Cité des Télécoms

La communication sans fil

Dossier pédagogique

Eric Millour – eric.millour@ac-rennes.fr

Professeur de sciences physiques et conseiller relais à la Cité des télécoms

Version mise à jour le 02/10/2020

académie Rennes

RÉGION ACADÉMIQUE BRETAGNE

LA CITE DES TELECOMS

- La Cité des télécoms, fondation d'entreprise, est un centre de diffusion de la culture scientifique et technique orienté télécom et numérique.

- La Cité des télécoms propose un programme de visite entièrement personnalisé répondant au plus près des attentes pédagogiques des enseignants :

- Le Radôme : un spectacle son et lumière projeté à l'intérieur même du Radôme, classé Monument Historique, retrace l'histoire de ce site unique au monde, théâtre de la première retransmission tv par satellite le 11 juillet 1962.

- Les espaces d'exposition sur les télécoms et le numérique pour vivre un formidable voyage à travers le temps et les technologies de la tour de Chappe à l'ère du tout numérique.

- Les ateliers pédagogiques : programmation robots, le GPS, sécurité sur Internet, programmation smartphone…

- L'exposition temporaire 2020-2021: « la voix, l'expo qui vous parle !»

- Les séjours sur 2,3 ou 5 jours associant visites d'expositions, ateliers et réalisation de reportages vidéo.

- La Cité des télécoms propose également des ateliers itinérants sur la thématique du numérique en intervenant directement dans les classes avec tout le matériel nécessaire.

- Ce dossier pédagogique propose des activités en lien avec notre exposition « La communication sans fil ».

SOMMAIRE

1. Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ? page 4

2. Comment une onde électromagnétique est-elle générée ? page 4

3. Une onde électromagnétique est-elle une onde mécanique ? page 7

4. Quelles sont les caractéristiques d'une onde électromagnétique ? page 8

5. Les différentes sortes d'ondes électromagnétiques page 10
   Activité 1 page 10

6. Propagation d'une onde électromagnétique dans la matière page 11
   Activité 2 page 11

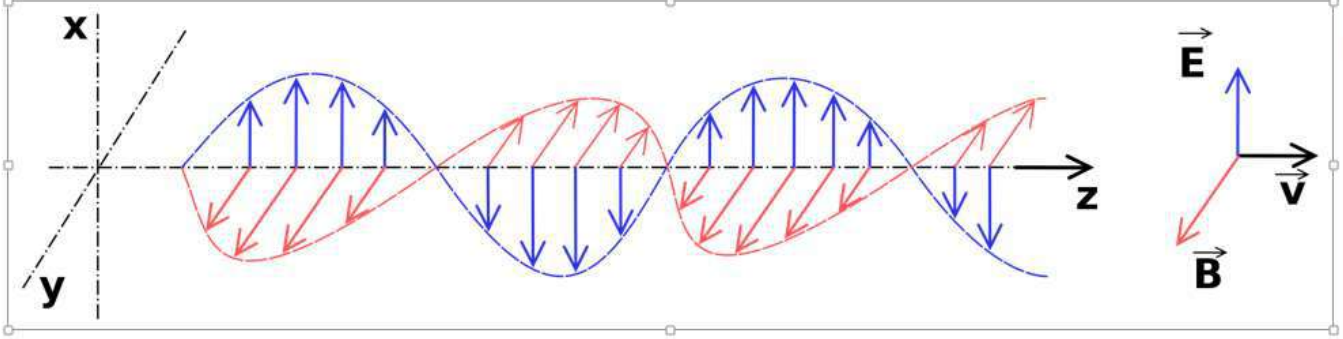
7. L'énergie d'une onde électromagnétique page 12
   Activité 3 page 13
   Activité 4 page 14
   Activité 5 page 15
   Activité 6 page 16
   Activité 7 page 17

1.QU'EST-CE QU'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE ?

Définition : une onde électromagnétique est une onde périodique qui propage des variations de champ magnétique $\vec{B}$ et de champ électrique $\vec{E}$.

Nous allons voir que les deux grandeurs ($\vec{E}$ et $\vec{B}$) sont intimement liées…

Illustration 1 : Onde électromagnétique



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_electromagnetique.svg

2.COMMENT UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE EST-ELLE GENEREE ?

Nous savons qu'une particule chargée (électrons, nuage électronique, proton…) génère naturellement un champ électrique $\vec{E}$. On parle alors de champ vectoriel.

Les lignes de champ partent de la charge électrique si cette dernière est positive. Elles arrivent sur la charge si celle-ci est négative.

Illustration 2 : Les lignes de champs électrique.

q 0

q 0

Compléter l'illustration en indiquant le signe de la charge.

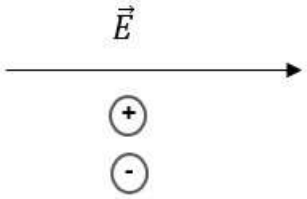
Nous savons également qu'une particule chargée soumise à un champ électrique $\vec{E}$ subit une force (d'attraction ou de répulsion) qui à pour effet de mettre en mouvement la particule chargée. Dans un matériau, les protons et électrons sont donc continuellement soumis à cette force.

L'expression de la force $\vec{F}$ à laquelle est soumise une charge q est donnée par la relation $\vec{F} = q.\vec{E}$

La direction ou droite d'action de la force est alors identique à celle du champ électrique.

Le sens de la force dépend du signe de la charge !

Illustration 3 – Force subie par une particule chargée placée dans un champ électrique $\vec{E}$.



Compléter l'illustration en traçant les vecteurs forces – Les charges sont identiques si l'on ne tient pas compte du signe de la charge.

Si à un conducteur AB : un fil, une antenne… on applique une différence de potentiel UAB < 0 V, il se crée alors un champ électrique $\vec{E}$ dirigé de A vers B. Sous l'action de la force électrostatique, les électrons libres vont se mettre en mouvement.

Illustration 4 – Déplacement des électrons libres dans un fil conducteur

Compléter l'illustration en plaçant les points A et B, le vecteur champ électrique, puis en indiquant le déplacement des électrons dans la section de l'antenne.

Chargés négativement, les électrons vont se déplacer vers le point A / B (entourer la bonne réponse)

En avril 1820, Hans Christian Oersted lors d'un cours sur l'électricité qu'il faisait à ses étudiants, découvrit la relation entre l'électricité et le magnétisme.
Il démontra, par l'expérience, qu'un fil transportant du courant était capable de faire bouger l'aiguille aimantée d'une boussole. Il montrait ainsi que la circulation du courant électrique permettait de générer un champ magnétique. (Nous le noterons $\vec{B}$)

ikipédia

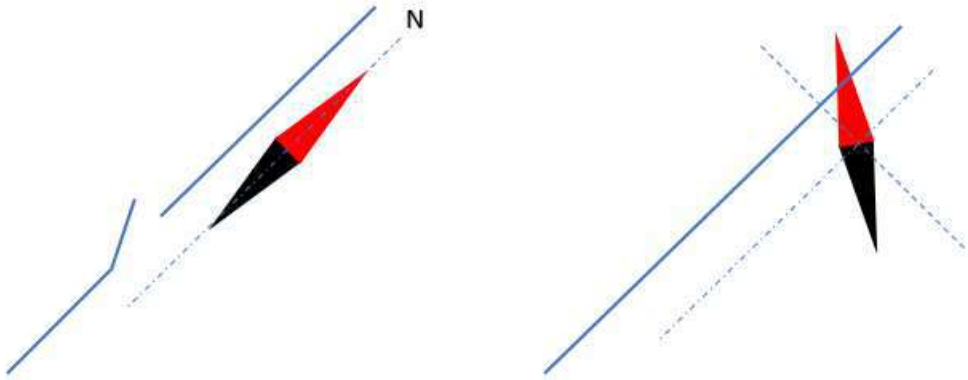
En septembre 1820 **Ampère** en prenant connaissance des résultats d'Oersted, développa rapidement la théorie qui allait permettre l'émergence de l'électromagnétisme.

Ampère - Wikipédia

Il en déduit la règle dite du « bonhomme d'Ampère » :

- le bonhomme est couché sur le conducteur ;
- le courant, qui va par convention du plus vers le moins, le parcourt des pieds vers la tête ;
- il a les yeux dirigés vers l'aiguille aimantée.
- Le pôle nord de cette aiguille se déplace alors vers sa gauche.

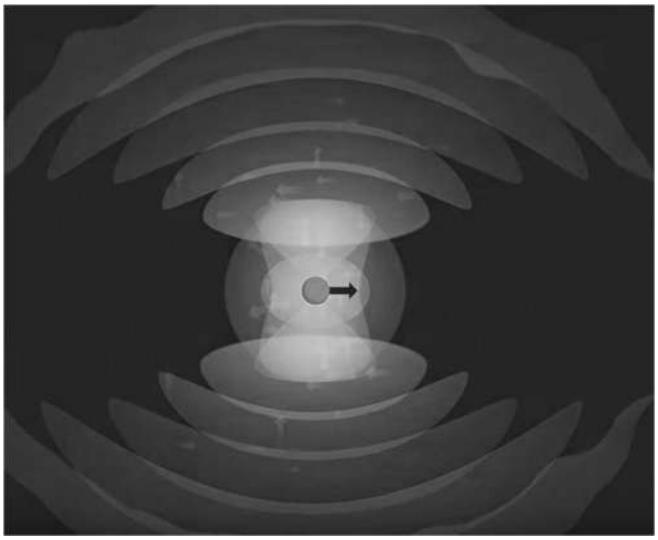
Illustration 5 : Règle du bonhomme d'Ampère. (Le fil conducteur est placé au-dessus de la boussole)



Compléter l'illustration, en indiquant :

- *Le vecteur champ magnétique terrestre* $\vec{B}_{Terre}$
- *Le sens du courant électrique I*
- *Le sens du vecteur champ magnétique créé par le fil électrique* $\vec{B}_{fil}$

Le champ magnétique créé par le mouvement des électrons va perturber le champ électrique créé par les électrons. A son tour, le champ électrique va perturber le champ magnétique… La propagation de la perturbation dans la zone de l'espace entourant le fil conducteur est alors nommée : onde électromagnétique.



D'après Sciences clic : Les ondes électromagnétiques- propagation de la perturbation.

3. UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE EST-ELLE UNE ONDE MECANIQUE ?

Information 1

Définition : Une **onde mécanique progressive** est le phénomène de propagation d'une perturbation locale dans un milieu matériel. Pour une **onde mécanique**, il n'y a pas de déplacement de matière mais un transport d'énergie

Information 2

« Les ondes électromagnétiques évoquées dans l'article couvrent les domaines de la radiodiffusion, de la télévision et des transmissions sans fils adoptées en téléphonie mobile. Historiquement, l'existence des ondes électromagnétiques a été prouvée vers 1864 grâce aux travaux théoriques menés par le physicien britannique James Clerc Maxwell. Toutefois, il faut attendre la toute fin du XIX^{e} siècle pour que le physicien germanique Heinrich Hertz apporte, en 1888, une vérification expérimentale montrant que les champs électromagnétiques étaient transportés dans l'espace à la vitesse de la lumière proche de 300 000 km/s. Plus souvent appelées aux vues des présentes applications, « *ondes radioélectriques* » ou « *ondes hertziennes* », les champs transportés par les ondes se manifestent par l'induction de tensions ou de courants produits sur tout conducteur électrique exposé à ces phénomènes. En fonction des paramètres analysés, on peut assimiler les ondes électromagnétiques à des vibrations ou à un flux de photons transmis dans un milieu immatériel à la vitesse de la lumière. »

D'après Quelques aspects de la propagation des ondes radioélectriques - Bernard Démoulin

Réponse :

---

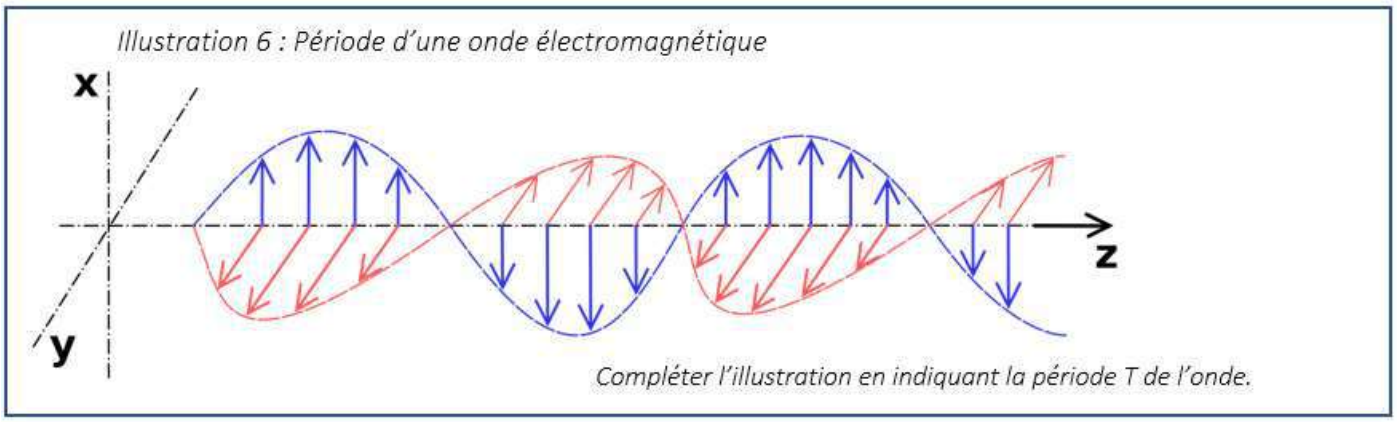
4. QUELLES SONT LES CARACTERISTIQUES D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE ?

Comme toutes les ondes périodiques, elle est caractérisée par :

- sa période T
- sa fréquence **ν** (ou f)
- sa longueur d'onde **λ**
- son amplitude
- sa célérité c

A. Fréquence et période

Définition : La période T est la durée séparant deux motifs élémentaires qui se reproduisent au cours du temps. La période s'exprime en seconde (s).



Définition : La fréquence est le nombre de motifs élémentaires identiques par seconde. Elle s'exprime en hertz (Hz).

La période T (seconde) ou la fréquence ν (ou f) (hertz) caractérise une onde électromagnétique, avec :

- f = 1 / T ou T = 1 / f

Ces grandeurs sont invariables quelles que soient les conditions de propagation.

B. Célérité

Les ondes électromagnétiques n'ont pas besoin de support matériel pour exister et peuvent se propager dans le vide.

Quelle que soit leur fréquence elles s'y propagent à la même vitesse que la lumière visible, à savoir une célérité :

c = 299 792 458 m/s

soit environ **c = 3,00.10^{8}m/s ou 3,00.10^5 km/s**

Attention, dans un milieu transparent la célérité est variable, elle dépend de la nature chimique du milieu mais aussi de paramètres physiques tels que la température, la pression, la densité…

Chaque milieu transparent est caractérisé par son indice de réfraction « n » (qui dépend parfois de la fréquence) et qui permet d'exprimer la célérité dans le milieu

$$c_{milieu} = c_{vide}/n$$

C. Longueur d'onde

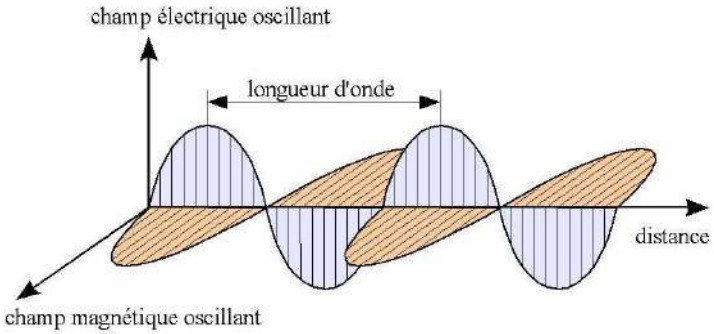
Définition : La longueur d'onde **λ** est la distance parcourue par l'onde pendant une période T à la vitesse v (vitesse de propagation dans le milieu considéré) :

$$\lambda = v\,T = v / f\,.$$

Dans le vide :

$$\lambda = c\,T = c / f\,.$$

La longueur d'onde dépend des conditions de propagation, ce n'est donc pas une longueur caractéristique.



5. LES DIFFERENTES SORTES D'ONDES ELECTROMAGNETIQUE

Les propriétés des ondes électromagnétiques, leur perception, leurs interactions avec la matière, leur propagation dans les différents milieux, leurs applications pratiques, dépendent de la valeur de leur longueur d'onde (et donc aussi de sa fréquence et de sa période).

Tous ces interactions (ou pas !) avec la matière nous ont amené à définir différents intervalles de longueur d'onde à distinguer différentes sortes d'ondes.

Activité 1

En vous aidant des informations disponibles, compléter le tableau suivant.

Longueur d'onde dans le vide	Fréquence	Catégorie d'onde électromagnétiques	Application
1m – 100 000 km			
1 mm – 1m		Micro-ondes	
	300 GHz – 385 THz $3{,}00.10^{11}$Hz – $3{,}85.10^{14}$Hz		
….. nm – …… nm $3{,}80.10^{-7}$m – $7{,}80.10^{-7}$m			
		Ultraviolets	
	30 PHz – 30 Ehz $3{,}0.\ 10^{16}$Hz – $3{,}0.\ 10^{19}$Hz		
λ < à 10 pm (10^{-11} m)			

6. PROPAGATION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE DANS LA MATIERE

Les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans certains milieux matériels et pas d'autre !

Suivant la fréquence de l'onde, une matière peut se montrer :

- Transparente (propagation possible)
- Opaque (pas de propagation, les ondes sont totalement absorbées, diffusées ou réfléchies)

Une onde électromagnétique peut donc interagir avec le corps humain. Ces possibles interactions conduisent à mettre en place un certain nombre de recommandations lors de l'usage du téléphone portable.

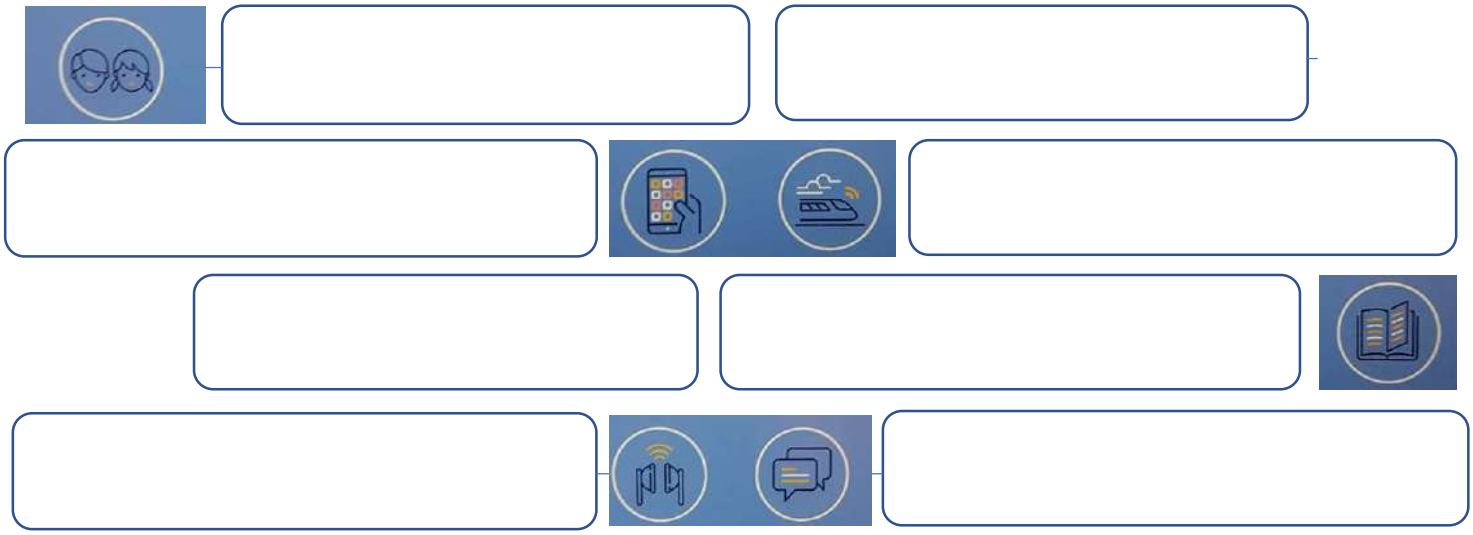
Activité 2

En vous aidant des informations disponibles, répondez aux questions suivantes :

1. Le corps humain peut-il être considéré comme transparent pour les ondes radio ?

2. Quels sont les organismes qui fixent ou émettent des recommandations quant aux seuils d'exposition aux ondes radio ?

3. Dans le cadre de l'utilisation d'un téléphone portable, quelle est la signification des sigles suivants ?



7. L'ENERGIE D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE

Comme toutes les ondes, les ondes électromagnétiques propagent de l'énergie. La quantité d'énergie est directement liée à la fréquence **ν**.

Etant donné que **λ= c/ν** plus la longueur d'onde est faible et plus l'énergie est élevée. Par conséquent les rayonnements les plus énergétiques du spectre électromagnétique sont les rayons gamma tandis que les moins énergétiques sont les ondes radio.

Il est cependant plus juste d'écrire que la quantité d'énergie correspond à l'énergie transportée par le photon !

Aspect corpusculaire

Les ondes électromagnétiques peuvent dans certaines conditions être considérées comme un flux de particules (de corpuscules) appelée photons. La notion de « photon » permet alors d'interpréter cette caractéristique des ondes électromagnétiques et en particulier les échangent d'énergie qu'elle peut opérer avec la matière.

La relation liant l'énergie E à la fréquence **ν** fait intervenir la constante de Planck (h).

$$\boldsymbol{E = h.\nu \quad = h.\frac{c}{\lambda}}$$

- E , l'énergie du photon (en joules : J).
- h, la constante de Planck dont une valeur approchée est : $6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s
- ν, la fréquence (Hz) de l'onde électromagnétique associée au photon considéré.
- λ , la fréquence (m) de l'onde électromagnétique associé au photon considéré.

Pour quantifier l'énergie transportée par un photon, le joule est peu adapté. On préfère utiliser l'électron volt (eV) , ainsi que son multiple (le kiloélectronvolt : keV) et ses sous-multiples (le milliélectronvolt : meV et le microélectronvolt : µeV). La valeur approchée de l'électron-volt étant : 1 eV ≈ $1{,}60 \times 10^{-19}$ J

Activité 3

Calculer en eV, l'énergie transportée par les photons.

Nom	Longueur d'onde	Fréquence	Énergie du photon
Rayons Gamma	< 10 pm	> $3{,}0 \times 10^{19}$ Hz	
Rayons X	10 pm – 10 nm	$3{,}0 \times 10^{16}$ Hz – $3{,}0 \times 10^{19}$ Hz	
Rayons Ultraviolets	10 nm – 390 nm	$7{,}7 \times 10^{14}$ Hz – $3{,}0 \times 10^{16}$ Hz	
Visible	390 nm – 780 nm	$3{,}8 \times 10^{14}$ Hz – $7{,}7 \times 10^{14}$ Hz	
Rayons Infrarouges	780 nm – 1 mm	$3{,}0 \times 10^{11}$ Hz – $3{,}8 \times 10^{14}$ Hz	
Micro-ondes	1 mm – 30 cm	$1{,}0 \times 10^{9}$ Hz – $3{,}0 \times 10^{11}$ Hz	
Ondes radio	> 30 cm	< $1{,}0 \times 10^{9}$ Hz	

D'autre part, Il est également important de mette en regard la longueur d'onde de l'onde électromagnétique avec les dimensions de la matière (noyau, atome, molécules…) mais également les fréquences de vibrations internes des atomes ou des molécules. Ceci est indispensable pour bien comprendre leur possible absorption par la matière et pouvoir ainsi prendre en compte leurs éventuelles dangerosités.

Il faut se rappeler, que l'émission ou l'absorption d'ondes électromagnétiques par la matière est possible lors de transition entre « niveaux d'énergie » différents :

- Le passage vers un niveau d'énergie plus bas permet de libérer de l'énergie et donc d'émettre une onde électromagnétique.
- Le passage vers un niveau d'énergie plus élevée nécessite un gain d'énergie et donc l'absorption d'une onde électromagnétique.

Pour qu'une onde électromagnétique puisse être absorbée il faut donc qu'il y ait adéquation entre l'énergie transportée par le photon et les niveaux d'énergie « interne » de la matière.

L'étude se faisant au cas par cas !

Activité 4

Associer au domaine de longueur d'onde les interactions envisageables avec la matière.

Oscillations d'électrons d'un circuit électrique.

Vibrations moléculaires, Oscillations électroniques.

Transitions des électrons de valence de l'atome

Transitions des électrons internes de l'atome

Transition dans le noyau atomique

Vibrations moléculaires, Oscillations de particules.

Nom	Longueur d'onde	Fréquence	Interaction avec la matière
Rayons Gamma	< 10 pm	> $3{,}0 \times 10^{19}$ Hz	
Rayons X	10 pm – 10 nm	$3{,}0 \times 10^{16}$ Hz – $3{,}0 \times 10^{19}$ Hz	
Rayons Ultraviolets	10 nm – 390 nm	$7{,}7 \times 10^{14}$ Hz – $3{,}0 \times 10^{16}$ Hz	
Visible	390 nm – 780 nm	$3{,}8 \times 10^{14}$ Hz – $7{,}7 \times 10^{14}$ Hz	
Rayons Infrarouges	780 nm – 1 mm	$3{,}0 \times 10^{11}$ Hz – $3{,}8 \times 10^{14}$ Hz	
Micro-ondes	1 mm – 30 cm	$1{,}0 \times 10^{9}$ Hz – $3{,}0 \times 10^{11}$ Hz	
Ondes radio	> 30 cm	< $1{,}0 \times 10^{9}$ Hz	

Activité 5 – La radiographie

Découverts en 1895 par le physicien allemand Wilhem Conrad Röntgen au cours de recherches sur les rayons cathodiques, les rayons X trouvèrent une utilisation médicale assez rapidement.
La radiographie enregistre l'image d'un corps traversé par un faisceau de rayons X. Suivant la constitution du corps, les rayons X sont plus ou moins absorbés et le film photographique, placé derrière le corps radiographié, est ainsi plus ou moins impressionné. Le document ci-dessous correspond à la radiographie d'une main. La main placée contre la plaque sensible s'intercale entre la source de rayons X et la plaque.

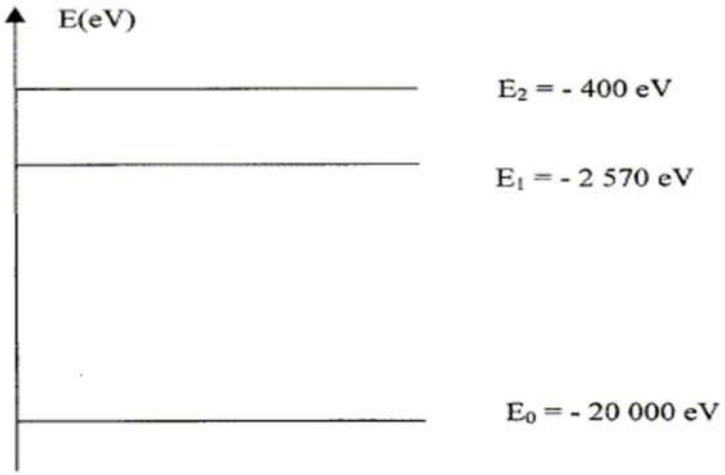
Les éléments calcium (Z=20) et phosphore (Z= 15) sont particulièrement présents dans les os.

Les éléments carbone (Z=6), hydrogène (Z=1) et oxygène (Z=16) sont les principaux éléments constitutifs des tissus.

En raisonnant sur les os et les tissus de la main, répondre aux questions suivantes :

A. Quelle partie de la main a absorbé le plus de rayons X ? Justifier.
B. Connaissant les éléments chimiques présents dans les os et dans les tissus, donner une explication possible justifiant la différence d'absorption qui apparaît sur la radiographie.

Les rayons X - L'émission d'un photon X par un métal est due à certaines transitions électroniques entre deux niveaux d'énergie. Le diagramme des niveaux d'énergie du molybdène est donné ci-dessous :



1. Reproduire le schéma ci-dessus et indiquer par des flèches toutes les transitions envisageables qui s'accompagnent de l'émission du photon.
2. Calculer, en électronvolts (eV), les variations d'énergie correspondant à ces transitions.
3. Quelle est la relation permettant de calculer l'énergie E transportée par un photon X associé à un rayonnement de fréquence ν ?
4. Déduisez-en la relation permettant de déterminer la longueur d'onde λ du rayonnement associé.

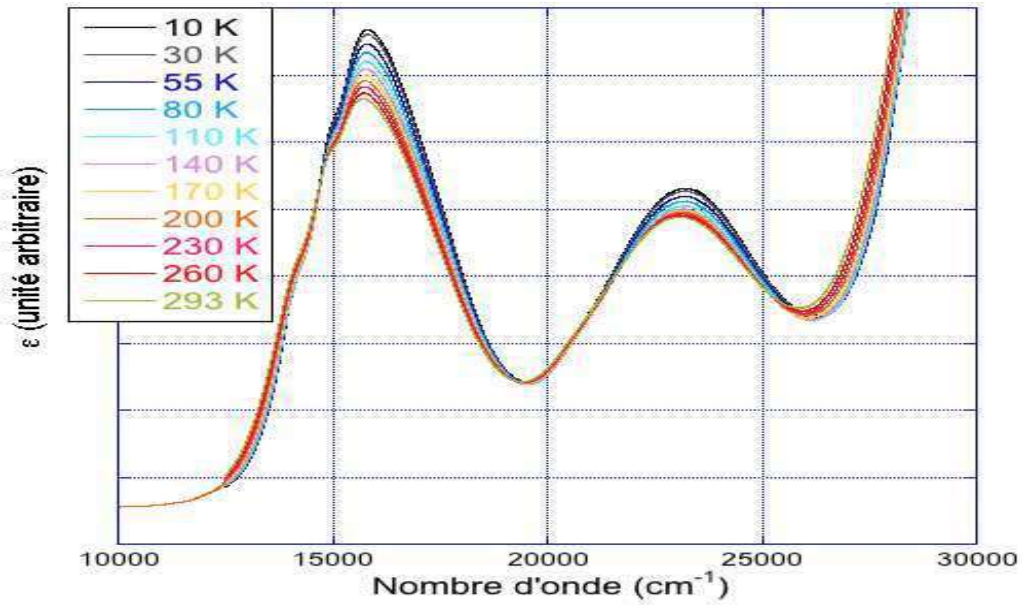
5. Quelle est, parmi les transitions envisagées, celle qui produit le photon X associé au rayonnement ayant la plus petite longueur d'onde ? Justifier votre réponse.

Activité 6 – Spectroscopie

En spectroscopie, le nombre d'onde ou nombre d'ondes $\bar{\nu}$ (également noté σ) est le nombre d'oscillations de l'onde par unité de longueur (λ est exprimée en mètre).

1. Donner l'unité de mesure du nombre d'onde.
2. Ecrire la relation mathématique liant le nombre $\bar{\nu}$ d'onde à la longueur d'onde λ.

3. Le graphe suivant représente les spectres d'absorption optique de 10 à 293 K du verre SBN7.



Déterminer la longueur d'onde, puis la fréquence des radiations absorbées.

Activité 7 – Opacité du verre !

A partir du texte suivant expliquer l'influence de la longueur d'onde sur l'opacité et la transparence du verre.

Chaque atome est constitué par un noyau entouré d'un nuage d'électrons. Les électrons les plus périphériques assurent les liaisons entre atomes pour constituer la matière. S'il y a des électrons libres ou très faiblement liés ceux-ci vibrent sur toute fréquence imposée. Ainsi quand un métal reçoit de la lumière, quelle que soit la fréquence de celle-ci, ses électrons se mettent à vibrer en synchronisme avec elle. Cette lumière est alors partiellement absorbée et transformée en chaleur.

Dans le cas du verre, les électrons de liaison vibrent à une période propre qui correspond à des vibrations véhiculées dans l'ultraviolet (en dessous de 0,35 mm). Les atomes eux-mêmes, liés dans le réseau relativement lâche du verre, vibrent beaucoup plus lentement à des fréquences correspondant à celles de l'infrarouge (au-dessus de 3,5 mm). Dans ces deux domaines le verre est opaque.

Ainsi le verre est transparent pour le visible dans un domaine de longueur d'onde compris entre 0,38 et 0.78 mm. La lumière visible ne met en vibration aucun électron et l'énergie qu'elle transporte n'est pas susceptible d'être absorbée.

D'après I. PEYCHES de la Compagnie de SAINT GOBAIN