ?

- Dans un tube en U, on verse 20 mL d'une solution de sulfate de cuivre II de concentration $C = 1 \text{ mol.L}^{-1}$ et 80 mL d'une solution de permanganate de potassium de concentration $C = 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$
- On mélange.
- On réalise le montage et on fait circuler le courant pendant $\frac{1}{4}$ heure environ.



Indice : Les ions permanganate de formule MnO_4^- sont violets et les ions cuivre II de formule Cu^{2+} sont bleus.

Questions :

1. Observer et décrire l'expérience.

.....
.....
.....

REA
😊 😞

2. Quels sont les ions présents dans le mélange ?

.....

APP
😊 😞

3. Proposer une explication du phénomène observé

.....
.....
.....
.....

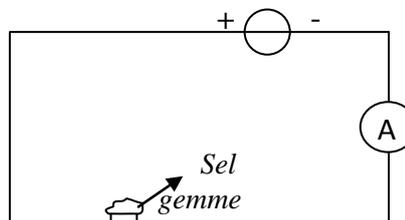
ANA
😊 😞

Dans les solutions électrolytiques, toutes les espèces chargées participent à la circulation du courant. Les cations circulent dans le sens conventionnel et anions négatives dans l'autre sens.

☆ **Expérience 3 : Le cas du sel**

On réalise l'expérience suivante :

Indice : le sel est un solide ionique de formule NaCl.



Questions :

1. Le sel conduit-il le courant ?

.....

ANA
😊 😞

2. Que contient le sel ?

.....

APP
😊 😞

3. Proposer une hypothèse quant au fait que l'eau salée conduise le courant et pas le sel.

.....
.....

ANA
😊 😞

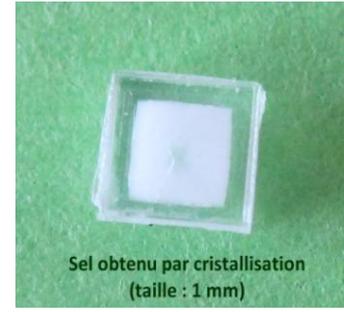
Le cristal de sel contient des ions mais ils doivent être fixes et ne peuvent donc assurer le passage du courant.

ACT. DOC : LA STRUCTURE DU CRISTAL DE SEL



Cristallisation du sel

L'arrangement des ions dans le cristal de sel est à l'origine de la forme régulière des cristaux que nous pouvons observer à notre échelle (voir photos) : une organisation régulière en cubes. On peut en déduire que le cristal de chlorure de sodium est constitué de cations Na^+ et d'anions Cl^- régulièrement disposés dans l'espace selon un réseau cubique.



Sel obtenu par cristallisation
(taille : 1 mm)

Mais quelle est précisément la structure de la maille élémentaire du cristal (la plus petite partie de l'espace qui se reproduit identique à elle-même dans tout le cristal) ?



W. Röntgen

En 1895, le physicien allemand **Wilhelm Röntgen (1845-1923)** découvre un rayonnement possédant des propriétés inhabituelles qu'il nomme rayons X.

En 1912, un autre physicien allemand, **Max von Laue (1879-1960)**, reconnaît la nature électromagnétique de ce rayonnement et constate une étrange propriété des rayons X. Lorsqu'un faisceau de rayons X entre dans un solide cristallin, les rayons sont dispersés dans toutes les directions par la structure du cristal. Or, dans certaines directions, ces rayons dispersés interfèrent pour se détruire ce qui produit des minima d'intensité et dans d'autres directions, ils interfèrent pour « se renforcer » ce qui donne des maxima d'intensité.

Il reconnaît là un phénomène analogue à la diffraction de la lumière et en déduit que les rayons X sont diffractés par le solide cristallin qui forme un « réseau de diffraction en trois dimensions ». Von Laue parvient alors à mesurer la longueur d'onde de ce rayonnement grâce aux interférences obtenues par diffraction à travers un cristal de blende (Sulfure de zinc ZnS). Il obtient le prix Nobel en 1914 pour cette découverte qui va permettre le développement rapide d'une nouvelle discipline : la radiocristallographie. En effet, grâce à la diffraction des rayons X, on peut maintenant étudier la structure des cristaux.

Ainsi, dès 1912, la structure du cristal de chlorure de sodium est découverte par les australiens **William Henry Bragg (1862-1942)** et son fils **William Lawrence Bragg (1890-1971)** qui obtinrent le prix Nobel en 1915 pour leurs travaux. Les deux physiciens établissent que le chlorure de sodium est un assemblage d'ions sodium et chlorure basé sur une structure cubique à faces centrées (CFC) :



W. L. Bragg

- Les ions chlorures sont rangés suivant une structure cubique à faces centrées de côté a : les anions occupent les sommets du cube et les centres des faces.
- Les ions sodium sont aussi rangés suivant cette structure mais ils sont translétés suivant une arête de $\frac{a}{2}$ par rapport aux anions.

Crédits : wikipédia common (illustrations libres de droits) et F. Trouillet pour les photos des cristaux de sel.

Le cristal de chlorure de sodium

1. Dessinez en perspective un cube de côté $a = 10$ cm et placez-y les ions Cl^- de sorte qu'ils soient disposés suivant une structure CFC. On les représentera par de petites boules vertes de sorte à obtenir un modèle éclaté.
2. Disposez ensuite les ions Na^+ (en gris) pour représenter une maille du cristal de chlorure de sodium. *En cas de blocage, demandez un coup de pouce !*
3. En fonction de sa position dans la maille un ion peut « se partager » avec les mailles voisines. Exemple : un ion chlorure au centre d'une face du cube compte pour moitié dans la maille car il appartient aussi à la maille « d'à côté ». Compter le nombre d'ions Cl^- et le nombre d'ions Na^+ dans une maille et expliquer la cohérence entre la structure cristalline microscopique et la formule du chlorure de sodium NaCl (cette formule statistique indique la nature et la proportion des ions présents sans en mentionner les charges).
4. On donne $a = 556$ pm. Calculer la plus petite distance entre les centres de :
 - a) deux ions Cl^- ;
 - b) deux ions Na^+ ;
 - c) un ion Cl^- et un ion Na^+ .*En cas de blocage, demandez « un coup de pouce ».*

REA
😊 😞

ANA
😊 😞

ANA
😊 😞

REA
😊 😞

Nous avons établi que le sel à l'état solide ne conduit pas le courant électrique. Nous avons émis l'hypothèse que les ions Na^+ et Cl^- devaient être fixe dans le cristal. Nous allons tenter de le vérifier et d'expliquer la cohésion de ce cristal.

La cohésion du cristal de chlorure de sodium

1. Quelles sont interactions qui s'exercent entre les ions ?
2. Calculer la valeur de la force d'interaction électrostatique qui s'exerce entre :
 - a) deux ions Cl^- les plus proches ;
 - b) un ion Cl^- et un ion Na^+ les plus proches.*En cas de blocage, demandez « un coup de pouce ».*
3. Représentez ces forces sur un schéma d'une des faces du cube (échelle : 1 cm pour 10^{-9} N).
4. La masse de l'ion Cl^- est de $5,85 \cdot 10^{-26}$ kg et celle de l'ion Na^+ est de $3,84 \cdot 10^{-26}$ kg. Calculer la valeur de la force gravitationnelle s'exerçant entre un ion Cl^- et un ion Na^+ les plus proches.
5. Comment interpréter la cohésion du cristal ?
6. L'hypothèse proposée pour l'expérience 3 (act. 2) est-elle validée. Précisez.

ANA
😊 😞

REA
😊 😞

REA
😊 😞

REA
😊 😞

ANA
😊 😞

VAL
😊 😞

Données : Constante de la force de Coulomb : $k = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{C}^{-2} \cdot \text{m}^2$;
Constante de gravitation : $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^2$;
Charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;
1 pm (picomètre) = 10^{-12} m

FICHES D'AIDE

A distribuer si besoin

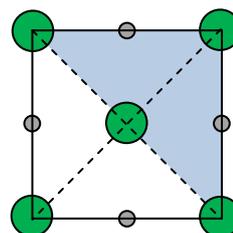
Coup de pouce n°1 : Au secours, je n'arrive pas à dessiner la maille !

La maille est formée :

- d'un ion Cl^- placé à chaque sommet de la maille ;
- d'un ion Cl^- au centre de chaque face de la maille ;
- d'un ion Na^+ au centre de la maille ;
- d'un ion Na^+ au milieu de chaque arête de la maille.

Coup de pouce n°2 : Au secours, je ne sais pas calculer les distances !

Pythagore peut peut-être vous aider ! Regardez donc sur cette vue de face du cristal... un triangle rectangle !



Coup de pouce n°3 : Au secours, je ne sais pas comment calculer la force d'interaction électrostatique

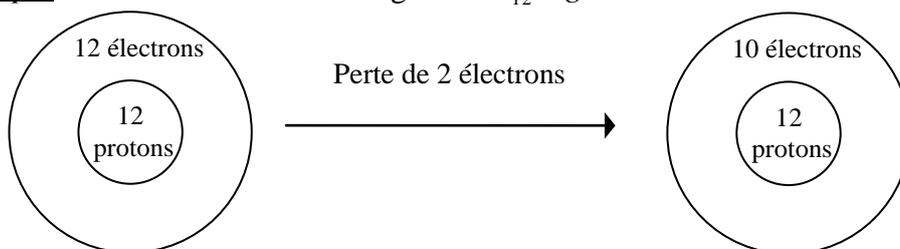
Rappelez-vous $F = k \times \frac{q_1 \times q_2}{d^2}$. **Attention les distances sont exprimées en m !**

Il suffit de chercher maintenant la charge électrique portée par chaque ion ... Un autre coup de pouce ?

Coup de pouce n°4 : Au secours, je ne sais pas comment déterminer la charge portée par un ion

- Un ion monoatomique est formé par un atome qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons.
- Il n'est pas électriquement neutre car son nombre de protons est différent de son nombre d'électrons.

Un exemple : la formation de l'ion magnésium ${}_{12}^{24}\text{Mg} \Rightarrow Z = 12$

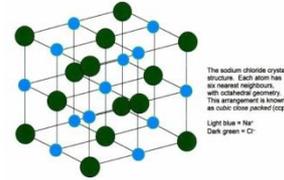


Calcul de la charge électrique de l'ion formé : $q = 12 \times (+e) + 10 \times (-e) = +2e$

On note donc cet ion Mg^{2+} .

Correction de la partie 1:

- 1 et 2. En vert : ions chlorures
 En bleu : ions sodium
 Image : crédit = [wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chlorure_de_sodium#/media:Image:NaCl_cubic_crystal_structure.png)



3. Chaque ion Cl^- disposé à chaque sommet appartient à 8 mailles (il y en a 8). Chaque ion Cl^- disposé à au centre de chaque face est partagé avec 2 mailles (il y en a 6). Ce qui fait 4 ions Cl^- par mailles ($\frac{8}{8} + \frac{6}{2} = 4$).

Chaque ion Na^+ au milieu de chaque arête est partagé avec 4 mailles (il y en a 12). Il y a un ion Na^+ au centre de la maille. Ce qui fait 4 ions Na^+ par mailles ($\frac{12}{4} + 1 = 4$).

Il y a donc autant d'ions chlorure que d'ions sodium dans une maille d'où la formule NaCl .

4. a) $d_{\text{Cl}^-/\text{Cl}^-} = \frac{1}{2}$ diagonale D d'une face du cube d'arête a
 $D^2 = a^2 + a^2 = 2a^2$ (Pythagore) donc $D = a \times \sqrt{2}$.

$$d_{\text{Cl}^-/\text{Cl}^-} = \frac{a \times \sqrt{2}}{2} = \underline{\underline{393 \text{ pm}}}$$

b) De même : $d_{\text{Na}^+/\text{Na}^+} = \frac{a \times \sqrt{2}}{2} = \underline{\underline{393 \text{ pm}}}$

c) $d_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-} = \frac{a}{2} = \underline{\underline{278 \text{ pm}}}$

Correction de la partie 2:

1. Les interactions électrostatiques et gravitationnelles s'exercent entre les ions.

2. a) $q_{\text{Cl}^-} = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \Rightarrow F_{\text{Cl}^-/\text{Cl}^-} = k \times \frac{q_{\text{Cl}^-} \times q_{\text{Cl}^-}}{(d_{\text{Cl}^-/\text{Cl}^-})^2} = 9 \cdot 10^9 \times \frac{(-1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(393 \cdot 10^{-12})^2} = \underline{\underline{1,5 \cdot 10^{-9} \text{ N}}}$

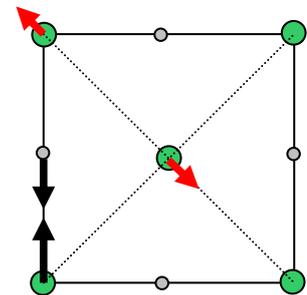
b) $q_{\text{Na}^+} = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \Rightarrow F_{\text{Na}^+/\text{Na}^+} = k \times \frac{q_{\text{Na}^+} \times q_{\text{Na}^+}}{(d_{\text{Na}^+/\text{Na}^+})^2} = 9 \cdot 10^9 \times \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(393 \cdot 10^{-12})^2} = \underline{\underline{1,5 \cdot 10^{-9} \text{ N}}}$

$$\Rightarrow F_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-} = k \times \frac{q_{\text{Na}^+} \times q_{\text{Cl}^-}}{(d_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-})^2} = 9 \cdot 10^9 \times \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(278 \cdot 10^{-12})^2} = \underline{\underline{3,0 \cdot 10^{-9} \text{ N}}}$$

3. En rouge : forces répulsives entre 2 ions Cl^-
 En noir : forces attractives entre les ions Cl^- et Na^+

4. $F_g = G \times \frac{m_{\text{Na}^+} \times m_{\text{Cl}^-}}{(d_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-})^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{5,85 \cdot 10^{-26} \times 3,84 \cdot 10^{-26}}{(278 \cdot 10^{-12})^2}$

$F_g = \underline{\underline{1,94 \cdot 10^{-42} \text{ N}}}$
 (négligeable devant les forces électrostatiques)



5. Dans un cristal ionique, il existe des forces d'interaction électrostatique répulsives et attractives entre les ions. Les ions sont répartis de telle façon que les attractions l'emportent sur les répulsions. L'ensemble des interactions électrostatiques assure la cohésion du cristal ionique.

6. Chaque ion est fixe car les forces électrostatiques qui s'exercent sur lui se compensent deux à deux : le chlorure de sodium est donc un isolant électrique.