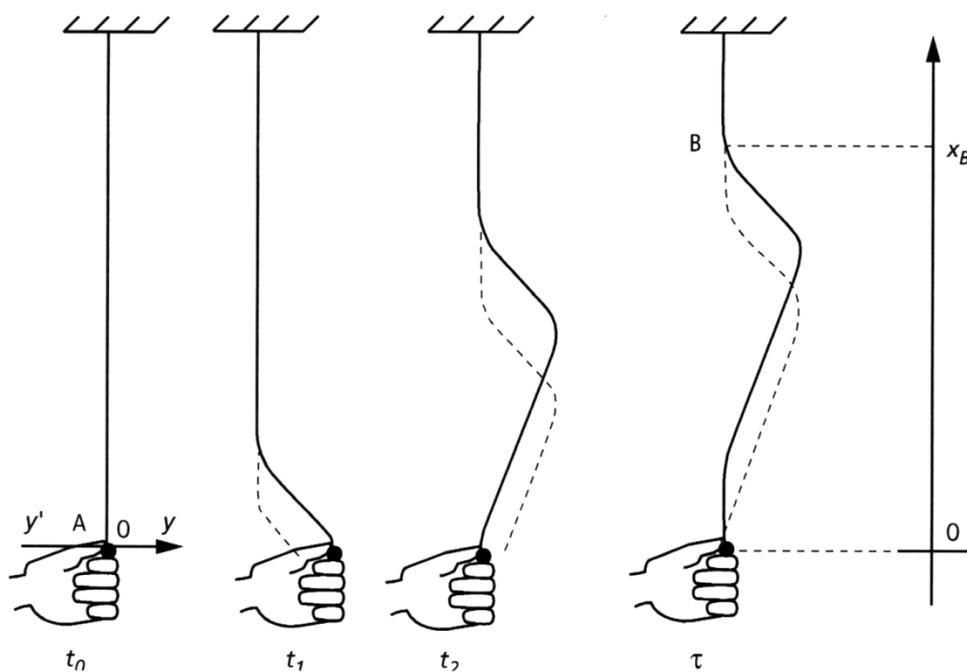


# PHYSIQUE

## TERMINALE L2

M. WAHAB  
DIOP

## COURS DE PHYSIQUE TERMINALE L2



Notes de Cours | Serigne Abdou Wahab Diop

## Table des matières

<b>Rappels et compléments (classe de 1ère)</b> .....	<b>6</b>
I. Énergie.....	6
1. Notion d'énergie .....	6
2. Les différentes sources d'énergie .....	6
3. Expression de quelques formes d'énergie .....	7
4. Conversions d'énergie.....	7
II. Quelques notions indispensables.....	7
1. Intensité du courant .....	7
2. Différence de potentiel (d.d.p.) ou tension électrique .....	7
3. Puissance électrique.....	8
4. Énergie mise en jeu .....	8
<b>Production, transport et utilisation de l'électricité</b> .....	<b>9</b>
I. Les alternateurs.....	9
1. Principe de l'alternateur.....	9
2. Quelques définitions .....	9
3. Puissance et rendement d'un alternateur .....	9
II. Les transformateurs .....	10
1. Constitution.....	10
2. Symbole d'un transformateur .....	10
3. Fonctionnement et rôle d'un transformateur.....	10
4. Puissance et rendement d'un transformateur.....	11
III. Production et transport de l'électricité.....	11
1. Production de l'électricité: centrales électriques .....	11
2. Transport de l'électricité .....	13
3. Rôle du transformateur dans le transport de l'électricité .....	14
IV. Utilisation domestique .....	14
1. Installation domestique.....	14
2. Facturation: Exercice: Bac 2010 .....	15
3. Danger du courant électrique .....	16
<b>Énergie nucléaire: réaction spontanées, fusion et fission</b> .....	<b>26</b>
I. Le noyau .....	26
1. Caractéristiques du noyau.....	26
2. Notion d'isotopie.....	26

II.	Le rapport entre masse et énergie.....	27
1.	Défaut de masse: cohésion des noyaux atomiques.....	27
2.	La théorie d'Einstein.....	27
3.	Unité de masse atomique (u) et énergie.....	27
4.	Énergie de cohésion (liaison) d'un noyau.....	28
5.	Énergie de liaison par nucléon.....	29
III.	Radioactivité.....	29
1.	Définition.....	29
2.	Lois de conservation: lois de Soddy.....	29
3.	Les divers types de radioactivité.....	29
IV.	Réactions nucléaires provoquées: fission et fusion.....	32
1.	La fission.....	32
2.	La fusion.....	33
3.	Énergie libérée lors d'une réaction nucléaire.....	34
V.	Décroissance radioactive.....	34
1.	Caractère aléatoire.....	34
2.	Période radioactive ou demi-vie.....	34
3.	Loi de décroissance.....	35
4.	Activité radioactive.....	35
VI.	Les applications civiles des réactions nucléaires.....	36
1.	Bombe atomique.....	36
2.	Centrale nucléaire.....	36
3.	Bombes thermonucléaires.....	36
4.	Énergie stellaire.....	37
5.	Effets biologiques de la radioactivité.....	37
6.	Datation.....	37
7.	Marquage isotopique en biologie et médecine.....	38
	<b>Généralités sur les signaux et ondes mécaniques.....</b>	<b>45</b>
I.	Généralités.....	45
1.	Signal ou perturbation d'un milieu au repos.....	45
2.	Définitions.....	45
3.	Nature d'une onde mécanique.....	46
II.	Propriétés générales des ondes mécaniques progressives.....	47
1.	Direction de propagation.....	47

2.	Célérité de l'onde. ....	47
3.	Croisement de deux ondes.....	47
III.	Onde progressive périodique à une dimension: .....	48
1.	Rappels sur le mouvement périodique .....	48
2.	Étude expérimentale .....	48
3.	Périodicité temporelle T.....	48
4.	Périodicité spatiale $\lambda$ .....	49
5.	Relation entre période T et longueur d'onde $\lambda$ .....	49
6.	Points vibrants en phase – points vibrants en opposition de phase.....	49
IV.	Cas des ondes à deux ou à trois dimensions .....	50
1.	Ondes à la surface de l'eau.....	50
2.	Ondes sonores.....	50
V.	Réflexion, réfraction, diffraction .....	50
1.	Réflexion et réfraction à la surface de l'eau.....	50
2.	Diffraction d'une onde progressive sinusoïdale .....	51
3.	Interférences mécaniques.....	52
	<b>Aspect ondulatoire de la lumière.....</b>	<b>57</b>
I.	Généralités .....	57
1.	Sources lumineuses .....	57
2.	Classification des milieux matériels.....	57
3.	Propagation rectiligne de la lumière .....	57
4.	Rayon et faisceau lumineux.....	58
II.	Réflexion, réfraction et diffraction de la lumière .....	58
1.	Réflexion de la lumière.....	58
2.	La réfraction de la lumière .....	59
3.	Diffraction de la lumière.....	60
III.	Modèle ondulatoire de la lumière.....	61
1.	Propagation .....	61
2.	Les périodicités.....	62
IV.	Couleur et longueur d'onde .....	62
1.	LUMIERE MONOCHROMATIQUE .....	62
2.	LUMIERE VISIBLE.....	62
V.	Interférences lumineuses : Expérience de la double fente de Young.....	63
1.	MISE EN EVIDENCE DES INTERFERENCES LUMINEUSES .....	63

2. OBSERVATIONS .....	63
3. INTERPRETATION THEORIQUE .....	63
<b>Aspect corpusculaire de la lumière ; Dualité onde-corpuscule .....</b>	<b>66</b>
I. Mise en évidence de l'effet électrique .....	66
1. Expérience de Hertz (1887) .....	66
2. Analyse de l'expérience .....	66
3. Conclusion .....	66
4. Cas de la cellule photoélectrique .....	67
II. Interprétation de l'effet photoélectrique .....	67
1. Hypothèse d'Einstein .....	67
2. Seuil photoélectrique .....	67
III. Dualité onde corpuscule .....	68

# Rappels et compléments (classe de 1ère)

## I. Énergie

### 1. Notion d'énergie

L'énergie est la capacité qu'a un corps de produire du travail. Longtemps l'Homme n'a utilisé que son énergie musculaire et celle des animaux pour se déplacer, effectuer du travail, fabriquer des objets. La chaleur libérée par la combustion du bois lui permet de se chauffer et transformer la matière: cuisson des aliments et des poteries, métallurgie.

Très tôt, il inventa des machines pour rendre ces travaux moins pénibles: machine à vapeur, moteur à explosion, moteur électrique.

Pour toutes ses activités et pour faire fonctionner ces machines, l'Homme a besoin d'énergie qu'il puise à différentes sources.

### 2. Les différentes sources d'énergie

#### a) Les sources fossiles

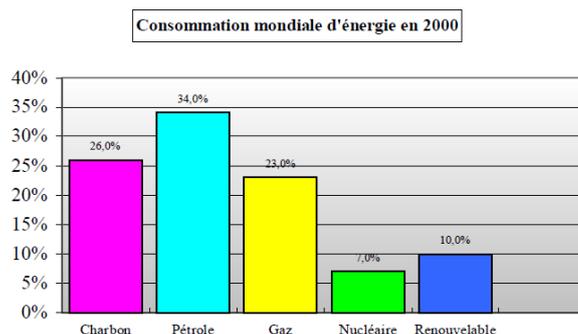
- **Le charbon:** Il y a des millions d'années, des forêts entières ont été enfouies sous la mer, puis recouvertes par des sédiments. Les végétaux se sont alors très lentement transformés, à l'abri de l'air, en une roche noire, riche en carbone C ;
- **Pétrole:** Le pétrole résulte de la décomposition, sous l'action de bactéries, à température et pression élevées, de substances organiques (plancton et micro-organismes) accumulées au fond des mers il y a environ 60 millions d'années. Le liquide sombre et visqueux qui en résulte à été piégé par des roches imperméables. Il est essentiellement constitué de molécules formées exclusivement d'atomes de carbone et d'atomes d'hydrogène : les hydrocarbures.
- **La gaz naturel:** il est constitué d'hydrocarbures gazeux, constitués essentiellement de méthane  $\text{CH}_4$  mais aussi d'éthane  $\text{C}_2\text{H}_6$ , de propane  $\text{C}_3\text{H}_8$  et de butane  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ . Il accompagne souvent le pétrole car il s'est formé dans les mêmes conditions que ce dernier. L'importance relative du gaz ou du liquide dépend du gisement.

#### b) Les sources nucléaires

La principale source d'énergie nucléaire est l'uranium, utilisé dans les centrales nucléaires sous forme d'oxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ).

#### c) Les sources renouvelables

Le rayonnement solaire (énergie solaire); le vent (énergie éolienne); la biomasse (la matière animale et végétale, susceptible de fournir de l'énergie, constitue la biomasse); la géothermie (eau chaude dans le sous-sol de certaines régions comme l'Islande)



### 3. Expression de quelques formes d'énergie

- Énergie cinétique (liée à la vitesse):  $E_c = \frac{1}{2} m V^2$  où m (kg) masse du solide;  $V(m \cdot s^{-1})$  vitesse
- Énergie potentielle de pesanteur (liée à la position par rapport à la terre):  $E_p = mgz$  où z(m) position de l'objet; m(kg) masse et  $g=9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$  intensité de la pesanteur.
- Énergie mécanique ou énergie totale:  $E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} m V^2 + mgz$

Unités: dans le système international d'unités, une énergie est mesurée en Joule (symbole: J). on emploie aussi d'autres unités comme:

- le kilowattheure (symbole kWh)

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

- La tonne-équivalent-pétrole (symbole: tep)

$$1 \text{ tep} = 4,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

### 4. Conversions d'énergie

L'énergie ne peut être ni créée ni générée, elle ne peut être convertie d'une forme à une autre. Une conversion d'énergie est le passage d'une forme d'énergie donnée à une autre.

- Combustion du bois: conversion de l'énergie chimique en énergie calorifique
- Mouvement horizontale d'une voiture: conversion de l'énergie chimique en énergie cinétique.
- Panneau solaire: conversion de l'énergie solaire en énergie électrique

## II. Quelques notions indispensables

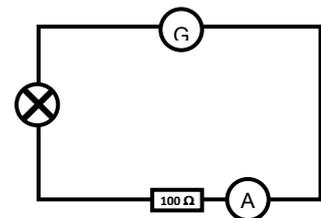
### 1. Intensité du courant

C'est le débit de charges dans un circuit: si la charge q, traverse le circuit pendant la durée t, l'intensité, supposée constante du courant est donnée par:

$$I = \frac{q}{t} \text{ où } I(\text{A}) \text{ l'intensité en Ampère; } q(\text{C}) \text{ la charge en coulomb; } t(\text{s}) \text{ la durée en seconde}$$

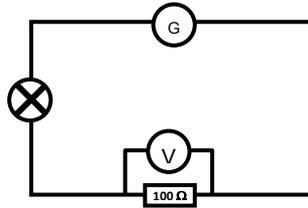
On a aussi  $q = N | e |$  où N est le nombre d'électrons et e la charge élémentaire de valeur  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

L'intensité du courant électrique est mesurée à l'aide d'un ampèremètre toujours branché en série avec le dipôle tout en respectant les polarités.



### 2. Différence de potentiel (d.d.p.) ou tension électrique

La tension entre deux point A et B d'un circuit se mesure avec un voltmètre branché en dérivation (parallèle) noté  $U_{AB}$  ou U. Elle s'exprime en volt (symbole: V)



### 3. Puissance électrique

#### a) En courant continu

Un dipôle de bornes A et B, parcouru par un courant circulant de A vers B d'intensité  $I$ , reçoit une puissance électrique  $\mathcal{P}$  définie par:

$$\mathcal{P} = UI \text{ où } I(\text{A}); U(\text{V}) \text{ et } \mathcal{P}(\text{W}). \text{ L'unité de puissance est le Watt}$$

#### b) En courant alternatif

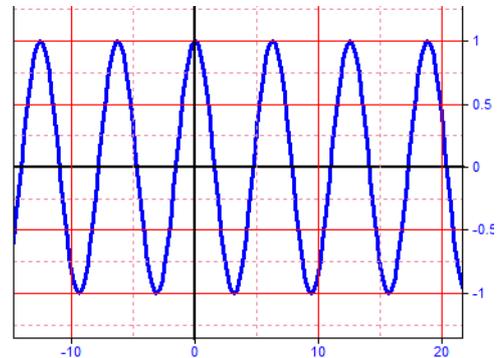
L'intensité et la tension correspondant à un courant alternatif sont variables en grandeur et en signe (donc en sens pour l'intensité) au cours du temps.

Si elles se reproduisent identiquement à elles même toutes les  $T$  secondes, le courant est périodique et de période  $T$ (s).

Le phénomène est aussi caractérisé par la fréquence  $N$  ou  $f$ ,

inverse de période:  $N = f = \frac{1}{T}$ ;  $N$  s'exprime en Hertz (Hz)

et la période en seconde (s)



Remarque: en courant alternatif, les appareils de mesure indiquent une valeur dite efficace de la grandeur mesurée.

$$\mathcal{P} = k \times UI \text{ où } U(\text{V}) \text{ tension efficace; } I(\text{A}) \text{ intensité efficace et } k = \text{facteur de puissance } (0 < k \leq 1)$$

### 4. Énergie mise en jeu

Si un dipôle reçoit une puissance constante  $\mathcal{P}$  pendant une durée  $t$ , le produit  $\mathcal{P} \times t$  représente l'énergie transférée au dipôle.

$$E = W = \mathcal{P} \times t \Rightarrow W = \mathcal{P} \times t \text{ où } W(\text{J}); \mathcal{P}(\text{W}) \text{ et } t(\text{s})$$

Autres unité d'énergie:

- L'électron volt (eV)

$$1 \text{ eV} = 1 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- Le méga électron volt (MeV)

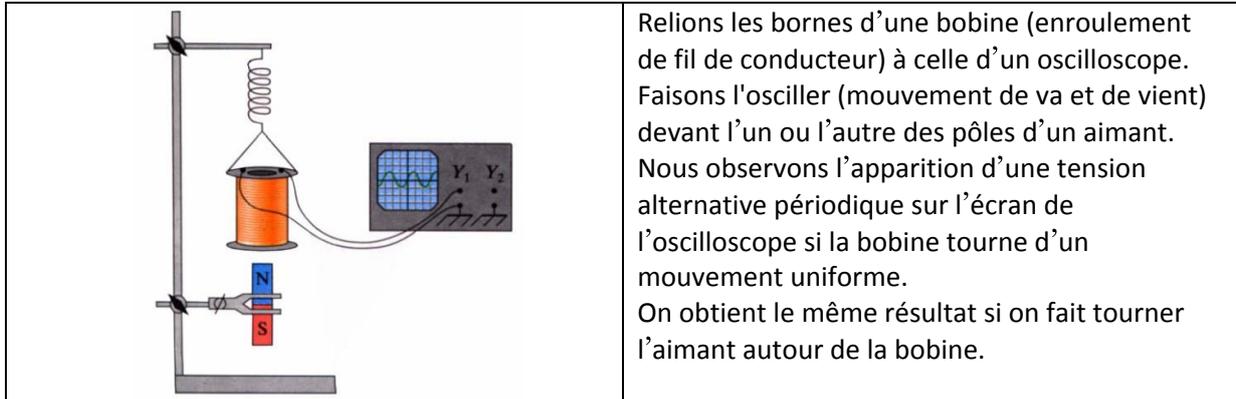
$$1 \text{ MeV} = 1.10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \Rightarrow 1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

## Production, transport et utilisation de l'électricité

### I. Les alternateurs

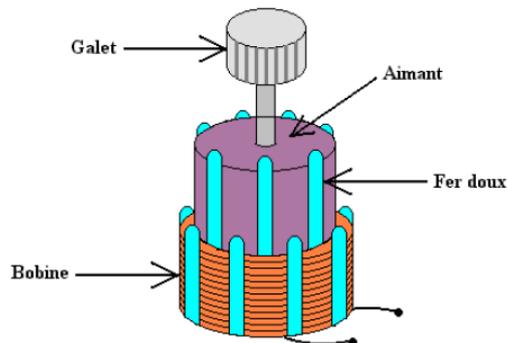
#### 1. Principe de l'alternateur

##### a) Expérience



Au cours de cette expérience nous avons reproduit ce qui se passe dans l'alternateur vélo.

*Schéma d'une dynamo de vélo*



##### b) Conclusion

En présence d'un aimant en mouvement de rotation, une bobine se comporte comme un générateur de tension alternative: c'est le phénomène d'**induction électromagnétique**.

#### 2. Quelques définitions

- Un alternateur est un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique. Il comporte une partie mobile appelée le **rotor** (ici bobine) et une partie fixe appelée le **stator** (ici aimant).
- La bobine aux bornes de la quelle apparaît la tension alternative est appelée **induit**.
- L'aimant à l'origine du phénomène d'induction est appelé **inducteur**.
- Le courant qui parcourt la bobine est appelé **courant induit**.

#### 3. Puissance et rendement d'un alternateur

- Un alternateur est caractérisé par sa puissance apparente  $\mathcal{P}_a$  :  $\mathcal{P}_a = UI$ ;  $\mathcal{P}_a$  s'exprime en voltampère (symbole: V.A): U en volt et I en ampère.

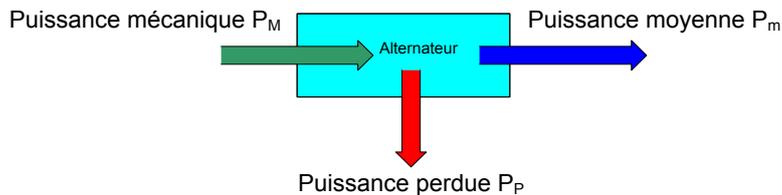
- La puissance moyenne électrique  $\mathcal{P}_e$  effectivement délivrée par un alternateur est définie par:

$$\boxed{\mathcal{P}_e = k \times \mathcal{P}_a} \text{ soit } \mathcal{P}_e = kUI, \text{ k est le facteur de puissance } (k \leq 1)$$

- Le rendement énergétique  $\eta$  des alternateurs est le rapport de la puissance électrique moyenne

$$\mathcal{P}_m \text{ et de la puissance mécanique } \mathcal{P}_m: \quad \boxed{\eta = \frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_m}}$$

Le rendement est toujours inférieur à 1 et s'exprime sans unité.



**Remarque:** les rendements énergétiques des alternateurs sont généralement voisins de 0,95, soit 95%.

## II. Les transformateurs

### 1. Constitution

Un transformateur simple se compose de deux bobines très rapprochées mais électriquement isolées l'une de l'autre. Elles sont enroulées sur une carcasse de fer feuilleté et constituent un circuit d'entrée appelé circuit primaire et un circuit de sortie dit circuit secondaire.

### 2. Symbole d'un transformateur

Un transformateur possède deux types de représentations, une normalisée et une autre non normalisée.

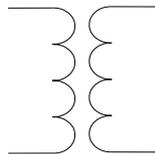
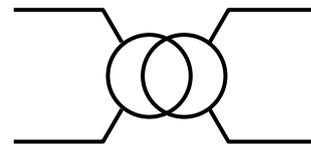


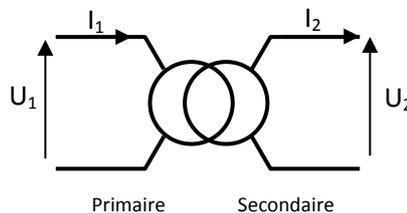
Schéma non normalisé



Primaire      Secondaire

Schéma normalisé

### 3. Fonctionnement et rôle d'un transformateur



Primaire      Secondaire

Si  $N_1$  est le nombre de spires du primaire et  $N_2$  le nombre de spires du secondaire, la mesure des tensions efficaces  $U_1$  et  $U_2$  respectivement aux bornes du primaire et du secondaire permet d'établir la relation:

$$\boxed{\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = m} \text{ où m est le rapport de transformation}$$

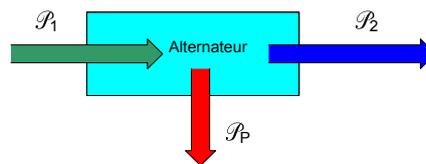
- Si  $m = \frac{N_2}{N_1} > 1 \Rightarrow U_2 > U_1$ : le transformateur est **survolteur** ou élévateur de tension
- Si  $m = \frac{N_2}{N_1} < 1 \Rightarrow U_2 < U_1$ : le transformateur est **sousvolteur** ou abaisseur de tension.

Remarque:

- Un transformateur délivre au secondaire une tension sinusoïdale de même fréquence, mais de valeur efficace différente de celle qui lui est appliquée au primaire.
- Un transformateur ne fonctionne pas en courant continu.

#### 4. Puissance et rendement d'un transformateur

- L'enroulement primaire, alimentée par une tension de valeur efficace  $U_1$ , est parcouru par un courant  $I_1$ . Il reçoit la puissance  $\mathcal{P}_1$  telle que:  $\mathcal{P}_1 = k_1 U_1 I_1$  ( $k_1 \leq 1$ )
- L'enroulement secondaire fournit la puissance  $\mathcal{P}_2$  telle que  $\mathcal{P}_2 = k_2 U_2 I_2$  ( $k_2 \leq 1$ )
- Par définition le rendement du transformateur s'écrit:  $\eta = \frac{\mathcal{P}_2}{\mathcal{P}_1}$  (les rendements peuvent atteindre 95%)



Remarque: pour un transformateur idéal: On a :  $\eta = 1 \Rightarrow \mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_2$  et  $k_1 = k_2 = 1$  d'où  $\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$



### III. Production et transport de l'électricité

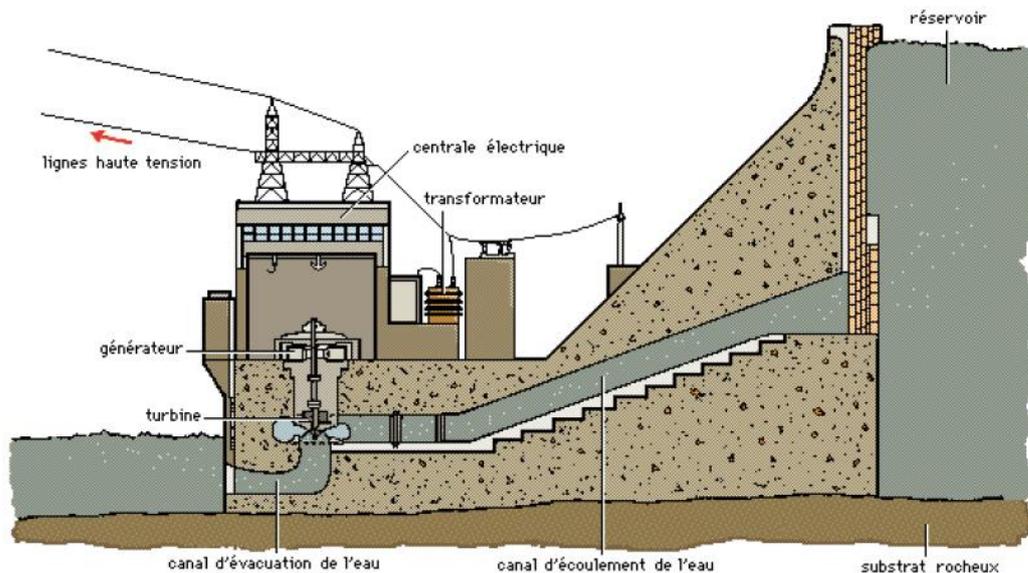
#### 1. Production de l'électricité: centrales électriques

L'électricité est produite dans les centrales électriques où une turbine maintient en mouvement le rotor d'un alternateur. L'ensemble turbine-alternateur transforme l'énergie mécanique (liée au déplacement d'un fluide) en énergie électrique.

Une centrale électrique fonctionne grâce à :

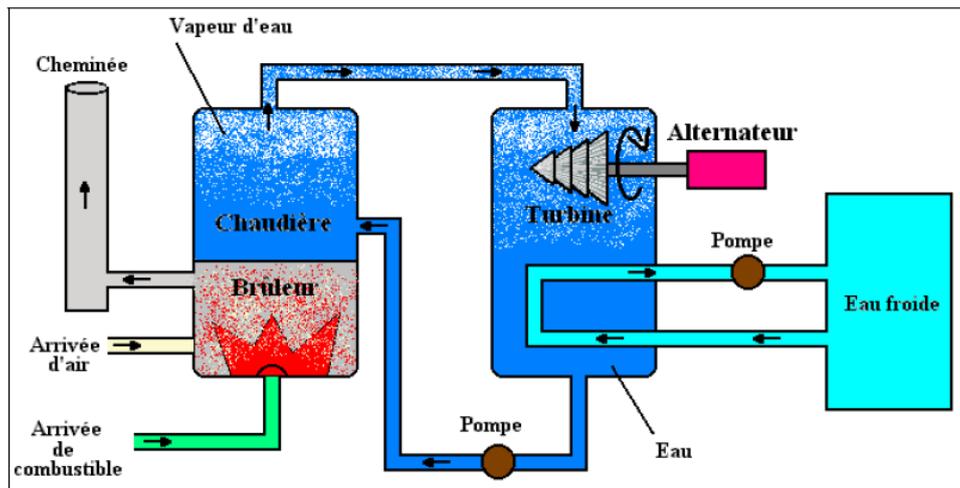
- un réservoir d'énergie dite primaire qui sera transformée en énergie mécanique,
- une turbine qui possède de l'énergie mécanique du fait de son mouvement de rotation (sauf centrale éolienne),
- un alternateur qui convertit l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

a) Centrale hydroélectrique: Coupe d'une centrale hydroélectrique



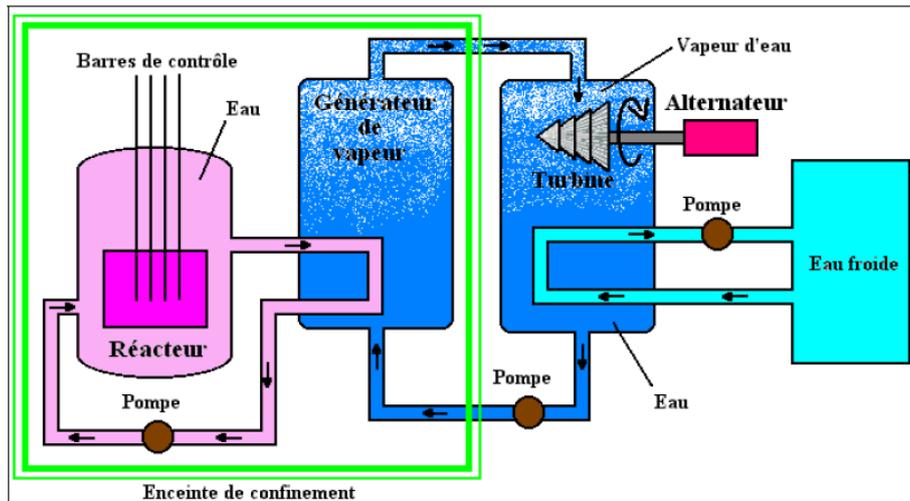
b) Centrale thermique

Dans une centrale thermique, la turbine de l'alternateur est entraînée par de la vapeur d'eau



La chaleur produite dans la chaudière par la combustion du charbon, gaz ou autre, vaporise de l'eau. Cette vapeur d'eau est alors transportée sous haute pression et sous haute température vers une turbine. Sous la pression, les pales de la turbine se mettent à tourner. L'énergie thermique est donc transformée en énergie mécanique. Celle-ci sera, par la suite, transformée à son tour en énergie électrique via un alternateur. A la sortie de la turbine, la vapeur est retransformée en eau (condensation) au contact de parois froides pour être renvoyée dans la chaudière où le cycle recommence.

Les centrales thermiques polluent par les dégagements de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), d'oxydes d'azote ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) et de soufre ( $\text{S}$ ) responsables des pluies acides ou de l'effet de serre.

c) Centrale nucléaire

Le mode de fonctionnement est identique à la centrale thermique si ce n'est que la chaleur est produite par des réactions de fission au cœur du réacteur. En fait la différence est que cette source de chaleur nécessite impérativement un confinement (isolation totale du milieu extérieur) pour éviter un contact, entre le circuit primaire et le circuit secondaire, qui contaminerait toute la centrale en éléments radioactifs.

Les centrales nucléaires produisent des matériaux de fission présentant un niveau de radioactivité important et qui ne diminue que faiblement au cours du temps.

2. Transport de l'électricitéa) Problèmes soulevés par le transport

Le transport doit se faire avec le moins de pertes possibles or une ligne électrique aussi parfaite soit-elle, n'a jamais une résistance nulle. D'après la loi de Joule, une ligne de résistance  $R$ , crée une chute de tension en ligne  $U = RI$ . La puissance joule dissipée (perdue) sous forme de chaleur dans la ligne est  $\mathcal{P}_p = UI = RI^2$

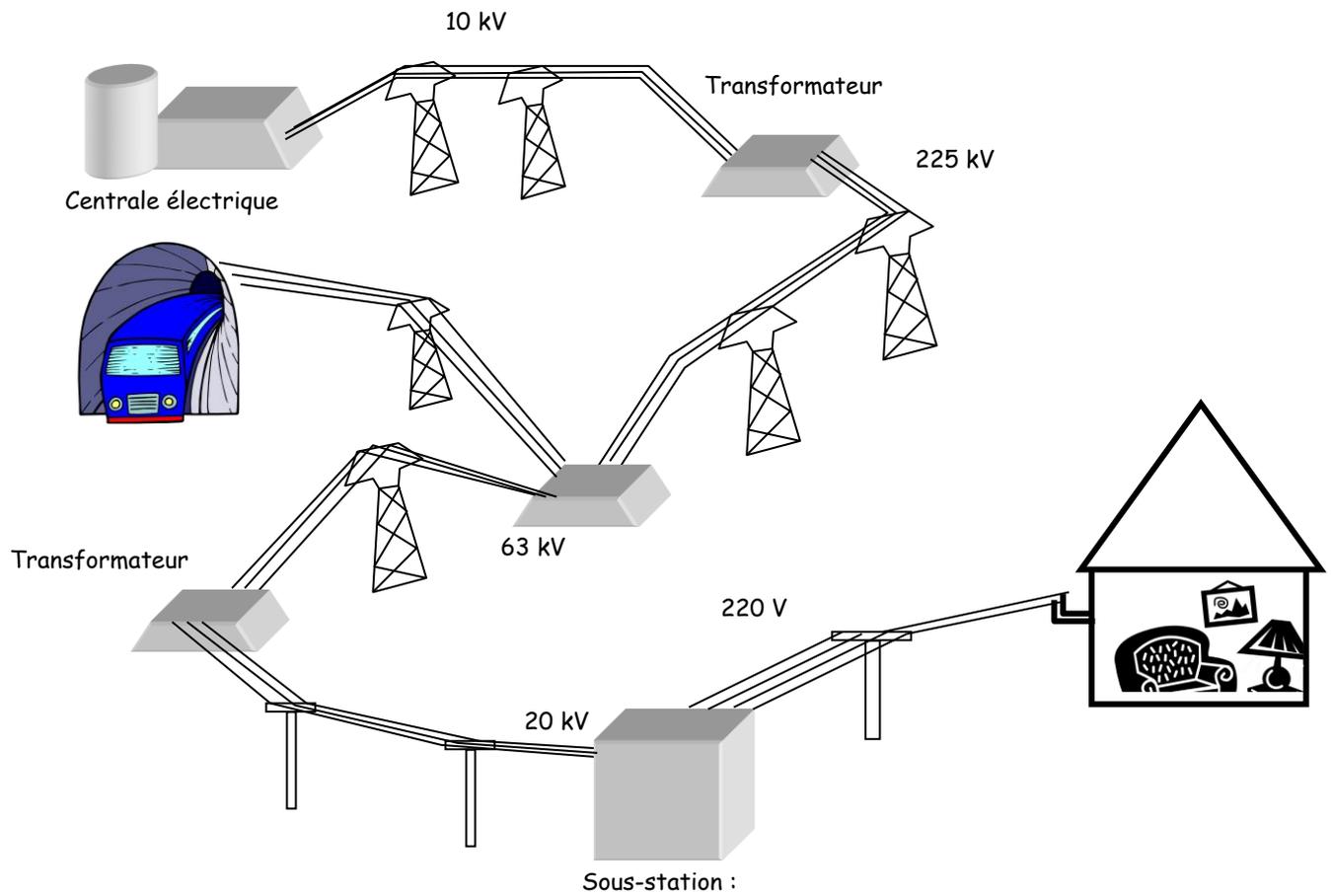
b) Solution adoptée

La puissance d'entrée de la ligne est  $\mathcal{P}_e = U_1 I_1$  (pour  $k_1 = 1$ ) et la puissance perdue sur la ligne est

$$\mathcal{P}_p = R_{\text{ligne}} \times I_1^2 = R_{\text{ligne}} \times \frac{\mathcal{P}_e^2}{U_1^2} = R_{\text{ligne}} \times \left( \frac{\mathcal{P}_e}{U_1} \right)^2 \Rightarrow \mathcal{P}_p = R_{\text{ligne}} \times \left( \frac{\mathcal{P}_e}{U_1} \right)^2$$

Ainsi pour minimiser les pertes, il faut utiliser des tensions les plus élevées possibles et des lignes de résistance minimale. C'est pourquoi on transporte le courant alternatif sous de très haute tension ou THT de (225 kV ou 400 kV). Les lignes haute tension ou HT (90 kV et 63 kV) assurent la distribution régionale et alimentent certaines entreprises de grandes consommatrices d'énergie. Les lignes basses tension ou BT (380V et 220V) assurent la distribution vers les usagers domestiques (particuliers).

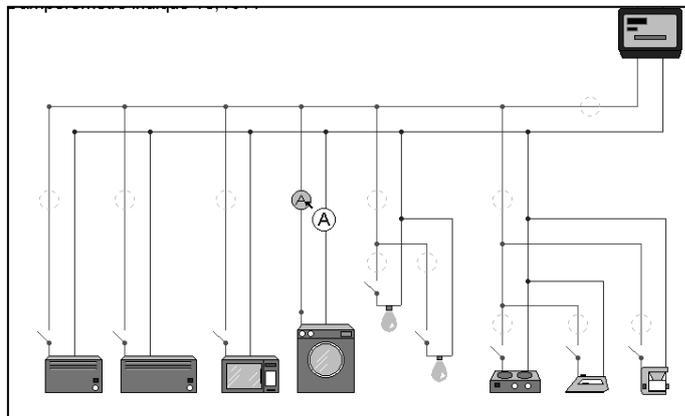
### 3. Rôle du transformateur dans le transport de l'électricité



Trajet de l'électricité du producteur au consommateur

## IV. Utilisation domestique

### 1. Installation domestique



Tous les appareils sont montés en parallèle

## 2. Facturation: Exercice: Bac 2010

- 1) Après production au niveau de la centrale, l'électricité fournie par la Société nationale d'électricité du Sénégal « Senelec » est transportée à haute tension sur de très longues distances par des câbles mais elle est utilisée à domestique à basse tension.
  - a) Expliquer pourquoi le courant électrique est transporté à haute tension de la centrale de production vers les utilisateurs.
  - b) Utilise-t-on un transformateur abaisseur de tension ou élévateur de tension au sortir de la centrale électrique?
- 2) La facture d'électricité délivrée par la Senelec est calculée sur la base de la quantité d'énergie électrique consommée par l'utilisateur et mesurée par le compteur électrique.

A titre d'exemple, la facture d'électricité d'un « goorgoorlu » se présente comme suit :

Tranche	Consommation (kWh)	Tarif (CFA/kWh)	Montant
1 <sup>er</sup> tranche	160	106,4	
2 <sup>e</sup> tranche	106	114,2	
3 <sup>e</sup> tranche	96	117,3	
total			

- a) Sur la facture, l'énergie électrique consommée est exprimée en kWh.
  - Rappeler le nom et le symbole de l'unité d'énergie dans le Système International (SI)
  - Convertir 1 kWh en unité SI.
- b) Quelle est la consommation totale du « goorgoorlu » en kWh et quel est le montant en C.F.A qu'il doit, hors taxe ? Recopier le tableau et y reporter les valeurs trouvées.
- c) Ce goorgoorlu doit en outre payer une taxe communale qui s'élève à 2,5 % du montant hors taxe, une redevance qui s'élève à 920 F et la taxe sur la valeur ajoutée (T.V.A) dont le montant est 18 % hors taxe. Calculer la somme nette que ce « goorgoorlu » doit à la Senelec.

### Réponses:

- 1)
  - a) Le courant électrique est transporté à haute tension de la centrale de production vers les utilisateurs pour minimiser les pertes d'énergie par effet joule.
  - b) On utilise un transformateur élévateur de tension au sortir de la centrale électrique.
- 2)
  - a) Nom de l'unité SI d'énergie = joule, symbole : J;  $1 \text{ kWh} = 10^3 \text{ Wh} = 3600 \cdot 10^3 \text{ J} = 3600 \text{ kJ}$
  - b) La consommation totale du « goorgoorlu » en kWh et le montant en C.F.A qu'il doit, hors taxe.

Tranche	Consommation (kWh)	Tarif (CFA/kWh)	Montant
1 <sup>er</sup> tranche	160	106,4	<b>17024</b>
2 <sup>e</sup> tranche	106	114,2	<b>12105,2</b>
3 <sup>e</sup> tranche	96	117,3	<b>11260,8</b>
total	<b>362</b>		<b>40390</b>

Il consomme 362 kWh et doit 40390 F CFA en hors taxe.

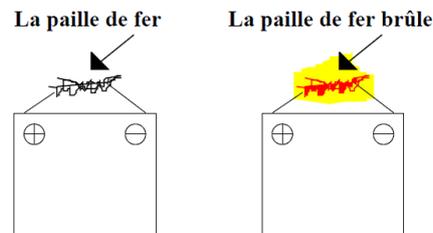
- c) Somme due à la Sénélec = montant hors taxe + taxe communale+ redevance + TVA  
 = 40390 + 1009,75 + 920 + 7270,2 = **49589,95 FCFA**

### 3. Danger du courant électrique

#### a) Le court-circuit :

On crée un court-circuit en reliant, accidentellement ou pas l'entrée ou la sortie d'un appareil électrique.

Exemple de court-circuit : On relie le + et le - d'une pile avec de la paille de fer très fine.



La paille de fer chauffe, rougit, puis se met à brûler.

Il peut se passer la même chose à la maison, si on relie les deux bornes d'une prise électrique, ou si deux fils électriques se touchent accidentellement. Les fils, étant traversés par une trop grande quantité de courant, deviennent très chauds et l'installation peut brûler. On peut mettre le feu chez soi.

#### b) Les surintensités :

Une surintensité apparaît si on branche trop d'appareils sur la même prise électrique (prise multiple). Les fils, devant laisser passer trop de courant, s'échauffent et l'installation peut prendre feu.

#### c) L'électrocution :

Ne pas toucher un fil dénudé. Ne pas approcher les mains mouillées d'un appareil électrique ou d'un interrupteur. Ne pas envoyer d'eau sur un circuit électrique.

A la maison, le fil relié à la phase possède une tension de 230 volts ! Le seul remède contre l'électrocution est l'attention : ne soyez pas tête en l'air...

**Attention!** Il ne faut jamais toucher une personne qui s'électrocute sans avoir arrêté le courant au niveau du compteur électrique. Sinon, on s'électrocute soi-même à son contact.

A la maison, le fil relié à la phase possède une tension de 220 volts ! Le seul remède contre l'électrocution est l'attention : ne soyez pas tête en l'air...

#### ○ Premier type d'accident :

Le courant entre par un doigt, traverse la main et ressort par l'autre doigt.

(Les prises modernes sont équipées d'éclipses pour éviter cet accident.)

C'est dangereux, car on se brûle la main.

#### ○ Deuxième type d'accident, plus grave :

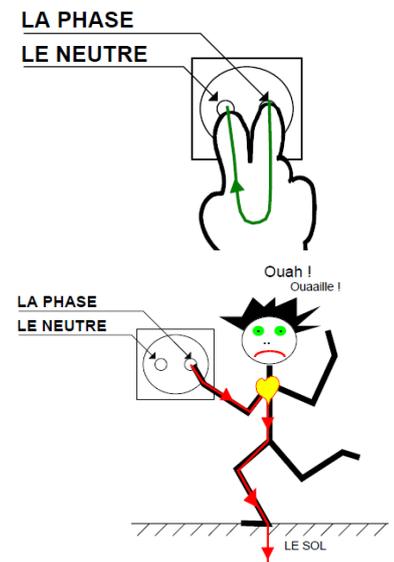
On ne touche que la phase. Le courant traverse le bras, le corps et revient à la centrale par le sol.

C'est l'accident le plus dangereux, car le cœur, sur le trajet du courant, peut s'arrêter.

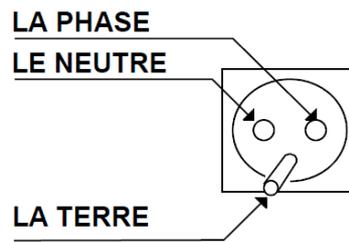
#### d) Protection des personnes

La prise de terre est reliée au sol.

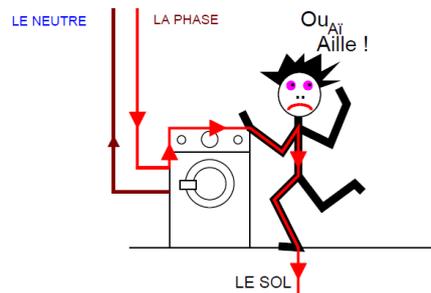
Si un appareil métallique est défectueux, la prise de Terre dévie le courant



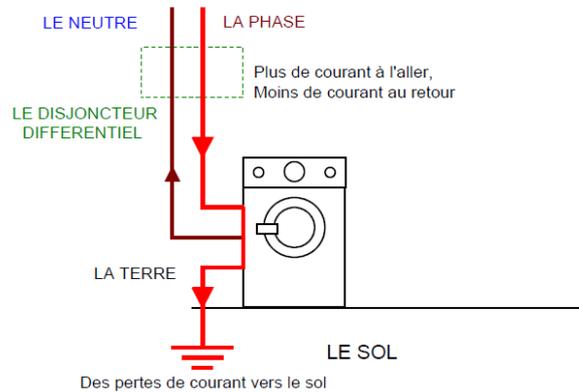
vers le sol.



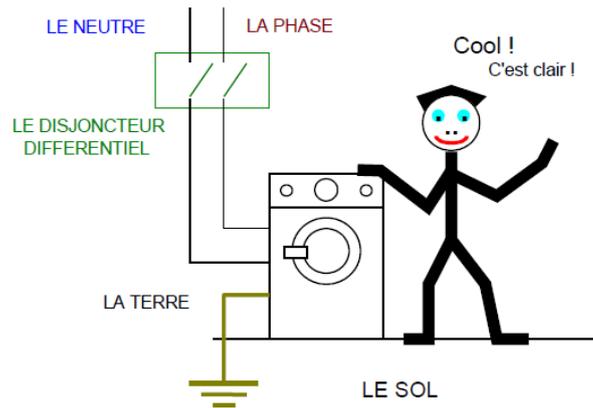
Supposons que la machine à laver soit défectueuse : la phase est présente par accident sur les parties métalliques accessibles. Si nous touchons la machine à laver, le courant électrique traverse notre corps et revient à la centrale de la SENELEC par le sol. Nous sommes électrocutés.



Normalement, la machine à laver possède une prise de terre reliée au sol. Le courant électrique s'échappe par cette prise de terre. Le courant électrique qui revient de la machine à laver par le neutre est moins fort que le courant qui est arrivé à la machine par la phase. Le disjoncteur différentiel, qui compare le courant qui arrive dans l'installation au courant qui repart de l'installation s'aperçoit de la perte d'électricité. Le disjoncteur différentiel coupe alors le courant électrique.



Le disjoncteur différentiel ayant ouvert le circuit électrique, le risque d'électrocution disparaît.



Si le courant qui sort de l'installation est plus faible que celui qui y est entré, le disjoncteur différentiel coupe le courant. Le disjoncteur différentiel évite une électrocution possible. Il ne faut jamais toucher une personne qui s'électrocute sans avoir arrêté le courant au niveau du compteur électrique. Sinon, on s'électrocute soi-même à son contact.

## Exercices sur la production et le transport de l'électricité

### Exercice 1 :

Compléter les phrases suivantes :

- 1) L'énergie cinétique d'un corps de masse  $m$  se déplaçant à la vitesse  $v$  est  $E_c = \dots\dots\dots$
- 2) L'énergie potentielle de pesanteur d'un corps de masse  $m$  et situé à l'altitude  $z$  est  $E_p = \dots\dots\dots$
- 3) L'unité d'énergie est le .....de symbole.....
- 4) L'énergie électrique consommée par un appareil est donnée par la relation  $E = \dots\dots\dots$
- 5) L'énergie électrique est souvent exprimée en wattheure, donner l'équivalent du wattheure en joule.  $1 \text{ kWh} = \dots\dots\dots \text{J}$
- 6) L'énergie ne peut être ni .....ni.....; elle ne peut qu'être .....d'une forme à une autre.
- 7) On appelle rendement d'un dispositif de transformation d'énergie, le .....de l'énergie qu'il .....par l'énergie qui lui a été .....dans le même temps.
- 8) Un rendement est toujours .....à ....et s'exprime sans.....par un nombre..... ou un .....

### Exercice 2 :

- 1) Quel est le principe fondamental de la production d'un courant alternatif ?
- 2) Quelle est la provenance de l'énergie électrique fournie par un alternateur ?
- 3) Que devient la majeure partie de l'énergie consommée par une centrale thermique ?
- 4) Pourquoi utilise-t-on des lignes à très haute tension pour transporter l'énergie électrique ?
- 5) Qu'est-ce qu'un transformateur ?
- 6) Quels sont les ordres de grandeur des rendements d'une centrale hydraulique et d'une centrale thermique ?

- 7) Un aimant en mouvement devant un circuit fermé provoque dans ce circuit le passage d'un courant électrique. Comment appelle-t-on ce phénomène ?
- 8) Quel est le rôle en termes de conversion d'énergie,
  - D'un moteur électrique?
  - D'un réacteur nucléaire?
  - D'une turbine?
  - D'un panneau solaire?

**Exercice 3 :** Compléter les phrases suivantes

- 1) Un aimant en mouvement devant une bobine dont les bornes sont reliées à un milliampèremètre provoque le passage d'un courant électrique. Ce phénomène est appelé.....et le courant mis en évidence est appelé .....
- 2) Un alternateur est un générateur de .....alternatif. Il transforme de l'énergie.....en énergie .....
- 3) On trouve dans l'alternateur une partie fixe appelée .....et une partie mobile appelée.....
- 4) Dans une centrale électrique, l'énergie .....est convertie en énergie.....grâce à une..... qu'entraîne elle-même un.....
- 5) A la sortie d'une .....on élève la tension. Afin de limiter les .....par effet ..... ; l'énergie électrique est.....par des lignes de.....
- 6) Le phénomène d'.....électromagnétique est à l'origine du fonctionnement des.....et des.....
- 7) Un alternateur convertit de l'énergie .....en énergie.....

**Exercice 4:**

Le primaire d'un transformateur T intégré dans un poste à souder à l'arc comporte 2000 spires. Il est alimenté sous une tension efficace  $U=230V$ . Le rapport de transformation est  $m=0,01$ .

- 1) Déterminer le nombre de spires du secondaire.
- 2) Calculer la valeur efficace de la tension obtenue aux bornes du secondaire.
- 3) Le primaire du transformateur T est parcouru par un courant d'intensité efficace  $I=2,5A$ . Calculer l'intensité efficace du courant obtenu au secondaire.
- 4) On admet que le transformateur T est parfait.
  - a) Indiquer ce qui caractérise un transformateur parfait.
  - b) Calculer la puissance apparente du transformateur T.

**Exercice 5:**

- 1) Le déplacement d'un aimant par rapport à une bobine dont les bornes sont reliées à un microampèremètre produit un courant électrique : c'est le phénomène .....
- 2) Un transformateur est un dispositif qui permet, suivant sa conception et son utilisation, d'élever ou d'abaisser une .....
- 3) L'alternateur est une application du phénomène d'..... son principe repose sur la rotation d'un ..... devant une bobine fixe que l'on désigne par .....
- 4) En régime sinusoïdal, la ..... est le produit de la tension efficace et de l'intensité efficace.
- 5) Un transformateur ne fonctionne pas en .....

**Exercice 6:**

Un spot à halogène est alimenté par un transformateur branché sur une prise de courant.



- 1) À la sortie, par combien la tension a-t-elle été divisée ?
- 2) Calculer le nombre de spires au secondaire si le primaire comporte 4500 spires.
- 3) On alimente le secondaire avec une tension efficace de 8 V. Quelle est la tension efficace au primaire ?

**Exercice 7:**

Un transformateur comporte deux bobines : l'une de 10000 spires, l'autre de 200 spires.

- 1) Quel est le primaire si on désire élever une tension ? Si on impose au primaire une tension de 100V, quelle est celle obtenue aux bornes du secondaire ?
- 2) Sur le primaire de ce transformateur on branche une tension continue de 12 V. Calculer la tension correspondant au circuit secondaire ?

**Exercice 8:**

- 1) Un ..... transforme de ..... en ..... et en énergie thermique.
- 2) Une énergie ..... est une énergie considérée comme ..... à notre échelle (à l'échelle humaine)
- 3) Le ..... d'un ..... au voisinage d'une ..... (ou l'inverse), produit une ..... (dont la valeur change au cours du temps).
- 4) Un ..... produit une tension .....
- 5) À la sortie des ..... électriques, on ..... la tension à l'aide d'un ..... afin de réduire les ..... en ..... lors du .....
- 6) Une éolienne permet d'obtenir de l'énergie électrique à partir de l'énergie fournie par le .....
- 7) L'alternateur permettant de récupérer de l'électricité est constitué d'un ..... et d'un ..... C'est le phénomène de ..... qui permet de produire de l'électricité

**Exercice 9:**

Le transformateur abaisseur est monophasé 230V / 30V. Sa puissance apparente nominale est  $P_G = 8,0 \text{ KVA}$ .

- 1) Déterminer les intensités  $I_1$  au primaire et  $I_2$  au secondaire.
- 2) Calculer le rapport de transformation  $m$ .
- 3) La mesure de la puissance électrique au primaire indique  $P_1 = 7,0 \text{ kW}$  quand le transformateur absorbe son courant  $I_1$ .
  - a) Calculer le facteur de puissance  $k_1$ .
  - b) On a mesuré les pertes du transformateur  $P_j = 300 \text{ W}$ .
    - i) Calculer la puissance électrique  $P_2$  délivrée au secondaire.
    - ii) Calculer le rendement  $\eta$  du transformateur.

**Exercice 10:**

Le réchauffement dû à l'accroissement de l'effet de serre est l'une des plus importantes menaces pour la planète. Principal responsable : le  $\text{CO}_2$

Transports, commerces, services, industries, vie quotidienne : nous avons besoin d'énergie sous des formes les plus diverses. L'électricité que nous consommons provient de différentes sources : énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz), renouvelables (hydraulique) ou nucléaire. Le choix entre ces sources n'est pas sans conséquence sur l'environnement.

Si, pour fournir à chaque français les 6700 kWh dont il a besoin chaque année, on devait recourir au charbon, on rejeterait dans l'atmosphère 6,7 tonnes de  $\text{CO}_2$ , 5,4 tonnes avec le pétrole, 4 tonnes

avec le gaz.

Avec 54 centrales électronucléaires et 2000 usines hydroélectriques, la France couvre 90% (75% nucléaire, 15% hydraulique) de ses besoins en électricité sans produire un seul gramme de CO<sub>2</sub>. Pas de CO<sub>2</sub>, pas d'oxyde d'azote, pas de dioxyde de soufre : la production d'électricité nucléaire n'émet pas de gaz polluants.

- 1) Quels sont les principaux produits de combustion des énergies fossiles ?
- 2) Parmi les énergies suivantes, hydraulique, pétrole, solaire, éolienne, charbon, indiquer celles qui sont renouvelables.
- 3) Citer un autre grand secteur producteur de dioxyde de carbone en France.
- 4) Le texte précise que "la production d'énergie nucléaire n'émet pas de gaz polluants". Pensez-vous pour autant qu'elle soit sans risques? Donner deux arguments.

### **Exercice 11:**

- 1) Vous êtes pour l'instant alimenté en 110V, la résistance de la ligne qui amène le courant à votre réfrigérateur est de 0,2Ω. La puissance absorbée par le moteur, quand celui-ci fonctionne, est de 400W.
  - a) Quelle est l'intensité du courant qui circule dans la ligne, en supposant que la tension est de 110V aux bornes du moteur et que le facteur de puissance du moteur est de 0,9 ?
  - b) Quelle est la puissance dissipée par le transport du courant du compteur au réfrigérateur ? Quelle est la puissance totale consommée ?
- 2) Votre installation est maintenant alimentée en 220V utilise un transformateur.
  - a) Quel est le rapport du nombre de spires du circuit primaire à celui du circuit secondaire ?
  - b) Le transformateur transmet 98% de la puissance qu'il reçoit. Quand le moteur fonctionne, quelle est alors l'intensité qui circule dans le circuit secondaire ? dans le circuit primaire ? (On supposera que la tension est de 220V aux bornes du secondaire ; on prendra le facteur de puissance du circuit primaire égal à 0,9.)
  - c) Quelle est la puissance totale consommée par votre installation ?

### **Exercice 12:**

- 1) Définir un alternateur
- 2) Indiquer le phénomène responsable du fonctionnement d'un alternateur.
- 3) Quel est le rôle d'un transformateur?
- 4) Pour quelles raisons la SENELEC est-elle obligée d'utiliser des lignes T.H.T. pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances?
- 5) Préciser les termes suivants: rotor, stator, induit et inducteur.

### **Exercice 13: Les enjeux planétaires de l'énergie**

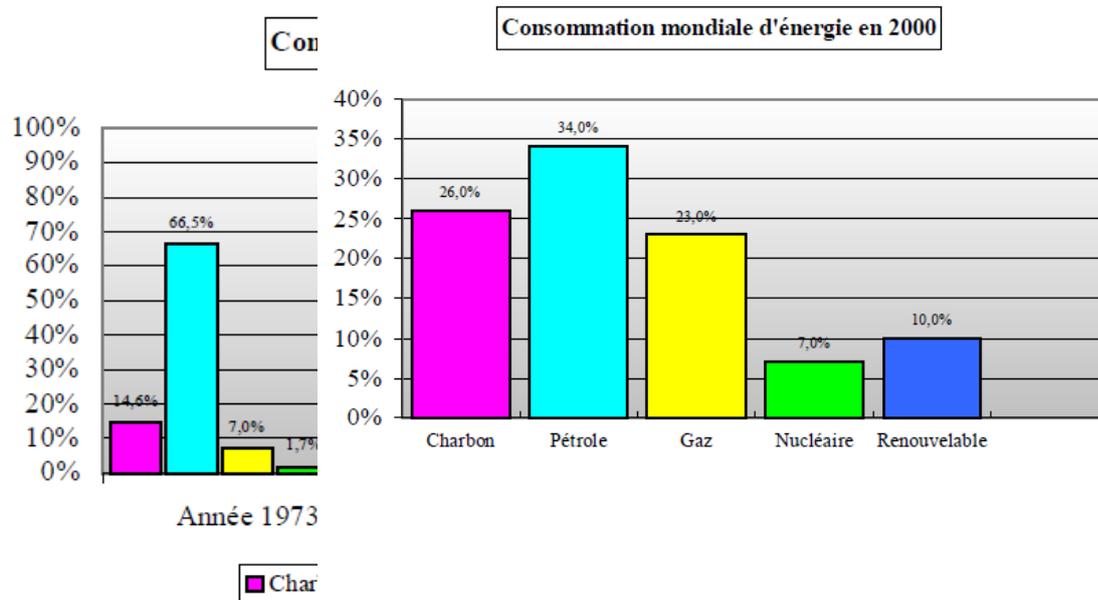
*« Quelques aspects de la situation énergétique mondiale en novembre 2000 »*

Il est devenu clair que les réserves d'énergies fossiles ne sont pas infinies et que leur combustion à marche forcée engendre des problèmes écologiques insurmontables et de plus en plus graves. La concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmentée de 50 % en un siècle et la situation deviendra rapidement insoutenable si les pays en voie de développement adoptent le mode de vie « énergivore » actuel des pays riches. L'époque où une minorité de la population mondiale pouvait accaparer l'essentiel des ressources énergétiques est pratiquement terminée : il n'y a plus de raison pour qu'un Américain consomme chaque année 8,1 tonnes d'équivalent pétrole

alors que pendant ce temps un Chinois n'en consommerait que 0,9.

En France, les gouvernements successifs ont longtemps considéré avoir réglé le problème énergétique, à la fois en terme d'indépendance et en terme de pollution, avec le lancement en 1973 d'un programme nucléaire ambitieux. On s'est très vite rendu compte que ce choix posait autant de problèmes qu'il n'était susceptible d'en résoudre.

La conjonction des tempêtes de décembre 99, des manifestations suscitées par la hausse du pétrole en septembre 2000 et des négociations qui se sont déroulées fin novembre 2000 à la Haye autour du protocole de Kyoto change profondément, et sans doute durablement, la donne. Il va falloir apprendre à se passer des énergies fossiles, qui représentent encore 83 % de la demande d'énergie dans le monde, et développer les énergies renouvelables.



### Questions :

- 1) Quelles sont, d'après les documents ci-dessus, les trois sources d'énergie fossile ?
- 2) Quel est l'avenir de ces trois sources d'énergie ?
- 3) Quel principal problème posent-elles ?
- 4) Quelles sont les sources d'énergie qui pourraient remplacer les sources d'énergie fossile ?
- 5) Quelles sont les trois principales sources d'énergie renouvelable ?
- 6) Expliquer le terme « énergivore ».
- 7) A l'aide des graphiques, justifier ce qu'a été « le programme nucléaire ambitieux de la France »
- 8) Pour l'année 2000, expliquer les différences entre la consommation mondiale d'énergie et la consommation française d'énergie.
- 9) L'unité légale d'énergie est le Joule (J) mais on utilise également le Wattheure (Wh) et la tonne d'équivalent pétrole (tep). Une tonne d'équivalent pétrole correspond à l'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole. On donne :  $0,222 \text{ tep} = 1 \text{ MWh} = 10^6 \text{ Wh}$  et  $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$ 
  - a) Quelle est la consommation énergétique annuelle d'un Américain en Wh ?
  - b) Quelle est la consommation énergétique annuelle d'un Chinois en J ?
  - c) Quelle sera en 2020, la consommation d'énergie nucléaire en France sachant que la consommation totale d'énergie pour cette année sera de 323,5 Mtep ? On donne :  $1 \text{ Mtep} = 10^6 \text{ tep}$ .

### Exercice 14:

Un transformateur de laboratoire porte l'indication suivante: 220V/48V – 300 V.A.

- 1) Calculer le rapport de transformation.
- 2) Calculer l'intensité efficace dans l'enroulement primaire.
- 3) Calculer l'intensité efficace dans l'enroulement secondaire dans l'hypothèse d'un transformateur idéal.

**Exercice 15** : La géothermie ou énergie de la Terre

Une énorme quantité de chaleur est disponible à l'intérieur de la Terre. Son exploitation date de l'antiquité : dans les villes romaines, on a retrouvé des canalisations de sources chaudes,

Dans le sous-sol, la température augmente avec la profondeur d'environ 3° tous les 100 mètres. Ce flux de chaleur provient en grande partie de la désintégration de certaines matières : c'est le phénomène de radioactivité naturelle et de convection.

Dans les régions de volcanisme actif où le flux géothermique est élevé, les roches de l'écorce terrestre sont généralement fracturées et favorisent l'infiltration d'eaux de pluie. La rencontre en profondeur d'une source importante de chaleur peut provoquer l'évaporation de cette eau créant des geysers, des fumerolles et des réservoirs de vapeur dont la température varie de 160°C à 300°C. La vapeur extraite par forage est envoyée directement par des canalisations de surface dans une turbine, elle-même reliée à un alternateur produisant de l'énergie électrique selon le principe des centrales thermiques classiques : c'est l'énergie géothermie haute énergie.

En dehors des régions volcaniques, des nappes d'eau chaude de (50°C à 90°C) souterraines ou aquifères formées de roches poreuses (calcaire, grès, sable) et imbibées d'eau sont situées dans des bassins sédimentaires entre 1000 et 2000 mètres de profondeur. L'exploitation de ces nappes aquifères profondes se fait par des forages de type pétrolier. L'eau géothermale peut être utilisée directement en puits unique si les quantités chimiques le permettent. Lorsque la salinité de l'eau géothermale est importante, afin d'éviter tout risque de pollution ou de corrosion, le fluide pompé dans la nappe passe dans un échangeur, puis est réinjecté dans la nappe par un second forage. L'énergie géothermique basse énergie a différentes applications : chauffage de logement, eau chaude sanitaire, chauffage de serres, séchage de céréales, pisciculture, piscines, fournitures d'eau chaude pour certains procédés industriels.

**Texte extrait de la Revue Française Sofedir (Septembre 1990)**

Répondre aux questions suivantes :

- 1) En utilisant ce texte, découper le en trois parties distinctes et donner à chacune d'elle un titre.
- 2) Donner les différentes étapes de production d'électricité dans les régions à volcanisme actif.
- 3) Quelle est l'origine de la chaleur géothermique ?
- 4) Quelle distinction faire entre l'énergie géothermique haute énergie et l'énergie géothermique basse énergie ?
- 5) Citer quelques applications de l'énergie géothermique basse énergie.

**Exercice 16** :

Compléter les phrases suivantes :

- 1) Un aimant en mouvement devant une bobine dont les bornes sont reliées à un milliampèremètre provoque le passage d'un courant électrique. Ce phénomène est appelé ....., .....et le courant mis en évidence est appelé .....,.....
- 2) Un alternateur est un générateur de .....alternatif. Il transforme de l'énergie..... en énergie.....
- 3) On trouve dans l'alternateur une partie fixe appelée .....et une partie mobile appelée.....

### **Exercice 17 :**

Les mesures relatives à un alternateur idéal comportant  $N_1 = 1100$  spires au primaire et  $N_2 = 60$  spires au secondaire, ont donné des résultats consignés dans le tableau ci-dessous.

1. Que signifie l'expression : transformateur idéal ?
2. Définir et calculer le rapport de transformation.
3. Écrire la relation liant les grandeurs efficaces  $U_1$  ;  $U_2$  ;  $I_1$  et  $I_2$ .
4. Compléter les valeurs manquantes dans le tableau sachant que :  $P_1 = P_2$ .

Intensité efficace	$I_1 = 0,5 \text{ A}$	$I_2 = \dots\dots\dots\text{A}$
Tension efficace	$U_1 = \dots\dots\dots\text{V}$	$U_2 = 12 \text{ V}$

5. Le transformateur précédent est alimenté en tension continue  $U = 220 \text{ V}$ . Quelle est la tension aux bornes du secondaire ?
6. Représenter le symbole normalisé de ce transformateur.

### **Exercice 18:**

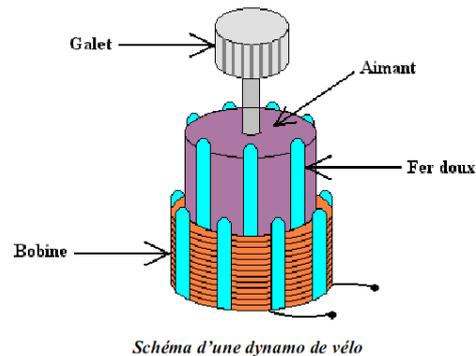
#### Activité documentaire et de questionnement POURQUOI ET COMMENT PRODUIRE DE L'ELECTRICITE ?

#### **Document n°1 :**

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de produire de l'électricité en grande quantité. En France, les trois principaux modes de production sont les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydroélectriques. La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité. Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles, alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur, un grand aimant cerclé d'une bobine, qui va produire un courant alternatif en tournant. Une fois le courant produit, il doit être amené jusque chez le consommateur...À la sortie de la centrale, un premier transformateur, un survolteur, augmente la tension du courant à 400 ou 800000 V. Ceci permet de minimiser les pertes d'énergie pendant le

transport. Près du point de livraison, un deuxième transformateur, un sous-volteur, fait l'opération inverse : il abaisse la tension du courant pour la mettre aux normes du réseau domestique. Il existe d'autres manières efficaces de produire de l'électricité : les panneaux solaires transforment la lumière du soleil en électricité et les éoliennes utilisent la force du vent. Il faut savoir qu'il existe également des usines marémotrices qui utilisent la force des marées, que la géothermie exploite les gisements d'eau chaude stockés dans le sous-sol terrestre, tandis que les usines à biomasse utilisent les déchets comme source d'énergie.

### Document n°2 :



### Questions :

- 1) Quels sont les cinq principaux types de centrales électriques ?
- 2) Quels sont les éléments indispensables à la production de courant électrique dans une centrale thermique ?
- 3) Quelle est la transformation réalisée dans l'ensemble turbine – alternateur ?
- 4) Quel est le mode de fonctionnement d'une dynamo de vélo ?
- 5) Quels sont les points communs entre une centrale thermique et une dynamo de vélo ?

### Exercice 21:

- 1) Le déplacement d'un aimant par rapport à une bobine dont les bornes sont reliées à un microampèremètre produit un courant électrique : c'est le phénomène .....
- 2) Un transformateur est un dispositif qui permet, suivant sa conception et son utilisation, d'élever ou d'abaisser une .....
- 3) L'alternateur est une application du phénomène d'..... son principe repose sur la rotation d'un ..... devant une bobine fixe que l'on désigne par .....
- 4) En régime sinusoïdal, la ..... est le produit de la tension efficace et de l'intensité efficace.
- 5) Un transformateur ne fonctionne pas en .....

## Énergie nucléaire: réaction spontanées, fusion et fission

Le "nucléaire" regroupe l'ensemble des techniques, ou des industries relatives à l'énergie nucléaire : on parle de physique nucléaire, de centrale nucléaire, de force nucléaire, de puissance nucléaire... Une réaction au cours de laquelle des **noyaux** d'atomes subissent des transmutations, est une *réaction nucléaire*.

C'est en 1896, que le physicien français Henri Becquerel découvre que des noyaux atomiques instables peuvent se désintégrer. Ce phénomène **spontané**, aléatoire, s'accompagne de l'émission de particules  $\alpha$ ,  $\beta$  et d'un rayonnement  $\gamma$  très dangereux; il porte le nom de **radioactivité**. Pierre et Marie Curie se consacrèrent à l'étude de ce phénomène. Ils parvinrent à isoler le radium et le polonium, ce qui leur valut le prix Nobel de physique en 1903. Cependant, lorsqu'on parle de production d'énergie nucléaire, on fait référence à un autre type de réaction : les réactions nucléaires **provoquées**.

### I. Le noyau

#### 1. Caractéristiques du noyau

Un **atome** est constitué d'un **noyau** chargé positivement, autour duquel gravitent des **électrons** chargés négativement. Un atome isolé est électriquement neutre.

Le noyau atomique est un assemblage de particules appelées **nucléons**. Il existe deux types de nucléons, caractérisés par leurs masses et leurs charges :

- les **protons** :  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$  kg;  $q_p = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C
- les **neutrons** :  $m_n \approx m_p = 1,675 \cdot 10^{-27}$  kg;  $q_n = 0$  C

La composition d'un noyau est déterminée par deux nombres :

- le **nombre de protons** représenté par le **numéro atomique** ou **nombre de charge Z**;
- le **nombre de nucléons** représenté par le **nombre de masse A**.

Le nombre de neutrons est alors représenté par **N**, tel que **N = A - Z**.

La **notation d'un noyau** atomique de l'élément X (ou **nucléide**) est :



*Exemple* : Les nucléides  ${}^{14}_6\text{C}$  sont les noyaux de l'élément carbone C, constitués de 14 nucléons, soit 6 protons et  $14 - 6 = 8$  neutrons.

#### 2. Notion d'isotopie

Un élément chimique est constitué par les nucléides de même numéro atomique Z. Les isotopes d'un élément chimique sont les nucléides de cet élément, qui diffèrent entre eux par le nombre de neutrons.

Ainsi,  ${}^A_Z X$  et  ${}^{A'}_Z X$  ayant même symbole X, même numéro atomique Z, mais des nombres de masse A et A' différents, sont des isotopes de l'élément X.

Exemples :  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$  et  ${}^3_1\text{H}$  sont les isotopes de l'élément hydrogène  ${}_1\text{H}$ .

${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C}$  et  ${}^{14}_6\text{C}$  sont les isotopes de l'élément carbone  ${}_6\text{C}$ .

${}^{234}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$  et  ${}^{238}_{92}\text{U}$  sont les isotopes de l'élément uranium  ${}_{92}\text{U}$ .

## II. Le rapport entre masse et énergie.

Albert Einstein (1879-1955), prix Nobel en 1921, est l'un des plus grands esprits scientifiques de tous les temps. Sa théorie de la relativité révolutionna les conceptions scientifiques, répondant ainsi à de nombreuses interrogations.

### 1. Défaut de masse: cohésion des noyaux atomiques

Les forces électriques répulsives entre les protons devraient conduire à l'éclatement des noyaux. S'il n'en est rien, c'est qu'il existe une **interaction attractive forte** qui assure la stabilité des noyaux.

On constate par ailleurs, que **la masse d'un noyau (au repos) est toujours inférieure à la somme des masses des nucléons séparés (au repos), qui le composent.**

$$m({}^A_Z\text{X}) < m_{\text{nucléons séparés}} \quad \text{soit} \quad m({}^A_Z\text{X}) < Z.m_p + (A - Z).m_n$$

Le **défaut de masse**  $\Delta m$  d'un noyau, est la différence entre la somme des masses des nucléons séparés (au repos), et la masse du noyau (au repos).

Pour un noyau  ${}^A_Z\text{X}$  ce défaut de masse s'exprime par la relation :

$$\Delta m = Z.m_p + (A - Z).m_n - m({}^A_Z\text{X})$$

Il y a donc lieu de penser que la cohésion des nucléons résulte du défaut de masse du noyau !

### 2. La théorie d'Einstein

La dissociation d'un noyau en ses différents nucléons nécessite un apport d'énergie  $\Delta E$  important. Elle s'accompagne d'une augmentation de masse  $\Delta m$ .

En 1905, Albert Einstein postule qu'une particule possède de l'énergie du seul fait de sa masse. C'est pour cette raison qu'il appelle cette énergie, **énergie de masse**.

L'**énergie de masse E** d'une particule de masse **m** est exprimée par la célèbre relation :

$$E = m.c^2$$

E : énergie de masse (en J) ; m : masse (en kg) ; c : célérité de la lumière dans le vide ( $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Remarque : En physique nucléaire, le joule est une unité d'énergie mal adaptée. C'est pourquoi on préfère utiliser l'**électronvolt**.  $1 \text{ eV} = 1,602.10^{-19} \text{ J}$

### 3. Unité de masse atomique (u) et énergie

La masse d'un noyau ou d'un atome est souvent exprimée en unité de masse atomique (symboles u). L'unité de masse atomique est le douzième de la masse d'un atome de carbone 12 :

$$1 \text{ u} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot N_A} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

D'après la relation ci-dessus, une masse égale à 1 u correspond à une énergie d'environ 931,5 MeV.

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \frac{(3 \cdot 10^8)^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6} = 931,5 \text{ MeV}/c^2 \Rightarrow \boxed{1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2}$$

Exemple : masse du proton =  $1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,00728 \text{ u} = 938,28 \text{ MeV}/c^2$ .

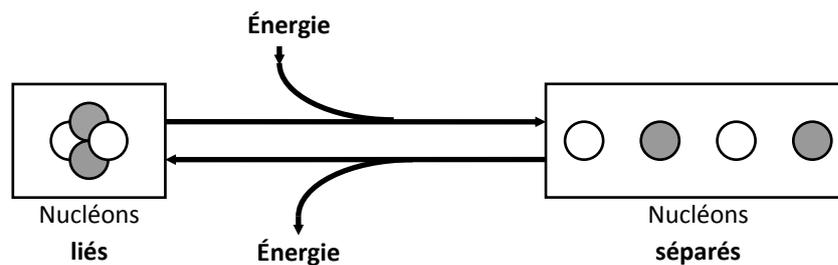
#### 4. Énergie de cohésion (liaison) d'un noyau

C'est l'énergie nécessaire pour libérer les nucléons. Selon la théorie d'Einstein, c'est donc l'énergie équivalente au défaut de masse du noyau.

**La formation d'un noyau (au repos) à partir de ses nucléons séparés (au repos), s'accompagne d'une diminution de masse égale à  $\Delta m$  et par conséquent d'une libération d'énergie égale à  $\Delta E$ , telle que :**

$$\Delta E = \Delta m \times c^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m({}_Z^A X)] \times c^2$$

En résumé :



Exemple : Quelle est l'énergie libérée lors de la formation d'un noyau d'hélium au repos à partir de ses nucléons séparés, au repos ?

Données :  $m({}_2^4 \text{He}) = 6,644 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

- Calculons la somme des masses des nucléons séparés, au repos. Le noyau d'hélium possède 4 nucléons ( $A = 4$ ) dont 2 protons ( $Z = 2$ ) et 2 neutrons ( $N = 4 - 2 = 2$ ).

$$m_{\text{nucléons séparés}} = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n = (2 \times 1,673 \cdot 10^{-27}) + (2 \times 1,675 \cdot 10^{-27}) = 6,696 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

- Calculons le défaut de masse  $\Delta m$  et l'énergie libérée  $\Delta E$  correspondante.

$$\Delta m = m_{\text{nucléons séparés}} - m({}_2^4 \text{He}) = 6,696 \cdot 10^{-27} - 6,644 \cdot 10^{-27} = 0,052 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0,052 \cdot 10^{-27} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 0,468 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

Cette énergie est ridiculement petite !

Mais pour 4 g d'hélium, l'énergie libérée serait d'environ :  $0,468 \cdot 10^{-11} \times 6,02 \cdot 10^{23} = 2,8 \cdot 10^{12} \text{ J}$ .

A titre comparatif, la combustion de 1 L de fuel fournit  $4,2 \cdot 10^7$  J ; il faudrait donc brûler  $2,8 \cdot 10^{12} / 4,2 \cdot 10^7 = 60000$  L de fuel pour obtenir une énergie équivalente !!!

### 5. Énergie de liaison par nucléon

Définition: L'énergie de liaison par nucléon d'un noyau est le quotient de son énergie de liaison par le nombre de ses nucléons. On la note  $E_A$ .

$$E_A = \frac{\Delta E}{A} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} E_A: \text{énergie de liaison par nucléon (en Mev/nucléon)} \\ E_i: \text{énergie de liaison du noyau (en Mev)} \\ A: \text{nombre de nucléons du noyau} \end{cases}$$

Remarque:  $E_A$  permet de comparer la stabilité des noyaux entre eux. Les noyaux dont l'énergie de liaison par nucléon est la plus grande sont les plus stables.

## III. Radioactivité

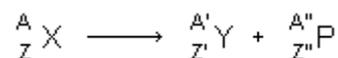
### 1. Définition

La radioactivité (naturelle) est l'ensemble des transformations (désintégrations) spontanées, aléatoire et inéluctables des nucléides instables (radioéléments).

### 2. Lois de conservation: lois de Soddy

**Lors d'une désintégration radioactive  $\alpha$  ou  $\beta$  il y a conservation du nombre de charge Z et du nombre de nucléons A.**

Considérons la désintégration d'un noyau X (appelé noyau père). Cette désintégration conduit à un noyau Y (appelé noyau fils) et à l'expulsion d'une particule P (particule  $\alpha$  ou  $\beta$ ). L'équation de la désintégration s'écrit:



Les lois de conservation de **Soddy** imposent alors:

- Loi de conservation du nombre de nucléons A:  $A = A' + A''$ .
- Loi de conservation du nombre de charges Z:  $Z = Z' + Z''$ .

### 3. Les divers types de radioactivité.

#### a) Radioactivité $\alpha$

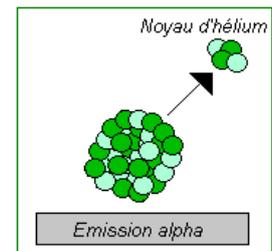
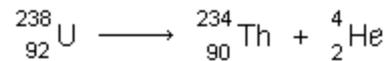
- Définition:

Des noyaux sont dits radioactifs  $\alpha$  s'ils expulsent des noyaux d'hélium  ${}^4_2\text{He}$ .

- Équation de la réaction de désintégration  $\alpha$ .

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit: 
$${}^A_Z X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2\text{He}$$

Par exemple, l'uranium 238 est un radionucléide  $\alpha$ . Son équation de désintégration s'écrit:



- Caractéristiques

Le noyau fils obtenu est un noyau de thorium. Les particules  $\alpha$  émises ont une vitesse de l'ordre de  $20000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Elles provoquent l'ionisation de la matière qu'elles rencontrent, mais sont peu pénétrantes : une simple feuille de papier suffit à les arrêter.

### b) Radioactivité $\beta^-$

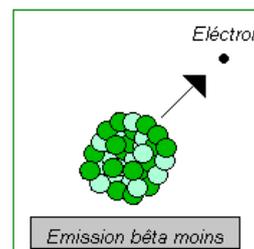
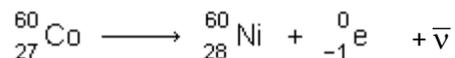
- Définition:

Des noyaux sont dits radioactifs  $\beta^-$  s'ils émettent des électrons notés  ${}_{-1}^0e$  et d'une particule appelée antineutrino  $\bar{\nu}$  (particule neutre et sans masse).

- Équation de la réaction de désintégration.

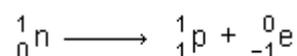
D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit:  ${}^A_Z\text{X} \longrightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$

Par exemple, le cobalt 60 est un radionucléide  $\beta^-$ . Son équation de désintégration s'écrit:

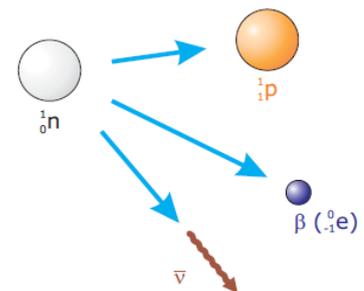


- Origine de l'électron expulsé.

Les radionucléides  $\beta^-$  sont des radionucléides qui possèdent trop de neutrons par rapport aux nucléides stables de même nombre de masse A. La transformation de ce neutron excédentaire produit un électron suivant le bilan:



Il apparaît aussi un proton.  $Z=27$  dans le cobalt devient  $Z'=28$  dans le nickel. Globalement Z augmente d'une unité et N diminue d'une unité. Alors A reste constant.



- Caractéristiques

L'énergie libérée par ce type de désintégration est emportée par l'électron, éjecté à une vitesse de l'ordre de  $280000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  et par l'antineutrino de vitesse presque égale à celle de la lumière dans le vide. Les électrons ainsi produits peuvent traverser une plaque métallique de plusieurs millimètres. Les neutrinos n'interagissent pratiquement pas avec la matière et peuvent traverser la Terre sans être arrêtés.

**c) Radioactivité  $\beta^+$ .**

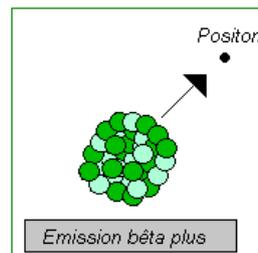
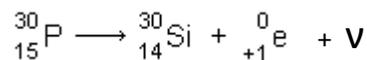
- Définition.

Des noyaux sont dits radioactifs  $\beta^+$  s'ils émettent des positons (ou positrons)  ${}^0_{+1}e$  (Ce sont des particules portant une charge +e) et des neutrinos  $\nu$ .

- Équation de la désintégration.

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit:  ${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1}e + \nu$

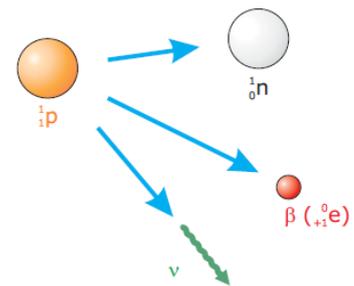
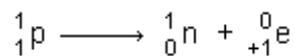
Par exemple, le phosphore 30 est un radio émetteur  $\beta^+$ . Son équation de désintégration est:



- Origine du positon expulsé.

Les radionucléides  $\beta^+$  sont des radionucléides qui possèdent trop de protons par rapport aux nucléides stables de même nombre de masse A.

La transformation de ce proton excédentaire produit un positon suivant le bilan:



Il apparaît aussi un neutron.  $Z=15$  dans le phosphore devient  $Z'=14$  dans le silicium. Globalement N augmente d'une unité et Z diminue d'une unité. Alors A reste constant.

- Caractéristiques

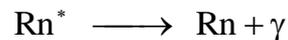
Les vitesses et énergies des rayonnements émis sont du même ordre que pour la radioactivité  $\beta^-$ . La radioactivité  $\beta^+$  est qualifiée de radioactivité artificielle car elle ne se produit que sur des nucléides fabriqués artificiellement.

**Résumé des équations nucléaires**

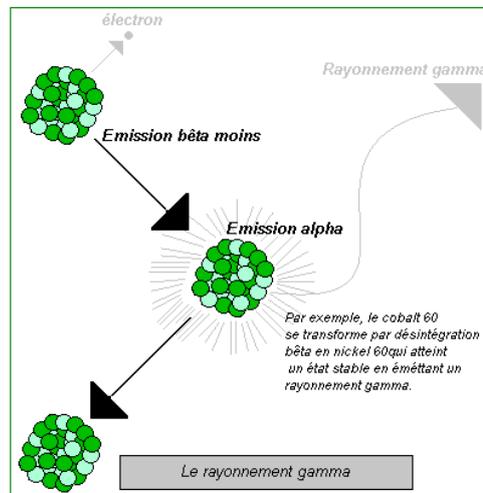
Type de radioactivité	Noyau père	→	Particule émise	+	Noyau fils
$\alpha$	${}^A_Z\text{X}$	→	${}^4_2\text{He}$	+	${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}^*$
$\beta^-$	${}^A_Z\text{X}$	→	${}^0_{-1}\text{e}$	+	${}^A_{Z+1}\text{Y}^*$
$\beta^+$	${}^A_Z\text{X}$	→	${}^0_1\text{e}$	+	${}^A_{Z-1}\text{Y}^*$

Le noyau fils est en général dans un état excité (renfermant un excès d'énergie), il est alors noté  $\text{Y}^*$ . Il libère son excès d'énergie sous forme de rayonnement  $\gamma$  :  $\text{Y}^* \rightarrow \text{Y} + \gamma$ .

Exemple:



La fréquence de ces rayonnements est de l'ordre de  $10^{20}$  Hz, et leur capacité de pénétration est très importante : un rayonnement gamma peut traverser plusieurs mètres de béton.



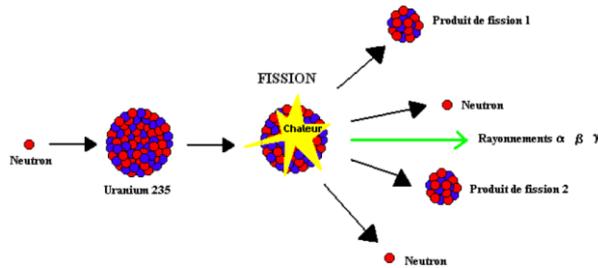
#### IV. Réactions nucléaires provoquées: fission et fusion.

Une réaction nucléaire fait intervenir des nucléides et des particules élémentaires (neutrons, protons, électrons); elle peut être source de rayonnements énergétiques ( $\gamma$  par exemple).

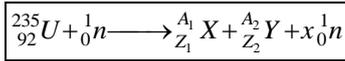
##### 1. La fission

Une réaction de fission est une réaction nucléaire **provoquée**, au cours de laquelle un noyau lourd se scinde en deux noyaux plus légers sous l'impact d'un neutron. Le noyau lourd, **fissile**, est en général un noyau d'**uranium 235**.

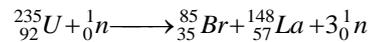
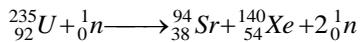
Pour être absorbé, le neutron doit être **lent** (donc peu énergétique); on le nomme **neutron thermique**. Cette réaction libère deux ou plusieurs autres neutrons rapides ...et beaucoup d'**énergie**!



Différentes fissions sont possibles, mais l'équation-bilan est de la forme générale :



Exemples :



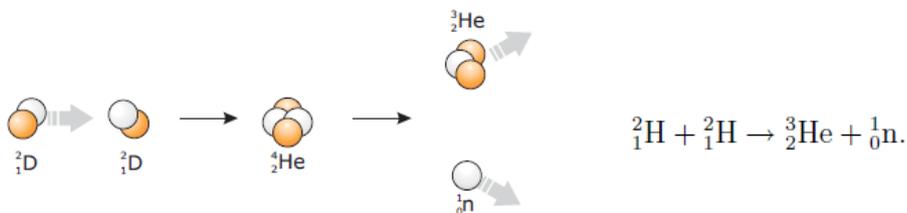
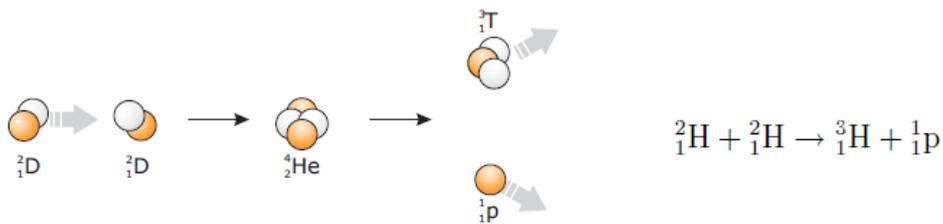
Après ralentissement, les neutrons libérés peuvent à leur tour provoquer la cassure d'autres noyaux lourds : d'où un effet multiplicateur appelé **réaction en chaîne**.

## 2. La fusion

Une réaction de fusion est une réaction nucléaire **provoquée**, au cours de laquelle, dans certaines conditions de température et de pression, deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.

On parle aussi de **réaction thermonucléaire**. Cette réaction libère éventuellement une particule élémentaire (neutron, proton, ...) et beaucoup d'énergie !

Exemples :



### 3. Énergie libérée lors d'une réaction nucléaire

Toute réaction nucléaire (de fission ou de fusion) s'accompagne d'une **perte de masse**. Cette perte de masse représente l'**énergie libérée**.

*Exemple : Quelle est la perte de masse correspondant à la fission d'un noyau d'uranium 235 ?*

$$\Delta m = m(^{235}_{92}\text{U}) + m_n - m_{(X)} - m_{(Y)} - x \cdot m_n \quad \Leftrightarrow \quad \Delta m = m(^{235}_{92}\text{U}) - m_{(X)} - m_{(Y)} - (x-1) \cdot m_n$$

Quelle est l'énergie libérée correspondante ?

$$\Delta E = \Delta m \times c^2 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta E = \left[ m(^{235}_{92}\text{U}) - m_{(X)} - m_{(Y)} - (x-1) \cdot m_n \right] \times c^2$$

La majeure partie de cette énergie apparaît sous la forme d'énergie cinétique des fragments formés, énergie rapidement transformée en chaleur.

## V. Décroissance radioactive

### 1. Caractère aléatoire

Un noyau meurt sans jamais vieillir, c'est-à-dire qu'il ne présente aucun symptôme avant de se désintégrer. Une désintégration radioactive est un phénomène aléatoire, sur lequel il est impossible d'agir : il n'existe aucun facteur susceptible de modifier les caractéristiques de la désintégration d'un noyau.

### 2. Période radioactive ou demi-vie

La période radioactive  $T$  est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés. Elle s'exprime en seconde et est définie par la relation:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

où  $\lambda$  est la constante radioactive, elle s'exprime en seconde moins un ( $s^{-1}$ ) et dépend du nucléide

Périodes de quelques corps radioactifs :				
Éléments chimiques	Période radioactive	Origine	Présence	Exemples d'utilisation
Tritium	12,3 ans	Artificielle		Fusion thermonucléaire Marquage biologique
Carbone 11	20,4 minutes	Artificielle		Imagerie médicale
Carbone 14	5 730 ans	Naturelle	Atmosphère et composés carbonés	Datation
Oxygène 15	2,04 minutes	Artificielle		Imagerie médicale
Phosphore 32	14,3 jours	Artificielle		Recherche en biologie
Soufre 35	87,5 jours	Artificielle		Recherche en biologie
Potassium 40	1,3 milliard d'années	Naturelle	Roches riches en potassium	
Cobalt 60	5,27 ans	Artificielle		Radiothérapie, Irradiation industrielle Gammagraphie
Strontium 90	28,2 ans	Artificielle	Produits des réacteurs nucléaires	Jauges d'épaisseur
Iode 123	13,2 heures	Artificielle		Médecine nucléaire
Césium 137	30,2 ans	Artificielle	Produits des réacteurs nucléaires	Curiothérapie
Thallium 201	3,04 jours	Artificielle		Médecine nucléaire
Thorium 232	14 milliards d'années	Naturelle		Datation des minéraux Combustible potentiel
Radon 222	3,82 jours	Naturelle	Gaz s'échappant des roches granitiques	
Radium 226	1600 ans	Naturelle	Roches terrestres contenant de l'uranium	
Uranium 235	704 millions d'années	Naturelle	Certaines roches terrestres - Roches granitiques	Bombe atomique Combustible
Uranium 238	4,47 milliards d'années	Naturelle	Certaines roches terrestres - Roches granitiques	Combustible dans les réacteurs à neutrons rapides
Plutonium 239	24 100 ans	Artificielle	Produit des réacteurs nucléaires	Bombe atomique Combustible

Remarques

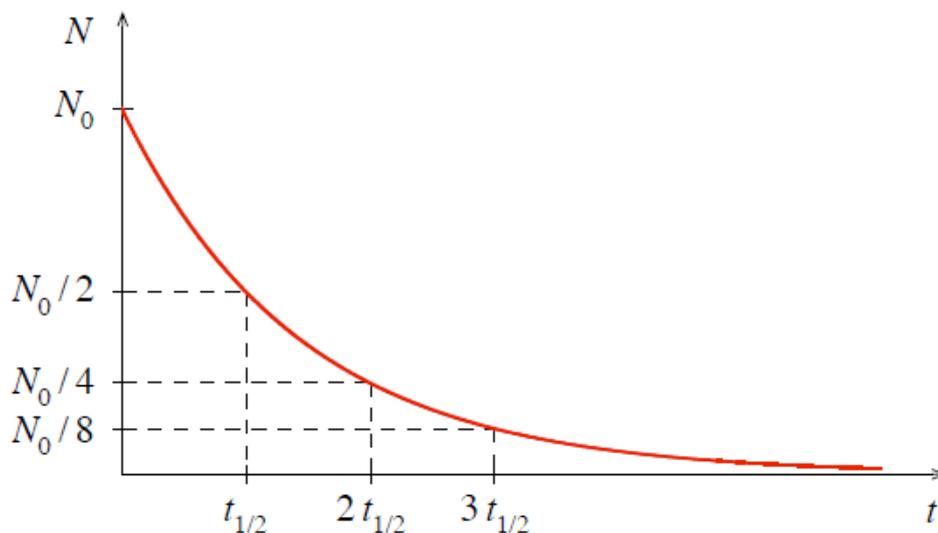
- Selon les éléments, les demi-vies radioactives peuvent varier de quelques nanosecondes à quelques milliards d'années... Les éléments dont la demi-vie est de l'ordre de l'âge de la Terre n'ont pas encore complètement désintégrés donc ils sont encore présents à l'état naturel sur Terre (exemple de l'Uranium 238, de demi-vie égale à 4,47 milliards d'années).
- On dit qu'un noyau radioactif ne vieillit pas puisque quel que soit son âge, ses chances de désintégrations restent les mêmes à tout moment. Par exemple, un noyau de césium 137 a une demi-vie de 30 ans, ce qui signifie qu'il a une chance sur deux de se désintégrer dans les 30 ans qui viennent. S'il ne se désintègre pas durant ses 30 ans, il aura une chance sur deux de se désintégrer dans les 30 ans suivants, et ainsi de suite... Ses chances de désintégrations n'augmentent donc pas avec son âge...

**3. Loi de décroissance**

Soit  $N_0$  est le nombre de noyaux radioactifs initialement présents. Au bout du temps  $n \times T$  le nombre de noyaux présents est donné par la relation:

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

d'où la courbe de dégénérescence ci-contre. (Sa fonction mathématique est:  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ )

**4. Activité radioactive**

L'activité  $A$  d'une quantité donnée d'un élément radioactif est le nombre moyen de désintégration par seconde. L'activité est exprimée en becquerels dont le symbole est Bq. Un becquerel correspond à une désintégration par seconde.

*Henri Becquerel a découvert le phénomène de la radioactivité le 1er mars 1896 à partir de sels d'uranium. Il a reçu le Prix Nobel de Physique en 1903 conjointement avec Pierre et Marie Curie, qui ont prouvé de leur côté que le phénomène n'était pas caractéristique seulement de l'uranium, et qui ont isolé le radium.*

On utilise aussi le curie (symbole: Ci):

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

On peut calculer l'activité par la relation:  $A = \lambda N \Rightarrow A = \lambda N = \frac{\lambda N_0}{2^n} = \frac{A_0}{2^n}$

$$\text{d'où } A = \frac{A_0}{2^n} \text{ avec } A_0 = \lambda N_0$$

La formule mathématique de l'activité en fonction du temps est:  $A = A_0 e^{-\lambda t}$

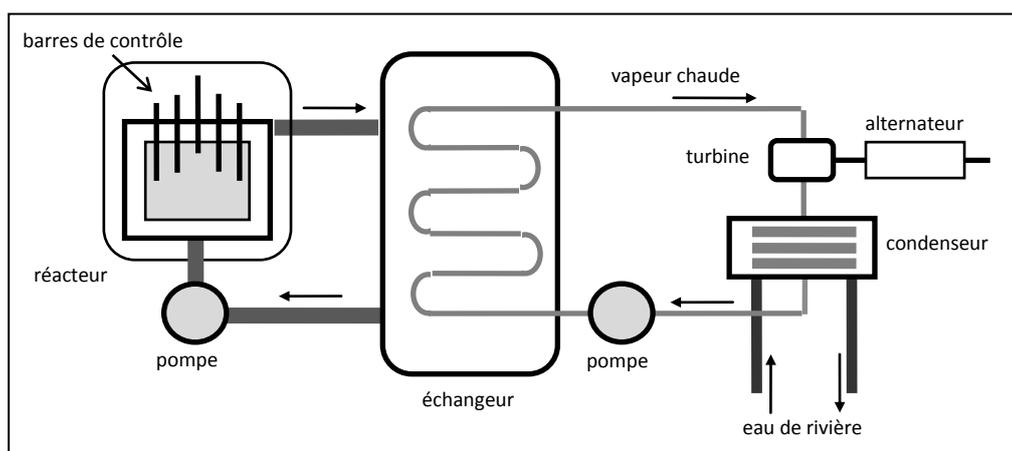
## VI. Les applications civiles des réactions nucléaires.

### 1. Bombe atomique

Au cours d'une réaction de fission, l'énergie dégagée devient très vite considérable. Non contrôlée, la réaction en chaîne conduit à une explosion : c'est le principe de la *bombe atomique* ou **bombe A**.

### 2. Centrale nucléaire

Convenablement maîtrisée dans un **réacteur nucléaire**, cette réaction en chaîne constitue la source d'énergie thermique d'une *centrale électrique*, dont voici le schéma de principe.



Les conditions à remplir pour assurer le fonctionnement du réacteur sont:

- La réaction doit être *auto-entretenu* dans le cœur du réacteur. Les neutrons rapides qu'elle produit, sont ralentis par les nombreux chocs sur les atomes d'un **milieu modérateur** entourant le matériau fissile. Devenus lents, ces neutrons peuvent, à leur tour, donner lieu à de nouvelles réactions de fission. C'est la **réaction en chaîne**.
- La réaction doit être *contrôlée*. Cette régulation s'effectue en plongeant plus ou moins profondément dans le cœur du réacteur, des **barres de contrôle** en graphite, matériau ayant la propriété d'absorber fortement les neutrons.

### 3. Bombes thermonucléaires

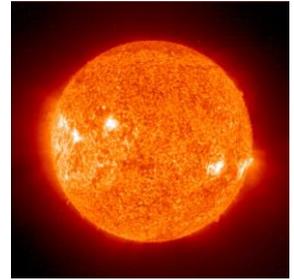
Les réactions de fusion nucléaire, incontrôlées et explosives, sont utilisées dans les *bombes thermonucléaires* appelées « **bombes H** ». L'amorçage de la fusion est alors réalisée grâce à l'énergie libérée par l'explosion d'une bombe A.

La fusion nucléaire contrôlée serait une source d'énergie quasi inépuisable. Malheureusement, elle reste toujours au stade de la recherche.

#### 4. Énergie stellaire

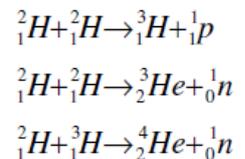
La fusion existe naturellement dans les environnements extrêmement chauds que sont les étoiles, comme le Soleil. Il y a, au cœur du Soleil, une température de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de degrés qui permet la fusion de noyaux légers comme ceux d'hydrogène en hélium.

Les principales réactions de fusion se font à partir de l'hydrogène et de ses isotopes : le deutérium  ${}^2_1\text{H}$  et le tritium  ${}^3_1\text{H}$



Par exemple :

Ces réactions de fusion thermonucléaire libèrent beaucoup d'énergie et expliquent la très haute température qui atteint en surface les 5 700 °C. Une très petite partie de l'énergie rayonnée par le Soleil atteint la Terre et permet la vie sur celle-ci.



#### 5. Effets biologiques de la radioactivité

En traversant le corps, les particules  $\alpha$  et  $\beta$ , ainsi que le rayonnement  $\gamma$ , provoquent des destructions cellulaires. A faible dose ces rayonnements sont responsables d'une augmentation des cancers et d'anomalies génétiques.

On parle d'irradiation lorsqu'un organisme se trouve à proximité d'une source radioactive. Il reçoit alors une partie du rayonnement émis par la source. Il y a contamination lorsque les produits radioactifs sont absorbés par les voies digestives ou respiratoires. Ils peuvent alors se désintégrer au sein même de l'organisme.

Le danger augmente avec l'activité  $A$  de la source radioactive, la proximité de la source, la durée d'exposition et le type de radioactivité (les particules  $\alpha$  sont arrêtées par une feuille de papier ; les particules  $\beta$  par une fine plaque d'aluminium ; le rayonnement  $\gamma$  par une forte épaisseur de plomb ou de béton).

#### 6. Datation

Le carbone 14 est produit en permanence par le rayonnement cosmique à partir de l'azote dans la haute atmosphère. Les échanges qui se produisent entre l'atmosphère et le monde vivant maintiennent quasiment constant le rapport entre la quantité de carbone 14 et celle de carbone 12. Mais, dès qu'un organisme meurt, le carbone 14 qu'il contient n'est plus renouvelé puisque les échanges avec le monde extérieur cessent ; sa proportion se met à décroître car il est radioactif ( $t_{1/2} = 5\,568$  ans). Pour déterminer l'âge du matériau mort, on mesure l'activité résiduelle du carbone 14 d'un échantillon de matériau mort et on applique la formule :

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

avec  $A_0$  est, en première approximation, constante pour les êtres vivants est égale à  $814 \pm 4$  Bq pour un échantillon de 1 g.

### 7. Marquage isotopique en biologie et médecine

On remplace un atome par un isotope radioactif. Le rayonnement émis permet de détecter et localiser la molécule. On peut ainsi suivre son mouvement et même la doser à distance. On étudie ainsi le mode d'action des médicaments, le fonctionnement du cerveau...

## Exercices sur l'énergie nucléaire

### Exercice 1: Questions de cours

- Définir le phénomène de la radioactivité.
- Quelles sont les différentes catégories de particules émises par les corps radioactifs ?
- Comment appelle-t-on le rayonnement électromagnétique émis par les corps radioactifs ?
- Citer les nombres qui sont conservés au cours d'une réaction nucléaire.
- Attribuer à chaque symbole le nom qui lui correspond :  ${}^1_0\text{n}$ ,  ${}^0_{-1}\text{e}$ ,  ${}^1_1\text{p}$ ,  $\bar{\nu}$ ,  $\gamma$ ,  ${}^0_1\text{e}$ ,  $\nu$  ?
- Donner la définition de l'activité d'un échantillon.
- Qu'appelle-t-on période radioactive, ou demi-vie, d'un nucléide ?
- Donner le nom et le symbole de l'unité d'activité.
- Sous quelles formes est libérée l'énergie produite par une réaction nucléaire ?
- Définir l'énergie de liaison par nucléon pour un noyau  ${}^A_Z\text{X}$ .
- Qu'appelle-t-on fission nucléaire ? Citer un exemple de noyau fissile.
- Quel est le projectile utilisé pour provoquer la fission d'un noyau d'uranium ?
- Qu'est-ce qu'une réaction nucléaire en chaîne ?
- Qu'appelle-t-on fusion nucléaire ? Donner un exemple de réaction de fusion.
- Nommer un système qui est le siège de réactions de fusion.

### Exercice 2 :

- Le noyau de l'atome de chlore contient 17 protons et 18 neutrons. Donner la représentation de ce nucléide.
- Le noyau d'uranium 238 a pour représentation  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Calculer le nombre de neutrons et le nombre de protons qu'il contient.

### Exercice 3 :

- Définir fusion et fission nucléaires
- Recopier et compléter les équations-bilans ci-dessous en précisant la méthode utilisée.
  - ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow \text{-----} \text{Pb} + {}^4_2\text{He} + \gamma$
  - ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow \text{-----} \text{N} + {}^0_{-1}\text{e} + {}^0_0\bar{\nu} + \gamma$
- Exprimer l'énergie libérée par la réaction a) en fonction des masses des noyaux impliqués et de la célérité de la lumière (il n'est pas demandé de faire le calcul). Comment cette énergie est répartie ?

- 4) On donne les nucléides suivants identifiés par les couples (Z, A) :  
 (38,94) ; (54,139) ; (92,235) ; (38,95) ; (54,140) ; (93,238) ; (92,238).
- Préciser la signification des lettres Z et A.
  - Déterminer parmi ces nucléides ceux qui sont isotopes.
  - En utilisant le tableau extrait de la classification périodique des éléments, identifiés parmi les nucléides cités ceux qui sont isotopes de l'uranium.

Th	Pa	U	Np	Pu
90	91	92	93	94

**Exercice 4 :**

Une certaine substance radioactive dont la demi-vie est de  $T=10$  s émet  $2.10^7$  particules alpha par seconde.

- Définir l'activité d'une substance radioactive.
- Calculer la constante de désintégration  $\lambda$  de cet isotope.
- Quelle l'activité de cette substance? Préciser son unité.
- Combien y a-t-il de noyaux radioactifs dans cette substance ?
- Combien en restera-t-il après 30 secondes ?

**Exercice 5 :**

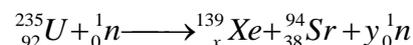
Le polonium  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  est un noyau instable qui donne par désintégration  $\alpha$  un noyau stable de plomb Pb, avec émission de rayonnement  $\gamma$ .

- Quelle est la signification des nombres placés à gauche du symbole Po ? En déduire la composition de ce noyau.
- Calculer en joule et en Mev l'énergie de cohésion par nucléon pour le noyau de polonium.
- Ecrire l'équation de désintégration du noyau de polonium. Quelle est, exprimée en Mev, l'énergie libérée au cours de cette désintégration ? Sous quelles formes se répartit cette énergie ?

**Données :**  $m(\text{Po}) = 210,04 u$  ;  $m(\text{Pb}) = 206,03854 u$  ;  $m(\alpha) = 4,00260 u$  ;  $u = 931 \text{ Mev}/c^2$ .

**Exercice 6 :**

Parmi les diverses réactions de fission de l'uranium 235 bombardé par des neutrons, on considère la réaction suivante :



- Compléter l'équation-bilan en calculant x et y.
- Calculer en MeV, l'énergie libérée par la fission d'un atome d'uranium 235 suivant cette réaction.
- Sous quelle forme peut-on trouver l'énergie libérée ?

**Données :**  $m({}_{92}^{235}\text{U}) = 3,902.10^{-25} \text{ kg}$        $m({}_x^{139}\text{Xe}) = 2,306.10^{-25} \text{ kg}$        $C = 3.10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$   
 $m({}_{38}^{94}\text{Sr}) = 1,559.10^{-25} \text{ kg}$        $m_n = 1,675.10^{-27} \text{ kg}$        $1 \text{ eV} = 1,602.10^{-19} \text{ J}$

**Exercice 7 :**

Une centrale nucléaire type REP utilise comme combustible de l'uranium enrichi en uranium  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .

- 1) Un noyau d'uranium  ${}_{92}^{235}\text{U}$  peut absorber un neutron. Parmi les réactions possibles, il y a celle où apparaissent deux noyaux radioactifs  ${}_{56}^{144}\text{Ba}$  et  ${}_{36}^{89}\text{Kr}$ .

Ecrire l'équation-bilan de cette réaction.

- 2) Une «tranche» de la centrale nucléaire de Gravelines (type REP) fournit une puissance de 900 MW.

On considère que 33 % de «l'énergie thermique» libérée par les réactions nucléaires est transformée en énergie électrique.

- Calculer en MeV, «l'énergie thermique» libérée par les réactions nucléaires durant une journée.
- Sachant qu'au cours de la réaction précédente, chaque noyau d'uranium libère une énergie de 200 MeV, calculer le nombre de réactions de fission qui ont lieu chaque jour.
- En déduire la consommation journalière d'uranium 235 dans cette centrale.

**Données :**  $m({}_{92}^{235}\text{U}) = 3,902 \cdot 10^{-25}$  kg      1 eV =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  J

### Exercice 8 :

Le constituant principal du Soleil ainsi que des autres étoiles jeunes est l'hydrogène. Lorsque le cœur de ces étoiles atteint une température de l'ordre de  $10^7$  K, les protons fusionnent. Cette fusion peut s'effectuer selon un processus dont le bilan est :  $4 {}_1^1\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + 2 {}_1^0\text{e}$

- Calculer l'énergie libérée lors de la formation d'un noyau d'hélium en J et en MeV.
- On considère que toute l'énergie produite par les réactions de fusion est rayonnée par le Soleil. La puissance rayonnée, supposée constante, est égale à  $3,9 \cdot 10^{26}$  W. La masse  $m_s$  du Soleil est de l'ordre de  $2,0 \cdot 10^{30}$  kg. On évalue son âge à 4,6 milliards d'années.

- Calculer la perte de masse  $\Delta m_s$  subie par le Soleil depuis qu'il rayonne.
- Calculer la fraction de la masse actuelle que cela représente.

**Données :**  $m({}_1^1\text{H}) = 1,67310^{-27}$  kg;  $m({}_2^4\text{He}) = 6,644 \cdot 10^{-27}$  kg;  $c = 3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>;  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg; 1 eV =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  J

### Exercice 9: Enjeux planétaires énergétiques.

En France, 78% de l'électricité est d'origine nucléaire. C'est l'une des plus compétitives d'Europe." Grâce à son parc de 58 réacteurs, la France atteint un taux d'indépendance énergétique proche de 50%, lui garantissant une grande stabilité d'approvisionnement.

Le nucléaire est une énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre. Dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique phénomène désormais bien compris des scientifiques, et défini comme inéluctable, il apparaît indispensable d'utiliser des modes de production d'énergie qui n'agissent pas sur ce réchauffement, afin de ne pas l'aggraver encore. Le nucléaire a sans aucun doute, aux côtés d'autres énergies, comme les énergies renouvelables, un rôle important à jouer pour contribuer à préserver l'environnement.

*D'après le site Internet du CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) [www.cea.fr/fr/jeunes/QR/nucleaire\\_1 .htm](http://www.cea.fr/fr/jeunes/QR/nucleaire_1.htm)*

- Citer un des principaux gaz responsable de l'effet de serre.
- Citer deux types d'énergies renouvelables.
- L'énergie nucléaire en fait-elle partie? Pourquoi ?

- 4) D'après le texte, que peut-on dire des centrales nucléaires du point de vue du respect de l'environnement ?
- 5) Proposer deux inconvénients des centrales nucléaires qui nuancent les propos de ce document.
- 6) Que représentent les nombres 235 et 92 ?
- 7) Comment appelle-t-on la réaction nucléaire que l'on fait subir à l'uranium 235 dans une centrale nucléaire ?

**Exercice 10: Répondre par vrai ou faux**

- 1) La masse d'un noyau est inférieure à la somme des masses de ses nucléons.
- 2) Plus l'énergie de liaison par nucléon est grande, plus le noyau est stable.
- 3) Deux isotopes ont des noyaux de même masse.
- 4) Un noyau contient toujours autant de neutrons que de protons.
- 5) On donne:  $^{10}_4\text{Be}$ ;  $^9_4\text{Be}$ ;  $^8_4\text{Be}$ ;  $^7_4\text{Be}$ ;  $^7_3\text{Li}$ ;  $^{12}_6\text{C}$ ;  $^{10}_5\text{X}$ .
  - a)  $^7_4\text{Be}$  et  $^7_3\text{Li}$  sont isotopes.
  - b) La réaction nucléaire produisant  $^7_3\text{Li}$  à partir de  $^7_4\text{Be}$  est du type  $\beta^+$ .
  - c) La réaction nucléaire produisant  $^{10}_5\text{X}$  à partir de  $^{10}_4\text{Be}$  est du type  $\beta^+$ .
  - d) Un atome de  $^9_4\text{Be}$  fixe une particule alpha pour libérer :
    - i) un neutron et  $^{12}_6\text{C}$ .
    - ii) un neutron et  $^8_4\text{Be}$ .

**Exercice 11 :**

Une certaine substance radioactive dont la demi-vie est de  $T = 10$  s émet  $2 \cdot 10^7$  particules alpha par seconde.

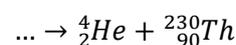
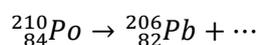
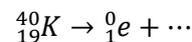
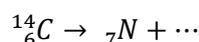
- 1) Définir l'activité d'une substance radioactive.
- 2) Calculer la constante de désintégration  $\lambda$  de cet isotope.
- 3) Quelle l'activité de cette substance? Préciser son unité.
- 4) Combien y a-t-il de noyaux radioactifs dans cette substance ?
- 5) Combien en restera-t-il après 30 secondes ?

**Exercice 12:** On donne pour tout l'exercice:

$$1u = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}; 1\text{MeV} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ J}; 1u = 931,494 \text{ MeV}/c^2$$

Les questions sont indépendantes

- 1) Pour un atome de fer:  $^{56}_{26}\text{Fe}$ , quels sont les nombres de nucléons, de protons, de neutrons et d'électrons dans le cortège électronique?
- 2) Que peut-on dire des noyaux des nucléides:  $^{30}_{15}\text{P}$  et  $^{32}_{15}\text{P}$ ?
- 3) Donner une valeur approchée de la masse d'un atome de cobalt représenté par  $^{60}_{27}\text{Co}$ .
- 4) Qu'est-ce qu'une fission nucléaire? Qu'appelle-t-on fusion nucléaire.
- 5) Compléter les équations-bilan suivantes. Chacune d'elles ne fait intervenir qu'une seule désintégration  $\alpha$ ,  $\beta^-$  ou  $\beta^+$ . On donne les éléments:  $^{90}\text{Th}$ ;  $^{92}\text{U}$ ;  $^{29}\text{Cu}$ ;  $^{26}\text{Fe}$ ;  $^{28}\text{Ni}$ ;  $^{20}\text{Ca}$ ;  $^{93}\text{Np}$ ;  $^{18}\text{Ar}$ ;



- 6) Le nucléide  $^{60}_{27}\text{Co}$  utilisé en radiothérapie se désintègre par radioactivité  $\beta^-$ .

- a) Écrire l'équation de la désintégration.  
 b) Sachant que sa période radioactive vaut  $T=5,3$  ans, quelle est la proportion des noyaux radioactives restant au bout d'une durée de 53 ans.
- 7) Calculer la perte de masse (en u) et l'énergie libérée (en MeV) :  ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U}$   
 On donne:  $m({}^{235}\text{U})=235,04393\text{u}$ ;  $m({}^{236}\text{U})=236,04556\text{u}$ ;  $m(\text{n})=1,00866\text{u}$

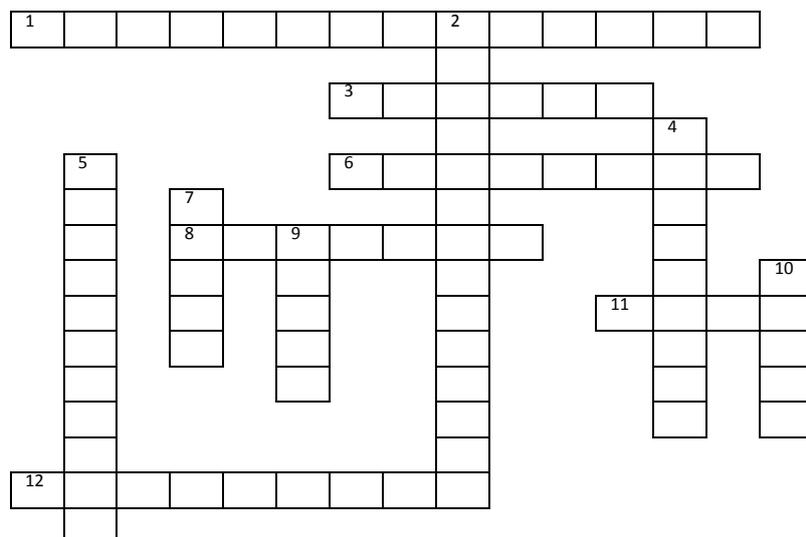
### Exercice 13 : Mots croisés

#### Indices Horizontaux

- 1: transformation d'un atome radioactif en un autre atome
- 3: mot latin qui signifie "rayon"
- 6: atomes ayant le même nombre de protons et un nombre différent de neutrons
- 8: émet des rayonnements invisibles semblables aux rayons X
- 11: émission d'un électron ou d'un positon
- 12: ces rayonnements nous parviennent sans arrêt de l'Univers et sont parfois très énergétiques

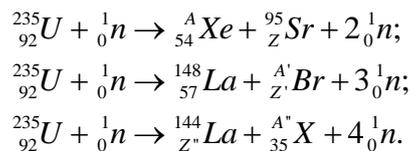
#### Indices Verticaux

- 2: nom donné aux atomes radioactifs
- 4: unité d'activité qui est le nombre de désintégrations de noyaux radioactifs par seconde
- 5: exposition aux rayons x
- 7: les ..... isolèrent le polonium et le radium radioactifs du minerai d'uranium
- 9: rayonnement constitué d'un atome d'hélium comprenant 2 protons et 2 neutrons
- 10: ce rayonnement est une onde électromagnétique comme la lumière visible ou les rayons X mais plus énergétique



### Exercice 14:

la fission d'un noyau d'uranium 235 bombardé par un neutron, fourni divers produit. Parmi les réactions qui se produisent, on peut citer:



- 1) Déterminer  $A, Z, A', Z', A''$  et  $Z''$ .
- 2) A partir des résultats obtenus, déduire la nature de X.

**Exercice 15:**

**Lire attentivement le texte et répondre aux questions.**

« Le samedi 26 avril 1986 à 1h 30 min, à la suite de manœuvres aberrantes, une explosion de vapeur d'eau se produit dans le réacteur n°4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl.

La dalle de béton située au-dessus du réacteur, d'une masse de mille tonnes, et plusieurs dizaines de tonnes de combustible radioactif fondu sont projetées sur les bâtiments environnants, y allumant des incendies. Le graphite, modérateur du réacteur, s'enflamme. Une partie des produits radioactifs d'activité estimée à environ  $10^{18}$  Bq ; celui-ci survolera ensuite une grande partie de l'hémisphère Nord ».

- 1) Donner un titre au texte.
- 2) Quelle est l'utilité de la dalle de béton de mille tonnes ?
- 3) Décrire sommairement l'effet modérateur du graphite.
- 4) Quels sont les effets néfastes de cet évènement sur l'environnement ?
- 5) Définir l'activité d'une substance radioactive, préciser son unité.

**Exercice 16:**

La constante radioactive du césium 137 est  $\lambda = 7,32 \cdot 10^{-10} \text{s}^{-1}$ .

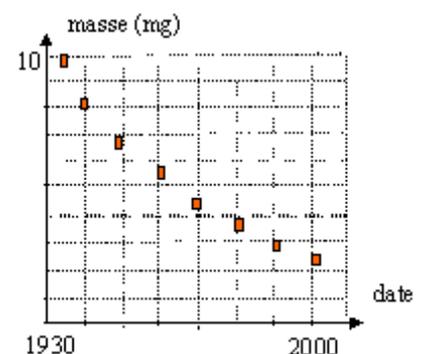
- 1) Calculer, en année, la période radioactive du césium 137 (On exprimera le résultat en une valeur entière)
- 2) Déterminer l'activité  $A_0$  d'un échantillon de césium 137 à la date  $t=0$  si le nombre de noyaux initialement présents est  $N_0 = 1,0 \cdot 10^{24}$ .
- 3) Déterminer son activité au bout de 30 ans et au bout 60 ans.
- 4) D'une façon plus générale, exprimer son activité au bout de  $n$  demi-vie en fonction de  $A_0$

**Exercice 17:**

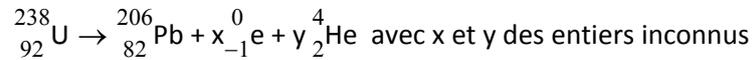
Un laboratoire étudie un échantillon de césium 137 de date de fabrication et de masse inconnues. Le graphe représente l'évolution de la masse de césium 137 en fonction du temps.

À partir du graphe, choisir la bonne réponse:

- 1) La demi-vie du césium 137 est :  
**1957 ans ; 1965 ans ; 35 ans ; 30 ans.**



- 2) On considère une substance radioactive qui émet  $2 \cdot 10^7$  particules alpha par seconde et dont la demi-vie est 10 s.  
Le nombre de noyaux radioactifs dans cette substance est :  $2 \cdot 10^8$  ;  $1,4 \cdot 10^6$  ;  $1,4 \cdot 10^7$  ;  $2,9 \cdot 10^8$ .
- 3) L'uranium 238 subit plusieurs désintégrations successives de type  $\alpha$  et  $\beta^-$  et se transforme en plomb 206 selon l'équation de la réaction:



Le nombre de désintégrations de chaque type pour passer de l'uranium 238 au plomb 206 est :

- **8 désintégrations de type  $\alpha$  et 6 désintégrations de type  $\beta^-$ .**
- **6 désintégrations de type  $\alpha$  et 8 désintégrations de type  $\beta^-$ .**
- **8 désintégrations de type  $\alpha$  et 1 désintégrations de type  $\beta^-$ .**
- **4 désintégrations de type  $\alpha$  et 3 désintégrations de type  $\beta^-$ .**

### Exercice 18:

On considère la réaction de fusion suivante:  ${}_2^3\text{He} + {}_2^3\text{He} \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2 {}_1^1\text{p}$

- 1) Définir une réaction de fusion.
- 2) Calculer en MeV l'énergie nucléaire libérée par la réaction.
- 3) Calculer l'énergie de cohésion d'un noyau d'hélium  ${}_2^4\text{He}$ . En déduire son énergie de liaison par nucléon.

Données: Masses des particules:  $m({}_2^3\text{He}) = 3,0149u$ ;  $m({}_2^4\text{He}) = 4,0015u$ ;  $m_p = 1,0073u$ ;  $1u=931,5 \text{ MeV}/c^2$

## Généralités sur les signaux et ondes mécaniques

### I. Généralités

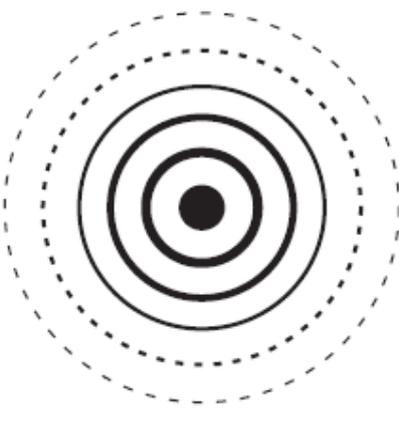
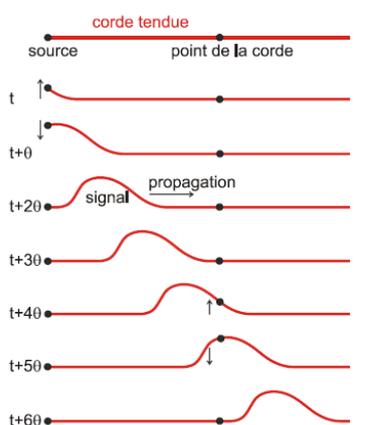
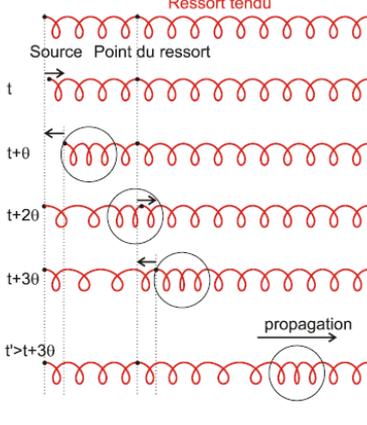
#### 1. Signal ou perturbation d'un milieu au repos

##### a) Définition d'un signal

On appelle signal ou perturbation toute modification temporaire et locale d'un milieu.

##### b) Expériences

Que se passe-t-il si on exerce une perturbation sur un milieu matériel ?

<p><u>Expérience a</u> : on fait tomber une goutte sur un plan d'eau au repos.</p>	<p><u>Expérience b</u> : on déplace très rapidement et verticalement l'extrémité d'une corde posée sur un support horizontal.</p>	<p><u>Expérience c</u> : on pince brièvement quelques spires d'un ressort posé horizontalement.</p>
		

##### c) Observations

Dans ces trois expériences, on observe que :

- la déformation se propage (se déplace) tout au long du milieu matériel
- la déformation est une perturbation, car le milieu matériel revient dans son état initial : le repos
- globalement, la matière ne s'est pas déplacée

#### 2. Définitions

##### a) Définition d'une onde mécanique

On appelle onde mécanique le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel sans qu'il y ait transport de matière.

##### Remarque importante

Une onde mécanique ne peut pas se propager dans le vide, puisque, par définition, elle se propage au sein de la matière.

Dans les trois expériences, on a donc affaire à une onde mécanique. Le milieu de propagation de cette onde est :

- la surface de l'eau pour l'expérience a:
- la corde pour l'expérience b
- le ressort pour l'expérience c

### b) Définition de la source d'une onde

On appelle source de l'onde l'endroit où naît la perturbation.

Dans les trois expériences, la source de l'onde est :

- le point d'impact de la goutte sur le plan d'eau pour l'expérience a
- l'extrémité de la corde pour l'expérience b
- les spires pincées pour l'expérience c

## 3. Nature d'une onde mécanique

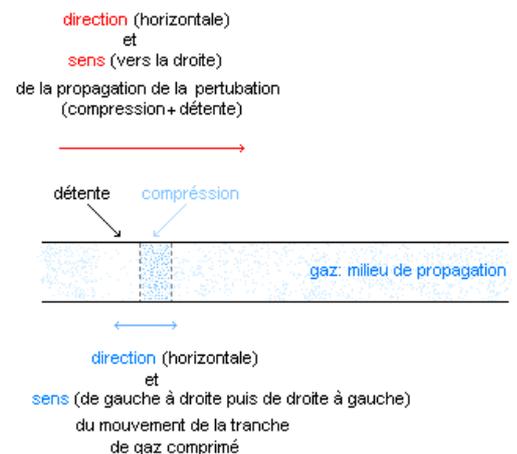
### a) Définition d'une onde progressive

Une onde mécanique est dite progressive si la perturbation qu'elle provoque s'éloigne de plus en plus de la source de l'onde au fur et à mesure que le temps s'écoule.

### b) Définition d'une onde mécanique progressive longitudinale

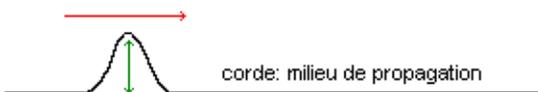
Une onde mécanique progressive est dite longitudinale si la matière affectée par la perturbation oscille parallèlement à la direction de propagation de l'onde.

Dans l'expérience c, on a affaire à une onde longitudinale. En effet, les spires du ressort oscillent horizontalement au passage de la perturbation et cette perturbation (la zone de compression) se déplace dans la même direction.



### c) Définition d'une onde mécanique progressive transversale

direction (horizontale)  
et  
sens (de gauche à droite)  
de propagation



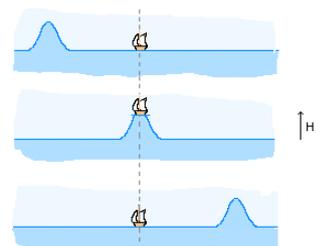
direction (verticale)  
et  
sens (de bas en haut puis de haut en bas)  
de déplacement des points  
de la corde

#### Remarque

Si on avait placé un objet flottant sur le plan d'eau, cet objet, au passage de l'onde, oscille verticalement et ne se déplace pas horizontalement.

Une onde mécanique progressive est dite transversale si la matière affectée par la perturbation oscille dans une direction perpendiculaire à celle de la propagation de l'onde.

Dans les expériences a et b, on a affaire à une onde transversale. En effet, la corde ou la surface de l'eau oscillent verticalement au passage de la perturbation, alors que cette perturbation (la vague) se déplace horizontalement.



## II. Propriétés générales des ondes mécaniques progressives.

### 1. Direction de propagation

Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes. On distinguera ainsi les ondes à une, deux ou trois dimensions.

### 2. Célérité de l'onde.

On appelle célérité  $v$  de l'onde la vitesse de propagation de l'onde. C'est le rapport entre la distance  $d$  parcourue par l'onde et la durée  $\Delta t$  du parcours.

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} v \text{ en mètre par seconde (ms}^{-1}\text{)} \\ d \text{ en mètre (m)} \\ \Delta t \text{ en seconde (s)} \end{cases}$$

On préfère le mot célérité au mot vitesse auquel est associée la notion de déplacement de matière (vitesse d'une automobile, d'une particule etc...).

La célérité de l'onde est une propriété du milieu de propagation et ne dépend pas de la façon dont la source a engendré l'onde. Elle est donc constante dans un milieu donné dans des conditions données.

- Par exemple la célérité du son dans l'air dépend de sa température.

Signal	Milieu de propagation	Célérité en m/s
Son	air à 0°C	330,7
	air à 20°C	342,6
	air à 40°C	354,1
	eau de mer à 15°C	1500
	acier (ondes transversales)	3240
	acier (ondes longitudinales)	5880
	hydrogène à 20°C	1300

- La célérité d'une onde se propageant sur une corde dépend de sa tension et de sa masse linéique (masse par unité de longueur).

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \text{avec} \quad \mu = \frac{m}{L} \Rightarrow v(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}); T(\text{N}) \text{ et } \mu(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$$

### 3. Croisement de deux ondes.

Deux ondes se propageant dans le même milieu peuvent se croiser sans se perturber mutuellement.



### III. Onde progressive périodique à une dimension:

#### 1. Rappels sur le mouvement périodique

Définition: Un mouvement périodique est un mouvement qui se répète à intervalles de temps égaux.

Définition: La période d'un phénomène périodique est la durée au bout de laquelle le phénomène se répète identique à lui-même. On la note T et elle s'exprime en secondes (s).

Définition: La fréquence d'un phénomène périodique représente le nombre de phénomènes effectués par seconde. On la note généralement f, son unité est le hertz (Hz). La fréquence est l'inverse de la période:

$$f = \frac{1}{T} \text{ avec } \begin{cases} f: \text{fréquence du phénomène en hertz (Hz)} \\ T: \text{période du phénomène en secondes (s)} \end{cases}$$

#### 2. Étude expérimentale

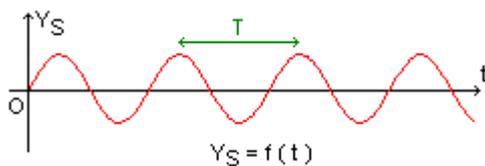
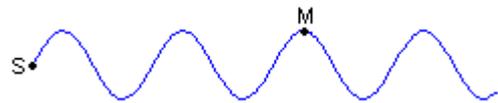
Soit une source S imposant une perturbation périodique sinusoïdale au milieu de propagation (échelle de perroquet ou corde).



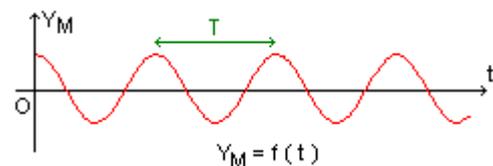
On constate qu'une onde progressive périodique se propage dans le milieu.

#### 3. Périodicité temporelle T

Ci-contre, l'aspect de la corde à un instant donné. L'élongation de la source et d'un point M quelconque est en général différente, mais on peut remarquer une périodicité dans le mouvement de chaque point de la corde.



L'élongation de la source S est périodique de période T. C'est une fonction sinusoïdale du temps.

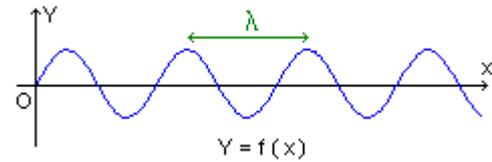


L'élongation du point M est elle aussi périodique de même période T.

**La période du mouvement de chaque point de la corde est imposée par la source S.**

#### 4. Périodicité spatiale $\lambda$

L'aspect de la corde à un instant donné est une fonction sinusoïdale de l'abscisse  $x$  de chacun des points du milieu.

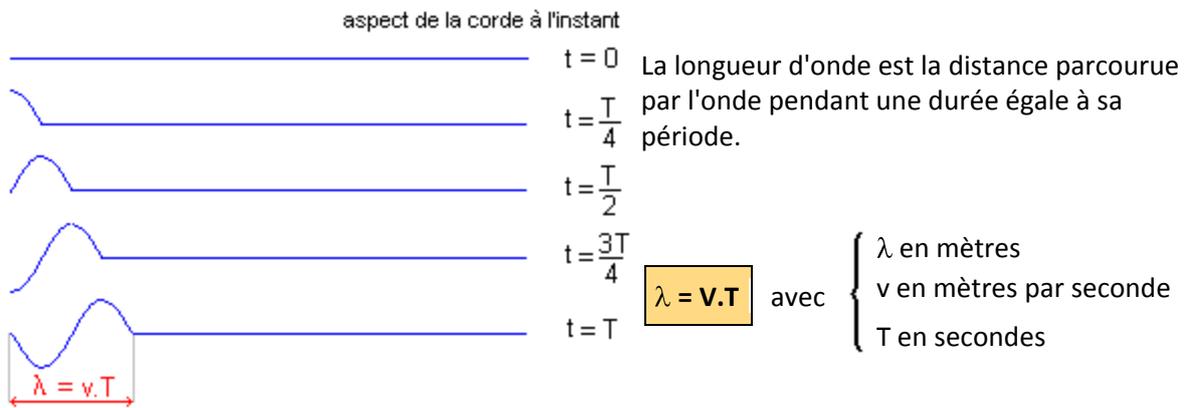


**Définition:** On appelle longueur d'onde (notée  $\lambda$ ) la période spatiale de l'onde progressive périodique.

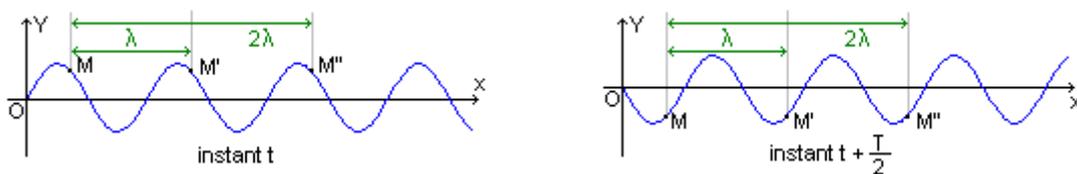
L'onde présente donc une double périodicité:

- une périodicité temporelle de période  $T$  (exprimée en secondes).
- une périodicité spatiale de période  $\lambda$  (exprimée en mètres).

#### 5. Relation entre période $T$ et longueur d'onde $\lambda$



#### 6. Points vibrants en phase – points vibrants en opposition de phase



- Les points  $M$ ,  $M'$  et  $M''$  conservent la même élongation quelque soit l'instant  $t$ . On dit que les points  $M$ ,  $M'$  et  $M''$  **vibrent en phases**.

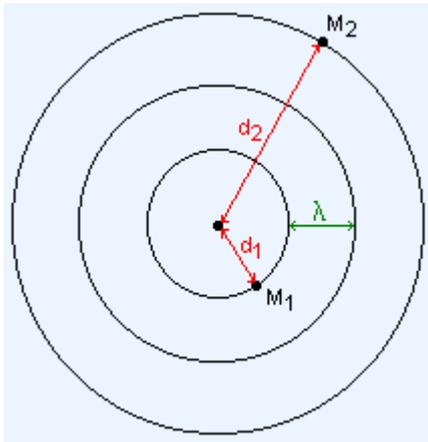
**Remarque:** tous les points d'une corde, séparés par des distances  $\lambda$ ,  $2\lambda$ , ...,  $n\lambda$  ( $n \in \mathbb{Z}$ ) ont à tout instant la même élongation: ils vibrent donc en phase  $\Rightarrow d = n\lambda$

- Deux points de la corde séparés par des distances  $\frac{\lambda}{2}$ ,  $(\lambda + \frac{\lambda}{2})$ ,  $(2\lambda + \frac{\lambda}{2})$ , ...,  $(n\lambda + \frac{\lambda}{2})$  ont à tout instant des élongations opposées: ils vibrent en opposition de phase  $\Rightarrow d = \frac{(2n+1)\lambda}{2}$

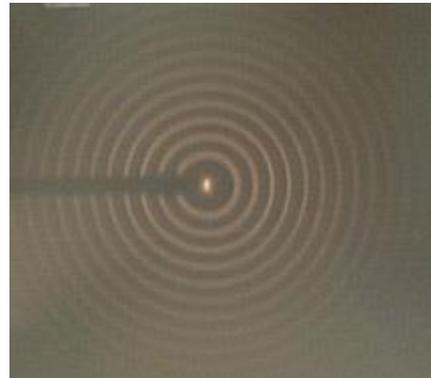
## IV. Cas des ondes à deux ou à trois dimensions

### 1. Ondes à la surface de l'eau

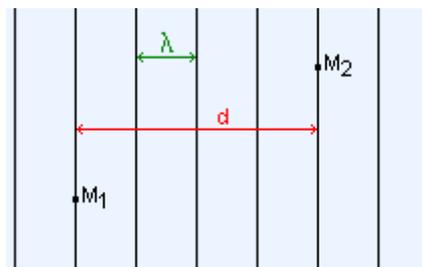
Ondes circulaires



Les points  $M_1$  et  $M_2$  vibrent en phase si  $|d_2 - d_1| = k\lambda$ .



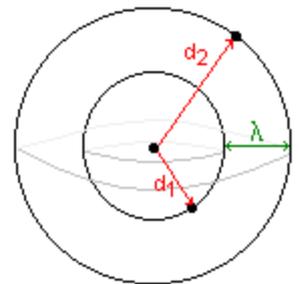
Ondes rectilignes



Les points  $M_1$  et  $M_2$  vibrent en phase si  $d = k\lambda$ .

### 2. Ondes sonores

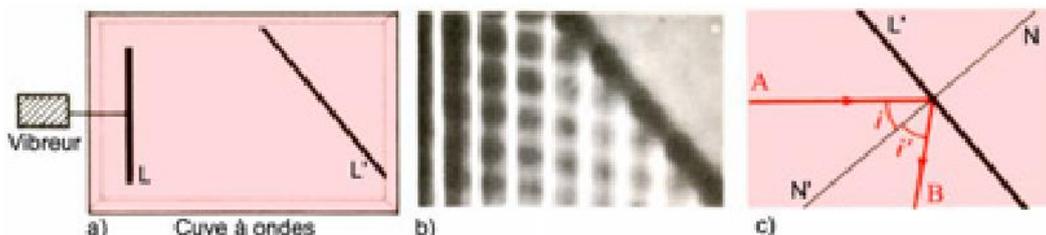
Les ondes sonores sont des ondes mécaniques longitudinales de compression-dilatation. Elles ne peuvent se propager dans le vide et leur propagation nécessite un milieu matériel élastique. Les points  $M_1$  et  $M_2$  vibrent en phase si  $|d_2 - d_1| = k\lambda$ . (voir image ci-contre).

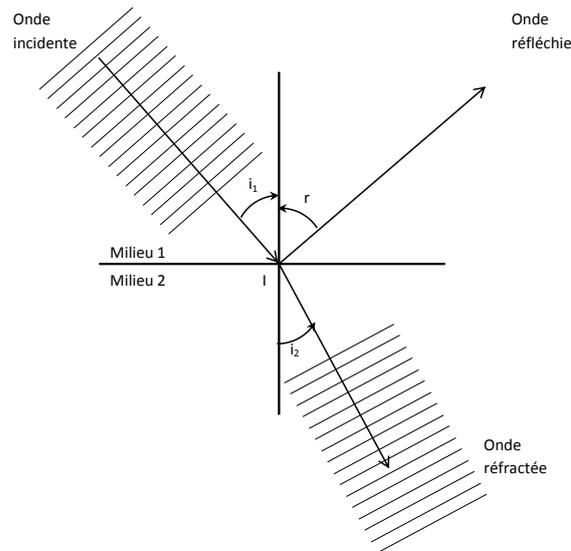


## V. Réflexion, réfraction, diffraction

### 1. Réflexion et réfraction à la surface de l'eau

#### a) Mise en évidence





### b) Définitions

- Lorsqu'une onde arrive contre un obstacle, elle est renvoyée par celui-ci. Ce phénomène est appelé la réflexion.
- La réfraction est le brusque changement de direction de propagation de l'onde lorsqu'elle traverse la surface de séparation de deux milieux transparents.

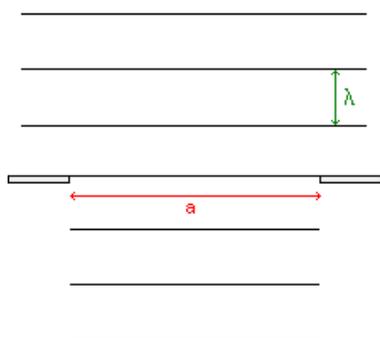
### c) Lois de la réflexion et de la réfraction: loi de Descartes

- L'onde incidente, l'onde réfléchie et l'onde réfractée sont contenues dans un même plan appelé plan d'incidence.
- L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.
- L'onde incidente et l'onde réfléchie sont situées de part et d'autre de la normale à la surface de séparation.
- Les ondes incidente et réfléchie ont la même longueur d'onde  $\lambda$ , la même célérité  $V$  donc la même période  $T$ .

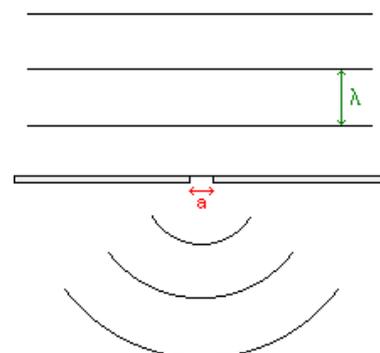
## 2. Diffraction d'une onde progressive sinusoïdale

Soit une onde plane périodique rencontrant un obstacle ou une ouverture.

**Cas n°1**  
L'ouverture est de grande taille par rapport à la longueur d'onde  
( $\lambda$  négligeable par rapport à  $a$ ).

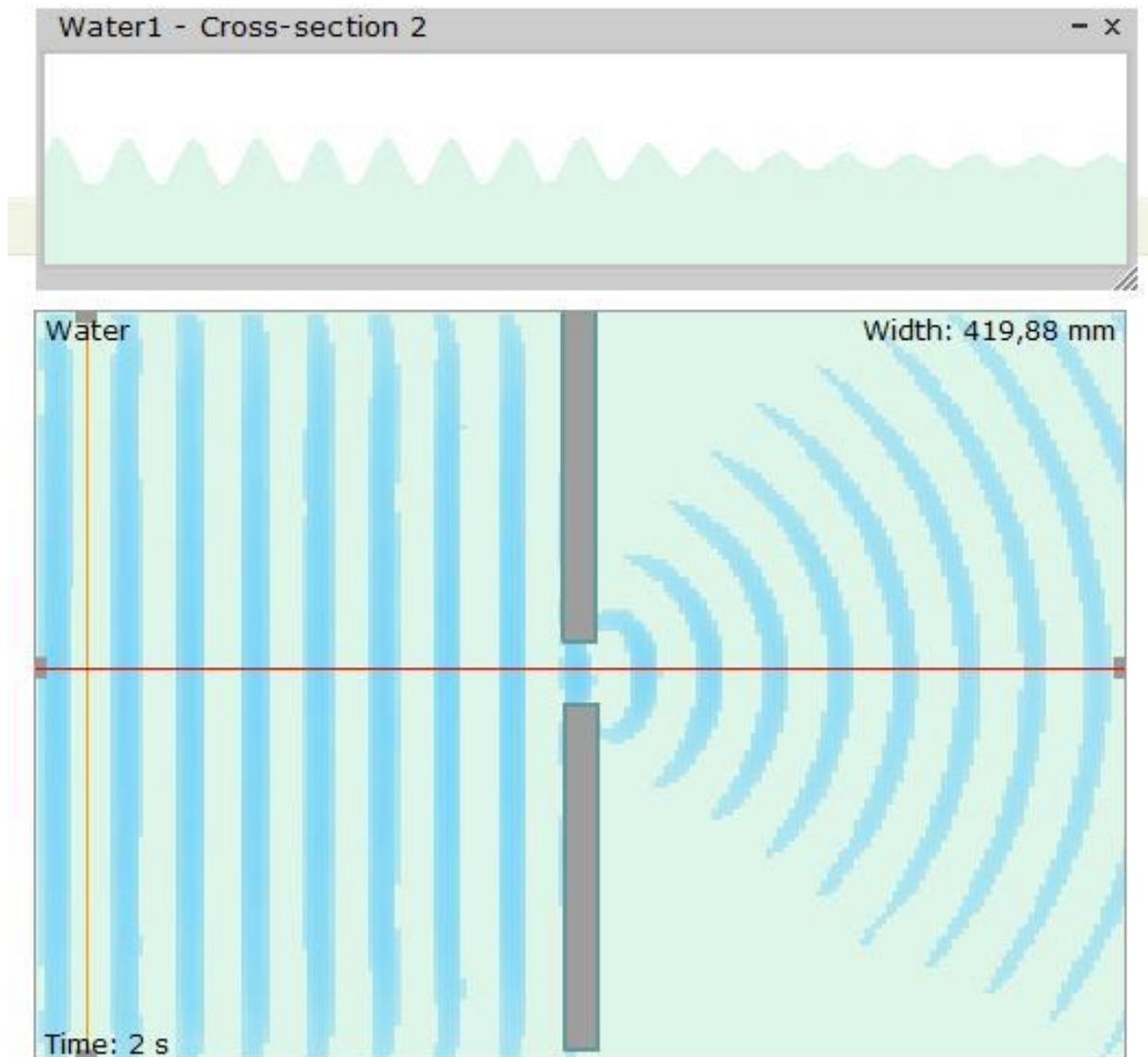


**Cas n°2**  
L'ouverture est de petite taille par rapport à la longueur d'onde  
( $\lambda$  non négligeable par rapport à  $a$ ).



Dans le cas n°1, l'onde est de même nature que l'onde incidente rectiligne mais elle épouse la forme de l'ouverture: elle est dite **diaphragmée**.

Dans le cas n°2, l'onde change de direction et de comportement sans changement de sa longueur d'onde: elle est **diffractée** (le phénomène mis en évidence s'appelle la **diffraction**).



### 3. Interférences mécaniques

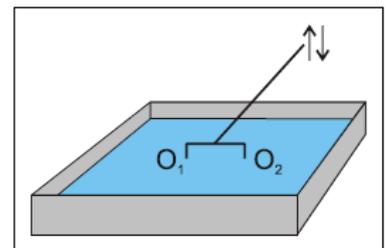
L'interférence est un phénomène qui résulte de la superposition de deux ondes de même nature et de même fréquence. Les sources émettrices de ces ondes doivent être cohérentes.

#### a) Dispositif expérimental

Une fourche munie de deux pointes est fixée à l'extrémité d'un vibreur. Les points  $O_1$  et  $O_2$  ont ainsi même fréquence et constituent deux sources cohérentes. Elles font naître à la surface de l'eau des ondes circulaires.

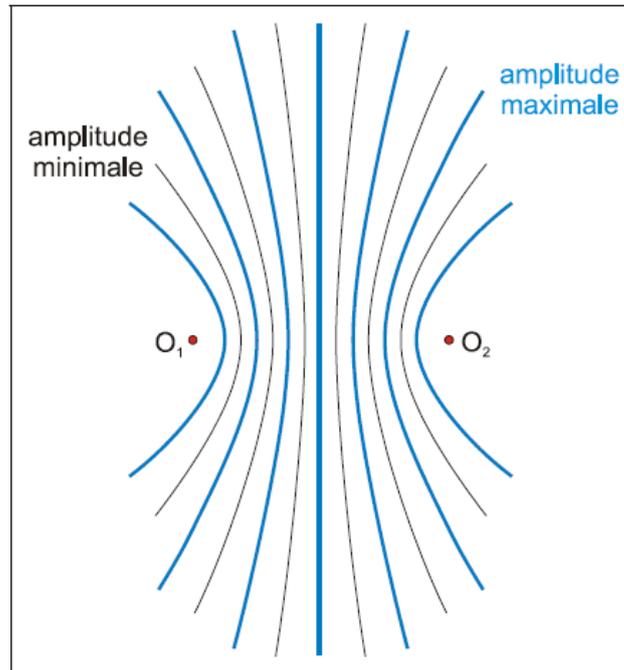
#### b) Observations

A la surface libre du liquide on observe des rides fixes, bien nettes



entre  $O_1$  et  $O_2$ . Elles ont la forme d'arcs d'hyperboles dont les foyers sont  $O_1$  et  $O_2$ . On les appelle des lignes ou des **franges d'interférence**. Elles disparaissent si l'une des pointes vibre sans toucher l'eau.

Remarque: Un milieu dispersif est un milieu où la vitesse de propagation d'une onde dépend de sa fréquence

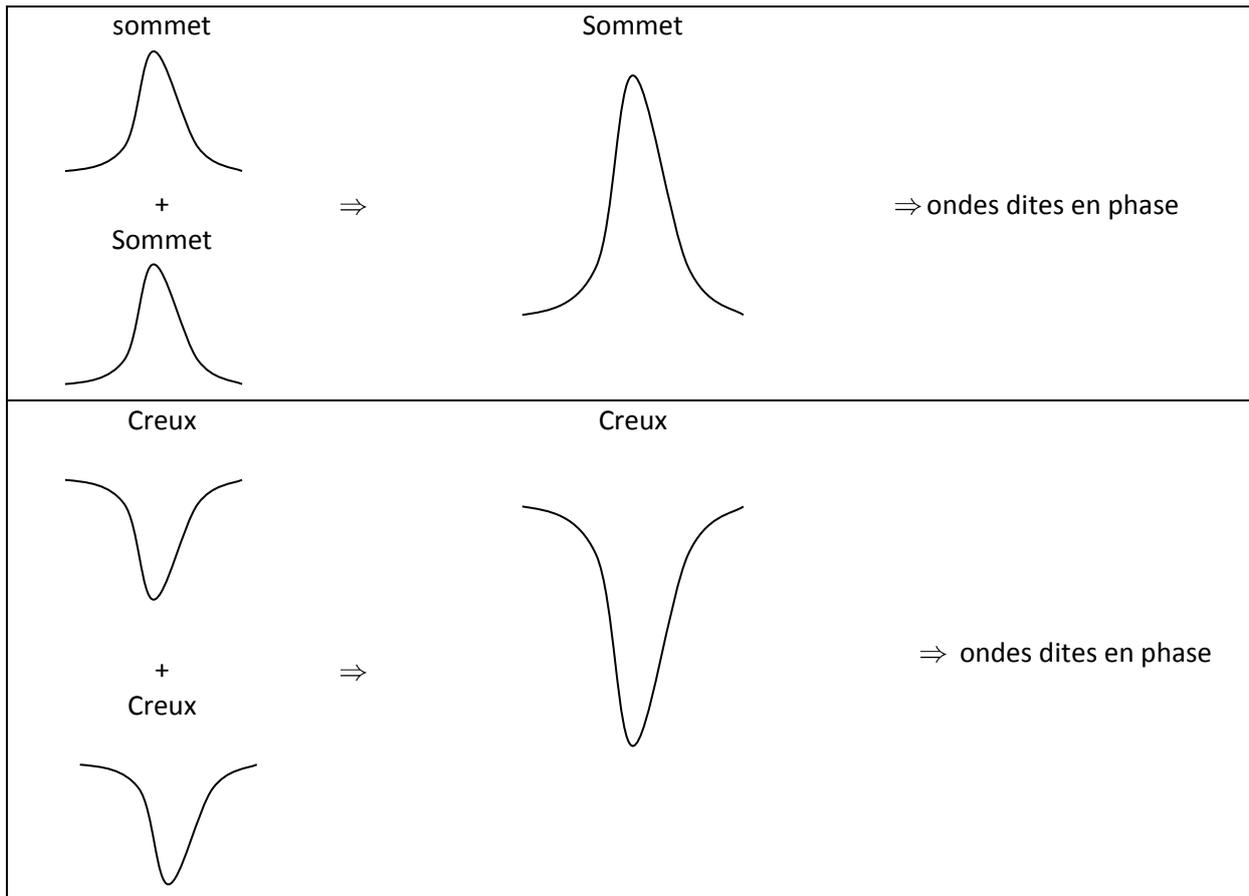


### c) Interprétation

Supposons que les deux pointes frappent l'eau exactement au même instant:  $O_1$  et  $O_2$  constituent alors deux sources synchrones. Si elles pénètrent à la même profondeur dans l'eau elles constituent des sources synchrones de même amplitude.

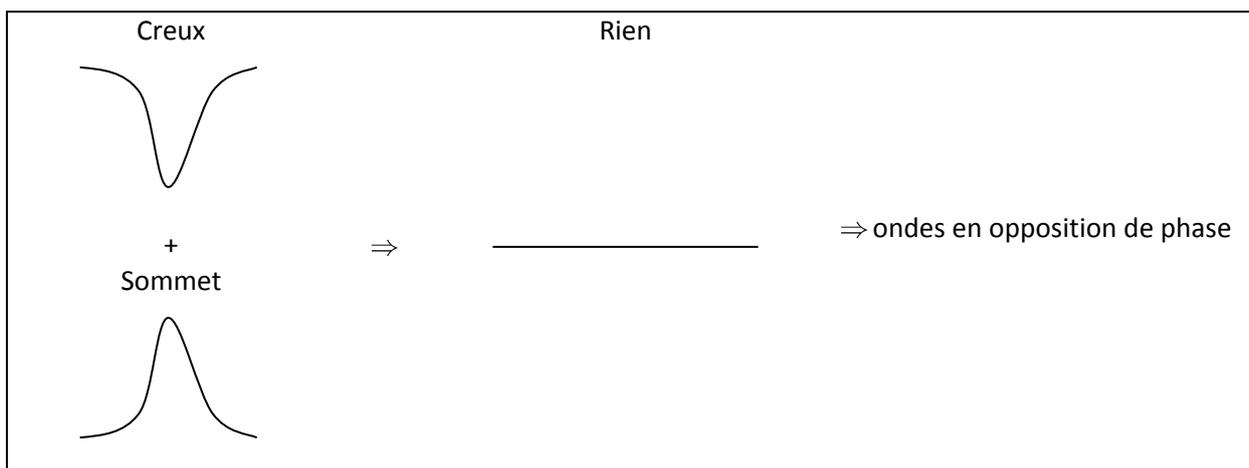
- Interférences constructive

Lorsque les deux ondes issues de  $O_1$  et  $O_2$  arrivent en phase en un point M: les interférences sont constructives et les amplitudes des deux ondes s'ajoutent (éclaircissement).



- Interférences destructives

Lorsque les deux ondes issues de  $O_1$  et  $O_2$  arrivent en opposition de phase en un point M: les interférences sont destructives et l'amplitude résultant des deux ondes s'annule (obscurité).



# Exercices sur les ondes mécaniques

## Exercice 1: Les parties A et B sont indépendantes

Le long d'une corde élastique, la célérité des ébranlements est  $c = 10 \text{ m.s}^{-1}$

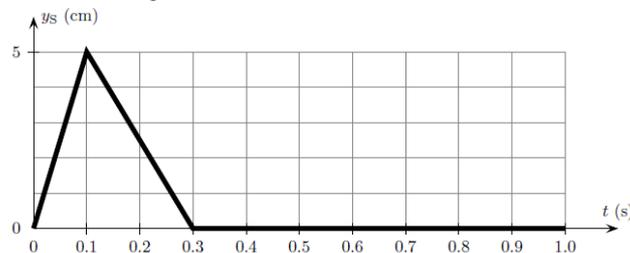
L'onde émise est une onde sinusoïdale de fréquence  $N = 2,5 \text{ Hz}$ .

- 1) Définir les concepts : signal ; onde et phénomène périodique.
- 2) Quelle est la période des vibrations de cette onde ?
- 3) Calculer la longueur d'onde de cette onde.

## Exercice 2:

Une très longue corde élastique inextensible est disposée horizontalement sur le sol. A la date  $t = 0$ , un opérateur crée une perturbation en imprimant une brève secousse verticale à l'extrémité S de la corde.

La célérité de l'onde mécanique créée vaut  $v = 10 \text{ m.s}^{-1}$ . La figure ci-dessous reproduit la courbe des variations temporelles de l'altitude  $y_S$  du point source.



- 1) Un point P se trouve sur la corde à une distance  $SP = 4,0 \text{ m}$  de l'extrémité. Quelle durée sépare l'émission du signal en S et son arrivée en P ?
- 2) Influence de quelques paramètres sur la célérité de l'onde.

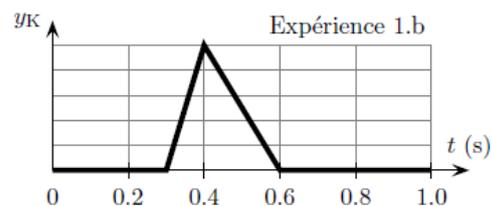
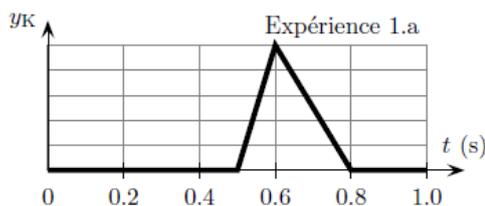
Les courbes ci-après donnent l'évolution au cours du temps du déplacement vertical d'un point K de la corde, située à la distance fixe  $d = SK$  du point source S ; les conditions expérimentales sont précisées pour chaque expérience.

Toutes les réponses doivent être justifiées en utilisant les représentations graphiques.

- a) Influence de la tension de la corde.

Lors de l'expérience 1.a, la tension est plus faible que lors de l'expérience 1.b.

La tension de la corde modifie-t-elle la célérité, et si oui, dans quel sens ?



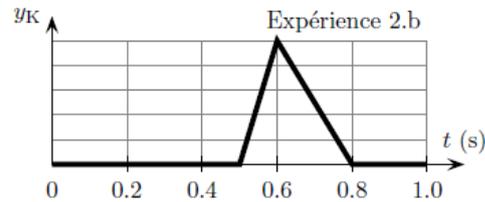
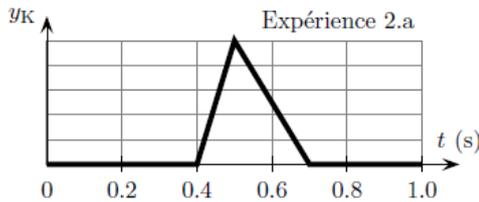
- b) Influence de la masse de la corde.

La masse linéique  $\mu$  est la masse par unité de longueur ; pour une corde de masse  $M$  et de longueur  $L$ , on a donc :

$$\mu = \frac{M}{L}$$

La masse linéique de la corde utilisée pour l'expérience 2.a est plus faible que celle de la corde utilisée pour l'expérience 2.b.

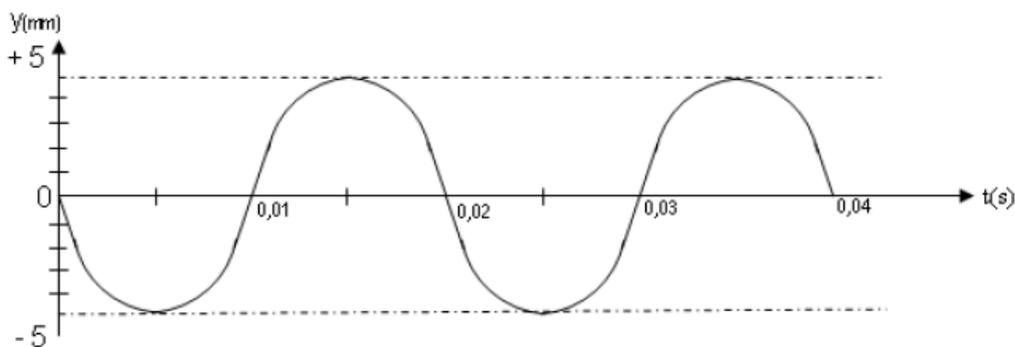
La masse linéique modifie-t-elle la célérité, et si oui, dans quel sens ?



Une lame vibrante provoque à l'extrémité A d'une corde élastique, de longueur  $L = 3\text{m}$  et de masse  $m = 90\text{g}$ , un mouvement vibratoire sinusoïdal transversal qui se propage le long de la corde.

La corde est tendue horizontalement par une force d'intensité  $F = 0,75\text{ N}$ . On néglige l'amortissement et la réflexion des ondes aux extrémités de la corde.

La courbe suivante représente la variation de l'élongation  $Y_A$  du point A en fonction du temps  $t$ .



- 1°-Calculer la célérité de propagation des ondes le long de la corde. ( 1;0,5)
- 2°-a) Déduire de cette courbe les valeurs de la période  $T$  et de la fréquence  $N$  du mouvement de A. ( 2; 1)
- b) Ecrire l'équation horaire du mouvement de A. ( 1; 1)
- c) Définir et calculer la longueur d'onde  $\lambda$ . ( 1;0,5)

## Aspect ondulatoire de la lumière.

### I. Généralités

#### 1. Sources lumineuses

On appelle source lumineuse un corps ou un dispositif qui émet de la lumière. On distingue deux types de sources:

- sources primaires ou réelles: ce sont des sources qui produisent elles-mêmes la lumière qu'elles émettent. Exemples: bougie, lampe incandescente ...
- sources secondaires ou apparentes: Ce sont des sources lumineuses qui ne produisent pas de la lumière, elles ne font que diffuser les rayons reçus d'autres sources lumineuses, c'est-à-dire qu'elles renvoient les rayons dans toutes les directions. . Exemples: lune, planète...

Une source de lumière peut être naturelle (exemples: le soleil, les étoiles, la lave, luciole...) ou artificielle (exemples: lampe électrique, le laser...).

#### 2. Classification des milieux matériels

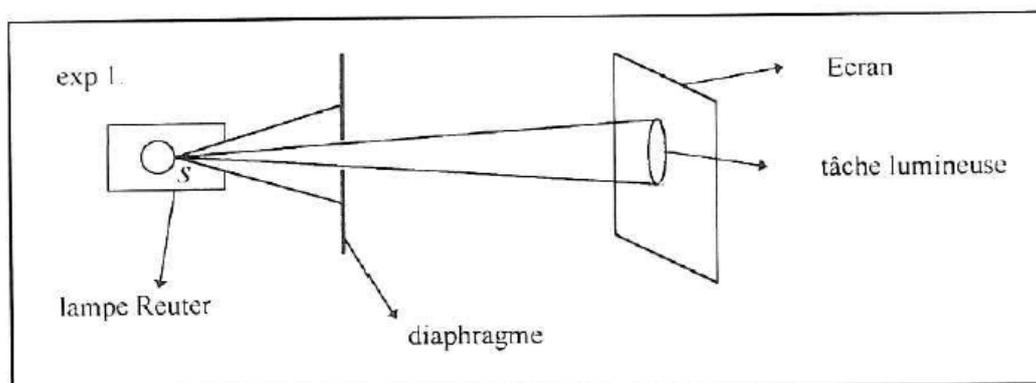
On distingue entre:

- Les milieux transparents: ils se laissent parfaitement traverser par la lumière et permettent de percevoir à travers eux nettement des objets placés derrière.  
Exemples: l'air, le verre, l'eau, la cellophane, etc.
- Les milieux translucides: ils se laissent traverser par la lumière en l'absorbant partiellement et ne permettent pas de percevoir nettement les objets (sinon seulement les contours).  
Exemples: le verre dépoli, le papier huilé, la porcelaine mince, etc.
- Les milieux opaques: ils arrêtent totalement la lumière.  
Exemples: le bois, la pierre, les métaux, etc.

Remarque: la transparence et l'opacité sont toutefois des propriétés relatives qui dépendent de l'épaisseur des milieux traversés. Ainsi par exemple une feuille d'or très mince quelques micromètre) devient translucide; d'autre part, l'eau sous une épaisseur de quelques dizaines de mètres, devient opaque.

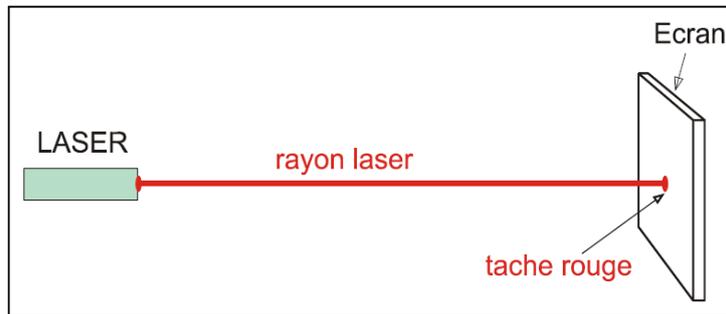
#### 3. Propagation rectiligne de la lumière

##### a) Expérience 1



Observation: la tâche lumineuse observée sur l'écran est nettement limitée et correspond à la section par l'écran du cône ayant pour sommet S et s'appuyant sur les contours du diaphragme.

### b) *Expérience 2*



Remarque: le pinceau de lumière est rendue visible avec l'aide de la fumée d'une cigarette.

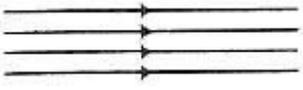
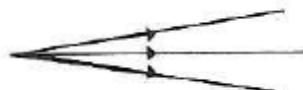
### c) *Conclusion:*

Principe: dans un milieu transparent, homogène (qui a les mêmes propriétés en tous ses points) et isotrope (qui a les mêmes propriétés dans toutes les directions), la lumière se propage en ligne droite.

Remarque: La formation des ombres est une conséquence immédiate de la propagation rectiligne de la lumière.

## 4. Rayon et faisceau lumineux

La direction suivant laquelle se propage la lumière s'appelle rayon lumineux. Un tel rayon n'a cependant pas d'existence physique réelle (il ne peut pas être isolé). En réalité on dispose de faisceaux lumineux qui sont considérés comme un ensemble de rayons lumineux.

	Faisceau parallèle
	Faisceau convergent (tous les rayons qui le composent se dirigent vers un point; le faisceau se resserre)
	Faisceau divergent (tous les rayons qui le composent viennent d'un même point; le faisceau s'élargit)

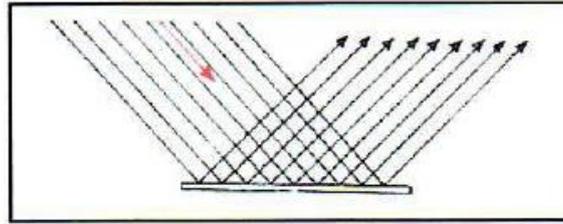
Remarque: on appelle pinceau lumineux un faisceau étroit.

## II. Réflexion, réfraction et diffraction de la lumière

### 1. Réflexion de la lumière

#### a) Le phénomène de la réflexion

La lumière qui tombe sur un miroir plan (ou sur toute autre surface suffisamment bien polie) est renvoyée dans une direction privilégiée: c'est la réflexion.



**b) Lois de la réflexion**

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MP = miroir plan</li> <li>• I = point d'incidence</li> <li>• SI = rayon incident</li> <li>• IR = rayon réfléchi</li> <li>• <math>i</math> = angle d'incidence</li> <li>• <math>r</math> = angle de réflexion</li> </ul>
--	--

1<sup>ère</sup> loi: le rayon incident, la normale au miroir au point d'incidence et le rayon réfléchi sont situés dans un même plan.

2<sup>ème</sup> loi: l'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux:  $i = r$

**2. La réfraction de la lumière**

**a) Mise en évidence du phénomène de la réfraction**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le milieu 1 est de l'air et le milieu 2 de l'eau.</li> <li>• S est la surface de séparation des deux milieux; S s'appelle surface réfringente ou dioptre.</li> <li>• I est le point d'incidence.</li> <li>• <math>NIN'</math> est la normale au dioptre au point d'incidence</li> </ul>	

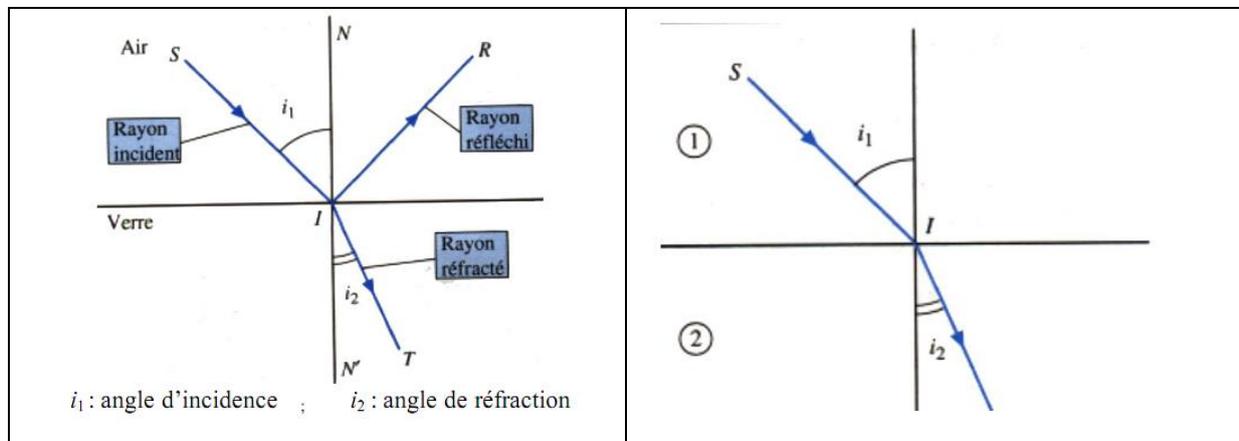
**Définition:** On appelle réfraction le brusque changement de direction que subit la lumière en traversant la surface de séparation de deux milieux transparents.

**Remarque:**

- la réfraction s'accompagne toujours de la réflexion sur la surface de séparation des deux milieux d'une faible partie de la lumière incidente.
- Lorsque le rayon réfracté se rapproche de la normale  $NIN'$ , le second milieu est dit plus réfringent que le premier milieu
- Lorsque le rayon réfracté s'éloigne de la normale  $NIN'$ , le second milieu est moins réfringent que le milieu un.

### b) Les lois de la réfraction

Les lois de la réfraction définissent la direction du rayon réfracté à partir du plan d'incidence et de l'angle d'incidence.



**1<sup>ère</sup> loi:** le rayon incident, la normale à la surface de séparation et le rayon réfracté sont situés dans un même plan. Le rayon incident et le rayon réfracté sont situés de part et d'autre de la normale au point d'incidence.

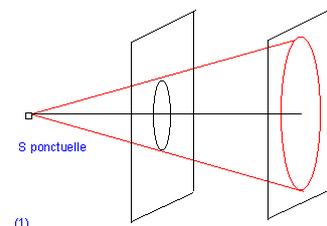
**2<sup>ème</sup> loi:** Lors du passage d'un rayon lumineux d'un milieu 1 d'indice dans un milieu d'indice, les angles d'incident et réfracté vérifient  $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$  (relation à ne pas évaluer)

### 3. Diffraction de la lumière

Dirigeons un faisceau lumineux sur un écran portant une ouverture.

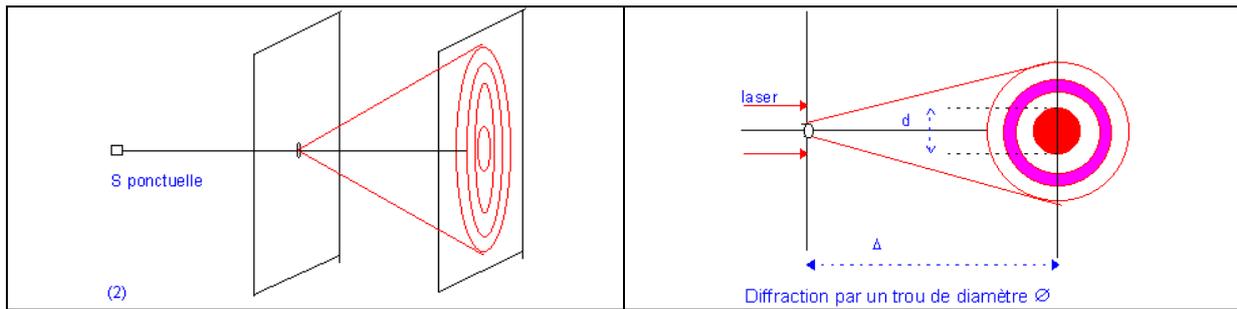
- OUVERTURE DE GRANDE DIMENSION : PHENOMENE DE DIAPHRAGME

La lumière épouse la forme de la fente à sa traversée : on dit qu'elle est diaphragmée par la fente.



- OUVERTURE DE QUELQUE MILLIMETRE : PHENOMENE DE DIFFRACTION

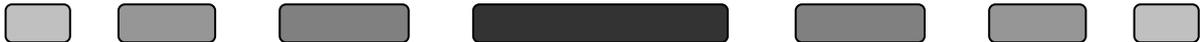
Pour isoler un rayon lumineux on peut réduire la fente ou le diamètre de l'ouverture circulaire. Réalisons l'expérience suivante:



On observe sur l'écran une figure de diffraction. Ce phénomène se produit lorsque l'ouverture par laquelle passe la lumière est de petite taille. On dit que l'ouverture a diffraqué (émet dans toutes les directions) la lumière du laser.

Remarque:

- Plus l'ouverture est petite, plus le phénomène de diffraction est marqué.
- Le phénomène de diffraction met en défaut le principe de propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène. Le concept de rayon lumineux apparaît comme une approximation consistant à négliger le phénomène de diffraction.
- Si l'ouverture est une fente, on observe la figure ci-contre. On observe un trait, ou frange, plus lumineuse et plus large que les franges qui l'entourent.



### III. Modèle ondulatoire de la lumière

De façon générale, la lumière peut être considérée comme une onde électromagnétique. En particulier, la lumière émise par le laser peut-être décrite comme une onde électromagnétique sinusoïdale de fréquence donnée.

#### 1. Propagation

La lumière se propage dans le vide, et dans les milieux transparents (air, eau, gaz, verre, etc.). Dans le vide, la célérité de la lumière est  $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (on retiendra  $c \simeq 3\cdot 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Remarque:

- La célérité de la lumière dans le vide ne dépend pas de la fréquence de l'onde.
- La célérité de la lumière dans l'air est pratiquement égale à celle dans le vide ( $c_{\text{air}} \simeq c_{\text{vide}}$ ).
- Dans un milieu matériel transparent, la vitesse  $v$  est inférieure à  $C$  :

$$v = \frac{C}{n} \text{ avec } n > 1 \text{ (indice de réfraction du milieu).}$$

## 2. Les périodicités

Une onde lumineuse a une double périodicité

- une périodicité temporelle  $T$
- une périodicité spatiale, de période  $\lambda$  appelé longueur d'onde.

La fréquence notée  $\nu$  pour une onde lumineuse, caractérise la périodicité temporelle et ne dépend

que du milieu :  $\nu = \frac{1}{T}$

La longueur d'onde  $\lambda_0$  dans le vide ou dans l'air et la fréquence  $\nu$  sont liées par l'expression :

$$\lambda_0 = cT = \frac{c}{\nu}$$

Remarque : la diffraction d'une onde par une ouverture se manifeste lorsque les dimensions de celle-ci sont de l'ordre de la longueur d'onde.

## IV. Couleur et longueur d'onde

### 1. LUMIERE MONOCHROMATIQUE

Définition : On appelle lumière monochromatique une onde électromagnétique progressive sinusoïdale de fréquence donnée. La couleur de cette lumière est liée à la valeur de sa fréquence.

### 2. LUMIERE VISIBLE

Définition : On appelle lumière une onde électromagnétique visible par l'œil humain.

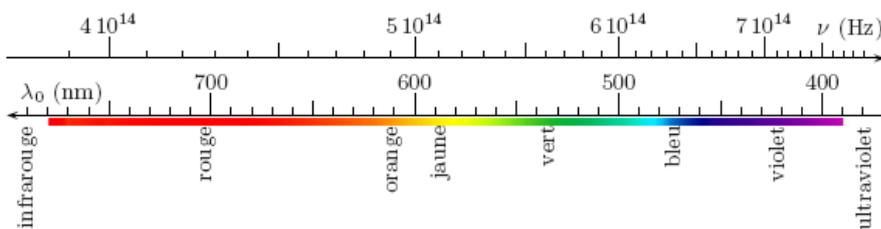
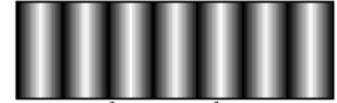
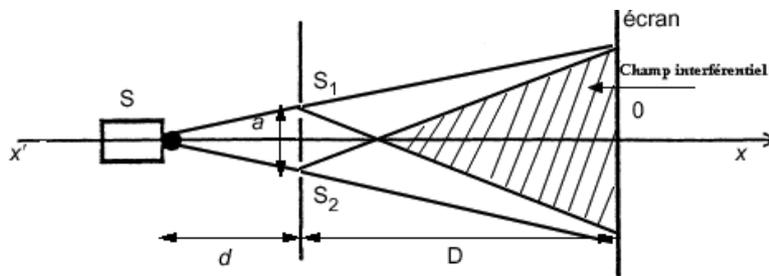


FIG. 1.1 – Fréquences et longueurs d'onde dans le vide de la lumière.

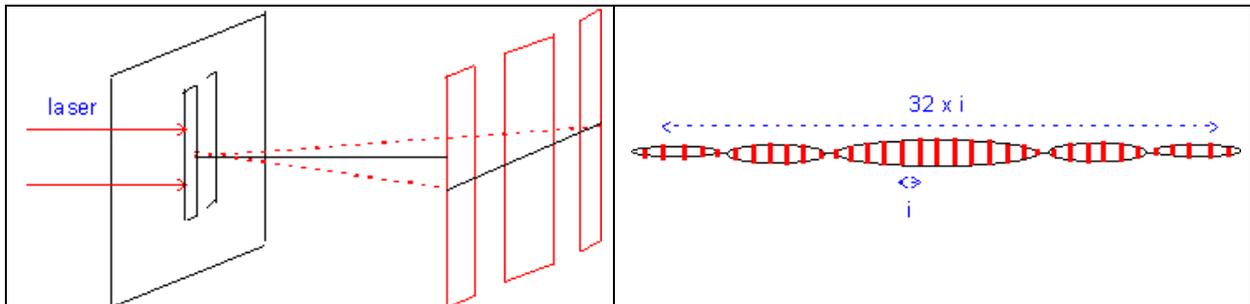
	rouge	orange	jaune	vert	bleu	indigo	violet
couleur							
fréquence (THz)	440 à 480	480 à 510	510 à 530	530 à 590	590 à 650	650 à 700	700 à 760

## V. Interférences lumineuses : Expérience de la double fente de Young

### 1. MISE EN EVIDENCE DES INTERFERENCES LUMINEUSES



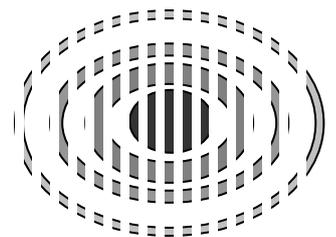
Aspect de l'écran dans l'écran d'Young



### 2. OBSERVATIONS

On observe sur l'écran E une tâche de diffraction striée de fines bandes sombres (ou franges) rectilignes, parallèles, équidistantes et de direction normale à la direction  $S_1S_2$ . L'ensemble des franges alternativement claires et sombres constituent des franges d'interférences.

Si les ouvertures sont des fentes, on observe la figure ci-contre.



### 3. INTERPRETATION THEORIQUE

Pour expliquer les résultats de l'expérience, il faut considérer le caractère ondulatoire de la lumière

#### Interférences constructives et destructives

En un point M d'une frange brillante se superposent les ondes lumineuses issues des fentes  $S_1$  et  $S_2$ , arrivant en phase : les interférences sont **constructives**.

En un point M d'une frange sombre se superposent les ondes lumineuses issues des fentes  $S_1$  et  $S_2$ , arrivant en opposition de phase : les interférences sont **destructives**.

# Exercices sur l'aspect ondulatoire de la lumière

## Exercice 1:

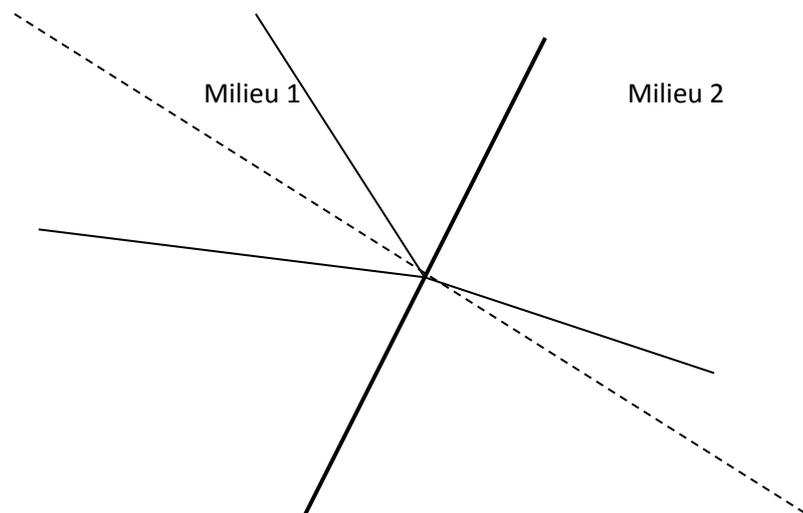
Compléter les phrases suivantes :

- 1) La lumière se ..... dans les milieux matériels .....
- 2) Dans un milieu transparent homogène, la lumière se propage en .....
- 3) Un ..... matérialise la direction de propagation de la lumière.
- 4) Les sources de lumière sont de deux types : les sources dites ..... qui produisent par elles-mêmes la lumière et les sources dites ..... qui, lorsqu'elles sont éclairées, renvoient dans toutes les directions une partie de la ..... qu'elles reçoivent.

## Exercice 2:

Un rayon lumineux tombe sur la surface de séparation de deux milieux transparents (1) et (2) (voir figure). On observe les rayons représentés ci-dessous :

- 1) Quels sont les phénomènes physiques susceptibles de se produire ? Définir ces phénomènes.
- 2) Identifier le rayon incident, le rayon réfléchi et le rayon réfracté.
- 3) Rappeler les lois de Descartes relatives à ces phénomènes.



## Exercice 3 :

A- Pour les phrases suivantes préciser, dans l'ordre, les mots manquants.

- 1) Le rayon lumineux qui arrive à la surface de séparation de deux milieux transparents est le ..... Le rayon qui se propage dans le second milieu est le ..... tandis que celui qui retourne dans le premier est le .....
- 2) Le rayon renvoyé par le miroir dans une direction privilégiée est appelée .....

- 3) Le phénomène des interférences lumineuses illustre l'aspect ..... de la .....
- B- Rappeler les lois de Descartes pour :
- la réflexion
  - réfraction.

**Exercice 4:**

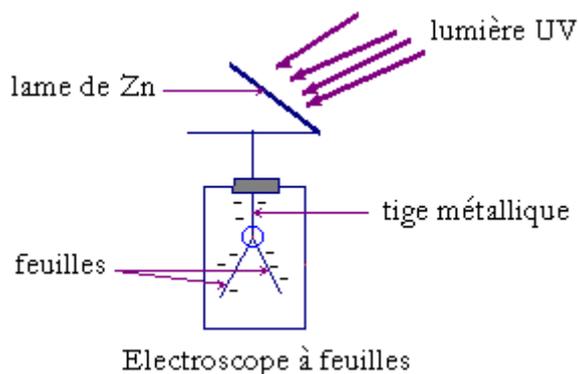
Un pinceau lumineux SI se propageant dans l'air arrive en I sur la surface de séparation de l'air et de l'eau avec un angle d'incidence  $i_1 = 40^\circ$ .

- 1) Faire un schéma de la situation.
- 2) Enoncer les lois de la réflexion.
- 3) Représenter un rayon réfléchi en précisant la mesure en précisant la mesure de l'angle de réflexion  $i'$ .
- 4) Enoncer les lois de la réfraction.
- 5) Représenter un rayon réfracté sachant que l'angle réfracté  $i_2=30^\circ$ .

## Aspect corpusculaire de la lumière ; Dualité onde-corpuscule

### I. Mise en évidence de l'effet électrique

#### 1. Expérience de Hertz (1887)



On envoie un faisceau de lumière riche en rayons ultraviolet sur une lame de zinc reliée à un électroscope initialement chargé, on constate que:

- Si l'électroscope est chargé positivement: il ne se passe rien (les feuilles restent écartées)
- Si l'électroscope est chargé négativement il se décharge (les feuilles retombent)
- Si on interpose sur le trajet de la lumière une lame de verre le phénomène ne se produit plus.

#### 2. Analyse de l'expérience

Lorsque la lame de zinc et le plateau de l'électroscope sont chargés négativement, ils portent un excédent d'électrons. Quand la lame est exposée à la lumière, des électrons sont arrachés du métal: c'est l'effet photoélectrique.

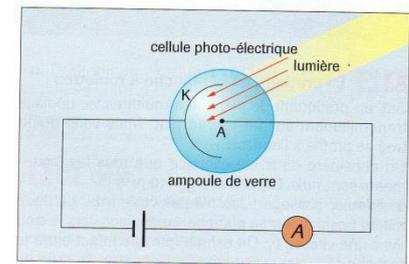
- si l'électroscope est chargé  $\oplus$  on peut considérer que les électrons extraits sont réattirés par la lame.
- Si l'électroscope est chargé négativement, les électrons extraits sont repoussés par la lame qui se charge  $\oplus$ . Les charges négatives portées par l'électroscope viennent neutraliser les charges positives de la lame donc l'électroscope se décharge et les feuilles tombent.
- L'électroscope est chargé négativement, si on intercale une lame de verre sur le trajet de la lumière, celui-ci ne se décharge pas car le verre absorbe le rayonnement ultraviolet. Seules certaines radiations sont capables de provoquer dans le cas du zinc l'émission d'électrons.

#### 3. Conclusion

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un métal lorsqu'il est éclairé par une lumière convenable.

#### 4. Cas de la cellule photoélectrique

Lorsqu'elle est éclairée par une lumière convenable la cathode C émet des électrons. Ces électrons sont captés par l'anode A qui est portée à un potentiel positif. Il en résulte dans le circuit extérieur un courant de faible intensité décelé par le galvanomètre G.



## II. Interprétation de l'effet photoélectrique

### 1. Hypothèse d'Einstein

Une onde électromagnétique, comme toute onde, transporte de l'énergie. On peut s'attendre à ce qu'un faisceau de forte intensité apporte l'énergie nécessaire pour extraire des électrons d'un métal. Or l'étape 3 de l'expérience d'Hertz montre qu'il n'en est pas toujours ainsi. L'énergie apportée, bien que quantitativement suffisante, ne l'est pas qualitativement. Pour expliquer l'effet photoélectrique, nous devons renoncer au modèle ondulatoire et recourir au modèle corpusculaire de la lumière. Einstein interprète l'effet photoélectrique en formulant les hypothèses (ou postulats) suivantes.

- la lumière est constituée par un ensemble de corpuscules, appelés photons, transportant chacun un quantum (des quanta) d'énergie.
- Un photon a une charge nulle et une masse nulle; il se déplace à la vitesse de la lumière, soit  $C \approx 3.10^8 \text{ m/s}$  dans le vide.
- Chaque photon d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $\nu$  transporte un quantum d'énergie:  $E = h \cdot \nu = \frac{hC}{\lambda}$  avec  $h$  la constante de Planck ( $h = 6,623.10^{-34} \text{ Js}$ ),  $C$  la vitesse de lumière dans le vide (en m/s) et  $\lambda$  la longueur d'onde dans le vide (en m).  $E$  s'exprime en joule (J).
- L'effet photoélectrique correspond à l'interaction (choc) entre un photon incident et un électron du métal avec transfert de l'énergie du photon à l'électron extrait.

### 2. Seuil photoélectrique

L'effet photoélectrique ne se produit que si l'énergie du photon incident  $E = h\nu$  est supérieure au travail d'extraction  $W_0$  d'un électron du métal. ( $W_0 = h\nu_0$  énergie d'extraction qui ne dépend que de la nature du métal).  $W_0$  représente l'énergie de liaison de l'électron au réseau métallique. Lorsqu'un électron absorbe un photon, trois cas sont envisageables :

- **L'énergie du photon est égale au travail d'extraction de l'électron  $h\nu = W_0$** 
  - L'énergie du photon suffit tout juste à expulser l'électron hors du métal!
  - La fréquence correspond alors la fréquence seuil du métal :  $\nu = \nu_0 = \frac{W_0}{h}$
  - La longueur d'onde correspond alors à la longueur d'onde seuil:  $\lambda = \lambda_0 = \frac{hC}{W_0}$
- **L'énergie du photon est inférieure au travail d'extraction:  $h\nu < W_0 \Rightarrow \nu < \nu_0 \Rightarrow \lambda > \lambda_0$**

L'énergie  $h\nu$  du photon incident est insuffisante pour extraire un électron du métal : l'effet

photoélectrique ne se produit pas et l'électron reste prisonnier du réseau métallique.

- **L'énergie du photon est supérieure au travail d'extraction:  $h\nu > W_0 \Leftrightarrow \nu > \nu_0 \Rightarrow \lambda < \lambda_0$**

L'électron capte l'énergie  $h\nu$ . Une partie,  $W_0$  de cette énergie sert à libérer l'électron du réseau métallique; l'électron conserve l'excédent sous forme d'énergie cinétique  $E_c$  :

Évaluons la vitesse d'éjection des électrons de l'atome. Soit  $E_c$  l'énergie cinétique des électrons.

$$E_c = E - W_0 = h(\nu - \nu_0) = hC$$

$$\frac{1}{2}m(v_{max})^2 = h(\nu - \nu_0) = hC \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$$

$m$  est la masse d'un électron:  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg.

### III. Dualité onde corpuscule

- certains phénomènes (interférence, diffraction) s'expliquent en considérant que la lumière se comporte comme une onde électromagnétique: c'est la théorie ondulatoire développée par Maxwell et Fresnel au 19<sup>e</sup> siècle.
- d'autres phénomènes par contre (effet photoélectrique, les réactions photochimiques) s'expliquent par la théorie corpusculaire: la lumière a une structure discontinue. Constituée de grains de photons.
- ces deux théories (corpusculaire et ondulatoire) en apparence antagonistes sont incomplètes mais complémentaires. Louis de Broglie en 1923 a eu l'idée d'associer ces deux théories: c'est la théorie de la mécanique quantique. Dans cette théorie la lumière se comporte à la fois comme un flux de particules et comme une onde. A toute onde électromagnétique de fréquence  $\nu$  on associe des photons d'énergie  $E = h\nu$ . Suivant le phénomène physique l'un des aspects de la lumière s'estompe tandis que l'autre s'affirme. Si  $\nu$  est élevée ( $\lambda$  faible) l'aspect corpusculaire l'emporte et si  $\nu$  est faible ( $\lambda$  élevé) l'aspect ondulatoire l'emporte.

# Exercices sur l'aspect corpusculaire de la lumière

## Exercice 1:

Une lumière polychromatique comprenant trois radiations ( $\lambda_1=450$  nm ;  $\lambda_2= 610$  nm ;  $\lambda_3=750$  nm) irradie un échantillon de potassium, contenu dans une ampoule. L'énergie d'ionisation vaut 2,14 eV (énergie nécessaire à arracher un électron de l'atome de potassium).

- 1) Calculer la longueur d'onde  $\lambda_0$  seuil du sodium.
- 2) Quelle(s) radiation(s) donne(nt) lieu à l'effet photoélectrique ?
- 3) Quelle est la vitesse des électrons expulsés du métal ?

Masse de l'électron  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg.

## Exercice 2 :

Pour les phrases suivantes indiquer, dans l'ordre, les mots manquants.

- 1) L'atome de chlore a pour symbole  $^{35}_{17}\text{Cl}$ . Il est formé de .....protons, de .....neutrons et de .....électrons .Le nombre de nucléons dans le noyau est.....
- 2) Un métal convenablement éclairé par de la lumière émet des électrons : c'est l'effet.....Cet effet met en évidence le caractère .....de la lumière.
- 3) La vitesse de la lumière dans le vide est égale à.....km/s .Cette vitesse diminue quand la densité du milieu traversé.....
- 4) L'effet photoélectrique prouve que la lumière est constituée de particules appelées .....La quantité d'énergie que transporte chacune de ces particules est appelée .....La lumière a donc une structure .....ou.....

## Exercice 3 :

On considère un métal pour lequel le travail d'extraction d'un électron est  $W_0 = 1,9$  eV.

- 1) Quelle est la longueur d'onde  $\lambda_0$  du seuil photoélectrique ?
- 2) Quelles sont les longueurs d'onde des radiations susceptibles de donner l'effet photoélectrique ?
- 3) Une radiation de longueur d'onde  $\lambda = 0,40$   $\mu\text{m}$  permet-elle l'effet photoélectrique ? Justifier.

**On donne** : constante de Planck :  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s<sup>-1</sup> ;

Célérité de la lumière dans le vide :  $C = 3,00 \cdot 10^8$  m/s ; Masse de l'électron :  $m_e = 9,10 \cdot 10^{-31}$  kg

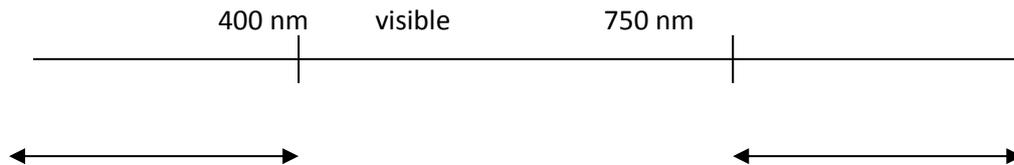
## Exercice 4 :

*Célérité de la lumière  $C = 3,00 \cdot 10^8$  m/s.*

- 1) On donne les longueurs d'onde dans le vide  $\lambda$  (en nm) et une série de couleurs.  
Associer les longueurs d'onde dans le vide et les couleurs.

Les couleurs sont :	Jaune	Bleu	Rouge
$\lambda$ (nm)	480	590	660
Couleurs	?	?	?

- 2) Une lampe à mercure, utilisée pour le bronzage du visage émet une radiation de fréquence à  $1,18 \cdot 10^{15}$  Hz.
- Calculer sa longueur d'onde dans le vide.
  - A quel domaine appartient-elle ?



### Exercice 5

On éclaire la cathode d'une cellule photoélectrique recouverte d'un métal pur par une radiation. L'énergie qu'elle doit absorber pour qu'un électron soit expulsé est  $W_0 = 3,31 \cdot 10^{-19}$  J.

- Quelle est la nature de la lumière ?
  - Qu'appelle-t-on fréquence seuil photoélectrique ?
  - Calculer la fréquence seuil  $\nu_0$  de ce métal.
- L'énergie cinétique maximale de l'électron à la sortie de la cathode est  $E_c = 3,6 \cdot 10^{-19}$  J.

  - Calculer la vitesse maximale de l'électron à la sortie de la cathode.
  - Calculer la longueur d'onde  $\lambda$  du photon incident.
  - Qu'est-ce qui change si on remplace la cathode par d'autre métal ?

Exercice 6

Une surface métallique est éclairée par la lumière U.V de longueur d'onde  $\lambda = 0,15\mu\text{m}$ .

Elle émet des électrons dont l'énergie cinétique maximale est égale à 4,85 eV.

1° - Calculer l'énergie transportée par un photon de cette radiation en J puis en eV.

2° - Définir et calculer l'énergie d'extraction pour ce métal.

3° - a) Calculer la longueur d'onde seuil  $\lambda_0$ .

b) Quelle est la nature de ce métal ?

On donne :

- Charge d'un électron :  $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Masse d'un électron :  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- Constante de Planck :  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

MÉTAL	LONGUEUR D'ONDE SEUIL $\lambda_0$ ( $\mu\text{m}$ )
Zn	0,35
Al	0,36
Na	0,50
K	0,55
Sr	0,60
Cs	0,66

Exercice 7

On dispose de trois cellules photo-émisives. Les cathodes sont respectivement couvertes de Césium (Cs), de Potassium (K) et de Lithium (Li). Les énergies d'extraction  $W_0$  de ces métaux sont données dans le tableau ci-dessous :

Métal	Césium (Cs)	Potassium (K)	Lithium (Li)
$W_0$ (eV)	1,9	2,29	2,39

1. Qu'appelle-t-on énergie d'extraction ? (1,0 ; 1,0)
2. On éclaire successivement chaque cellule par une radiation monochromatique de longueur d'onde  $\lambda = 0,60\mu\text{m}$ .
  - a- Calculer, en électron-volt, l'énergie transportée par un photon incident. (1,0 ; 0,5)
  - b- Avec laquelle de ces trois cellules obtient-on l'effet photo-électrique ? Justifier la réponse. (0,5 ; 0,5)
  - c- Calculer, en joule, l'énergie cinétique maximale d'un électron à la sortie de la cathode. (1,5 ; 1,0)

Exercice 8

- 1°-Décrire une expérience mettant en évidence l'effet photoélectrique. (1,0 ; 0,5)
- 2° - a – Qu'appelle-t-on effet photoélectrique ? (1,0 ; 0,5)  
b – Donner la définition de la fréquence seuil d'une cellule photoémissive. (1,0 ; 0,5)
- 3°-Pour extraire un électron d'un métal M constituant la cathode d'une cellule photoémissive, il faut fournir une énergie minimale  $W_0 = 5,3 \cdot 10^{-19} \text{J}$ .  
Calculer la fréquence seuil photoélectrique du métal M. (1,0 ; 0,5)
- 4° -On éclaire ce métal M par une radiation monochromatique de fréquence  $\nu = 10^{15} \text{ Hz}$ .  
a – Calculer, en joule, l'énergie cinétique maximale d'un électron à la sortie du métal. (1,0 ; 1,0)  
b – En déduire la vitesse maximale de l'électron à la sortie du métal. (1,0 ; 1,0)

Exercice 9

La surface métallique d'une cellule photoémissive est éclairée par une radiation ultraviolette de fréquence  $\nu = 15 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ . Le travail d'extraction de la cellule est  $W_0 = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

- 1° – Calculer, en électron-volt, le travail d'extraction  $W_0$  de la cellule. (1,0 ; 1,0)
- 2° - Calculer l'énergie  $W$  transportée par un photon incident. (1,0 ; 1,0)
- 3° - a – Expliquer pourquoi observe-t-on le phénomène d'effet photoélectrique dans l'expérience précédente ? (2,0 ; 1,0)  
b – Calculer, en joule, l'énergie cinétique maximale d'un électron à la sortie du métal. (1,0 ; 1,0)  
c – En déduire la vitesse maximale de l'électron à la sortie du métal. (1,0 ; 1,0)