

# Interactions des rayonnements ionisants avec la matière<sup>®</sup>

Play

TNT



**1) INTRODUCTION AUX  
RAYONNEMENTS  
IONISANTS**

**2) MÉCANISMES  
GÉNÉRAUX DES  
INTERACTIONS AVEC  
LA MATIÈRE**

**3 )INTERACTIONS DES  
PHOTONS/PARTICULES**



# QU'EST-CE QU'UN AI ?

**Un rayonnement  
électromagnétique  
(REM) ou particulaire**

Capable de modifier la  
matière qu'il traverse  
(ionisations)

**Directement ou  
indirectement ionisant**

Phénomène physique

- effets chimiques (ADN)
- effets biologiques



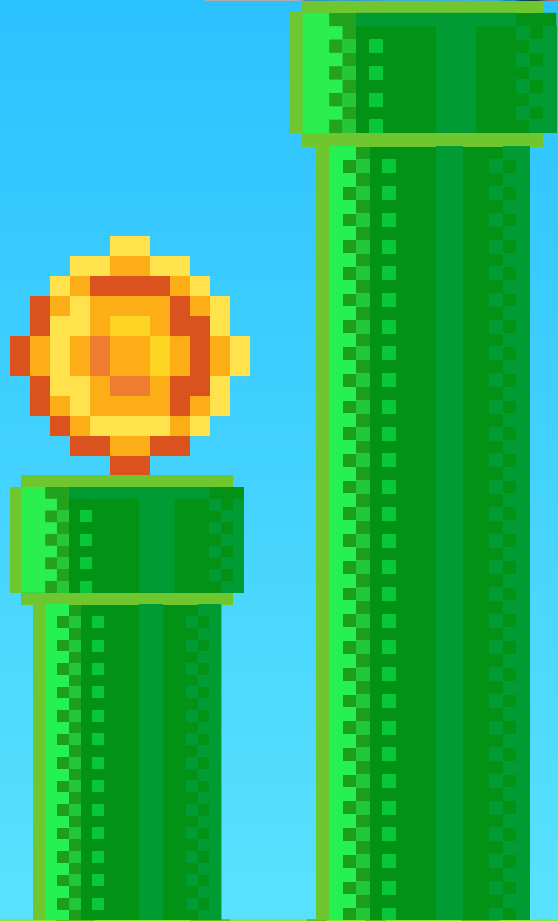
# O'OU PROVIENNENT-ILS ?



Ils  
proviennent  
de l'atome

nuage  
électronique  
(RX)

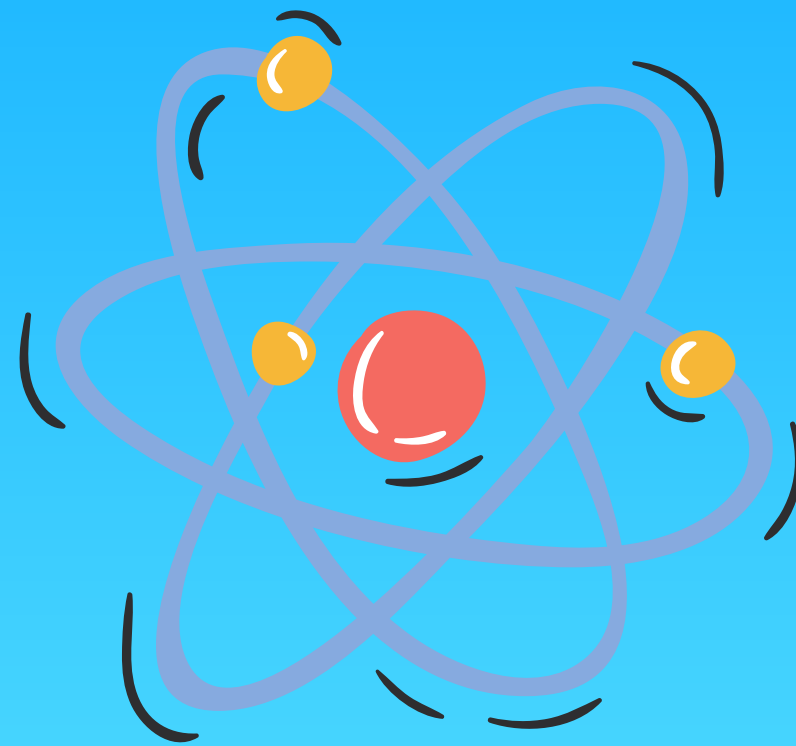
noyau  
(radioactivité)



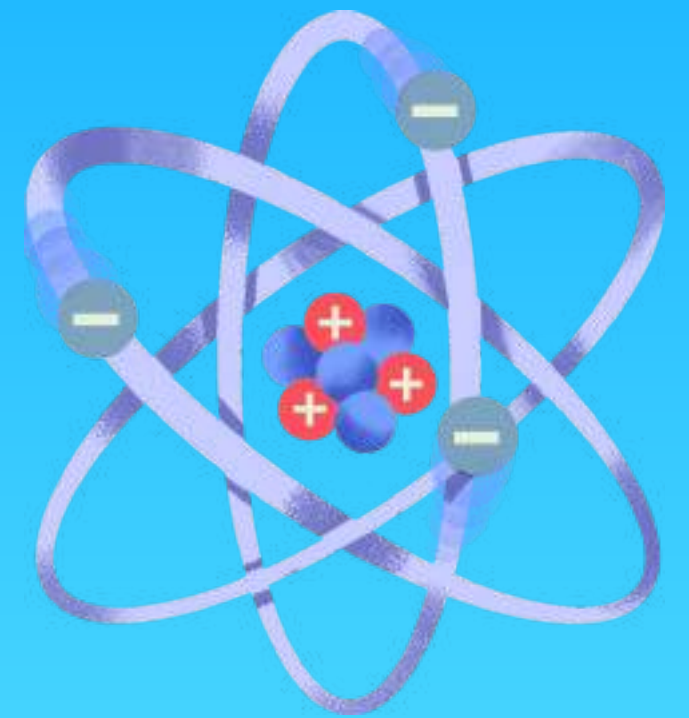
# MÉCANISMES GÉNÉRAUX



Échauffement



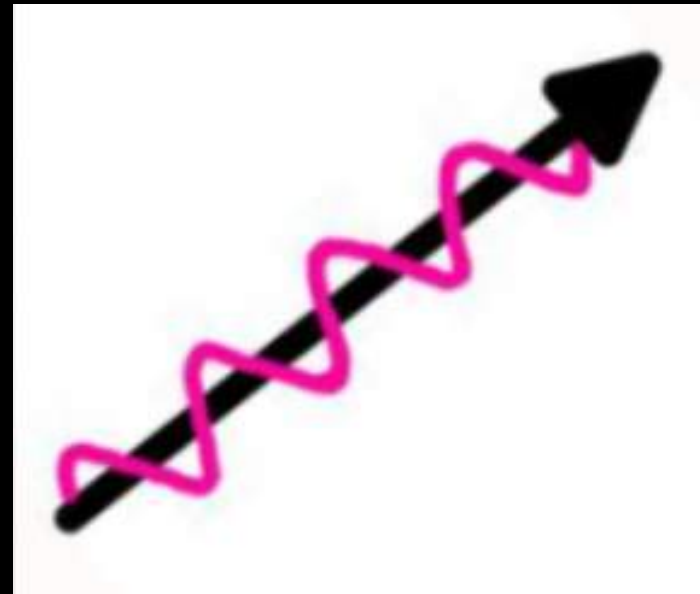
Excitation



Ionisation

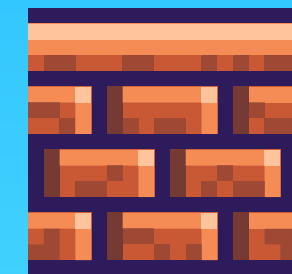
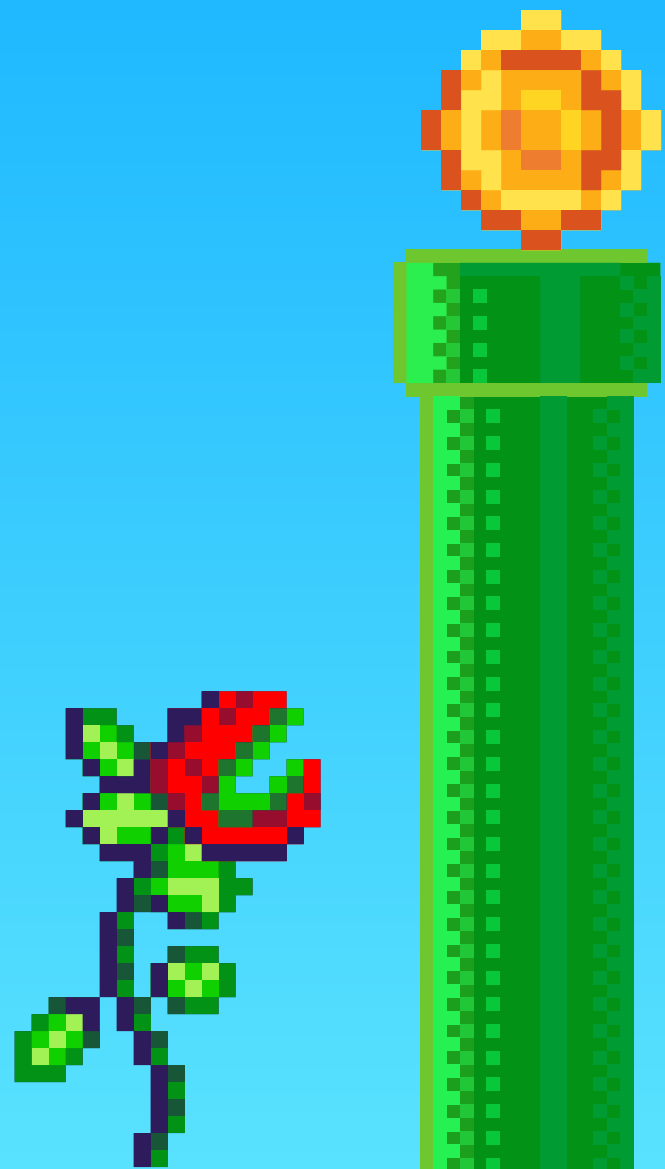
# Le photon

$$E = h\nu$$



$h$  = constante de Planck

$\nu$  = fréquence de vibration du REM



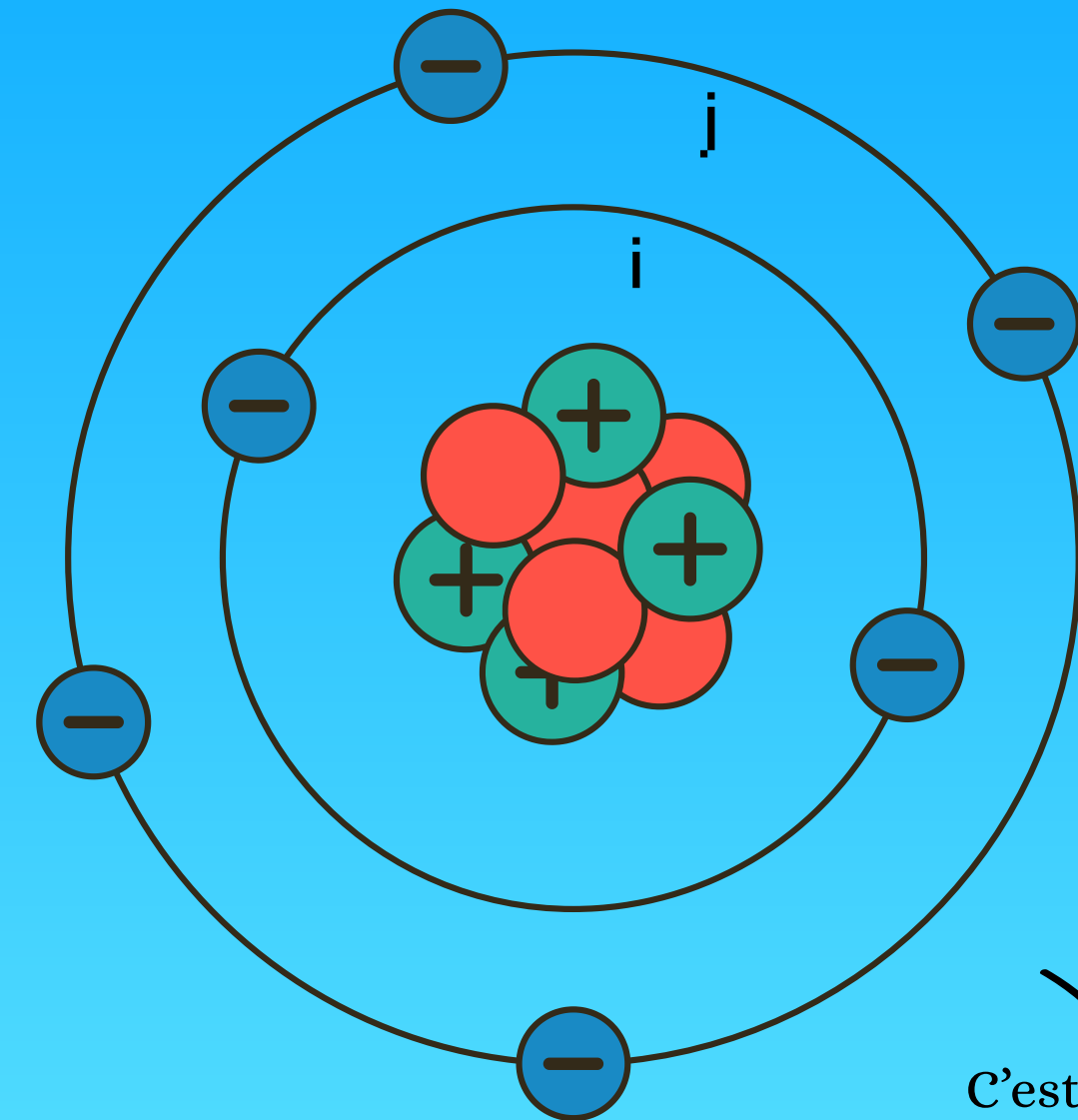
# L'ATOME

Modèle de Bohr

Couches électroniques (i,j,k...)

Énergie de l'électron =  $W_i$   
Énergie de liaison de l'électron =  $|W_i|$

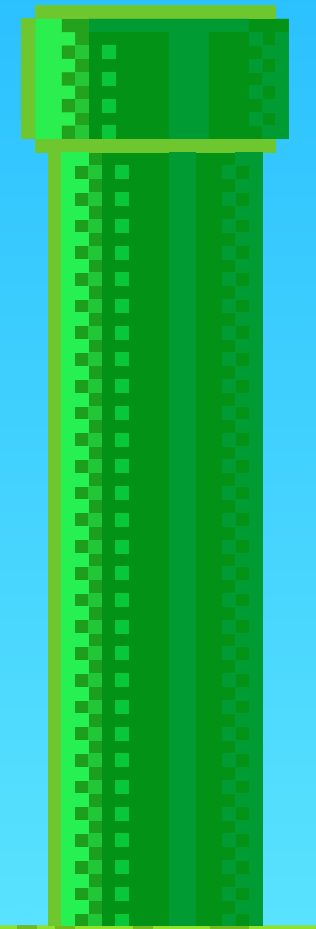
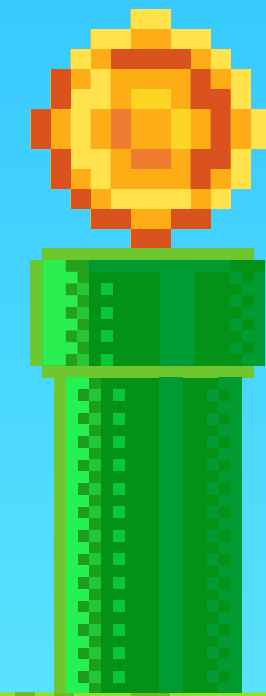
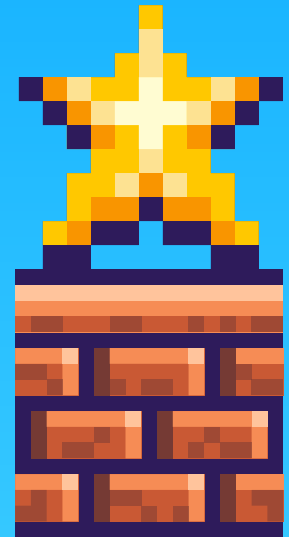
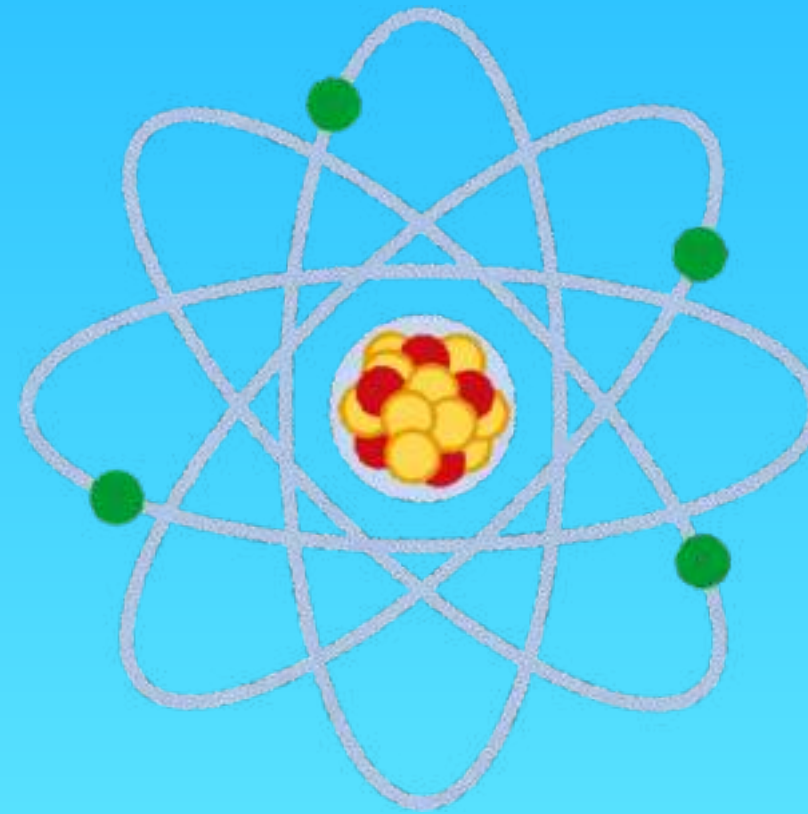
C'est l'énergie qu'il faut apporter à l'électron pour l'arracher



# LES INTERACTIONS DE BASE

Excitation

Ionisation



# EXCITATION

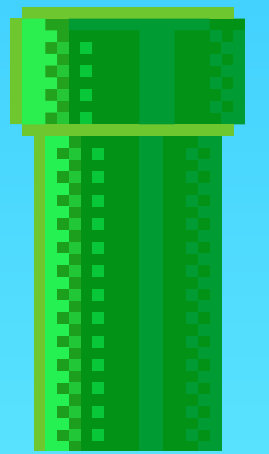
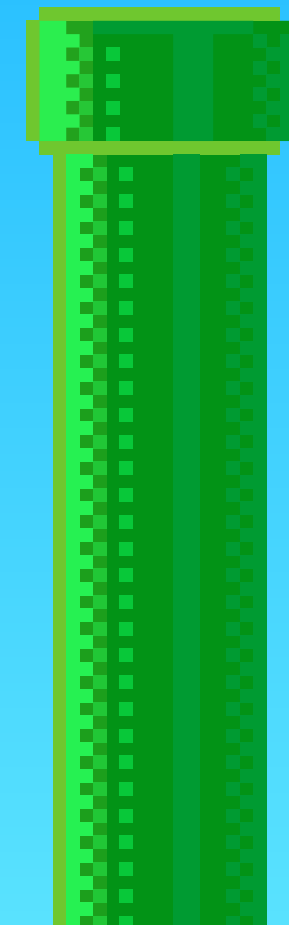
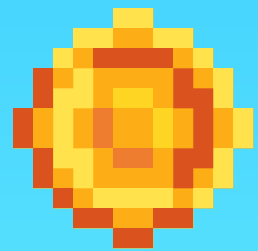
Si  $E < |W_i| - |W_j|$

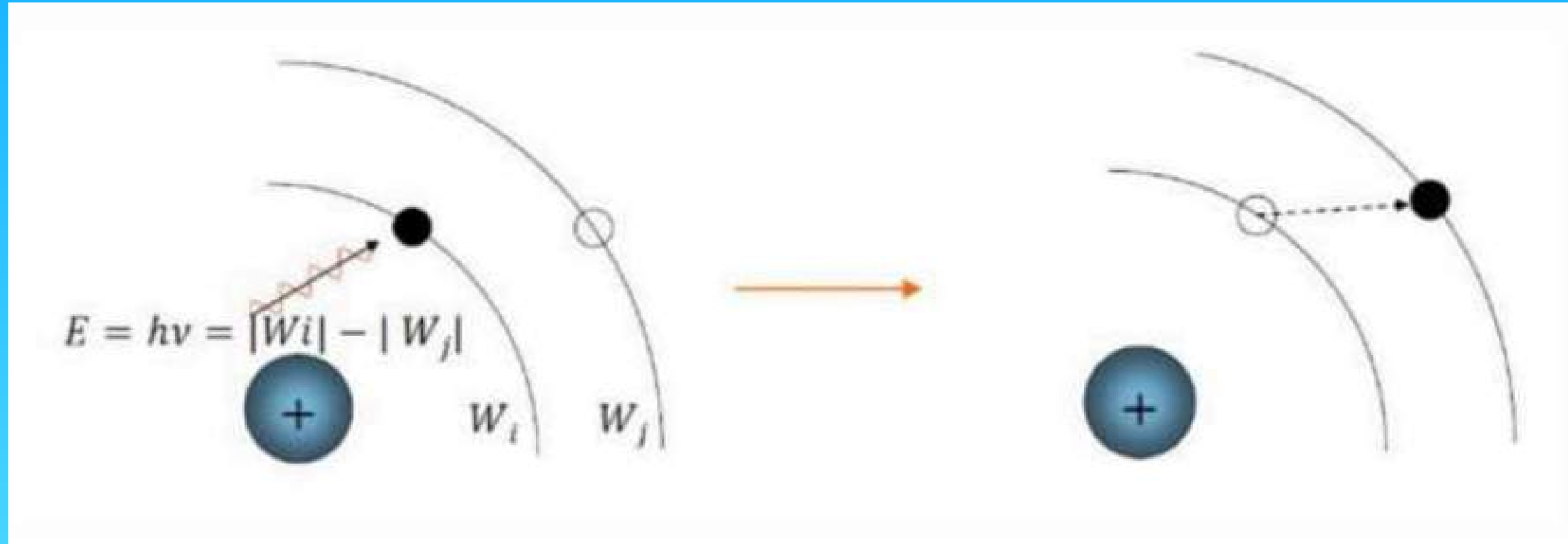
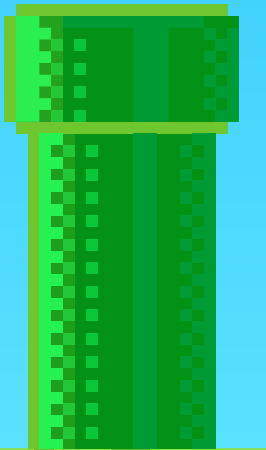
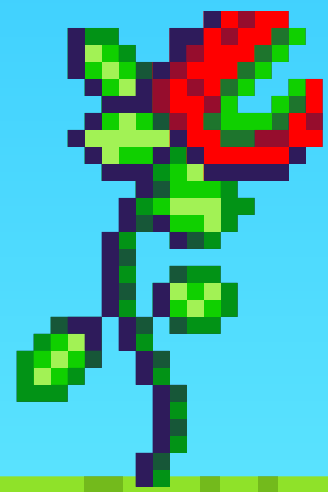
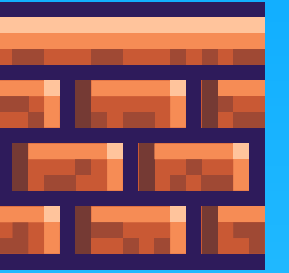
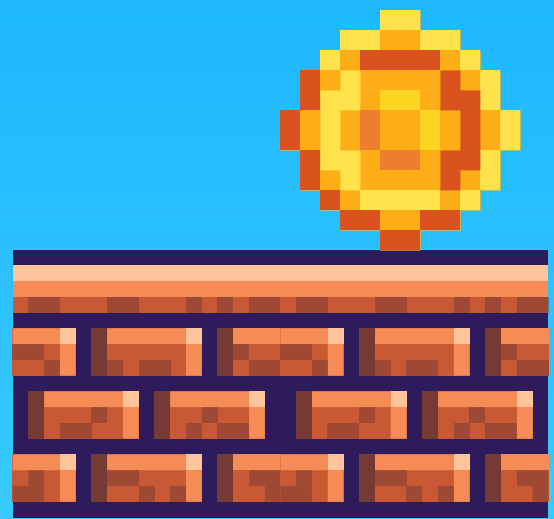
Simple échauffement

Si  $E = |W_i| - |W_j|$

Absorption de l'énergie ; case vacante

Énergie absorbée, quantifiée (valeurs bien définies), état instable





# IONISATION

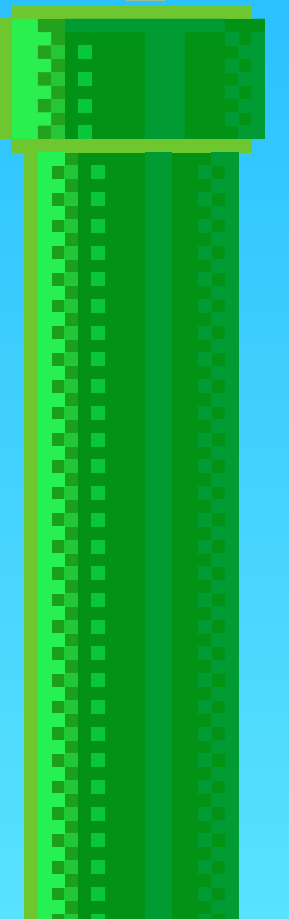
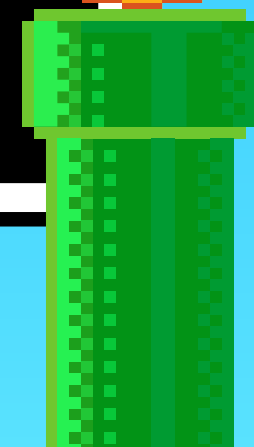
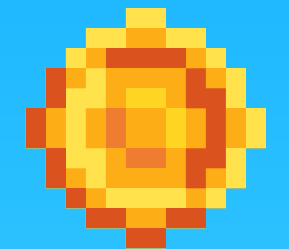
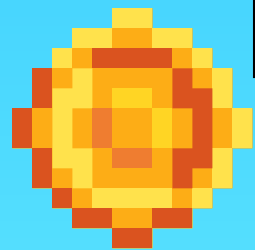
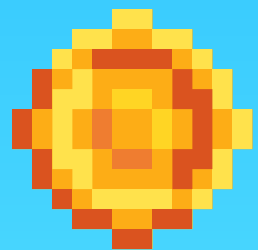
Si  $E > |W_i| - |W_j|$

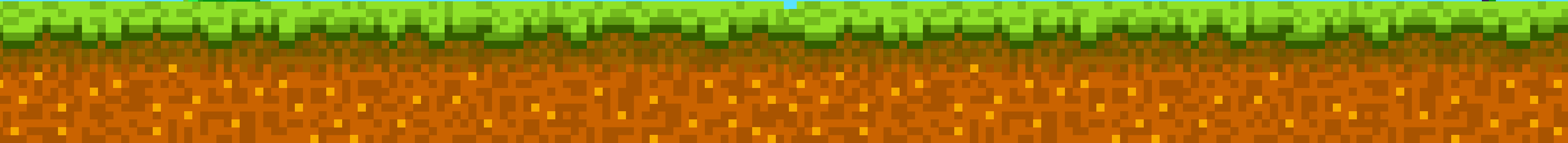
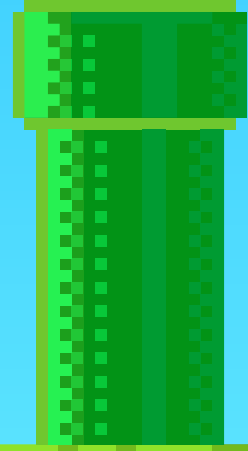
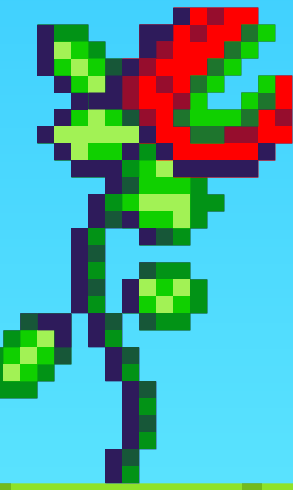
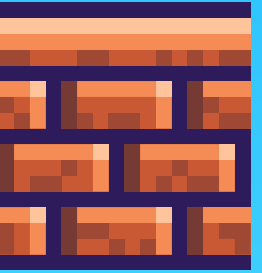
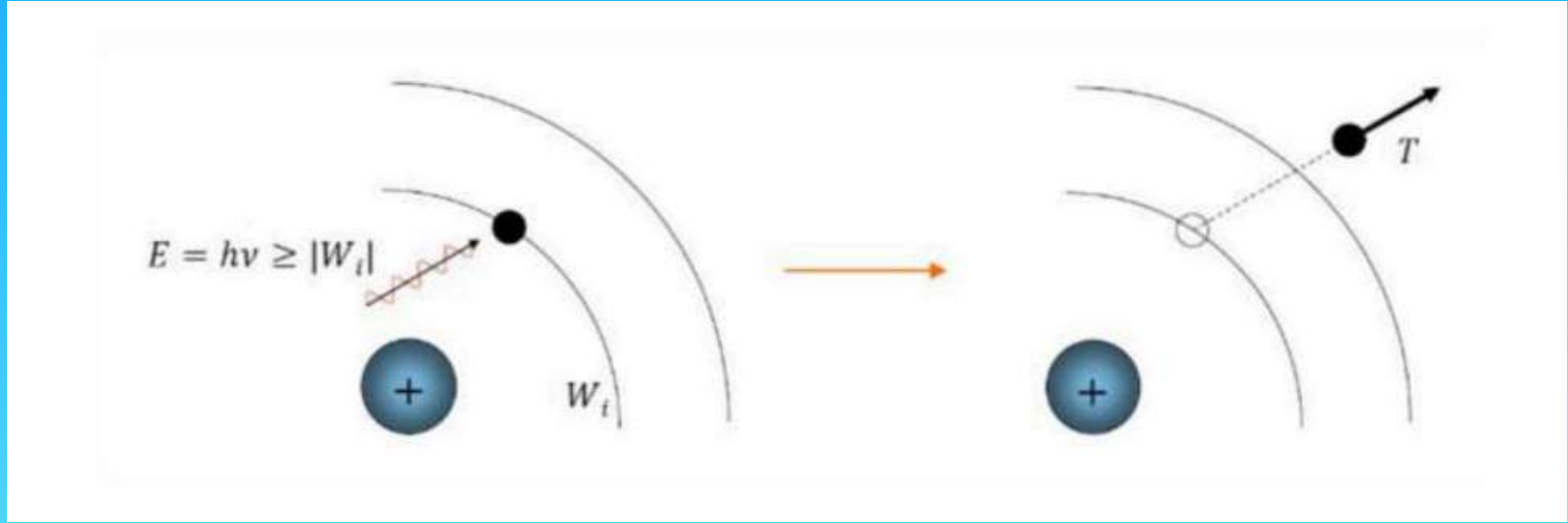
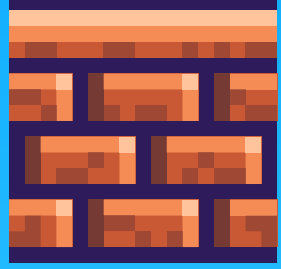
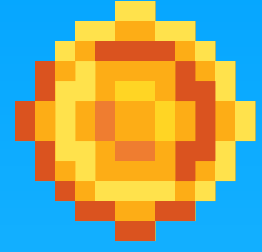
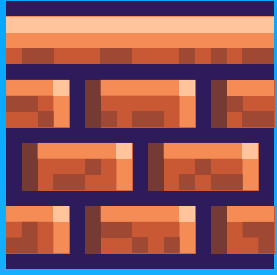


Excès d'énergie

Énergie cinétique  $T = h\nu - |W_i|$

Énergie PAS quantifiée (continue), état instable





# IONISANT OU NON-IONISANT ?

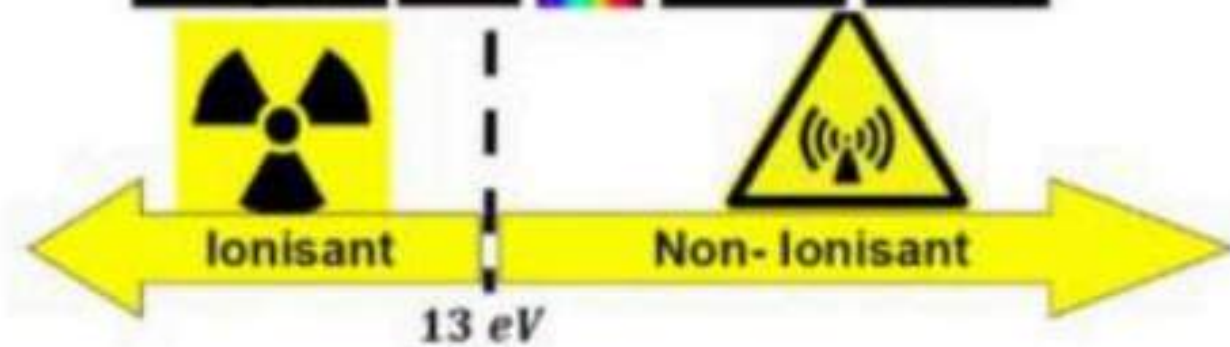
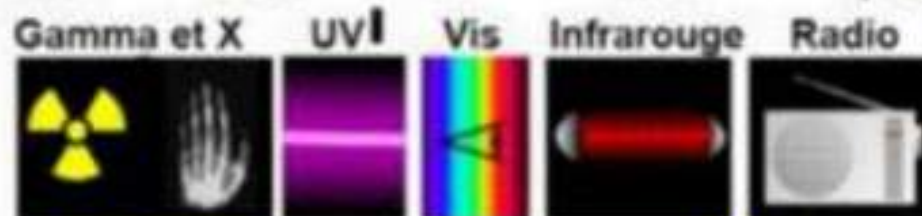
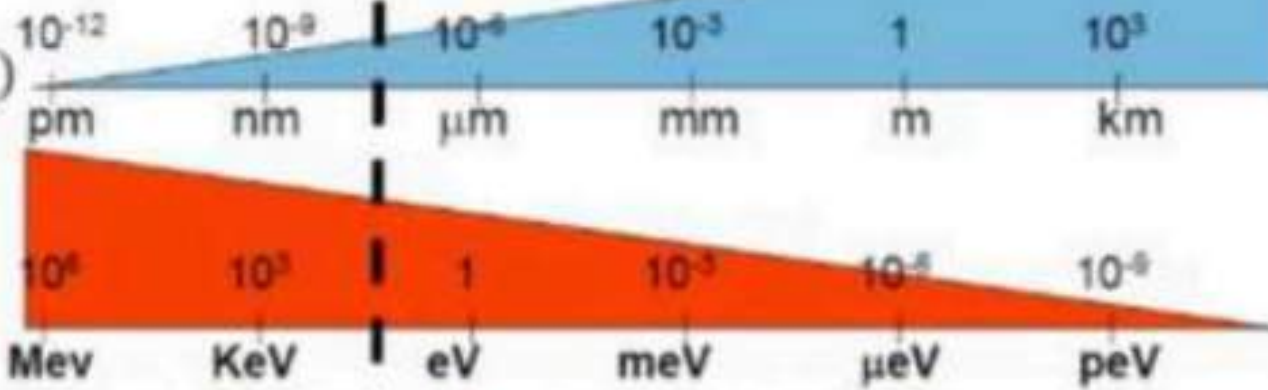
Cela dépend de l'énergie de liaison moyenne des électrons dans les atomes qui constituent cette matière

Spectre des rayonnements électromagnétiques

Longueur d'onde  $\lambda$  (m)

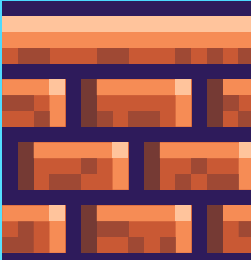
$$E = \frac{1240}{\lambda}$$

Énergie (eV)



$$h\nu \geq |Wn|$$

On prend comme seuil celle d'une molécule d'eau :  $W(\text{H}_2\text{O}) = 13,6 \text{ eV}$



# DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT IONISANT ?

LES PARTICULES CHARGÉES :

$\alpha$  ;  $\beta^+$  ;  $\beta^-$  ;  $e^-$  ;  $p^+$

LES REM ET LES PARTICULES  
NEUTRES :

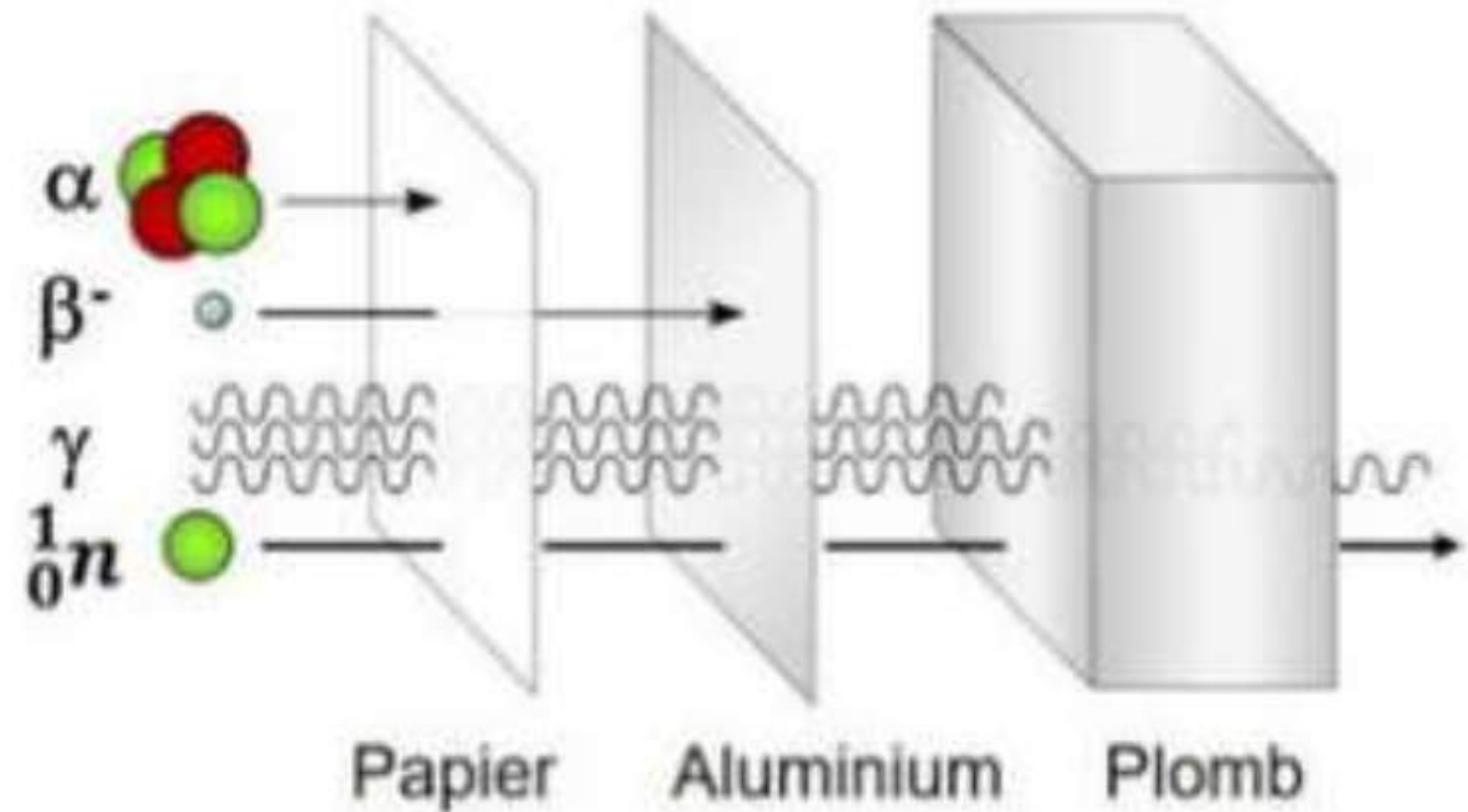
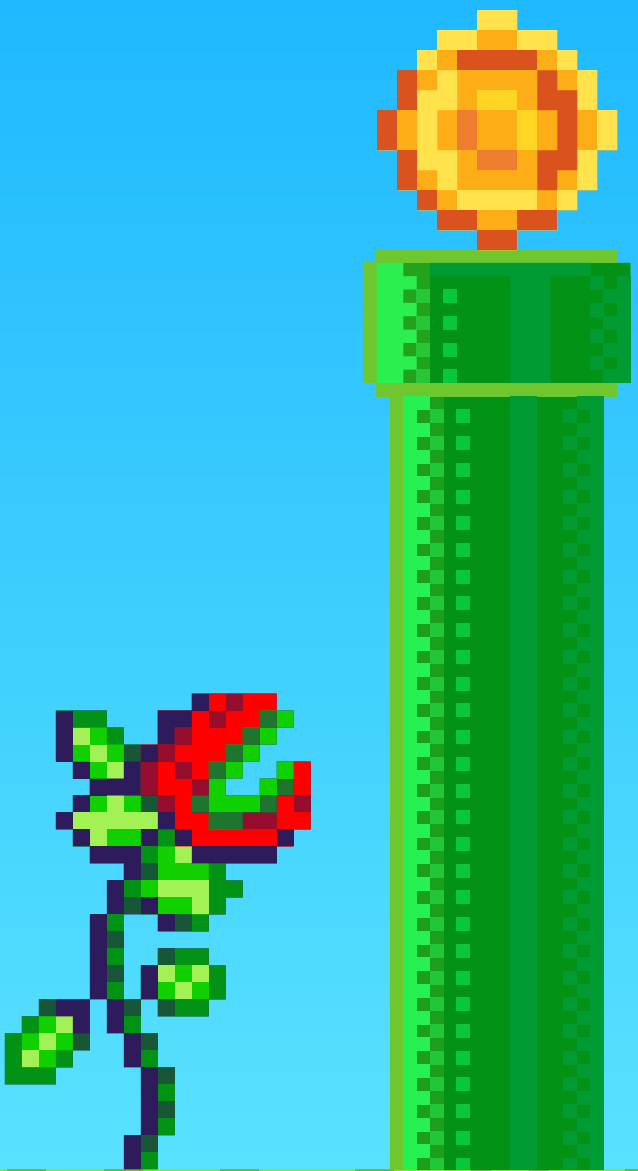
$\gamma$  ; X ; n

- Directement ionisantes
- Interactions obligatoires
- Interactions coulombiennes  
(électrostatiques)

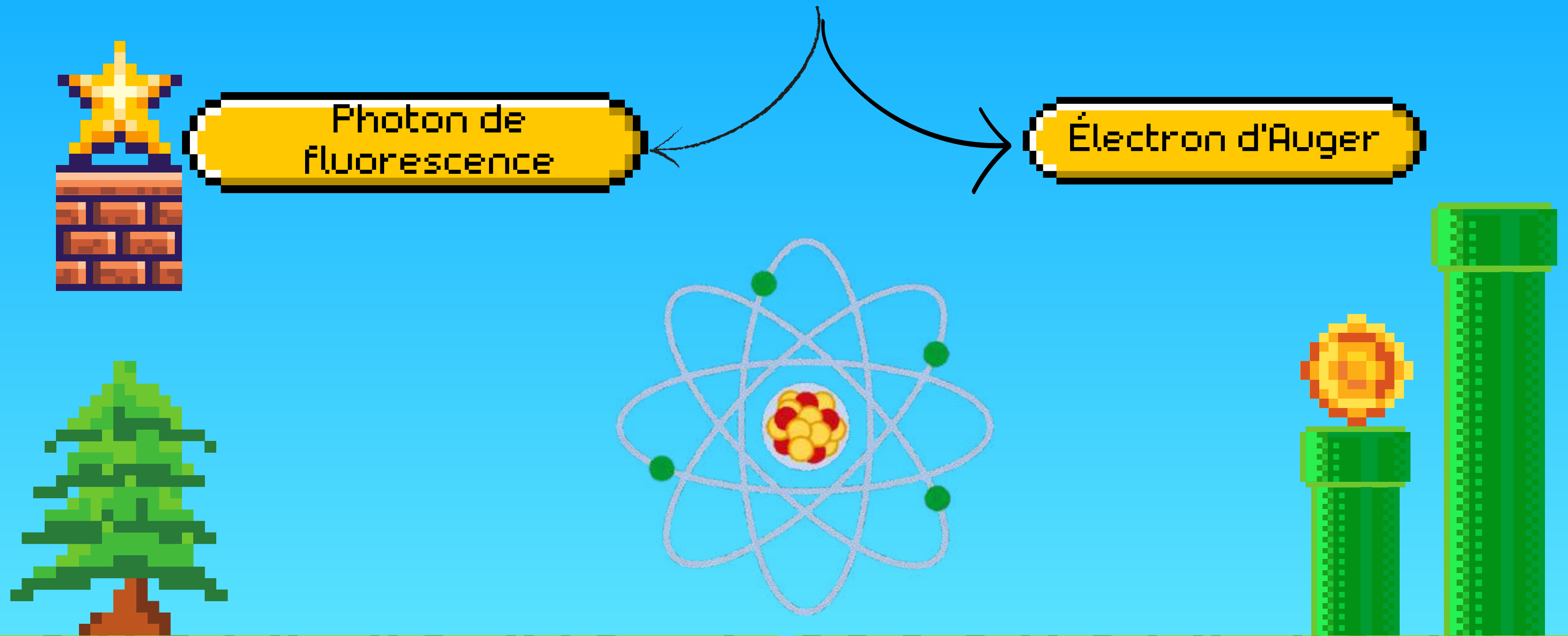
- Indirectement ionisantes
- Interactions non-obligatoires
- Interactions balistiques (statistiques)

# PÉNÉTRATION DANS LA MATIÈRE

Plus une particule est chargée, plus elle aura d'interactions, plus vite elle sera arrêtée



# CONSEQUENCES DES INTERACTIONS



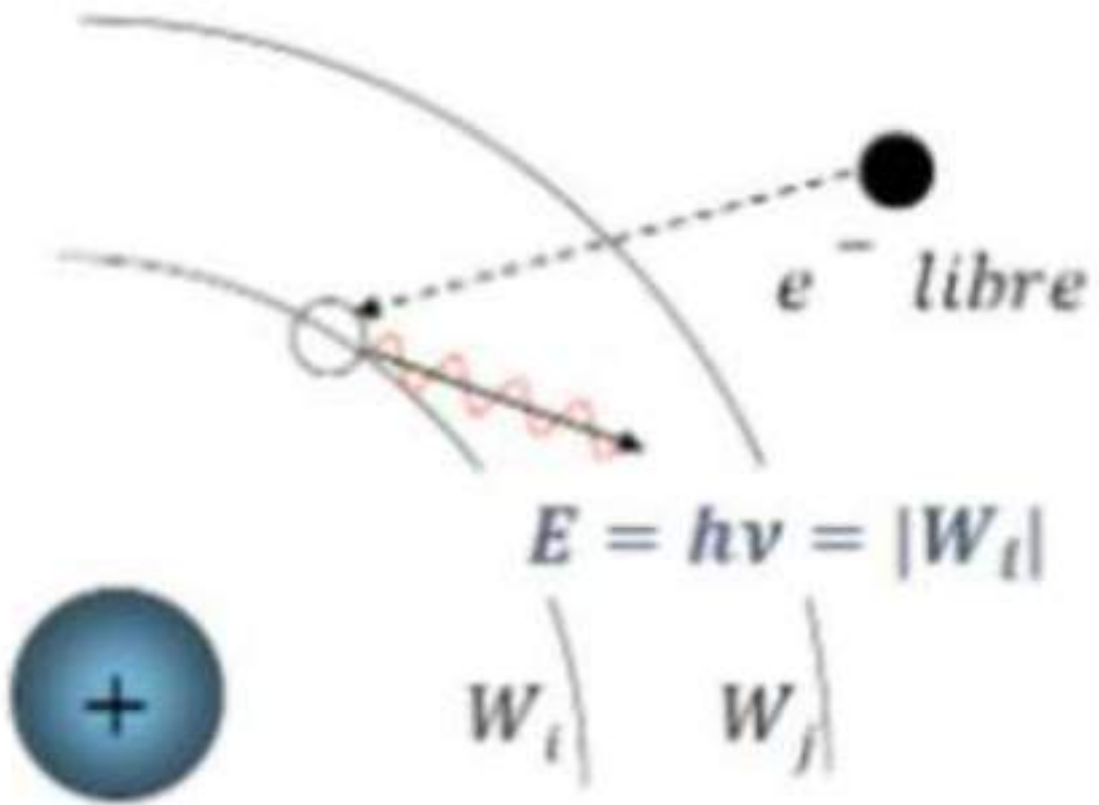
# ÉMISSION D'UN PHOTON DE FLUORESCENCE

- L'atome possède un excès d'énergie, il va donc restituer cette énergie
- Retour à l'état fondamental dans un état stable
- Pour redescendre en énergie, il libère un photon de fluorescence

# ÉMISSION D'UN PHOTON DE FLUORESCENCE

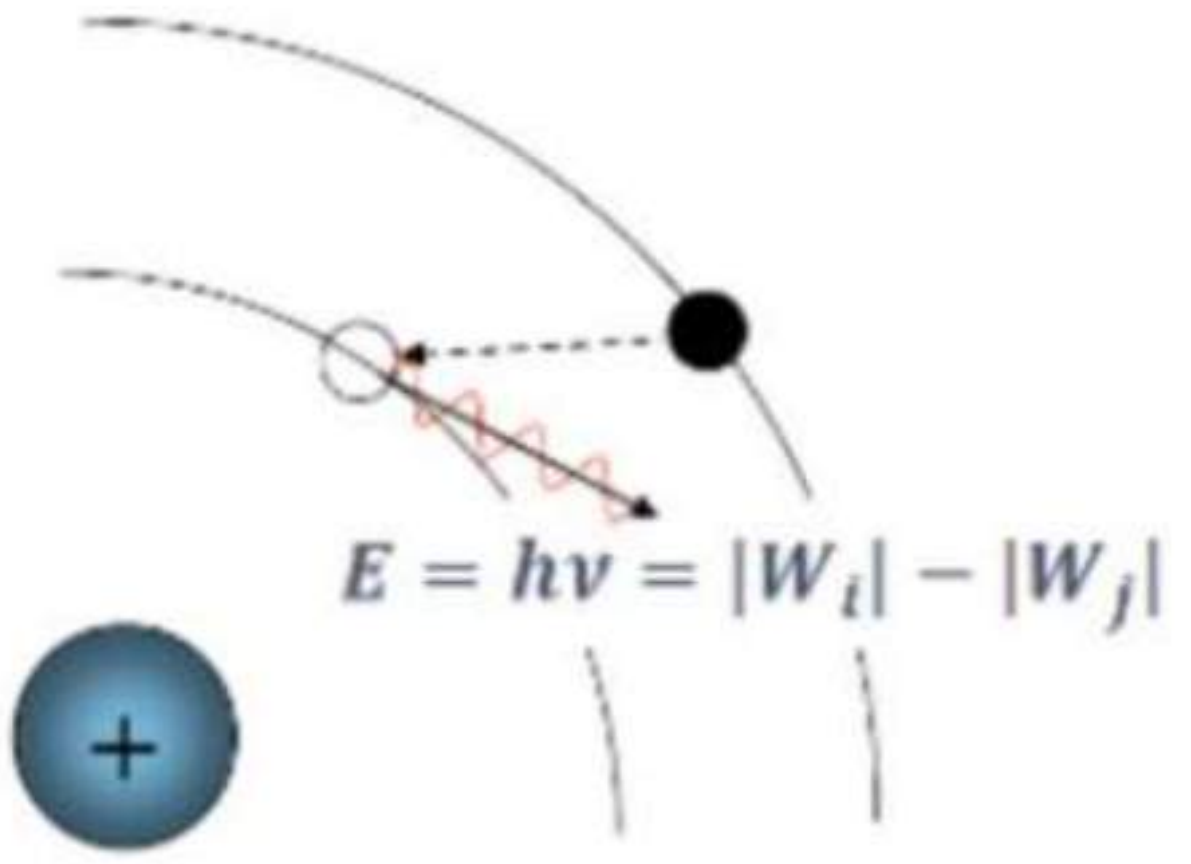
Après ionisation

$$E = |W_i|$$



Après excitation

$$E = |W_i| - |W_j|$$

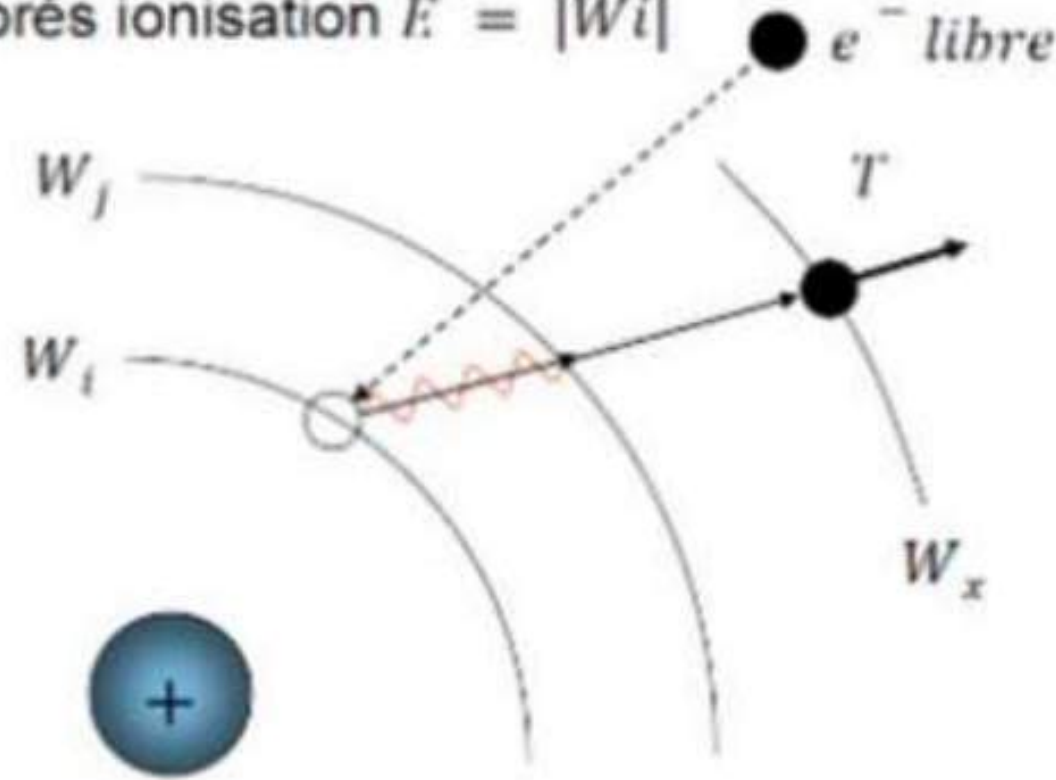


# ÉMISSION D'UN ÉLECTRON D'AUGER

- Le photon de fluorescence ionise un électron plus périphérique
- Électron d'Auger avec une énergie cinétique

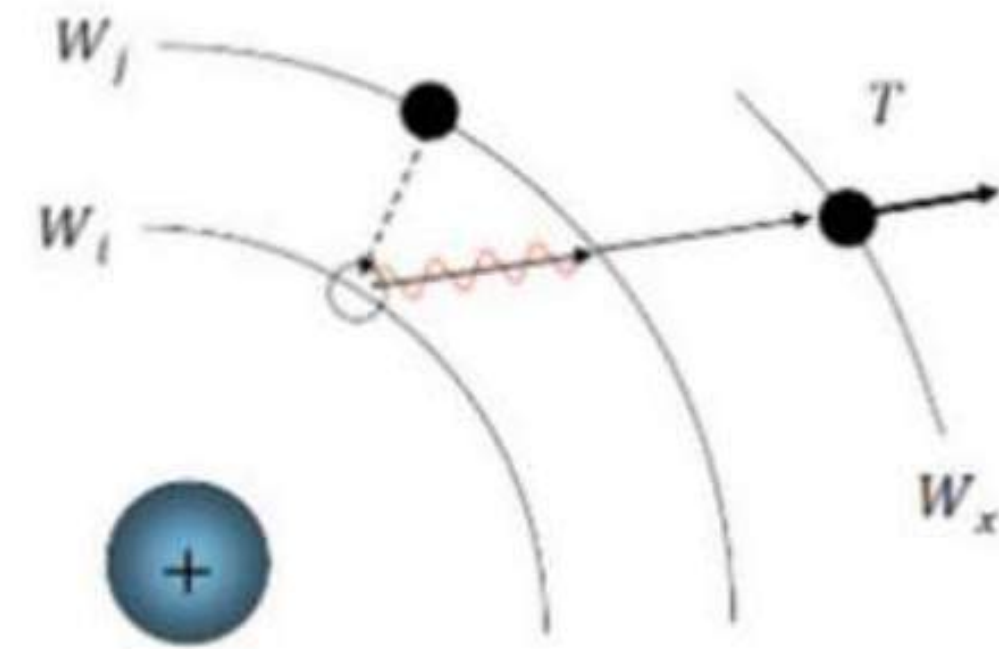
# ÉMISSION D'UN ÉLECTRON D'AUGER

Après ionisation  $E = |W_i|$



$$T = h\nu - |W_x| = |W_i| - |W_x|$$

Après excitation  $E = |W_i| - |W_j|$

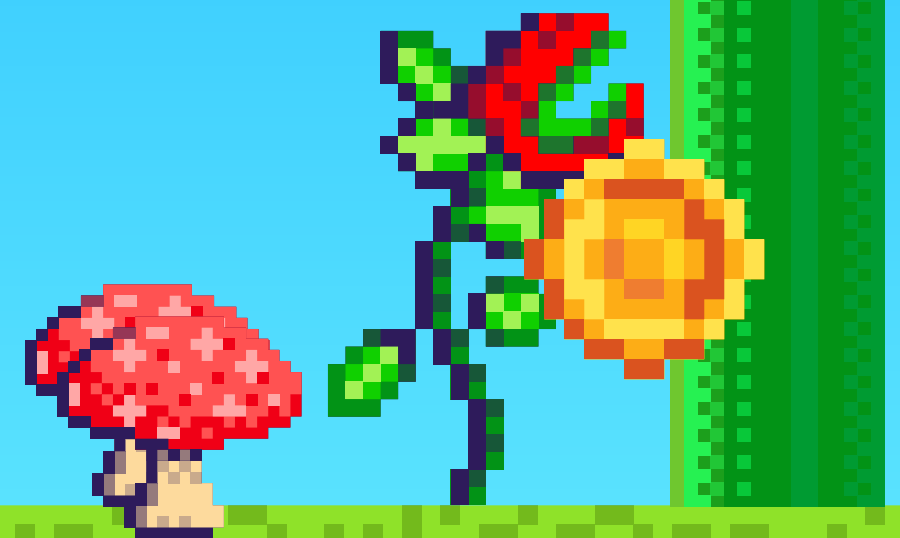
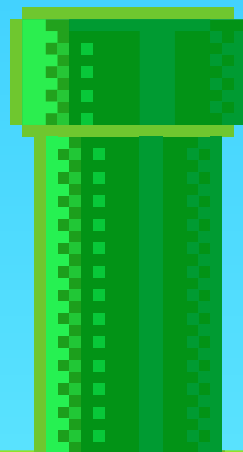


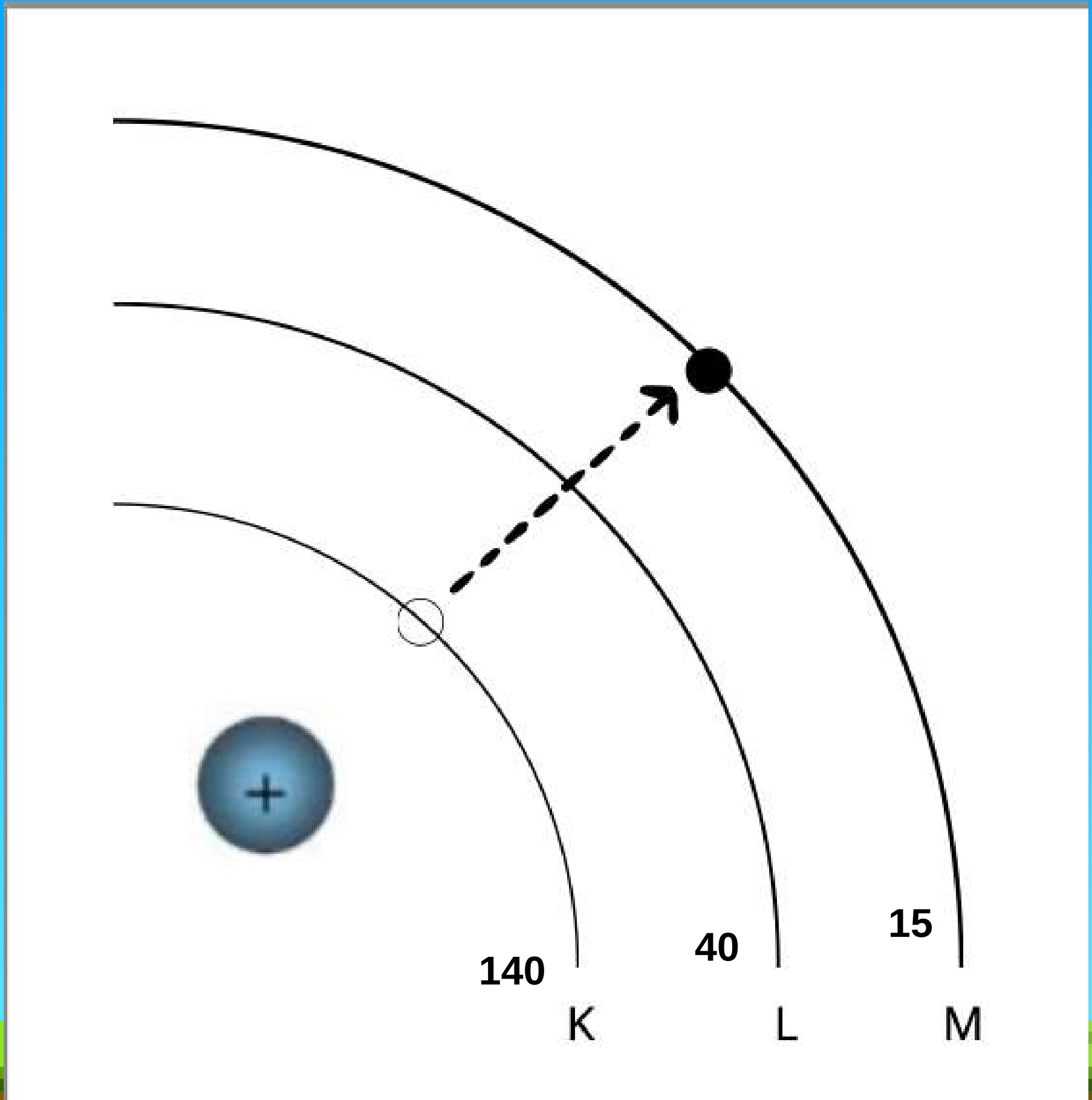
$$T = h\nu - |W_x| = (|W_i| - |W_j|) - |W_x|$$

# QCM !!!!!

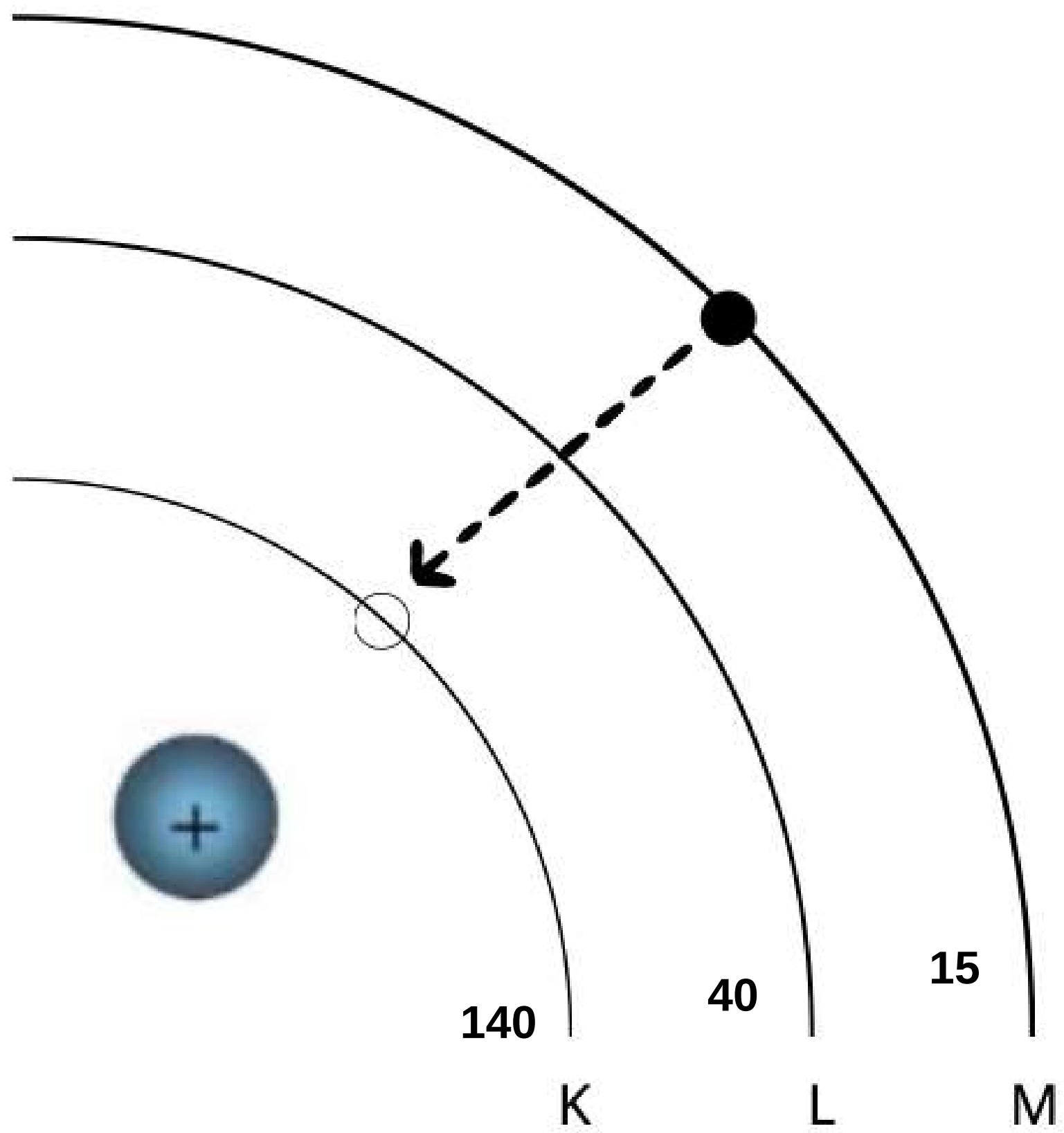
**QCM 1** : On considère l'atome de Chlore ( $Z=17$ ) dont les énergies des électrons selon le modèle de Bohr sont (en eV) :  $W_K = -140$  ;  $W_L = -40$  et  $W_M = -15$ . Un atome de Chlore subit une excitation de la couche K vers la couche M. Parmi les phénomènes que l'on pourra observer, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Un photon de fluorescence de 15 eV
- B) Un photon de fluorescence de 25 eV
- C) Un électron d'Auger avec une énergie cinétique de 110 eV
- D) Un électron d'Auger avec une énergie cinétique de 125 eV
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

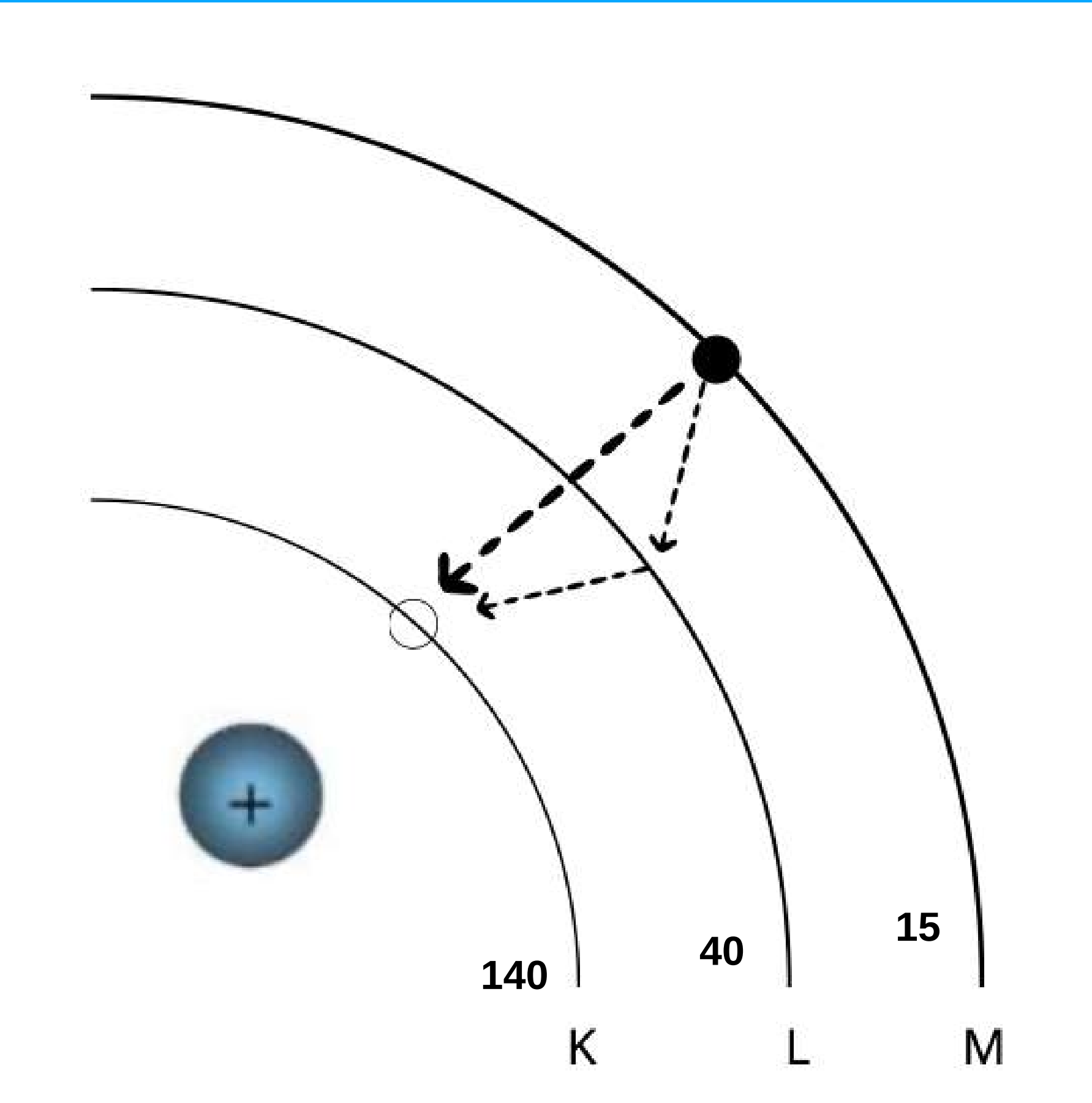




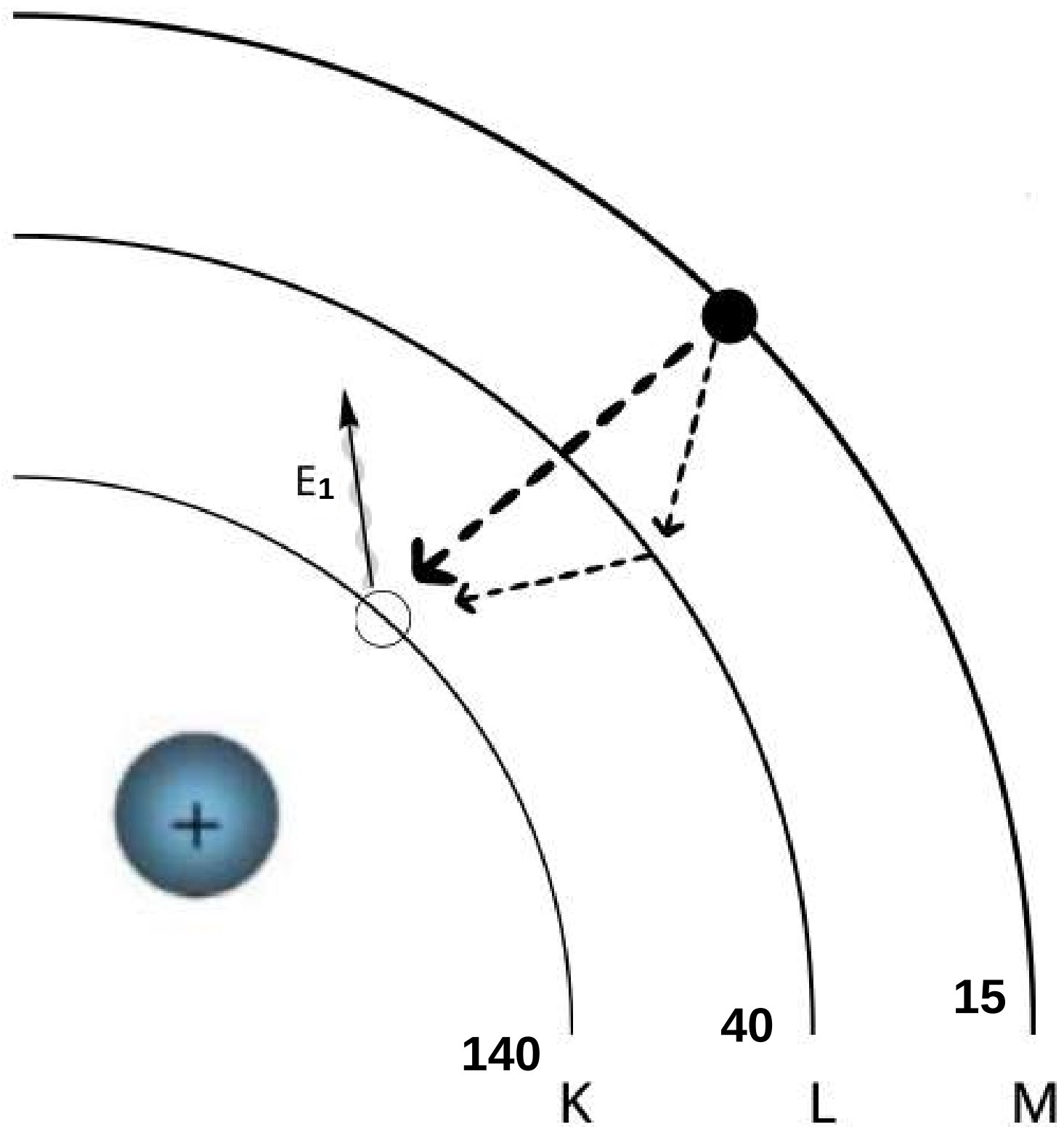
**Excitation de l'électron :  
Passage de la couche k à la  
couche m**



**Désexcitation directe**



**Désexcitation indirecte**



**Photon de fluorescence :  
désexcitation directe**

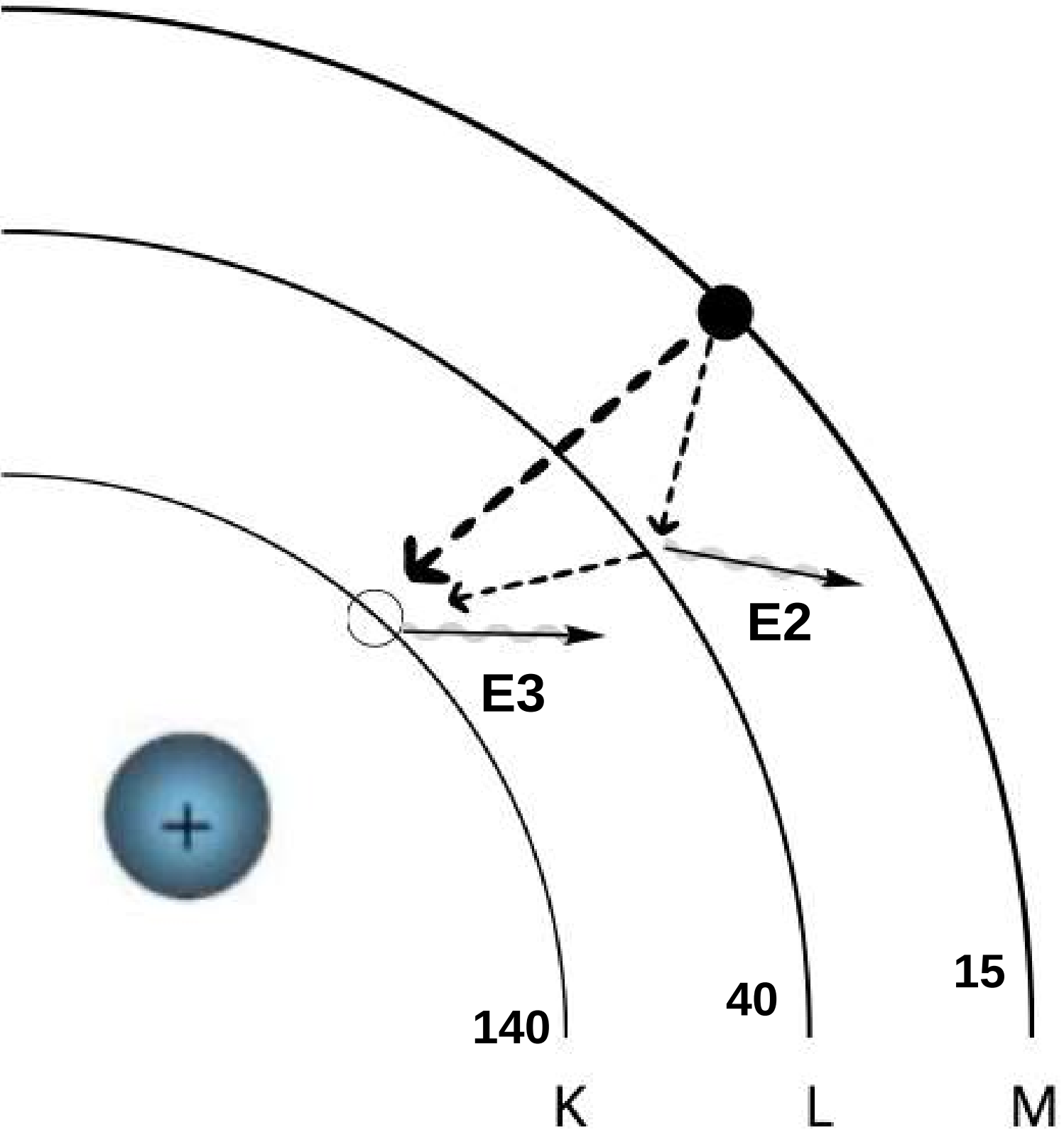
$$\begin{aligned} E_1 &= |W_k| - |W_m| \\ &= 140 - 15 \\ &= 125 \text{ eV} \end{aligned}$$



# Photons de fluorescence : désexcitation indirecte

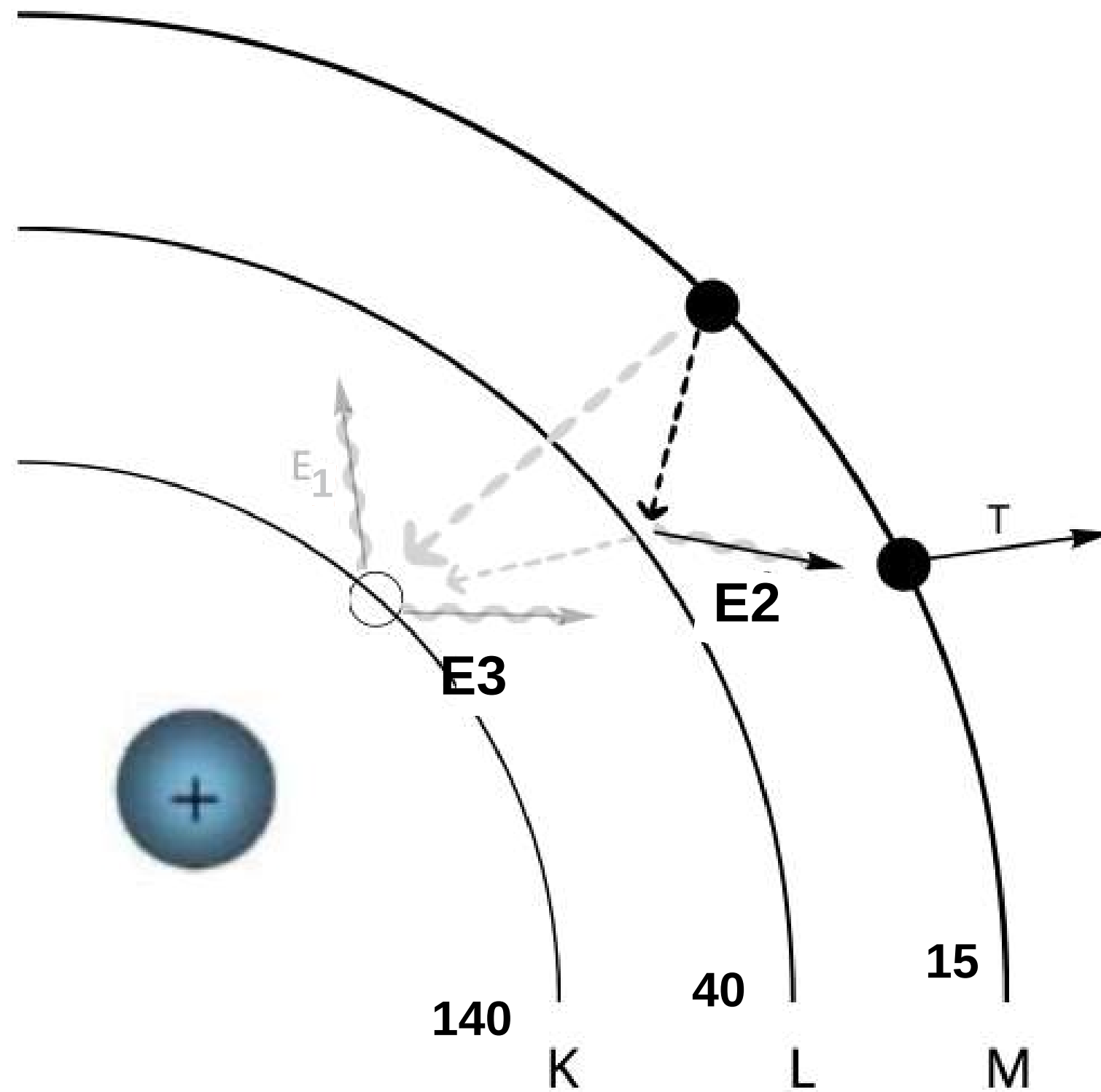
$$\begin{aligned} E2 &= |Wl| - |Wm| \\ &= 40 - 15 \\ &= 25 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E3 &= |Wk| - |Wl| \\ &= 140 - 40 \\ &= 100 \text{ eV} \end{aligned}$$



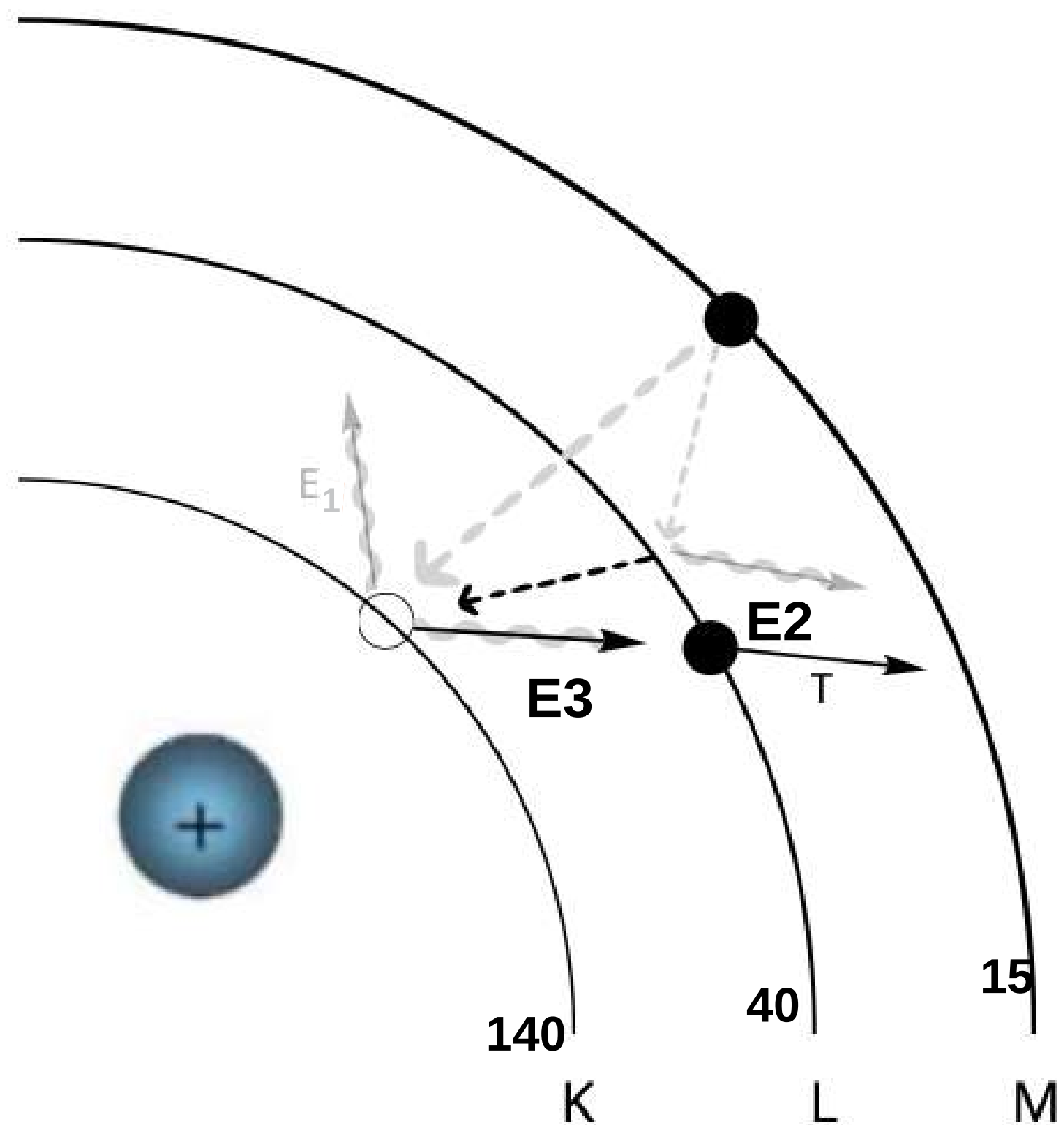
## Électron d'Auger de la couche M:

$$\begin{aligned} T &= E2 - |Wm| \\ &= 25 - 15 \\ &= 10 \text{ eV} \end{aligned}$$



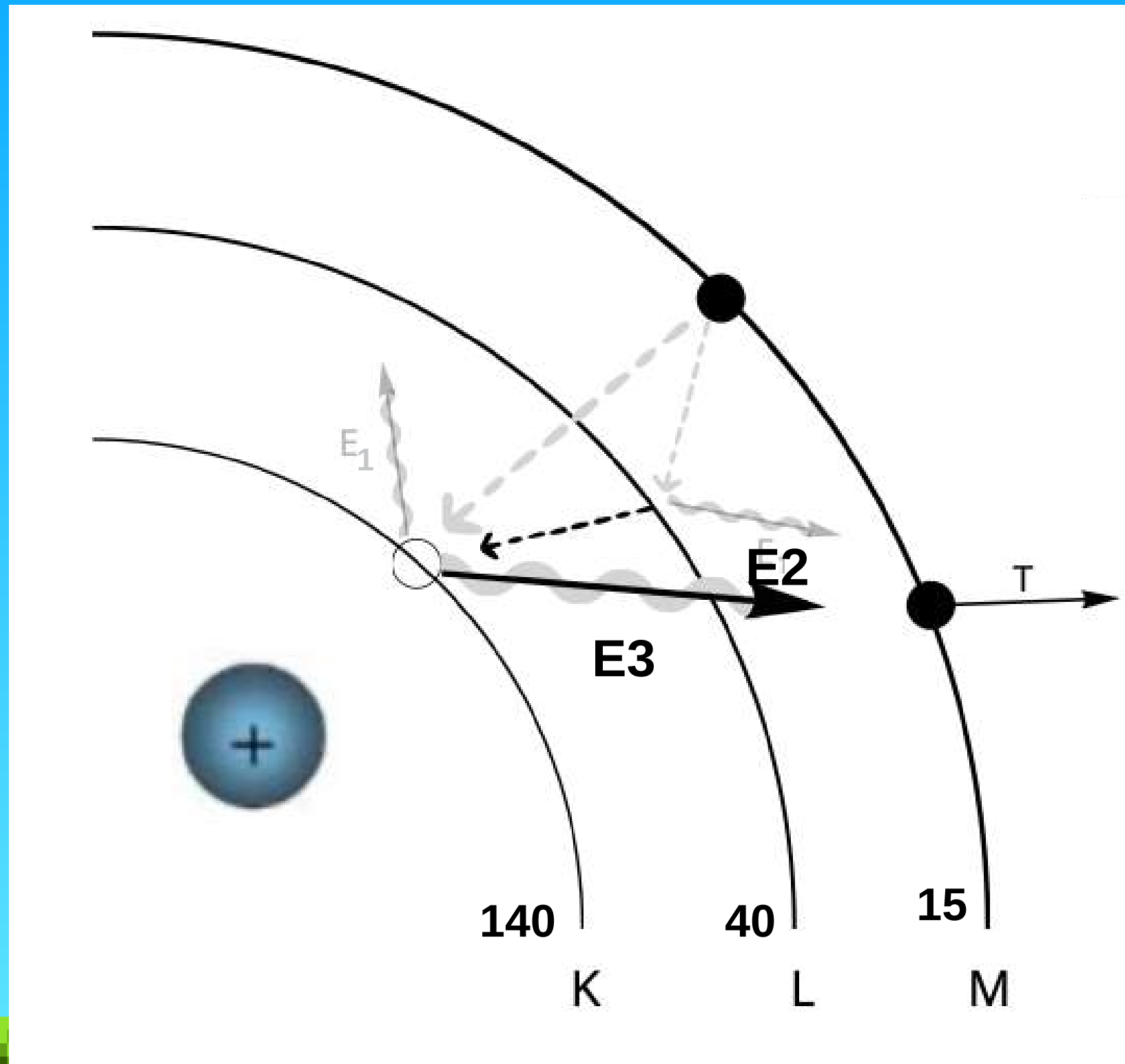
## Électron d'Auger de la couche L:

$$\begin{aligned} T &= E3 - |W| \\ &= 100 - 40 \\ &= 60 \text{ eV} \end{aligned}$$



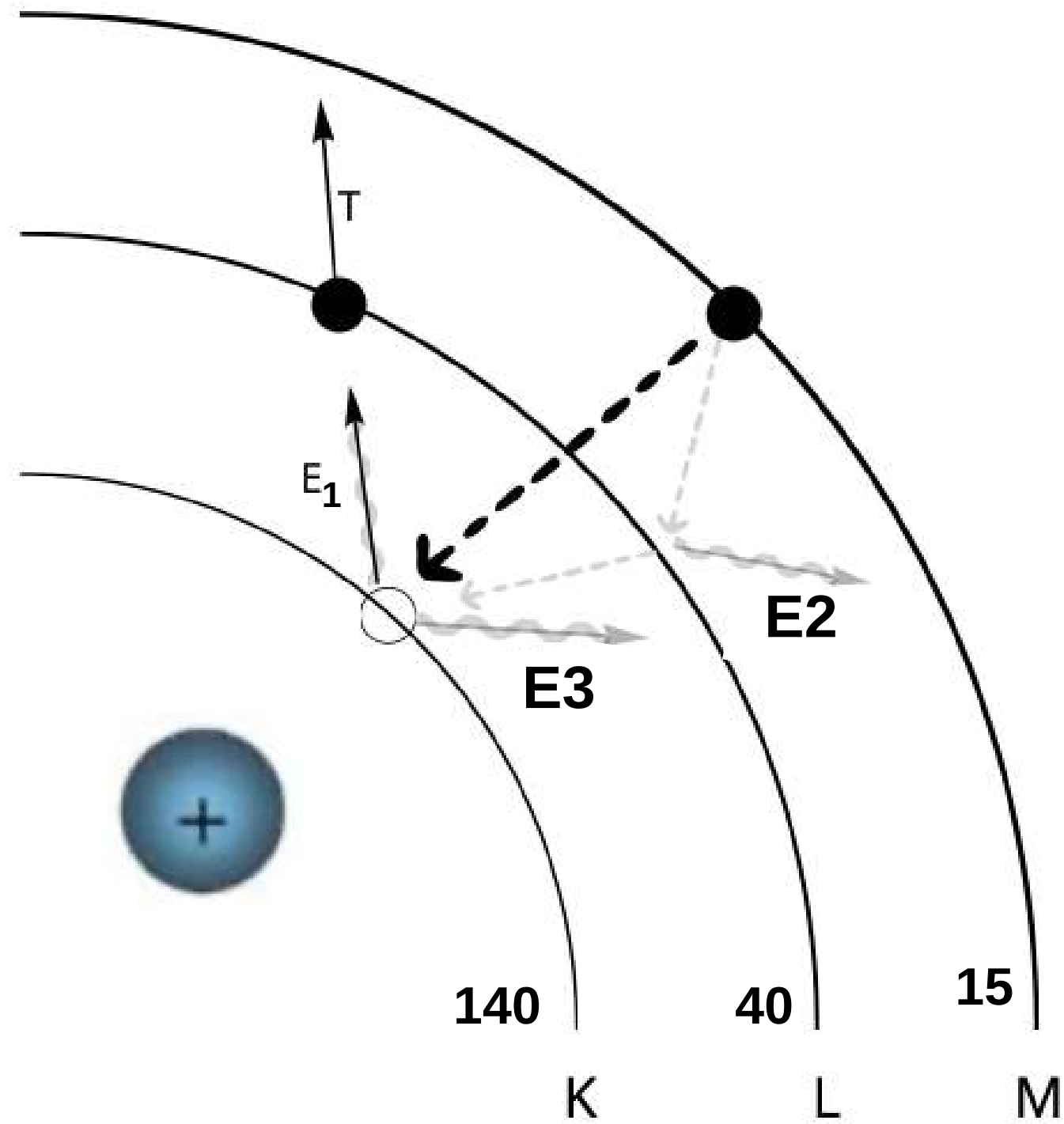
## Électron d'Auger de la couche M:

$$\begin{aligned} T &= E3 - |Wm| \\ &= 100 - 15 \\ &= 85 \text{ eV} \end{aligned}$$



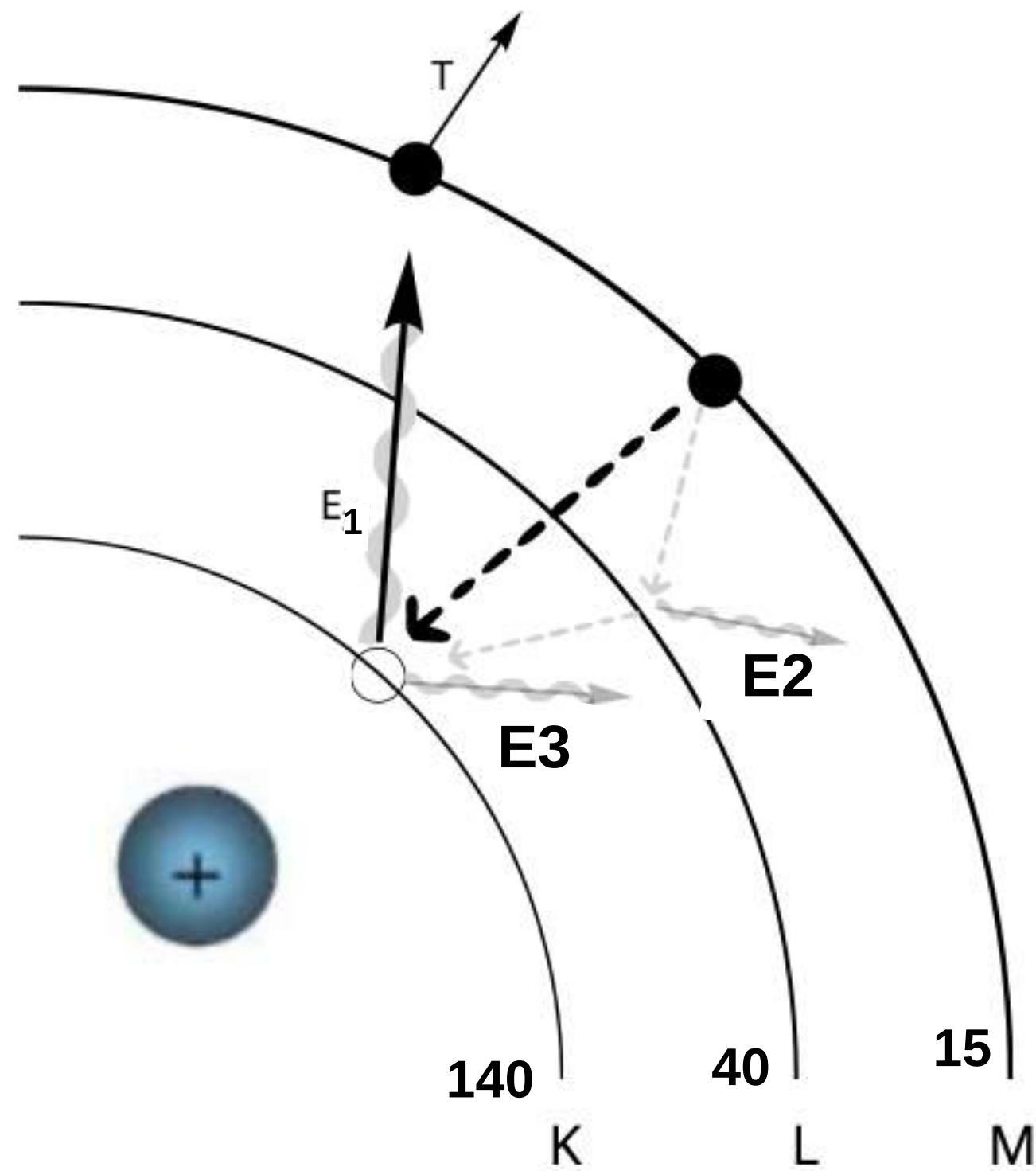
## Électron d'Auger de la couche L:

$$\begin{aligned} T &= E1 - |W| \\ &= 125 - 40 \\ &= 85 \text{ eV} \end{aligned}$$



## Électron d'Auger de la couche M:

$$\begin{aligned} T &= E_1 - |W_m| \\ &= 125 - 15 \\ &= 110 \text{ eV} \end{aligned}$$



# 00NC

Photons de fluorescence possibles :

$E_1 = 125 \text{ eV}$

$E_2 = 25 \text{ eV}$

$E_3 = 100 \text{ eV}$

Électrons d'Auger possibles :

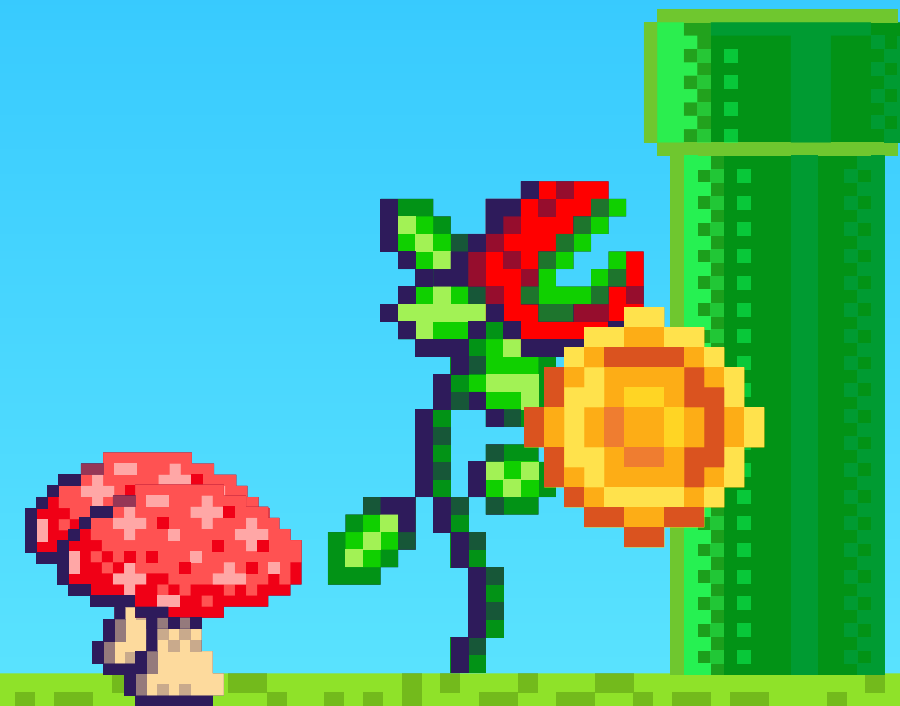
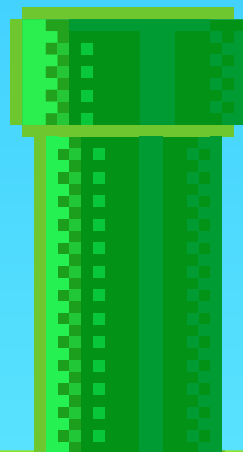
$T = 10 \text{ eV}$

$T = 60 \text{ eV}$

$T = 85 \text{ eV}$

$T = 85 \text{ eV}$

$T = 110 \text{ eV}$

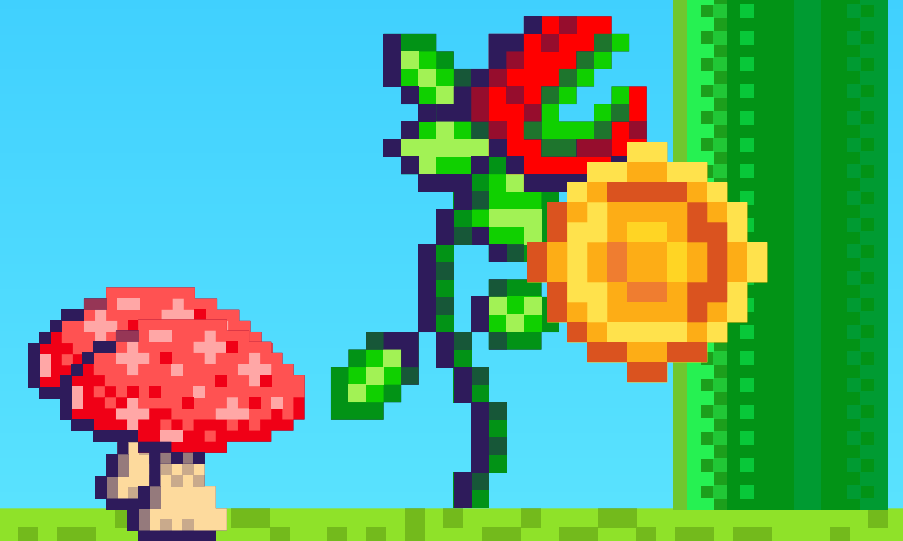
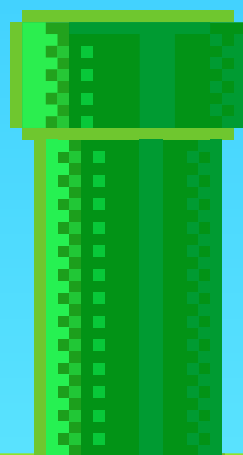


Réponses B et C

# QCM !!!!!

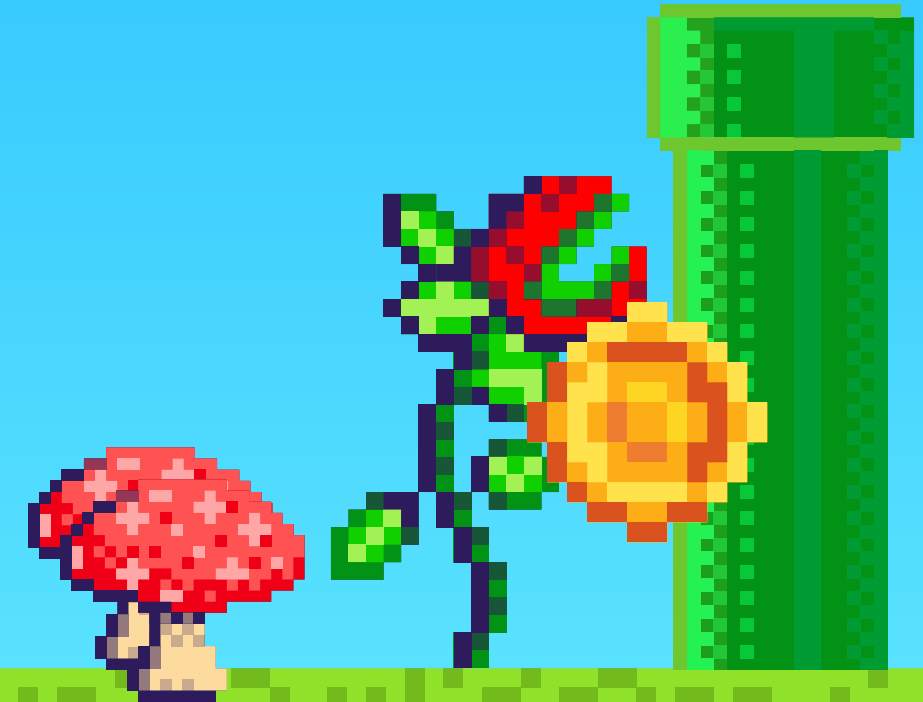
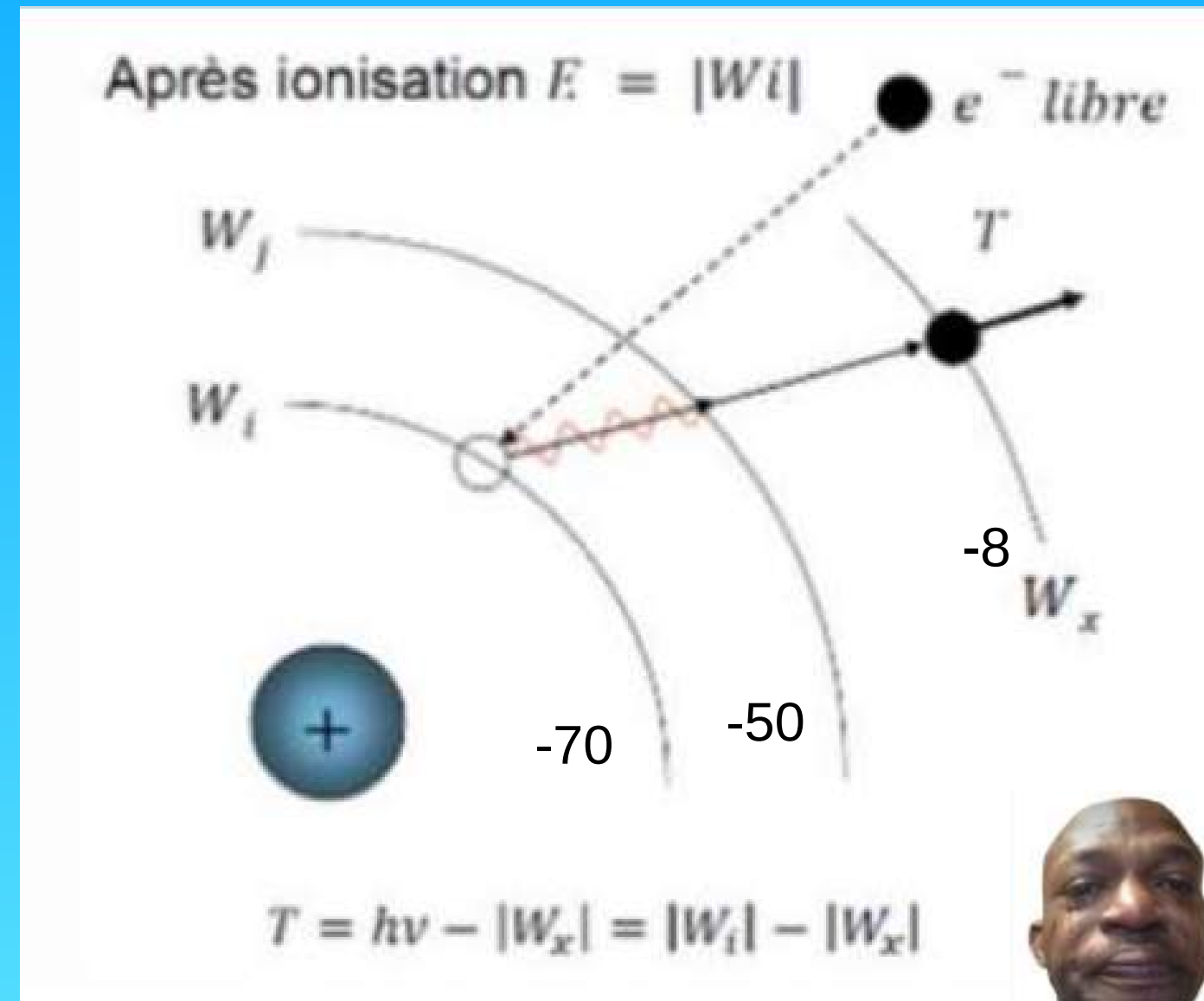
**QCM 2** : On considère l'atome de sodium ( $Z=11$ ) dont les énergies des électrons selon le modèle de Bohr sont (en eV) :  $W_K = -70$  ;  $W_L = -20$  et  $W_M = -8$ . Un atome de sodium subit une ionisation de la couche K. Parmi les phénomènes que l'on pourra observer, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Un photon de fluorescence de 12 eV
- B) Un photon de fluorescence de 50 eV
- C) Un électron d'Auger avec une énergie cinétique de 4 eV
- D) Un électron d'Auger avec une énergie cinétique de 62 eV
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses



# QCM !!!!!

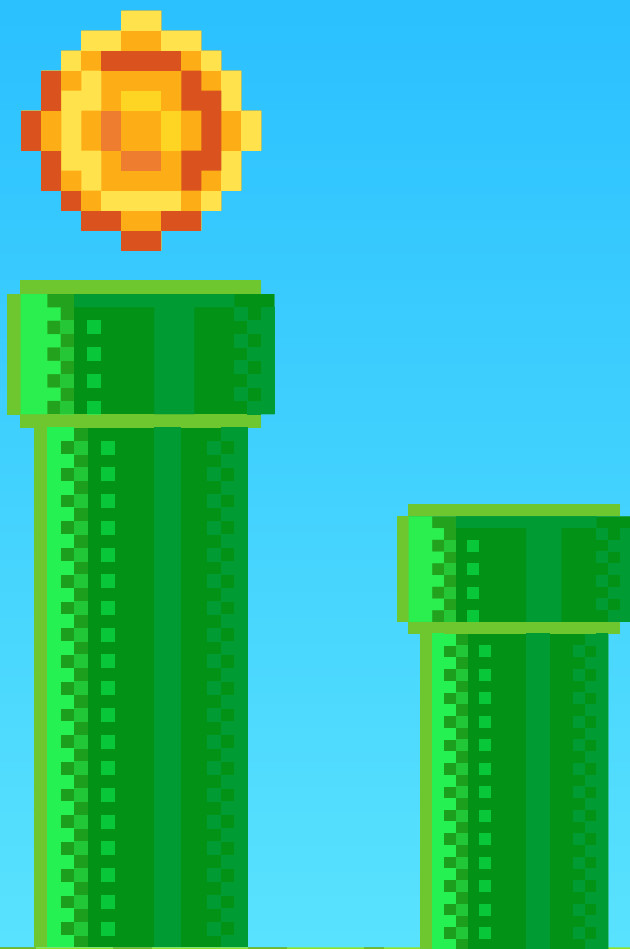
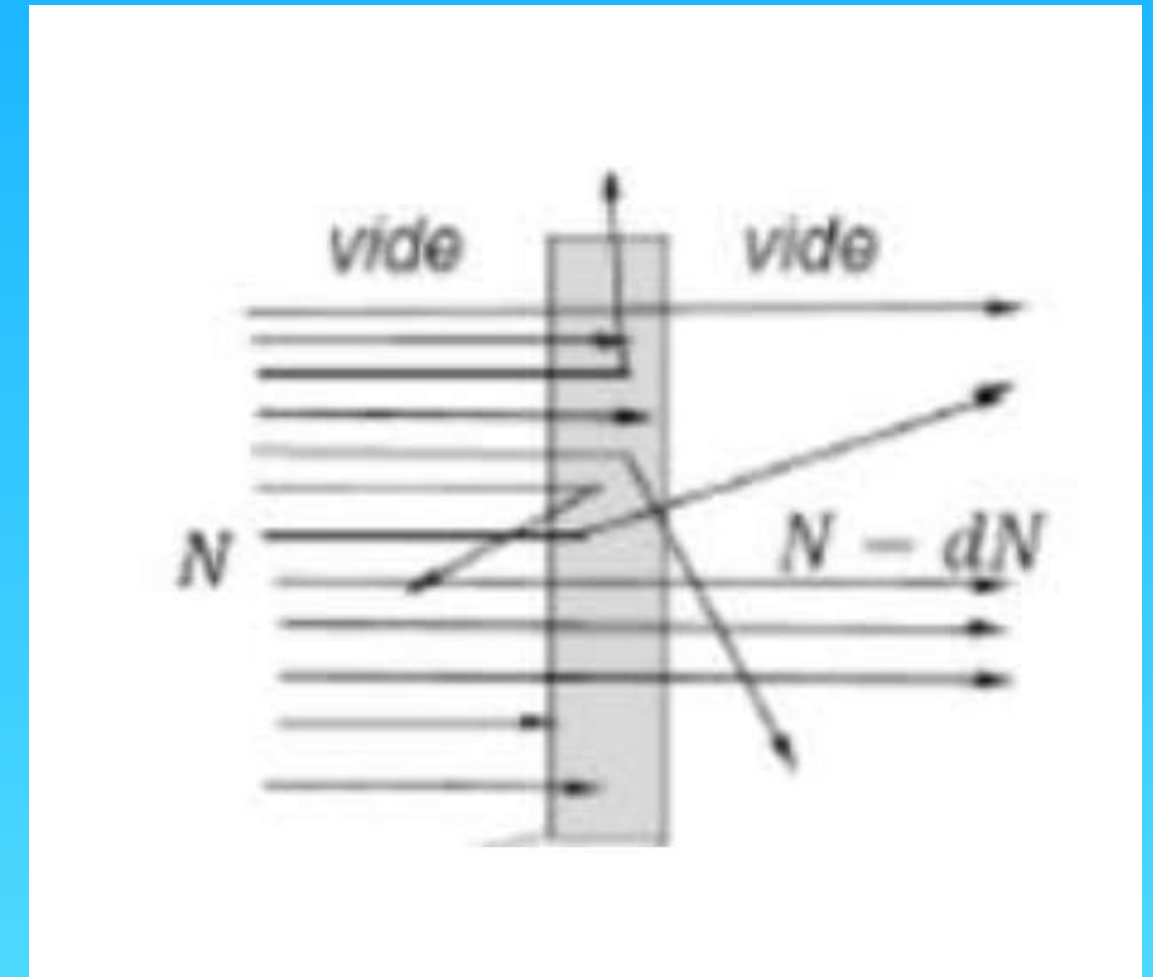
## QCM 2 : ABCD



# ATTENUATION DES PHOTONS

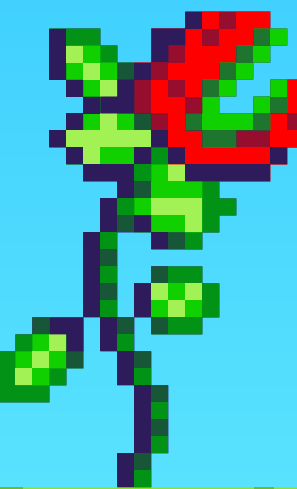
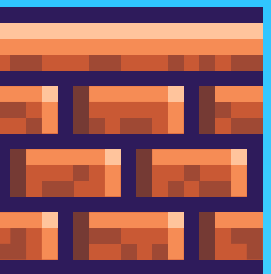
## Flux de photons dans la matière :

- Absorbé
- Diffusé (dévié)
- Transmis (traverse sans interagir)

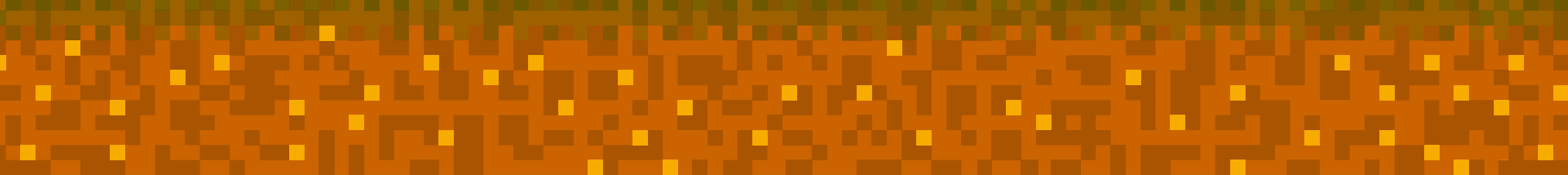
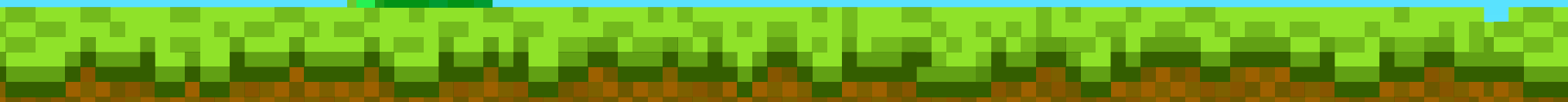
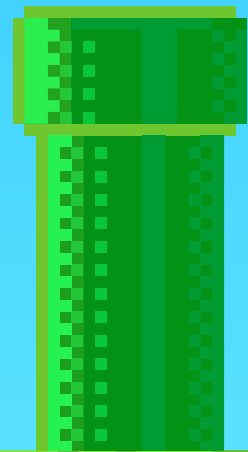
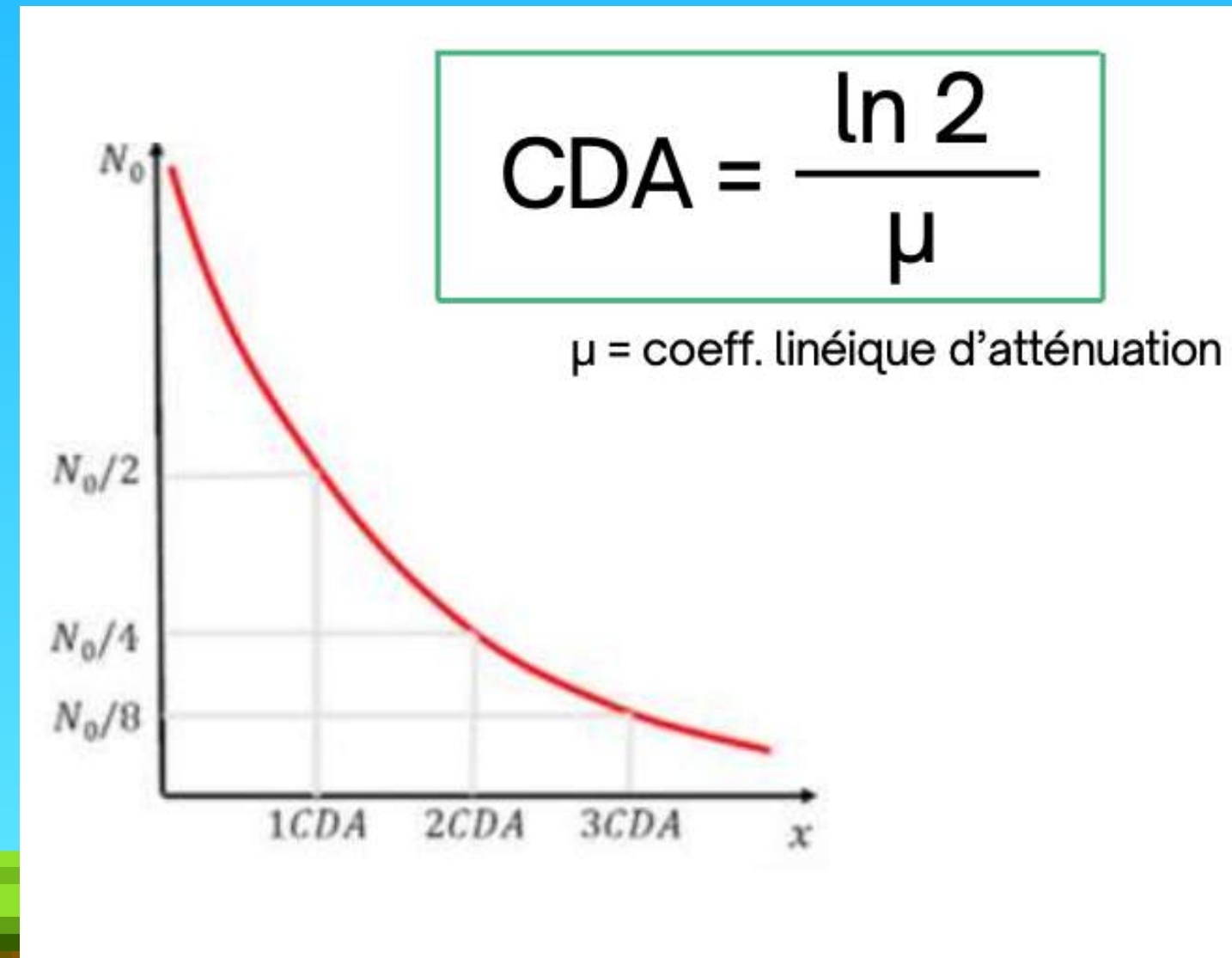


# COUCHE DE DEMI-ATTENUATION

= l'épaisseur  $x$  qui diminue le flux de photon incident d'un facteur 2



$x$	$N(x)/N(0)$	%
$1 \times CDA$	$1/2$	50
$2 \times CDA$	$(1/2)^2$	25
$3 \times CDA$	$(1/2)^3$	12,5
$n \times CDA$	$(1/2)^n$	
$10 \times CDA$	$1/1024$	0,1



# MÉCANISMES D'INTERACTION DES PHOTONS

Effet  
photoélectrique

The diagram features three yellow boxes with black outlines, each containing text. Three black arrows point from the top center towards these boxes. The left box is labeled 'Effet photoélectrique', the bottom box is 'Effet Compton', and the right box is 'Création de Paire'. The background is a blue sky with a green ground line and brown soil. On the left, there are two green pipes, one with a coin on top. On the right, there is a yellow star and a brick wall.

Effet Compton

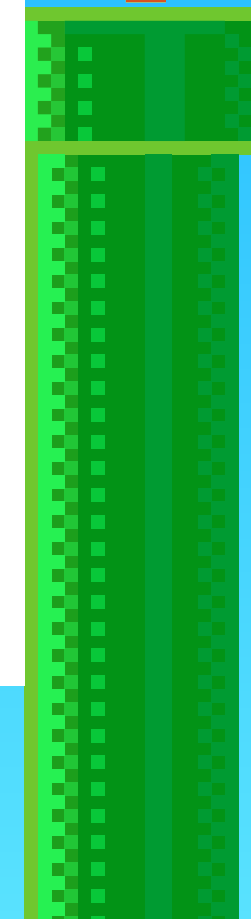
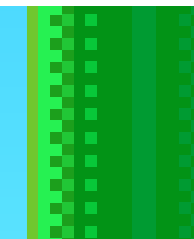
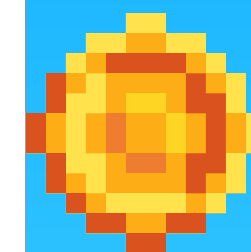
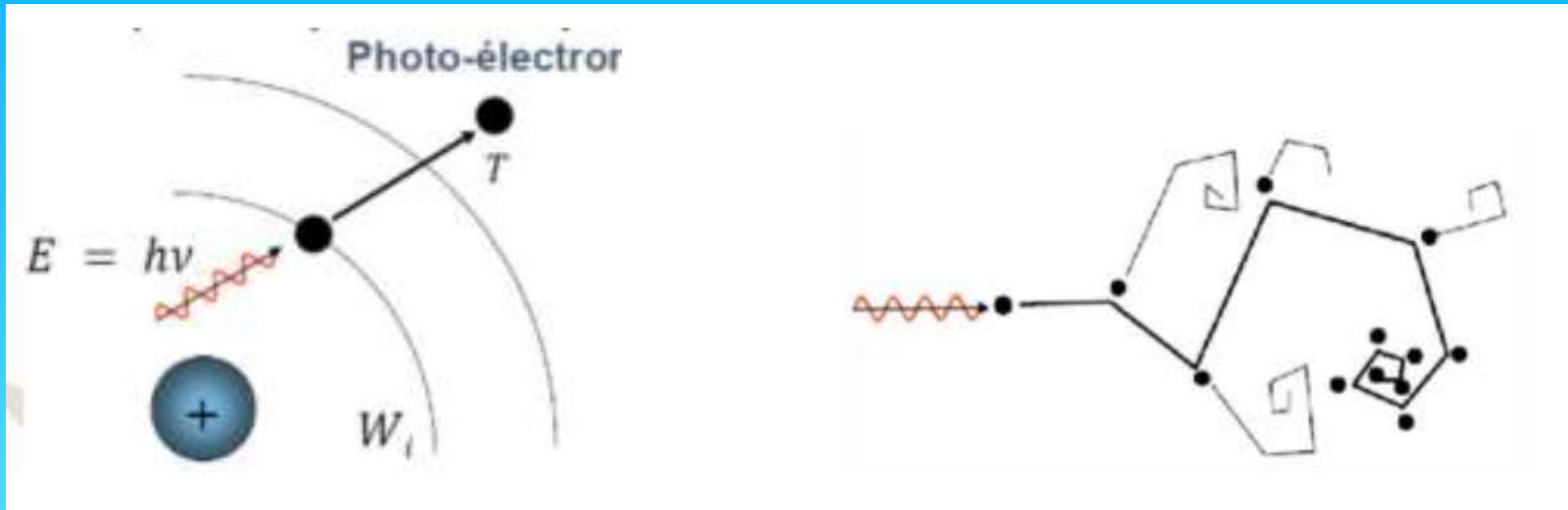
Création de  
Paire

# EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

- Transfert de la TOTALITÉ de l'énergie du photon
- Expulsion du photo-électron :  $T = h\nu - |W_i|$
- Les conséquences :
  - pour l'atome : case vacante + excès d'énergie ; réarrangement
  - pour l'électron ionisé : parcours dans la matière jusqu'à épuisement
  - pour le photon : disparition



# EFFET PHOTOÉLECTRIQUE



# EFFET COMPTON

- Transfert d'une PARTIE de l'énergie du photon
- Répartition de l'E :  $E_c$  de l'électron Compton + E consommée pour l'arracher + E photon diffusé
- Les conséquences :

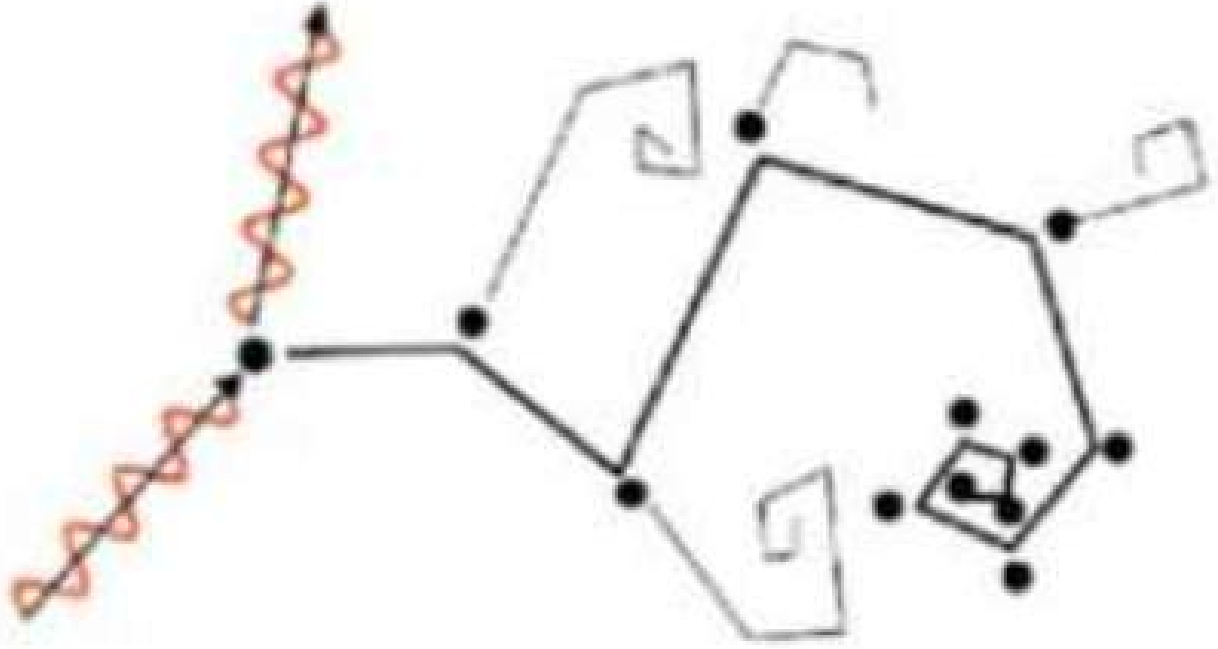
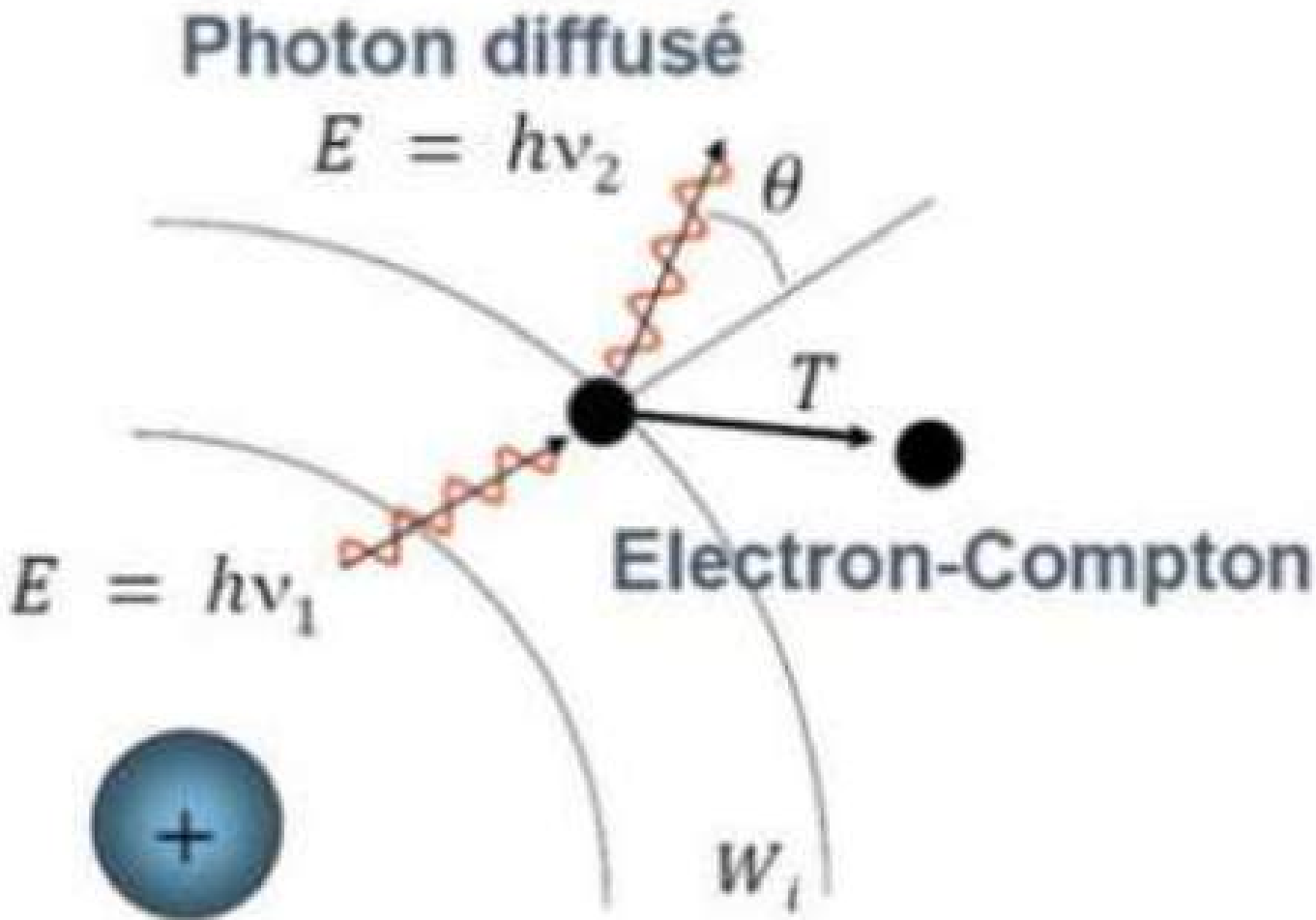
-pour l'atome : case vacante + excès d'énergie ;  
réarrangement

-pour l'électron ionisé : parcours dans la matière  
jusqu'à épuisement

-pour le photon : une partie est déviée



# EFFET COMPTON

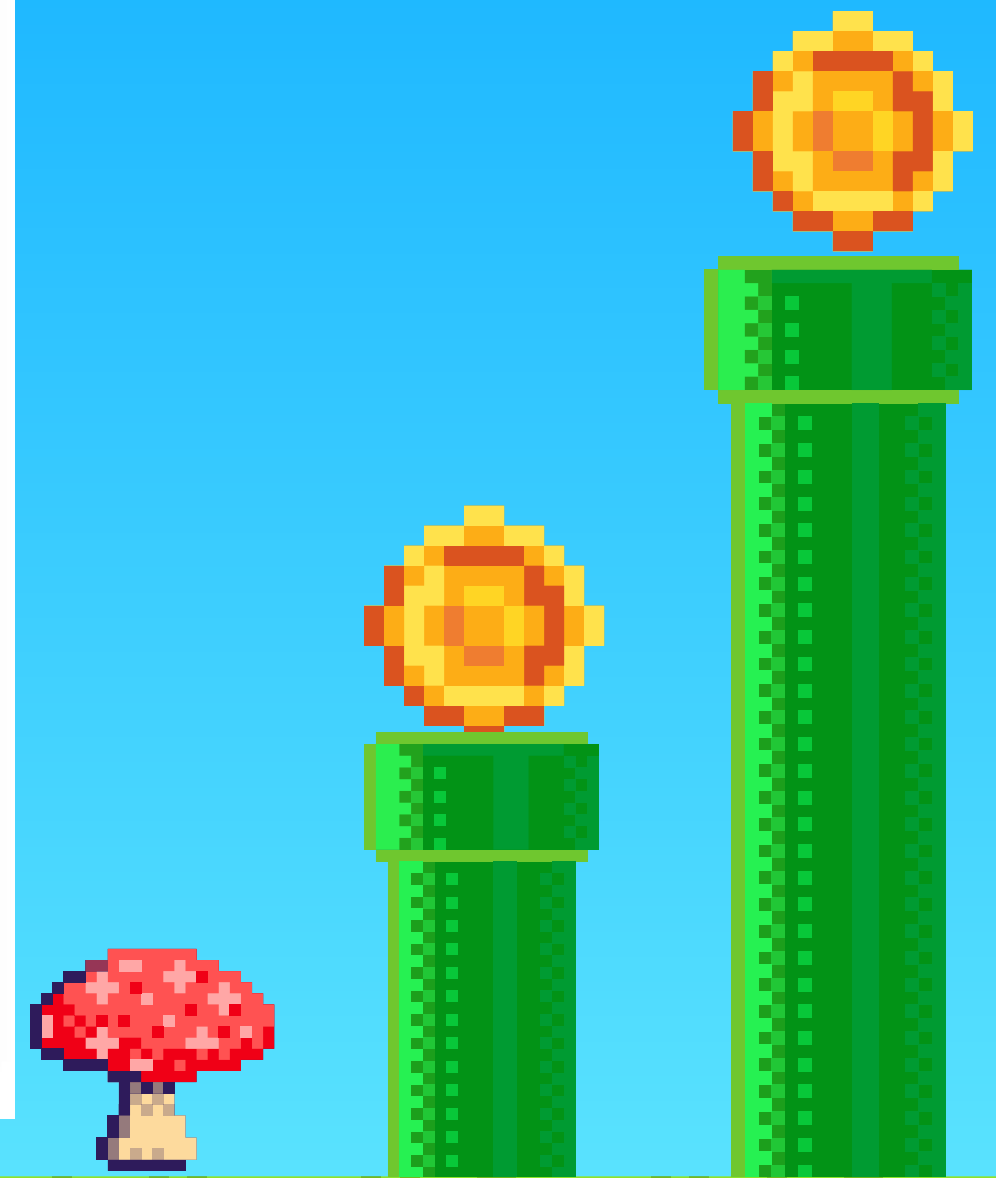
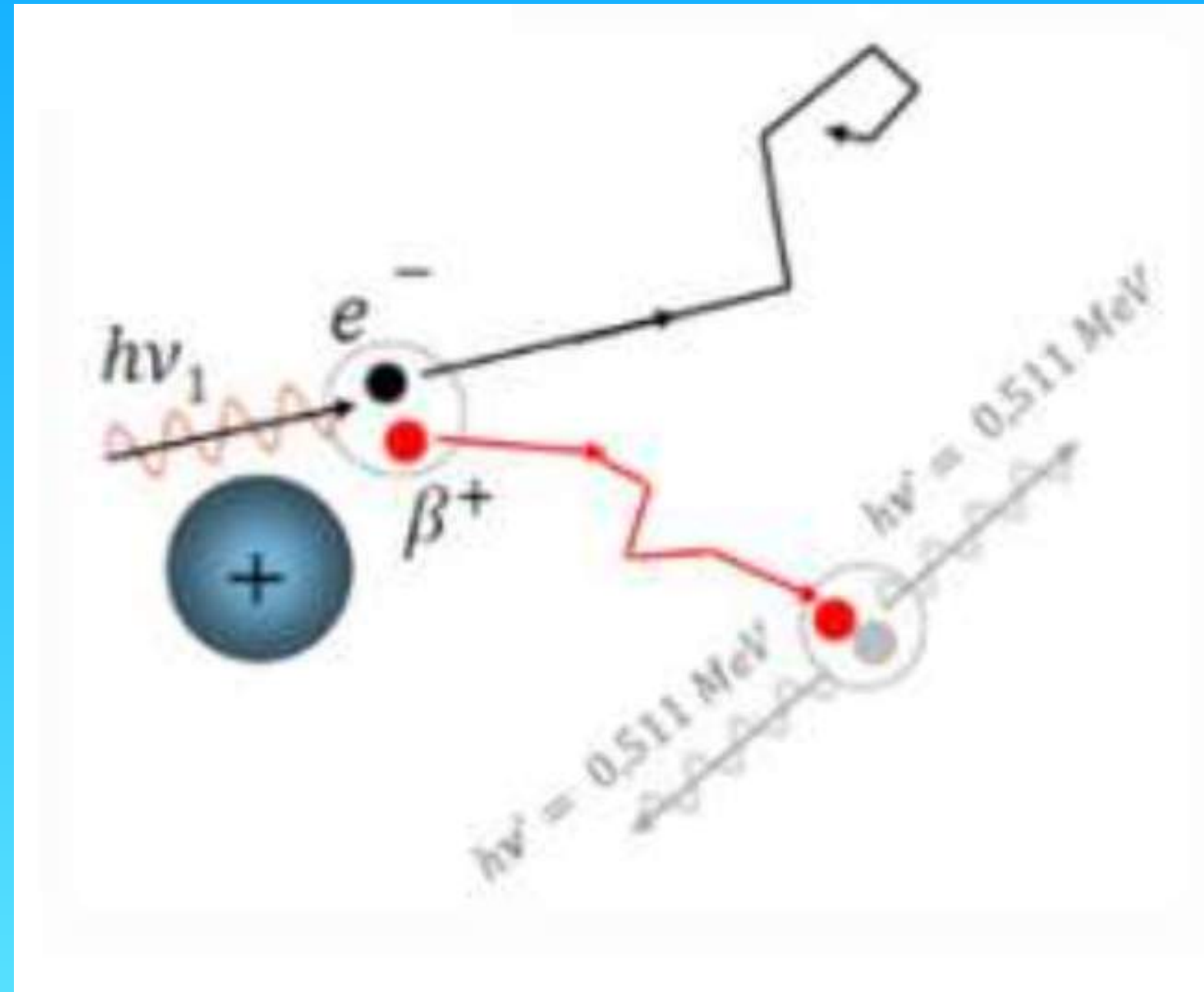


# CRÉATION DE PAIRE

- Photon TRÈS énergétique à proximité du noyau
- Répartition de l'E : 2 particules ( $e^-$  et  $\beta^+$ )
- Uniquement si  $h\nu \geq 1022 \text{ keV}$



# CRÉATION DE PAIRE



# PROBABILITÉ DES INTERACTIONS

EFFET PHOTOELECTRIQUE

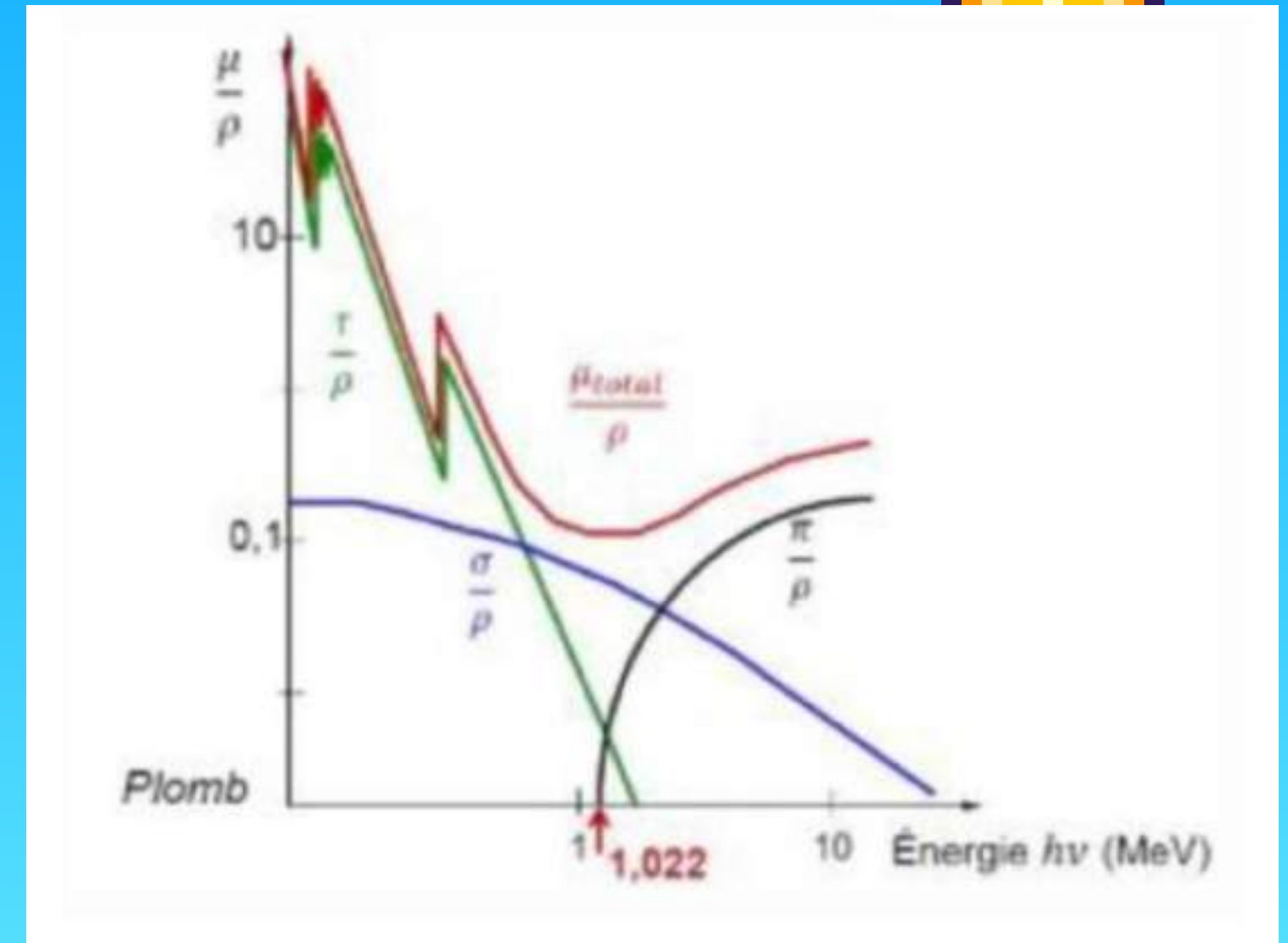
Éléments lourds et photon faible

EFFET COMPTON

Indépendant du Z et photon faible

CRÉATION DE PAIRE

Photon de 1022 keV minimum



# INTERACTIONS DES PARTICULES AVEC LA MATIÈRE



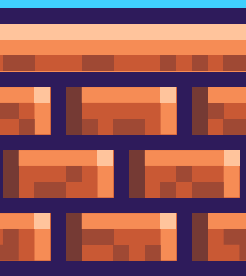
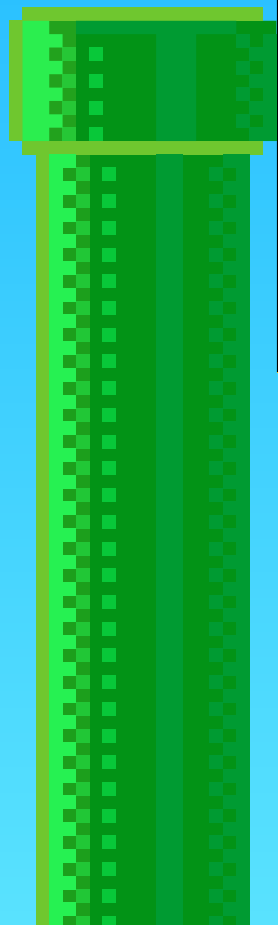
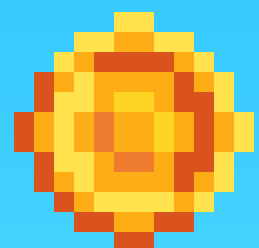
Neutrons



Protons



Électrons



# NEUTRONS/MATIÈRE

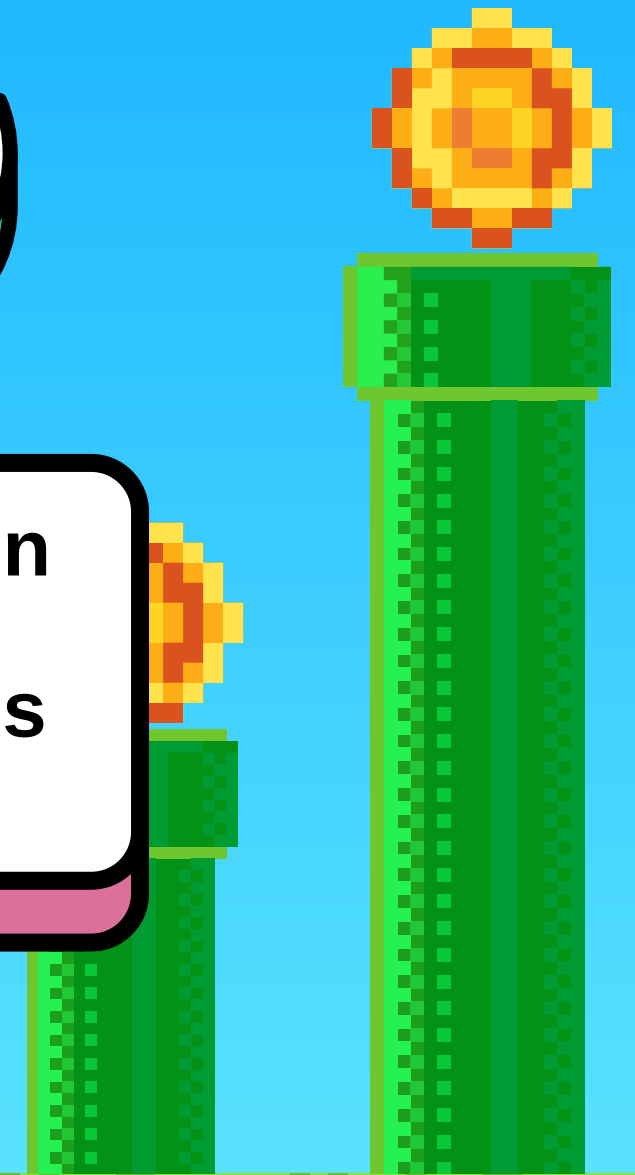
- Non chargés, indirectement ionisants, chocs directs
- Très pénétrants car probabilité d'interaction faible

Neutrons LENTS

Absorbés par les noyaux lourds  
(capture nucléaire)

Neutrons RAPIDES

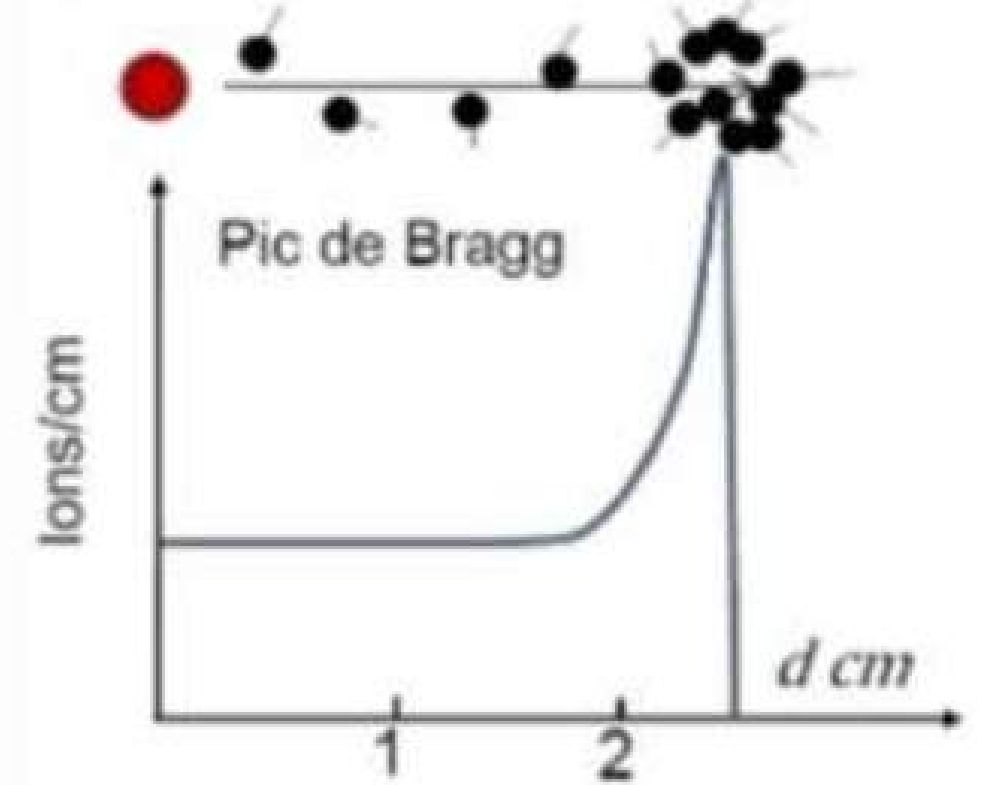
- Milieux riches en H : percussion du noyau
- Milieux riches en noyaux lourds : neutrons rebondissent



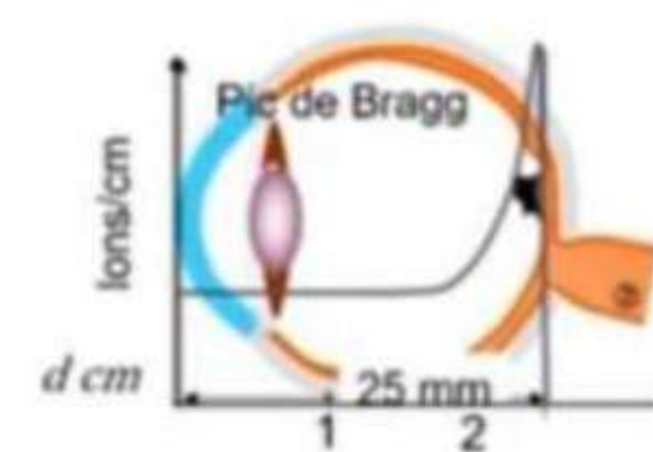
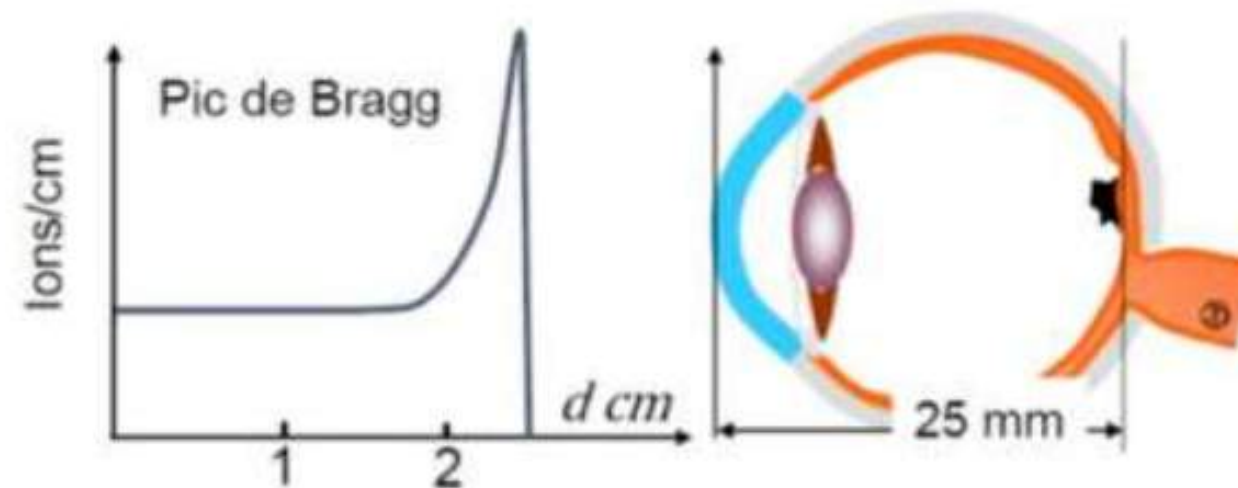
# PARTICULES CHARGÉES/MATIÈRE

## Particules alpha et protons

- Interactions coulombiennes (à distance)
- Trajectoire rectiligne (masse élevée)
- Parcours court : pic de Bragg



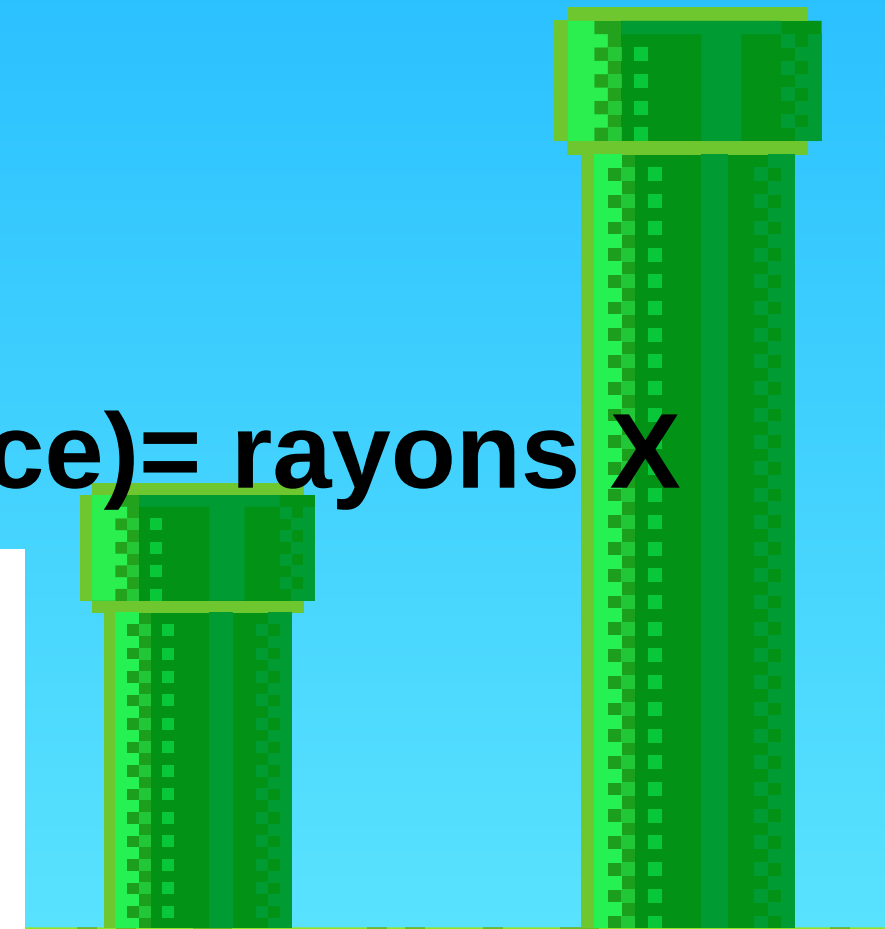
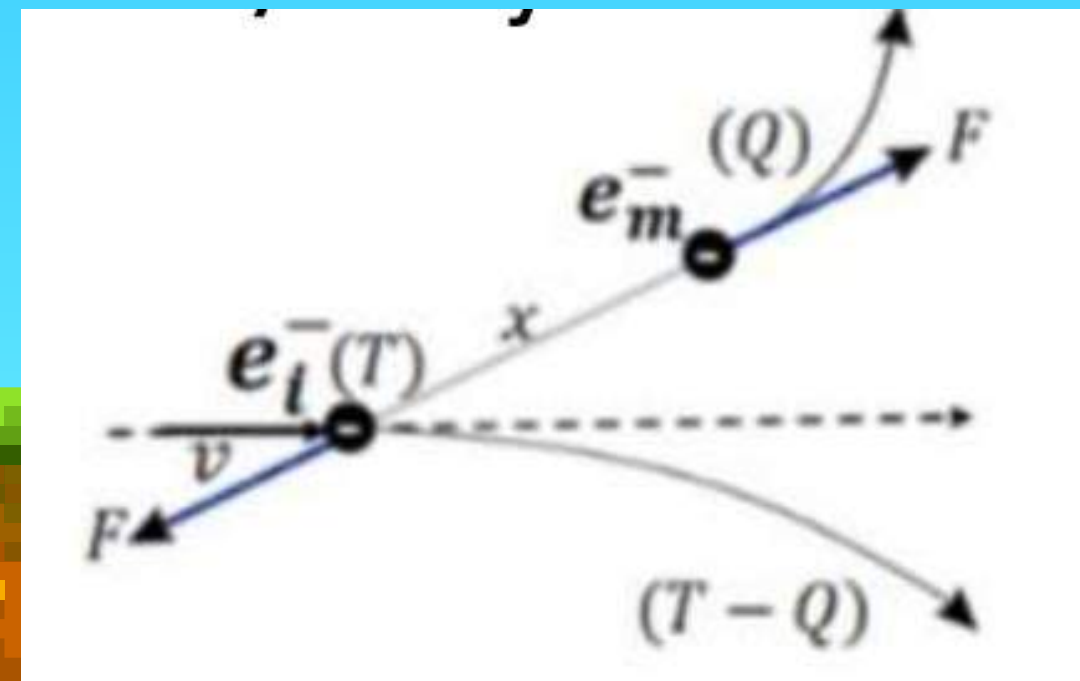
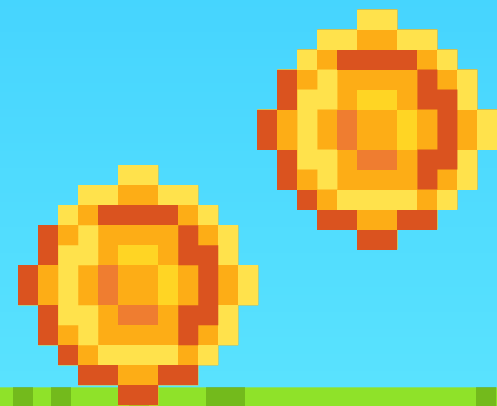
Exemple de la *protonthérapie* : traitement des tumeurs avec précision



# ÉLECTRONS/MATIÈRE

## Interactions par "collision" : électron-électron

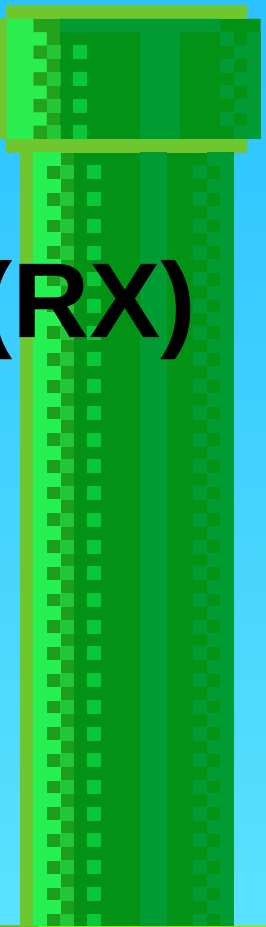
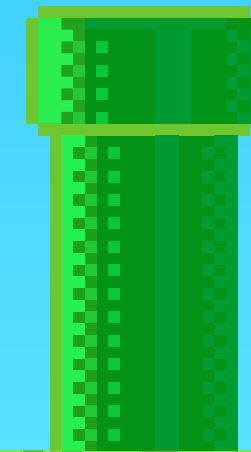
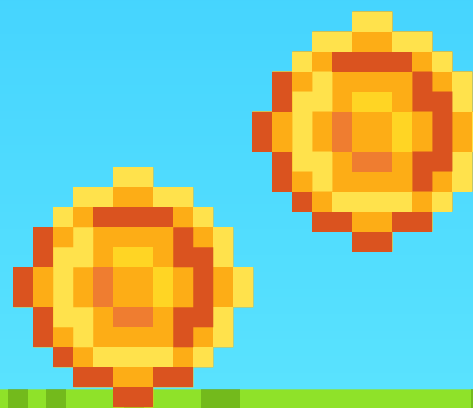
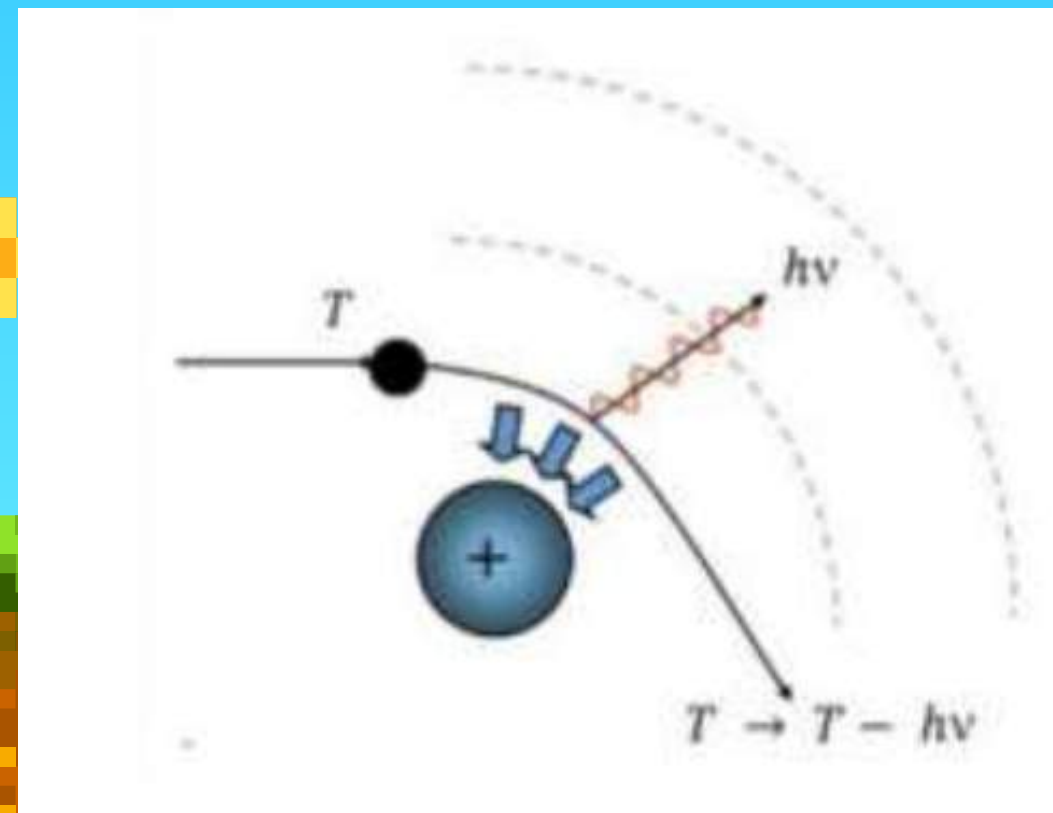
- Pas d'interactions (chocs) physiques mais interactions coulombiennes par deux charges qui se repoussent
  - Si  $T < |W_i|$  chaleur et vibration
  - Si  $T = |W_i|$  excitation
  - Si  $T > |W_i|$  ionisation
- État instable : réarrangements (photons de fluorescence)= rayons X



# ÉLECTRONS/MATIÈRE

## Interactions par “freinage” : électron-noyau

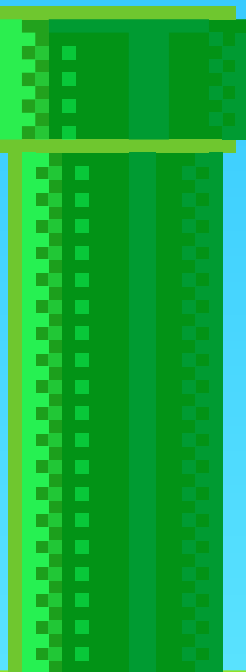
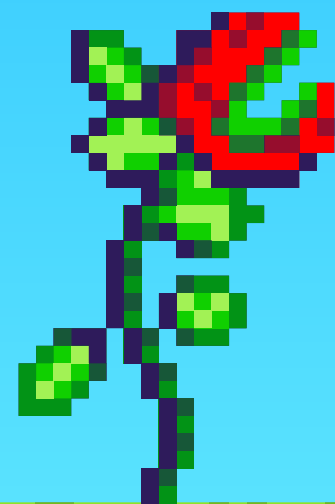
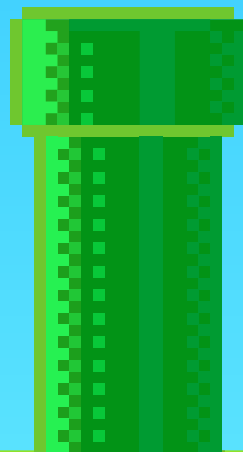
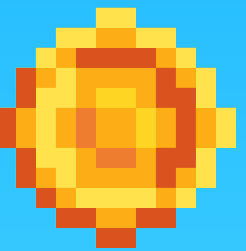
- Attraction coulombienne du noyau
- Différence de masse importante
- Électron dévié par accélération centripète : création d'un photon (RX)
- Perte d'E de l'électron



# QCM !!!!!

**QCM 1 : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :**

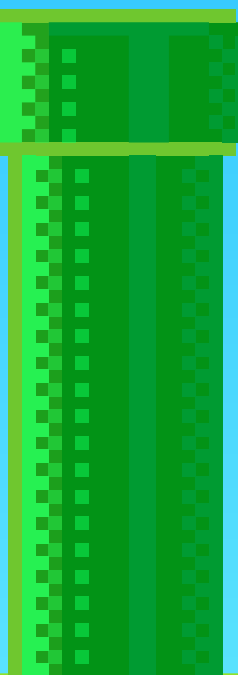
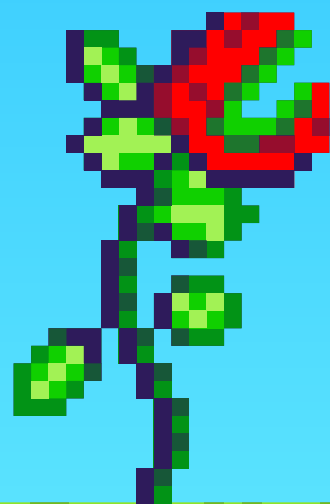
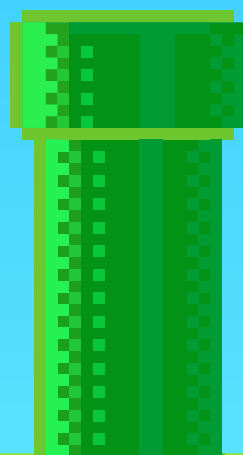
- A) L'effet photoélectrique est un transfert partiel de l'énergie du photon incident**
- B) On observe une excitation si  $E > |W_i|$**
- C) Le pic de Bragg s'observe en fin de parcours avec un flux de neutrons**
- D) Les interactions par freinage des électrons donnent lieu à des rayons X**
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses**



# QCM !!!!!

**QCM 1 :** A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) L'effet photoélectrique est un transfert partiel de l'énergie du photon incident
- B) On observe une excitation si  $E > |W_i|$
- C) Le pic de Bragg s'observe en fin de parcours avec un flux de neutrons
- D) Les interactions par freinage des électrons donnent lieu à des rayons X
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses



# QCM !!!!!

**QCM 2 : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :**

- A) Les neutrons, rayons gamma et rayons X sont directement ionisants**
- B) Une particule  $\beta^-$  est arrêtée par une feuille d'aluminium**
- C) La probabilité de l'effet Compton dépend de la matière**
- D) Les neutrons lents sont absorbés par les noyaux lourds**
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses**



# QCM !!!!!

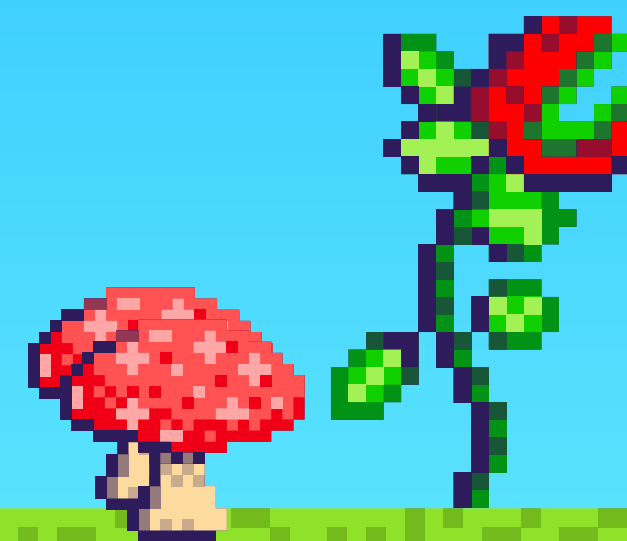
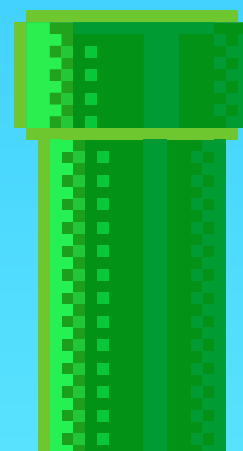
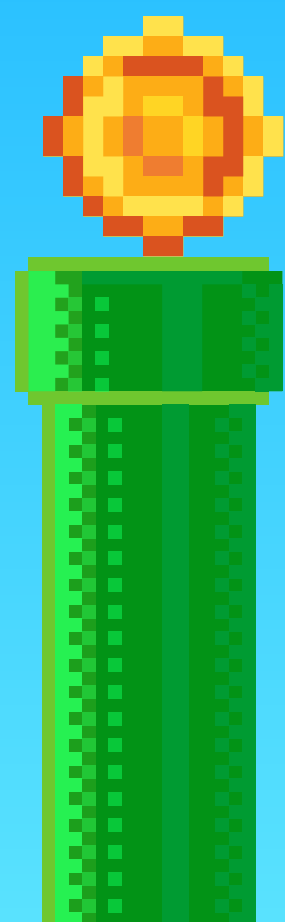
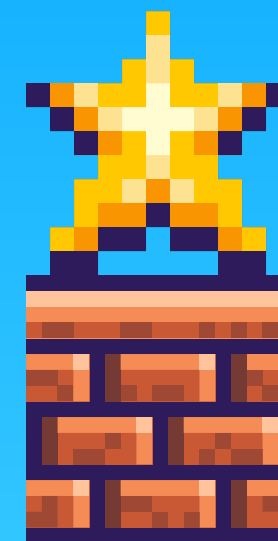
QCM 2 : A propos des rayonnements ionisants, indiquez la (les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Les neutrons, rayons gamma et rayons X sont directement ionisants
- B) Une particule  $\beta^-$  est arrêtée par une feuille d'aluminium
- C) La probabilité de l'effet Compton dépend de la matière
- D) Les neutrons lents sont absorbés par les noyaux lourds
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses



THANKS FOR  
PLAYING

END



WII LOVE BIOPHY® : LA SEULE CONSOLE OÙ TU TRANSPÏRES SANS BOUGER

