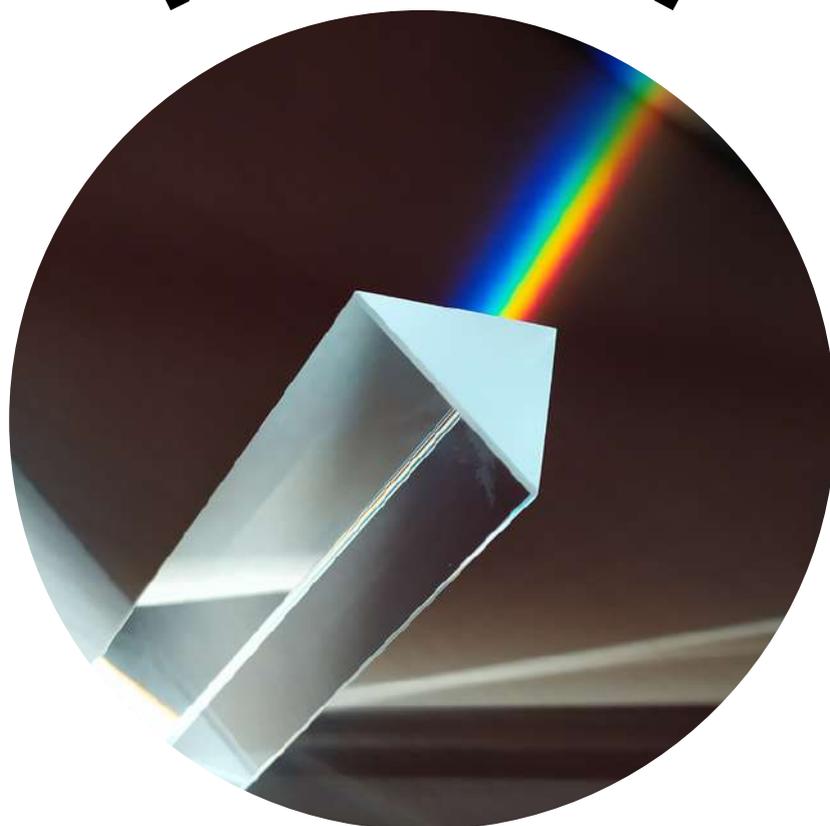


# physique I



- OPTIQUE
- PHYSIQUE NUCLÉAIRE
- THERMODYNAMIQUE



## Shop



- Cahiers de Biologie + Lexique
- Accessoires de Biologie



## Etudier



Visiter [Biologie Maroc](http://www.biologie-maroc.com) pour étudier et passer des QUIZ et QCM en ligne et Télécharger TD, TP et Examens résolus.



## Emploi



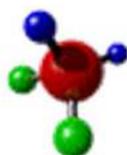
- CV • Lettres de motivation • Demandes...
- Offres d'emploi
- Offres de stage & PFE



Faculté Poly-disciplinaire de Safi



# Physique Nucléaire



Pr. Abdellatif NACHAB

Semestre I - SVI

Année universitaire 2019-2020

Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

1

## Chapitre I

### Noyau atomique, Masse- Energie, Stabilité

Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

2

Chapitre I : Noyau atomique, Masse- Energie, Stabilité

Un atome contient un noyau situé en son centre et des électrons qui "tournent" autour du noyau.

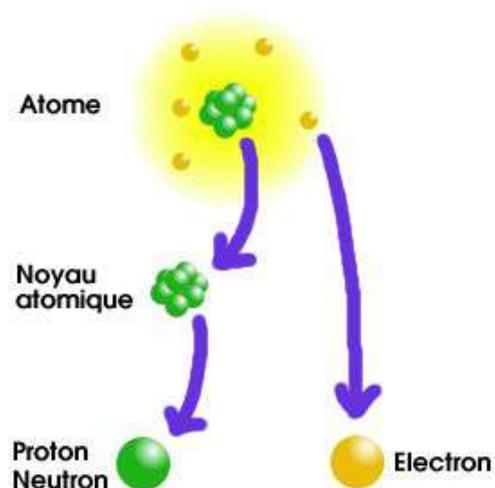
Le noyau contient des nucléons:

nucléons = protons + neutrons

Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

3

Chapitre I : Noyau atomique, Masse- Energie, Stabilité



Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

4

## Structure du noyau atomique

- Les électrons sont des **charges électriques négatives (-e)**.
- Les protons ont une charge électrique **positive (+e)**, de même valeur que celle de l'électron.
- Les neutrons n'ont pas de charge électrique, ils sont **neutres**.
- un atome est donc **électriquement neutre** : contient le **même nombre** d'électrons que de protons.
- Le nombre d'électrons (ou de protons) dans un atome détermine ses propriétés physiques et chimiques, c'est le **nombre atomique Z**, noté:  ${}_Z\text{X}$  (**X: élément chimique**)
- Par exemple: l'atome d'hydrogène comprend 1 électron et 1 proton,  ${}_1\text{H}$   
le nombre atomique du carbone est 6:  ${}_6\text{C}$   
celui de l'oxygène 8:  ${}_8\text{O}$ , d'un atome de fer 26:  ${}_{26}\text{Fe}$ ,  
d'un atome d'uranium 92:  ${}_{92}\text{U}$

## Noyau Atomique

- Le noyau atomique est le cœur de l'atome. Il est cent mille fois plus petit et contient 99,97% de sa masse.
- Le noyau contient **Z protons et N neutron**  

$$\rightarrow Z + N = A \text{ nucléons} \quad \text{notation: } {}_Z^A\text{X}_N$$
- **Un noyau atomique a une taille de l'ordre de  $10^{-15}\text{m}$  (1 Fermi), soit cent mille fois plus petit que l'atome !!**

Chapitre I : Noyau atomique, Masse- Energie, Stabilité

## Caractéristiques du noyau atomique

- **Isotopes:** Noyaux de mêmes Z  
Exemple: H (Hydrogène), D=<sup>2</sup>H (Deutérium) et T=<sup>3</sup>H (Tritium)
- **Isotones:** Noyaux de mêmes N  
Exemple: C (Carbone), N (Azote) et O (Oxygène)
- **Isobares:** Noyaux de mêmes A  
Exemple: Ar(Argon), K (Potassium) et Ca (Calcium)

Chapitre I : Noyau atomique, Masse- Energie, Stabilité

## Periodic Table of the Elements

Legend:

- alkali metals
- alkaline earth metals
- transitional metals
- other metals
- nonmetals
- noble gases

Callout for Silicon (Si):

- atomic number: 14
- atomic weight: 28.08
- symbol: Si
- name: Silicon
- solid
- black
- liquid
- gas
- white
- red
- synthetically prepared
- most stable isotope

Lanthanide series: Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu

Actinide series: Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr

## Dimension: rayon

- Etude par diffusion : RUTHERFORD
  - Système atomique: Rayon de masse et rayon de charge
  - Sphéricité du noyau (dimension /atome)
- Hypothèses:
  - Noyau de forme sphérique:  $V = 4/3\pi R^3$
  - Densité constante (volume proportionnel à la masse)

Rayon nucléaire donné par:

$$R = r_0 A^{1/3}$$

$r_0 = 1,2$  Fermi: rayon de l'Hydrogène

## Unité de Masse Atomique

### Définition :

L'u.m.a est définie comme le 1/12 de la masse d'un atome de carbone 12.

$$\begin{aligned} 1 \text{ u.m.a} &= (1/12)(\text{masse de } ^{12}\text{C}) \\ &= (1/12) \times (12\text{g}/N_a) = 1/(6,022 \cdot 10^{23}) \\ N_a &= 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mole}^{-1}: \text{Nombre d'AVOGADRO} \end{aligned}$$

[le Kg du système MKSA n'est pas adaptée comme unité de masse au noyaux atomiques]

$$1 \text{ u.m.a} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Donc en u.m.a, les masses nucléaires sont exprimées par

$$\rightarrow M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ u et } M(^A\text{X}) \sim A \cdot \text{u}$$

## Chapitre I : Noyau atomique, Masse- Energie, Stabilité

## Equivalence Masse- Energie (relation d'Einstein)

- Dans la théorie de la relativité restreinte, en 1905, Einstein a montré que la masse est une forme d'énergie.
- Toute particule de masse  $m$ , au repos, possède une énergie :

$$E = m \cdot c^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} E \text{ énergie en (J)} \\ m \text{ masse en (kg)} \\ c \text{ célérité de la lumière dans le vide en (m/s)} \end{array} \right.$$

- $c = 299792458 \text{ m/s}$  → on utilise:  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$
- L'unité d'énergie " joule " n'est pas adaptée l'étude du noyau atomique.
- Indication:**  $1 \text{ Joule} = 1 \text{ Newton} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m}$

## Chapitre I : Noyau atomique, Masse- Energie, Stabilité

## Masse- Energie: unités

- L'unité utilisée est l'électron-Volt (eV) et ses multiples:

**Définition :** l'eV est l'énergie d'une charge élémentaire  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  qui se trouve dans le potentiel de 1Volt:

$$1 \text{ eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Multiples de l'eV:

$$- 1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

$$- 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$- 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

Exemples: - proton :  $m_p = 1,67261 \cdot 10^{-24} \text{ g} \leftrightarrow m_p c^2 = 938,31 \text{ MeV}$   
- neutron :  $m_n = 1,67493 \cdot 10^{-24} \text{ g} \leftrightarrow m_n c^2 = 939,69 \text{ MeV}$

$$1 \text{ uc}^2 = 931,62 \text{ MeV}$$

Chapitre I : Noyau atomique, Masse- Energie, Stabilité

## Energie de liaison nucléaire

- Soit un noyau  ${}^A_ZX_N$ , ses A nucléons sont liés entre eux grâce à la force nucléaire (interaction forte).
- Pour le dissocier en ses constituants, il faut lui fournir une énergie assez importante = **Energie de liaison** .
- Constat: La masse du noyau  ${}^A_ZX_N$  est inférieure à la masse de ses constituants !!

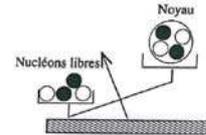
$$\rightarrow M({}^A_ZX_N) < Zm_p + Nm_n$$

$m_p$  : masse du proton ;  $m_n$  : masse du neutron.

• On écrit:  $M(X) = Z m_p + Nm_n - B(A,Z)/c^2$

$$\rightarrow M(X)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B(A,Z) \quad \text{avec } \underline{B(A,Z) > 0}$$

$B(A,Z)$  a la dimension de l'énergie : c'est l'énergie de liaison du noyau  ${}^A_ZX_N$



$$B(A,Z) = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - M(X) c^2$$

Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

13

## Chapitre II

# Radioactivité & réactions nucléaires

14

## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

### Radioactivité

La radioactivité est la possibilité qu'à un noyau instable de se transformer, en émettant une particule ou un rayonnement, pour donner un autre noyau

#### Types de radioactivité:

- **Naturelle:** a lieu spontanément (sans action extérieure)
- **Artificielle:** provoquée par action extérieure
  - **Radioactivité,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$  et Capture Electronique:** se produisent sans changement du nombre de nucléons: **Transitions isobariques** (A constant)
  - **Radioactivité  $\alpha$ :** émission d'un noyau d'hélium ( ${}^4_2\text{He}$ ).
  - **Radioactivité  $\gamma$ :** émission de photons  $\gamma$  (état métastable).
  - **Autres types de radioactivités:** p, n, C, O très rares

## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

### Probabilité de désintégration radioactive

La désintégration radioactive est un phénomène aléatoire: chaque désintégration est un événement indépendant et l'on ne peut pas prévoir à quel moment un noyau instable donné va subir une désintégration.

**Constante radioactive  $\lambda$ :** est la probabilité de désintégration radioactive pendant le temps  $\Delta t$

- Evolution d'une population d'atome radioactifs :  
On a :  $dN = -\lambda N dt \Rightarrow (-dN/dt) = \lambda N$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Où  $N(t)$  = nombre d'atome persistant (non désintégré) au bout du temps  $t$   
 $N_0$  = nombre initial d'atomes  
 $\lambda$  = constante radioactive ( $s^{-1}$ )

**Période radioactive T:** temps au bout duquel 50% des atomes se sont désintégrés

$$N(T) = N_0/2 \quad \Rightarrow \quad T = \ln(2)/\lambda$$

## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

**Activité d'un noyau radioactif**

Par définition l'activité « A » correspond au nombre de désintégrations radioactives par unité de temps.

$$A(t) = \lambda N(t)$$

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

$N(t)$  = nombre des atomes radioactifs présents à l'instant  $t$

**Unité = becquerel : 1 Bq = 1 désintégration/seconde**

Ancienne unité : curie (activité d'1g de radium)

et **1 mCi = 37 MBq**

L'activité d'un échantillon décroît exponentiellement avec le temps

## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

**Valeur typique de demi-vie,  $T_{1/2}$** 

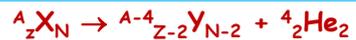
Isotope	Demi-vie
Polonium $^{214}_{84}\text{P}$	$1,64 \times 10^{-4}$ s
Krypton $^{89}_{36}\text{Kr}$	3,16 minutes
Strontium $^{90}_{38}\text{Sr}$	28,5 années
Radium $^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 années
Carbone $^{14}_6\text{C}$	5730 années
Uranium $^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \times 10^9$ années

## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

## Les principales transformations radioactives

### L'émission de particule $\alpha$

Une particule  $\alpha$  est constituée d'un noyau d'hélium comportant 2 protons et 2 neutrons, c'est une particule chargée (2+)

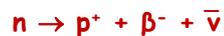


- > L'élément Y produit peut être stable ou radioactif
- > L'émission  $\alpha$  survient pour des noyau lourd (excès de neutrons)

## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

### L'émission de particule $\beta^-$

- La particule  $\beta^-$  est un électron porteur d'une charge négative
- Une particule  $\beta^-$  est produite par la transformation d'un neutron en proton:



- $\bar{\nu}$  = antineutrino= particule neutre de masse faible qui interagit peu avec la matière



## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

### Emission $\beta^+$

- La particule  $\beta^+$  est un électron porteur d'une charge positive
- Une particule  $\beta^+$  est produite par la transformation d'un proton en neutron:



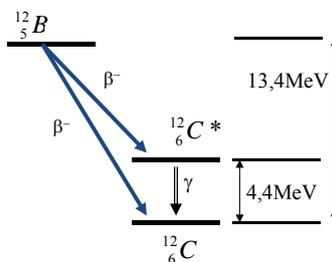
- $\nu$  = neutrino= particule neutre de masse faible qui interagit peu avec la matière



## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

### Emission $\gamma$

Les rayons gamma ( $\gamma$ ) sont en général émis peu après une désintégration  $\beta$  ou  $\alpha$  ou lorsqu'un noyau a été porté à un état excité à la suite d'une collision.



## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

### Réactions nucléaires

- **Définition** : Transformation d'un noyau atomique provoquée par une interaction avec un autre noyau, avec une particule ou un photon.

**Notation** :  $a + A \rightarrow b + B$  ou  $A(a,b)B$

$a$  : projectile ;  $A$  : cible ;  $b$  : éjectile ;  $B$  : noyau résiduel

- **Lois de conservation**

De la charge, de l'énergie, de l'impulsion et du moment cinétique

Le bilan énergétique de la réaction est :

$$Q = (M_a + M_A - M_B - M_b)c^2$$

Si  $Q < 0$  la réaction est endoénergétique

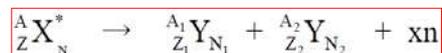
Si  $Q > 0$  la réaction est exoénergétique

## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

### Fission nucléaire

Lorsqu'un neutron est capturé par un noyau  $^{235}\text{U}$ , il crée un noyau  $^{236}\text{U}$  instable, de courte durée de vie ( $\sim 10^{-14}$  s). Ce noyau subit ensuite une fission.

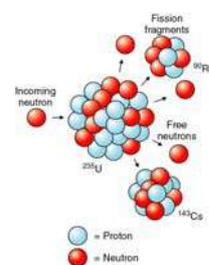
#### Équation de fission



#### Bilan d'énergie

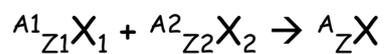
$$Q_{\text{FS}} = (M_X - M_{Y_1} - M_{Y_2} - xm_n)c^2$$

#### Exemple :

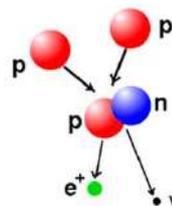


## Chapitre II : Radioactivité et réactions nucléaires

### Réaction de fusion nucléaire



Un ensemble de réactions appelé **chaîne proton-proton** ont lieu à l'intérieur du Soleil.



L'énergie solaire provient de **la fusion nucléaire** à l'intérieur du Soleil.

## Chapitre III

### Interaction rayonnement-matière

### Chapitre III : Interaction rayonnement-matière

#### Définitions

❖ Un rayonnement est dit "ionisant" lorsqu'il est susceptible d'arracher des électrons à la matière :

✓ Exemple : Rayonnement  $\gamma$  et X

✓ Condition :  $E_{RI} > B_e$  : énergie de liaison des électrons

⇒ matière biologique (H, C, N, O)  $11 < B_e < 14$  eV

Énergie d'ionisation :

H : 13,54 eV

C : 11,24 eV

N : 14,24 eV

O : 13,57 eV

❖ Rayonnements non ionisants :  $E_{RNI} < 12,4$  eV

✓ ondes radioélectriques,

✓ UV,

✓ visible,

✓ IR

Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

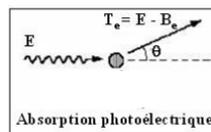
### Chapitre III : Interaction rayonnement-matière

#### Interaction photon-matière

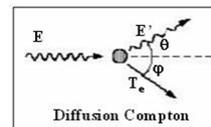
🌐 Les interactions avec les électrons atomiques :

✓ Effet photoélectrique: interaction du photon d'énergie  $E$  avec un électron, d'énergie de liaison  $B_e$ , très lié à une couche K, L, etc. Dans ce cas, le photon disparaît en communiquant la totalité de son énergie à l' $e^-$  qui peut être éjecté de l'atome avec une énergie cinétique  $T_{e^-}$ .

$$T_{e^-} = E - B_e$$

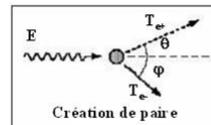


✓ Diffusion Compton: interaction du photon avec un électron moins lié. Lors de ce phénomène, le photon communique une partie de son énergie à l' $e^-$ .



🌐 Les interactions avec les noyaux :

✓ Production de paires d'électrons: le photon d'énergie supérieure à 1,022 MeV ( $2m_0c^2$ ) peut se matérialiser en un  $e^-$  et  $e^+$ .



Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

### Chapitre III : Interaction rayonnement-matière

#### Coefficients d'atténuation

Les photons ne sont pas arrêtés dans la matière, mais leur faisceau qui est simplement atténué.

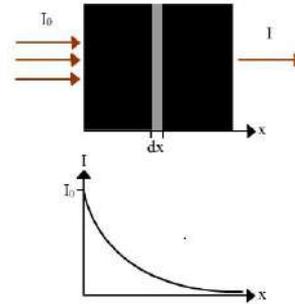
❖ Loi d'absorption :

$$dI = -\mu_{\text{tot}} I dx \Rightarrow I(x) = I_0 e^{-\mu_{\text{tot}} x}$$

Coefficient d'atténuation linéaire :  $\mu_{\text{tot}}$

Coefficient d'atténuation linéaire :  $\mu_{\text{tot}} = \mu_c + \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{pair}}$  unité :  $\text{cm}^{-1}$

Couche de demi atténuation :  $\text{CDA} = x_{1/2} = \frac{\text{Ln}2}{\mu}$   $I(nx_{1/2}) = \frac{I_0}{2^n}$



Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

### Chapitre III : Interaction rayonnement-matière



Application des photons dans l'imagerie médicale

Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

### Chapitre III : Interaction rayonnement-matière

#### Interaction particules chargées avec la matière

Une particule chargée ( $z$ ), de vitesse  $v$ , passant au voisinage d'un atome ( $Z$ ) de la matière peut interagir avec le cortège électronique ou le noyau atomique. Elles perdent la quasi-totalité de leurs énergies à travers la matière. La perte d'énergie par unité de longueur est donnée par la formule semi-empirique de **Bethe** et **Bloch** suivante:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 e^4 n Z}{4\pi \epsilon_0^2 m_e v^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e v^2}{I} \right) - \ln \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

**Transfer linéique d'énergie (T.L.E)**  
unité **MeV/cm**

Avec:  $n$  est la densité atomique cible et  $I$  l'énergie d'ionisation

❖ **Parcours** : Il s'agit de la distance le long de laquelle la particule perd la totalité de son énergie

$$\bar{R} = \int_{E_0}^0 \frac{dx}{dE} dE = \int_0^{E_0} \left( -\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE \quad \text{unité : cm}$$

Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

### Chapitre III : Interaction rayonnement-matière

#### Ralentissement $\alpha$

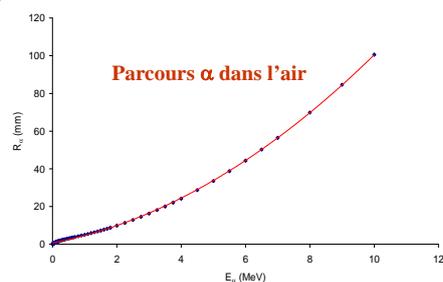
✓ **Spectre de raies** :  $3 < E_\alpha < 9 \text{ MeV}$   
⇒ petits parcours (**rectiligne**)

✓ **Très ionisantes**

✓ **Calcul du parcours** :

$$R_{\text{air}} (\text{cm}) = 0,32 E_\alpha^{3/2} (\text{MeV})$$

$$R_{\text{milieu}} = R_{\text{air}} \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{milieu}}}$$



$E_\alpha$ (MeV)	4,2	5,3	6	8,8
$R_{\text{air}}$ (cm)	2,6	3,8	4,6	8,6
$R_{\text{eau}}$ ( $\mu\text{m}$ )	32	48	57	107

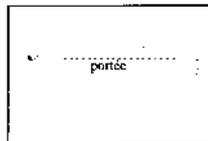
Notes de cours de Ph. Nucléaire  
Pr. Abdellatif Nachab

### Chapitre III : Interaction rayonnement-matière

#### Ralentissement des $\beta$

**Parcours** : longueur réelle de la trajectoire

**Portée** : profondeur maximale atteinte



✓ Portée :

$$R_{\max}(\text{cm}) = \frac{0,412 E_{\beta\max}^n (\text{MeV})}{\rho(\text{g/cm}^3)} \quad \text{avec } n = 1,265 - 0,0954 \ln(E_{\beta\max})$$

**Exemple** :  $^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S} + \beta^- + \bar{\nu}$   $E_{\beta\max} = 1,7 \text{ MeV} \Rightarrow n = 1,214$

	Air	eau	PVC	Aluminium
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,0013	1	1,41	2,7
$R_{\max}$ (cm)	603,68	0,78	0,56	0,29

# Bon courage



## LIENS UTILES 🙌

Visiter :

1. <https://biologie-maroc.com>

- Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. <https://biologie-maroc.com/shop/>

- Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
- Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
- Trouver des bourses et des écoles privées

3. <https://biologie-maroc.com/emploi/>

- Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
- Trouver des offres d'emploi et de stage

