

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT PHYSIQUE  
N° : ...../2024



DOMAINE : Sciences de la matière  
FILIERE : Physique  
OPTION : Physique Médicale

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Professionnel**

**Par:**

Zenboua Ilham  
Ladjel khadidja

**Intitulé**

**Contribution à l'étude du rendement de**  
**fluorescence de la sous-couche L3 dans le cas**  
**des lanthanides**  
**( $57 \leq Z \leq 71$ )**

**Soutenu le 06 / 06 /2024 devant le jury composé de:**

DEGHFEL Bahri	Professeur	Univ. de M'sila	Président
KASRI Yazid	Professeur	Univ. de M'sila	Rapporteur
KAHOUL Abdelhalim	Professeur	Univ. de B.B.A	Corapporteur
MEDJEDEL Soheib	Maitre de conférences	Univ. de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2024/2023**

## *Remerciements*

*Nous tenons avant tout à adresser notre reconnaissance à Dieu pour nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.*

*Nous exprimons ensuite toute notre gratitude et nos remerciements les plus sincères à:*

*Notre encadreur M. KASRI YAZID pour m'avoir guidé grâce à ses précieux conseils et ses encouragements lors de la réalisation de ce mémoire.*

*Et à notre Co-encadreur M. KAHOUL ABDELHALIM de l'université de Bordj Bou Arreridj pour sa disponibilité et ses encouragements*

*Nous sommes reconnaissantes à M. DEGHEFEL Bahri, qui a accepté de présider le jury.*

*Nos vifs remerciements s'adressent à M. MEDJEDJEL Soheib qui a accepté d'être membre du jury.*

*Ce travail n'a pu être réalisé sans l'aide, la gentillesse et l'hospitalité de Melle Amari Kahina, doctorante de M. A. KAHOUL, à l'université de Bordj Bou Arreridj.*

## Dédicace

*Louange à Allah par la grâce duquel les bonnes actions s'accomplissent et remerciements à Allah qui nous a permis de les faire. Si nous avons réussi, c'est grâce à Allah, et si nous avons commis des erreurs, c'est à cause de nous-mêmes. Nous demandons à Allah le pardon et la miséricorde.*

*Mes chers parents :*

*Avec une immense fierté et une profonde reconnaissance, je dédie mon succès à mes chers parents (Zeboua Laïde et Cannoï Nacira), qui ont été le soleil qui a illuminé mon chemin et l'étoile brillante qui m'a guidé vers mes rêves. Grâce à votre amour infini, à votre patience admirable et à votre soutien indéfectible, ma confiance en moi et ma capacité à réaliser mes aspirations se sont développées. Votre foi en mes capacités a été une puissante motivation qui m'a poussé à affronter toutes les difficultés et défis que j'ai rencontrés. Je vous remercie infiniment pour tout ce que vous m'avez donné et continuez de me donner.*

*Je suis reconnaissante pour vos immenses sacrifices pour moi, pour vos nuits blanches passées à veiller sur mon bien-être et pour avoir assumé la responsabilité de mon éducation et de mon instruction. Vous avez tout donné pour faire de moi une personne honnête et réussier dans ma vie.*

*Merci, merci, merci, même si les mots ne suffisent pas à exprimer ma gratitude*

*Mes chères sœurs : Chaima, Hamoda, Ishak*

*Je me tiens devant vous aujourd'hui, portant entre mes mains ce travail modeste, fruit de mes efforts et de mes nuits blanches, pour vous l'offrir en signe de reconnaissance pour votre immense bonté, vos efforts colossaux et votre soutien continu qui n'a jamais faibli. Je ne considère pas ce succès que j'ai obtenu comme une réalisation personnelle, mais plutôt comme une réalisation commune entre nous, née de notre collaboration fraternelle.*

*Je vous dédie ce travail modeste comme une simple expression de ma gratitude et de mon appréciation pour tout ce que vous m'avez donné.*

*À mes sœurs de cœur : Chaima, Zebaida, Asia, Hadil, Randa, Hayet*

*Vous n'êtes pas nées de la même mère que moi, mais vous avez été pour moi les meilleures amies. Votre amitié sincère, votre soutien et votre présence constante ont été une bénédiction dans ma vie. Merci d'être là pour moi.*

*Z. Ilham*

# *Dédicace*

*En premier lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail. Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents (mon père, LADJEL Meftah (que Dieu lui fasse miséricorde )*

*Et ma chère mère Malika qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études*

*Mes sœurs et frères : SOUHILA, ASSIA, AICHA,*

*MOHAMMED, AHMED*

*Les enfants de ma sœur : MELISSA, ASSER,*

*Toutes mes amies*

*Tous ceux qui me sont chères et proches.*

*L, KHADIDJA*

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

## ***Chapitre I***

### ***Rappel théorique sur l'interaction photon-atome***

I.1. Introduction .....	04
I.2. Organisation de la couche électronique .....	04
I.2.1. Le nombre quantique principal $n$ .....	04
I.2.2. Le nombre quantique orbital $l$ .....	05
I.2.3. Le nombre quantique orbital $m_l$ .....	05
I.2.4. Le nombre quantique de spin $s$ .....	05
I.3. Transitions entre niveaux .....	07
I.4. Rayonnement .....	08
I.4.1. Définition .....	08
I.4.1.1. Les sources naturelles incluent .....	08
I.4.1.2. Les sources artificielles incluent .....	08
I.5. Les type de rayonnements .....	08
I.5.1. Le rayonnement non ionisant .....	08
I.5.2. Rayonnement ionisant .....	09
I.5.2.1. Particules $\alpha$ .....	09
I.5.2.2. Particules $\beta$ .....	09
I.5.2.3. Rayons $\gamma$ .....	09
I.5.2.4. Neutrons .....	09
I.5.2.5. Rayons X .....	09

I.6. Les interactions .....	11
I.6.1. Généralités sur les interactions photoniques avec atomes cibles .....	11
I.6.1.1. Diffusion Thomson .....	12
I.6.1.2. Diffusion Rayleigh .....	12
I.6.1.3. Effet Compton .....	13
I.6.1.4. Effet Photoélectrique .....	14
I.6.1.5. Effet de production de pair .....	15
I.6.1.6. Combinaison des trois effets .....	16
I.6.1.7. Loi d'atténuation .....	18
I.6.2. Interaction des particules chargées avec la matière .....	18
I.7. Processus radiatif et non radiatif .....	19
I.7.1. Processus radiatif .....	19
I.7.1.1. Fluorescence X .....	19
I.7.1.2. Principes de la fluorescence X .....	20
I.7.1.3. Le rendement de fluorescence X .....	21
I.7.2. Processus non radiatif .....	21
I.7.2.1. L'effet Auger .....	21
I.7.2.2. Principe de L'effet Auger .....	22
I.7.2.3. Transitions de Coster-Kronig .....	23
I.8. Les lanthanides.....	24
I.9. Section efficace .....	24
I.8.1. Définition .....	24
I.9.2. Section efficace totale de production de rayon X .....	25
I.9.2.1. Rayonnement électromagnétique .....	25
I.9.2. Section efficace de production des rayons X de la couche L .....	25
I.10. Références Bibliographiques .....	27

## ***Chapitre II***

### ***Base de données des rendements de fluorescence de la sous couche $L_3$ pour les lanthanides ( $57 \leq Z \leq 71$ ).***

II.1. Introduction .....	30
II.2. Base de données .....	30
II.3. La distribution du rendement de fluorescence $\omega_{L_3}$ expérimentale .....	31
II.4. Résultats et discussions .....	40
II.5. Références bibliographiques .....	44

## ***Chapitre III***

### ***Calcul semi empirique des rendements de fluorescence de la sous-couche $L_3$ pour les éléments avec $57 \leq Z \leq 71$***

III.1. Introduction .....	47
III.2. Méthodes de calcul et résultats .....	47
III.3. Comparaison.....	49
III.4. Références bibliographiques .....	52
Conclusion générale .....	53

## LISTE DES FIGURES

---

### *Chapitre I*

<b>Figure I.1:</b> Les couches électroniques et leurs capacités en électrons.....	06
<b>Figure I.2:</b> Spectre électromagnétique .....	10
<b>Figure I.3:</b> Tube à rayons X .....	11
<b>Figure I.4:</b> Les phénomènes d'interaction des photons (X, $\gamma$ ) avec la matière...12	
<b>Figure I.5:</b> Diffusion Rayleigh.....	13
<b>Figure I.6:</b> Effet Compton .....	13
<b>Figure I.7:</b> Effet photoélectrique .....	15
<b>Figure I.8:</b> Représentation schématique de L'effet de production de pair .....	16
<b>Figure I.9:</b> L'importance relative des trois effets en fonction de l'énergie $h\nu$ du photon et du numéro atomique Z .....	17
<b>Figure I.10:</b> Interaction des particules chargées avec la matière .....	19
<b>Figure I.11:</b> Principe de la fluorescence .....	20
<b>Figure I.12:</b> Emissions X et émission Auger .....	22
<b>Figure I.13:</b> Processus de désexcitation de l'atome .....	23
<b>Figure I.14 :</b> Transition de Coster-Kronig .....	24

### *Chapitre II*

<b>Figure II.1:</b> Distribution du nombre de mesures expérimentales du rendement de fluorescence de la couche $L_3$ pour les éléments dont le numéro atomique Z est compris entre ${}_{57}\text{La}$ et ${}_{71}\text{Lu}$ .....	40
<b>Figure II.2:</b> Un histogramme du nombre de données expérimentales du rendement de fluorescence de la sous couche $L_3$ en fonction de l'année de publication du travail original entre 1963 et 2020 .....	41

## LISTE DES FIGURES

---

### *Chapitre III*

- Figure III.1:** Le rapport R en fonction de numéro atomique Z .....48
- Figure III.2:** La distribution des rendements de fluorescence  $\frac{(\bar{\omega}_{L_3})_{WR}}{(1-(\bar{\omega}_{L_3})_{WR})^{\frac{1}{4}}}$  de la sous-couche  $L_3$  en fonction du numéro atomique Z, pour les éléments avec  $57 \leq Z \leq 71$  .....48
- Figure III .3 :** Nos valeurs semi empirique des rendements de fluorescence de la sous-couche  $L_3$  comparé aux autres valeurs d'autres auteurs (Krause et al. (1979), Puri et al. (1993) et Cambale et al. (2003) en fonction des éléments de nombre atomique  $57 \leq Z \leq 71$  .....51

*Chapitre I*

**Tableau I.1:** La configuration électronique et le moment angulaire total .....07

*Chapitre II*

**Tableau II.1:** Résumé des rendements de fluorescence expérimentaux de la sous-couche  $L_3$  pour les éléments de  $\alpha$  et la valeur moyenne pondérée  $(\omega_{L_3} - W)$  Avec les paramètres d'incertitudes .....32

*Chapitre III*

**Tableau. III.1 :** Les Coefficients de l'interpolation dès les deux formules  $g(Z)$  et  $h(Z)$  .....49

**Tableau III.2:** Semi-empirical (this work), theoretical, fitted, (other works) of average  $L_3$  Subshell fluorescence yields for all elements in the region  $57 \leq Z \leq 71$  .....50

### *Introduction générale*

**L**a physique atomique est une branche importante de la physique qui s'intéresse à l'étude de la structure atomique et des interactions mettant en jeu les atomes. L'atome est constitué d'un noyau chargé positivement entouré d'un nuage d'électrons chargés négativement, répartis en couches ou niveaux d'énergie. Les électrons des couches internes ont une énergie plus faible que ceux des couches externes. L'atome est le théâtre de nombreuses interactions, dont la plus importante est le transfert d'électrons entre différents niveaux d'énergie. Un électron peut passer d'un niveau d'énergie élevé à un niveau inférieur, en libérant de l'énergie sous forme de photons (particules de lumière). À l'inverse, il peut également passer d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau d'énergie supérieur en absorbant une quantité d'énergie équivalente à la différence d'énergie entre les deux niveaux.

Dans ce travail, nous allons étudier le processus de transfert d'électrons d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau d'énergie supérieur, en absorbant de l'énergie d'une source externe (comme la lumière), puis en revenant à son état fondamental, en émettant un photon dont l'énergie est égale à la différence d'énergie entre les niveaux d'énergie. Ce phénomène est appelé "fluorescence". Notre étude porte plus particulièrement sur l'efficacité de la fluorescence de la sous-couche L3.

L'étude s'est basée sur l'analyse des valeurs expérimentales de l'efficacité de la fluorescence de la sous-couche L3, publiées par des chercheurs dans divers domaines scientifiques. En analysant ces données, les chercheurs ont pu déduire une nouvelle valeur pour l'efficacité moyenne de la fluorescence de la sous-couche L3.

Cette recherche apporte des informations nouvelles et importantes sur les propriétés de la fluorescence de la sous-couche L3. Ces informations sont d'une grande valeur pour le développement de nouvelles technologies plus efficaces dans divers domaines tels que l'éclairage, les lasers, l'énergie solaire et le diagnostic médical.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Notre mémoire comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre : il est consacré à un rappel théorique des phénomènes liés à l'interaction entre eux les rayons et la matière, ainsi qu'au phénomène de la fluorescence X. Le concept de transformations radiatives et non radiatives est également abordé.
- Le deuxième chapitre : il est dédié à la construction d'une base données ; couvrant toutes les valeurs bêta des rendements de fluorescence moyenne publiée sur la période allant de 1963 à 2020.
- Le troisième chapitre : il est consacré à la détermination des rendements de fluorescence semi-empirique de la sous-couche L3 des éléments atomiques compris entre 57 et 71 ( $57 \leq Z \leq 71$ ). Le calcul se base sur les valeurs moyennes pondérées dérivées des données expérimentales. Nous avons également comparé nos résultats avec d'autres valeurs publiées par divers auteurs.

# *Chapitre I*

## *Rappel théorique sur l'interaction photon-atome*

### ***1.1. Introduction***

L'atome constitue la plus petite unité de la matière et il est essentiellement un modèle théorique. Il est composé d'un noyau à charge positive (protons et neutrons) entouré d'un nuage d'électrons à charge négative qui orbitent autour du noyau. Diverses réactions se produisent dans l'atome pour différentes raisons, notamment :

- La stabilité : elle se produit par l'absorption ou la perte d'énergie.
- La chaleur : La chaleur peut augmenter l'énergie des électrons, ce qui leur permet de passer à des orbites d'énergie plus élevée. Lorsque l'atome se refroidit, les électrons perdent leur énergie et retournent à leurs orbites d'origine.
- La lumière : Un électron peut absorber des photons et passer à une orbite d'énergie plus élevée. Cette énergie, lorsqu'elle est perdue, est émise sous forme de lumière. Ce principe est généralement utilisé dans la fluorescence et le laser.

### ***1.2. Organisation de la couche électronique***

L'organisation des électrons dans les couches est décrite par quatre nombres quantiques :

***1.2.1. Le nombre quantique principal  $n$***  : détermine fondamentalement le niveau d'énergie de l'électron ou la couche qu'il occupe, il peut prendre des valeurs entières positives

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

Plus la valeur de  $n$  est grande, plus l'énergie de l'électron est élevée et plus sa distance par rapport au noyau est grande. De plus, pour chaque valeur de  $n$ , il existe une couche électronique spécifique.

Valeur $n$	Symbole de la couche
1	K
2	L
3	M
4	N
5	O

**I.2.2. Le nombre quantique orbital  $l$  :** Le nombre quantique magnétique joue un rôle crucial dans la détermination de la forme de l'orbitale occupée par l'électron, de plus pour chaque valeur de  $l$ , il existe un nombre fini d'orbitales sous-couche (s, p, d, f, g).

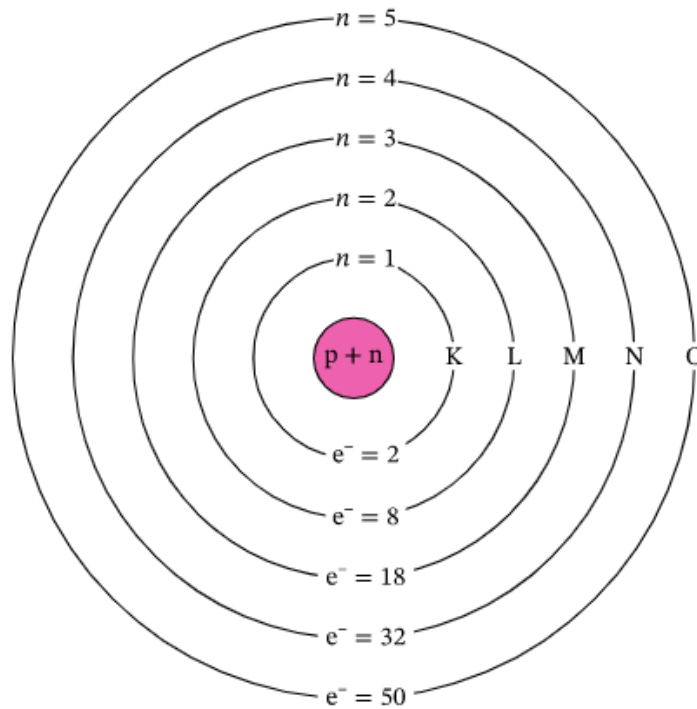
Le nombre quantique magnétique prend des valeurs entières  $l=0, 1, 2, 3, \dots$

Avec la condition  $0 \leq l \leq n - 1$ .

**I.2.3. Le nombre quantique magnétique  $m_l$  :** est un nombre quantique qui décrit l'orientation de l'orbitale d'un électron dans l'espace. Il est lié au moment cinétique orbital de l'électron et peut prendre des valeurs entières comprises  $-l \leq m_l \leq l$ .

**I.2.4. Le nombre quantique de spin  $m_s$  :** Le nombre quantique de spin est une propriété fondamentale de l'électron et qui est purement quantique et n'a pas d'équivalent classique. Il est quantifié et ne peut prendre que deux valeurs :  $+1/2$  (spin up) et  $-1/2$  (spin down).

Les électrons d'un atome suivent une distribution définie sur différents niveaux d'énergie. Les nombres quantiques déterminent les propriétés de chaque niveau d'énergie et la localisation de l'électron dans ce niveau.



Capacité en électrons =  $2n^2$   
 $n$  est le numéro de couche électronique

**Figure I.1 :** Les couches électroniques et leurs capacités en électrons (Rebouli 2022)

- La couche K, contient deux électrons au maximum, subdivisée à une seule sous-couche K
- La couche L, contient huit électrons au maximum, subdivisée à trois sous-couches  $L_1, L_2, L_3$  .
- La couche M, contient dix-huit électrons au maximum, subdivisée à cinq sous-couches  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$  .
- La couche N, contient trente-deux électrons au maximum, subdivisée à sept sous-couches  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7$  .

Couche	Sous-couche	Caractéristique de l'électron
K	K	1s ( $j=1/2$ )
L	$L_1$	2s ( $j=1/2$ )
	$L_2$	2p ( $j=1/2$ )
	$L_3$	2p ( $j=3/2$ )
M	$M_1$	3s ( $j=1/2$ )
	$M_2$	3p ( $j=1/2$ )
	$M_3$	3p ( $j=3/2$ )
	$M_4$	3d ( $j=3/2$ )
	$M_5$	3d ( $j=5/2$ )
N	$N_1$	4s ( $j=1/2$ )
	$N_2$	4p ( $j=1/2$ )
	$N_3$	4p ( $j=3/2$ )
	$N_4$	4d ( $j=3/2$ )
	$N_5$	4d ( $j=5/2$ )
	$N_6$	4f ( $j=5/2$ )
	$N_7$	4f ( $j=7/2$ )

**Tableau I.1 :** La configuration électronique et le moment angulaire total (Derradj, 2019).

### ***I.3. Transitions entre niveaux***

L'électron se déplace entre les orbites atomiques par absorption ou émission d'énergie.

- Absorption d'énergie : Le processus par lequel un électron absorbe de l'énergie d'une source externe, lui permettant de passer à une orbite atomique d'énergie supérieure.
- Perte d'énergie : Ce phénomène se produit lorsqu'un photon est émis, emportant avec lui l'énergie correspondant à la différence d'énergie entre les deux orbites

Energie absorbée ou émise :

$$h\nu = E_2 - E_1 = |E_1 - E_2| \quad (\text{I.1})$$

$h$ : constante de Planck et elle est égale à  $6.626 \cdot 10^{-34}$  J.S

$\nu$ : Fréquence (Hz)

$E_1$ : Energie de première orbite (J)

$E_2$ : Energie de deuxième orbite (J)

## ***I.4. Rayonnement***

***I.4.1. Définition*** : Le rayonnement est l'émission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques ou de petites particules, Le rayonnement peut provenir de sources naturelles ou artificielles.

### ***I.4.1.1. Les sources naturelles incluent :***

- **Le soleil** : Émet des rayons ultraviolets qui peuvent causer des brûlures cutanées.
- **Le gaz radon** : Gaz naturel incolore et inodore présent dans le sol et les roches.
- **Matériaux radioactifs naturels** : \*\*\*Comme l'uranium et le potassium, présents partout dans l'environnement\*\*\*.

### ***I.4.1.2. Les sources artificielles incluent :***

- **Rayons X** : Utilisés en médecine pour diagnostiquer et traiter les maladies.
- **Réacteurs nucléaires** : Utilisés, entre autre, pour générer de l'électricité.
- **Médicaments radioactifs** : Utilisés pour traiter certaines maladies.
- **Appareils médicaux** : Comme les appareils à rayons X et les scanners TEP.

## ***I.5. Les type de rayonnements***

Il existe deux types de rayonnement :

***I.5.1 Le rayonnement non ionisant***: est un type de rayonnement qui ne possède pas suffisamment d'énergie pour éjecter un électron d'un atome. Contrairement au rayonnement ionisant, ce type de rayonnement ne cause pas de dommages directs aux cellules vivantes ou à l'ADN.

**I.5.2 Rayonnement ionisant:** Ce type de rayonnement possède suffisamment d'énergie pour éjecter un électron d'un atome. Il peut provenir de sources naturelles ou artificielles et peut causer des dommages aux cellules vivantes comme le cancer et d'autres maladies liées à l'exposition à de fortes doses de rayonnements.

Il existe plusieurs types de rayonnement ionisant :

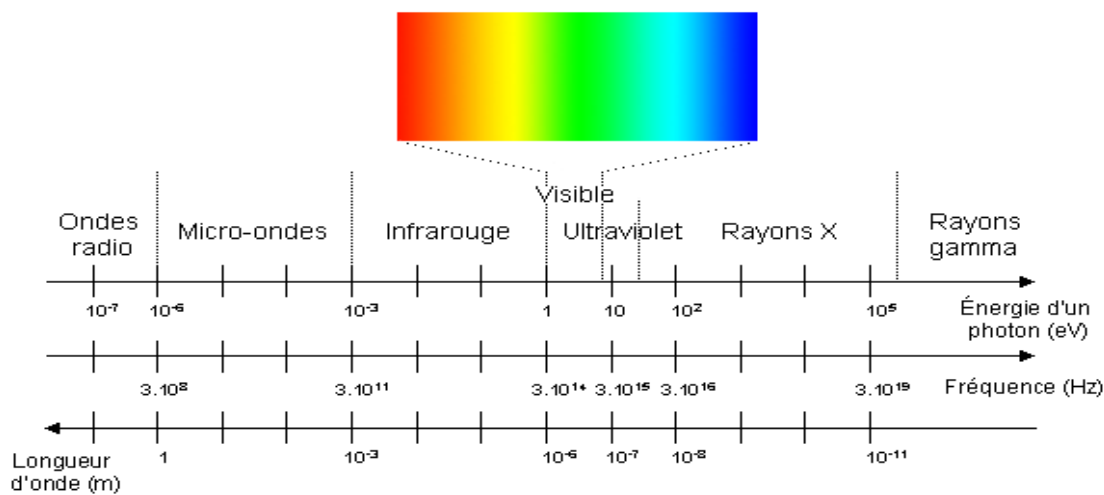
**I.5.2.1. Particules  $\alpha$ :** Elles sont constituées de noyaux d'atomes d'hélium. Leur vitesse dépend du type de source radioactive et peuvent être arrêtées par une feuille épaisse.

**I.5.2.2. Particules  $\beta$ :** Elles sont constituées d'électrons ou de positrons et ont un pouvoir de pénétration environ 100 fois plus élevé que les particules alpha. Elles peuvent pénétrer de quelques millimètres dans l'aluminium.

**I.5.2.3. Rayons  $\gamma$ :** Elles sont des ondes électromagnétiques de haute énergie, ce qui leur confère un pouvoir de pénétration élevé dans la matière, pouvant atteindre plusieurs centimètres dans le plomb.

**I.5.2.4. Neutrons :** Ce sont les seules particules non chargées. Les neutrons peuvent pénétrer de nombreux matériaux, mais ils sont lents dans les milieux aqueux.

**I.5.2.5. Rayons X :** C'est une forme de rayonnement électromagnétique, tout comme les rayons gamma. On appelle rayons X les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre  $10^{16} \text{ Hz}$  et  $10^{20} \text{ Hz}$ . Les longueurs d'ondes sont de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-12} \text{ m}$ , et les énergies des photons X sont comprises entre 40 et  $4 \times 10^5 \text{ eV}$ .



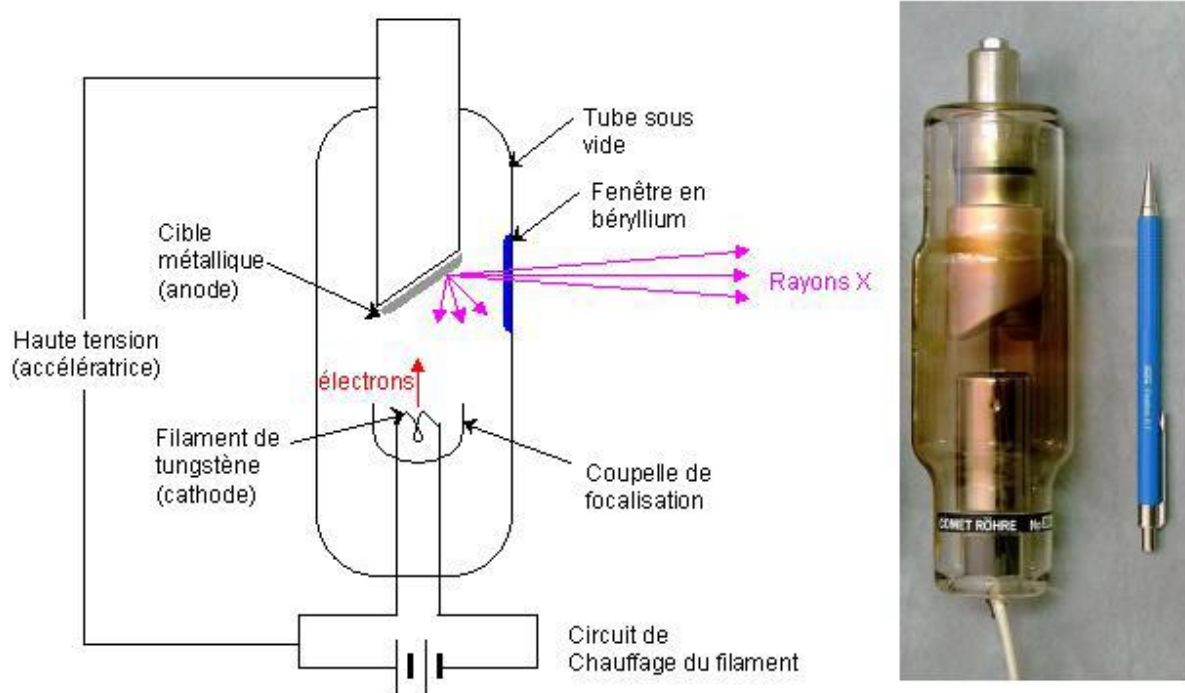
**Figure I.2 :** Spectre électromagnétique

- **Production de rayons X**

Les rayons X sont produits dans des tubes à rayons X également appelés tubes de Coolidge ou tubes à cathode chaude (figure I.3). Le principe est le suivant : des électrons émis par une cathode (un filament, le plus souvent en tungstène, chauffé par le passage d'un courant électrique) sont accélérés par une différence de potentiel élevée (de 10 à 150 keV), dans une enceinte sous vide, en direction d'une cible constituée d'une anode en métal (en tungstène également).

Les rayons X sont émis par la cible selon deux mécanismes :

- le freinage des électrons par les atomes de la cible crée un rayonnement continu appelé rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung (Bremsstrahlung est un mot allemand signifiant freinage) dont une partie dans le domaine des rayons X.
- Les électrons accélérés ont une énergie suffisante pour exciter certains des atomes de la cible, en perturbant leurs couches électroniques internes. Ces atomes excités émettent des rayons X en retournant à leur état fondamental (raies caractéristiques).



**Figure I.3 :** Tube à rayons X

## **I.6. Les interactions :**

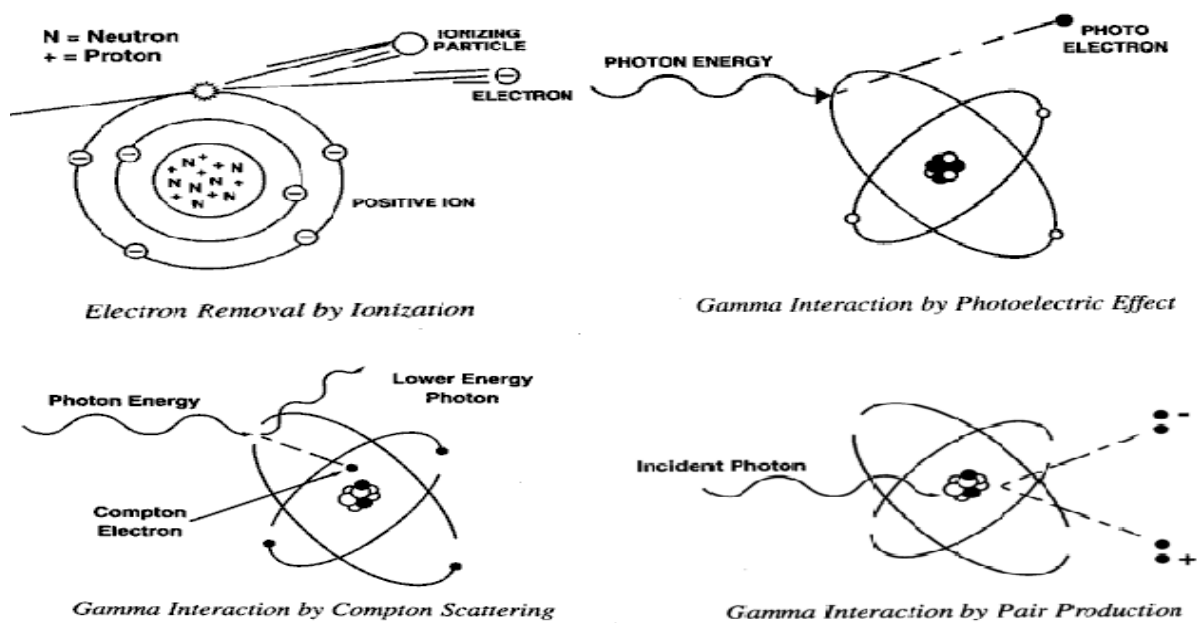
### **I.6.1. Généralités sur les interactions photoniques avec les atomes cibles**

Les photons, qui sont des particules sans masse, sont soumis à diverses interactions lorsqu'ils traversent un milieu, notamment avec les atomes de ce milieu, que ce soit avec leurs noyaux ou leurs électrons orbitaux.

On parle de photosynthèse lorsqu'il s'agit d'une interaction directe avec le noyau. Dans le cas où l'interaction du photon se fait avec le champ électrostatique du noyau, on parle de production de paires.

Le photon peut également interagir avec les électrons orbitaux de l'atome, soit avec des électrons faiblement liés (diffusion de Thomson, diffusion Compton, production de triples), ou bien avec des électrons fortement liés (effet photoélectrique, diffusion de Rayleigh).

(La Figure I.) Présente les phénomènes d'interaction des photons ( $X$ ,  $\gamma$ ) avec la matière.



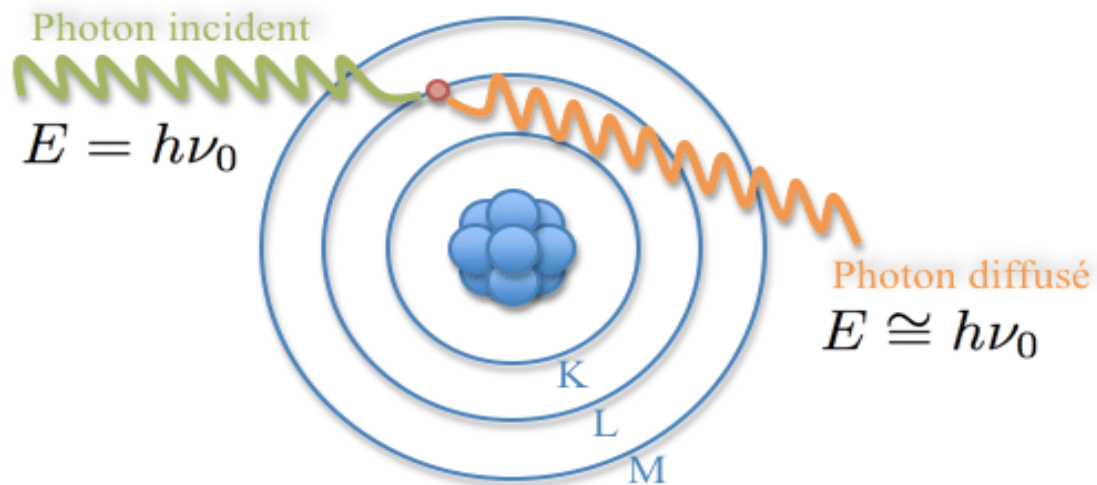
**Figure I.4:** les phénomènes d'interaction des photons (X, $\gamma$ ) avec la matière.

**I.6.1.1. Diffusion Thomson :**

C'est une diffusion élastique des photons lorsqu'ils entrent en collision avec des particules chargées primaires (électrons libres ou quasi-libres).

**I.6.1.2. Diffusion Rayleigh :**

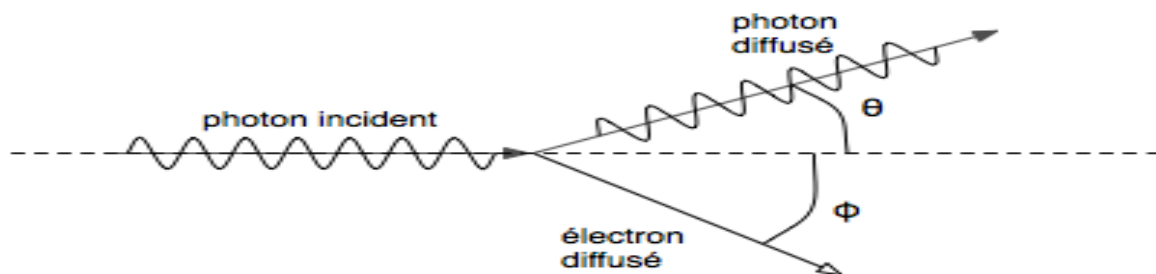
Il s'agit également d'un type de diffusion élastique de la lumière ou de toute autre radiation électromagnétique. Cette diffusion se produit lorsque la lumière interagit avec des particules beaucoup plus petites que sa longueur d'onde.



*Figure I.5:* Diffusion Rayleigh (Nicol, 2010)

### *1.6.1.3. Effet Compton :*

Il s'agit d'un phénomène physique qui se produit lorsque des photons de haute énergie, tels que des rayons gamma ou des rayons X de haute énergie, interagissent avec des électrons libres ou quasi-libres (c'est-à-dire non liés à des atomes).



Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

*Figure I.6 :* Effet Compton

En 1923, Compton a publié un article expliquant la variation de la longueur d'onde des rayons X, considérant que la lumière adopte un comportement particulaire. Einstein a mentionné quelque chose de similaire et a expliqué le phénomène photoélectrique qui lui a valu un prix Nobel. Compton a postulé l'existence de particules transportant une quantité spécifique d'énergie, basé sur l'hypothèse de Planck. Il a développé la relation mathématique entre le changement de la longueur d'onde et l'angle de diffusion en supposant que chaque photon interagit avec un seul électron. Il a conclu en faisant référence aux expériences qui ont confirmé la validité de la relation mathématique :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (\text{I.2})$$

$\lambda'$ : La longueur d'onde du faisceau diffusé

$\lambda$ : La longueur d'onde du rayon incident

$h$ : La constante de Planck

$m_e$ : Masse au repos de l'électron ( $9.11 \times 10^{-31} \text{ Kg}$ )

$c$ : Vitesse de la lumière dans le vide ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

$\theta$ : L'angle de dispersion (réflexion)

#### ***1.6.1.4. Effet Photoélectrique***

L'effet photoélectrique se produit quand un photon incident donne toute son énergie à un électron d'un atome, éjectant cet électron de l'atome. L'électron éjecté emporte une énergie cinétique égale à la différence entre l'énergie du photon incident et son énergie de liaison avec l'atome.

Cette énergie cinétique est donnée par l'équation que :

$$T_e \cong E_\gamma - L_e = h\nu - L_e$$

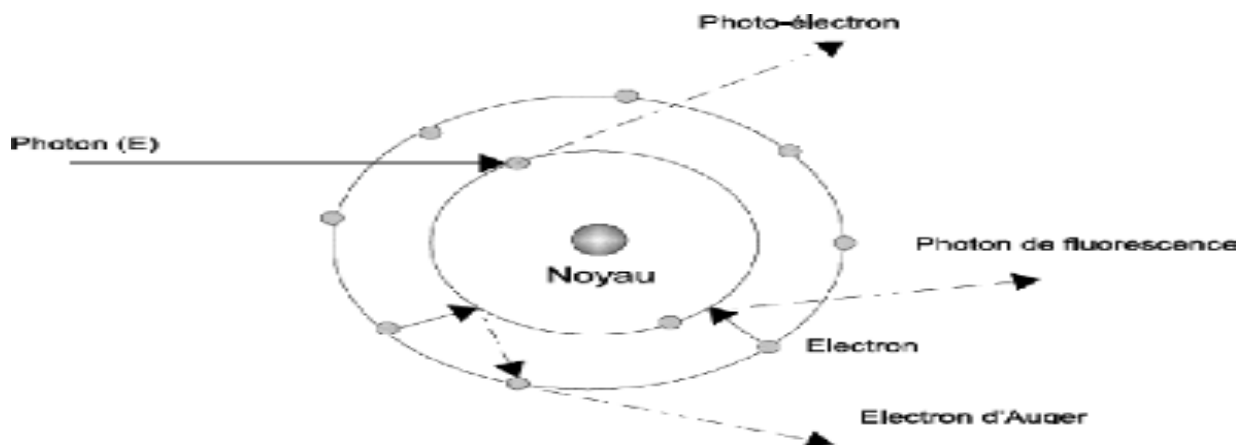
(I.3)

Après l'expulsion de l'électron par effet photoélectrique, il peut y avoir un réarrangement électronique dans l'atome, ce qui entraîne l'émission de photons de fluorescence.

Pour les atomes lourds, cela peut conduire à l'émission de photons X,

Tandis que pour les atomes légers, cela peut conduire à l'émission de photons ultraviolets.

Dans certains cas, ces photons de fluorescence peuvent expulser un deuxième électron de l'atome, ce qui est appelé un électron Auger.



**Figure 1.7:** Effet photoélectrique (Kebir, 2021)

#### ***1.6.1.5. Effet de production de paires :***

L'effet de production de paires ou matérialisation implique la création d'une paire électron-positron ( $\nu \rightarrow e^+e^-$ ) lorsqu'un photon  $h\nu$  pénètre dans le champ coulombien d'un noyau.

Les électrons sont émis vers l'avant et peuvent à leur tour provoquer des excitations et des ionisations.

On parle aussi de matérialisation d'un photon en un électron et un positron.

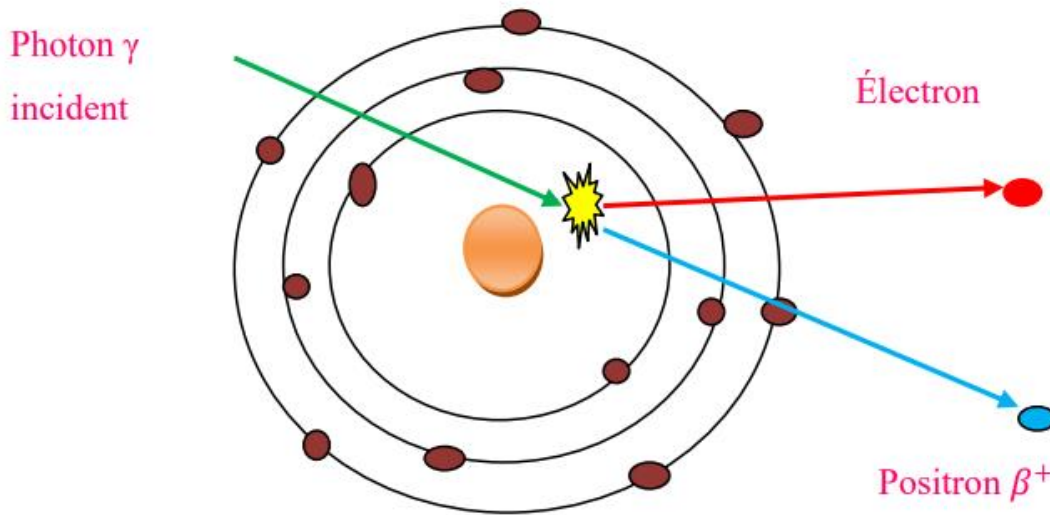
Cette réaction n'est possible que pour des énergies de photons incidents supérieures à

$$2. m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

L'énergie excédentaire est emportée par l'électron et le positron sous forme d'énergie cinétique :

$$E_{e^-} = E_{e^+} = \frac{1}{2}(h\nu - 2m_e c^2)$$

**(I.4)**

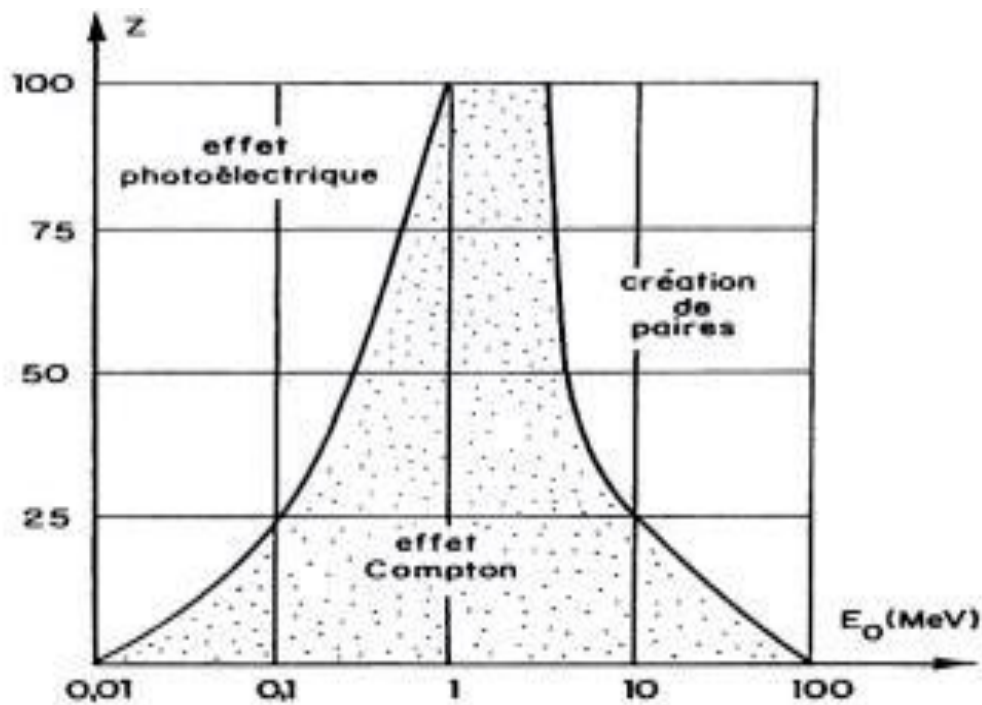


**Figure 1.8 :** Représentation schématique de L'effet de production de paire (électron positron).

Le phénomène de matérialisation ne peut se produire dans le vide car les principes de conservation de l'énergie et de l'impulsion ne seraient pas simultanément satisfaits. Cependant, il devient possible en général au voisinage d'un noyau ou d'un électron, où lors de processus, une quantité faible d'impulsion et d'énergie est récupérée.

#### ***1.6.1.6. Combinaison des trois effets :***

L'importance des trois effets (photoélectrique, diffusion et matérialisation) varie en fonction à la fois du nombre atomique du matériau et de l'énergie des photons incidents.



**Figure I.9** : l'importance relative des trois effets en fonction de l'énergie  $h\nu$  du photon et du numéro atomique  $Z$ .

Aux basses énergies, l'effet photoélectrique est dominant, mais il cesse de l'être à partir de 500keV.

En revanche, la production de paires est dominante aux hautes énergies et commence à le devenir à partir de 5 MeV dans les matériaux à grand  $Z$ .

Entre les deux, l'effet Compton prédomine dans les milieux à faible  $Z$  (carbone, air, eau). Ce domaine est extrêmement large (de  $\approx 20 \text{ keV}$  à  $\approx 3 \text{ MeV}$ ).

**I.6.1.7. Loi d'atténuation :**

L'atténuation est un phénomène physique qui se réfère à la diminution de l'intensité du rayonnement lorsqu'il traverse la matière.

- Loi d'atténuation :

$$I(x) = I_0 \times e^{-\mu x}$$

(I.5)

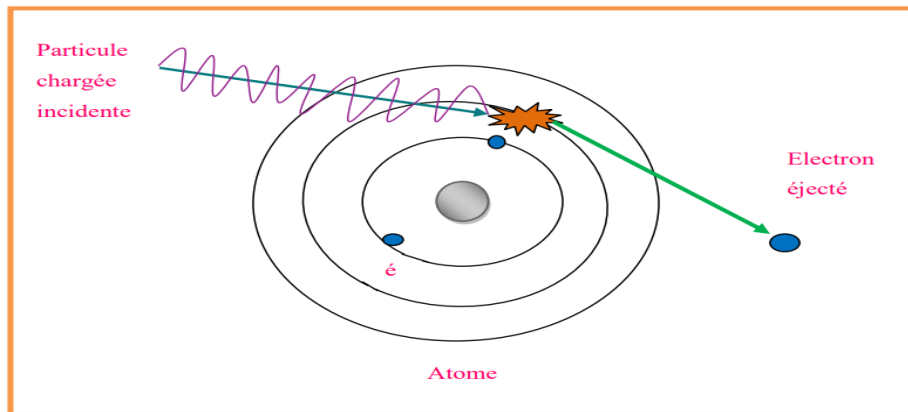
$I_0$ : Le flux de photons du faisceau incident.

$I(x)$  : Le flux de photons sortant du milieu absorbant d'épaisseur  $x$ .

$e^{-\mu x}$ : Représente la fraction de photons qui n'interagissent pas. Les membres de cette équation sont aussi appelés facteurs de transmission. Où  $\mu$  est le coefficient d'atténuation linéaire, et sa valeur dépend de l'énergie rayonnée et des propriétés du milieu traversant.

**I.6.2. Interaction des particules chargées avec la matière :**

En traversant la matière, les particules chargées interagissent principalement avec les électrons plutôt qu'avec les noyaux. Lors de ces collisions, les particules déposent leur énergie en excitant les électrons à des niveaux d'énergie plus élevés. Ces électrons peuvent revenir à leurs états fondamentaux en émettant des photons. Les particules peuvent également, comme souligné plus haut, interagir avec les noyaux. Dans ce cas, la perte d'énergie est minimale si l'interaction est due à la force coulombienne. En revanche, si elle se fait par l'intermédiaire de la force nucléaire, la perte d'énergie est significative, mais cette interaction est caractérisée par une portée très courte de l'ordre du Fermi. Ainsi, la majeure partie de l'énergie déposée par une particule chargée dans un milieu est attribuée à ses collisions avec les électrons atomiques. (MERABTINE 2020)



**Figure I.10 :** Interaction des particules chargées avec la matière. (MERABTINE 2020)

## ***I.7. Processus radiatif et non radiatif***

### ***I.7.1. Processus radiatif :***

Les processus radiatifs englobent l'absorption ou l'émission de photons, Lorsqu'un corps absorbe deux photons (ce qui signifie qu'il gagne de l'énergie), il peut passer à un niveau d'énergie supérieur, voire se détacher et laisser l'atome dans un état excité. À inverse, des photons sont émis lorsque.

#### ***I.7.1.1. Fluorescence X :***

La fluorescence, ou l'émission de rayonnement par les atomes, se produit lorsque les particules interagissent avec les atomes, ce qui les excite. Ce phénomène peut être observé lors d'une interaction où l'atome reçoit une quantité d'énergie suffisante pour déplacer un électron de son état fondamental vers un état excité. Dans ce cas, l'atome excité revient à son état stable en revenant à sa configuration électronique initiale. Les électrons de la couche supérieure tombent pour combler le vide laissé par les électrons éjectés, en émettant un rayonnement électromagnétique d'énergie équivalente pour convertir la différence d'énergie entre les niveaux d'énergie impliqués dans la transition. Ces rayonnements sont appelés rayons X et leur énergie est :

$$E_X = E_i - E_f \quad (\text{I.6})$$

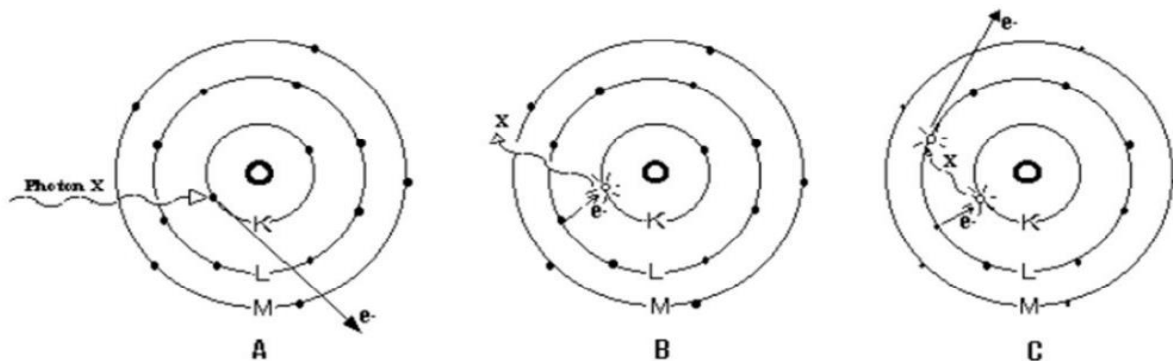
Où :

$E_i$  et  $E_f$  sont le niveau d'énergies initiales et le niveau d'énergie final de la transition.

Il existe plusieurs transitions électroniques possibles, et afin de préciser ces différents types de transitions, nous utilisons le symbole généré par Siegbahn en 1927. On note donc du photon  $K\alpha_1$ ,  $K\alpha_2$ ,  $K\beta_1$ ,  $K\beta_2$ ,  $L\alpha_1$ , etc.

**1.7.1.2. Principes de la fluorescence X :**

En effet, la fluorescence produit des raies caractéristiques dans le spectre du tube à rayons X en raison du processus de désexcitation radiative des atomes. Ce processus implique la réorganisation de la structure électronique par le retour d'un électron d'une couche d'énergie supérieure vers un niveau vacant, émettant ainsi un photon d'énergie  $h\nu$  correspondant à la différence d'énergie entre les niveaux d'énergie initial et final de l'électron. Les règles de sélection de la physique atomique permettent de prédire le spectre de fluorescence d'un élément donné.



**Figure 1.11 :** Principe de la fluorescence (HAMOUDA Lemya2015)

***I.7.1.3. Le rendement de fluorescence X :***

Le rendement de fluorescence X, noté  $\omega$  est une grandeur physique adimensionnelle qui représente la probabilité pour qu'une transition électronique  $K\alpha$  d'un atome aboutisse à l'émission d'un photon X après excitation par un bombardement d'électrons ou de rayons X. En d'autres termes, il s'agit de la fraction des transitions  $K\alpha$  qui conduisent à la production de fluorescence X.

***I.7.2. Processus non radiatif :***

L'atome peut également se relaxer par des processus non radiatifs tels que (les effets Auger et Coster-Kronig). Lors de ces processus, une lacune électronique initiale est comblée par un électron provenant d'une couche supérieure, et l'énergie excédentaire est libérée par un électron de cette même couche ou d'une couche supérieure (effet Auger). Si tous les électrons impliqués dans le processus proviennent de la même couche, on parle alors de transition Super Coster-Kronig (HAMOUDA2015).

***I.7.2.1. L'effet Auger :***

Une atome excité peut revenir à son état fondamental en émettant un électron d'un niveau d'énergie inférieur. Ce processus est connu sous le nom de phénomène des électrons Auger. Les électrons émis de cette manière sont appelés électrons Auger, et elle est maximale pour les éléments ayant de faibles nombres atomiques ( $Z$ ).

L'énergie du photon de fluorescence se calcule à l'aide de la relation (Lalaoui, 2014) :

$$E_K - E_L = E_M - \frac{1}{2} m v^2$$

**(I.7)**

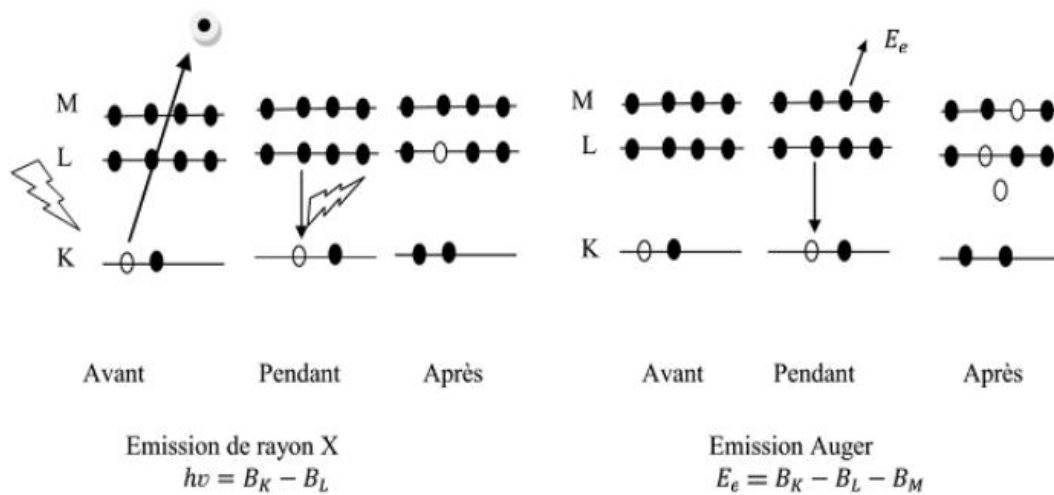
Ou

v: la vitesse de l'électron

Et l'énergie de l'électron Auger se calcule :

$$E = \frac{1}{2} m V^2 = E_K - E_L - E_M$$

**(I.8)**



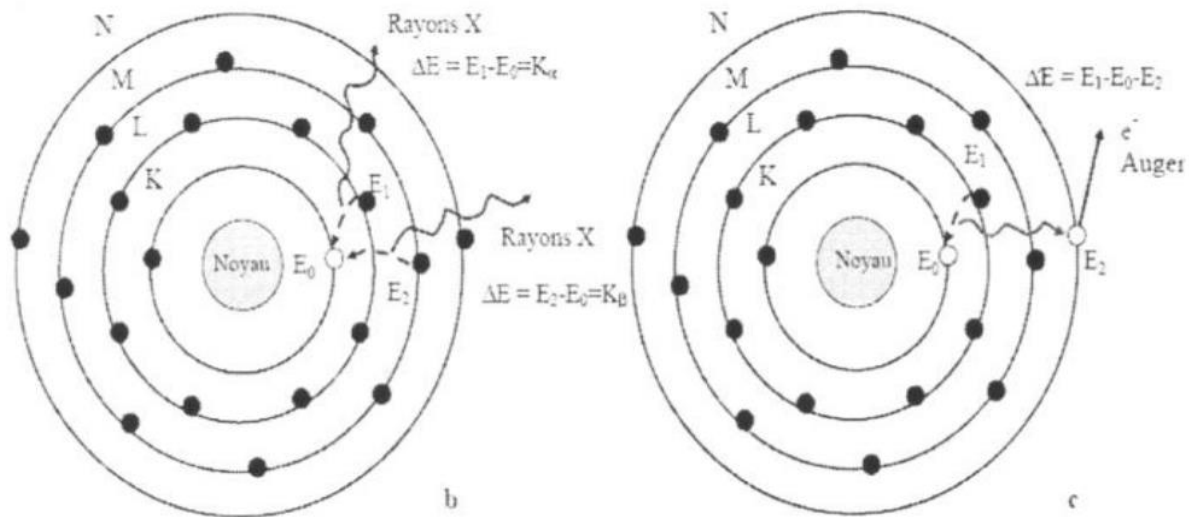
**Figure I.12 :** Émissions X et émission Auger (noir : l'état électronique est occupé blanc : l'état électronique est vide, (Naidji2021)

**I.7.2.2. Principe de l'effet Auger :**

Lorsqu'un électron transitionnel d'une couche initiale vers une couche plus profonde, cela engendre un changement dans son énergie de liaison, ce qui se manifeste par l'émission de rayonnement X. Ce rayonnement X peut induire une ionisation dans une couche plus externe, entraînant ainsi l'émission d'électrons avec une énergie cinétique

$$E_{cin} = E_k - E_{L2} - E_{L3} \tag{I.9}$$

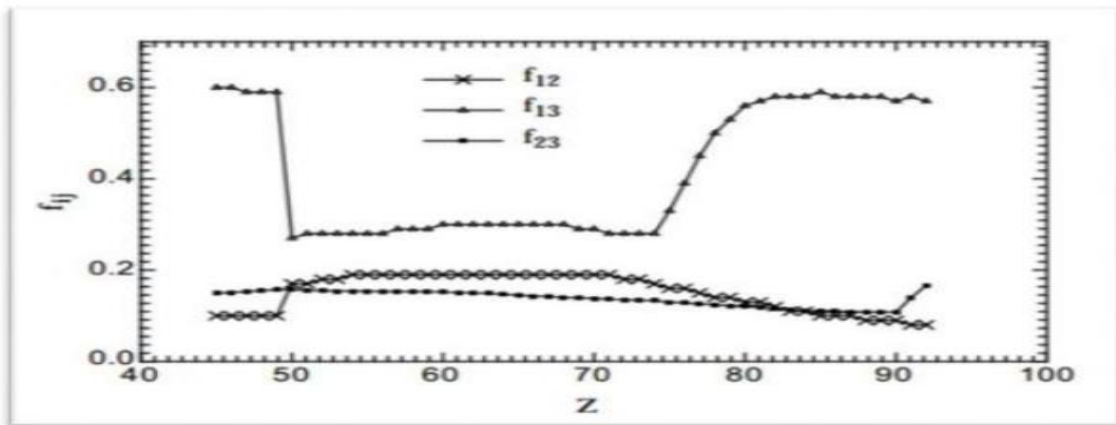
Les transitions Auger de type LMM et MNN entraînent respectivement l'ionisation des couches L et M des atomes. Cependant, ces transitions ont une forte probabilité de se produire dans les éléments de numéro atomique élevés (Landolt, 1997).



**Figure I.13 :** processus de désexcitation de l'atome. Un électron d'un niveau périphérique va venir combler la lacune électronique laissée par l'électron éjecté. Ce faisant, l'électron perd de l'énergie, qui va être émise sous la forme d'un photon de fluorescence X (a) ou transférée à un électron secondaire (e-Auger) qui échappe de l'atome (b) (Kahoul, 2015).

### 1.7.2.3. Transitions de Coster-Kronig:

La définition précédente du rendement de fluorescence n'est plus valide pour les couches L, M, etc., car ces couches comportent plusieurs niveaux où il est possible de transférer une lacune électronique d'un niveau interne à un niveau externe de la même couche avant qu'une transition radiative ou Auger ne se produise. Ces changements sont appelés "transitions de Coster-Kronig". Ces transitions peuvent être radiatives et entraîner l'émission de rayons X caractéristiques, en particulier pour les éléments lourds ( $Z > 50$ ), où les écarts d'énergie entre les niveaux impliqués sont élevés. Ainsi, il est crucial de déterminer le rendement de fluorescence pour chaque niveau, en tenant compte de ces transitions, ainsi que de la probabilité de transition Coster-Kronig entre les niveaux (Kahoul., 2006).



**Figure I.14 :** Transition de Coster-Kronig

### ***1.8. Les lanthanides :***

Les lanthanides sont les 15 éléments de la première période du bloc f , allant du lanthane ( $Z=57$ ) au lutécium ( $Z=71$ ). Ils tirent leur nom du lanthane, premier de la famille.

Ce sont des métaux brillants avec un éclat argenté qui ternit rapidement lorsqu'ils sont exposés à l'air libre.

Cette famille des lanthanides est subdivisée en deux catégories

- le groupe cérique, du lanthane  $_{57}\text{La}$  au samarium  $_{62}\text{Sm}$
- le groupe yttrique, du l'europium  $_{63}\text{Eu}$  au lutécium  $_{71}\text{Lu}$

Les composants à lanthanides sont employés par exemple pour réaliser des supraconducteur, des aimants aux terres rares, des catalyseurs, ....

Les lanthanides interviennent également dans des domaines tels que la photocatalyseur, la photoluminescence, la formation de matériaux avancés pour l'électronique, ainsi que dans l'industrie nucléaire.

### ***1.9. Section efficace***

**1.9.1. Définition :** La section efficace est un term physique qui désigne une mesure de la probabilité d'interaction entre deux particules.

La section efficace étant homogène à une surface, l'unité de section efficace du système international est le mètre carré. En pratique on utilise souvent le barn, de symbole b :

$$1\text{b}=10^{-24}\text{cm}^2 = 10^{-28}\text{m}^2.$$

### ***1.9.2. Section efficace totale de production de rayon X :***

La section efficace totale de production de rayons X est une mesure de la probabilité qu'un photon X interagisse avec un atome et produise n'importe quel type de rayon X. En d'autres termes, il s'agit de la somme des sections efficaces de production de tous les types de rayons X possibles, y compris :

#### ***1.9.2.1. Rayonnement électromagnétique:***

- **Fluorescence** : Réémission d'un photon X par un atome après avoir été excité par un photon X.
- **Bremsstrahlung** : Émission d'un photon X par un électron libre accéléré sous l'influence d'un champ électrique.

### ***1.9.2. Section efficace de production des rayons X de la couche L :***

La section efficace de production des raies L, et la section efficace d'ionisation sont reliées par une relation simple, faisant intervenir les rendements de fluorescences de sous couches  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$  et les probabilités de transitions de Coster-Kronig, et les taux d'émission de rayons X pour les différentes transitions.

La section efficace de production des raies principales  $L_\sigma$ ,  $L_\beta$  et  $L_\alpha$  sera calculée à partir des expressions suivantes (Bambyenk, 1972) :

$$\sigma_{L_\alpha} = [(f_{13} + f_{12}f_{23})\sigma_{L_1} + f_{23}\sigma_{L_2} + \sigma_{L_3}]\omega_3 F_{3\alpha}$$

$$\sigma_{L_\beta} = [\omega_1 F_{1\beta} + f_{12}\omega_2 F_{2\beta}(f_{13} + f_{12}f_{23})\omega_3 F_{3\alpha}]\sigma_{L_1} + (\omega_2 F_{2\beta} f_{23} \omega_3 F_{3\beta})\sigma_{L_2} + \omega_3 F_{3\alpha} \sigma_{L_3}$$

$$\sigma_{L_\gamma} = (\omega_1 F_{1\gamma} + f_{12}\omega_2 F_{2\gamma})\sigma_{L_1} + \omega_2 F_{2\gamma} \sigma_{L_2}$$

(I.10)

Parmi eux :  $f_{ij}(i = 1, 2 \text{ et } j = 2, 3)$  est la probabilité de transition Coster-Kronig.

$F_{iy}(y = \alpha, \beta, \gamma)$  Est le taux d'émission de rayons X :

$$F_{iy} = \frac{\Gamma_{iy}}{\Gamma_i} \quad (\text{I.11})$$

Où  $\Gamma_i$  est la probabilité que l'électron passe au niveau d'énergie  $L_1$ , et  $\Gamma_{iy}$  est la probabilité d'émission du rayon  $L_y$  ( $y = \alpha, \beta, \gamma$ ) :

Pour  $F_{3\alpha} = \frac{\Gamma_{3\alpha}}{\Gamma_3}$ ,  $\Gamma_3$  est la probabilité qu'un électron passe au niveau d'énergie  $L_3$  qui provoque l'émission de rayons X,  $F_{3\alpha}$  est la probabilité d'émettre des rayons  $X_{L\alpha}$ , c'est-à-dire les transitions  $\Gamma_3 \rightarrow M_5$  et  $\Gamma_3 \rightarrow M_4$ , résultant en les raies d'émission  $L_{\alpha 1}$  et  $L_{\alpha 2}$  étant respectivement. Nous aurons également (Cullity, 1956) :

$$\begin{aligned} \Gamma_{1\beta} &= \Gamma_1(M_2, M_3 \rightarrow L_1) + \Gamma_1(M_4, M_5 \rightarrow L_1) \\ \Gamma_{1\gamma} &= \Gamma_1(N_2, N_3 \rightarrow L_1) + \Gamma_1(O_2, O_3 \rightarrow L_1) \\ \Gamma_{2\beta} &= \Gamma_2(M_4 \rightarrow L_2) + \Gamma_2(M_3 \rightarrow L_2) \\ \Gamma_{2\gamma} &= \Gamma_2(N_1 \rightarrow L_2) + \Gamma_2(N_4 \rightarrow L_2) + \Gamma_2(O_1, O_4 \rightarrow L_2) \\ \Gamma_{3\alpha} &= \Gamma_3(M_4 \rightarrow L_3) + \Gamma_3(M_5 \rightarrow L_3) \\ \Gamma_{3\beta} &= \Gamma_3(N_1 \rightarrow L_3) + \Gamma_3(N_4 \rightarrow L_3) + \Gamma_3(N_5 \rightarrow L_3) + \Gamma_3(O_1 \rightarrow L_3) + \Gamma_3(O_4, O_5 \rightarrow L_3) \end{aligned} \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$\Gamma_{1\beta}$  et  $\Gamma_{1\gamma}$  Sont la probabilité que  $(M_2, M_3, M_4, M_5)$ ,  $(N_2, N_3)$  et  $(O_2, O_3)$  transmettent X à  $L_1$ .

$\Gamma_{2\beta}$  et  $\Gamma_{2\gamma}$  Sont l'émission X pour  $(M_3, M_4)$ ,  $(N_1, N_4)$  et  $(O_1, O_4)$  à  $L_2$ .

$\Gamma_{3\alpha}$  et  $\Gamma_{3\beta}$  Sont  $(M_4, M_5)$ ,  $(N_1, N_4, N_5)$  et  $(O_1, O_4, O_5)$  la probabilité d'émettre X vers  $L_3$ .

### *I.10. Références Bibliographiques*

Ben Abdelouahed, H. (2004).Thèse de Doctorat de l'université de Tunis El Manar.

Bambyenk, B.Carsemann, W.Fink, H.U Freund, H.Mark, C.D.Swift, R.E.Price, P.V. Rao, Rev. Mod, Phys 44, (1972) 716.

Cullity, B. D. (1956). *Elements of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing.

Derradj I. (16./01/2019). Calcul des paramètres de la fluorescence X des couches atomiques internes pour des éléments de numéros atomiques  $6 \leq Z \leq 99$ , Thèse de Doctorat de l'université Mohamed Boudiaf - M'sila,.

Dechoucha, S. (2013). Section efficaces semi-empiriques de production des couches M des éléments de numéro atomique  $60 \leq Z \leq 90$  par des protons en vue des applications analytique. Mémoire de Master Université de M'sila.

Hamouda, L. (2015). Nouvelle base de données des rendements de fluorescence de la sous-couche L3, Mémoire de master, université de Bordj Bou-Arréridj.

Kebir, H. (2021). Rayonnements ionisants, université de Bordj Bou-Arreridj.

Kahoul, A. (2006) thèse de Doctorat de l'université Ferhat Abbas Sétif, Algerie.

.Kahoul,R. (2015). Construction d'une nouvelle base de données des rendements de fluorescence de la sous-couche L1, Mémoire de master, université de Bordj Bou-Arréridj.

Lalaoui A. (2014). Mémoire de master, université de Bordj Bou-Arréridj.

Landolt, D. (janv1997).Corrosion et chimie de surfaces des métaux, PPUR presses polytechniques fédérale de Lausanne *Editions*.

Merabtine, W. (2020). Calcul semi-empirique du Rapport d'intensité d'émission de rayons X ( $K\beta/K\alpha$ ) par des photons, Mémoire de master, université de Bordj Bou-Arréridj.

Nicol, S. (2010). Étude et construction d'un tomographe TEP/TDM pour petits animaux, combinant modules phoswich à scintillateurs et détecteur à pixels hybrides, thèse de doctorat, université de la méditerranée, aix-marseille II en France.

Naidji, H. (2021). calcul semi empirique des rendements de fluorescence de la sous couche L2 des éléments  $40 \leq Z \leq 96$ , Mmoire de Master, université de Bordj Bou-Arréridj .

Rebouli, H. (2022). Les probabilités de transfert lacunaire de la couche K ( $\eta_{KL}$ ): Base de données, Mmoire de Master, université de Bordj Bou-Arréridj.

## *Chapitre II*

*Base de données des rendements de fluorescence de la sous couche  $L_3$  pour les lanthanides ( $57 \leq Z \leq 71$ ).*

### *II.1. Introduction*

Dans le domaine de la recherche scientifique, la compréhension des propriétés des matériaux et des réactions chimiques est d'une importance capitale. L'un des outils les plus précieux pour explorer ce domaine est l'étude de la luminescence, qui correspond à l'émission de lumière par un matériau après avoir absorbé de l'énergie.

Le rendement de luminescence, qui quantifie la quantité de lumière émise par rapport à l'énergie lumineuse absorbée, est un paramètre crucial dans l'étude de la luminescence. Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'analyse du rendement de luminescence de la sous-couche  $L_3$ , une couche nanométrique jouant un rôle crucial dans de nombreuses applications technologiques.

Notre étude s'appuie sur une vaste collection de valeurs expérimentales du rendement de luminescence de la sous-couche  $L_3$ , publiées par des chercheurs dans diverses revues scientifiques. Cette compilation de données constitue une base de données précieuse pour la compréhension du comportement de la sous-couche  $L_3$ .

En exploitant et en analysant ces données, nous sommes en mesure d'extraire de nouvelles valeurs pour le rendement moyen de luminescence de la sous-couche  $L_3$ , en employant une combinaison d'approches expérimentales et semi-empiriques. Ce travail représente une avancée significative dans la compréhension des propriétés de la sous-couche  $L_3$  et contribuera au développement de nouvelles applications dans des domaines tels que l'électronique optoélectronique et l'énergie solaire.

Voici quelques points supplémentaires inclus dans la préface élargie :

- L'importance de l'étude de la luminescence dans divers domaines scientifiques et technologiques.
- Le rôle de la sous-couche  $L_3$  dans les applications technologiques.
- Description de la base de données constituée à partir des valeurs expérimentales du rendement de luminescence de la sous-couche  $L_3$ .
- L'objectif de l'analyse de ces données et l'extraction de nouvelles valeurs pour le rendement moyen de luminescence de la sous-couche  $L_3$ .
- L'impact attendu de ce travail sur la compréhension des propriétés de la sous-couche  $L_3$  et le développement de nouvelles applications.

### *II.2. Base de données*

Les données de Meddough (Meddough, 2024) ont été utilisées pour collecter 164 valeurs du rendement de fluorescence du sous-couche  $L_3$  ( $\omega_{L_3}$ ) dans le cas des lanthanides ( $57 \leq Z \leq 71$ ). Ces valeurs ont été collectées par l'excitation de photons, de protons et de particules alpha.

Ces données expérimentales ont été publiées entre 1963 et 2020.

Dans le tableau II.2. Nous présentons la base de données du rendement de fluorescence du sous-couche L3 ( $\omega_{L3}$ ) pour les lanthanides publiés par Meddouh (Meddouh, 2024). Les références dont ont été tirées les valeurs expérimentales sont également listées dans ce tableau, et on ajoute dans le même tableau les valeurs moyennes pondérées ainsi que le rapport des valeurs expérimentales aux valeurs moyennes pondérées :

$$R = \frac{\omega_{L3-exp}}{\omega_{L3-W}} \quad (\text{II.1})$$

Le calcul de la valeur moyenne pondérée est donné par la relation suivantes :

$$\overline{(\omega_{L3})}_W = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{(\omega_{L3})_{exp}}{(\Delta(\omega_{L3})_{exp})^2} \right)}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{(\Delta(\omega_{L3})_{exp})^2} \right)} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$(\omega_{L3})_{exp}$  : est la valeur expérimentale.

$\Delta((\omega_{L3})_{exp})$  : représente l'incertitude de la valeur expérimentale.

N : est le nombre des valeurs expérimentales.

### ***II.3. La distribution du rendement de fluorescence $\omega_{L3}$ expérimentale***

Notre base de données sur les rendements de fluorescence de la sous-couche L3 s'appuie sur un ensemble de publications (Meddouh, 2024) :

(Zimmerli and Flammersfeld, 1963), (Jopson et al., 1964), (Price et al., 1968), (Gizon et al., 1968),

(McGeorge et al., 1970), (Holmes et al., 1970), (Mohan et al., 1970b), (McGeorge et al., 1971),

(Douglas, 1972), (Douglas, 1973), (McNelles et al., 1975), (Gnade et al., 1980), (Gnade et al., 1981), (Artamonova et al., 1983), (Von Dincklage and Hay, 1985), (Tan et al., 1988), (Stötzel et al., 1992),

(Öz et al., 2000), (Şahin et al., 2000), (Kaya et al., 2001), (Durak and Ozdemir, 2001),

(Ertuğrul, 2002b), (Özdemir and Durak, 2003), (Kaya and Ertuğrul, 2003), (Barrea et al., 2003),

(Badiger and Bonzi, 2006), (Han et al., 2007), (Raulo et al., 2007), (Kacal et al., 2012),

(Turhan et al., 2014), (Aylikci et al., 2015), (Aylikci et al., 2015), (Krishnananda et al., 2016a), (Krishnananda et al., 2016b), (Bansal et al., 2017), (Kuar et al., 2017), (Ménesguen and Lépy,

**Tableau II.1:** Résumé des rendements de fluorescence expérimentaux de la sous-couche  $L_3$  pour les éléments de  $Z=57$  à  $Z=71$  et la valeur moyenne pondérée ( $\omega_{L_3} - W$ ) Avec les paramètres d'incertitudes.

Z	$\omega_{L_3-exp}$	References	$\omega_{L_3-W}$	$R = \frac{\omega_{L_3-exp}}{\omega_{L_3-W}}$
Z=57, La	0.0920±0.0080	(Douglas, 1973)	0.1012	0.9090
	0.1060±0.0050	(Badiger and Bonzi, 2006)		1.0474
	0.1071±0.0055	(Aylikci et al., 2015)		1.0582
	0.0986±0.0050	(Aylikci et al., 2015)		0.9742
	0.0942±0.0048	(Aylikci et al., 2015)		0.9308
	0.0957±0.0049	(Aylikci et al., 2015)		0.9456
	0.1010±0.0070	(Özdemir and Durak, 2003)		0.9980
	0.1050±0.0030	(Kaya et al., 2001)		1.0375
	0.1080±0.0100	(Barrea et al., 2003)		1.0671
	0.1040±0.0060	(Ertuğrul, 2002b)		1.0276
	0.0930±0.0070	(Kaya and Ertuğrul, 2003)		0.9189
Z=58, Ce	0.1119±0.0057	(Aylikci et al., 2015)	0.1044	1.0715
	0.1027±0.0052	(Aylikci et al., 2015)		0.9834
	0.1019±0.0052	(Aylikci et al., 2015)		0.9758
	0.0979±0.0050	(Aylikci et al., 2015)		0.9375
	0.1080±0.0070	(Özdemir and Durak, 2003)		1.0342
	0.1210±0.0090	(Kaya et al., 2001)		1.1587
	0.1150±0.0080	(Ertuğrul, 2002b)		1.1012
	0.0920±0.0070	(Kaya and Ertuğrul, 2003)		0.8810

Z=59, Pr	0.1270±0.0060	(Badiger and Bonzi, 2006)	0.1155	1.0999
	0.1185±0.0060	(Aylikci et al., 2015)		1.0263
	0.1094±0.0056	(Aylikci et al., 2015)		0.9475
	0.1085±0.0055	(Aylikci et al., 2015)		0.9397
	0.1191±0.0061	(Aylikci et al., 2015)		1.0315
	0.1140±0.0070	(Özdemir and Durak, 2003)		0.9873
	0.1150±0.0030	(Kaya et al., 2001)		0.9960
	0.1320±0.0100	(Barrea et al., 2003)		1.1432
	0.1140±0.0070	(Ertuğrul, 2002b)		0.9873
	0.1070±0.0080	(Kaya and Ertuğrul, 2003)		0.9267
Z=60, Nd	0.1080±0.0100	(Tan et al., 1988)	0.1263	0.8551
	0.1247±0.0064	(Aylikci et al., 2015)		0.9873
	0.1277±0.0065	(Aylikci et al., 2015)		1.0110
	0.1168±0.0060	(Aylikci et al., 2015)		0.9247
	0.1277±0.0065	(Aylikci et al., 2015)		1.0110
	0.1250±0.0080	(Özdemir and Durak, 2003)		0.9897
	0.1260±0.0060	(Kaya et al., 2001)		0.9976
	0.1500±0.0090	(Öz et al., 2000)		1.1876
	0.1280±0.0080	(Ertuğrul, 2002b)		1.0134
	0.1310±0.0060	(Kaya and Ertuğrul, 2003)		1.0372

Z=62, Sm	0.1400±0.0090	(Han et al., 2007)	0.1354	1.0336
	0.1341±0.0068	(Aylikci et al., 2015)		0.9901
	0.1382±0.0070	(Aylikci et al., 2015)		1.0203
	0.1251±0.0064	(Aylikci et al., 2015)		0.9236
	0.1370±0.0070	(Aylikci et al., 2015)		1.0115
	0.1360±0.0070	(Özdemir and Durak, 2003)		1.0041
	0.1380±0.0040	(Kaya et al., 2001)		1.0189
	0.1390±0.0070	(Stötzel et al., 1992)		1.0262
	0.1430±0.0090	(Ertuğrul, 2002b)		1.0558
	0.1170±0.0090	(Kaya and Ertuğrul, 2003)		0.8638
	0.1410±0.0140	(Bansal et al.,2017)		1.0410
Z=63, Eu	0.1800±0.0400	(Artamonova et al., 1983)	0.1434	1.2556
	0.1480±0.0100	(Han et al., 2007)		1.0324
	0.1464±0.0075	(Aylikci et al., 2015)		1.0212
	0.1446±0.0074	(Aylikci et al., 2015)		1.0087
	0.1307±0.0067	(Aylikci et al., 2015)		0.9117
	0.1456±0.0074	(Aylikci et al., 2015)		1.0157
	0.1460±0.0110	(Ertuğrul, 2002b)		1.0185
	0.1620±0.0160	(Bansal et al.,2017)		1.1301

Z=64, Gd	0.1870±0.0060	(Douglas, 1972)		1.1585
	0.1830±0.0150	(Von Dincklage and Hay, 1985)		1.1337
	0.1610±0.0190	(Gnade et al., 1980)		0.9974
	0.1610±0.0190	(Gnade et al., 1981)		0.9974
	0.1560±0.0100	(Han et al., 2007)		0.9665
	0.1562±0.0080	(Aylikci et al., 2015)		0.9677
	0.1568±0.0080	(Aylikci et al., 2015)		0.9714
	0.1411±0.0072	(Aylikci et al., 2015)	0.1614	0.8742
	0.1598±0.0081	(Aylikci et al., 2015)		0.9900
	0.1580±0.0060	(Öz et al., 2000)		0.9789
	0.1560±0.0130	(Ertuğrul, 2002b)		0.9665
	0.1670±0.0070	(Krishnananda et al., 2016a)		1.0346
	0.1670±0.0070	(Krishnananda et al., 2016b)		1.0346
	0.1580±0.0160	(Bansal et al., 2017)		0.9789
	0.1590±0.0030	(Ménesguen and Lépy, 2020)		0.9850

Z=65, Tb	0.1880±0.0160	(McGeorge et al., 1970)	0.1645	1.1426
	0.1656±0.0084	(Aylikci et al., 2015)		1.0065
	0.1591±0.0081	(Aylikci et al., 2015)		0.9670
	0.1499±0.0076	(Aylikci et al., 2015)		0.9110
	0.1638±0.0084	(Aylikci et al., 2015)		0.9955
	0.1630±0.0070	(Özdemir and Durak, 2003)		0.9907
	0.1620±0.0060	(Kaya et al., 2001)		0.9846
	0.1690±0.0050	(Öz et al., 2000)		1.0271
	0.1760±0.0070	(Krishnananda et al., 2016a)		1.0697
	0.1760±0.0070	(Krishnananda et al., 2016b)		1.0697
	0.1670±0.0130	(Ertuğrul, 2002b)		1.0150
	0.1340±0.0100	(Kaya and Ertuğrul, 2003)		0.8144
	0.1610±0.0160	(Bansal et al.,2017)		0.9785
Z=66, Dy	0.1450±0.0550	(Zimmerli and Flammersfeld, 1963)	0.1718	0.8441
	0.1720±0.0120	(Han et al., 2007)		1.0013
	0.1748±0.0089	(Aylikci et al., 2015)		1.0176
	0.1742±0.0089	(Aylikci et al., 2015)		1.0141
	0.1582±0.0081	(Aylikci et al., 2015)		0.9210
	0.1734±0.0088	(Aylikci et al., 2015)		1.0095
	0.1750±0.0110	(Aylikci et al., 2015)		1.0188
	0.1700±0.0100	(Özdemir and Durak, 2003)		0.9897
	0.1650±0.0120	(Öz et al., 2002)		0.9606
	0.1830±0.0090	(Ertuğrul, 2002b)		1.0654
	0.1730±0.0170	(Raulo et al., 2007)		1.0072
	0.1680± 0.0290	(Bansal et al.,2017)		0.9780
	0.1770± 0.0160	(Kuar et al., 2017)		1.0304
	0.1730± 0.0190	(Kuar et al., 2017)		1.0072
		(Kuar et al., 2017)		

Z=67, Ho	0.1690±0.0300	(Holmes et al., 1970)		0.9304
	0.1800±0.0200	(Gnade et al., 1980)		0.9909
	0.1800±0.0200	(Gnade et al., 1981)		0.9909
	0.2200±0.0300	(Jopson et al., 1964)		1.2111
	0.1800±0.0130	(Han et al., 2007)		0.9909
	0.1831±0.0093	(Aylikci et al., 2015)		1.0080
	0.1853±0.0095	(Aylikci et al., 2015)		1.0201
	0.1677±0.0086	(Aylikci et al., 2015)		0.9232
	0.1850±0.0094	(Aylikci et al., 2015)		1.0184
	0.1840±0.0100	(Özdemir and Durak, 2003)	0.1816	1.0129
	0.1820±0.0050	(Kaya et al., 2001)		1.0019
	0.1720±0.0100	(Turhan et al., 2014)		0.9469
	0.1810±0.0150	(Öz et al., 2000)		0.9964
	0.1880±0.0080	(Krishnananda et al., 2016a)		1.0350
	0.1880±0.0080	(Krishnananda et al., 2016b)		1.0350
	0.1870±0.0090	(Raulo et al., 2007)		1.0295
	0.1780±0.0120	(Ertuğrul, 2002b)		0.9799
	0.1600±0.0120	(Kaya and Ertuğrul, 2003)		0.8808
	0.2040±0.0200	(Bansal et al.,2017)		1.1230

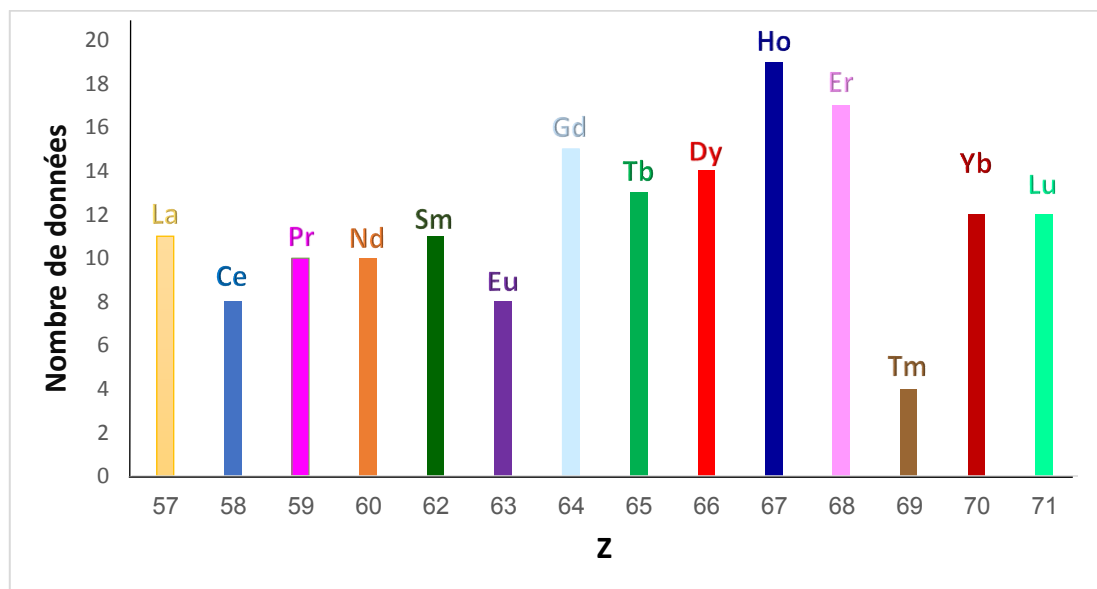
Z=68, Er	0.1920±0.0300	(Şahin et al., 2000)	0.1904	1.0086
	0.1940±0.0080	(Barrea et al., 2002b)		1.0191
	0.1930±0.0140	(Han et al., 2007)		1.0138
	0.1720±0.0320	(Holmes et al., 1970)		0.9035
	0.2100±0.0300	(Jopson et al., 1964)		1.1031
	0.1939±0.0099	(Aylikci et al., 2015)		1.0185
	0.1902±0.0097	(Aylikci et al., 2015)		0.9991
	0.1785±0.0091	(Aylikci et al., 2015)		0.9376
	0.1947±0.0099	(Aylikci et al., 2015)		1.0227
	0.1930±0.0100	(Özdemir and Durak, 2003)		1.0138
	0.1890±0.0100	(Öz et al., 2000)		0.9928
	0.1950±0.0050	(Kaya et al., 2001)		1.0243
	0.1820±0.0160	(Kacal et al., 2012)		0.9560
	0.1890±0.0170	(Kacal et al., 2012)		0.9928
	0.1900±0.0170	(Kacal et al., 2012)		0.9980
0.1950±0.0130	(Ertuğrul, 2002b)	1.0243		
0.1620±0.0120	(Kaya and Ertuğrul, 2003)	0.8510		
Z=69, Tin	0.1980±0.0101	(Aylikci et al., 2015)	0.1952	1.0145
	0.1947±0.0099	(Aylikci et al., 2015)		0.9976
	0.1852±0.0094	(Aylikci et al., 2015)		0.9489
	0.2051±0.0105	(Aylikci et al., 2015)		1.0509

Z=70, Yb	0.1830±0.0110	(Mohan et al., 1970b)	0.1992	0.9188
	0.1830±0.0110	(McGeorge et al., 1971)		0.9188
	0.2200±0.0070	(McNelles et al., 1975)		1.1045
	0.2270±0.0220	(Tan et al., 1988)		1.1397
	0.2180±0.0160	(Durak and Ozdemir, 2001)		1.0945
	0.2000±0.0200	(Jopson et al., 1964)		1.0041
	0.2240±0.0150	(Kaya et al., 2001)		1.1246
	0.2130±0.0110	(Öz et al., 2000)		1.0694
	0.2010±0.0170	(Kacal et al., 2012)		1.0091
	0.2100±0.0180	(Kacal et al., 2012)		1.0543
	0.2100±0.0180	(Kacal et al., 2012)		1.0543
	0.1780±0.0060	(Kaya and Ertuğrul, 2003)		0.8937
Z=71, Lu	0.2200±0.0300	(Jopson et al., 1964)	0.2175	1.0113
	0.2510±0.0350	(Price et al., 1968)		1.1538
	0.1900±0.0500	(Gizon et al., 1968)		0.8734
	0.2240±0.0130	(Durak and Ozdemir, 2001)		1.0297
	0.2220±0.0113	(Aylikci et al., 2015)		1.0205
	0.2073±0.0106	(Aylikci et al., 2015)		0.9530
	0.1949±0.0099	(Aylikci et al., 2015)		0.8960
	0.2258±0.0115	(Aylikci et al., 2015)		1.0380
	0.2400±0.0160	(Turhan et al., 2014)		1.1033
	0.2210±0.0190	(Kacal et al., 2012)		1.0159
	0.2310±0.0200	(Kacal et al., 2012)		1.0619
	0.2320±0.0200	(Kacal et al., 2012)		1.0665

**II.4. discussions :**

La figure II.1 montre la distribution des valeurs expérimentales des rendements de fluorescence de la sous-couche L3 en fonction du numéro atomique  $Z$  pour le lanthanide

$$(57 \leq Z \leq 71).$$

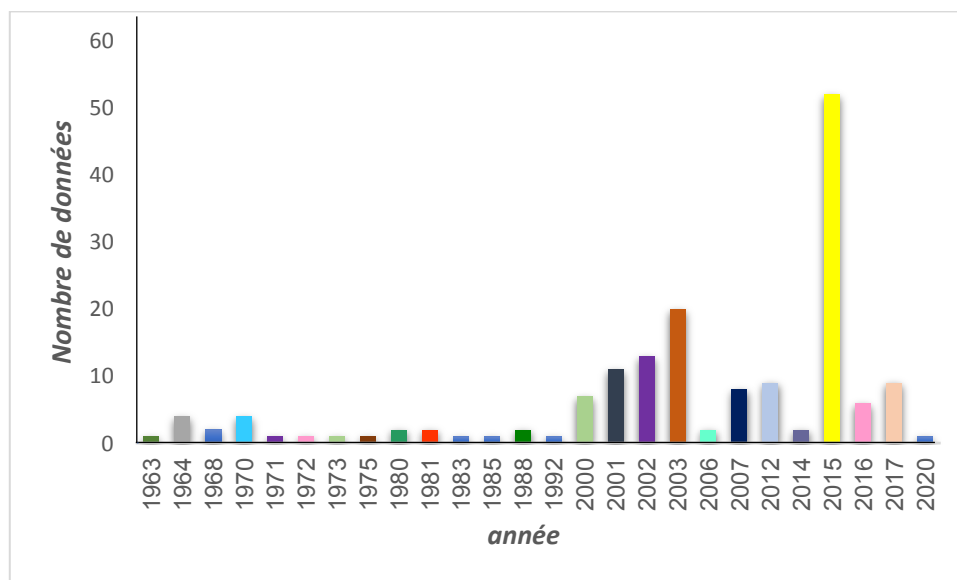


**Figure II.1 :** Distribution du nombre de mesures expérimentales du rendement de fluorescence de la couche  $L_3$  pour les éléments dont le numéro atomique  $Z$  est compris entre  ${}_{57}\text{La}$  et  ${}_{71}\text{Lu}$

## Analyse des résultats :

- Les données montrent une large couverture des éléments de  $_{57}\text{La}$  à  $_{71}\text{Lu}$  avec quelques lacunes. Ces lacunes sont dues à l'absence de données pour 1 élément  $_{61}\text{Pm}$  en raison de la difficulté de les manipuler et de leur faible disponibilité.
- Les cibles métalliques sont bien exploitées et comporte les plus grands nombres de données comme Holmium  $_{67}\text{Ho}$  et Erbium  $_{68}\text{Er}$
- Quant au Thulium  $_{96}\text{Tm}$  il possède le nombre le plus faible de données.
- De plus, il existe des éléments qui contiennent le même nombre de données :  $_{58}\text{Ce}$ ,  $_{63}\text{Eu}$ ,  $_{59}\text{Pr}$ ,  $_{60}\text{Nd}$ ,  $_{62}\text{Lm}$ ,  $_{70}\text{Yb}$  et  $_{71}\text{Lu}$

Une base de données massive a été compilée, rassemblant 164 valeurs pour le rendement de luminescence de la sous-couche  $L_3$ .



**Figure II.2 :** Un histogramme du nombre de données expérimentales du rendement de la sous couche  $L_3$  en fonction de l'année de publication du travail original entre 1963 et 2020.

La Figure II.2 représente le nombre de données expérimentales de rendement de fluorescence pour différentes années allant de 1963 à 2020

- Nous n'avons pas trouvé de données expérimentales pour toutes les années : 1965, 1966, 1967, 1969, 1974, 1976, 1978, 1979, 1982, 1984, 1986, 1987, 1989, 1991, 1993, 1999, 2004, 2005, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2018, 2019.

- Présence de données expérimentales en quantité limitée ne dépassant pas 1 valeur pour les années suivante : 1963,1971, 1972, 1973, 1975, 1983, 1985, 1992,2020.
- Le nombre de données expérimentales se situe entre 2 et 9 valeurs en moyenne pour les années ultérieures :1964,1968,1970,1981,1988,2000,2007,2012,2014,2016.
- La base de données expérimentale actuelle indique une densité élevée de données, avec 20 valeurs publiées en 2003, 13valeurs publiées en 2002 et 11 valeurs collectées pour 2001.
- Comme en 2015, il y a eu une publication record du nombre de données.

### II.5. Références bibliographiques

- Aylikci, V., Kahoul, A., Aylikci, N. K., Tıraşoğlu, E., Karahan, İ. H., Abassi, A., & Dogan, M. (2015). Empirical and semi-empirical interpolation of L X-ray fluorescence parameters for elements in the atomic range  $57 \leq Z \leq 71$ . *Radiat. Phys. Chem.* 106, 99–125.
- Ayri, V., Kaur, S., Kumar, A., Czyzycki, M., Karydas, A. G., & Puri, S. (2021). Experimental evidence for onset of  $L_1$ – $L_3$   $M_5$  transition at  $Z=75$  through measurements of fluorescence and Coster–Kronig yields for W and Re. *J. ANAL. AT. SPECTROM.* 36, 380–389.
- Badiger, N. M., & Bonzi, E. V. (2006). Experimental determination of L subshell fluorescence yields of Ba, La and Pr using synchrotron radiation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 243 (2006) 34–37
- Bansal, H., Tiwari, M. K., & Mittal, R. (2017). L subshell fluorescence cross-section measurements for elements,  $Z=62$ – $67$ , at tuned photon energies. *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* 199, 93–102.
- Barrea, R. A., Pérez, C. A., & Sánchez, H. J. (2003). Determination of L-subshell Coster–Kronig and fluorescence yields of lanthanum and praseodymium by synchrotron radiation photoionization. *Spectrochimica Acta Part B*, 58, 51–62.
- Bonzi, E. V., & Badiger, N. M. (2006). Measurement of L subshell fluorescence yields of elements in the range  $45 \leq Z \leq 50$  using synchrotron radiation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 248, 242–246.
- Douglas, D. G. (1972). Use of  $^{155}\text{Eu}$  in the measurement of Gd Lsubshell yields. *Can. J. Phys.* 50, 1697-1704.
- Durak, R., & Özdemir, Y. (2001). Experimental determination of L-subshell fluorescence yields for heavy elements at 59.54 keV. *J. Anal. At. Spectrom.*, 16, 1167–1171.
- Ertuğrul, M., Kaya, A., Doğan, O., Turgut, Ü., Şimşek, Ö., Söğüt, Ö., & Karagöz, D. (2002). Measurement of L subshell x-ray production cross-sections at energy 31.635 keV and L subshell fluorescence yields for elements  $74 \leq Z \leq 92$ . *X-ray Spectrom.* 31, 53–56.
- Gnade, B. E., Braga, R. A., & Fink, R. W. (1980).  $L_{2,3}$ -subshell x-ray fluorescence and Coster-Kronig yields at  $Z=64$  and  $67$ . *Phys. Rev. C*, 21, 2025-2032.
- Han, I., Demir, L., & Ağbaba, M. (2007). Measurements of L X-ray production cross sections, L subshell fluorescence yields and K to L shell vacancy transfer probabilities. *Radiat. Phys. Chem.* 76, 1551–1559.
- Holmes, C. P., and Kostroun, V. O. (1970). L subshell fluorescence yields and coster-kronig transition probabilities of Ho and Er. *Bull. Ame. Phys. Soc*, 15, p. 561.
- Jopson, R. C., Khan, J. M., Mark, H., Swift, C. D., & Williamson, M. A. (1964). Fluorescence yields of the  $L_{II}$  and  $L_{III}$  shells in heavy elements. *Phys. Rev.*, 133, A381-A384.

- Kaçal, M. R., Han, I., Akman, F., & Durak, R. (2012). Measurement of L subshell fluorescence yields for high-Z elements excited by 22.6 keV photons. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 113, 373–381.
- Meddouh, K., (2024). Étude des paramètres d'ionisation des éléments atomiques en couche interne : Rendements de fluorescence. Thèse de doctorat, université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj.
- Kaur, R., Kumar, A., Czyzycki, M., Migliori, A., Karydas, A. G., & Puri, S. (2017). Measurements of fluorescence and Coster-Kronig yields for  ${}_{66}\text{Dy}$  using synchrotron radiation induced selective photoionization method. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 407, 210–216.
- Kaya, A., & Ertugrul, M. (2003). Measurement of L X-ray production cross sections and  $L_i$  subshell fluorescence yields. *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 130, 111–118.
- Kaya, A., Ertugrul, M., Doğan, O., Söğüt, Ö., Turgut, Ü., & Şimşek, Ö. (2001). Measurement of L subshell X-ray fluorescence cross-sections at 59.54 keV and L subshell fluorescence yields for elements in the atomic range  $55 \leq Z \leq 81$ . *Anal. Chim. Acta.* 441, 317–323.
- McGeorge, J. C., & Fink, R. W. (1971).  $L_2$  and  $L_3$  subshell fluorescence and Coster-Kronig yields for  $Z=96$  from the decay of  ${}^{249}\text{Cf}$ . *Z. Phys.* 248, 208–219.
- McGeorge, J. C., Freund, H. U., & Fink, R. W. (1970). Decay of  ${}^{159}\text{Dy}$ : L-subshell X-ray fluorescence and Coster-Kronig yields at  $Z=65$ ; branching ratio, and K-conversion of the 58 keV transition in  ${}^{159}\text{Tb}$ . *Nucl. Phys. A*, 154, 526–538.
- Ménesguen, Y., & Lépy, M.-C. (2020). Experimental determination of L fluorescence yields of gadolinium. *X-ray Spectrom.* 49, 596–602.
- Mohan, S., Freund, H. U., Fink, R. W., & Rao, P. V. (1970b). Decays of  $\text{Tm}^{170}$  and  $\text{Tm}^{171}$ :  $L_2$  and  $L_3$  subshell-fluorescence yields, Coster-Kronig transition probabilities, and K-shell conversion coefficients in Yb. *Phys. Rev. C*, 1, 254-259.
- Öz, E., Özdemir, Y., Ekinci, N., Ertugrul, M., Şahin, Y., & Erdoğan, H. (2000). Measurement of atomic L shell fluorescence ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ) and Auger ( $a_1, a_2$  and  $a_3$ ) yields for some elements in the atomic number range  $59 \leq Z \leq 85$ . *Spectrochimica Acta Part B*, 55, 1869–1877.
- Raulo, A., Grassi, D., & Perillo, E. (2007).  $L_3$ -subshell x-ray emission rates for Dy and Ho. *J Phys. B-At Mol. Opt.Phys* 40, 2739-2746.
- Stotzel, R., Werner, U., Sarkar, M., & Jitschin, W. (1992). Fluorescence, Coster-Kronig and Auger yields of the  ${}_{62}\text{Sm}$  L subshells measured with the synchrotron photoionization method. *1. Phys. 8: At. Mal. Opt. Phys. ZS*, 2295-2307.
- Tan, M., Braga, R. A., Fink, R. W., & Rao, P. V. (1988).  $L_{2,3}$  subshell X-ray fluorescence yields and Coster-Kronig transition probabilities of Nd and Yb. *Phys Scr*, 37, 62-65.

Turhan, M. F., Durak, R., & Akman, F. (2014). Determination of L X-ray fluorescence parameters for Ho, Lu, W, Hg and Bi. *Appl. Radiat. Isot.* 89, 151–158.

Von Dincklage, R. D., & Hay, H. J. (1985). Atomic L-subshell yields from the electron

Zimmerli, T., & Flammersfeld, A. (1963). Eine neue Methode zur Bestimmung von L-Fluoreszenzausbeuten bei Dysprosium. *Z. Phys.* 176, 323–328.

## *Chapitre III*

*Calcul semi empirique des rendements  
de fluorescence de la sous-couche  $L_3$   
pour les éléments avec  $57 \leq Z \leq 71$*

### III.1. Introduction

L'essence de l'approximation semi-empirique réside dans l'exploitation des données expérimentales pour façonner une fonction universelle. Cette approche s'appuie sur des paramètres soigneusement sélectionnés, capables de s'adapter à un large éventail de données expérimentales et d'offrir une cohérence avec les prédictions théoriques.

Certains paramètres se focalisent spécifiquement sur l'ionisation des protons vers la couche K, tandis que d'autres s'étendent à l'ionisation des protons vers la sous-couche Li. En substance, l'approximation semi-empirique établit un pont entre les principes théoriques et les observations expérimentales, permettant une analyse rigoureuse des phénomènes physiques.

Dans ce chapitre nous avons montré les résultats de calcul semi empirique des rendements de fluorescence de la sous couche  $L_3$ , les résultats obtenus sont comparés avec des autres valeurs théoriques, expérimentales et semi-empiriques publiés par des autres auteurs.

### III.2. Méthodes de calcul et résultats

Dans cette étude, nous proposons un ensemble de nouveaux paramètres pour le calcul du rendement de fluorescence de la sous-couche  $L_3$  pour une gamme de cibles allant de  $^{57}\text{La}$  à  $^{71}\text{Lu}$

Ces paramètres ont été déterminés en utilisant des valeurs moyennes pondérées, comme détaillé dans le tableau II.1 du chapitre II. L'approximation d'ordre trois a été appliquée pour le calcul du rendement de fluorescence semi-empirique de la sous-couche  $L_3$ .

On a utilisé logiciel l'origine version 6.0 pour déterminer l'approximation polynomiale

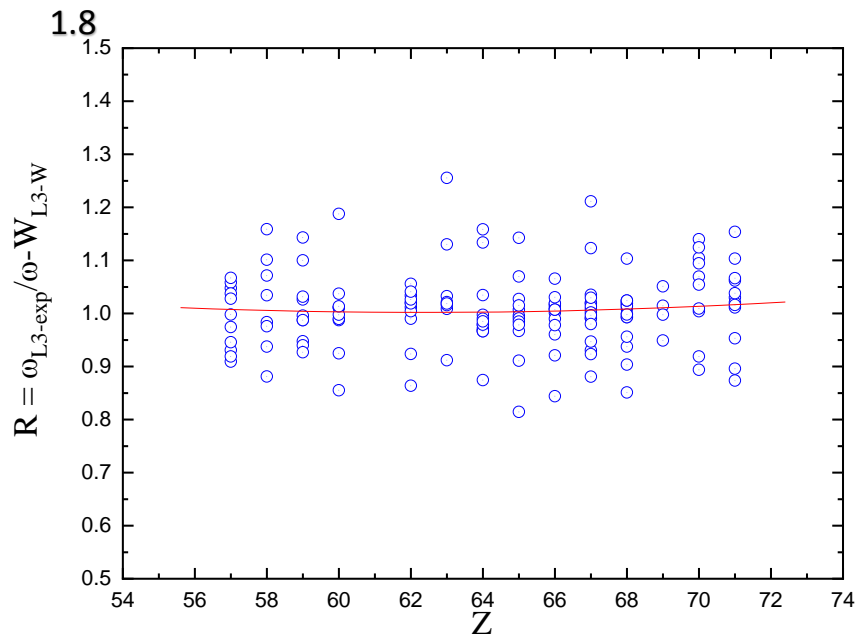
- D'abord pour le rapport  $R = \frac{\omega_{L_3-exp}}{\omega_{L_3-W}}$ :

Le rapport R est présenté comme fonction de Z. La fonction d'interpolation  $g(Z)$  est tracée dans la figure III.1 en fonction du nombre atomique Z.

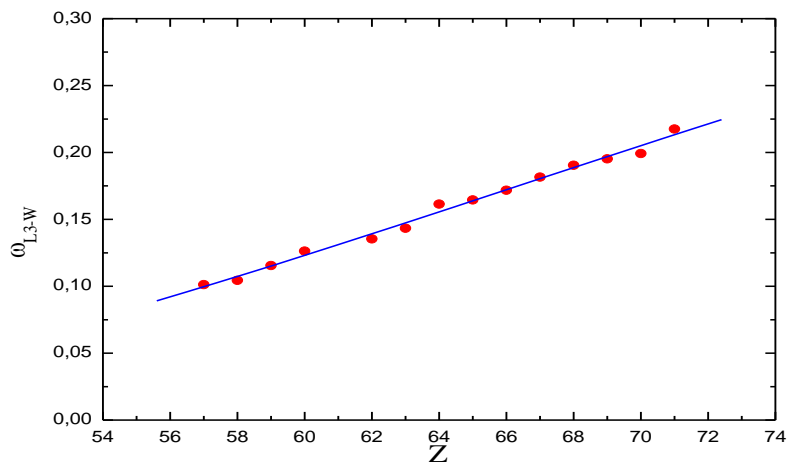
$$g(Z) = \sum_{i=0}^2 a_i Z^i \quad (\text{III.1})$$

- Ensuite pour la valeur moyenne pondérée  $\omega_{L_3-W}$  :

La valeur moyenne pondérée est présentée aussi comme fonction de Z. La fonction est tracée dans la figure III.2 en fonction du nombre atomique Z.



**Figure III. 1:** le rapport R en fonction de numéro atomique Z.



**Figure III. 2:** La distribution des rendements de fluorescence  $\frac{(\bar{\omega}_{L3})_{WR}}{(1-(\bar{\omega}_{L3})_{WR})^{\frac{1}{4}}}$  de la sous-couche  $L_3$  en fonction du numéro atomique Z, pour les éléments avec  $57 \leq Z \leq 71$ .

Où nous avons choisi la fonction analytique d'interpolation comme polynôme du troisième degré :

$$h(Z) = \sum_{i=0}^3 b_i Z^i \tag{III.2}$$

Finalement, nous concluons que les valeurs semi-empirique du le rapport de saut  $\omega_{L_3-s-emp}$  D'après l'équation suivante :

$$\omega_{L_3-s-emp} = g(Z) \times h(Z) \tag{III.3}$$

Le tableau suivant résume les coefficients de l'interpolation dès les deux formules  $g(Z)$  et  $h(Z)$ .

**Tableau. III.1 :** Les Coefficients de l'interpolation dès les deux formules  $g(Z)$  et  $h(Z)$ .

<i>i</i>	<i>g(Z)</i>	<i>h(Z)</i>
	<i>a<sub>i</sub></i>	<i>b<sub>i</sub></i>
0	1.7602961889094	0.3872875797117
1	-0.0243297653562	-0.0262254455601
2	0.0001951367152	0.000521073572
3	-	-0.0000026228935

**III.3. Comparaison :**

Le présent calcul de valeurs semi empirique des rendements de fluorescence pour tous les éléments dans la région  $57 \leq Z \leq 71$  sont présentés dans le tableau III.1. Les valeurs théoriques de (Krause et al. (1979)) et les valeurs empiriques de (Puri et al. (1993)) et (Campbell. (2003)) dans le même tableau.

Pour bien comparer nos résultats ceux avec théoriques et empiriques de las valeurs semi empirique des rendements de fluorescence, ces derniers sont représentés sur la figure III.3 en fonction du numéro atomique Z.

Avant tout, on remarque que les deux séries de données ont été combinées en un seul graphique. Pour ce faire, nous avons utilisé la relation de différence relative (RD) pour identifier l'auteur le plus pertinent :

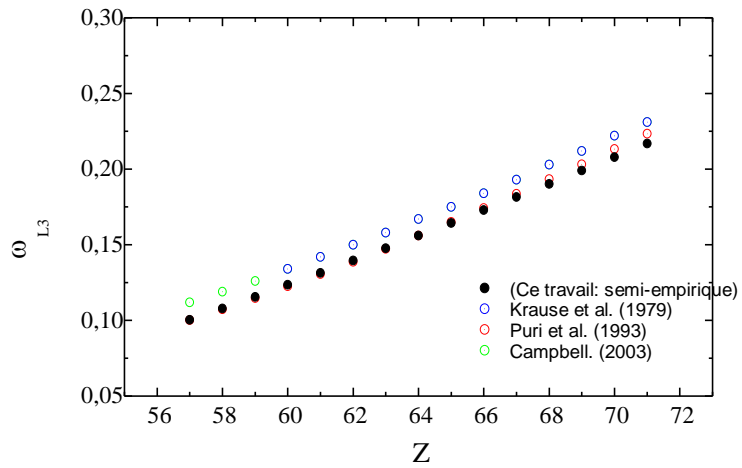
$$RD(\%) = \left| \left( \omega_{L_3 exp} - \omega_{L_3 s-emp} \right) / \omega_{L_3 s-emp} \right| \times 100 \tag{III.2}$$

Concernant les valeurs empiriques, il est facile d'observer que nos valeurs semi-empiriques sont bien conforme aux celles de(Campbell. (2003)) (L'écart varie entre (0%,3%)). De plus, nos données se diffèrent par un très acceptable pourcentage avec les valeurs empiriques de

(Puri et al. (1993)). (L'écart varie entre (6.42% ,8.5%)) et (Krause et al. (1979) (6.42%,11.55%) .

**Tableau III.2:** Semi-empirical (this work), theoretical, fitted, (other works) of average  $L_3$  Subshell fluorescence yields for all elements in the region  $57 \leq Z \leq 71$ .

Z	Ce travail	Autres travaux		
	s-emp	Krause et al. (1979)	Puri et al. (1993)	Campbell. (2003)
Z = 57, La	0.1004	0.1120	–	0.1001
Z = 58, Ce	0.1079	0.1190	–	0.1073
Z = 59, Pr	0.1156	0.1260	–	0.1147
Z = 60, Nd	0.1235	0.1340	0.1340	0.1225
Z = 61, Pm	0.1314	0.1420	0.1420	0.1305
Z = 62, Sm	0.1395	0.1500	0.1500	0.1387
Z = 63, Eu	0.1477	0.1580	0.1580	0.1472
Z = 64, Gd	0.1560	0.1670	0.1670	0.1560
Z = 65, Tb	0.1644	0.1750	0.1750	0.1650
Z = 66, Dy	0.1729	0.1840	0.1840	0.1742
Z = 67, Ho	0.1815	0.1930	0.1930	0.1837
Z = 68, Er	0.1902	0.2030	0.2030	0.1933
Z = 69, Tm	0.1990	0.2120	0.2120	0.2031
Z = 70, Yb	0.2079	0.2220	0.2220	0.2132
Z = 71, Lu	0.2168	0.2310	0.2310	0.2233



**Figure III.3 :** Nos valeurs semi empirique des rendements de fluorescence de la sous-couche  $L_3$  comparé aux autres valeurs d'autres auteurs (Krause et al. (1979), Puri et al. (1993) et Cambale et al. (2003) en fonction des éléments de nombre atomique  $57 \leq Z \leq 71$ .

*III.4. Références bibliographiques*

Campbell J.L. Measurement of the L1 subshell fluorescence and Coster–Kronig yields of bismuth. *J Phys B: At Mol Opt Phys.* 2003;36:3219–3231.

Krause M.O. Atomic radiative and radiationless yields for K and L shells. *J Phys Chem Ref Data* 1979;8:307–327.

Puri S., Mehta D., Chand B., Singh N., Trehan P.N. L shell fluorescence yields and Coster-Kronig transition probabilities for the elements with  $25 \leq Z \leq 96$ . *X-ray Spectrom* 1993;22:358–361.

### *Conclusion générale*

Dans le cadre de ce travail, nous avons constitué une nouvelle base de données regroupant les résultats des mesures expérimentales de fluorescence de la sous-couche  $L_3$  publiées entre 1963 et 2020, pour les éléments de numéro atomique ( $57 \leq Z \leq 71$ ). La base de données utilisée dans ce travail est basée sur les données expérimentales compilées et éditées au cours de la période 1963 à 2020. Elle regroupe toutes les valeurs expérimentales des rendements de fluorescence de la sous-couche  $L_3$  pour les éléments ( $57 \leq Z \leq 71$ ), classées par numéro atomique. Au total, 164 valeurs ont été recensées à partir d'articles et de sources disponibles dans la littérature scientifique.

L'analyse de ces données a permis de dégager les observations suivantes:

- La plupart des éléments dans la plage ( $57 \leq Z \leq 71$ ) sont couverts par la base de données. Cependant, l'élément de numéro atomique  $61\text{Pm}$  n'est pas encore inclus en raison de la difficulté à le manipuler et de sa rareté.
- Les cibles métalliques sont bien exploitées et comporte les plus grands nombres de données comme Holmium  $67\text{Ho}$  et Erbium  $68\text{Er}$ .

Des valeurs semi-empiriques nouvelles des rendements de fluorescence de la sous-couche  $L_3$  ont également été calculées pour les éléments de la base de données ( $57 \leq Z \leq 71$ ) en utilisant une formule analytique. Ces calculs ont été basés sur l'interpolation de toutes les valeurs expérimentales publiées dans la base de données, et les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs expérimentales et théoriques publiées par d'autres auteurs.

### *Abstract*

In this work, we present a new database gathering experimental values of the fluorescence yield  $\omega_{L_3}$  for the  $L_3$  subshell of elements with atomic numbers between  $57 \leq Z \leq 71$  and published between 1963 and 2020.

In addition, semi-empirical values of the fluorescence yield  $\omega_{L_3}$  were calculated using an analytical formula based on the experimental database.

The obtained values were compared with other theoretical and experimental values published in scientific journals, which showed a remarkable correspondence between the results.

### *Rrèsumé*

Dans ce travail, nous présentons une nouvelle base de données rassemblant des valeurs expérimentales du rendement de fluorescence  $\omega_{L_3}$  pour la sous-couche  $L_3$  des éléments ayant des numéros atomiques compris entre  $57 \leq Z \leq 71$  et publiés entre 1963 et 2020.

De plus, des valeurs semi-empiriques du rendement de fluorescence  $\omega_{L_3}$  ont été calculées à l'aide d'une formule analytique basée sur la base de données expérimentale.

Les valeurs obtenues ont été comparées à d'autres valeurs théoriques et expérimentales publiées dans des revues scientifiques, ce qui a montré une correspondance remarquable entre les résultats.

### *ملخص*

لقد قمنا في هذا العمل بتقديم قاعدة بيانات جديدة تجمع قيما تجريبية لمردود الفلورة  $\omega_{L_3}$  للطبقة الفرعية  $L_3$  وذلك العناصر ذات الاعداد الذرية  $71 \geq Z$  والتي تم نشرها ما بين 1963 الى 2020. بالإضافة الى ذلك تم حساب قيم شبه تجريبية لمردود الفلورة  $\omega_{L_3}$  باستخدام صيغة تحليلية تعتمد على قاعدة البيانات التجريبية. تمت مقارنة القيم المتحصل عليها مع قيم نظرية وتجريبية اخرى منشورة في مراجع علمية مما أظهر تطابقا ملفتا بين النتائج.